

SUPER SCIENCE HIGHSCHOOL SCIENCE LABORATORY

NARA WOMEN'S UNIVERSITY SECONDARY SCHOOL

2009年度 SSHサイエンス研究会 研究論文集



奈良女子大学附属中等教育学校

2009 年度 SSH サイエンス研究会 研究論文集

奈良女子大学附属中等教育学校

2010年3月1日

2009 年度 SSH 生徒研究論文集 目次

はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.1
奈良女子大学附属中等教育学校のカリキュラム・・・・・・・・・	p.2
第I部 研究論文	
物理班	
波形観測システムを用いた筋電位計測計の開発・・・・・・・・・	p.5
加速度センサの研究と応用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.13
ウェアラブル・コントローラーの開発・・・・・・・・・・・・・	p.17
触れずに動かすタッチパネルーグーパーマウスの開発ー・・・・・・	p.39
粒子衝突シミュレータの製作とその応用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.45
筋電位計測システムの開発とその応用 その2・・・・・・・・・	p.49
数学班	
四色問題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.63
ピタゴラス三角形とピタゴラス数・・・・・・・・・・・・・・・	p.69
生物班	
猿沢池のプランクトン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.95
食品の細菌量・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.99
ブレファリズマの膜形成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.101
納豆菌の水質浄化作用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.105
カツオブシ菌とその働き・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.109
ウニから考える生命の発生・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.113
ベンソンの実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.117
プラナリアの白色死について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.121
"草薙剣仮説"実証 ―シカのフンが作る生態系―・・・・・・・	p.125
細胞サイズの変化の過程・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.137
ブレファリズマのシスト形態・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.143
ブレファリズマの脱シスト化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.149
講義「ヒカリゴケの人工培養法」参加レポート・・・・・・・・・	p.153
化学班	_
タンパク質分解酵素のはたらき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.155
地学班	-
レーザーの波長の変化と温度の相関性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.161
高高度発光現象の観測にむけて・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.167
	•
第Ⅱ部 活動報告	
「NSL講座」参加報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.171
「韓国 ISSS」参加報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	p.191

はじめに

文部科学省からの指定を受け、平成 17 年度から 5 年間の計画で進めてまいりましたスーパーサイエンスハイスクール (SSH) の取り組みも、本年、最終年度を迎えました。

本校では、SSH の指定に伴って、理数に興味・関心のある生徒の課外活動として「サイエンス研究会」を創設し、数学・理科・科学技術に関する生徒の研究活動を、奈良女子大学をはじめとする国内外の研究諸機関と連携して支援してきました。

本研究論文集は、「サイエンス研究会」の生徒たちが、自ら研究テーマを設定し、数学的リテラシーと科学的リテラシーを駆使し、どのように課題を解決していったか、その研究活動の軌跡であり、「サイエンス研究会」の生徒たちの課外活動の報告書ともいうべきものであります。今年度も、生徒たちは各種の学会・科学コンテストですばらしい成果をあげました。JSECのグランドアワード、日本学生科学賞の文部科学大臣賞をはじめ、1年間で6つの賞を受賞しました。「サイエンス研究会」の生徒たちが、研究活動を通じて学ぶことの喜びを感じ、学ぶことは非常に楽しいことなのだということを自覚することができ、自らチャレンジしていく様子を見ると、感動を覚えます。そして、自分たちが確実に伸びていっている、今日は昨日より進歩していると生徒たちが実感して頑張っている姿に、私たちはこの上ない喜びを感じます。

「サイエンス研究会」における仮説・実験・検証という自然科学の研究プロセスの重要性は、単に自然科学の研究にとどまりません。実験室のなかだけではなく、社会においても種々の場面で必要とされる能力だと思います。科学的論理的思考や科学的態度は、将来どのような分野に進んでもその生徒にとって力となるものだと考えています。この研究活動が、しっかりと根を張り、枝を伸ばし、大木に育ってほしいと願っています。

本論文集が、生徒たちの知的探究心・知的向上心をインスパイアーし、「サイエンス研究会」の活動のさらなる発展に寄与することを祈念いたします。

最後になりましたが、SSH運営指導委員の先生方、大学・研究機関の先生方、ご 支援を賜りました皆様に、心より感謝申し上げますとともに、今後ともなお一層のご 指導、ご支援いただきますようお願い申し上げます。

> 奈良女子大学附属中等教育学校 校長 塚 本 幾 代 (生活環境学部教授)

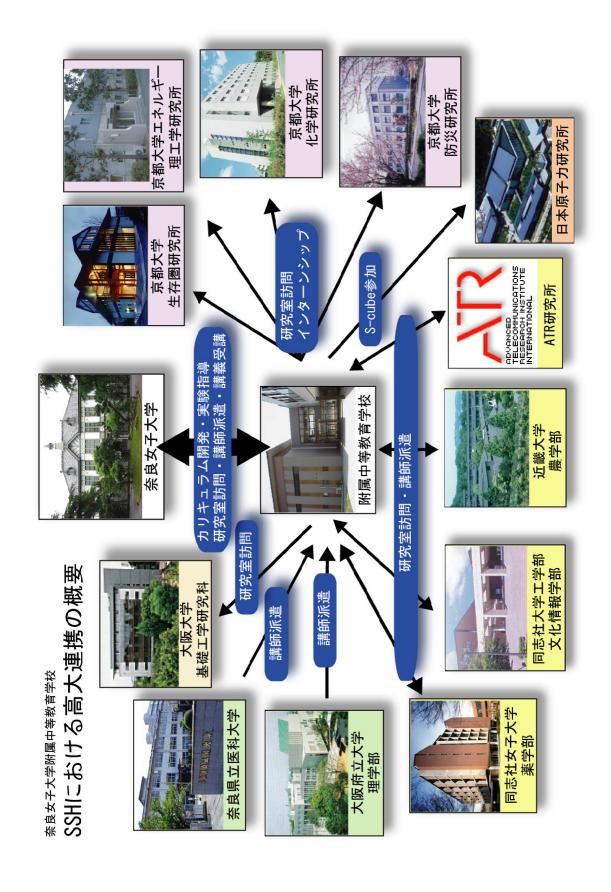
2009年度教育課程表

奈良女子大学附属中等教育学校

学年	1年	2年	3年	4年	E	 年	64	E		
時間	共通	共通	 共通	共通	文系	理系	文系	<u>+</u> 理系		
	六地	六地	六世	六地	入示	华 尔	人示	在 示		
2	国語基礎(4)	国語基礎(3)	国語総合(3)		現代	文(2)	現代文(2)			
3				国語総合(5)	古典	典(2)	古典(2)			
4		情報と表現(1)	表現(1)							
5			現代社会(2)		古典詞	講読(1) ┲	日本史B(3)	日本史B(3) 世界史B(3)		
6	社会•地理(3)	社会•歴史(3)		現代社会(2)	化学 I (3)	# W = 4.3	世界史B(3) 地理B(3)	地理B(3) 政治·経済(3)		
7			現代史(2)	201112211	生物 I (3) 地学 I (3)	化学 I (3) *(3)	*(3)	*(3)		
8			361 VX(2)	現代史(2)	*(3)		世界史B(3)			
9	基礎数学 I (4) •代数	基礎数学Ⅱ(4) •代数		死(又(2)	日本史B(3)	日本史B(3)	世介史B(3) 政治·経済(3) △(0)or(3)	化学Ⅱ(4)		
10	· 幾何	· 幾何	解析 I (3)		世界史B(3) 地理B(3)	世界史B(3) 地理B(3)	Δ(0)0f(3)	\triangle (0)or(4)		
11				代数•幾何Ⅱ(3)	*(3)	*(3)	化学 I (3)			
12	探究数学(1)	探究数学(1)	16.40				生物 I (3) 地学 I (3)			
13			代数·幾何 I(2)		世界史B(3) 文化と社会(3)	生物 I (3) 物理 I (3)	$\triangle(0)$ or(3)	物理Ⅱ(4)		
14	基礎理科 I(3)			解析Ⅱ(2)	$\Delta(0)$ or(3)	*(3)	基礎理科(2)	生物 Ⅱ (4) △(0)or(4)		
15		基礎理科Ⅱ(4)	自然探究 I				発展現代文(2) 選択漢文(2)			
16			・地球環境 (4)	自然探究 II ・物質とエネルギー ・生命科学 (4)	解析Ⅲ(3) 総合数学 I (3) *(3) 代数·幾何Ⅲ(3) 音楽Ⅱ(2)	解析皿(3)	△(0)or(2) 古典講読(1)	代数·幾何IV/ 特論(3)		
17	音楽(2)					*(3)	日本史特講(2) 世界史特講(2) 地理特講(2)			
		音楽(2)	音楽(2)					$\Delta(0)$ or(3)		
18	美術(2)		美術(2) 生活デザイン(2)	音楽 I (2)		【 代数·幾何Ⅲ(3)	△(0)or(2)			
19		美術(2)	*(2)	美術 I (2) 生活デザイン I (2) 科学と技術(2)	美術 II (2) 生活デザイン II (2) ム(0)or(2)or(3)	*(3)	倫理(3) 音楽Ⅲ(2) 美術Ⅲ(2)	解析Ⅳ/		
20	工創基礎1		技術総合 家庭総合 (2)	*(2)	2(0)01(2)01(0)		生活デザインⅢ(2) 数学特論ⅢⅣ(2)			
21	生活基礎1 (3)	生活基礎1工創基礎2(3)生活基礎2		家庭総合(2)		ling(2))or(2)	△(0)or(2)	特論(5) △(0)or(5)		
22		(2)			Δ(0,)OI (2)	Reading(2) $\triangle(0)$ or(2)			
23		体育(2)	体育(3)	体育(2)	情報B(2)		Δ(0)or(2)			
24	体育(3)	., ,,,,								
25		保健(1)	保健(1)	保健(1) 保健(1)			体育(3)			
26			IE(2)		体育(3)					
27	IE(3)	IE(3)	IE(Z)	IE(Reading)(3)						
28			IE(1)		£ ,	:4 24 (0)	Topic Stu	dies II(3)		
29	BE(1)	BE(1)	BE(1)	IE(Writing)(1)	生活科学(2)					
30	NET(1)	NET(1)	NET(1)	NET(Speaking)(1)			Writing(2)	Writing(2)		
31	道徳(1)	道徳(1)			Topic Studies I(3) Writing(0.5) NET(0.5) *(1)		$\Delta(0)$ or(2)	生物 I (2) △(0)or(2)		
32	HR(1)	HR(1)	環境学(2)	世界学(2)			粉学性詮ⅠⅡ/○	数理科学(2)		
33			 道徳(0.5)	HR(1)			数学特論 I II(2) △(0)or(2)	倫理(2) 数学特論 I II(2) △(0)or(2)		
34			HR(1)	道徳(0.5)	HF	R(1)	HR(1)			
			補講	AG(1)	AG(1)		補講・AG(1)			
短期集中	総合学習探究(1)	総合学習探究(1)		NSL講座(1)		·研究(0.5)	※テーマ研究(0.5)			
			NSL講座(1) △(0)or(1)	△(0)or(1) SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	△(0)or(1) SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)		△(0)or(1) SSHテーマ研究(1)			
*選択必修	 ・標記の科目から必	が1科目を選択する	▲ △(0)or(1)位数になるよう標記の科目から選択する							

奈良女子大学附属中等教育学校 6年一貫SSHカリキュラム

6年		英語科「Topic Studies」				「課題研究」	「数理科学」	「テーマ研究」			を利用した数学教育	一	理数講義プログラム」	インターンシップ	本学の講義受講	・希望して選ばれた生徒が対象
5年	「情報B」	英語科				理科		Ė	l		- ビ会議システムを	 	「理数講	125	本	
4年	「田界学」	英語科「Integrated English」	l		ラフ電卓を活用した関数学習	研究入門」	「一一」	ガイダンス」		/ 【基礎講座」 -	AHS・梨花女子大学附属高校とのテレビ会議システムを利用した数学教育	大学・研究所を訪				「サイエンス研究会」
3年	「環境学」	英語科「Integr	国語科「表現」	用した幾何学習	グラフ電卓を活	理科「課題研究入門」	「環境学」	「アカデミックガイダンス」	「NSL講座」	 「サイエンス基礎講座」 	AHS·梨花女子力					
2年	数学」	0人授業	国語科「情報と表現」	作図ツールを活用した幾何学習		観察技術の完全習得	『探求』					イエンス夏の学校」				生徒全員が対象
1年	「探究数学」	英語科20人授業	創作科「情報基礎」	具体的操作活動	による幾何学習	実験・観察技	総合字習					「サイエンス				
カテゴリー		基礎・基本		数学的	リテラシー	科学的リテラシー		問題解決能力		基礎・基本	数学的 リテラシー	科学的 リテラシー		問題解決能力		
十	应 **									課外						



第 I 部

研 究 論 文

波形観測システムを用いた筋電位計測計の開発

3年B組 武田 優生 指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

コンピューターやセンサーの発達により、より高速な処理が行われるようになったため、その信号をLEDなどにより視覚的に捉えることが難しくなった。そこで、高速な信号をマイコンを用いて観測し、その機能を応用させることで、筋電位計測計を開発した。

キーワード A/D変換、オシロスコープ、データロガー、筋電位

2. 研究背景と目的

さまざまな電子機器が高度化している 今、センサーなどの値を目でみたり、音 で聞いたりすることができなくなってき ている。そこで今回、dsPICマイクロコ ンピューター(以下、マイコン)を用いて 波形観測システムを構築し、センサーな どから出力されるデータを可視化するこ とにした。



図 1 今回使用した Microchip 社製 dsPIC30F3012 最高処理速度 120MHz

具体的には、センサーから出力された

アナログデータを A/D 変換でデジタルに変換し、マイコンに取り込む。そこから RS-232C シリアル通信を用いて PCにデータを送信し、VisualBasic2008(以下 VB)で自作アプリケーションを作成し、波形を観測した。

この自作アプリケーションには、DFT機能を自分でプログラミングし入力データのスペクトルを表示することができるようにした。このDFT機能によって筋電位を観測することができた。また、データロガー機能もつけたので長期間データをとり続けることもできる。

また、筋電位計測計の作成において、 物理班西田による「筋電位計測システム の作成とその応用」(2008 年度 SSH サ イエンス研究会研究論文集 p.23~35)を 参考にして、私は独自に筋電位計測計を 作成した。

3. 研究内容

〈目標〉

センサーからどのようなデータが出ているのかを可視化する。さらに、筋電位を用いてアプリケーションを操作する。

(1)研究事項

〈研究1〉 シリアル通信をマイコンに実装し、データが確実に送信されるかどうかを確認する。

〈研究 2〉 A/D 変換機能を用いてセンサーなどの値を数値としてみる。

<研究 3> VB でアプリケーションを作成し、送られてきたデータでグラフを作り、どう変化するかを確認する。

〈研究4〉 この波形観測システムを用いて表面筋電位計測計を作成する。

(2)研究方法

〈研究 1〉 dsPIC マイコンから出力される 0-5V の信号ではシリアル通信で通信できないので、PC と通信するために、 $\pm 13V$ の電圧に変換する IC を用いて PC と接続した。そのときの様子が図 2 である。



図2 シリアル通信のテスト

このとき、通信速度は 115.2kbps まで

上げることが可能であった。また、これ 以上の通信速度(230.4kbps)を超えるあ たりではエラーが目立った。

〈研究 2〉 センサーから出力されたアナログデータを dsPIC マイコンの A/D 変換機能を使用し、デジタルデータに変換して PC に送信する。図 3 のようにアナログデータを 10 進数に変換して PC に送れていることが確認できた。

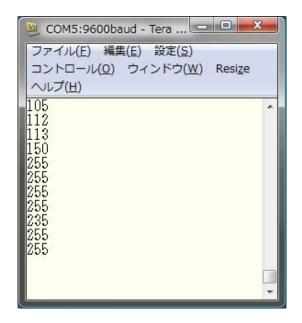


図 3 シリアル通信でアナログ変換されたデータを受信できた。0から 255 の範囲が 0Vから 5V に対応している

〈研究 3〉 PC 側アプリケーションには、 Microsoft Visual Basic 2008 Express Edition を用いて作成した。このアプリケーションには、オシロスコープ機能、スペクトル解析、データロガー機能、スクリーンショット撮影機能などをプログラミングした。

■オシロスコープ機能

1kHzのパルスを入力した様子。図4

が自作ハードウェア+自作アプリケーションで表示した画面、図 5 が Agilent Technologies InfiniVision DSO5014A で表示させた画面である。

このように、自作ハードウェア+自作アプリケーションでも低周波では、オシロスコープ並みの性能もたせることができる。だが、100kHz を超える高周波になると、A/D 変換の速度が追いつかないため、図 6 のように波形がいびつになってしまう。

今回の目標である筋電位の取得の場合、 筋電位の周波数は数 Hz からせいぜい数 kHz なので、この速度で問題ないことが わかった。

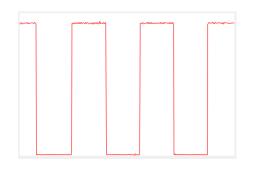


図4 自作ハードウェア+アプリケーションで 1Hz パルスを入力した様子

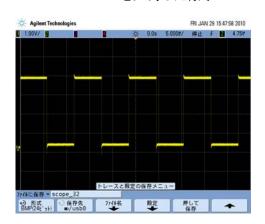


図 5 Agilent Technologies
InfiniVision DSO5014A で表示させた画面

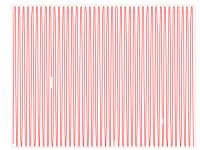


図 6 $100 \mathrm{kHz}$ の Sin 波を 自作ハードウェア+アプリケーションに 入力した様子

■データロガー機能

5V1F の電気二重層コンデンサを満充電し、青色 3ϕ の LED(30mA)で放電させたとき、そのデータを 1 秒ごとに取得し、その後グラフにすることができた。

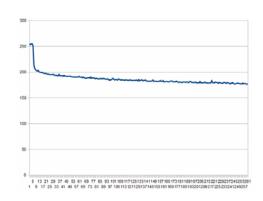


図 7 電気二重層コンデンサを LED で 放電させたときのグラフ

充電後5秒後に LED に接続したため、 このグラフ図7から、5秒あたりで1V 程度の大幅な電圧降下が発生しているこ とがわかる。

■Google フライトのコントロール Google Earth のフライトシュミュレ ータはもともとマウスやキーボードで操 作するものだが、この方法だと操作し辛 い。そこで、SHARP 製 距離センサー GP2D12 を用いて手を移動させるだけでフライトシュミュレータを操作することができた。このセンサーは 10cm~90cm ぐらいの距離なら、かなり高精度に測ることができる。そこでこれをセンサー部が横になるように設置すると、機体の向きの制御、センサー部を上になるように設置すると、機体の高度を制御することができる。



図8 SHARP 製 距離センサー GP2D12

現在はまだ多チャンネルシリアル通信 に成功していないため、機体の向きを制 御するか、高度の上下を選択するかのど ちらかしかできない。

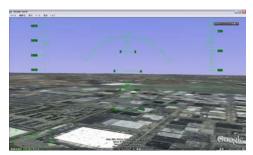


図 9 Google フライトシュミュレータ を制御している様子

■筋電位計測計の開発

〈ハードウェア〉

(1)電極の作成

筋電位を取得するために必要な電極を 開発した。銀のパッドが一番いいが、入 手が困難である。そのため、まずは生基 板とよばれる銅の板を薄くはった基板 40mm×30mm に切り出してみた。しか し翌日にはさびて使い物にならなくなっ てしまった。

そこで次に、生基板を切り出した後、 ヤスリで表面を磨き、半田こてで表面を SnPb からなる半田でコーティングした。 だが、生基板が熱に弱いため、途中で曲 がってしまうか、銅板が熱にやられて穴 が開いてしまった。

その後試行錯誤した結果、サンハヤト社が製造している、磁気ガード用銅箔テープ T-30C (図 10) に半田メッキし、裏の粘着テープでマジックテープに直接固定した。最終的には、銅箔テープの半田メッキを、1%銀入り半田を用いることにより、皮膚表面との表面電位差を小さくすることができた。



図 10 サンハヤトの銅箔テープ T-30C

(2)増幅回路の作成

今回私は、作動増幅という回路を利用 した。この作動増幅は、2極間の差をと って増幅するので、外から入るノイズに 強い。蛍光灯や家庭のコンセントは 60Hzのノイズを発生してしまうが、そ のノイズをある程度は、打ち消すことができた。

また、今回は簡易的に筋電位を取得することを目標としているため、LM324Nという4回路入り汎用オペアンプを使用した。図 11 は作動増幅の回路図である。

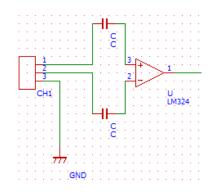


図 11 作動増幅回路の回路図

このようにオペアンプを使用して簡単な作動増幅回路を組んだ。増幅率は10万倍に設定してある。



図 12 今回作成した筋電位計測計 図 13 の本体の上に接続して PC と通信することができる

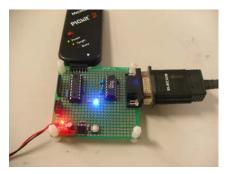


図 13 波形観測システム本体

〈ソフトウェア〉

ソフトウェアは波形観測システムに離散フーリエ変換機能をプログラミングし、スペクトルを求めることで、筋電位を見ることができた。

また、筋電位を用いたインターフェイスを作成できるよう、閾値でアプリケーションをコントロールできる機能を組み込こんでいるが、誤反応が多く改善の余地がある。

<フーリエ変換>

フーリエ変換には、簡単だが動作速度 が遅い離散フーリエ変換(DFT)を用いて スペクトルを表示している(図 14)。

この離散フーリエ変換は、複雑な波形でも単純な Sin 波を掛け合わしたものがその波形のスペクトルになるというものである。

今回は VisulaBasic2008 でプログラム を組んでいるのでそのソースコードの一 部を紹介する。

Private Sub

DiscreteFourierTransform(ByVal input() As Integer, ByRef output() As Double)

For i = 1 To 200

For j = 0 To 399

output(i) += input(j) *

Math.Sin($j / (n / i) * 2 * \pi$)

Next

Next

End Sub

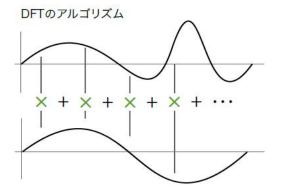


図 14 離散フーリエ変換のアルゴリズム



図 15 今回作成した 筋電位計測用ソフトウェア

<実際に出力される筋電位>

図 16 のように接続し、通常時と腕に力を入れたときに分けて測定した。

図 17 の上のグラフが実際の筋電位で、下のグラフが DFT に通した結果であり、DFT 処理したグラフの大きさが全体的に大きくなっている。それに対して、図 18 の方が下の DFT 処理した筋電位の大きさが全体的に小さくなっているので、 通常時と異なった周波数の筋電位が出ていると思われる。

しかし、家庭用電源などからでてしま う 60Hz のノイズをピンポイントで除く フィルタ回路を搭載していないため、 60Hz のノイズが混入し、DFT 処理後に もきれいに筋電位を観測することができなかった。さらに今回は、鉛フリー半田を用いて皮膚との表面電位差を小さくはしているが、AC結合で接続していないため、皮膚との接触状態が悪いと正確なデータがとれずグラフが大きくずれてしまうこともあった。

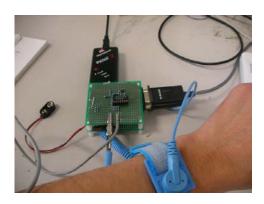


図 16 実際に動作させている様子

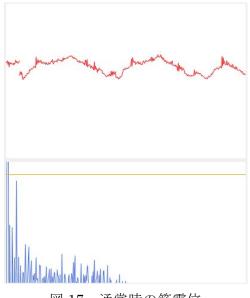


図 17 通常時の筋電位

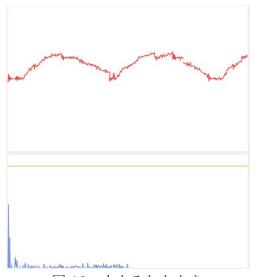


図 18 力を入れたとき

4. 今後の課題

多チャンネルの A/D 変換はすることができるが、シリアル通信で多チャンネル A/D 変換のデータを送信することができないので今後改善する必要がある。

また、今回フーリエ変換には、離散フーリエ変換(DFT)を用いた。だが、離散フーリエ変換はデータ数をNとすると、 N^2 ほど計算を繰り返す必要がある。そこで、高速フーリエ変換(FFT)を用いると、 $N\log N$ ほどの回数ですむ。

さらに、追実験をしていくとともに、 現在開発中の筋電位観測用ハードウェア を用いて一つの電極で複数の動きを認識 できるようにする。

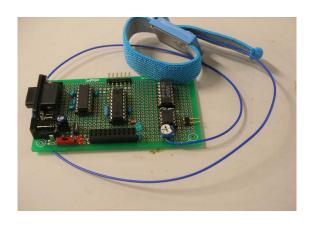


図 19 現在開発を進めている 筋電位計測専用ハードウェア

5. 参考文献

[1]「電子制御、信号処理のための dsPIC 活用ガイドブック」,後関哲 也著,技術評論社

[2]Microsoft 社, Visual Basic デベロッパーセンター

http://msdn.microsoft.com/jajp/vbasic/default.aspx

[3]Microchip 社, dsPIC30F3012 データ シート

http://www.microchip.com/www products/Devices.aspx?dDocNa me=en010342

[4]EXAR 社, SP3232ECP データシート

http://www.exar.com/ [5]SHARP 社, GP2D12 http://www.mech.tohokugakuin.ac.jp/rde/contents/tech/h 8train/gp2d12_.pdf

[6]ナショナルセミコンダクター社,

TA7805F

http://www.semicon.toshiba.co.j p/openb2b/websearch/productDe tails.jsp?partKey=TA7805F [7]秋月電子通商,dsPIC30F3012 http://akizukidenshi.com/catalo g/g/gI-01945/

6. 謝辞

今回の研究にあたり技術指導してくだ さった顧問の米田先生、アドバイスをく ださったサイエンス研究会物理班の先輩 方にこの場を借りて深くお礼申し上げま す。

加速度センサの研究と応用

3年C組 山田 悠太 指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

私は、X,Y,Z 軸の加速度を検知できる加速度センサのアナログ出力を、PIC を用いてデジタルに変換することに成功した。また、PIC を用いてサーボモーターを制御することに成功した。また、その結果をふまえて、加速度センサで動作するロボットを作成したが、うまく動作させることはできなかった。

キーワード 加速度センサ、PIC、サーボモーター、A/D変換

2. 研究動機

最近、ロボットが私たちの身近な場面に登場するようになってきた。しかし、それらのロボットは高価で、複雑な動きをさせるときに、操作をしにくいという問題点がある。そこで、私は操作が簡単なロボットを作ろうと考え、人間の腕の動きをアナログ出力の加速度センサを用いて測定して、ロボットの動きとリンクをさせると、操作が非常に簡単なロボットを作成することができると考え、実際に製作を試みた。

3. 研究内容

(1)仮説

加速度センサの出力どおりに PIC から出力して、サーボモーターを動かすことで、簡単に操作可能なロボットを作成することができる。

(2)研究課題

まず、このロボットを完成させるにあた り必要な条件がある。

研究① 加速度センサのアナログ出力を PIC でデジタルに変換する必要がある。

研究② その結果を元にサーボモーターに 出力する必要がある。

(3)構成内容

私が今回作成しているロボットは主に3 つの部品から構成されている。

①PIC

- ②加速度センサ
- ③サーボモーター

PIC とは、数あるマイクロコンピューターのひとつで、書き込んだプログラムに従がって動作するもので、加速度センサの信号を入力したり、サーボモーターに信号を出力するもので、C 言語プログラミングが可能などのメリットがある。



図1 PIC

加速度センサとは、X,Y,Z 軸の加速度に応じて出力するもので、電源が 5V のとき、オフセット(0g 時の出力電圧)が、2.5V で、1000mV/g ごとに変化するセンサである。今回、使用した加速度センサは、非常に小型なので、腕などにつけるときにも気にならないサイズである。



図2 加速度センサ

ロボットを動かすために必要な、関節や 筋肉の役割を果たすのが、このサーボモー ターである。一般的なモーターとは異なり、 パルス信号を送り、角度を指定するとその 角度を保つことが可能なものである。



図3 サーボモーター

(4)研究概要

研究①

研究①で作成したものは加速度センサの アナログ信号を PIC で A/D 変換するもので ある。また、今回は A/D 変換の成功を確認 するため、LED に出力した。



図4 研究①の概要

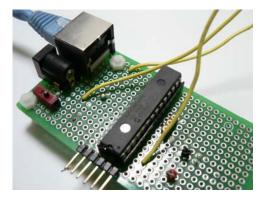


図5 今回作成したメイン基板

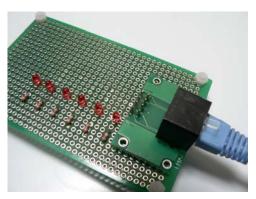


図6 成功確認用 LED 基板

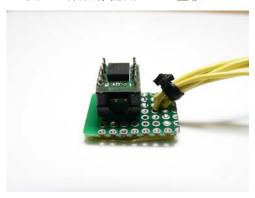


図7 加速度センサ基板

研究②

研究②で作成したものは、PIC で、パルス信号を出力して、サーボモーターの角度

を指定するものである。

PIC ^{パルス}サーボモーター

図8 研究②の概要



図9 サーボモーター制御基板

4. 結果

研究(1)

加速度センサを振り、PIC に加速度センサの信号が送られると、PIC の出力が変化して、LED に変化が見られた。

研究②

プログラムで、パルス信号の周期を変え、 サーボモーターの角度を指定すると、指定 したとおりにサーボモーターの角度も変化 した。

5. 問題点

研究①と研究②に成功したにもかかわらず、ロボットが完成しなかった理由のひとつに、使用したセンサが加速度センサであったことが考えられる。なぜなら、加速度センサは、加速度をアナログ信号として出

力するので、それを積分する必要があるからである。また、研究①では X 軸のみ A/D 変換しているので、残りの Y, Z 軸も A/D 変換する必要があることも考えられる。

実験②では、制御したサーボモーターの 個数が1つだけで、実際にロボットを作っ た場合は片手に最低3つは必要なので、さ らにたくさんのサーボモーターを制御する 必要がある。

6. 今後の課題

加速度センサは、片手につけるだけで3 軸、両手につけると6軸と、多いので処理 に時間がかかる。さらに PIC で積分をする と、処理結果が正確かどうかわからないの で、今後はシリアル通信でパソコンと通信 をしながら、パソコンに積分をしてもらい、 そのデータをもとにサーボモーターに出力 をしよう(図 10)と考えている。

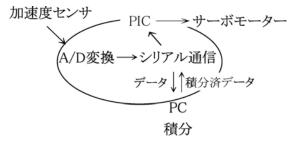


図10 今後の展望

そこで、シリアル通信をする必要があるので、今回の研究において、テスト基盤を作成した(図 11)。今後もシリアル通信について研究を進めて行きたい。



図11 シリアル通信テスト基板

また、将来的には、図 12 のように PIC 内部で積分を行い、パソコンを使わないでロボットを制御していきたいと思う。



図12 将来の構想

7. 参考文献

- [1]「改訂版電子工作のための PIC18F 活用 ガイドブック」,後閑 哲也 著
- [2]「やさしい PIC マイコンプログラミング &電子工作」, 高橋 隆雄 著

8. 謝辞

この研究にあたり、さまざまな指導やアドバイスをサイエンス研究会物理班の顧問である米田隆恒先生やサイエンス研究会物理班の先輩方にいただきました。ありがとうございました。

ウェアラブル・コントローラーの開発

3年B組 羽鹿 諒 指導教諭 米田 隆恒

1. 研究の概要

私は現在「ハードウェア母音認識」の研究を行っている。この研究における目標は、オリジナル・ハードウェアのみで母音認識を行うことである。また、この研究に付随させる機能の一つとして、「文字認識機能」を考えている。これは、ハードウェアコントローラーで空中に文字を書くと、書いた文字が認識され、コンピュータ等の入力装置として使用できるものである。

今回の研究では、このハードウェアコントローラーに焦点を当て、「ウェアラブル・コントローラーの開発」を行い、これに成功した。

キーワード マイコン、加速度センサ、DC/DC コンバーター、フォトインタラプタ、 リチウムイオンバッテリー、フルカラーLED、パターン認識

2. 製作したオリジナル・ウェアラブル・ コントローラーの概要

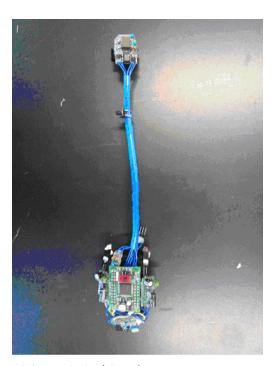


図1 オリジナルな ウェアラブル・コントローラー

今回、製作したハードウェアの仕様は次 のようになっている。

- MPU:H8-3664F(ルネサス・テクノロジ 社製、動作周波数 16MHz)
- ・ 電源用電池:リチウムイオン充電池2個(3.7V/830mAh)
- 昇圧回路用 DC/DC コンバーターモジュール: HT7750A×2(3.7V→5.0V 昇圧用)
- 加速度センサ:ADXL202(米アナログ・ デバイセズ社製、2軸加速度用)
- 本体サイズ:40(横)×30(縦)×30(高 さ)(単位:mm)

今回のコントローラーで行うことができ る機能は次のようになっている。

- ・ 加速度センサを用いた直感的な操作
- パソコンとの通信(RS-232C)なお、現段階ではリモートコントローラーの機能となる要素は含んでいない。

3. 研究の背景と目的

私が現在行っている研究は概要にも記したように、自分で0から作ったオリジナルのハードウェアだけを用いて人間の母音を認識し、今までにない「話して使うコントローラー」を開発するというものである。

これまでの様々な研究において、マウス やジョイスティックなど、ポインティング デバイス(図 2)に関するものは数多く行わ れてきた。しかし、キーボードなどの入力 装置(図 3)に関するものはそう行われてい ない。



図2 パソコン用マウス



図3 パソコン用キーボード

また、米アップル社の「iPhone 3G/3GS」 (図4)の「マルチタッチ機能」(図5)に代表 されるように、直感的な操作が可能なポイ ンティングデバイスの企業による製品化や 特許の取得は既にかなり行われている。一 方、入力装置において、直感的な操作が可 能なものは例があまりない。

なお、アップル社のマルチタッチ機能とは、手の指を開いたり、閉じたり、スライドさせたりすることで直感的な操作を行える機能のことである。



図4 アップル社「iPhone 3G/3GS」



図5「マルチタッチ・テクノロジー」

そこで、私は母音認識と「ウェアラブル」なコントローラー、つまり常に身につけておけるコントローラーを開発し、これらを組み合わせることを考えた。こうすることで、どんな人でも複雑な操作をすることなく「機械に話しかける」ことで、従来のコントローラーよりも更に直感的な操作が可能となるのではないかと考えている。

ここで問題となるのは、「母音認識」という名前から分かるとおり、子音の認識が不可能であるということである。「あ・い・う・え・お」の5音だけを認識しても、子音が

認識できない限りは用途がかなり限られて しまう。また、パソコンの入力装置、キー ボードとして使うときも記号などが入力で きないという欠点が発生してしまう。

さらに、ハードウェアのみで認識を行うため、音声だけを取得した場合、誤作動が多くなる可能性がある。これでは、実用性のある技術にはなり得ない。

そこで、コントローラーに加速度センサ (図 6)を搭載することで、これらの問題を解決することを考えた。つまり、どの場合においても読み上げて母音認識をさせながら空中に文字を書くことで子音の問題や記号の問題、誤作動の問題を減らせる。つまり、母音認識の機能に文字認識機能をプラスさせることで、問題を解決するということである。



図 6 加速度センサ「ADXL202」 (黒色の IC)

よって、今回はこの「ウェアラブル・コントローラー」を開発、プロトタイプを試作して実験することで、実際に使えるコントローラーであるかを検証することにした。さらに、ここではパソコンに接続するのではなく、プロトタイプゆえハードウェアのみで動作させることにした。

また、文字認識の前段階のテストとして、 数種類の図形を空中に描き、ハードウェア のみで認識させることも行った。

今回は、ウェアラブル・コントローラー についての研究結果を記し、母音認識につ いては現在も研究中であるため、ここでは 記していない。

4. 研究内容

(1) 研究事項

研究1 電源部およびセンサ部の小型回路を製作し、マイコン回路と接続する。さらに、実際に電源となるリチウムイオン電池を接続、動作を実験する。

研究2 wii リモコンを Bluetooth 通信機能を用いてパソコンとリンクさせ、いくつかの動作パターンにおいて内蔵3軸加速度センサから出力される信号波形を確認する。この中から、大きな変化が現れる波形を出力させた動きを選ぶ。そして、コントローラーで実際に使用する2軸加速度センサから出力される信号波形を確認する。

研究3 センサテストプログラム、LED インジケーターテストプログラムを製作、 動作実験を行う。その結果を踏まえ、図形 認識プログラムのテストバージョンを製作 し、動作実験を行う。

研究4 研究1~研究3までの研究のステップおよび構造などを見直し、さらにスマートなシステムを作る。

(2) 研究仮説

研究1 小型ハードウェアは完成し、動

作する。

研究2 それぞれの動作パターンにおいて、異なった波形が確認できる。また、かなり正確な信号が出力されると考えられる。また、2軸加速度センサにおいてもそれぞれの動作パターンで異なった波形が確認できる。

研究3・研究4 いずれも動作する。

(3) 研究方法

研究1

ここでの小型回路では、以下の条件および目標を決めて製作した。

- 面積はH8マイコンボード(横:約40mm, 縦:約30mm)のサイズにする
- ・ 電源はリチウムイオン充電池を使用する
- マイコンボードの安定した動作を行う ため、昇圧型 DC/DC コンバーターを使 用する
- ・ センサとして加速度センサおよび近接 センサを、インジケーターとして青色 LED(電源確認用)およびフルカラー LED(認識図形確認用)を搭載する

私は、今までの研究において H8 マイコンを用いてきた。今回は、秋月電子通商から販売されている「H8-3664Fマイコンボード」(図7)をそのまま用いることにした。今回は、小型化をはかるため、従来のユニバーサル基板(図8)ではなく、「ハーフミリピッチ基板」(図9)と呼ばれるものを使用した。



図7 H8-3664Fマイコンボード

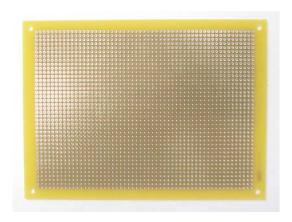


図8 ユニバーサル基板

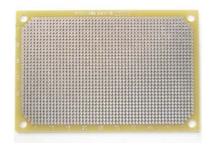


図9 ハーフミリピッチ基板

従来のユニバーサル基板に比べて穴と穴の間隔が 1.27mm と狭いため、小型化するには最適であると考えられたためである。

電源として用いたリチウムイオン充電池は、現在販売されているものであり、3.7V/350mAhという容量である。よって、サイズが小さく、軽量であり、かつ繰り返し使えるという利点がある。



図 10 リチウムイオン充電池

今回の回路では、上記の通りリチウムイオン充電池を用いているが、充電池からの出力電圧が3.7Vなのに対し、H8マイコンボードの電源は5Vである。よって、電源電圧を3.7Vから5Vに昇圧する必要がある。そこで、HOLTEK社から販売されている「HT7750A」(図11)という昇圧型DC/DCコンバーターと呼ばれる部品を用いて3.7Vから5Vに昇圧することにした。



図 11 HT7750A

加速度センサは、その名の通り加速度と 傾きを計測できるセンサのことである。今 回の研究において製作したコントローラー は文字認識システムで使用できることが目 標である。このシステムでは、空中で文字 を書いて認識させるため、傾きや加速度を 計測する必要がある。よって今回は、アナ ログ出力とデジタル出力の両方が可能な2 軸加速度センサ「ADXL202」(図6と共通) を用いた。このセンサは、実験段階におい てもっとも精度がよかったものであるため、 今回はこのセンサを使用した。なお、2軸 とは x 軸と y 軸を表す。

近接センサは、一般にフォトインタラプタと呼ばれるものである。今回製作したコントローラーでは、本体の最上部に設置し、手をかざして用いる。こうすることにより、文字モードの変更が行えると考えている。例えば、ひらがなを入力するモードからアルファベット文字を入力するモードへと変更する場合などである。ここでは、ローム社の「RPR-220」(図 12)と呼ばれるものを用いた。



図 12 RPR-220

今回の研究では、ハードウェアのみで動作させることが目標であったため、どの図形を認識しているかが一目で分からなければならない。そこで、インジケーターとしてRopla 社製のフルカラーLED(図 13)を取り付けた。



図 13 フルカラーLED

フルカラーLED とは、従来の単色発光の LED と違い、赤、緑、青の3つの色の LED 素子が1パッケージの中に内蔵されている ものである。

これらに加え、割り込み入力端子に接続するために小型の押しボタンスイッチであるタクトスイッチと呼ばれるものも取り付けた。割り込み端子に接続されていることで、ボタンを押している間に何らかの動作を行い、離してからどの図形であったか認識を行うことができる。これにより、誤動作を減らすことができるのである。

さらに、図 7 の H8-3664F マイコンボードを追加し、配線する。

製作したハードウェアの写真を図 14 に示す。



図 14 オリジナル・ハードウェア

研究2

wii リモコン(図 15)は、任天堂株式会社から販売されている家庭用ゲーム機「wii」(図 16)に付属するコントローラーである。



図 15 wii リモコン



図 16 wii 本体

また、Bluetooth とは、短距離無線通信 規格の1つで、パソコンや携帯電話にはよ く搭載されている技術の1つである。

Wii リモコンは、3軸加速度センサが搭載されており、直感的に操作ができることや、Bluetooth が搭載されていることなどから、インターネット上にパソコン用のドライバやソフトウェアが多数公開されている。これらは、wii リモコンをパソコン上でマウスとして使うためのソフトウェアである。

今回は、wii リモコンに内蔵されている加速度センサからの出力信号波形を見ることができる「wiinremote」(図 17)というフリ

ーソフトウェアを用いて、実験を行った。

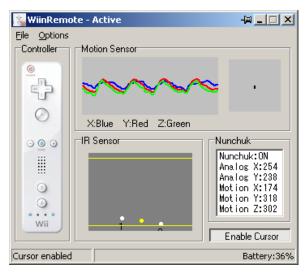


図 17 wiinremote スクリーンショット

ここでは、以下の図形の動きを行い、実験を行った。

- ・ / (スラッシュ) (図 18)
- (バック・スラッシュ) (図 19)
- ((左括弧) (図 20)
- ·) (右括弧) (図 21)
- · 〇 (丸) (図 22)
- ・ △ (三角形、左→上→右に時計回り)
 (図 23)

さらに、動作実験として以下の動きを行い、信号波形を測定した。

- 前に押す(y軸方向に突き出す) (図 24)
- 後ろに引く(y軸方向に引っ込める)(図 25)
- 左にスワイプさせる(x軸方向に滑らせる) (図 26)
- 右にスワイプさせる(x軸方向に滑らせる) (図 27)
- 左に傾ける(x 軸方向に右サイドを上げる) (図 28)
- ・ 右に傾ける(x軸方向に左サイドを上げ

る) (図 29)

また、対照実験として、何もしていない ものも測定した。(図 30)

なお、これらの実験は wii リモコンを床 (机)と平行にして行った。実験結果を以下に 示す。

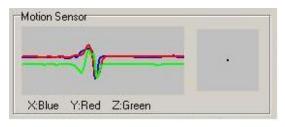


図 18 スラッシュ



図 19 バック・スラッシュ

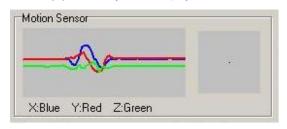


図 20 左括弧

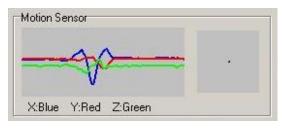


図 21 右括弧

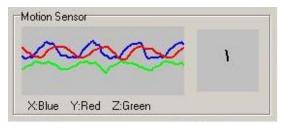


図 22 丸

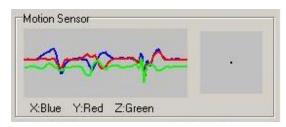


図 23 三角形、左→上→右:時計回り

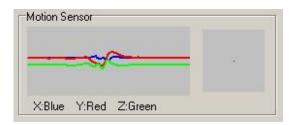


図 24 y 軸方向に突き出す



図 25 y 軸方向に引っ込める

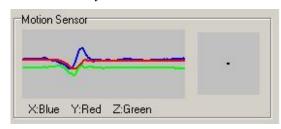


図 26 左にスワイプさせる

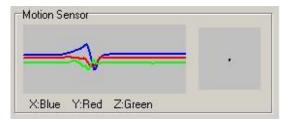


図 27 右にスワイプさせる

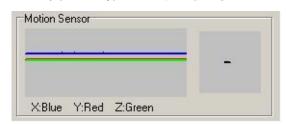


図 28 左に傾ける

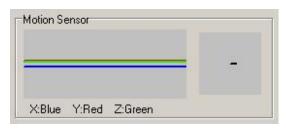


図 29 右に傾ける



図30 何もしない

次に、実際のコントローラーで使用する 加速度センサ、「ADXL202」とそのテスト 回路を用いて実験することにした。ここで は、波形を測定する際、オシロスコープを 用いている。

なお、実験する際に用いる動作パターン は以下の8種類にすることにした。

- 丸 (図31)
- y軸方向に突き出す (図 32)
- ・ y 軸方向に引っ込める (図 33)
- ・ 左にスワイプさせる (図34)
- ・ 右にスワイプさせる (図 35)
- ・ 左に傾ける (図36)
- ・ 右に傾ける (図37)
- ・ 何もしない (図38)

また、条件は測定装置以外、wii リモコンの場合と同様である。実験結果を以下に示す。

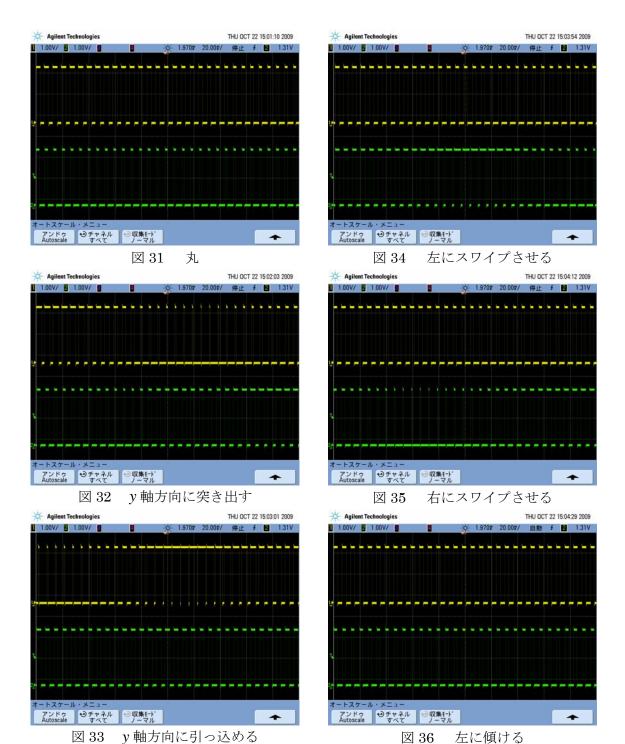


図 36 左に傾ける

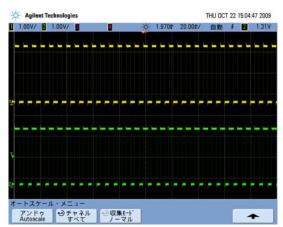


図 37 右に傾ける



図 38 何もしない

研究3

まず、センサテストプログラムを製作した。今回のコントローラーに搭載されているセンサは以下の通りである。

- 2軸加速度センサ(ADXL202・デジタル 出力)
- フォトトランジスタ(RPR-220・アナロ グ出力)
- ・ タクトスイッチ(デジタル出力)

ここでは、それぞれのセンサにおいて入 力方法が違うため、別々のプログラムを作 成する必要がある。

なお、ここでのプログラムは全てC言語 と呼ばれるプログラム言語を用いて、全て 自分で製作したものである。 まずは、2軸加速度センサである。このセンサからは、パルスデータ(図 39)が出力されている。パルスデータとは、矩形波と呼ばれる信号の一種である。

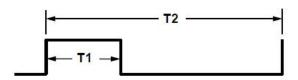


図 39 パルスデータ例、(T1, T2:時間)

通常、静止状態にあると図 39 の T1 と T2 は同じ秒数である。つまり、デューティー比が 50%のパルスといえる。これが、傾いたり、加速度を感知したりすると T1 の秒数が変わる。そこで、今回は T1/T2 の割合によって傾きや加速度を算出し、パソコンの「ハイパーターミナル」というソフト上に表示させるプログラムを製作し、実験した。

以前、私はフォトトランジスタを用いて ライントレースカー(図 40)を製作した。



図 40 オリジナル・ライントレースカー

この際も、同じセンサを用いた。このセンサは、アナログ出力、つまり信号の電圧がそのまま出力される。そこで、8ビットアナログ入力を行い、0V~5Vまでの電圧

値を $0\sim255$ までの数値に、パソコンのハイパーターミナル上に表示させるプログラムを製作し、実験した。

また、インジケーターテストとして、フォトトランジスタに手をかざしていくと、 赤→オレンジ→緑→青緑→青→紫→白 という順番に色が変わるようなテストプロ グラムを製作し、実験した。

それぞれにおいて、実験中の写真を加速 度センサ・フォトトランジスタにおいては 図 41、タクトスイッチにおいては図 42、イ ンジケーターテストは図 43 に示す。

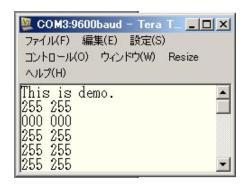


図 41 ハイパーターミナルテスト

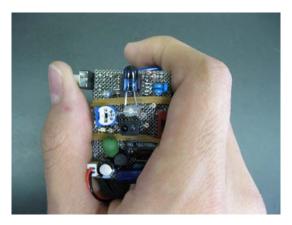


図 42 タクトスイッチの実験

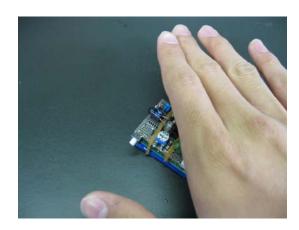


図 43 インジケーターテスト

最後に、これまでの実験結果を踏まえて、 図形認識プログラムを製作し、実験した。

これは、コントローラーを丸や三角など、特定の形にそって動かしたときに、加速度センサからの出力をマイコンで取得し判断する。そして、その結果をコントローラー上部についているフルカラーLED の動作に対応させるというものである。実験の条件や方法は上記の通りである。実験中の図を図44に示す。



図 44 テスト中の写真

研究4

これまでの研究において製作できたコントローラーの大まかな仕様としては、次のようなことが挙げられる。

- ・ 加速度センサ出力=デジタル出力
- 割り込みスイッチ
- ・ フルカラーLED
- · 昇圧回路用 IC=HT7750A 使用
- 電池=リチウムイオン二次電池 (3.7V/350mAh)
- ・ フォトインタラプタ

この研究4では、これまでの研究において製作したハードウェアおよびソフトウェアの両方を見直した。より簡潔で、高速に動作させるためである。

ハードウェアの面で見直しを行った結果、割り込みスイッチとフルカラーLED、フォトインタラプタを省いた。そして、センサ出力をデジタル出力からアナログ出力に変更し、さらにリチウムイオン電池を図 45 以降、容量の大きな 830mAh のものに変更した。



図 45 830mAh バッテリー

ここで、センサ出力をアナログ出力に変 更したため、どのようなセンサ出力が得ら れるか、テスト回路を試作した。今回は、 ブレッドボード(図 46)と呼ばれる部品を差 し込むだけで電子回路を作ることができる 基板を用いた。

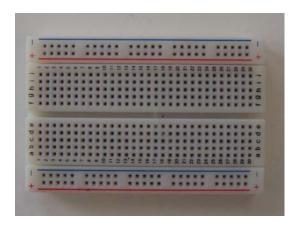


図 46 ブレッドボード

実際に製作した回路の様子を図 47 に、また、その回路から得られた出力信号の様子を図 48 に示す。なお、センサ出力のテストを行う際は、センサ基板ごと左右に 5cm 揺すって測定した。この基板は、以下「v1.1」として記す。

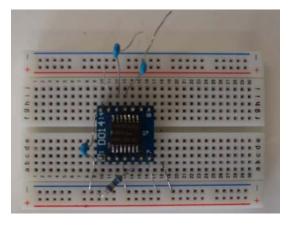


図 47 v1.1 基板

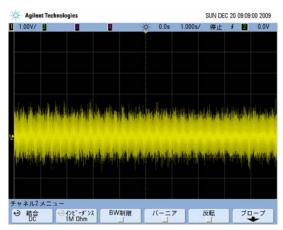


図 48 v1.1 基板からの出力信号

このv1.1 基板から得られた信号から分かることは、

- センサ出力は 0V を中心に正負の両方 の領域にわたってふれている
- 振れは正も負もそれぞれ 0.5V ずつしか 振れていない
- ノイズが多い

といったことである。

そこで、これらの問題を解決すべく、v1.1 回路にアンプと呼ばれる増幅器回路を追加し、以下の条件を達成できるようにした。

- 信号の振幅中心を 0V から 2.5V にする
- 振れを4倍にし、マイコンでも読み取る ことができるようにする

v1.1 基板に変更を加えた回路の様子を図 49 に、得られた信号の様子を図 50 に示す。また、この基板は以下 $\lceil v1.2 \rceil$ として記す。

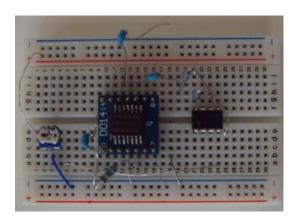


図 49 v1.2 基板

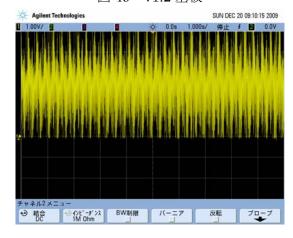


図 50 v1.2 基板からの出力信号

このv1.2 基板から得られた信号から分かることは、

- ・ センサ出力が 2.5V 中心になっている
- ・ 信号の振れが v1.1 基板と比べて大きく なっている
- ノイズが多い

ということである。

この v1.2 基板において、v1.1 基板におけるノイズに関すること以外の問題は解消された。

そこで、最後に信号に混入するノイズを 消すための回路を組み込んで新たに回路を 設計した。ノイズを消すためには様々な方 法が考えられるが、ここでは最も単純な方 法である「ローパスフィルタ」回路を用いた。

これはその名の通り、低い周波数の信号は通過させ、高い周波数の信号はカットするというフィルタである。また、必要なパーツはコンデンサと抵抗だけ、という非常にシンプルな回路構成となる。

ここでは、10Hz 以下の信号は通過させ、 それより上のものは通さない回路を設計した。V1.2 の回路にローパスフィルタを組み 込んだ様子を図 51 に、得られた信号の様子 を図 52 に示す。また、この基板は以下 「v1.3」として記す。

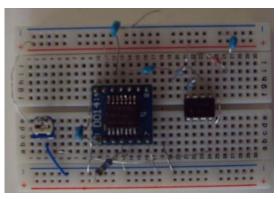


図 51 v1.3 基板

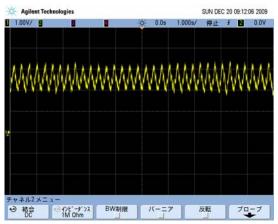


図 52 v1.3 基板からの出力信号

このv1.3 基板から得られた信号から分かることは、

・ センサ出力は v1.2 基板と同様に 2.5V

中心になっている

- ・ 信号の振れも v1.2 基板と同様に、v1.1 基板と比べて大きくなっている
- ノイズが省かれ、マイコンでも識別が簡単にできるようになっている

といったことである。

さらに、v1.3 基板を小型化し、実際に使えるように超小型のセンサモジュールを製作した。このモジュールの完成図を図 53 に示す。



図 53 超小型加速度センサモジュール

しかし、ここで問題が発生した。その問題とは、電源供給の問題である。アンプ回路を追加したため、アンプを動作させるためには、正と負の両方の領域における電力供給が必要となるのである。さらに、マイコン回路も同時に動作させなければならない。よって、研究1~3までのような電力供給では必要な電圧が確保できないのである。

そこで、ここでは大容量のリチウムイオンバッテリーと、研究1で用いた DC/DC コンバータを中心に昇圧モジュール(図 54)を作製し、つなぎ合わせることで 5V 出力モジュールとした。さらに、これらを2セット製作し、直列につないで10V出力電源とした。その上、その電源に半固定抵抗と呼ばれる抵抗器を用いて、電圧を正負の両

方に割り振る回路を製作した(図 55)。

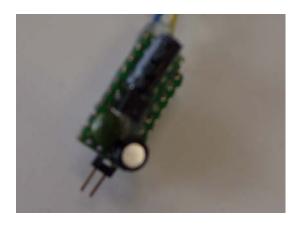


図 54 昇圧モジュール



図55 割り振り回路

研究3までで完成していたコントローラーに搭載していた割り込みスイッチは、割り込み機能が必要ないために省略した。しかし、動作させるためにはボタンを押しながら行うのがよいだろうと考えた。そこで、ごく一般的な押しボタンスイッチとして取り付けた。

ここまでのセンサモジュールと、電源回路、さらに今回の研究で用いている H8 マイコンボードを組み合わせることで、新しいハードウェアを完成させた(図 56)。



図 56 シンプルになったコントローラー

一方、ソフトウェア(ファームウェア)も大きく変更した。これまでのハードウェアの変更で、ソフトウェアに影響が及ぶものは以下の2つである。

- センサの入力方法がアナログになった
- スイッチが割り込み機能を用いず、デジタル入力となったこと

これらの問題に加え、ここではプログラムの考え方を新しくすることで性能の向上にも取り組んだ。

まず、ここでは認識する図形の種類を三 角形・四角形・円の3種類に限定してプログラムを開発した。

円を除く三角形・四角形の2種類の図形に共通する特徴は何かと探したところ、それぞれの図形には異なる数の頂点が存在しているという当然の事実に気づいた。三角形では3つ、四角形では4つである。

図形を認識するためには、この「頂点」

をマイコンで認識できれば、ハードウェア のみでの図形認識のプロトタイプができる のではないかと考えた。

そこで、どのようにして加速度センサを 用いて図形の頂点を認識すればよいかを考 えるために簡単な実験を行った。鉄球と木 槌、それに鉄球を止めるための真鍮のブロ ックを用意した。実験の様子を図 57 に示す。

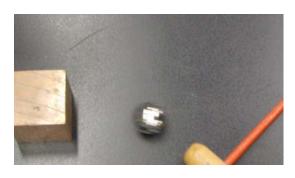


図 57 実験の様子

この実験は、四角形を例にして行った。 図 58 のように、四角形を描くときは、まず 図 58 の①のように縦線を描く。次に、図 58 の②のように横線を描くとき、縦方向の 動きから横方向の動きへ速度の向きを移さ なければならない。このとき、速度の変動 がどのようになるのかをこの実験で調べた。

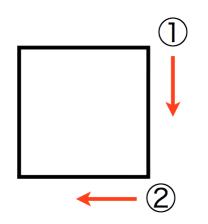


図 58 四角形の場合

実験の結果、図59のような結果が得られた。つまり、縦方向から横方向に鉄球の転

がりを変化させるには、転がってきた鉄球を木槌で斜め45°方向にたたくと、鉄球が直角に曲がることが分かった。鉄球が直角に曲がるとき、鉄球に加わるこの斜め方向の力が、いわゆる「加速度」であることが分かった。

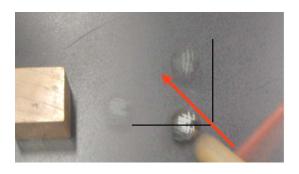


図 59 実験結果の図

そこで、図 60 のように①~⑤までの 5 つの大きな速度の変化が発生するだろう、と予測をたて、先ほどの v1.3 基板を用いて四角形を空中に描いた。そのときの信号の変化はオシロスコープで観察した。また、三角形も同様な考え方をもって、4回の大きな加速度の変化が生じるだろうと予測をたて、四角形の場合と同様に実験を行った。

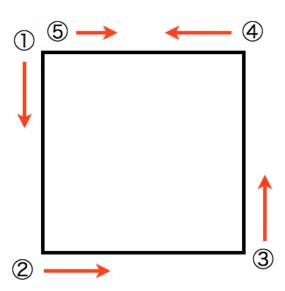


図60 四角形を書いたとき発生する加速度

四角形のときの結果を図 61 に、三角形のときの結果を図 62 に表す。



図61 四角形を書いたときの波形



図62 三角形を書いたときの波形

どちらの結果においても、ピーク(波形のきわめて大きいところ)の数が1つずつ少ないことが分かる。言い換えれば、加速度の変化がそれぞれ1回ずつ少ない、ということである。

また、円に関しての同様の実験も行った。 これは図 63 に表す。円には角が存在しない が、正弦波(サイン波)に酷似した波形が出力 されていることが分かる。また、三角形・ 四角形の信号よりもピークが低いことも分 かる。

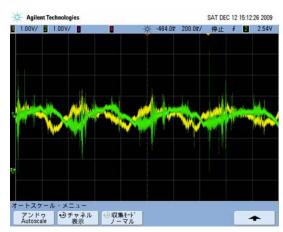


図 63 円を書いたときの波形

このようにそれぞれの図形の信号における特徴が分かった。しかし、このままではまだマイコンによる信号の読み取りができない。なぜなら、これらの信号波形にはまだ雑音が含まれているからである(図 61~63 を参照)。

そこで、「移動平均」と呼ばれる方法をプログラムに導入することにより、この雑音をなくすことを考えた。図 64 に一般的な平均と移動平均との違いを表す図を示した。

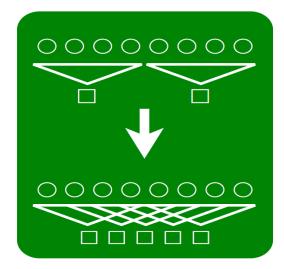


図 64 一般的な平均(上)と移動平均(下)

一般的な平均は、与えられた数値を一定 の個数で平均するものである。例えば、1 ~4までの数値があれば、数値の数は全部 で4つなので、1~4までの数値の合計を 4で割る計算となる。

一方、移動平均は、今回の研究のような 次々とデータが得られる場合に有効な手法 である。例えば、平均を取る数値の個数を 4個としたとする。1~8までの数値があ るとき、初めに1~4までの数値の合計を 4で割り、平均値をとる。次に、2~5ま での数値の合計を4で割り、平均値をとる。 さらにまた、上記の計算を繰り返す。

つまり、次から次へとやってくる数値を 一定の個数で平均していくのが、移動平均 である。

結果的に、得られたデータのグラフがど うなったかは、次節の図 67,68 に示す。

また、今回製作したプログラムのフロー チャートは図65に示す。

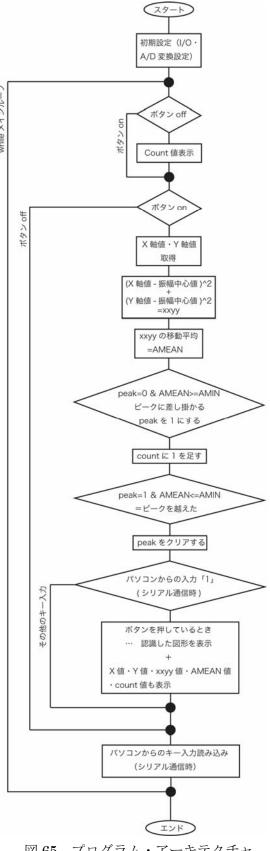


図 65 プログラム・アーキテクチャ

また、ここでの実際の動作確認は、パソコンと通信させて認識した図形の名前を表示することで行った。

(4) 研究結果

研究1

図 14 の通り、センサおよび電源部の基板の面積はほぼ H8 マイコンボードと等しくなった。また、リチウムイオン充電池においても面積がほぼ同じだったため、面積的にはかなり小さくなった。さらに、高さや重さに関してもとても小さく、特に重さに関してはバッテリー込みで約 30g であり、非常に軽量である。今回は試験的に右手の人差し指と中指に装着した(図 66)。



図 66 装着図

写真からも分かるとおり、目標であった 小型化は達成できたといえる。

研究2

wii リモコンの加速度センサにおいては、 予想以上に高精度の結果が得られた。また、 コントローラーに用いているセンサにおい ても、かなり細かい出力信号が得られたと 考えている。

研究3

いずれにおいても動作した。

研究4

結果、研究3において製作したハードウェアに比べ、誤認識を減らすことができた。また、図56のような形状にしたことで、一体感を増したのではないかと考えている。さらに、信号波形を移動平均した結果については以下に示す。

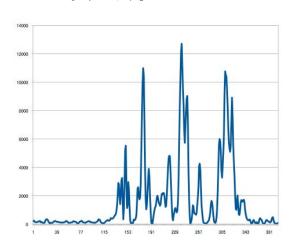


図 67 三角形を書いたときの信号波形を グラフ化したもの

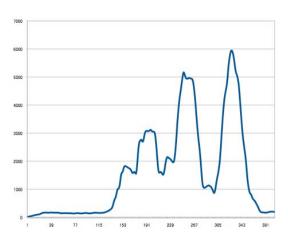


図 68 三角形を書いたときの信号波形を 移動平均処理したもの

5. 考察

研究1

今回製作したハードウェアにはいくつか の問題点が挙げられる。その中でも大きな 問題は以下の4つである。

- ・ 比較的大きい部品は寝かせて取り付けられているため、基板のスペースが多少無駄になっている
- DC/DC コンバータ周辺の回路が密集していることや配線が細い
- DC/DC コンバータ自身からの発熱により、基板が動作中はかなり高温になる
- ・ H8マイコンとの配線がスペースの都合 上かなり短くなっていることや部品数 が多く、密集していることからデバッグ 等の操作が大変行いにくい

これら4つの問題点において全てに共通するのが DC/DC コンバータである。実用性のあるデバイスにするため、今後は昇圧回路を改良するか、あるいは別の方法を考えてさらに小型に、特に薄型にしていく必要がある。そのため、チップ部品などを多用することによりこれらの問題を解消できるのではないかと考えている。

研究2

wii リモコンの加速度センサとオリジナル・ハードウェアで使用している加速度センサにおいて、それぞれ同様の動きを行ってグラフを取得した。ここで分かったことのうち最も大きかったことは、たとえ一方向にしか動かしていないつもりでも全ての座標において動きが発生しているということである。例えば、図 26,27 のスワイプが挙げられる。右にしか動かしていないはずだが、人の腕の構造上、一方向だけに動くことはできない。さらに、wii リモコンは

1/3000G(G:加速度の単位)という微振動で さえ検出してしまうので、さらに細かく 様々な動きを検出してしまう。また、オリ ジナル・ハードウェアで用いている加速度 センサにおいてもオシロスコープで波形を 測定した結果、拡大していくととても細か い数値まで取得している。

今後は、これらのノイズをいかにハード ウェアで認識しないようにするかを研究し ていく必要がある。

研究3

ここでは、それぞれのセンサにおいてテストプログラムを製作し、ハードウェアに 実装して実験を行った。このとき、次のような問題が発生した。

- プログラムどおりに動作せず、かなり予想とは違う動きをする
- ハイパーターミナル上に数値を表示するプログラムの場合、通信エラーや明らかに異なった数値が表示される

研究4

最後の研究4では、研究1~3までの流れをふまえてソフト・ハード面ともにすべて一新した。

結果的に、研究3において製作したハードウェアよりも認識精度を高めることができた。また、今後の研究のテーマである「母音認識」にもつながるヒントを得ることができた。

ただし、今回の実験である「パソコンと 通信させて認識した図形の名前を表示す る」では、以下のような問題点も見つかっ た。

通信エラーが起きて、表示がおかしくな

る

- ・ 上記と同様の理由で、誤作動が起きる
- ・ 長時間動作により、熱が発生する
- パソコン側の通信プログラムとの互換 性の問題がある

これらの問題は、研究3における考察と 同様、プログラムを安定化させることでク リアできるのではないかと考えている。

6. まとめと今後の課題、展望

今回の研究において、小型のウェアラブル・コントローラーを製作し、実際にシステムのデモンストレーションを行うことができた。また、これを通して、デジタル信号やパルス信号といった特殊な信号の入力を判断・制御することができた。また、図形を認識するという動作においては、時間経過とともに変わる入力値を時間とセンサ値の両面から判断できた。

今回の小型ウェアラブル・コントローラーを開発できたことで、常に身に着けておけ、日常生活でも行うような直感的な操作をするだけで様々な機械を操作することができるコントローラーを開発できたといえる。

ただ、これからこのハードウェアをコントローラーとして発展させていくには、いくつかの課題があると考える。

まずは、数々あるエラーのデバッグである。これは、ファームウェアに起因するものであり、これから随時修復することを考えている。

次に、シリアル通信の無線化が挙げられる。現段階では、テストに有線シリアル通信を用いている。しかし、「リモートコント

ローラー」という言葉がある以上、有線で 用いたのでは意味がない。

ディジ・インターナショナル社から「XBee」(図 69)と呼ばれる無線モジュールが販売されている。



図 69 bee モジュール

これは、シリアル通信を簡単に無線化できる通信モジュールの1種である。今後、このハードウェアと組み合わせることで無線通信を行えると考えている。

また、今回の研究における実験中にある 問題が見つかった。それは、マイコンの処 理性能の問題である。

かなり速度が求められる処理を行ったため、体感的に少し熱を持ったり、処理が追いつかなかったりするケースが数回見られた。

そこで、今後は使用するマイコンを高速 で、使いやすいものへ変更することも考え ている。

今後は、現在研究中のハードウェア母音 認識と組み合わせて、新しい入力装置やど んな人でも使える画期的なデバイスを開発 していきたいと考えている。また、これを 行うことで、今までの入力装置の常識を覆 すことができるのではないかと考えている。

7. 謝辞

今回の研究にあたり、様々なアドバイス をいただいた本校サイエンス研究会物理班 顧問の米田隆恒先生をはじめ、本校前校長 の植野洋志先生、現校長の塚本幾代先生に は公開研究会においてご指導、ご助言をい ただきました。

また、前顧問である末谷健志先生、サイエンス研究会統括顧問である川口慎二先生、地学班顧問である藤野智美先生には、ご指導、ご助言をしていただきました。

さらに、本校サイエンス研究会物理班の 先輩方にも多大なご協力をいただきました。 お世話になった方々、本当にありがとう ございました。この場をお借りして御礼申 し上げます。

触れずに動かすタッチパネル ーグーパーマウスの開発ー

4年C組 庄野 裕貴 指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

最近普及している Web カメラを用い、画像処理の技術を応用して『触れずに動かすことのできるタッチパネル(グーパーマウス仕様)』の開発に成功した。グーパーマウスは、直感的に扱うことができる、タッチパネルに比べ安価である、非接触である、通常のタッチパネルとは異なり、3次元的に操作することができるなど、従来になかった特徴が挙げられる。

キーワード 画像処理、手の領域、Webカメラ、マウス、形状認識

2. 動機

タッチパネルは大変使いやすいデバイスであるが、次のような問題がある。それは価格と衛生面である。会議室や学校などで使用されるような大型のタッチパネルになると通常のディスプレイサイズに比べ、2~5倍のコストがかかる。また、公共の場では不特定多数の人が触れるので、衛生面で不安がある。これらの点を改善するために研究を始めるに至った。

3. 目的

開発する『触れずに動かすタッチパネル (グーパーマウス仕様)』は、次の特徴を備 えたものとする。

- パネルに直接触れることなく、手で操作ができる。
- ②直感的に操作ができる。
- ③安価で、導入が容易である。

4. 研究内容

(1)仮説

人間の手の座標と形状を取得できるモーションキャプチャを実現し、それを利用した グーパーマウス仕様の触れずに動かすタッ チパネルを開発することができる。

(2)研究方法

カメラに映し出された、グーパーマウスと なる手の3次元座標を連続的に取得する技 術をモーションキャプチャという。



図1 使用した Web カメラ

通常、この技術は高額で大掛かりな装置を 必要とするが、わたしは数千円の USB 接続 の Web カメラを使ってモーションキャプチ ャを開発した。この技術がグーパーマウスの 中核となる。 以下に、今回開発したモーションキャプチャに関する研究の一部を紹介する。

研究 I 手の切り出しと3次元座標の取得

まず、Webカメラが映し出す画像から、グーパーマウスとなる手の部分のみを切り出す必要がある。画像は、色情報を持つたくさんの画素の集合体である。手の色情報に近い画素のみを表示することで、この切り出し作業ができるのではないかと考えた。

また、この切り出した手の色領域の重心を 次に示すような計算式を用いて求められる のではないかと考えた。

手の色領域の重心
$$(X,Y) = \frac{\sum (x_i, y_i)}{N}$$

また、手がカメラに近ければ、切り出された画素の総数は多くなり、遠ければ少なくなると考えられる。このことから、手の Z 座標(カメラからの距離)を算出できるのではないかと考えた。

研究Ⅱ 手の形状認識

ここではグーパーマウスでクリック操作 をするために手の形状を認識したいと思う。

この形状認識の方法は具体的にはその手がじゃんけんのグーとパーのどちらなのかを認識させることができる。今回は、凸包 (convex hull)を用いてグー/パーを識別した。凸包とは、ある図形を含む最小の凸図形のことで、手の領域を輪ゴムで囲うようにぴったりと囲んだ線による図形が凸包である。

研究 I で抽出した手の領域を凸包で囲み、 凸包で囲んだ領域中に手がどれだけの面積 をしめているかで、グーかパーかを判断できると考えた。

研究Ⅲ マウスポインタの動きと手の動き との関連付け

研究 I で取得した手の重心の X-Y 座標をマウスカーソルの位置を設定する座標とリンクさせることによって、本来のマウスカーソルの移動をコントロールすることができる。研究 II で得た手の形状認識の情報を用い、マウスカーソルのクリック操作をコントロールすることができると考えた。

(3)研究の結果

モーションキャプチャの処理を行うソフトウェアは、C++言語で記述した。開発環境は Microsoft 社の VisualStudio2008 と OpenCV である。OpenCV とは画像処理のライブラリである。

研究Ιの結果

手の色領域を認識することに成功した。切り出した手の色領域の重心を手の重心とすると、精度よく手の位置を検出することができた。

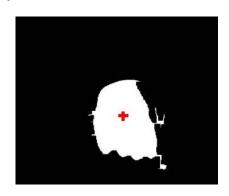


図2 グーのときの重心の位置

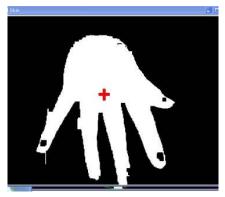


図3 パーのときの重心の位置

また、切り出された手の色領域の面積から、 手の Z 軸座標(カメラからの距離)を測ることもできた。今後は手の面積の変化の差で制 御することによって、人によって違う人の手 の大きさの問題を解決し、操作したいと考え ている。

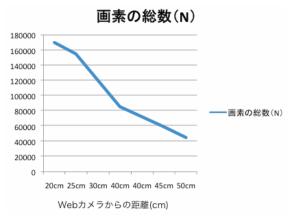


図4 切り出した画素の総数と カメラー手間の距離 R の関係

研究Ⅱの結果

基本的に研究 I で抽出した手の色領域の面積 N と凸包の面積の割合によってグーとパーを識別することに成功した。

手の色領域の面積 N と凸包の面積の割合が $100\% \sim 75\%$ の時をグーと識別し、手の色領域の面積 N と凸包(凸包)の面積の割合が、 $75\% \sim 45\%$ の時をパーと識別した。

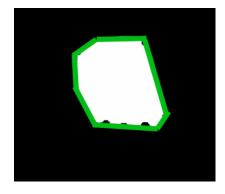


図5 グーのときの凸包



図6 パーのときの凸包

研究Ⅲの結果

研究Ⅰと研究Ⅱから得られた座標や手の 形状を本来のマウスカーソルの動きとリン クさせることができる。

- ① 手の色領域の重心の移動→マウスカーソルの移動
- ② 手のカメラからの距離 (Z軸の座標)
 - →基本は画像やウィンドウの拡大・縮 小
 - →音楽ソフトを操作している場合は音 量の調節
- ③ 手の形状認識 (手のグーとパーの認識)
 - →本来のマウスカーソルでのクリック 操作

(4) 研究のまとめ

研究Ⅰ・研究Ⅱについて

- ① 手の色情報をもとに、映像から手のみを 切り出すことができる。
- ② 切り出した手の重心を連続的に求めることで、移動する手の X-Y 座標を取得することができる。
- ③ 切り出した手の総画素数 N より、手のカメラからの距離 (Z 軸) を求めることができる。

研究Ⅲについて

①現状のタッチパネルとは違い、手を触れず に動かすことができる。

完成したグーパーマウスは次のような構造になった。

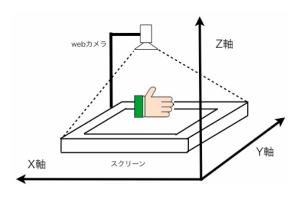


図7 グーパーマウスの構造図

- ②スクリーン全体が撮れるようにカメラを 上の方につける。
- ③スクリーンの上にある手の形状・位置 (座標) を取得し、ソフトウェアを操作する。



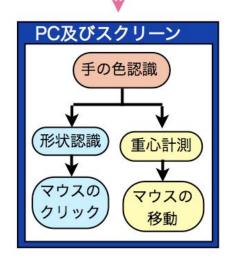


図8 グーパーマウスの動作原理の図

次の図に完成品を示す。



図 9 完成品



図10 グーパーマウスの使用風景

<操作方法>

手の動き	マウスの動き
グー	クリックしている
	状態
パー	クリックしていない
	状態
手の移動	カーソルの移動
手の上下	ウィンドウの
	拡大.縮小
	音楽ソフトの場合
	音量の調節



図 11 google map の操作の様子

5. まとめ

① Web カメラに写し出された手をグーパー

マウスにすることができる。

- ② 手をグーパーマウスとして操作することによって、画面上のウィンドウを"つかんだり"、"離したり"が文字通り行うことができ、非常に直感的な操作性をもつ。
- ③ Web カメラを1台使うだけなので、安価であり、コスト面においても導入が容易である。
- ④ 画面平面上(X-Y軸)の操作(クリック、 ドラッグなど)に加えて、手を上下に移動 させる(Z軸)ことによって、画像やウィ ンドウなどの操作(拡大・縮小・音量の調 節など)が容易にできる。

6. 今後の課題

以上のことから、研究の目的は概ね達成できたと考える。

今後は実用化に向けて、座標の取得精度を 向上させること及び、プログラムの高速化を 目指していきたい。

7. 展望

現状の大型のタッチパネルに比べ、安価であるので、導入しやすくなる。また、公共の場においては、不特定多数の人が触れる現在のタッチパネルよりも、今回開発した『触れずに動かすタッチパネル(グーパーマウス仕様)』の方が、衛生面での改善が見込まれる。

また、手で簡単にかつ直感的にコンピューターを操作することができるので、より多くの人がコンピューターを利用しやすくなる。 そして、この技術を用いることによって

そして、この技術を用いることによって、 手以外の体の部分、例えば、目や足などを取 得し、体に障害を持っている人へのリハビリ、 コンピューターのインターフェイスとして 使えるのではないかと考えている。

8. 参考文献・サイト

- [1]「独習 C++」, ハーバート シルト著
- [2]「C 言語で学ぶ実践画像処理」,井上誠喜, 林正樹,八木伸行,中須英輔,三谷公二, 奥井誠人 共著
- [3]「OpenCV プログラミングブック」, 奈良 先端科学技術大学院大学 OpenCV プ ログラミングブック制作チーム

9. 謝辞

本研究およびレポート作成にあたってご 指導くださった顧問の米田隆恒先生に深く 御礼申し上げます。また、本校のサイエンス 研究会の諸先輩のご協力に感謝します。

粒子衝突シミュレータの制作とその応用

6年B組 西田 惇 指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

「熱力学」や「気体の状態変化」で学習する公式や事象は、理屈は理解できるが視覚的に確認したことがないものがほとんどである。そこで CPP 言語を用いて粒子衝突シミュレータを制作し、力学的エネルギーの保存、気体分子運動論、ブラウン運動、 Maxwell の速度分布、エントロピー増大の法則を視覚的に確認できるソフトウェアを制作した。今回は制作期間が7日間と非常に短かったため、多くの公式を可視化することはできなかったが、制作した本ソフトウェアを用いることによって、より感覚的に各公式・事象を認識できるようになった。

キーワード 粒子衝突、熱力学、シミュレータ、C++、並列処理

2. 研究背景

中等教育課程で学習する熱力学に関する 公式・事象について視覚的に確認した例は ほとんどない。そこで、より直感的に事象 を理解するため、粒子衝突シミュレータを 制作し、いくつかの公式・事象についてコ ンピュータ上で再現し、視覚化した。

3. 目的

粒子衝突シミュレータを制作し、さらに、熱力学及び気体に関するいくつかの公式・事象をコンピュータ上でシミュレートできるソフトウェアを制作する。また、粒子衝突に関する計算時間を短縮する手法について考察する。

4. 研究内容

(1) 仮説

<研究Ⅰ>「粒子衝突シミュレータの制 作Ⅰ

力積の定義と反発係数の公式等を用いて 粒子が衝突する様子をシミュレートできる。

<研究Ⅱ>「数理モデルの実装」

制作したシミュレータでいくつかの公式・事象を再現できる。

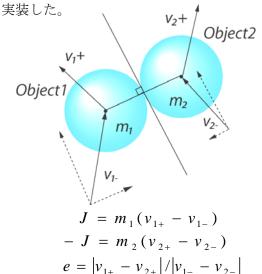
<研究Ⅲ>「並列処理プログラミングの導入と検討」

並列処理プログラミングを導入すること により処理速度を向上させることができる。

(2) 研究方法

<研究 I > 「粒子衝突シミュレータの制作」

CPP 言語を用いて Windows Form Application を制作し、粒子衝突前の速度から衝突後の速度を求めるアルゴリズムを



J: 力積 m: 質量 v: 速度 −: 衝突前 +: 衝突後 上記の 3 式から次式を求めることができ る。

$$J = -Vr(e+1)/(1/m_1 + 1/m_2)$$
 to the variation of the second se

各粒子に作用する力積がわかれば、質量で割ることにより衝突後の速度を求めることができる。

 $v_{1+} = v_{1-} + J / m_1$ $v_{2+} = v_{2-} + (-J / m_2)$

<研究Ⅱ>「数理モデルの実装」

今回は以下の公式・事象について視覚化 を行った。

- ① 力学的エネルギー保存則
- ② 気体分子運動論(平均運動エネルギー)
- ③ ブラウン運動
- ④ Maxwell の速度分布
- ⑤ エントロピー増大の法則

<研究Ⅲ>「並列処理プログラミングの導 入と検討」

搭載されたデュアルコア CPU の性能を 最大限引き出すために OpenMP を用いて 並列処理プログラミングを導入する。並列 化した場合としない場合の処理時間を計測 し、その効果について考察する。

本研究の仮説を検証するソフトウェア開発 環境は以下の通りである。

 $OS \hspace{1cm} : Windows \ XP \ HE \ SP3$

Hardware : Intel Core2Duo P8400,2GB IDE : VisualStudio2008 PE SP1

(1)研究結果

<研究 I >「粒子衝突シミュレータの制作」

制作した粒子衝突シミュレータを以下に 示す。

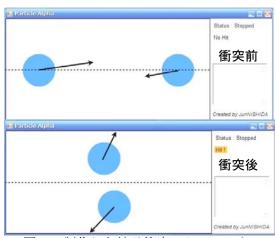


図1 制作した粒子衝突シミュレータ

<研究Ⅱ>「数理モデルの実装」

制作した粒子シミュレータに各数理モデルを実装した。フォームには、初期値設定コントロール(粒子数、質量、半径、反発

係数、温度、圧力)、各パラメータを表示 するグラフを配置した。

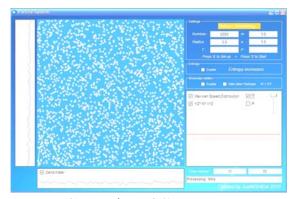


図2 数理モデルを実装したシミュレータ

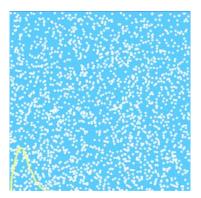


図3 粒子の初期配置状態。 初期座標・初期速度は乱数で決定する。 下部の黄色のグラフは粒子の速度分布を示す。

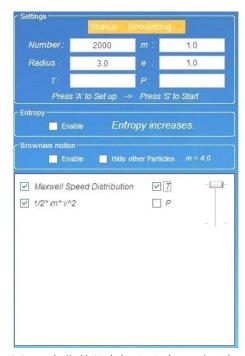


図4 初期値設定部及びグラフ表示部

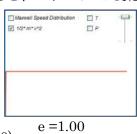
各公式・事象のシミュレーション結果を次に示す。

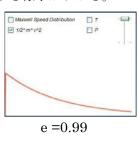
① 力学的エネルギー保存則の視覚化

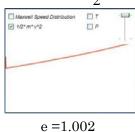
反発係数を変化させると、エネルギーが変化する様子がわかる。











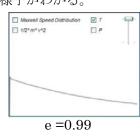
配置した粒子(粒子数 2000)

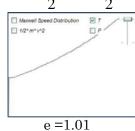
② 気体分子運動論(平均運動エネルギーは絶対温度に比例)の視覚化 粒子の速度を変化させると、温度が変化する様子がわかる。





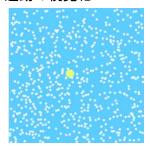






配置した粒子(粒子数 2000)

③ ブラウン運動の視覚化





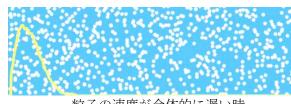
粒子の中にコロイド粒子を配置した様子

コロイド粒子の軌跡のみを表示した様子

(粒子数 2000、コロイド粒子の質量は粒子の 5倍)

④ Maxwell の速度分布の視覚化

温度を次第に上げていくと、速度分布がシフトする様子がわかる。



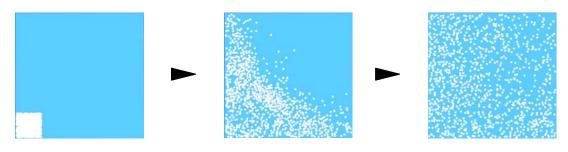




粒子の速度が全体的に遅い時

粒子の速度が全体的に速い時

⑤ エントロピー増大の法則の視覚化



<研究Ⅲ>「並列処理プログラミングの導 入と検討।

デュアルコア CPU をコンピュータが搭載していても、ソフトウェア側が並列処理に対応していなければ2個あるコアのうち大半の処理が片方で行われてしまい、マシンのパワーを最大限に引き出せない。

そこで、For 文中に並列処理用 API 「OpenMP」を導入し、衝突計算を2つのコアに分散させ、並列処理させた。



図5 並列処理プログラミング導入の効果 (上:並列化前 下:並列化後)

図5は並列化前と並列化後の CPU 使用率のグラフを示す。並列化前は両方のコアの性能が十分に生かされていないが、並列化後は、両コア共に CPU 使用率がほぼ100%になっている。

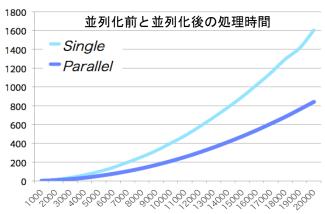


図6 並列処理プログラミング導入の効果 縦軸は処理時間(ms), 横軸は粒子数 Single:並列化前 Parallel:並列化後

図6は並列化前と後の処理時間の比較を表したものである。縦軸は処理時間(ms)、横軸は粒子数を示し、粒子数 1000 ~2万の時の処理時間をそれぞれ計測した。グラフより、衝突計算を各コアに分散して並列処理することにより処理速度が最大2倍高速になることがわかった。

5. 考察

並列処理について、搭載するコア数を増やすことによって処理速度がさらに高速になると推測される。さらに、衝突計算だけでなくモーションキャプチャや信号処理等、For 制御文を多用する他のプログラムにおいても高速化が期待できる。実際の授業で使用できるようにするには、UI の改善が必要であると考えられる。

6. まとめと今後の展開 (1)まとめ

粒子を配置した領域内で粒子の衝突、物理・化学公式がシミュレート可能であることがわかった。さらに並列処理プログラミングを導入することにより処理速度を飛躍的に向上できることが検証された。これらにより、より感覚的に各公式を理解できるソフトウェアを提示できた。

(2)今後の展開

より忠実に分子の振る舞いを再現するため、分子間力をパラメータに追加したい。これにより、物体の三態の変化、熱の伝導、熱平衡、対流、放射などのシミュレーをようになる。さり忠実に再現できるようになる。さり忠実を編めて、近月からにない。処理をとれる。「GPGPU」、描画処理の「ハードととれる「GPGPU」、描画処理の「ハードととれる」ともに処理速度が向上すると考えらの投業のには、中等教育課程での実際のおきなりには、中等教育課程での実際の追加を行っていきたい。

7. 参考文献

- [1] 「リード a 物理 I · Ⅱ」,数研出版
- [2] 「リードα 化学 I・II」, 数研出版
- [3] 「ゲーム開発のための物理シミュレーション入門」,オーム社
- [4] VisualC++2005, SoftBank Creative
- [5] MSDN ライブラリ, Microsoft

8. 謝辞

顧問の米田隆恒先生にご指導をいただきました。ありがとうございました。

筋電位計測システムの開発とその応用 その2

6年B組 西田 惇 指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

近年、コンピュータや電子デバイスの普及により様々な処理が行えるようになった。しかし現在のコンピュータ等電子端末のインターフェイスに代表されるマウスやキーボードは我々が実際に行ったジェスチャーが画面に直接反映されないため「直感的な操作性」に欠ける。そこで私は、生体とハードウェアをダイレクトにリンクさせ、腕の動作を操作対象に直接反映させることによって、より直感的な操作が可能になると考え、昨年度に筋電位計測システムのベースとなる基盤技術を確立させた。本年度は昨年度の理論・基盤技術をより安定的かつ実用的に実装させた。昨年度と比べ計測システムを50%小型化するとともに、FFTを用いた新しい腕動作認識アルゴリズムを考案し、認識精度を44%向上させることに成功した。さらに、これらをベースにして現在計9種類のアプリケーションを実現することに成功した。筋電位を利用した仮想ドラム演奏ソフトや、新しい家電制御システムなど多岐にわたる分野に非常に低価格で展開できたことにより、本システムの汎用性並びに実用性を示すことができた。

キーワード 生体インターフェイス、筋電位(EMG)、信号増幅、ノイズフィルタ、 FFT(周波数解析)

2. 緒言

現在、コンピュータやロボットなど、様々な家電製品や電子デバイスが発達し続け、 高度化している。しかし、それに伴って、 操作方法が複雑化し、便利だが使いにくい 例がたくさんある。そこで私は、人間の生 体情報という側面から、直感的で分かりや すいインターフェイスの開発に取り組んだ。

3. 目的

昨年度に開発した、非常に微弱な筋電位を増幅し不要なノイズを除去する電子回路を大幅に改良する。また、増幅された信号をコンピュータで認識し、様々なソフトウェア・電子デバイスを操作できるシステム

を新規に構築する。

4. 研究内容

(1)仮説

〈研究 I〉「筋電位計測システムの新規開発」

昨年度開発した計測システムを安定化させ、コンピュータ側でフーリエ解析できるようシステムを改良できる。

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規 考案」

取得した筋電位波形から、ハードウェア・ソフトウェアを操作するのに必要な情報を抽出できるアルゴリズム及びソフトウェアを開発できる。

〈研究Ⅲ〉「新しい生体インターフェイスの 開発」

開発した計測システム・アルゴリズムを 用いて、エンターテイメントや日常生活で 使用できる様々な電子デバイスやソフトウ ェアを開発できる。

(2)研究方法

〈研究 I〉「筋電位計測システムの新規開 発」

差動増幅回路および、ローパス、ハイパスなどの各種フィルタ、交流-直流変換などハードウェアレベルの研究

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規 開発」

- ① 取得した筋電位波形を平滑化し単純閾 値判定を行うアルゴリズムの研究
- ② 取得した筋電位波形を周波数解析し、パーやグーなど複数の腕の動作を識別できるアルゴリズムの新規開発

〈研究Ⅲ〉「新しい生体インターフェイスの 開発」

- ① 筋電位を利用したモーターカーの制御方法の検討と開発
- ② 筋電位を利用した筋電義手の制御方法の検討と開発
- ③ 筋電位を利用したゲームソフトの制御方法の検討と開発
- ④ 筋電位を利用した仮想ドラム演奏ソフト の制御方法の検討と開発
- ⑤ 筋電位を利用した個人差グラデーション 提示ソフトの制御方法の検討と開発
- ⑥ 筋電位を利用した仮想テルミン演奏ソフトの制御方法の検討と開発
- ⑦ 筋電位を利用した筋疲労計測システムの 検討と開発
- ® 筋電位を利用した新しいコンピュータインターフェイスの制御方法の検討と開発
- ⑨ 筋電位を利用した家電制御システムの制 御方法の検討と開発

(3)研究結果

〈研究 I〉「筋電位計測システムの新規開発」

そもそも筋電位とは、人体に流れる生体電位のことである。私たちが筋肉を動かす直前、脳は神経を介して筋肉に電気的な信号を送っている。この信号が筋電位(EMG; electro-myo-gram) と呼ばれ、皮膚表面に $10\mu V \sim 100\mu V$ と微弱ながら漏れている。これをコンピュータで周波数解析するには、増幅回路と不要なノイズを除去するフィルタ回路及び交流—直流変換回路が必要となる。

構築した新システムを図1に示す。

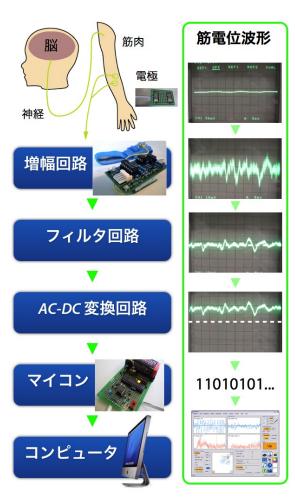


図1:開発した新システム全体図

■ 電極周りの再設計

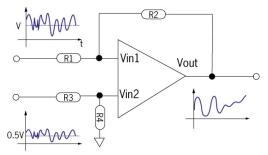
まず筋電位を取得するための電極周りを 大幅に改良した。昨年度自作したシステム では電極と増幅回路を別個の基板に実装し ていたため、装着するのに手間がかかる上、 ゴムバンドで固定していた増幅回路が動く と電極も動き皮膚と擦れ、アーチファクト (人工ノイズ)が発生していた。そこで電極と 増幅回路を一体化、さらに増幅回路と電極 の間に緩衝材を設けることで装着時間の短 縮及びアーチファクトの軽減を図った(図 2)。



図2 製作した新しい電極と緩衝材

■増幅回路の再設計

「差動増幅回路」と呼ばれる回路を採用した(図3)。これは、2極間の電位差(Vin1-Vin2)を増幅するため、図3、図6のように、外来ノイズが混入してもある程度相殺される。手作業での基板製作(図4)では基板ごとに個体差が生じたため、プリント基板化し、個体差の縮小、装着時の安定性向上を図った。製作した増幅回路は図5のようになった。



R1=R3, R2,=R4 ならば、出力電圧 Vout は Vout= R1 (Vin1-Vin2)

図3 差動増幅回路の仕組み

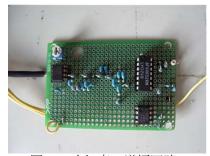


図4 昨年度の増幅回路



図5 製作した新しい電極・増幅回路

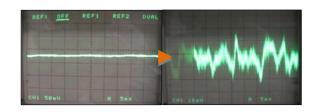


図6 筋電位波形を増幅した結果

■ フィルタ回路の設計

増幅回路により増幅された信号には、筋電位信号の他に、取り除けなかった商用電源からのノイズや、筋電位以外のその他の

ノイズが多く含まれている。そこで、不要なノイズをカットするためにフィルタを製作した。製作したフィルタは、特定の帯域のみをカットできる「ノッチフィルタ」と特定の帯域のみを通す「バンドパスフィルタ」である。製作したバンドパスフィルタ(図7)とノッチフィルタ(図8)の周波数特性図を以下に示す。

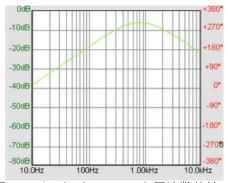


図7 バンドパスフィルタ周波数特性

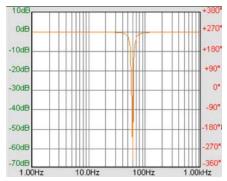


図8 ノッチフィルタの周波数特性

バンドパスフィルタは、ハイパスフィルタとローパスフィルタで構成される。製作したフィルタ回路の特性について説明する。まず周囲の電源コードや機器など商用電源に由来する交流ノイズ 60Hz(西日本)をノッチフィルタで除去し、筋電位の周波数帯域(10Hz~500Hz)以外の信号を除去するためにバンドパスフィルタに通す。これらにより、筋電位以外の不要なノイズをほぼカットすることが可能となった(図9)。

これによって筋電位波形を抽出すること

ができた(図 10)。

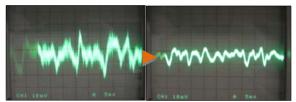


図9 フィルタ回路によるノイズのカット

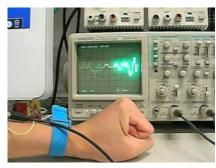


図 10 設計した増幅回路による筋電位信号の増幅

■ 交流-直流変換回路の設計

フィルタを通過した信号は、振幅±4.5V の電位変化で構成されている。昨年度ではこの時点で絶対値変換回路に通し信号の形を崩していたが、これではフーリエ解析を行うことができない。そこで筋電位信号の基線を 0V から 2.5V に引き上げる回路を挿入した。これにより、波形の形を崩さずそのままコンピュータに取り込めるようになった(図 11)。

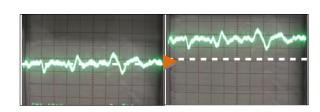


図 11:交流-直流変換回路の効果イメージ

■マイコン回路の再設計

昨年度製作したマイコン基板は 15cm× 15cm と大きく、さらに波形の処理の一部を ハードウェア回路で行っていたため、携帯性・可搬性に劣り、メインテナンスを頻繁

に行う必要があった。今回はこれらの問題を解消するため、波形の処理をソフトウェアに移行するなど回路設計を変更し、 $10cm \times 6cm$ まで小型化することに成功、部品点数を減らしメインテナンス性を向上させた(図 12)。

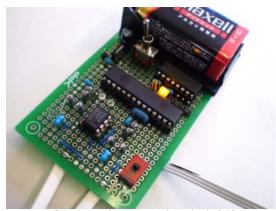


図 12 製作した新しい交流 一直流変換回路 及びマイコン回路

システム全体では、昨年度のものと比べ、50%小型化することに成功した。

〈研究Ⅱ〉「腕動作認識アルゴリズムの新規 考案」

RS-232C(EIA-232-D)でPCに送られた筋電位信号から、腕の状態をある程度認識できないかと考え、VisualStudio2008を用いて解析ソフトを0から開発した(図 13)。フォームには、マイクロコンピュータとの通信の設定を行うためのボタン、閾値判定及び腕状態判定に関する設定を行うボタン、筋電位信号とスペクトルを表示するグラフ、その他のアプリケーションを呼び出すためのボタンがある。



図 13 開発したソフト

①単純閾値判定アルゴリズムの考案

私は、「自乗平均判定法」というものを考案した。これは、取得した筋電位信号 20 サンプルのそれぞれを 2 乗し、その平均の平方根を求め、その値が指定した定数より大きければ論理値 1 として扱うものである(式1)。このアルゴリズムにより、腕に力が入っているか否かを判定できるようになった(図 14)。

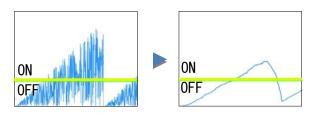


図 14 自乗平均判定法適用前と後の波形

$$\Theta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i^2} \quad (\text{\textsterling 1})$$

N: サンプル数 Xi: 筋電位サンプル

また、自乗平均判定法を適用するサンプル数(式1における N)をスライドバーで設定できるようにしたため、平滑化の度合いを操作対象に応じて自由に変えることができる。



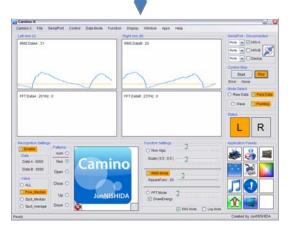


図 15 上図で表示されている入力信号に 自乗平均法を適用した様子(下図)

単純閾値判定アルゴリズムによって得た 筋電位のスイッチングデータを他の処理で も使えるようにするため、フォーム内に他 のソフトウェアを呼び出すアイコンを配置 した。これにより、筋電位のスイッチング データをそのまま使用して他のソフトウェア ア及びハードウェアを制御できる。

②FFT を用いた腕動作識別アルゴリズムの 新規考案

これまでの研究により、筋電位波形をコンピュータで読み取り、力を入れているか否かの2値の情報を抽出することに成功した。しかし単純閾値判定アルゴリズムでは片腕から得られる情報がON又はOFFと極

端に少なく、より複雑な動きを必要とする 義手などが製作できないなどデバイスの応 用範囲に制限ができてしまう。そこで筋電 位波形の単なる振幅ではなく、波形の形か ら腕の複数の動作を認識する必要があった。 そのために周波数解析(FFT)を行うことに した。ここでは、脱力、掌握(グー)、開(パー)、手首を上に曲げた状態、手首を下に曲 げた状態、この5つの動作の認識を試みた (図 16)。

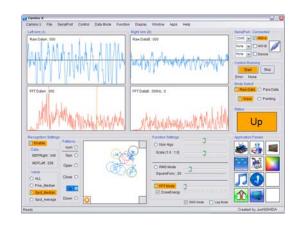


図 16 マイコンから取得した筋電位波形をフ ーリエ解析した結果を表示し、腕動作 を識別している様子

昨年度考案した「中央値判定法」では、 取得した2つの筋電位波形のエネルギー分 布(周波数×振幅)の中央値をグラフにプロッ トし腕動作を識別してきた。

方法:片腕に電極2つを取り付け(図 17)、 筋電位波形のエネルギー分布から中央値を 算出(図 18)、それぞれの中央値を XY 平面 にプロットし各腕動作を識別する。



図 17 電極の取付位置

昨年度の識別アルゴリズムの結果を次に 示す。

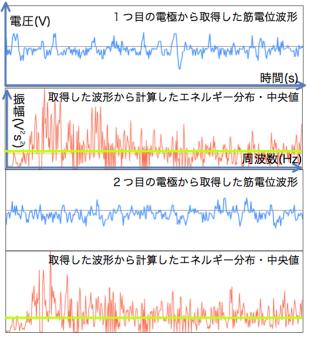


図 18 マイコンから取得した筋電位波形(青色) をフーリエ解析した結果(赤色)と中央値 (緑色の横線)

しかしこのアルゴリズムでは、周波数×振幅の中央値を特徴量として採用していたため、同じ腕の動作を行った場合でも、力の入れ具合によって振幅が変動し、値にばらつきが生じることがあった(図 19)。

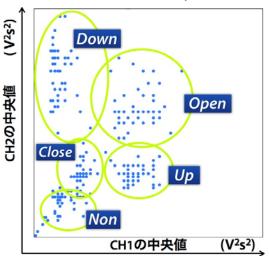


図 19 X 軸に1つ目の電極の中央値、Y 軸に 2つ目の電極の中央値をプロットする

そのため、腕動作ごとのカテゴリが一部 重なり、誤認識を引き起こす要因になって いた。

ゆえに、波形の振幅の変化に影響を受けない上、腕動作の特徴を捉える新しい特徴量を見つける必要があった。昨年度の「中央値判定法」ではエネルギー分布の縦軸にあたる「周波数×振幅」を特徴量として捉えていたが、横軸にあたる「周波数」を特徴量として捉えられないかと考え、中央周波数(MDF)を特徴量とした新しいアルゴリズムを考案した。

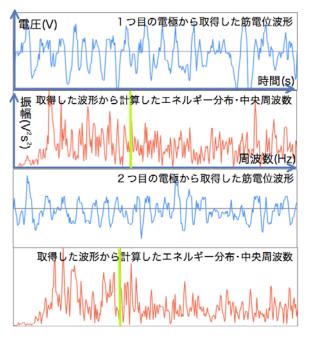


図 20 マイコンから取得した筋電位波形(青色) をフーリエ解析した結果(赤色)と中央 周波数(緑の縦線)

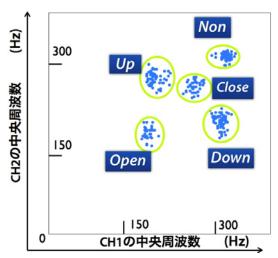


図 21 X 軸に1つ目の電極の中央周波数 (MDF), Y 軸に2つ目の電極の中央 周波数をプロットしたグラフ

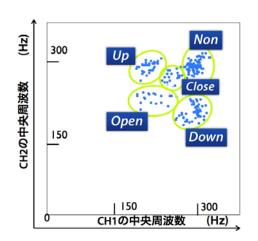
方法:片腕に電極 2 つを取り付け(図 17)、筋電位波形のスペクトル分布×周波数 $(P(f)\times f)$ から中央周波数(MDF)を(式 2) から算出し(図 20)、それぞれの中央周波数を XY 平面にプロットし各腕動作を識別する。

$$\int_{0}^{MDF} P(f) \cdot f \, df = \int_{MDF}^{512} P(f) \cdot f \, df$$
(\pi 2)

図 21 は、横軸に一つ目の電極から得られた中央周波数、縦軸に二つ目の電極から得られた中央周波数を表し、各腕動作の中央周波数(特徴量)をマッピングしたものである。驚いたことに、明らかに昨年度考案した「中央値判定法」とは異なり、各腕動作の値の分散はほとんどなく、カテゴライズ(グループ分け)できることがわかった。私はこの新しいアルゴリズムを「中央周波数判定法」と名付けた。

この結果を踏まえて個人差測定実験を行った。結果、各腕動作の位置関係は同じで、

それぞれの腕動作についてカテゴライズできている。カテゴリ同士が隣接しているが、数回訓練することによって、より標準偏差が小さくなると考えられる。



新旧アルゴリズムについて各腕動作の特 徴量の標準偏差(式3)の平均を算出した。そ の結果、新しい「中央周波数判定法」は昨 年度の「中央値判定法」と比べ 44%標準偏 差が小さいことが判明した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}$$
 (式3)

各アルゴリズムの標準偏差の平均を以下に 示す。

アルゴリズム	各腕動作の特徴量の 標準偏差の平均
中央周波数(新)	10.4
中央値 (旧)	18.5

<研究Ⅲ>「新しい生体インターフェイスの 開発」

今回開発した筋電位解析ソフトは取得した筋電位信号を元に左右の腕のスイッチング情報、さらに5種類の腕の状態を識別す

ることができる。そこで、これらの情報を 用いてハードウェアやソフトウェアの操作 を行えないかと考えた。

①筋電位を利用したモーターカーの制御 方法の検討と開発

解析ソフトによって得られたスイッチング情報(例:左腕 OFF、右腕 ON)を元にモーターカーを制御する信号をモーターカー制御ソフトで生成する。モータ制御信号はコンピュータに接続された無線装置を介してモーターカーに搭載された無線装置に送信され、その信号に応じてマイクロコンピュータがモータードライバーを介してモータを制御する。図 23 は動作の様子を示す。

製作したモータ制御回路の仕様を以下に 示す。

マイクロコンピュータ	PIC16F873A
通信方式	RS232C、 38.4kbps
プログラム	自作 PGM
	(アセンブリ)
最大モータ駆動電力	60W
制御回路方式	FET-Hブリッジ回路
電源電圧	PIC9V、 Motor6V

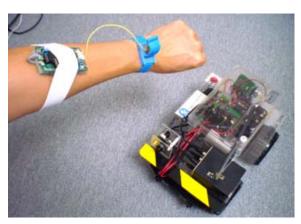


図 23 モーターカーの動作の様子

②筋電位を利用した筋電義手の制御方法の検討と開発

解析ソフトに実装した、FFT を用いた腕 状態識別アルゴリズムを利用して、取得し た筋電位波形から腕動作を識別、サーボモ ータの回転角を対応させることによって義 手を制御することができる(図 24)。生成さ れたサーボモータ制御信号は、シリアルケ ーブルを介してサーボコントローラーに送 信され、パルス信号に変換される(図 25)。

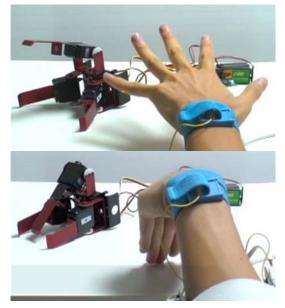


図 24 筋電義手の制御風景





図 25 製作した制御ソフトとコントローラ基板

③筋電位を利用したゲームソフトの制御 方法の検討と開発

単純閾値判定ソフトによって得られたスイッチング情報(例:左腕 OFF、右腕 ON)を元にバーを左右に動かすことによってゲ

ームをより直感的にプレーすることができる(\boxtimes 26、 \boxtimes 27)。

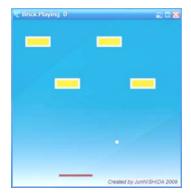


図 26 ゲームのプレー画面



図 27 ゲームのプレー風景

④筋電位を利用した仮想ドラム演奏ソフトの制御方法の検討と開発

ドラムを叩く時に発生する筋電位を認識 し、物理的なドラムセットなしに、ドラム を叩く動作をするだけでドラムの音を出力 することができる。物理的なドラムと異な り、ドラムセットを設置する空間を必要と しないため、省スペースで練習することが できる。



図 28 筋電位を利用したドラム演奏ソフト



図 29 筋電位を利用したグラデーション提示ソフト 筋電位波形の個人差をアートに適用した 一例である。取得する個人の筋電によって、 表示されるグラデーションのパターンが異 なってくる。これを応用すると、個人個人 の生体情報を元に生成したスクリーンセー バやデザインを作成することができるよう になる。

⑥筋電位を利用した仮想テルミン演奏ソフトの制御方法の検討と開発



図30: 筋電位を利用したテルミン演奏ソフト 筋電位波形の個人差を音楽に適用した一 例である。波形の形から音階を設定し、出 力する。腕の動作、個人によって出力され る音階が異なる。

⑦筋電位を利用した筋疲労計測システム の検討と開発

筋電位波形の周波数成分は、筋疲労に伴い低周波側へシフトする。これを利用して 筋肉の疲労度を測定できるシステムを構築 した。これによって医学的パラメータを出力することも可能になった。

⑧筋電位を利用した新しいコンピュータインターフェイスの制御方法の検討と開発

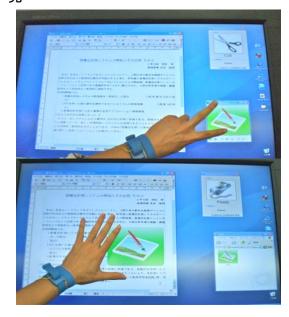


図 31 筋電位を利用した新しい コンピュータ・インターフェイス

腕の動作を直接コンピュータに反映できる例として、筋電位を利用した新しいコンピュータインターフェイスを開発した。これは、マウス・キーボードに付け加えて使用する"Third-Interface"(第3のインターフェイス)として機能する。動作例として、手を「チョキ」にすると「コピー」、「パー」にすると「貼付け」を行うことができる。また腕を上下することによりウェブブラウザやファイルエクスプローラの上下スクロールを行うことができる。

手の動作とコンピュータ上での動作が一致しているため、より直感的で実感のある 操作が可能となる。



図32 手首の上下でスクロールを行うことが可能に なりより直感的な操作が可能となる

⑨筋電位を利用した家電制御システムの 制御方法の検討と開発

開発した筋電位計測システムを日常生活で実用的に使用できる一例として、家電制御システムが挙げられる。これは腕に力を入れたときに発生する筋電位波形を認識し、制御する家電製品のアイコン、行いたい操作を表したアイコンを選択、赤外線ユニットを介して家電製品を制御するものである。本システムの大きな特徴は、腕を動かさなくても、赤外線リモコン制御式の家電製品全てを操作することが可能であることである。これは寝たきりのお年寄りや障害のある方にとって非常にメリットが大きいと推測される。本システム全体図を図34に示す。



図33 開発した家電制御システム



図34 家電制御システムの全体図

5. 考察

現段階において、取得した筋電位から多くのハードウェア、ソフトウェアをより詳細に制御できるようになった。本研究において明らかになったことは、以下の3点である。

- ① 同じ筋肉でも、長時間使っていると電位が 小さくなり、周波数成分が低周波側へシフ トする。
- ② 腕の動作によって、筋電位波形のエネルギー分布の中央周波数が異なる。
- ③ 同じ箇所で筋電位波形のエネルギー分布 を測定しても、特徴量(MDF)の分布はほぼ 同じ。

③については、個々人の皮膚表面の保水率 の違いや、使用する筋繊維が若干異なること で特徴量が変動すると考えられる。

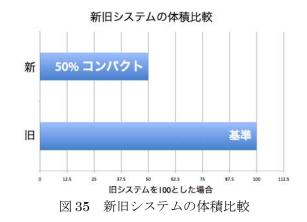
6. まとめと今後の課題

(1)まとめ

〈研究 I〉「筋電位計測システムの開発・改良」

- ① 電極周りの大幅な改良
- ② 増幅回路の再設計・安定化・小型化
- ③ マイコン回路の再設計・小型化
- ④ 解析ソフトウェアの新規設計

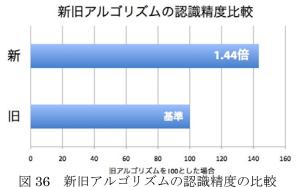
これらにより昨年度と比較し、筋電位をより安定的に取得・解析するシステムを50%コンパクトに構築することができた(図35)。



<研究Ⅱ>「腕動作認識アルゴリズムの新規 開発」

- ① 筋電位データの閾値判定アルゴリズムの開発
- ② FFT を用いた腕動作識別アルゴリズムの新規考案、認識精度 44%向上これにより、さらに精密に操作対象をコ

ントロールすることができるようになった。



<研究Ⅲ>「新しい生体インターフェイスの 開発」

エンターテイメント分野の直感的ゲーム ソフトから、介護補助となる家電制御シス テムまで計9種類、幅広い分野に計測シス テムを応用することができた(図 37)。

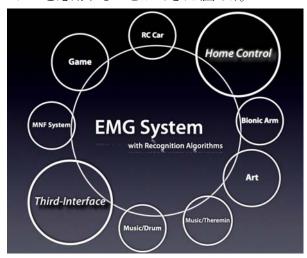


図37 システムの応用概念図

これらの研究により、筋電位を計測し、 電子デバイス及びソフトウェアのインター フェイスとして応用できるシステムを低コ ストで、かつより安定的に使用できる道筋 を提示することができた。

(2)今後の課題

脳から送られてくる信号をダイレクトに ハードウェアやソフトウェアに伝えるシス テムは、直感的な操作であったり、人間の 物理的限界を超えたりといった意味におい て非常に将来性を感じさせる。本研究によ り、このシステムを「低価格で」かつ「シ ンプル」に実現する道筋を示すことができ た。今後はこれらの特性を生かして、次の 3つの応用を実現していきたい。

①ハードウェアでの今後の応用

家電制御システムの開発をさらに進めていきたいと考えている。研究を進めていく上で、筋電位を用いたインターフェイスは健常者のみならず、障害のある方や高齢の方にとって非常にメリットが大きいことが判明した。そこで今後は、臨床での試験も進めていきたい。また、計測システムを腕時計サイズまで小型化し内部に通信機能を持たせることにより、ウェアラブルに、手のモーションだけで家電製品を操作することができるようになる。例えば、手首を回すと TV のボリュームアップ、指さしだけで照明を点けることができる。



図38 新しい家電制御システムのコンセプト

②ソフトウェアでの今後の応用

口の周囲に分布する筋肉の電位を取得し、 発声せずに口を動かすだけで母音を認識できる「無発声母音認識」を行う。これは、 極度の雑音下での会話が可能となることや、 プライバシーが確保されるといった大きな メリットがある。これを利用して、工場や 建設現場における作業員同士の簡単なメッセージのやり取り、あるいは電車での無発 声通話や会場内での秘匿性の高い会話が可能となる。

③腕動作識別アルゴリズムの改良

今回新規に考案したアルゴリズムでは、 取得した筋電位波形の中央周波数を求め、 5種類の腕動作を認識することに成功した。 しかし、電極の貼り付け位置や皮膚の保水 率によって結果が左右されてしまい、最適 な結果を得られるまで調整に時間がかかる。 そこで今後は、最適な調整方法をマニュア ル化していきたいと考えている。

7. 参考文献

- [1] 「トランジスタ技術」, CQ 出版
- [2] 「 OP アンプ実用回路設計」, CQ 出版
- [3] 「表面筋電図」,東京電機大学出版
- [4] VisualBasic2005 シニア編, ソフトバ ンククリエイティブ
- [5] MSDN ライブラリ, マイクロソフト
- [6] MPLAB C30 C Compiler User's Guide, Microchip
- [7] 「画像処理とパターン認識入門」, 森北 出版

8. 謝辞

この研究を進めるに当たり、顧問の米田隆恒先生、MIT(マサチューセッツ工科大学)研究員の松下光次郎氏には数々のご指導をいただきました。また予算面などは吉田信也副校長先生に、数学的検証については川口慎二先生に多大なご協力をいただきました。お世話になった先生方、ありがとうございました。

四色問題

2年A組 森田 倖規 佐藤 奨 2年B組 指導教諭 川口 慎二

1. 要約

サイエンス研究会数学班2年生は、地図の塗り分けを起源とする「四色問題」について学 習している。その理解のために、グラフ理論に関する参考文献[1]を輪読しながら、基本事 項の習得を行っている。本稿では、グラフの基本的な性質や用語の用意をしながら、四色 問題に関する事実について紹介する。

キーワード 四色定理、グラフ、地図、次数、オイラーグラフ、単純グラフ、 彩色可能性、双対性、面彩色、点彩色、辺彩色、彩色指数

2. 研究の背景と目的

社会の授業で地図を色分けした経験が あるだろう。地図の塗り分けについては、 「地図の隣り合った国を異なる色で塗 り分けるためには何色あれば十分なの か」という問題が数学の問題としてあり、 これに対しては、4色あれば十分である という結論である四色定理(four-color theorem)が知られている。

実際に、図1のように、日本地図におい て隣り合った都道府県を4色で塗り分け

けを考えるときには、「平面グラフ」の考 え方が役に立つ。

本稿では、グラフの考え方を紹介すると ともに、地図の彩色とグラフの彩色の関係 を考察したい。また、四色定理は、かなり 高度な数学の知識を必要とするため、まず は2色による彩色ができるためには、グラ フがどのような条件を満たせばよいのか について学習した。



日本地図の4色による塗り分け 図 1

3. 研究内容

3-1. グラフとは

図 2 のように、有限個の点を線でつないだ図形を(平面)グラフ(graph)といい、この有限個の点を頂点(vertex)、つないだ線を辺(edge)という。また、各頂点に出入りしている辺の本数をその頂点の次数(degree)という。例えば、図 2 のグラフの頂点 A, D の次数はそれぞれ 2, 5 である。

また、辺 p のように、出発点と終点が同じ頂点である辺を**ループ(loop)**という。グラフ内で一周できる道を**閉路(cycle)**という。例えば、図 2 のグラフを見てみると、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ が閉路である。

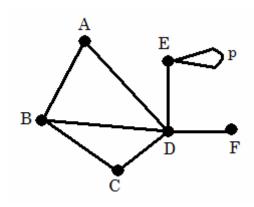


図2 平面グラフの例①

平面グラフ G のどの 2 点も辺でつながれているとき、G は**連結グラフ(connected graph)**であるといい、連結グラフ G が、すべての辺を通って出発点に戻る歩道を含むとき、G をオイラーグラフ(Eular graph)という。

また、2点を結ぶ辺が2本以上あるとき、 その辺を**多重辺(multiple edges)**という。 ループや多重辺を含まないグラフを**単純 グラフ(simple graph)**という。

3-2. オイラーの定理

図3のグラフは、図4や図5のようにも書き換えることができる。

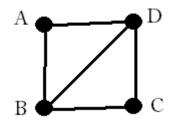


図3 単純グラフ

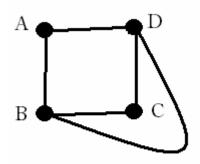


図4 図3と同型なグラフ①

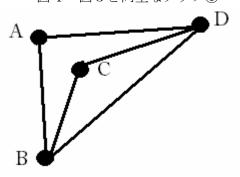


図5 図3と同型なグラフ②

逆に、図4、図5を図3に変形することもできるので、図3から図5はいずれも同型であることがいえる。ここで、2つのグラフが同型(equivalent)であるとは、2つのグラフにおいて、それぞれ対応する各頂点の次数が等しいときをいう。すなわち、グラフにおいては、頂点と頂点がおつきは、方向や距離を考えず、単に各頂点がどの頂点と結びついているかという情報が重要なのである。

さらに、グラフGにおいて、同じ頂点を二度と通らない閉じた道を**サイクル**(cycle)という。

サイクルをもたない、連結されたグラフを**木(tree)**という。また、少なくとも一

つの辺をもった木において、一つの辺の 終点である頂点を**吊り頂点(pendant vertex)**という。

さて、グラフが一筆書きできる場合について考えよう。グラフが一筆書きできるとき、それぞれの頂点から出る辺と入る辺の数が等しい。ただし、始点(出発点)と終点(到着点)は除いて考える。

2つの頂点を除いた頂点の次数がそれぞれ偶数であるとき、このグラフは一筆書きできるといえる。そして、始点と終点が一致する場合には、その頂点の次数も偶数になるが、一致しなければその2つの頂点の次数はそれぞれ奇数となる。

以上のことは、オイラーの一筆書き定理という定理として知られている。

定理1 (オイラーの一筆書き定理)

次数が奇数となる頂点が0個か2個であるグラフは、一筆書きができ、それ以外の場合は一筆書きできない。

「証明]

まずは、グラフGが一筆書きできるとき、Gの頂点のうち、次数が奇数であるものは0個か2個であることを示そう。

上述のように、グラフGが一筆書きできるとき、始点と終点以外の頂点vでは、vに入ってくる辺とvから出て行く辺の数が等しい。つまり、始点と終点の2つの頂点を除いた頂点の次数はすべて偶数である。そして、始点と終点が一致する場合には、その2頂点の次数も偶数になるが、一致しなければその2頂点の次数はそれぞれ奇数となる。

次に、次数が奇数となる頂点が0個または2個であるグラフ G が一筆書きできることを証明しよう。この証明には、辺の数に関する帰納法を用いる。

(i) G は次数が奇数である頂点をもたない、即ち、G のすべての頂点の次数が偶数である場合について考える。

まず、辺の数が 0 のとき、即ち始点のみの場合は、明らかに一筆書きできる。

ここで、辺の数が k 本以下のグラフ(ただし、すべての頂点の次数は偶数である) が一筆書きできていると仮定する。

さて、(すべての頂点の次数が偶数であり、) k+1本の辺からなるグラフ G について考えてみよう。このグラフ G は、始点と終点が一致するので、吊り頂点をもたない。よって、木ではないことがわかる。したがって、G にはサイクル(閉じた道)があることがわかる。ここで、このサイクルに属する辺を一時的にすべて取り除くとグラフはいくつかの部分(これを連結成分(component)という)に分けられる(図 6 参照)。

しかし、これらの部分は、一時的に取り除いたサイクルと共通の頂点をもっている。これらの共通する頂点は、サイクルの頂点でもあるため、もともとの次数より 2 だけ小さくなる。よって、もとのグラフ G からサイクルを除いてできる各部分は、すべての頂点の次数が偶数であり、辺の数はk本以下である。

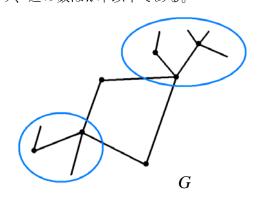


図6 グラフGの連結成分

すると、帰納法の仮定により、これらの各成分は一筆書きできることがわかる。 したがって、サイクルを一周して、連結成分と共有する頂点に着いたとき、その成分を一筆でかくことで、次数が奇数の頂点が0個の場合は証明できる。

(ii) G は次数が奇数である頂点を2つ もつ場合について考える。

まず、始点と終点を含むグラフ上の辺 をそれぞれ取り除く。すると奇数の次数 をもつ頂点がなくなることがわかる。

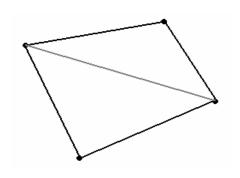


図7 次数が奇数である頂点を 2個もつ場合

このグラフは(i)において議論した、 次数が奇数である頂点をもたない、即ち すべての頂点の次数が偶数であるグラフ になるので、あとは、(i)と同様に証明 できる。

(i), (ii) より、次数が奇数となる頂点が0または2個であるグラフ G が一筆書きできる。

以上から、オイラーの一筆書き定理が 証明された。(Q.E.D.)

上の定理から、一筆書きできるグラフ のことを、オイラーグラフとも呼ぶので、 定理1 (オイラーの一筆書き定理) を言い 換えると、次のような命題になる。

|定理2|(オイラーの定理)

連結グラフGがオイラーグラフである ための必要十分条件は、Gのすべての頂点 の次数が偶数になることである。

3-3. 2色による彩色

まずは、簡単な2-彩色可能な地図の条件を見ていくことにする。以降、地図(map)とは、すべての頂点の次数が3以上で、ループを含まない連結グラフと約束する。

地図の隣接している 2 つの面 (辺を共有する 2 つの面) が同色にはならないように k 色で彩色することができるとき、この地図は k - 彩色可能 (k -colorable) であると定義する。また、地図の隣接している 2 つの頂点が同色にはならないように、頂点を

k色で彩色することができるとき、この地図はk-点彩色可能であるとする。

定理3

地図 G が 2 - 彩色可能であるための必要十分条件は、G がオイラーグラフになることである。

「証明]

G は 2 色で彩色できるはずだから、G の各点 g に対して、g を囲む面の個数は g

偶数でなくてはならない。したがって、各頂点の次数は偶数であるので、定理2(オイラーの定理)から、Gがオイラーグラフであることが分かる。

逆に、G がオイラーグラフであると仮定する。G の面を彩色するために、任意に面 F を選んで、F を色 1 (例えば赤)で塗る。F の中の点 x から、他の面 H の点 y へ行

く線をかく。ただし、この線xyはグラフ Gの頂点を通らないようにする。

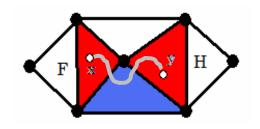


図8 グラフの彩色

この線xyが偶数本のGの辺と交わると

き、面Hを色 $1(\frac{1}{5})$ で、奇数本の辺と味 割るときには、面Hを色2(例えば青)で 彩色する。図8を見よ。

このように彩色してから、xyのような

2本の線からできる閉路を考えると、Gはオイラーグラフであることから、この閉路は G の偶数本の辺としか交差せず矛盾が起こることはない。(Q.E.D.)

3-4. 地図の彩色とグラフの彩色

地図の彩色とグラフの彩色の関係をみるためには、**双対性(duality)**という考え方が必要である。平面グラフ G に対して、グラフ G*を次のように作る。

- ① G の各面 F から 1 点 x を選び、これを G^* の頂点とする。
- ② G の各辺 e にだけ交わるような線 f を引き、この e に接する 2 つの面 内の点を結び、 G^* の辺とする。

このとき、この新しいグラフ G*を G の **(幾何学的) 双対**という。

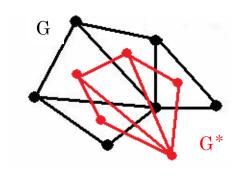


図9 グラフ G の幾何学的双対 G*

定理4

G をループのない平面グラフとして、 G^* を G の双対とする。このとき、G が k - 点彩色可能であるための必要十分条件 は、 G^* が k - 彩色可能であることである。

[証明]

Gをループのない平面グラフとして、その双対 G^* は地図であるとする。もし、G が k - 点彩色できれば、 G^* の各面には G の点がちょうど 1 個ずつ含まれているので、その色で G^* の各面を彩色できる。したがって、 G^* は k - 彩色可能である。逆に、平面グラフ G の双対 G^* が k - 彩色可能であるとする。G の各点は G^* のいずれかの面に含まれているので、その面で G の頂点を彩色できる。したがって、G は k - 点彩色可能である。(Q.E.D.)

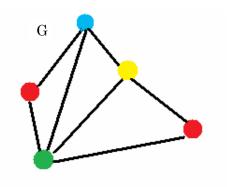


図 10 グラフ G の点彩色

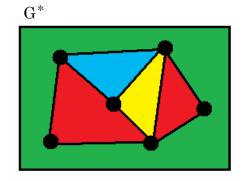


図 11 グラフ G の面彩色

最後に、地図の彩色とグラフの彩色の 関係について述べたい。平面グラフの四 色定理とは、「すべての平面グラフは4 - 点彩色可能である」というものである。 定理2から、四色定理の同値性が示され る。

定理5

地図に関する四色定理は平面グラフに 関する四色定理と同値である。

[証明]

平面グラフGは、ループを含まないものとする。その双対G*は地図であり、地図が4-彩色可能であるという仮定から、定理4から明らかに、グラフGは4-点彩色可能である。

逆に、地図 G の双対 G^* を考える。このとき G^* は平面グラフであり、仮定から 4 - 点彩色可能である。したがって、 G^* の双対 G は 4 - 彩色可能である。(Q.E.D.)

3-4. 辺彩色

3-3節では、地図の彩色(これを**面彩色(face-coloring)**ともいう)と、平面グラフの**頂点彩色(vertex-coloring)**を「双対」という考え方でつなげられることを学習した。ほかにも「**辺彩色(edge-coloring)**」という考え方がある。

グラフ G の隣接する辺は同じ色にならないように、グラフ G の辺をk 色で彩色できるとき、このグラフ G はk - 辺彩色可能(k - colorable(e))であると定義する。また、グラフ G がk - 辺彩色可能であるが、(k-1)辺彩色可能でないとき G の彩色指数(chromatic index)はk であるといい、 $\chi(G)=k$ と表すことにする。G の

最大次数を Δ とすると、 $\chi(G) \ge \Delta$ であることは自明である。図12のグラフGに対しては、 $\chi(G)=4$ である。

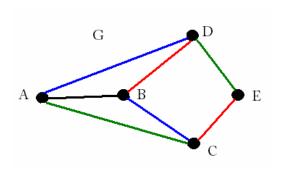


図 12 $\chi(G) = 4$ であるグラフ G

次の定理6は、3次(すべての点の次数が3以下)の単純グラフGの彩色指数と四色定理の関係を示している。

定理 6

四色定理が成り立つならば、どのような 3次の地図 G に対しても、 $\chi(G)=3$ が 成り立つ。

「証明」

G の面に関する 4-彩色が与えられていると仮定して、そこで用いられる色を順に $\alpha=(1,0)$, $\beta=(0,1)$, $\gamma=(1,1)$, $\delta=(0,0)$ と表すことにする。このとき、Gの3-辺彩色は次のようにして得られる。

各辺 e が接する 2 つの面の色を $\mod 2$ で加えて得られる色によって辺 e を彩色 すればよい。例えば、辺 e に接する 2 つの 面が色 α と γ で彩色されているとき、

 $(1, 0)+(1, 1)=(0, 1) \pmod{2}$

であるのでeを β で彩色することになる。

ここで、各辺に接する 2 つの面の色は異なることから、 δ はこの辺彩色には現れない。そして隣接する 2 本の辺が同じ色を共有しないことも明らかである。(Q.E.D.)

定理 6 は逆も成立することが知られているが、今回は証明を省略する。

4. 今後の課題

本年度は、参考文献[1]を輪読し、地図の塗り分けをきっかけに、グラフの彩色について考察した。グラフ理論にはさらに深い内容があるため、今後も引き続き、学習・研究を継続したい。

5. 参考文献

[1]「グラフ理論入門」, R. J. ウィルソン著, 西関隆夫、西関裕子共訳, 近代科学社 (2001)

6. 謝辞

顧問の川口先生には、わからない部分を説明してもらい、公開研究会でのポスターや本稿についても、いろいろなアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

ピタゴラス三角形とピタゴラス数

3年A組 清水 悠平 3年C組 佐藤 圭 3年C組 森 宇宏 指導教員 川口 慎二

1. 概要

サイエンス研究会数学班3年生は、幾何の授業で「ピタゴラスの定理(三平方の定理)」を 学習した。そのとき、この定理の証明が 100 通り以上あることを知った。さらに、顧問の 先生から、直角三角形の3辺の関係を代数的に調べることもできるという話を聞いて、ピ タゴラス数について興味を持った。その理解のために、参考文献[1]を輪読しながら、基本 事項の習得を行った。本稿では、[1]の内容をまとめながら、基本的事実について紹介する。

キーワード ピタゴラスの定理(三平方の定理)、ピタゴラス三角形、ピタゴラス数、 ピタゴラス方程式、既約、互いに素、フェルマーの大定理

2. 研究の背景と目的

2-1. ピタゴラス三角形とは

ピタゴラス三角形(Pythagorean

triangle)とは、3辺の長さを整数で表すことができる直角三角形である。

B.C.2000 頃のエジプトではすでに辺の 長さが 3, 4, 5 のピタゴラス三角形の存在を 知られていた。このようにピタゴラス三角 形はとてつもなく長い歴史がある。

また、よく知られているように直角三角 形の3辺の間には、ピタゴラスの定理(定理 1)が成り立つことを授業で学習した。

定理1 (ピタゴラスの定理)

直角を挟む2辺の長さがx,yである直角 三角形の斜辺の長さをzとしたとき、

$$x^2 + y^2 = z^2 \cdots (1)$$

が成り立つ。

このとき、等式(1)を**ピタゴラス方程式** (Pythagorean equation)という。

また逆に、等式(1)が成り立つ三角形は直角三角形となる(「ピタゴラスの定理の逆」と呼ばれる)。 そして、ピタゴラス三角形の3辺の長さの組み合わせをピタゴラス数(Pythagorean number)という。

あるピタゴラス三角形を拡大すると、新しい直角三角形ができる。新しくできた直角三角形は、各辺が自然数であり、もとの三角形に相似なので、これもまたピタゴラス三角形となる。このようにあるピタゴラス三角形を 2倍,3倍,4倍…としていくと、次々に新たなピタゴラス三角形ができる。つまり、1つのピタゴラス三角形がら無数のピタゴラス三角形が生み出される。これを記号で表現しよう。一般に、3辺がx,y,zであるピタゴラス三角形を(x,y,z)と表すことにする。このとき、(kx,ky,kz)

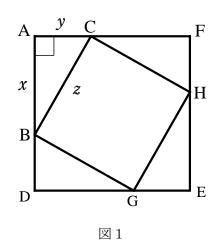
(ただし、 $k = 1,2,3,\cdots$)はすべてピタゴラス 三角形になる。

例えば、(3, 4, 5)という組み合わせのピ タゴラス三角形からは、(6, 8, 10), (9, 12, 15)などのピタゴラス三角形が得られる。

ここで、ピタゴラスの定理の証明をいくつか紹介する。

「証明1]

3辺の長さがx,y,zであり、 $\angle A=90^\circ$ である直角三角形 ABC を考える。まず、 \triangle ABC と合同な直角三角形を図1のように 4枚並べて、正方形 ADEF をつくる。



このとき、 \triangle ABC, \triangle DGB, \triangle EHG, \triangle FCH はすべて合同である。すると、

$$AB=DG=EH=FC=x$$
,
 $AC=DB=EG=FH=y$,
 $BC=GB=HG=CH=z$

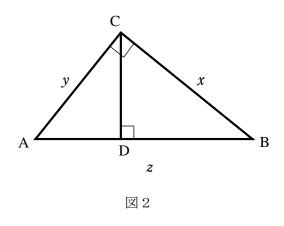
であるから、正方形 BGHC の面積S は、 $S=c^2$ と表すことができる。一方、正方形 BGHC の面積は、一辺が(x+y) の正方形から、4 枚分の直角三角形の面積を引いたものなので

$$(a+b)^2-4\times\frac{1}{2}ab$$

と表すこともできる。したがって、 $c^2 = (a+b)^2 - 2ab = a^2 + b^2 = c^2$ となる。(Q.E.D.)

「証明 2]

図 2 のように、3 辺の長さが x, y, z であり、 \angle C = 90° である直角三角形 ABC を考える。 頂点 C から斜辺 AB へ下ろした垂線の足を D とする。



ここで、 $\angle D=90^{\circ}$ より、 $\triangle ABC \diamondsuit \triangle ACD \diamondsuit \triangle CBD$ となる。よって、 $\triangle ABC$ と $\triangle ACD$ の相似比は y:AD=z:y であり、よって、 $AD=\frac{y^2}{z}$ …①である。

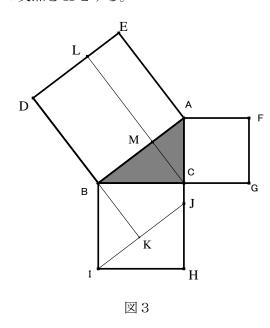
同様に、 $\triangle ABC$ と $\triangle CBD$ の相似比は x:BD=z:xであり、したがって、BD $=\frac{x^2}{z}$ …②となる。 いま、z=AB=AD+BD であるから、

$$z = \frac{y^2}{z} + \frac{x^2}{z} = \frac{x^2 + y^2}{z}$$

が成り立つ。この両辺にz (>0)を掛ける と、 $z^2 = x^2 + y^2$ となる。(Q.E.D.)

「証明3]

3 辺の長さが x,y,z (BC= x , CA= y , AB=zとする)であり、 \angle A=90° である直角三角形 ABC を考え、図 3 のように、各辺を一辺とする正方形を辺上につける。また、点 C から辺 DE におろした垂線の足を L とし、AB との交点を M とする。また、I を通り AB に平行な直線 IJ を引き、線分 AH との交点を J、線分 IJ と辺 BD の延長線との交点を K とする。



すると、IJ//BA、IB//JA であるため、四 角形 ABIJ は平行四辺形である。ここで、 □ABIJ=BI×BC なので、

 $\square ABIJ = \square BIHC \cdots \bigcirc$

ここで、□ABIJ と□BIHC はそれぞれ平 行四辺形 ABIJ と正方形 BIHC の面積をそ れぞれ表している。

また、 \triangle IBK と \triangle CBM において、BI=BC であり、

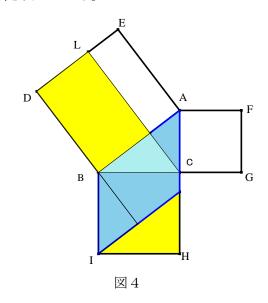
 $\angle IBK = 90^{\circ} - \angle KBC = \angle CBM$ なので、ともに直角三角形であり、斜辺と1鋭角が等しいので、 $\triangle IBK \equiv \triangle CBM$ であ

る。

よって BK=BM となり、また $KD/\!\!/CL$ であるから、

 \square ABIJ=AB×BK=BD×BM = \square BMLD ···②

ここで、□BMLD は長方形 BMLD の面 積を表している。



②より、

 \square BIHC= \square BMLD ···③

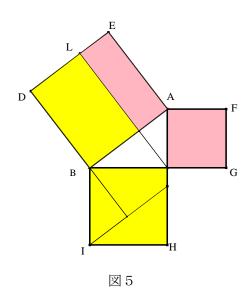
であり、同様に、

 $\square ACGF = \square AELM \cdots 4$

となる。③, ④より、

□BIHC+□ACGF=□AEDB つまり、 $x^2 + y^2 = z^2$ が成り立つ。

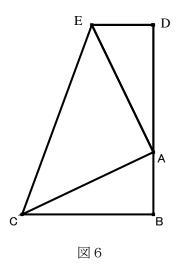
(Q.E.D.)



「証明4]

3 辺の長さが x,y,z (AB= x, BC= y, CA=zとする)であり、 \angle B=90° である直角三角形 ABC を考える。

図 6 のように、直角三角形の 1 辺 AB の 延長上に AD=BC となるような点 D をとり、 $AD\botDE$ かつ DE=AC となるような点 E をとる。 E と A, E と C を結ぶ。



 Δ EDA & \triangle ABC において、AD=CB であり、DE=BA、&ADE=&CBA=&90°なので、 \triangle EDA=&ABC &なる。よって AE=

CA = z cap = z

ここで、四角形 BDEC は上底が DE=x, 下底が BC=y, 高さが BD=AB+AD=x+yの台形であるので、その面積は

$$\frac{1}{2}(x+y)^2 = \frac{1}{2}(x^2 + 2xy + y^2) \cdots \text{ }$$

である。また、この台形は \triangle ABC+ \triangle ABE + \triangle EAD と表すことができる。 \triangle EAD は 一辺が z の直角二等辺三角形なので、

$$\triangle EAD = \frac{1}{2} \quad \cdots ②$$

である。したがって、この台形 BDEC の面 積は、②より、

$$\frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{2}xy + \frac{1}{2}xy = \frac{1}{2}z^2 + xy \quad \cdots \text{ } 3$$

となる。ゆえに、①, ③から、

$$\frac{1}{2}(x^2 + y^2) + xy = \frac{1}{2}z^2 + xy$$

すなわち、 $x^2 + y^2 = z^2$ が成り立つ。 (Q.E.D)

本稿では、ピタゴラス三角形のもつ幾何 的性質と、ピタゴラス数のもつ代数的性質 の対応に注目しながら、ピタゴラス数の基 本的な性質をまとめたい。

3. 研究内容

3-1. 既約なピタゴラス三角形

2つの整数 a,b が**既約(irreducible)**であるとは、2数の最大公約数が 1 であるときをいう。一般に、2数 a,b の最大公約数を (a,b) と表すので、a,b が既約であることを (a,b) = 1 と表す。このとき、a,b は**互いに素(coprime)**であるともいう。さらに、

(a,b)=1 かつ $b \neq 0$ であるとき、分数 $\frac{a}{b}$ は これ以上約分できない。このような分数を **既約分数(irreducible fraction)**という。

ピタゴラス三角形が既約であるとは、3 辺の、どの2つの辺の長さも既約になって いるときをいう。

既約なピタゴラス三角形を求めるために、まず既約なピタゴラス三角形(x,y,z)について、この3辺の長さの性質を調べていく。以降、ピタゴラス三角形(x,y,z)を考え、zをその斜辺とする。つまり、 $x^2+y^2=z^2$ が成り立っているものとする。

まず、斜辺以外の2辺については、それらの偶奇性(パリティ)が決定される。証明のために、次の補題を準備しておく。

補題I

奇数の平方を8で割ると、1余る。

「証明]

ある自然数kをもちいて、ある奇数を2k+1と表す。この平方は

 $(2k+1)^2 = 4k^2 + 4k + 1 = 4k(k+1) + 1$ と なる。このとき、k(k+1) は連続 2 数の積ゆえ偶数なので、4k(k+1) は 8 で割り切れる。ゆえに、 $(2k+1)^2$ は 8 で割ると 1 余る。 (Q.E.D.)

定理2

x, *y* は(奇数、偶数)または(偶数、奇数) の組合せとなる。

「証明]

まず仮定として、x,yが互いに素であるとする。

(i) どちらも偶数である場合

x = 2m, y = 2n (m, n は自然数)と表すことができるので、どちらも 2 で割ることができ、2 数が互いに素であるという仮定に反するため、起こり得ない。

(ii) どちらも奇数である場合

補題 I から、2つの奇数の平方の和を 8 で割ると 2 余ることがわかります。したがって、2つの奇数の平方の和は4 で割り切ることができない。奇数の平方は奇数なので、2つの奇数の平方の和は偶数になる。つまり、 z^2 は偶数になる。ゆえに、z も偶数であるとわかる。

ここでz = 2k とすると、 $z^2 = 4k^2$ となり 4 の倍数になる。つまり、 $x^2 + y^2$ が 4 の倍数である。これは、2 つの奇数の平方の和を 4 で割り切ることができないという事実に反するので、2 数が両方奇数ということ はあり得ない。

(i), (ii)から、x,yは一方が奇数であり、 一方が偶数でなければならないことが示さ れた。(Q.E.D.)

x,y,zをより具体的に求めるためには、次の補題が必要である。この補題は、2数を因数分解して考えれば、直感的には正しく思える。しかし、数学的に正確な証明をするためには、素因数分解の一意性を認めておく必要がある。ここでの証明は行わないので、参考文献[2]などを参照せよ。

補題Ⅱ

2つの互いに素である数の積が平方数の とき、この2数はどちらも平方数でなけれ ばならない。

定理3

x,y,zは互いに素な2数m,nを用いて、 それぞれ

 $x = m^2 - n^2$, y = 2mn, $z = m^2 + n^2$ と表すことができる。

「証明]

定理 2 から、x,y の組の一方が奇数で、 もう一方が偶数であることは証明された。 ここで、x を奇数、y を偶数とおいく(するとz は奇数となる)。

ピタゴラス方程式を変形させ、

 $y^2 = z^2 - x^2 = (z + x)(z - x)$ …① としたとき、z + x とz - x は、x, z がともに奇数であることから、どちらも偶数となる。よって整数a,bを用いて、

z+x=2a, z-x=2b …② と表すことができる。ゆえに、

z=a+b, x=a-b …③ となる。この等式からa,bが互いに素であることが導かれる。

なぜならば、背理法を用いて、a,bが 1 より大きな公約数 d をもつとすると、③から d は x,z の公約数となる。ゆえに、z+x と z-x も公約数 d をもつことになる。ここで①から、 d^2 は y^2 の約数になり、d は y の約数ともなる。このとき、d は x,y の公約数となり、x,y が互いに素であるという仮定に反する。したがって、a,b は互いに素でないといけない。

また、自然数 c を用いて y = 2c と表すことができるので、①,②から、 $4c^2 = 2a \times 2b$,つまり、 $c^2 = ab$ …④となる。ここで、補題 \mathbb{I} と④から、 $a = m^2$, $b = n^2$ と表せる。いま、 $a \ge b$ が互いに素であるので、 $m \ge n$ も互いに素であることが分かる。③から

x,z は、

 $x=m^2-n^2$, $z=m^2+n^2$ となる。 さらに、 $c^2=ab=m^2n^2$ より、, y=2c=2mn

である。こうして、互いに素な2数m,nを用いて、x,y,zはそれぞれ

 $x = m^2 - n^2$, y = 2mn, $z = m^2 + n^2$ …⑤ と表すことができた。(Q.E.D.)

ちなみに、m,n がともに偶数または奇数 のとき、 $x = m^2 - n^2$ から、x が偶数となり、最初の仮定に反するので、m,n の一方 が偶数、他方が奇数でないといけないこと がわかる。

このことからわかるように、ピタゴラス 三角形の斜辺でない2辺のうちどちらか は4で割りきることができる。したがって、 3辺がすべて素数であるピタゴラス三角 形は存在しないことになる。

これまでをまとめると、次の定理のように記述できる。

定理4

辺yが偶数であるような既約なピタゴラス三角形は、すべて

 $x = m^2 - n^2$, y = 2mn, $z = m^2 + n^2$ (m > n)から求められる。ただし、m, n は 一方が偶数で他方が奇数であるような既約な任意の2数である。また、y が偶数であるような既約なピタゴラス三角形(x,y,z) は、このような2数m, n によって一意的に定まる。

[証明]

m,nは互いに素な整数で、m>nとし、

さらに一方が偶数、もう一方が奇数であるとする。⑤によって、これらの数から既約なピタゴラス三角形(x,y,z)の辺が決まる。恒等式

 $(m-n)^2 + (2mn)^2 = (m+n)^2$ から、ピタゴラス方程式が成り立つことは明らかである。

次に、⑤のように定めたx,yが互いに素になることを示そう。そこで、x,yが公約数d (d>1)をもつとする。x は奇数なので、d も奇数となる。また、d はz の約数にもなる。すると、⑤から m^2+n^2 と m^2-n^2 が公約数d を持つことになり、 $2m^2$ と $2n^2$ が d で割り切れる。ゆえに m^2 と n^2 も d で割り切れる。

しかし、これはm,nが互いに素であるという最初の条件に反するので、x,yが互いに素であることになる。

最後に、m,n が異なる (x,y,z) の組み合わせには、異なったピタゴラス三角形が対応するということを確かめる。これは、⑤から

 $2m^2 = x + z$, $2n^2 = x + z$ となるため x, y, z が一致した場合 m, n も 一致する。したがって、m, n が異なると x, y, z も異なることが示された。(Q.E.D.)

定理5

y が偶数であるようなすべてのピタゴラス三角形(x, y, z) は式

$$x = kl$$
, $y = \frac{k^2 - l^2}{2}$, $z = \frac{k^2 + l^2}{2}$

によって表される。ここでk とl は互いに素なすべての奇数の組を動く。しかもy が偶数であるような既約なピタゴラス三角形(x,y,z) はこれによって一通りに表され

る。

「証明〕

ピタゴラス方程式 $x^2 + y^2 = z^2$ は、因数 分解により、 $x^2 = (z + y)(z - y)$ と表すこ とができる。

ここで、yは偶数、x,zは奇数である。 よって、u=z+yとv=z-yはともに奇数で互いに素である。すると、 $x^2=uv$ と表すことができる。

したがって、 $u = k^2$ 、 $v = l^2$ をみたすような互いに素な2数k,lが存在する。つまり、x = klであり、

$$x = kl$$
, $y = \frac{k^2 - l^2}{2}$, $z = \frac{k^2 + l^2}{2}$...

と表される。一意性については、定理4と同様に証明できる。(Q.E.D.)

y が偶数であるような既約なピタゴラス三角形を無限に求めたければ、まずkに奇数の値 $3,5,7,9,\cdots$ を順に当てはめ、lにk より小さくk と互いに素な奇数の値を順に当てはめる。最後に公式⑦によってx,y,zの値を計算しればよい。

公式⑦によって最初の 20 個の既約なピタゴラス三角形を次ページの表1に示す。

あらゆるピタゴラス三角形を求めるには、既約なピタゴラス三角形をなす自然数を次々にかけていけばよい。このようにして、y が偶数であるようなあらゆるピタゴラス三角形を得ることができる。さらに、x と y を入れ替えたピタゴラス三角形を追加すれば、すべてのピタゴラス三角形が

得られる。

このような性質を用いて、特別な場合の ピタゴラス三角形を調べていく。

表 1 既約なピタゴラス三角形 (はじめの 20 個)

k	1	X	У	Z
3	1	3	4	5
5	1	5	12	13
5	3	15	8	17
7	1	7	24	25
7	3	21	20	29
7	5	35	12	37
9	1	9	40	41
9	5	45	28	53
9	7	63	16	65
11	1	11	60	61
11	3	33	56	65
11	5	55	48	73
11	7	77	36	85
11	9	99	20	101
13	1	13	84	85
13	3	39	80	89
13	5	65	72	97
13	7	91	60	109
13	9	117	44	125
13	11	143	24	145

3-2. 100 以下の辺をもつピタゴラス三 角形

3辺の長さがいずれも 100 を超えないようなピタゴラス三角形をすべて求めるには、斜辺の長さが 100 以下であるような三角形を見つければ十分である。

表1をみると、条件を満たすものはたっ

た 16 個しかない。なぜなら $k \ge 15$ とすると、

$$z = \frac{k^2 + l^2}{2} > \frac{15^2}{2} > 100$$

となってしまい、100 を超えてしまうから である。

また、表 1 の最初の 7 個は辺を 2 倍することができ(そうしても辺の長さは 100 を超えない)、同様に最初の 5 個は 3 倍、最初の 3 個は 4 倍または 5 倍、最初の 2 個は 6 倍または 7 倍、最初の 1 個は 8 倍から 19 倍まですることができ、合計 50 個のピタゴラス三角形を求めることができる。最後に x,y の値を入れ替えることによってできた 50 個を加えて、辺がすべて 100 以下であるピタゴラス三角形を合計 100 個求めることができた。

3-3. 連続する整数を2辺にもつピタゴ ラス三角形

表1に挙げた既約なピタゴラス三角形を見ると、(3, 4, 5)というペアは連続する3数からできている。このようなピタゴラス三角形はこれしかない。この事実は、簡単に証明することができる。

定理6

連続する3数を辺としてもつピタゴラス三角形は(3,4,5)のみである。

「証明〕

ある自然数 $n(n \ge 2)$ を用いて、連続する 3数をn-1,n,n+1と表す。この3数がピ タゴラス方程式を満たすとき、

$$(n-1)^{2} + n^{2} = (n+1)^{2}$$
$$n^{2} - 2n + 1 + n^{2} = n^{2} + 2n + 1$$

から、 $n^2 = 4n$,n(n-4) = 0 となり、 $n \ge 2$ なので、n = 4である。

よって、この条件を満たすものは(3, 4, 5)のみである。(Q.E.D.)

また、辺の長さが等差数列となるものを 求めることも簡単である。

定理7

等差数列である3数を辺としてもつピタゴラス三角形は(3,4,5)に相似である。

[証明]

定理6と同じように自然数kを公差として、3辺をn-k,n,n+kとする。

この3数がピタゴラス方程式を満たすとき、

$$(n-k)^2 + n^2 = (n+k)^2$$

 $n^2 - 2kn + k^2 + n^2 = n^2 + 2kn + k^2$
から、 $n^2 = 4kn$, $n(n-4k) = 0$ となり、

から、 $n^2 = 4kn$,n(n-4k) = 0 となり $n \ge 2$ なので、n = 4k である。

この条件を満たすものは(3k,4k,5k)であり、これらはすべて(3,4,5) と相似なものである。(Q.E.D.)

次に2辺の長さが連続する自然数で表せるようなピタゴラス三角形を考える。このとき、x,zは奇数としたので、z-x=1とはならない。したがって、z-y=1となるものを考える。定理5によって、l=1とわかるので、(x,y,z)は

$$x = k$$
, $y = \frac{k^2 - 1}{2}$, $z = \frac{k^2 + 1}{2}$ ···(2)

となる。

この公式によって、z-y=1であるすべてのピタゴラス三角形が求められ、最初の

いくつかを挙げると次のようになる。

(3, 4, 5), (5, 12, 13), (7, 24, 25), (9, 40, 41), (11, 60, 61), (13, 84, 85), … ここで、この公式以外でこのような三角 形を求める方法を2つ紹介する。

1つ目は、次のメスネーラ(Moessnera) の恒等式を用いる方法である。

定理8(メスネーラの恒等式)

すべての自然数nに対して、

$$(10n-5)^2 + \{50n(n-1)+12\}^2$$

$$= \left\{ 50n(n-1) + 13 \right\}^2$$

が成り立つ。

これによって求められるものの例として、nに1から5を代入すると、(5, 12, 13), (15, 112, 113), (35, 612, 613), (45, 1012, 1013)などが挙げられる。

もうひとつの方法は、まずkが奇数であることから、k=2n+1とおき、さらにsを整数とし、 $n=10^s$ とおくと、(2)から

$$x = 2 \times 10^{s} + 1 = 20 \cdot \cdot \cdot \cdot 01$$

$$y = 2 \times 10^{2s} + 2 \times 10^{s} = 20...020...02$$

 $z = 2 \times 10^{2s} + 2 \times 10^{s} + 1 = 20...020...01$ が得られる。

例えば、s = 1,2,3,4 を代入すると下表 2 を得る。

表 2 s = 1,2,3,4 の場合

Х	у	Z
21	220	221
201	20200	20201
2001	2002000	2002001
20001	200020000	200020001

このように、機械的にいくらでもピタゴ ラス三角形を求めることができる。

次に、直角をはさむ2辺の長さが連続する自然数で表せるピタゴラス三角形を考えよう。まず、次の事実はすぐに証明される。

補題Ⅲ

直角をはさむ2辺の長さが連続する自然 数で表せるピタゴラス三角形は無数に存在 する。

「証明]

ある 2 つの自然数 x,z によって表される ピタゴラス三角形 (x,x+1,z) があるとき、 (3x+2z+1, 3x+2z+2, 4x+3z+2)も ピタゴラス三角形になる。

実際に、

$$(3x+2z+1)^{2} + (3x+2z+2)^{2}$$

$$= 18x^{2} + 24xz + 8z^{2} + 18x + 12z + 5$$
...(3)

である。ここで、(x,x+1,z)はピタゴラス 三角形なので、 $x^2+x^2-2x+1=z^2$ 、つま り $2x^2+2x+1=z^2$ である。したがって(3) から、

$$18x^{2} + 24xz + 8z^{2} + 18x + 12z + 5$$
$$= (2x^{2} + 2x + 1) + 16x^{2} + 24xz$$

$$+8z^{2} + 16x + 12z + 4$$

$$= 16x^{2} + 24xz + 9z^{2} + 16x + 12z + 4$$

$$= (4x + 3z + 2)^{2}$$

となり、

(3x+2z+1, 3x+2z+2, 4x+3z+2) がピタゴラス三角形であることがわかる。

直角をはさむ2辺が連続する自然数で表せるピタゴラス三角形を、この式に当てはめることでできた三角形は、これもまた直角をはさむ2辺が連続する自然数で表せるピタゴラス三角形である。この操作を繰り返すと、次々に、直角をはさむ2辺が連続する自然数で表せるピタゴラス三角形が求められる。(Q.E.D.)

このようにして求められるもので、最初の4つを挙げると次のようになる。(3, 4, 5), (20, 21, 29), (119, 120, 169), (696, 697, 985)である。

次に、上の方法によって直角をはさむ2 辺が連続する自然数で表せるピタゴラス三 角形がすべて求められることを証明しよう。

定理9

直角をはさむ 2 辺が連続する自然数で表せるようなピタゴラス三角形は、必ず三角形の無限列 (3,4,5), f(3,4,5), ff(3,4,5) …の中に現れる。ただし、f(x,x+1,z) はピタゴラス三角形

(3x+2z+1, 3x+2z+2, 4x+3z+2) を表すと定める。

この定理9を証明するために、次の補題を証明する。

補題IV

x>3のとき、(x,x+1,z)がピタゴラス 三角形ならば、f(p,p+1,q)=(x,x+1,z)を満たす(p,p+1,q)もピタゴラス三角形 であり、q < zである。さらに、 (p, p+1, q) = (3x-2z+1, 3x-2z+2, 3z-4x-2)である。

「証明]

まず、

(p, p + 1, q)

= (3x-2z+1,3x-2z+2,3z-4x-2)となることを示す。つまり、(p,p+1,q)が f(p,p+1,q) = (x,x+1,z)…①

を満たすことを確かめればよい。

$$3p - 2q + 1$$

$$= 3(3x-2z+1) + 2(3z-4x-2) + 1 = x,$$

$$4p+3q+2$$

=4(3x-2z+1)+3(3z-4x-2)+2=zとなることから、(p,p+1,q)は①を満たす。 次に、p>0, 0 < q < zとなることを示す。x > 3 ゆえ、

 $x^2 > 3x = 2x + x > 2x + 1$ である。ところが、(x, x+1, z) がピタゴラス三角形なので、 $x^2 + (x+1)^2 = z^2$ であるから、

$$4z^{2} = 8x^{2} + 4 - (2x + 3)$$
$$= 9x^{2} + 8x + 4 - x^{2}$$
$$< 9x^{2} + 8x + 4 - (2x + 3)$$

= $9x^2 + 6x + 1 = (3x + 1)^2$ であるから、2z < 3x + 1…②、つまり、 p = 3x - 2z + 1 > 0

となる。ここで、x>0に注意すると、不 等式②を弱めて、2z<4x+2とすること ができる。ゆえに、z<2x+1 となり、さ らに、

 $x^{2} + (x+1) = z^{2}$ かつ x > 0 であるから、

 $9z^2 = 18x^2 + 18x + 9$ $> 16x^2 + 16x + 4 = (4x + 2)^2$ つまり、3z > 4x + 2 となる。したがって、0 < 3z - 4x - 2 = q である。一方、q = 3z - 4x - 2 < 3z - 2z = zゆえ、0 < q < z となり、これで不等式は 証明された。

最後に、(p, p+1, q) がピタゴラス三角 形になることを証明する。 $p^2 + (p+1)^2 = (3x-2z+1)^2 + (3x-2z+2)^2$ $= 18x^2 + 8z^2 - 24xz + 18x - 12z + 5$ $q^2 = (3z-4x-2)^2$ $= 16x^2 + 9z^2 - 24xz + 16x - 12z + 4$ であるが、 $z^2 = 2x^2 + 2x + 1$ であるので、 $16x^2 + 9z^2 - 24xz + 18x - 12z + 5$ $= 18x^2 + 8z^2 - 24xz + 18x - 12z + 5$ となる。したがって、 $q^2 = p^2 + (p+1)^2$ が 成り立ち、補題は証明された。(Q.E.D.)

ここで、ピタゴラス三角形 (x, x+1, z) に対して、

$$f(p, p+1, q) = (x, x+1, z)$$

を満たすピタゴラス三角形(p, p+1, q)を対応させる操作をgとして表すことにすると、gはfの逆操作になる。つまり、

$$g(x, x+1, z) = (p, p+1, q)$$

= $(3x-2z+1,3x-2z+2,3z-4x-2)$
となる。

「定理9の証明〕

補題IVによって、小さい 2 辺が連続する 自然数になっているピタゴラス三角形 (x,x+1,z) (x>3)から、また新たに、条 件を満たすピタゴラス三角形(p,p+1,q)ができる。

そこでさらにx>3ならば、再び補題 \mathbb{N}

によって新たなピタゴラス三角形ができる。しかし、また同様に操作を続けたからといって、無限に新たな三角形ができることはない。この操作をするごとに斜辺の長さは短くなっていくからである。だから必ず、ある整数nに対して、ピタゴラス三角

形 $(x_n x_n + 1, z_n) = g^n(x, x + 1, z)$ (ただ し、 $x_n = 3$)に行きつくだろう。すると、

$$x_n^2 + (x_n + 1)^2 = z_n^2$$

から、 $z_n = 5$ でなければならない。したがって、ある整数n に対して、

$$g^{n}(x,x+1,z) = (3, 4, 5) \cdots ①$$
 が成り立たなければならない。

ここで、x > 3 である任意のピタゴラス 三角形(x,x+1,z) に対して、

$$fg(x, x+1, z)$$

$$= f(3x-2z+1,3x+2z+2,3z-4x-2)$$

= $(x, x+1, z)$... ②

が成り立つ。よって、

ffgg(x,x+1,z)=(x,x+1,z)であり、一般に $k=1,2,3\cdots$ に対して

 $f^k g^k (x, x+1, z) = (x, x+1, z)$ …③ が導かれる。したがって、①より、ある整 数n に対して、 $(x, x+1, z) = f^n (3,4,5)$ と なり、定理 9 は証明された。(Q.E.D.)

3-4. 辺が3または5で割り切れるピタ ゴラス三角形

3-1節で述べたように、すべてのピタ ゴラス三角形では直角をはさむ2辺のう ち少なくとも一つは4で割りきれなくては ならない。

さらに、次の事実が成り立つ。

定理 10

任意のピタゴラス三角形について、直角 をはさむ2辺のうち少なくとも一つは3で 割り切れなければならない。

「証明〕

この定理を証明するために、あるピタゴ ラス三角形(x,y,z)が存在して、直角をは さむ 2 辺 x,y はどちらも 3 で割り切れない と仮定する。このとき、

$$x = 3k \pm 1$$
, $y = 3l \pm 1$

(k,l は整数)とおく。

すると、ピタゴラスの定理において、 $x^2 + y^2 = 3(3k^2 + 3l^2 \pm 2k \pm 2l) + 2 \cdots$ ① となる。ところが、この式①の右辺は平方数にはなりえない。まず、この数は3では割り切れないので、3の倍数の平方でないことは明らかである。また、3で割り切れない数 $3t \pm 1$ (t は整数)の平方は

$$(3t \pm 1)^2 = 3(3t^2 \pm 2t) + 1$$

であり、3で割ると1余る。しかし、 $x^2 + y^2$ は3で割ると2余る。したがって、3で割り切れない数の平方にもなり得ない。

こうして、直角をはさむ2辺のいずれもが、3で割り切れないという仮定は矛盾を引き起こす。

ゆえに、x,yのうち一方は3で割り切れないといけない。(Q.E.D.)

実例を見ると、(5, 12, 13)のように3で割り切れる数と、4で割り切れる数が一致することもあり、また、(3, 4, 5)のように3で割り切れる数と、4で割り切れる数が一致しないこともある。

すべてのピタゴラス三角形について、直 角をはさむ2辺の少なくとも一方がnで 割り切れるとき、このような自然数nは、1,2,3,4に限られることがすぐわかる。なぜなら、ピタゴラス三角形(3,4,5)をとると小さい2辺のどちらをとっても4より大きい自然数では割り切れないからである。

ピタゴラス三角形の3辺については、次 の事実がある。

定理 11

任意のピタゴラス三角形について、3 辺 のうち少なくとも一つは5で割り切れなければならない。

[証明]

この定理を証明するために、数nは5で割り切れないと仮定する。すると、整数kを用いて、nは $n=5k\pm1$ あるいは $n=5k\pm2$ の形をしている。

$$n = 5k \pm 1$$
 の場合には $n^2 = 5(5k^2 \pm 2k) + 1$, $n = 5k \pm 2$ の場合には $n^2 = 5(5k^2 \pm 4k) + 4$

が成り立つ。

以上から、5で割り切れない数の平方は、 5で割ると1または4あまることが分かる。

もし、ピタゴラス三角形(x,y,z)のx,yがどちらも5で割り切れないとすると、上の式から x^2,y^2 はいずれも1または4余るため、その結果 x^2+y^2 を5で割った余りは2,3,0のどれかになる。ここで、上で示したように、 z^2 は5で割って2または3で余ることはない。したがって、 z^2 は5で割ると0あまるという最後の条件のみに当てはまることが分かる。つまり、 z^2 が5で割り切れるので、zも5で割り切れると

いうことが分かった。(Q.E.D.)

よって、直角をはさむ2辺がいずれも5で割り切れない場合は、斜辺が5で割り切れない場合は、斜辺が5で割り切れないといけない。

また、既約なピタゴラス三角形では明らかに5で割り切れる辺はただ1つしかない。次の三角形

(3, 4, 5), (5, 12, 13), (21, 20, 29) を見てわかるように、5 で割ることのできる辺は、直角をはさむ2 辺のうち偶数のものであったり、奇数のものであったり、または斜辺であったりする。

以上からわかるように、すべてのピタゴラス三角形において、3辺のうち1つがnで割り切れるとき、このような自然数nは1, 2, 3, 4, 5のいずれかに限られる。

3-5. ピタゴラス三角形の辺の値

ここで、どのような自然数nを与えたら、 直角をはさむ2辺のうち、一方がnに等し いピタゴラス三角形を作ることができる のだろうか。

これに対して次の定理を証明しよう。

定理 12

直角をはさむ2辺のうち小さい方がn に等しいピタゴラス三角形が存在するための必要十分条件は、nが2より大きい整数となることである。

「証明〕

この定理を証明するために、まず次のことに注意しよう。つまり、ピタゴラス三角 $\Re(a,b,c)$ において

$$a^{2} = c^{2} - b^{2} = (c+b)(c-b)$$

が成り立ち、またc>bなので、 $b \ge 1$, $c \ge 2$ である。したがって、 $c-b \ge 1$, $c+b \ge 3$ であるため、 $a^2 \ge 3$ となり、a=1とはならない。

$$4 = (c+b)(c-b)$$

が成立しなくてはならず、 $c-b \ge 1$, c+b ≥ 3 であるため、c-b=1, c+b=4 となる。しかし、この式から 2c=5 が導かれ、c が自然数でなくなってしまう。したがって、a=2 ともなり得ない。

このように、ピタゴラス三角形の小さい 2辺はどちらも2より大きいことがわかっ た。

さて、ここで逆に、n が 2 より大きい奇数だとする。すると、

$$n^2 + \left(\frac{n^2 - 1}{2}\right)^2 = \left(\frac{n^2 + 1}{2}\right)^2$$

が成り立ち、また $\frac{n^2-1}{2}$, $\frac{n^2+1}{2}$ はどちらも自然数になるため、ピタゴラス三角形

$$\left(n,\frac{n^2-1}{2},\frac{n^2+1}{2}\right) \cdots \bigcirc$$

ができる。

同様に、n が 2 より大きい偶数だとすると、

$$n^2 + \left(\frac{n^2}{4} - 1\right)^2 = \left(\frac{n^2}{4} + 1\right)^2$$

が成り立ち、ピタゴラス三角形

$$\left(n, \frac{n^2}{4} - 1, \frac{n^2}{4} + 1\right) \cdots \bigcirc$$

ができる。(Q.E.D.)

この2つの式 \mathbb{O} , 2を利用し、直角をはさむ辺が3, 4, \cdots , 10 のピタゴラス三角形の例は

(3, 4, 5), (4, 3, 5), (5, 12, 13), (6, 8, 10), (7, 24, 25), (8, 6, 10), (9, 40, 41),

(10, 24, 26)

などである。

しかし、t>2を満たすすべての整数tに対して、直角をはさむ辺がtとなる既約なピタゴラス三角形がいつも存在するわけではない。例えば、t=6のとき、そのピタゴラス三角形は既約にはならない。なぜなら、定理3から 2mn=6であるが、mn=3となるため、m,nの一方が偶数でなければならないという事実に反するので、t=6となる既約なピタゴラス三角形は存在しない。

次に、斜辺が自然数nと一致するピタゴラス三角形は存在するのだろうか。この問題を解くの困難なので、ここでは証明なしで次の定理を紹介する。

定理 13

nを斜辺とするピタゴラス三角形が存在するための必要十分条件は、n が 4k+1 という形の素因数を少なくとも 1 つ持つことである。

したがって、 $n \le 50$ に対して、以下のnを斜辺とするピタゴラス三角形が存在する。n = 5, 10, 13, 15, 17, 20, 25, 26, 29, 30, 34, 35, 37, 41, 39, 40, 45, 50

つまり、これらの数は素因数 5, 13, 17, 29, 37, 41 を持つ。

斜辺の長さが連続する2つの自然数n, n+1で表される2つのピタゴラス三角形の組合せが無数にあることは、次の恒等式からすぐに導かれる。

$$(25+65k)^2 = (15+39k)^2 + (20+52k)^2$$
$$(26+65k)^2 = (10+25k) + (24+60k)^2$$

(ただし、 $k = 1, 2, 3, \dots$)

また、次の事実も成り立つことがわかっている。

定理 14

任意の自然数mに対して、斜辺の長さがm個の連続する自然数

$$n, n+1, n+2, \dots n+m-1$$

(n は適当な自然数)で表されるm 個のピタゴラス三角形が存在する。

例えば、m=3に対しては、n=39とすることができ、ピタゴラス三角形

(15, 36, 39), (24, 32, 40), (9, 40, 41) が求められる。

また、m=4に対しては、n=50とすることができ、ピタゴラス三角形

(30, 40, 50), (24, 45, 51), (20, 48, 52),

(28, 45, 53)

が求められる。

3 - 6. 共通する辺をもつピタゴラス三角 形

ある自然数aを、直角をはさむ1辺とするピタゴラス三角形は有限個しか存在しない。なぜなら、ピタゴラス三角形(a,b,c)において、

$$a^2 = (c+b)(c-b)$$

からb+cが a^2 の約数になるため、 $b < a^2$, $c < a^2$ であり、このようなb,cな組み合わせは有限個しかないからである。

簡単に証明できるように、次のことが成 り立つ。

定理 15

任意の自然数nに対して、直角をはさむ 辺を共有している少なくともn個のピタゴ ラス三角形が存在する。

[証明]

これを示すため、 $k = 0,1,2,\cdots,n-1$ として、

$$b_k = 2^k (2^{2n-2k} - 1), c_k = 2^k (2^{2n-2k} + 1)$$

とおく。このとき、 c_0, c_1, \dots, c_{n-1} は 2^n で割

るといつも異なった余り 2^k が生じるので、明らかにすべて違っている。

さらに、
$$c_k^2 - b_k^2 = (2^{n+1})^2$$
 が成り立つ

ので、ここで $a=2^{n+1}$ とおくとピタゴラス 方程式が成り立ち、n 個のピタゴラス三角 形 (a,b_k,c_k) $(k=0,1,2,\cdots,n-1)$ を得る が、これらはみな共通辺aを持ち、斜辺は すべて異なっているので、これらの中に同じピタゴラス三角形は存在しない。

(Q.E.D.)

たとえば、n=2のときには、共通辺 8 をもった 2 つのピタゴラス三角形

(8, 15, 17), (8, 6, 10)

が求められ、n=2の時には、共通辺 16 をもった 3 つのピタゴラス三角形

(16, 63, 65), (16, 30, 34), (16, 12, 20) が求められる。

また、少し複雑なので証明などは加えないが、次が成り立つことも知られている。

定理 16

任意の自然数nに対して、直角をはさむ 辺を共有する、少なくともn個の既約なピ タゴラス三角形が存在する。

例えば、n=2 のときには、三角形 (5,12,13),(35,12,37) が求められ、n=4 のときには、三角形 (105,88,137),(105,208,233), (105,608,617),(105,5512,5513) が求められる。

共通な斜辺cを持つピタゴラス三角形は有限個しかない。これは簡単に示すことができる。なぜなら、直角三角形(a,b,c)において、a < c, b < c なので、与えられたc に対するa,b の組み合わせが有限だからである。それと同時に次のことも成り立つ。

定理 17

任意の自然数nに対して、共通の斜辺を持つ少なくともn個の異なったピタゴラス三角形が存在する。

「証明]

まず、自然数nに対して、 $c = (3^2 + 1)(4^2 + 1)(5^2 + 1)\cdots\{(n^2 + 2) + 1\}$ とおく。このとき、 $k = 3.4, \dots, n+2$ とする

と、
$$\frac{c}{k^2+1}$$
はいつも自然数となる。

したがって、同様に $k = 3,4,\dots,n+2$ としたとき、

$$a_k = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}c$$
, $b_k = \frac{2kc}{k^2 + 1}$

はどちらも自然数になる。

よって、恒等式

$$c^{2} = \left(\frac{k^{2}-1}{k^{2}+1}c\right)^{2} + \left(\frac{2kc}{k^{2}+1}\right)^{2}$$

から $c^2 = {a_k}^2 - {b_k}^2$ が成り立ち、 (a_k, b_k, c) がピタゴラス三角形であることがわかる。 ここで、 $k = 3,4,\cdots,n+2$ に対して a_k は

$$a_k = \frac{k^2 - 1}{k^2 + 1}c = c - \frac{2c}{k^2 + 1}$$

と変形することができ、k が増えれば a_k も増えていることがわかる。したがってピタゴラス三角形 (a_k,b_k,c) が共通の斜辺をもつn 個の異なった三角形が得られることがわかった。(Q.E.D.)

3-7. 等しい周を持つピタゴラス三角形

まず次の定理を紹介する。

定理 18

任意に自然数nに対して、共通の周を持つn個のピタゴラス三角形が存在する。

「証明〕

この定理は容易に示される。

まず、n個の異なった既約なピタゴラス 三角形 (a_k,b_k,c_k) $(k=1,2,3,\cdots,n)$ をと り、

$$a_k + b_k + c_k = s_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

とおく。 さらに、 $s = s_1 s_2 \dots s_n$,

$$a'_{k} = \frac{a_{k}s}{s_{k}}, \ b'_{k} = \frac{b_{k}s}{s_{k}}, \ c'_{k} = \frac{c_{k}s}{s_{k}}$$

$$(k = 1, 2, 3, \dots, n)$$

とおく。このとき、任意のkに対して、 $a'_k + b'_k + c'_k = s$ となり、このうち、どのピタゴラス三角形をとっても相似になる組み合わせはない。

よって、元の三角形 (a_k,b_k,c_k) によって、 共通の斜辺を持つn個のピタゴラス三角形 ができた。(Q.E.D.)

例を挙げると、n=3として、元のピタゴラス三角形を

(3, 4, 5), (5, 12, 13), (8, 15, 17) とすると

$$s_1 = 3 + 4 + 5 = 12$$

 $s_2 = 5 + 12 + 13 = 30$
 $s_3 = 8 + 15 + 17 = 40$
 $s = 12 \times 30 \times 40 = 1440$

したがって、

$$a_1' = \frac{3 \times 1440}{12} = 360$$

$$b_1' = \frac{4 \times 1440}{12} = 480$$

$$c_1' = \frac{5 \times 1440}{12} = 600$$

となる。つまり、三角形 (a_1',b_1',c_1') は(360,480,600)である。同様に

$$(a'_2, b'_2, c'_2) = (240, 576, 624)$$

 $(a'_3, b'_3, c'_3) = (288, 540, 612)$

となり、これらの周は 1440 と等しくなる。 上の証明ではsの値を s_1, s_2, \cdots, s_n の積 としたが、これは s_1, s_2, \cdots, s_n の公倍数をと っても良い。そのようにすると、先程使った既約なピタゴラス三角形(3, 4, 5), (5, 12, 13), (8, 15, 17)を用いて周の長さが 120 に等しい3つのピタゴラス三角形ができる。これは先ほどの三角形よりも簡単なものになっている。

ちなみに周の長さが平方数である既約なピタゴラス三角形も存在する。その中でも最も小さい三角形が(16,63,65)である。この三角形では周の長さが144のため、12²に等しくなっている。

3-8. 等しい面積を持つピタゴラス三角 形

前節は三角形の周に注目したが、次は面積について注目しよう。

既約なピタゴラス三角形の面積に注意してみると、(21, 20, 29)と(35, 12, 37)の面積が210と等しく、この1組のみである。実際これと同じ面積を持ち、しかも斜辺の異なる既約なピタゴラス三角形で、これより小さなものは存在しない。そこで、斜辺が37以下の既約でないピタゴラス三角形を挙げてみると、つぎの様になる。

表3 斜辺が37以下の既約でないピタゴラス三角形

X	у	Z	面積
6	8	10	24
9	12	15	54
12	16	20	96
15	20	25	150
18	24	30	216
21	28	35	296
10	24	26	120
30	16	34	240

この表3を見てもわかるように、斜辺が37以下の直角三角形の中で、同じ面積をもつものの組み合わせは(21, 20, 29)と(35, 12, 37)以外に無い。つまり、異なった斜辺で、同じ面積を持つ既約なピタゴラス三角形の組で最小なものは(21, 20, 29), (35, 12, 37)の組である。

定理 19

斜辺が同じで、面積も等しいピタゴラス 三角形は一致する。

[証明]

まず、このようなピタゴラス三角形を (a_1,b_1,c_1) , (a_2,b_2,c_2) とし、 $a_1 \ge a_2$, $b_1 \ge b_2$ とする。

すると、面積が等しいことと、斜辺が等 しいことから、 $a_1b_1=a_1b_2$, $c_1=c_2$ となる。 加えて、ピタゴラス方程式が成り立つので、

$$a_1^2 + b_1^2 = a_2^2 + b_2^2$$

である。これらの式から

$$a_1^2 - 2a_1b_1 + b_1^2 = a_2^2 - 2a_2b_2 + b_2^2$$

$$\downarrow 0, \quad (a_1 - b_1)^2 = (a_2 - b_2)^2 \quad \cdots \text{ }$$

$$a_1^2 + 2a_1b_1 + b_1^2 = a_2^2 + 2a_2b_2 + b_2^2$$

より、 $(a_1+b_1)^2=(a_2+b_2)^2$ …②となる。 したがって、①、②から、連立方程式

$$\begin{cases} a_1 - b_1 = a_2 - b_2 \\ a_1 + b_1 = a_2 + b_2 \end{cases}$$

を解くと、 $a_1 = a_2$, $b_1 = b_2$ が導かれ、斜辺が同じで、面積も等しい三角形は一致することが証明された。(Q.E.D.)

ここで、面積の等しいピタゴラス三角形 の他の例をいくつか挙げよう。

ピタゴラス三角形(15, 112, 113)の面積は840に等しい。またこれは、三角形(21, 20, 29), (35, 12, 37)の面積である210の4倍に等しいため、三角形(21, 20, 29), (35, 12, 37)の各辺を2倍した三角形(42, 40, 58), (70, 24, 74)の面積に等しいことがわかる。つまり、3つの三角形

(15, 112, 113), (42, 40, 58), (70, 24, 74) の面積が等しいということである。

しかし、これらがみな既約なピタゴラス 三角形というわけではない。 3 つの既約な ピタゴラス三角形に共通な最小の面積は 13123110 であり、その三角形は (4485,5852,7373),(19019,1380,19069),(3509,8580,9109)である。

次に、周のときと同様に、条件を満たす 任意個のピタゴラス三角形が存在するかど うかである。この問題は次のフェルマーの 定理によって証明される。

定理 20

任意の自然数nに対して、異なった斜辺で等しい面積を持つピタゴラス三角形がn個存在する。

定理 20 は次の補題 V を用いて、帰納法で 証明される。

補題V

異なった斜辺で等しい面積を持つn個 $(n \ge 1)$ のピタゴラス三角形が存在し、そのうち1つが奇数の斜辺を持つと仮定すれば、

やはり異なった斜辺で等しい面積を持つ (n+1) 個のピタゴラス三角形が存在し、そのうち 1 つは奇数の斜辺を持つ。

「証明]

 $n \ge 1$ をある自然数とし、異なった斜辺で同じ面積を持つn 個のピタゴラス三角形 (a_k,b_k,c_k) (k=1,2,3...n) を考える。また、 $a_k < b_k < c_k$ であり、 c^2 は奇数であるとする。

k = 1,2,3...n に対して、

$$a'_{k} = 2(b_{1}^{2} - a_{1}^{2})c_{1}a_{k}$$

$$b'_{k} = 2(b_{1}^{2} - a_{1}^{2})c_{1}b_{k} \qquad \cdots \textcircled{1}$$

$$c'_{k} = 2(b_{1}^{2} - a_{1}^{2})c_{1}c_{k}$$

とおき、さらに、

$$a'_{n+1} = (b_1^2 - a_1^2)^2$$

$$b'_{n+1} = 4a_1b_1c_1^2 \qquad \cdots ②$$

$$c'_{n+1} = 4a_1^2b_1^2 + c_1^4$$

とおく。

すると、三角形 (a'_k, b'_k, c'_k) はピタゴラス 三角形になる。なぜなら、これらの三角形 の辺は自然数で表され、しかもピタゴラス 三角形 (a_k, b_k, c_k) に相似だからである。 また三角形 $(a'_{n+1}, b'_{n+1}, c'_{n+1})$ もピタゴラス三 角形である。これは、②と等式

$$a_1^2 + b_1^2 = c_1^2$$

から導かれる。

さて、これらの三角形 (a'_k,b'_k,c'_k) (k=1,2,3...n)が必要な条件を満たしていること示そう。

三角形 (a_k,b_k,c_k) (k=1,2,3...n) に共通な面積を Δ とすると、k=1,2,3...nに対

して、

$$a_k b_k = 2\Delta$$

が成り立つ。一方、三角形 (a'_k,b'_k,c'_k) の面積は、①から

$$\frac{1}{2}a'_kb'_k = 2(b_1^2 - a_1^2)^2 c_1^2 a_k b_k$$
$$= 4(b_1^2 - a_1^2)^2 c_1^2 \Delta$$

となる。また、 $(a'_{n+1},b'_{n+1},c'_{n+1})$ の面積は②から、

$$\frac{1}{2}a'_{n+1}b'_{n+1} = 2(b_1^2 - a_1^2)^2 a_1 b_1 c_1^2$$
$$= 4(b_1^2 - a_1^2)^2 c_1^2 \Delta$$

と、互いに面積は等しくなる。したがって、 三角形はすべて同じ面積を持ち、さらに k=1,2,3...nに対して、三角形 (a_k,b_k,c_k) の斜辺はすべて異なっているから、三角形 (a_k',b_k',c_k') の斜辺もみな異なっている。それらの斜辺はどれも①からわかるように偶数である。

一方、 c'_{n+1} は②によって、奇数で表されている。だから、k=1,2,3...nに対して斜辺 c'_{k} はみな異なっている。

これで補題は証明された。(Q.E.D.)

「定理 20 の証明〕

この補題Vに対して、最も簡単なnの値、n=1を考えよう。補題Vが適応できる最も小さいピタゴラス三角形は、辺の長さが

$$a_1 = 3$$
, $b_1 = 4$, $c_1 = 5$

のピタゴラス三角形である。このピタゴラス三角形から始めて、同じ面積を持つ2つのピタゴラス三角形 $(a_1',b_1',c_1'),(a_2',b_2',c_2')$ が求められる。

$$2(b_1^2 - a_1^2)c_1 = 2 \times 7 \times 5 = 70$$

より、①から

 $a_1' = 70 \times 3 = 210$

 $b_1' = 70 \times 4 = 280$

 $c_1' = 70 \times 5 = 350$

となり、②から

$$a_2' = (4^2 - 3^2)^2 = 49$$

$$b_2' = 4 \times 3 \times 4 \times 5^2 = 1200$$

$$c_2' = 4 \times 3^2 \times 4^2 + 5^2 = 1201$$

となる。

これら2つのピタゴラス三角形は、異なった斜辺をもち、そのうち一方の辺が奇数となっている、面積が29400に等しいピタゴラス三角形である。

また、こうして求められた2つの三角形に同じ操作を行えば、新たに3つの同じ面積を持つピタゴラス三角形ができる。このようにしてできたピタゴラス三角形の各辺は10桁以上になる。

以前にも別の方法で3つの同じ面積を持つピタゴラス三角形を求めた。このときの三角形は、上とは違い各辺が3桁程度だった。同様にしてもとめられた、同じ面積を持つ簡単なピタゴラス三角形の例で、4つの組み合わせと、5つのものを挙げよう。

4つのピタゴラス三角形の組み合わせは、 (518, 1320, 1418), (280, 2442, 2458)

(231, 2961, 2969), (111, 6160, 6161) であり、これらの三角形の面積は341880 に等しく、三角形の各辺は4桁程度で表されている。

5つのピタゴラス三角形の組み合わせは

(2805, 52416, 52491),

(3168, 46410, 46518).

(5236, 28080, 28564),

(6006, 24480, 25206),

(8580, 17136, 19164)

であり、これらの三角形もまた、面積が 73513440 に等しく、各辺は5桁程度になっ ている。

面積が Δ に等しいピタゴラス三角形は明らかに有限個である。なぜなら、このような三角形の直角をはさむ辺は 2Δ の約数だからである。しかし、例えば面積が6に等しく、有理数辺をもつ異なった直角三角形は無数に存在する。この事実を示そう。

まず、補題Vから、異なった斜辺を持ち、面積が同じ Δ であるピタゴラス三角形がn個 $(n \ge 1)$ 存在するとして、そのうち1つの三角形の斜辺が奇数であると考える。このとき、異なった斜辺をもち、面積が同じ Δd^2 (d は整数)であるピタゴラス三角形は(n+1)個存在し、そのうち1つの三角形の斜辺が奇数である。

ピタゴラス三角形(3,4,5)を考えよう。この三角形に補題を(n-1)回適用すると、異なる斜辺を持ち、面積が $6m^2$ (m は①、②から求められる)と等しいn 個のピタゴラス三角形が求められる。このときできたピタゴラス三角形の各辺をm で割ると、その三角形の面積は6 になり、また各辺は有理数になる。つまり、各辺が有理数で面積が6 の異なったピタゴラス三角形が求められたということである。

また、nは任意の自然数であるから、上の方法でできた三角形は無数にあるとわかる。よって定理は証明された。(Q.E.D.)

3-9. 平方数を辺とするピタゴラス三角 形

この節ではまず、斜辺を平方数とするピ タゴラス三角形について、次を示そう。

定理 21

斜辺を平方数とするピタゴラス三角形は 無数にある。

「証明〕

まず、n であるピタゴラス三角 形 <math>(m,n,p) を適当にとる。すると、2数 m,n は一方が奇数、他方が偶数であり、この2数は互いに素である。ここで、定理3 から新たなピタゴラス三角形 (x,y,z) を作ることができる。この x,y,z は公式

 $x = m^2 - n^2$, y = 2mn, $z = m^2 + n^2$ によって求められる。このとき斜辺 z は

$$z = m^2 + n^2 = p^2$$

となり、自然数の平方数になっている。同様に、x,yは

$$x = m^2 - n^2$$
$$y = 2mn$$

となる。これを繰り返して、斜辺を平方数とするピタゴラス三角形を無数に作ることができる。(Q.E.D.)

例えば、既約なピタゴラス三角形(3,4,5)からは、既約な三角形(7,24,25)が求められる。このとき斜辺は 5^2 になっている。また、既約なピタゴラス三角形(5,12,13)からは、既約な三角形(119,120,169)が求められ、斜辺は 13^2 になっている。ちなみに、斜辺が立方数になる三角形も存在し、その例には(117,44,125)があり、斜辺は 5^3 である。

次に、直角をはさむ辺に注目しよう。

定理 22

直角をはさむ一方の辺が平方数であるような既約なピタゴラス三角形は無数に存在

する。

「証明〕

まず、既約なピタゴラス三角形 (q,n,m) でn が偶数、q,m が奇数であり、m,n が互いに素なものを考える。

斜辺のときと同様に、定理3を使って、 直角をはさむ辺のうち奇数の方であるxは

$$x = m^2 - n^2 = p^2$$

となり、自然数の平方数になっている。同じくy,zは

$$y = 2mn$$
$$z = m^2 + n^2$$

となる。したがって、この方法で新たな既 約なピタゴラス三角形で、かつ直角をはさ む辺の奇数の方(=x)が平方数であるもの が求められる。(Q.E.D.)

この方法を使うと、既約なピタゴラス三角形(3, 4, 5)からは、既約な三角形(9, 40, 41)が求められ、xの値は 3^2 になっている。また、既約な三角形(5, 12, 13)からは、既約な三角形(25, 312, 313)が求められる。この三角形のxの値も 5^2 であり、自然数の平方数になっている。

上のxは、直角をはさむ辺のうち奇数のものだったが、次にこれが偶数であるものを考えよう。

定理 23

直角をはさむ偶数辺が平方数であるような既約なピタゴララス三角形は無数に存在する。

[証明]

この証明には、次の恒等式

 $(k^4-4)^2+(2k)^4=(k^4+4)^2$ を用いる。ただしこのとき、 k^4-4 と $4k^2$ は互いに素でないといけないので、 k は奇数でないといけない。 したがって、無数に存在する。(Q.E.D.)

例えば、

k=1のときは、 $(3,2^2,5)$ k=3のときは、 $(77,6^2,85)$ k=5のときは、 $(621,10^2,629)$ が求められる。

さて、2辺が平方数で表せるピタゴラス 三角形は存在するのだろうか。この問題に ついては、次のフェルマーによる定理によ って解決される。

定理 24

少なくとも2つの辺が平方数であるよう なピタゴラス三角形は存在しない。

「証明〕

直角をはさむ 2 辺が平方数であるようなピタゴラス三角形が存在すると仮定する。このようなピタゴラス三角形の中には、斜辺が最も小さいものがあり、その三角形を(x,y,z)とする。そこで、 $x=a^2$, $y=b^2$ (a,b は自然数)とおく。まずa,b が互いに素であることを示す。

数 a,b が整数 d>1 で割り切れるとする と、 $a=da_1$, $b=db_1$ より、 a_1,b_1 は整数に なる。すると、

$$z^2 = d^4(a_1^4 + b_1^4)$$

が成り立つ。

この等式から z^2 が d^4 で割り切れること

がわかり、したがって、z が d^2 で割り切れて、 $z = d^2 z_1$ (z_1 は整数)となることがわかる。ここで、等式 $z^2 = d^4 (a_1^4 + b_1^4)$ の両辺を d^4 で割ると、

$$a_1^2 + b_1^2 = z_1^2$$
, $z_1 < d^2 z_1 = z$ の形になる。つまり、ピタゴラス三角形 (a_1^2, b_1^2, z_1) は斜辺 $z_1 < z$ をもち、直角をはさむ 2 辺は平方数である。

しかしこのとき、最初の仮定である最も 小さい斜辺zをもつピタゴラス三角形 (x,y,z)であるということに反するので、 矛盾している。

したがって、数a,bは互いに素であり、 ピタゴラス三角形

$$(x, y, z) = (a^2, b^2, z)$$

は既約でなければならない。

そこで、このピタゴラス三角形に定理3 を適用し、2数 a^2 , b^2 のうち一方が偶数 (ここでは b^2 を偶数とする)であり、3数 a^2 , b^2 ,zは

$$a^{2} = m^{2} - n^{2}$$

$$b^{2} = 2mn \qquad \cdots \text{ }$$

$$z^{2} = m^{2} + n^{2}$$

と表せることがわかる。

このとき、m,nは互いに素であり、その うち一方が偶数で、他方が奇数である。さ らに、m>nである。

ここでもし、m が偶数でn が奇数であるとすると、①のはじめの等式を変形させた $a^2 + n^2 = m^2$ から a^2 が奇数であるとわかる。ところが、この等式から (a,n,m) はピタゴラス三角形になるから、a とn がどち

らも奇数であるということはありえない。

なぜなら、以前示したようにピタゴラス 三角形において、直角をはさむ辺のうち一 方は偶数でないといけないからである。

したがって、m が奇数で、n が偶数でないといけない。そこで、k を整数として、n=2k とおける。また、m とn が互いに素なので、m とk も互いに素である。①の第2式によって

$$b^2 = 2m \times 2k = 2^2 mk$$

となる。b は偶数としたから、l を自然数として、b=2l とおく。すると、上の式から $l^2=mk$ となる。

ここで、m,k が互いに素であることを考えると、m もk も平方数でなければいけないことが分かる。だから整数r,s を用いて

$$m=r^2$$
, $k=s^2$

と表すことにする。

さらに、今までの式から

$$b^2 = 4l^2 = 4mk$$
, $b^2 = 2mn$
である。したがって

4mk = 2mn, $n = 2k = 2s^2$

また、m とn が互いに素なので、①からa とn は互いに素である。だからピタゴラス 三角形 (a,m,n) は既約である。

ここで、定理3からnが偶数であることを考えると、一方が偶数で互いに素な2数 m_1 と n_1 が存在し、

$$n = 2m_1n_1$$
 $m = m_1^2 + n_1^2$

という式が作れる。ところで、 $n = 2s^2$ であったから、

$$s^2 = m_1 n_1$$

とおくことができる。したがって、2数 m_1,n_1 はそれぞれ平方数であり、自然数 a_1

と b_1 を用いて、

$$m_1 = a_1^2 \qquad n_1 = b_1^2$$

と表すことができる。

そこで、等式 $m={m_1}^2+{n_1}^2$ に m,m_1,n_1 の値を代入すると、

$$a_1^4 + b_1^4 = r^2$$

となる。上式のrは

 $r \le r^2 = m < m^2 + n^2 = z$ を満たす。つまり、ピタゴラス三角形

 (a_1^2,b_1^2,r) は、直角をはさむ 2 辺が平方数で、斜辺 r は z よりも小さい。したがって、この三角形は最初の三角形 (x,y,z) も小さく、仮定に反している。

だから、直角をはさむ辺が平方数となる ピタゴラス三角形があると仮定すると矛盾 が生じる。したがってこのような三角形は 存在しない。

次に、斜辺と他のもう一辺が平方数となる三角形を考えよう。

まず、三角形 (x,y,z) が、上のような三角形の中で最も小さな斜辺を持つものであるとする。したがって、自然数 a と c を用いて $x=a^2$ $z=c^2$ と表す。

最初に三角形 (x,y,z) が既約であることを示そう。それにはxとz が既約であることを証明するだけで十分である。そこで、xとz に公約数d があると仮定する。するとa,c が公約数d を持つことになり、自然数 a_1,b_1 を用いて、

 $a=da_1,\ c=dc_1$ と表せる。したがって、3数x,y,zは

$$x = a^{2} = d^{2}a_{1}^{2}$$

$$y^{2} = x^{2} - z^{2} = d^{4}(c_{1}^{4} - a_{1}^{4})$$

$$z = c^{2} = d^{2}c_{1}^{2}$$

である。これから、 y^2 は d^4 で割り切れ、 したがって、yは d^2 で割り切れる。よって yは、自然数 y_1 を用いて、

$$y = d^2 y_1$$

と表すことができる。

ここで、三角形(x,y,z)の等式

$$x^2 + y^2 = z^2$$

にこれまでの式を代入し、 d^4 でわると

$$d^{4}a_{1}^{4} + d^{4}y_{1}^{4} = d^{4}c_{1}^{4}$$
$$a_{1}^{4} + y_{1}^{4} = c_{1}^{4}$$

が得られる。

さらに、 $z=d^2c_1^2$ でd>1のため、 $c_1^2 < z$ である。つまり、ピタゴラス三角形 $\left(a_1^2,y_1,c_2^2\right)$ は斜辺と、もうひとつの辺も平方数であり、その斜辺の長さはzよりも小さい。これは最初の仮定である、ピタゴラス三角形 $\left(x,y,z\right)$ が最も小さい斜辺をもち、斜辺ともうひとつも辺が平方数であるということに反している。

次に、yは偶数ではないことを示そう。 なぜなら、yが偶数であるとすると、定理 3によって、互いに素な2数m,n (m>n) が存在して、

$$a^2 = x = m^2 - n^2$$
$$y = 2mn$$

$$c^2 = z = m^2 + n^2$$

と表すことができる。これから、

$$c^2 < m^2$$
, $(ac)^2 = m^4 - n^4$

であり、 $n^4 + (ac)^2 = m^4 となる$ 。

したがって、ピタゴラス三角形

 (n^2, ac, m^2) では、直角をはさむ 1 辺が平方数で、斜辺は $m^2 < z$ である。しかし、これは最初の仮定に反する。

これにより、yは奇数でなければならず、 $x=a^2$ が偶数でなければならない。また、 $a^4+y=c^4$ となり、aは偶数、yは奇数であるから、cは奇数で、

$$y^2 = c^4 - a^4 = (c^2 + a^2)(c^2 - a^2)$$

次に、2つの奇数 $c^2 + a^2$, $c^2 - a^2$ は互いに素であることを示す。

ここで、 c^2+a^2 と c^2-a^2 の公約数は $2c^2$ と $2a^2$ の約数であるが、それは奇数でなければならないから、実は互いに素な2数 a^2,c^2 の公約数でなければならない。だから、2数 c^2+a^2,c^2-a^2 は互いに素である。

つまり、 y^2 は2つの素な因数に分解されるから

$$c^2 - a^2 = r^2, c^2 + a^2 = s^2$$

でなければならない。これから、

$$2c^2 = r^2 + s^2$$

となるが、ここでr,sは互いに奇数である

から数
$$\frac{s+r}{2}$$
と $\frac{s-r}{2}$ は整数になる。

この2数は、それらの和と差が互いに素 だから、それら自身も互いに素である。

だから、定理3によって互いに素な2数m,nが存在して、一方は偶数であり、

$$\frac{s+r}{2} = m^2 - n^2, \quad \frac{s-r}{2} = 2mn,$$

$$c = m^2 + n^2$$

あるいは、

$$\frac{s-r}{2} = m^2 - n^2, \ \frac{s+r}{2} = 2mn$$

$$c = m^2 + n^2$$

が成り立つ。

ここから、どちらの場合も

$$2a^2 = s^2 - r^2 = 8mn(m^2 - n^2)$$
 …②
が得られる。 a は偶数だから、 $a = 2a_1$ とおけて、

$$a_1^2 = mn(m^2 - n^2) = mn(m+n)(m-n)$$

が成り立つ。数m,nは互いに素でそのうち一方は偶数である。 2数m-n,m+nも互いに素で、mとm-n, mとm+nもそれぞれ互いに素である。

ゆえに、②の右辺にある4つの因数どの 2つを組み合わせても、互いに素である。 したがって、等式②の右辺の各因数はそれ ぞれ平方数でなければならない。つまり、

$$m = k$$
, $n = l$, $m - n = p$,
 $m + n = q$

となる。ここから、

$$k^4 - l^4 = m^4 - n^4 = (m^2 + n^2)(pq)^2$$

 $\overset{\circ}{\sim}$, $\overset{\circ}{\sim}$ $\overset{\circ}{\sim}$

$$k^4 = m^2 < m^2 + n^2 = c < c^2 = z$$

ゆえに、 $k^2 < z$ でもある。つまり、ピタゴラス三角形 (l^2, pq, k^2) は、斜辺と一方の辺が平方数で、斜辺 k^2 はzよりも大きい。しかし、これは前の仮定に反する。

したがって、ピタゴラス三角形の斜辺と一方の辺が平方数であるようなものが存在するという仮定により矛盾が生じる。よって、このような三角形は存在しない。これで定理 24 は証明された。(Q.E.D.)

この定理から3辺が平方数であるピタゴ ラス三角形はもちろん存在しないことが分 かる。また、これを代数学的に言い直すと、 次の定理のような命題になる。

定理 25

不定方程式 $x^4 + y^4 = z^4$ は自然数解を もたない。

この定理は、有名な「フェルマーの大定理」(定理 26)の特別な場合である。

定理 26 (フェルマーの大定理)

任意の整数 n > 2 に対して、不定方程式 $x^n + y^n = z^n$ は自然数の解をもたない。

「フェルマーの大定理」は、数学者フェ ルマー(Pierre de Fermat)がディオファン トスの著書『数論』の余白に命題のみを記 述し、証明を付していなかったエピソード で有名であり、その後、「フェルマー予想」 として、数論の未解決問題となった。多く の数学者が証明に挑戦し、失敗を重ねてき た。しかし、少しずつ進歩を重ねていき、 ついに、1995年アメリカの数学者**アンドリ** ュー・ワイルズ(Andrew John Wiles)によっ て、完全な証明が与えられた。その過程に は、志村五郎、谷山豊という2人の日本人 数学者による「志村-谷山予想」が大きな 役割を果たしたことも有名である。このよ うな深遠な理論にまで達することは、数学 の世界の広がりと深さを実感できる。

4. 今後の課題

本年度は、参考文献[1]を輪読し、ピタゴラスの定理をきっかけとして、ピタゴラス三角形の分類を、ピタゴラス数という整数の組の特徴を調べることにより学習することができた。テキストの内容をすべて理解することが困難であったので、今後、さらなる学習を進めていきたい。

5. 参考文献

- [1]「ピタゴラスの三角形」, B. シェルピンスキー著,銀林浩訳,東京図書(1993)
- [2] 「はじめての数論」, J. H. シルヴァーマン著, 鈴木治郎訳, ピアソン・エデュケーション(2007)
- [3]「数論入門」,北村泰一著,槙書店(1965)

6. 謝辞

顧問の川口先生には、わからない部分を解説していただき、整数論に関する基本的な部分を説明していただきました。また、公開研究会でのポスターや本稿についても、いろいろなアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

猿沢池のプランクトン

3年A組 野依 莞奈 3年A組 浪江 智子 3年C組 坂田 実咲 指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

猿沢池の水質およびプランクトンについて調査した。その結果、気象条件により発生するプランクトンに違いがあることがわかった。また、プランクトンの培養を試み、藍藻類の培養に成功した。

キーワード プランクトン、藍藻類、pH、COD、寒天培地、培養

2. 研究の背景と目的

古くから、奈良八景として親しまれてきた池、猿沢池。本校近くのその池には『澄まず 濁らず 出ず 入らず 蛙はわかず 藻が生えず 魚が七分に水三分』という七不思議がある。

生態系の根本であるプランクトンを主に 調べることで猿沢池の水質を調査した。

また、約半年間の観察を通して、珪藻類と藍藻類を多く採集できた。このことより、 更に珪藻、藍藻類の特徴を調べるために培養を試みた。

3. 実験方法

以下の二つの実験を行った。

(1)環境データとプランクトンの採集および観察

プランクトンネットを使用し、1回につき、綺麗に水洗いしたフィルムケースに一杯をサンプルとして持ち帰った。同時に、気温・水温・天候を現地で調べた。また、サンプルは持ち帰ってすぐに、pHとCODを調べた。

フィルムケース内に沈殿したプランクトンを、水ごとピペットで吸い上げ、1滴をスライドグラスに載せたものを3枚作成し、それぞれについて顕微鏡で詳しく観察した。

(2)寒天培地の製作と培養

100ml の蒸留水に粉末寒天 1.5g を加え、 よく混ぜてからサランラップで蓋をし、電 子レンジでさらに混ぜながら加熱した。

人肌ぐらいまで冷ました後、クリーンベンチの中で5枚の滅菌シャーレに分けて注ぎ、それぞれにハイポネックスをピペットで2滴ほど入れて軽く混ぜた。蓋をしてビニールテープでひとまとめにし、冷蔵庫で冷し固めた。固まった培地に、クリーンベンチの中からとってきたばかりのサンプルを計 40ml 遠心分離し、底に沈殿したプランクトンをピペットで吸い上げて5枚の培地に均等に入れた。

常温庫の光のよく当たる場所に、1回目は7日間、2回目は3ヶ月間、3回目は1ヶ月間保管した。

白く濁った斑点部分をメスで切り取り、

表面をスライスしてスライドグラスに載せ たものを顕微鏡で観察した。

4. 実験結果

(1)環境データとプランクトンの採集および観察の結果

観察されたプランクトンの写真を最後のページに掲載した。

	ミクロキスティス	M ・ペーゼンベルギー	M・ノバセッキ	M・ビリディス	M・エルギノーザ	M ・イクチオブラーベ	アウラコセイラ・アンピグア	A・ アンピグア(変種)	セネデスムス・オポリエンシス	ハリケイソウ	ササノハケイソウ	スタウラストルム	フォルミディウム・テヌエ	アナベナ・マクロスポーラ	ラトラスポラ・ラクストリス	ツボワムシ	ヒゲナガワムシ	ツメナガネズミワムシ	ミドリゾウリムシ	ヒゲナガミジンコ	ケンミジンコ
04/20(金)	0			77			O	O			44	0				0		193		8	
05/12(月)		0												O			0	0			
06/08(火)		O		O		0								O			0				
07/13(月)		O							0	0	O										
08/21(金)		O	0	0			O	O			8		0	1		0			0		
10/22(木)	1	0		0	O		O	Q		0	C				O	0				,	C
11/09(月)		O	0	0				0													
12/14(月)		O																			
01/13(水)	18	0	100	1	88		88	10	177	196	88			100		0				8	C

表1 観察されたプランクトン一覧

	天気	気温	水温	рΗ	COD	種類数
04/20(金)	률비	21.5	21.5	5		5
05/12(月)	晴れ	27	28	6.2	17	4
06/08(火)	晴れ	27.5	27	6.7	17	5
07/13(月)	晴れ	34.5	32	7.3	22	4
08/21(金)	晴れ	32.2	30	7.2	20	8
10/22(木)	晴れ	22.8	20	6.4	30	10
11/09(月)	晴れ	23.8	18.2	6.5	20	4
11/20(金)	晴れ	12	13	6.4	25	4
12/14(月)	晴れ	14.5	- 11	6.5	7	1
01/13(水)	雪後晴れ	2	3	5	5	3

表2 採集日の環境データ

観察されたプランクトンの種類数について、次の結果が得られた。

- ①猿沢池は、植物プランクトンが多い傾向 にある。
- ②藍藻類が、種類も数も一番多く、次に珪

藻類が多く観察できた。

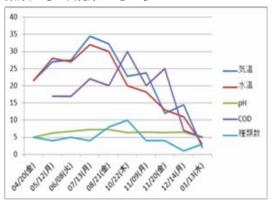


図1 環境データのグラフ

- ③M.ベーゼンベルギーは、調査期間中は多く見られた。
- ④8月以降の観察では、動物プランクトンの数が4~7月までに比べ、増加していた
- ⑤ 8 / 21 と 10 / 22 は比較的多くの種類が見られた。
- ⑥6ヶ月にわたる観察の結果、気温が上昇 するとプランクトンが活発になる傾向が あった。

また、猿沢池の環境について次の結果が 得られた。

- ⑦気温、水温が上がると、pH は酸性に近づくことがわかる。
- ⑧10/22 は COD の値が急上昇し、pH も酸性よりになった。

なお、ツボワムシについては、顕微鏡で の観察中に植物プランクトンを捕食してい る様子が見られた。

(2)寒天培地による培養の結果

7 日間保管したものでは、M.ベーゼンベルギー、M.ビリディス、M.ノバセッキが確認できた。

また、M.ノバセッキについては、分裂したと思われるものも確認できた。

1ヶ月間保管したものは、5枚中2枚に カビが発生していた。

肉眼で確認できた、プランクトンのコロニーと思われる部分を顕微鏡で観察したが、プランクトンは発見できなかった。

3ヶ月間保管していたものは、5枚中3 枚にカビが発生しており、1ヶ月間保管したもの同様、プランクトンは確認できなかった。

最後のページに、培養できたプランクトンの写真を掲載した。

5. 考察

(1)環境データとプランクトンの採集、観察の結果について

結果の②、③について、ミクロキスティス属は藍藻類に分類されており、藍藻類は原始的な種であること、猿沢池の七不思議の一節に『藻は生えず』とあることから、藻や種子植物の水草が生えない環境は、原始的である藍藻類にとって繁殖しやすい環境なのではないかと考えられる。

結果の⑧について、次のことが考えられる。

10/22 の観察では、ケンミジンコのノープリウス期がはじめて観察できた。そのときの池の水が、いつもよりも緑がかっていたことから、9月中旬頃に晴れた日が続き、光合成によって植物プランクトンが増えた結果、ケンミジンコの餌が豊富になり、増殖期を迎えたのではないかと考えられる。

また、この日の観察は、植物プランクトンも多く観察できた。

(2)寒天培地による培養の結果について

上記の通り、藍藻類は原始的な種である ことから、増えやすかったのではないかと 考えられる。

今回は、常温庫の中でも特に蛍光灯の光が当たるところに置いたが、それでも光が足りず、光合成できる量が限られてしまったせいで藍藻類しか増えなかったと考えられる。1ヶ月と3ヶ月間、それぞれ保管したものについては、12月と1月に採集した水に植物プランクトンが少なかったことが原因として考えられる。

また、長期間の培養期間でプランクトン がカビに負けて全滅した、培養期間中に栄 養分を使い果たして全滅したとも考えられ る。

6. 今後の課題

(1)環境データとプランクトンの採集およ び観察についての課題

9月は、採集と観察をすることができな かったので、今後も採集と観察をできる限 り続け、長期的な視点でも調査していきた い。

また、プランクトンの種類を絞り込んで個々の特徴を探る実験や、気候・pH・CODの変化がプランクトンに与える影響を調べる実験や調査もしていきたい。

プランクトンの種類の特徴に関する文献が、今の時点では不足しており、猿沢池の水質の傾向などについて、プランクトンを通して考えることが出来ていない。よって、文献を探し、プランクトンの調査結果から水質を考えることもしていきたい。

猿沢池の底の様子や、池の中心部についても、毎回の採集場所とのデータの変化は

あるのかなどを調査したいので、池そのも のについてもさらに調査し、池全体の生態 に迫っていきたいと思う。

現在の観察方法では、個体数の同定が確 実ではないので、クロロフィルを取り出し、 個体数を同定する方法もやってみたいと思 う。

(2)寒天培地による培養についての課題

今まで3回実験を行ってきたが、まだ結果に結びつく段階まで辿りつけていないので、今後は培養環境を変えた対照実験や、種類別の純粋培養、試験管での培養にも挑戦し、実験の範囲を広げていきたい。

藍藻類の限られた種類しか増えなかった 理由を解明し、さらに多くの種類を培養で きる環境を見つけ、さらに高度な培養実験 につなげていきたい。

7. 参考文献

[1]「やさしい 日本の淡水プランクトン 図解ハンドブック」, 一瀬論, 若林徹哉 滋賀の理科教材研究委員会 (2005) http://www.digitalsolution.co.jp/natu re/science/plankton/index.html

8. 謝辞

今回の研究にあたり、指導してください ました矢野先生に、深く感謝申し上げます。

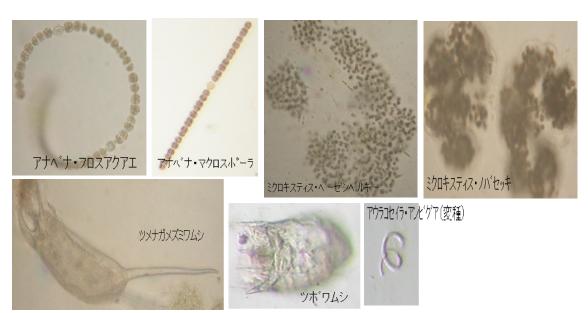


図2 観察されたプランクトン







図3 培養できたプランクトン



食品の細菌量

3年A組 藤岡 侑里 3年A組 東 美弦 3年A組 細井 映美 指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

私たちはいわゆる「三秒ルール」の真偽を、実験を行い調査した。その結果にばらつきがあったので、原点に戻り、身近な食べ物(特にお弁当によく入っているもの)に元から含まれている細菌量を調べることにした。

キーワード コロニー、培地、お弁当のおかず

2. 研究の背景と目的

「三秒ルール」とは、「食べ物を床に落としても3秒以内に拾えば食べても問題ない」という俗説である。お弁当のおかずを落としてしまって、悲しくなった経験のある人も多いだろう。そこで私たちは「三秒ルール」について調べることにした。

3. 研究内容

まず、三秒ルールの真偽を調べるために お弁当のおかずを床に落として細菌の増加 量を調べた。

I. 実験 1

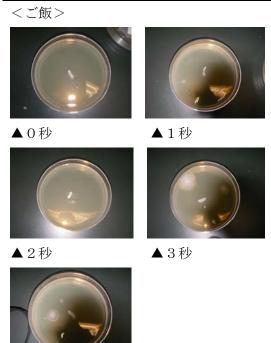
《方法》

(1)お弁当に入っているおかずの代表として、ご飯、卵焼きを生物教室の床にそれぞれ、0,1,2,3,4,10 秒間落とし、LB 培地の中に入れた。

(2) 培地を約 40 度に保たれたインキュベーターの中に入れて、3、4日間培養した。 《結果》

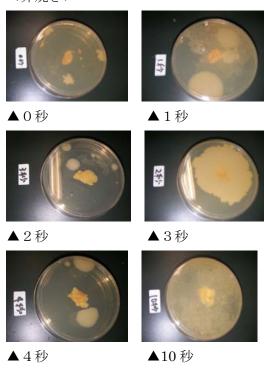
培地にあらわれたコロニーの面積(mm²) を次に示す。

	0秒	1秒	2 秒	3 秒	4秒	10 秒
<u>,,</u>	ほぼ	1.50	0.16	1.96	6.48	0.12
飯	無し			0.12	2.20	
卵	1.20	9.52	シャ	2.94	0.09	シャ
焼		2.20	ーレ	0.70	3.60	ーレ
き		2.08	全体	0.70	4.25	全体
				1.30		



▲4秒

<卵焼き>



《考察》

落としていた時間、落としたものによっての違いがはっきりと出なかった。またコロニーが複数あらわれたものもあった。そこで、今度はおかずに元からついている細菌量を調べた。

Ⅱ. 実験 2

《方法》

お弁当の中に入っていたおかず、にんじん、パセリ、卵焼きを5mm角に切り、床の上に落とさずに培地の中に入れ、約25℃に保たれたインキュベーターの中で3日間培養した。なお、より正確な結果を得るために、にんじん3つ、パセリ3つ、卵焼き4つを用意し、それぞれ別の培地に入れた。《結果》

3日後培地にあらわれたコロニーの面積 (mm²)を次に示す。

材料	大きさ	特徴
パセリ	4.00	
1~3		
卵焼き 1	15.75	
2	22.00	もやもやしたコロニ
	4.30	ーが薄く広がってい
		た
3	9.00	もやもや
	3.68	
4	5.52	もやもや
にんじん	なし	にんじんは6日後に
1~3		コロニーができた。

《考察》

- (1) 卵焼きが、一番菌がついていることが分かった。
- (2) ニンジン自体は菌がふえにくいので、3 秒ルールには適する可能性がある。

4. まとめと今後の課題

細菌は落としていた時間の長さに関わりなくふえることがわかった。よって「三秒ルール」は成り立たないと思われる。また食品によって細菌のふえる量が違うことがわかり、細菌の種類も違うことに気づいた。

これからは、その細菌の違いや種類について研究して行こうと思う。気をつけることは、コロニーの面積を分かりやすくするために定規と一緒に写真に残すことや、おかずの大きさを統一することである。

5. 謝辞

指導教諭の矢野先生にはたくさんのアド バイスをいただきました。ありがとうござ いました。

ブレファリズマの膜形成

4年A組飯島麻穂4年C組井上なずな指導教諭櫻井昭

1. 要約

繊毛虫ブレファリズマを飢餓状態にし、光学顕微鏡で撮影を続けていたところ、膜から細胞が抜け出るような現象が確認された。この現象がなぜ生じたのか、それが撮影された環境条件に着目して調べることにした。今回設定した実験条件は高温(37.5℃)、低温(約5℃)、化学薬品(ニュートラルレッド)の3つとした。実験の結果、ニュートラルレッドを用いた実験で細胞から膜がはがれるような現象を確認することが出来た。膜の形成は何らかの刺激から身を守るために出来るのではないかと考えられる。しかし、今回の実験で見られた現象は初めに興味を持った現象とは少し違う。今後も研究を深める必要があると思われる。

キーワード ブレファリズマ、ニュートラルレッド、細胞膜

2. 研究背景と目的

サイエンス研究会生物班では歴代、ジャ イアントブレファリズマやシストといった ブレファリズマ(図1)の形態変化について 研究してきた。今回私たちは、先輩方の研 究途中で得られた1枚の写真(図2)に興味 を持ち、本研究を開始した。繊毛虫ブレフ アリズマは、その膜表面に様々な分泌物を 蓄えていることが知られている。今回見ら れた脱皮のような現象も、この膜構造が影 響しているのではないかと考え、過去の実 験を参考に実験方法を考えていくことにし た。先輩方の研究途中で得られた写真には 通常見られない膜のようなもの(以下単に 「膜」とする)が存在している。この膜が何 故発生したのか、どんな成分で構成されて いるのかを解明することを、本研究の最終 目標とする。

3. 研究内容

ジャイアントブレファリズマやシストの 形態変化には飢餓状態という共通の環境条件がある。しかし、飢餓状態では細胞から の膜の分離は見られなかった。そこで、脱 皮のように見える現象が撮影された条件を 先輩に伺ったところ、ブレファリズマには 強力な光が当てられており、水が非常に少 なく蒸発寸前、という過度のストレス状況 下だったそうである。では、どのストレス が膜を形成する直接的な原因になったのか を調べようと思い、仮説を立てた。

ブレファリズマに強力な光が当てられていたということから温度の高い状況ならストレス状態になるのではないか。また、逆もストレス状態になるのではないか、と考え高温と低温という条件の実験を行った。

3-1. 温度条件における膜の形成の有無 (1)仮説

培養温度よりも高温、保管温度よりも低温の環境下に置かれるとブレファリズマは細胞外に膜を形成する。

(2)実験方法

a) ブレファリズマの培養方法 バクテリアを増殖させたレタス 培養液をエサとして用い、インキュ ベーターで培養する。

b) 細胞の準備

- ・培養したブレファリズマを質量が同じになるように2本、ないし4本の遠沈管に分け、同じ重さの遠沈管を対称に遠心分離器にセットし、5分間遠心分離する。(1000rpm)
- ・分離が終わったら、遠沈管の底に集められたブレファリズマを別の容器に移す(以下これを「濃縮ブレファリズマ」と呼ぶ)。

c) 対照実験

①高温

遠心分離器にかけたときの上澄 み液を湯煎で温める。この上澄み液 300μ l と、濃縮ブレファリズマ 200μ l をマルチプレートに入れ、顕 微鏡で観察する。このときの全体の 温度は 37.5 $^{\circ}$ Cだった。

②低温

用意しておいた濃縮ブレファリ ズマを、約-20℃の冷凍庫で 10 分 間冷やし、500µl をマルチプレート に移して、顕微鏡で観察する。

(3)実験結果

①高温(図3)

ブレファリズマの動きが活発になるだけで、膜の形成は確認できなかった。

②低温(図4)

色素が抜け、動きが通常より遅くなっただけで、膜の形成は確認できなかった。

2つの実験から、温度変化によるストレスではブレファリズマは膜を形成しないことが分かった。そこで私たちは、文献調査をしたところ、「Caupsule Shedding (膜分離様現象)」という文献を発見し、この膜分離が、先輩が確認したものと同様なのではないかと考えた。文献で使用した薬品の中から、入手可能な薬品を選び、以下の追実験を行うことにした。

3-2. 薬品添加における膜形成の有無 (1)仮説

文献で見た膜分離は先輩方が発見した現 象と同様のものである。

(2)実験方法

ブレファリズマ 500μl に対し、ニュート ラルレッド 20μl をマイクロピペットでマ ルチプレートに入れ、顕微鏡で観察する。

(3)実験結果

赤っぽい色の膜を形成しているブレファ リズマを確認した。また、形成した膜から 脱皮するように抜け出る様子も観察できた (図5)。

4. 考察

ニュートラルレッドの実験のみで膜の形成が見られたことから、膜の形成はなんらかの物理的刺激から身を守るためにできるのではないか、と考える。

次に、ブレファリズマのニュートラルレッドのある成分と反応したのではないかとも考えられる。高温・低温の実験と決定的に違うのは薬品を使用した点だからである。そして膜形成は、低温状態でブレファリズ マの色素が抜ける反応とは違うメカニズムなのではないかと考えられる。低温状態の実験では、細胞膜のすぐ内側にある色素的ないカーズミンという色素が抜けるのとから、低温というストレスが細胞膜に何らかの影響を与えたと考えられる。しかし、低温では、アルスが細胞膜に何らかの影響を与えたと考えられる。しかし、低温では、膜の形成は確認されなかった。よって、色素が抜けるのとは違うメカニズムなのではないかと考えた。

そして最後に、当初の興味を持った写真と、今回得られた実験結果の膜は違う現象なのではないかと考えられる。当初の写真で見られたものは、細胞膜のような膜から細胞が抜け出しているように見える。それに対し、今回の実験で得られたものは、細胞内部から何らかの物質が分泌され、膜を形成しているように見えるのである。ここから、私たちが立てた仮説は2つである。

仮説1:細胞膜がニュートラルレッドと反応したのではないか。

ブレファリズマには多くの膜が存在していて、そのうちの数枚までにニュートラル レッドが浸透しはがれたのではないかと考 えた(図6)。

仮説2:実験で得られた膜は、ブレファリ ズマの細胞内にある物質が出たも のではないか。

低温の実験で見られた色素が抜けるという現象は、ブレファリズマがもともと持っている色素胞というものがあるからだ。このように、外から刺激を受けることで細胞内の何らかの物質が分泌されたと考えた(図7)。

5. 今後の展望

まず、ニュートラルレッドが細胞のどこまで到達するのかを調べようと思う。上記に挙げたように、ニュートラルレッドが細胞表面でとどまるのであれば、形成された膜はニュートラルレッドが細胞表面の物質と反応し、細胞膜が剥がれ落ちたものと考えられ、ニュートラルレッドが細胞内まで到達するのであれば、細胞内でニュートラルレッドと何らかの物質が反応し、それが細胞外に分泌されたと考えられる。

そして今回ニュートラルレッドという薬品で反応が見られたが、ブレファリズマの生息地である池や沼に、薬品そのものがあるとは考えられない。そこで、薬品を使わず、自然界に近い状況下で実験することで、膜の形成が自然界でも起こりうることなのか(物理的刺激によって生じるものなのか)ということを調べたい。

ニュートラルレッドの成分調査を行い、 ブレファリズマの生息地である池や沼と共 通する成分があるかどうかも調べていきた い。また、共通する成分が多い場合はニュ ートラルレッド以外の薬品でも実験を行い、 絞り込んでいこうと思う。

6. 参考文献

[1] 『Caupsule Shedding(膜分離様現象)』, Chapter Seven

7. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、櫻井先生には 多くのご指導を受けました。また、生物班 の先輩である中澤春香先輩にも情報提供を していただき、より深い研究につなぐこと ができました。この場で深く感謝致します。

【図表一覧】



図1 通常のブレファリズマ



図2 先輩方の得た写真



図3 高温実験の結果

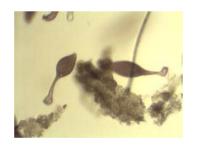


図4 低温実験の結果



図5 ニュートラルレッドの結果

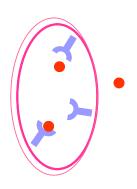


図6 仮説1

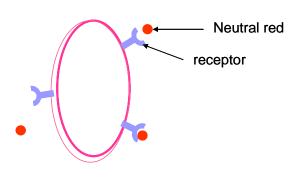


図7 仮説2

納豆菌の水質浄化作用

4年A組 吉川 啓明 4年C組 高杉 典史 指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

サイエンス研究会生物班はプランクトンや細菌などの微生物の研究などを行っている。 4年生では特にカビや細菌を研究しており、我々の班では納豆菌について研究をしている。 今回は納豆菌の水質浄化作用についての研究をレポートにまとめた。

キーワード 微生物、納豆菌、水質浄化、純粋培養、バイオリアクター

2. 研究の背景と目的

近年、川や湖などの水質汚染が問題になっており、その解決策として納豆菌の持つ水質 浄化作用が注目されている。また、納豆菌の 特徴として他には温度変化や環境の変化に強いという性質がある。

今回、そのような納豆菌の特性を十分に理解し、また納豆菌の持つ水質浄化作用も確認するために実験を行った。

最終的には納豆菌の水質浄化作用のメカニズムを解明し、他の分野への転用をすることが我々の目的である。

3. 研究内容

I. バイオリアクターを用いた実験

まず、納豆菌の水質浄化作用を確認するためにバイオリアクターを用いた実験を行った。 <目的>

納豆菌に水質浄化作用があることを確認する。

<方法>

今回は納豆菌の水質浄化作用をバイオリア クターを用いて実験された方の文献を参考に して実験を行った。

①納豆のネバネバを集める。(納豆菌の単離) ②①をLB液体培地に入れ、40°Cで培養する。

(納豆菌の培養)



図1 納豆菌の液体培養

③培養した納豆菌をバイオリアクターに 閉じ込める。(納豆菌の固定)



図2 納豆菌のバイオリアクター

④バイオリアクターを 0.1%に薄めた牛乳、豆乳に入れ、様子を観察した。

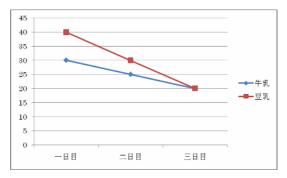
今回は水質浄化作用をCOD値の測定により 確認した。

CODを選んだのは次の理由による。水質を 調べる方法は多数あるが、時間がかからず、 パックテストなので比較的楽に計測でき、水 溶液中の有機物の量を計測するのに一般的で あるという理由からCOD値による測定を選ん だ。

<結果>

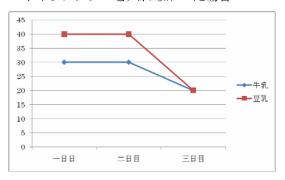
次のような結果が得られた。

グラフ① バイオリアクターを入れた場合



グラフ②

バイオリアクターを入れなかった場合



<考察>

本来ならばバイオリアクターを入れた実験 のみCOD値が下がり、対照実験であるコント ロールはCOD値が下がらないはずなのだが、 グラフからわかるように今回は、バイオリア クターを用いた実験の最終的な結果ではコン トロールとの差がなかった。

その原因はおそらくバイオリアクター作成時に何か不手際があったかもしくは納豆菌の培養が不十分であったこと、または培養して増えたものが納豆菌でなかったことなどが考えられる。また、コントロールも同じようにCOD値が下がった理由については牛乳、豆乳の有機物が沈殿してしまい、COD値が下がったと考えられる。そのことはコントロールだけに言えることではなくバイオリアクターを入れた実験にもいえる。

結果的には納豆菌が水質浄化をしたことが確認できず、この実験は失敗だった。この失敗を踏まえて、まず納豆菌の純粋培養から取りかかることにした。

Ⅱ. 納豆菌の純粋培養

<目的>

私たちは、今回納豆菌の水質浄化作用を確かめるために、まず確認実験の基礎実験にあたる納豆菌の純粋培養を行った。

これは、前回の実験が成功しなかった原因の 一つとして納豆菌の培養が不十分であった。 という可能性があるからである。

前回の失敗の原因に他の菌が入ったことが 挙げられたので、今回は納豆菌以外の菌が入 らないようにするために、クリーンベンチを 使用した。

納豆菌の純粋培養を以下の手順で行った。

<方法>

- ①まず最初に市販されている納豆を滅菌水に 入れる。(この際、使用した滅菌水は加熱滅 菌したものであるが、納豆菌は熱に強いた め生き残っている。この作業で納豆菌はい るが他の菌はいない水ができた。)
- ②①で作った水をクリーンベンチ内でLB寒天 培地に塗った。(塗った量は500µlである。 寒天培地は、水94%寒天3%LB培地の素 2%の割合で混ぜたものを使用した。LB培 地は細菌の培養に向いた培地である。)
- ③②の培地を保温機で35℃に保ったまま二日 放置した。(35~40℃は納豆菌が一番増殖し やすい温度である。この作業により納豆菌 だと思われるものを培養して増やす。)
- ④③の納豆菌をクリーンベンチ内で別のLB 寒天培地に3つ移した。(この作業が今回の 実験で一番重要で主となる作業である。③ で培養した納豆菌と思われるものが納豆菌 であることを確認するための作業である。)
- ⑤④の培地を保温機で35度に保ったまま約7時間放置した。(この作業の結果により納豆菌の純粋培養に成功したかが分かる。)

<結果と考察>

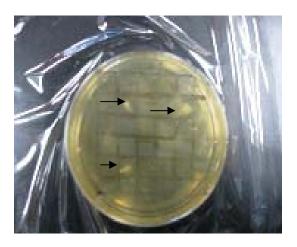


図3 納豆菌の培養

上の写真を見ると、同じような色、大きさのコロニーが3つ確認できる。また、これらはすべてほぼ同時期に出来ている。よって、これらのコロニーは同一のものであるといえる。つまり、このLB寒天培地には納豆菌しかいない、すなわち、納豆菌の純粋培養に成功したと考えられる。

<今後の課題>

このコロニーが、確実に納豆菌のコロニーであると断定するには、上記の理由では不十分である。何故なら、上記の理由では、3つのコロニーが同一であるということしか言えないからである。そこから納豆菌であろうと推測はできる。よって、どうしたらこのコロニーが納豆菌であるかを確認するための実験方法を考え、実行することが最初にクリアしなくてはいけない課題である。

納豆菌の純粋培養に成功した後は、前回失 敗に終わった水質浄化作用について詳しく調 べ、水質浄化以外にその仕組みが使えないか を考える。

4. 考察

Iで納豆菌の水質浄化作用を確認するための実験は失敗に終わった。その反省を踏まえた上で、IIの水質浄化作用確認実験の基礎段階である納豆菌の純粋培養は成功したと考えられる。

5. 今後の課題

実験を始めた段階では培養の基礎などの実験をする上での基本となる部分の技術などが欠けており苦労した。

まず、今回増やした菌が納豆菌であるという確証を得るためにどうすれば良いかを検討 していかねばならない。

その方法として、グラム染色による検定 や、顕微鏡を用いて実際に見る等の方法を考 えている。グラム染色検定では、増やした菌 の種類が大まかにわかるが、この検定方法で は大まかな種類しかわからないので、増やし た菌が納豆菌であるという確証は得られない。 よって、私たちは納豆菌を確認できる方法を 調査しなければならない。

次に、LB寒天培地で純粋培養した納豆菌を液体培地で培養することを考えている。以前にも、私たちは納豆菌を試験管で培養しようとした。しかしその際、納豆菌が好気性細菌であることを知らなかったので、酸欠で納豆菌がうまく増えなかった。

次回からは納豆菌は好気性細菌であるから、 振盪培養器を用いて振盪培養を行う。

前回失敗してしまった納豆菌の水質浄化作用確認の実験方法を見直し再度行う。その際、培養の時に用いた振盪培養器を使用することで、バイオリアクター内の納豆菌が十分に活動できるようにする。さらに、納豆菌の水質

浄化作用が確認できた後、仕組みを解明し、 他の分野にその技術ができないかを考えたい。

6. 参考文献

[1]「納豆菌を用いたバイオリアクターによる 生活排水の清浄化」, 桝谷英樹, 化学と教 育 Vol.50 No.7 pp530-531 (2002)

7. 謝辞

サイエンス研究会生物班の活動において、 顧問の矢野先生と櫻井先生には、多大なご指 導を賜りました。

また、サイエンス研究会生物班の別グループの先輩方には、多くのアドバイスをいただきました。この場をお借りして深く感謝申し上げます。

カツオブシ菌とその働き

4年C組 中西 夏輝 4年C組 谷口 亜紳 指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

サイエンス研究会生物班4年生は主に微生物を研究対象に据えて活動をしている。私たちはその中でも発酵食品に携わる菌・バクテリアなどに注目しており、身近な食品に潜む微生物の働きについて研究している。このレポートは、その中でも我々に昔からなじみのある発酵食品「カツオブシ」に関わる菌類についてまとめたものである。

キーワード カツオブシ菌、ペプトン培地、抗生物質

2. 研究の背景と目的

菌類は私たちの生活に大きくかかわっている。身近な生活品や食材から、社会の最先端科学技術まで、もはや人間は菌類の助けなくしては現在のような生活を送ることはできない。さらにいうならば、そもそもこの社会が成り立っているのは菌類たちのおかげである。私たちはそのような目立たずとも世界を縁の下で支えている菌類に興味を持ち、その中でも日本の伝統的な発酵食品である「鰹節」に携わる「カツオブシ菌」を研究対象とした。

鰹節とはその製作過程に「カツオブシ菌 (Aspergillus repens / Aspergillus glaucus)」というカビの一種が使われた世界でもっと堅い発酵食品である。その食品を作る際に使われる菌がどの様な性質を持っているのか、鰹節以外にその性質を応用できないのかについて興味を持ち、調べることにした。

今回扱う「カツオブシ菌」は菌界、子嚢 菌門、ユーロチウム目、マユハキタケ科、 アスペルギルス属に分類される真菌である。 この菌の特徴は、低水分・高塩分でも増殖できる点にある。これはこの菌の吸水力が極めて強いことに由来する。また、脂質分解酵素とタンパク質分解酵素により余分な脂肪・タンパク質をアミノ酸、イノシン酸という旨味成分へと分解している。鰹節から取ったダシに旨味があるのはこのためである。加えて、酸化防止酵素を生成しているため、一般の食品に比べて保存が効くようになっている。「カツオブシ菌」はまさに鰹節を作る上で極めて適した菌だといえる。

この菌を研究するために培地を作りたいが、カツオブシ菌に関する資料が著しく少ないため単離培養の方法を確立するところから始めた。

菌を育てるための培地には寒天培地や液体培地など多様にあるが、今回は「麹菌(Aspergillus oryzae)」と同じアスペルギルス属ということで寒天培地を用いて単離培養することにした。



図1 使用した鰹節

3. 研究内容

培地は、カビの育成に適したペプトン培 地を使用した。培地の作成方法を次に示す。

- ①200mlの蒸留水に、3.2gの寒天と10gの ブドウ糖ペプトンを加えて攪拌し完全に 溶かす。
- ②この溶液を300mlビーカーに入れ、オートクレーブを用いて20分120℃で滅菌する。
- ③6つのシャーレに均等に分け、寒天が固 まったら冷蔵保存する。

作成したペプトン培地に、削り取った鰹節の表面の粉末をかけて、30℃で数日間培養した。結果、数種類の菌のコロニーが確認できた。それらの菌の一部を採取し、それぞれを800µlの滅菌水に溶かし、ループで培地にまんべんなく塗りつけた。前回と同じ環境で数日間培養した後、灰色と黄色の2種類のコロニーが成長した。



図2 黄色のコロニー



図3 灰色のコロニー

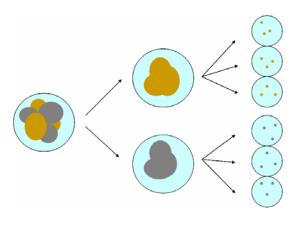


図4 単離培養

資料などを調べた結果、Aspergillus repensは黄色、Aspergillus glaucusは灰色のコロニーを作ることが分かった。その他、成長するときに大量の水分を必要とするなどの特徴が、今回できたコロニーと一致した。よってこの2つのコロニーはカツオブ

シ菌であると断定した。

つまり、図 2 はAspergillus repens、図 3 はAspergillus glaucusであると思われる。

図2,3の段階では一種類ではあるが複数のコロニーが混在している状況で、一つの細胞からできた一つのコロニーがほかのコロニーとは接していない状態でないと単離培養とは言えない。この実験を繰り返していくうち、単離培養に成功した培地もあったが、多くの培地でコンタミネーションが起こり、実験を次の段階まで進めるまでには至らなかった。

そこで、単離培養の成功確率を上げるために、抗生物質を用いた培地を使用することにした。前述のペプトン培地にカナマイシンを混ぜるという方法をとった。カナマイシンは、カビなどの菌を培養するときにコンタミネーションを防ぐために使われる抗生物質である。

今回は保存濃度が20mg/mlであるカナマイシンを、溶媒として滅菌 SP 水を用い、使用濃度を $10\sim50$ µg/mlに設定した。

まず、カナマイシンは、常温では活性が 失われるので、冷凍するために濃度 20mg/mlの保存ストックを作成した。作業 はすべてクリーンベンチ内で行った。

- ①マイクロピペットで10mlの滅菌水を量る。
- ②電子天秤を用いてカナマイシンを200mg 量りとる。
- ③先ほど量った滅菌水にカナマイシンを加 えボルテックスで溶かしこむ。
- ④この水溶液を1mlずつ分けて冷凍保存する。

このストックを10本作成した。

オートクレーブにかけた固まる前の培地に濃度が20µg/mlとなるようにカナマイシンを加え、シャーレに移して冷蔵した。このカナマイシン入の培地は合計11個作成した。



図5 完成した培地

4. 考察

今回の実験は、コンタミネーションを防ぐために行ったのもので、作成段階で菌の混入を防ぐ必要がある。使う機材や手を消毒し、クリーンベンチやオートクレーブを使用するなどの細心の注意を払った。作成した培地を使用してデータを取っていないが、培地に菌を移した場合、以下のような結果が予想できる。

- ①カツオブシ菌のみが成長し、他のバクテリアなどは全く成長しない、つまり、単離培養に成功する。
- ②カツオブシ菌と他のバクテリア等が混在 し、抗生物質を使う前とあまり変化が無い
- ③カツオブシ菌が成長せずに、バクテリアのみが成長する。
- ④全くなにも成長しない。
 - ①の場合なら問題無いが、②~④の場合

にはそれぞれ以下のような改善点が挙げられる。

- ②バクテリアがカナマイシンに対して耐性 を持っていることが考えられるので抗生 物質の種類を変える、もしくはカツオブ シ菌のみが成長できるぎりぎりの濃度を 調べる。
- ③カナマイシンが、カツオブシ菌の成長を 妨げており、さらにバクテリアに対して は効果を上げていないので、この場合、 カナマイシン以外の、カツオブシ菌には 効かない抗生物質を利用する。
- ④カナマイシンが、シャーレ内の全ての菌 の成長を抑制しているので、濃度を下げ て実験をやり直す。

5. 今後の課題

現段階ではカツオブシ菌の培養というごく初歩的な実験だが、将来的にはカツオブシ菌が持っているとされるリパーゼやプロテアーゼと言った酵素の検出や、それらの酵素が分解した結果できたアミノ酸などの検出を行っていくつもりである。そのためには、カツオブシ菌の単離培養する方法を確立する必要がある。今回はカナマイシンを使用するが、カナマイシンがアスペルギルス属に適さなければ、ほかの抗生物質の使用も検討する。他にも、カツオブシ菌は高塩分の状態にも耐性があるので、培地に塩を混ぜることも考えている。

6. 参考文献

[1] 「バイオ実験イラストレイテッド」 4巻~7巻, 真壁和裕, 秀潤社 (1996, 1997, 2003)

7. 謝辞

サイエンス生物班の活動において、顧問の矢野先生、櫻井先生に、多大なご指導を賜りました。そのほか、本校や仙台でのポスター発表において、的確なアドバイスを下さった他校の先生方、大学の先生方に感謝申し上げます。

ウニから考える生命の発生

5年B組 市瀬拓人 4年C組 中西夏輝

1. 要約

和歌山県白浜町にある京都大学瀬戸臨海実験所付近に位置する番所の崎の磯にてムラサキウニ、バフンウニ、ラッパウニなどを採取して、発生実験とその観察を連続して行った。

キーワード 卵割、原腸形成、器官形成、原腸胚

2. 研究背景

今回行った実験は、発生学の基礎となる 等黄卵であるウニの発生を実際に見て学ぶ ことによって発生のメカニズムを理解する ことである。

この実験では、発生実験に適していると言われているラッパウニ(Toxopneustespileolus)を用いて実験を行った。

3. 研究の目的

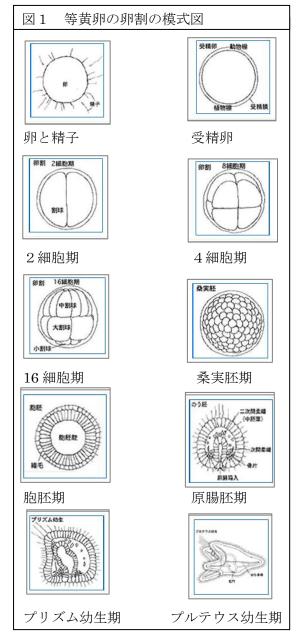
受精の瞬間からプルテウス幼生期まで、 をビデオカメラ等を用いて詳細に記録し発 生の仕組みを肌で感じる。

4. 研究内容

現地で採取したウニの受精卵を時間を追って観察する。

4-1. 基本事項

ウニの受精卵は受精後、等割を行い、桑 実胚期、胞胚期、原腸胚期、プリズム幼生 期、プルテウス幼生期を経て、普段目にす る成体のウニになる。



割の様子を観察する。

4-2. 実験内容

(1)実験方法

①採取したラッパウニの口の周囲の5箇所 に10倍希釈の塩化アセチルコリン

(CH₃COOCH₂CH₂N+(CH₃)₃) を、注射 器を用いて約 1~2ml注入する。これは性 腺刺激ホルモンの役割がある。



図2 塩化アセチルコリンを注入

②しばらくすると、性腺から精子または卵が出るので、精子の場合は乾いたペトリ 皿に、卵の場合は海水の入ったビーカー に性腺を下にして精子または卵を採取する。

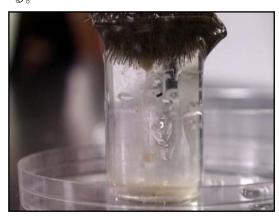


図3 精子または卵の採取

③光学顕微鏡下で受精を行う。その後、卵

(2)実験結果

(1) 受精

下図はウニの受精の瞬間の光学顕微鏡写 真である。

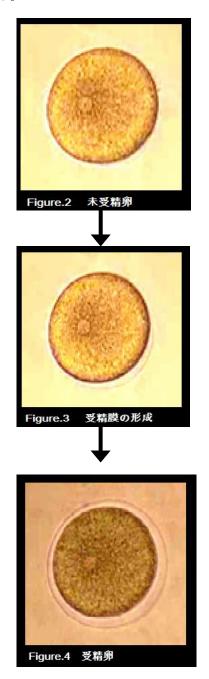


図4 ウニの受精の瞬間

Figure.2 は精子が卵に入る瞬間であり、 未受精卵の直径はおよそ 100μm である。 Figure.3 は精子が卵に入った瞬間であり、 Figure.4 は受精膜が形成された瞬間である。 この際、卵の最外部にゼリー層がある。一 般的に、このゼリー層を精子が通過する際 に、哺乳類は先体反応で酵素を用いてゼリ ー層を通過する。しかし、ウニの場合は精 子の先端にある卵の受容体に結合できる膜 タンパク質を用いてゼリー層を通過する。

また、先体突起膜と受容体に種特異性があるので、別の種の精子による交雑を防ぐことができるのである。

(2) 卵割

ウニは等黄卵であり、等割を行う。また、 16 細胞期までの卵割の仕方は次のようで あった。

2,4細胞期は共に経割で、8細胞期になる際にはじめて緯割を行った。16細胞期になる際には、動物極は経割、植物極は緯割を行い、大割球、中割球、小割球に別れた。さらに、桑実胚期(図5)、胞胚期、原腸胚(図6)になり、原腸胚後期からは遊泳するようになる。



図5 桑実胚期

このとき、なかには間柔組織と呼ばれる 粒の小さな細胞の塊が見えるようになる。 通常なら、この次にプリズム幼生になるが、 今回の実験では、海水からバクテリアが進 入し、培養液が腐敗し、幼生が死亡してい たため、実際にこの実験で観察できたのは 原腸胚期後期までであった。

今後は、形態だけでなく、DNA量の変化などについて分析しながら観察するとより良いと思われる。

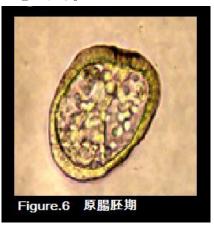


図6 原腸胚期

●ウニに関する資料

【和名】 ラッパウニ

【学名】 Toxopneustes pileolus

【分類】 動物界 棘皮動物門 海胆綱 サンショウウニ目 ラッパウニ科

【殼径】 10cm

【特徴】棘が密生し、殻は通常見えない。 棘は短く先端がラッパ状に開く。棘の先端には三叉状のカギがある。

【生態】

千葉県以南の岩礁域、珊瑚礁域に生息す る。ウニの中では移動速度が速い。

上記の生物は棘に毒を持っているという ことが知られている。通常、さされると痺 れや麻痺の症状が見られることが多い。最 悪の場合、死にいたるケースも報告されて いるので、実験時は厚手の手袋を着用し、 なるべく手で触れないよう留意する。

6. 参考文献・web ページ

- ○webページ
- [1] Introductry cell biology 東京医科歯科 大学教養部生物和田勝氏の web ページ http://www.tmd.ac.jp/artsci/biol/textli fe/lifesci.htm
- [2] 東邦大学メディアネットセンター,海藻研究日誌 web ページ http://www.mnc.toho-u.ac.jp/v-lab/kai sou/hitoiki/hitoiki01.html

○文献

- [1]「キャンベル生物学」, 丸善株式会社
- [2]「ダイナミックワイド図説生物総合版」, 東京書籍株式会社

7. 謝辞

この研究・実験を進めるにあたり、京都 大学瀬戸臨海実験所の宮崎先生に大変、ご 協力いただきました。この場をお借りして お礼申し上げます。

ベンソンの実験

5年A組 行松 和輝5年C組 國松 大悟指導教諭 矢野 幸洋指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

ベンソンの実験は、植物は光合成において、一定の期間光を当てさえすれば、そのときに生み出した化学物質を用いて、暗闇においてもその後の反応を続けることが可能であるということを明らかにしている。この実験を新しい手法を用いて追実験し、正確に数値化できないかを調べた。また、その手法には画像解析ソフトを用いて、正確性とともに効率性もあげた。これにより、光合成の条件による効率変化を調べることが容易になる。

キーワード ベンソンの実験、画像解析ソフト(imageJ)、数値化、 光合成の第四過程

2. 研究の背景と目的

僕たちが研究しているのは大まかにいえば、植物に光合成を暗闇の中でさせようというものだ。この研究は、「ベンソンの実験」と呼ばれる実験の結果により、成功する可能性が保障されている。何故なら、ベンソンの実験とは、光合成の最後の過程は、光なしでもおこなえるということを主張する実験であるからだ。

具体的にベンソンの実験の実験方法を示そう。ベンソンの実験では光合成をするためには、二酸化炭素と光エネルギーと水が必要であり、一つでも欠けると光合成ができなくなることを用いる。

まず、脱気して空気を無くした状態で植物に光を当てる。そして植物に、光合成をせずに光エネルギーだけをためさせ、その光エネルギーによって光合成の次の段階までを行わせる。そこで最後に、この光エネルギーがたまった状態で暗闇に入れて空気

を入れ、植物が酸素とデンプンを合成する かを調べる。

この実験では、その結果として、植物はある一定の時間だけ酸素とデンプンの合成が行う、ということを示した。つまり、この実験によって植物は一旦光を浴びた後であれば、光合成の最後の過程を暗闇の中でも行うことが出来るということが実証されている。

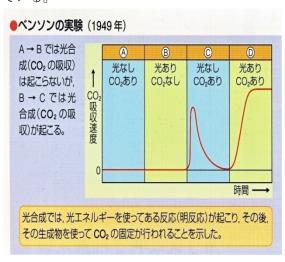


図1 ベンソンの実験

だが、この研究の前提であるその実験方法は何故か教科書などにも詳しく記載されていない。そこで本研究の前提としてこれまでにその追実験を試み、結果の確認には、視覚的に成功した。しかしながら、前回の実験では上手く数値化できなかったため、今回は正確に数値を計測する方法を探った。

3. 研究内容

3-1. 前回の実験方法

ひとまず、今回の実験方法の比較対象と して、前回までの実験方法とその問題点を 示す。

まず大まかにだが、前回の実験方法では 光合成で消費される二酸化炭素量を、pH値 という指標を用いて測った。結果を以下に 示す。

	1	2	3	4	5
A	7.1	7.6	7.7	4.0	4.9
В	7.2	8.2	8.2	5.1	5.3
C	7.1	7.8	7.9	4.9	5.1
D	7.1	9.0	6.2	5.2	5.1
E	7.2	9.2	6.5	4.9	5.5
F	7.1	8.9	6.4	4.9	7.1
G	7.2	8.7	6.1	5.3	6.3

- ①純水の pH 値
- ②そこに石灰水を入れたものの pH 値
- ③オオカナダモを入れ、15 分間 2000lux の光に当てたものの pH 値
- ④その後、二酸化炭素を 24ml 入れたものの pH 値
- ⑤この試験管を 10 分間暗室に放置した 後の pH 値

と定めた。

これでは、最初の①の段階であっても、

すでに pH 値が変わっており、正確性が極めて低い。これだけの違いが、同じはずの段階で生じてしまっているので、今調べたい、暗闇で光合成をしているという証拠である④から⑤にかけての変化は、極めて微妙で信憑性に欠ける。

これらはまさに酸素の量をはかろうとして、pH値という指標を用いたがために起きた失敗である。なぜなら、pH値を測るためには、各段階で測る前にいちいち計測部を洗浄しなくてはならず、検定もしなくてはならないからである。これでは、正確性が落ちるとともに、実験にかかる時間も長くなってしまう。

これらの実験結果と考察を踏まえて、私たちは光合成によってできるもう一つの物質、デンプンの合成量を測ることにした。そして、その計測には、ゲノム解析に用いられている、色の濃淡を見ることのできる画像解析ソフト(imageJ)を用いた。

面積とまり具合をそれぞれ測定し、面積 当たりの光合成量を測定し、写真を各段階 で撮ればいいだけにすることにより、精度 と効率性をあげ、より正確にそして迅速に 実験結果を得ることができるのではないか と考えた。

3-2. 実験方法

- (1)シロツメクサの葉を一枚ずつ写真で 撮り、面積を測定する。
- (2) それらのシロツメクサの葉を
 - ①アスピレーターにより真空状態にして光を30分当て、その後空気を入れ、暗闇に入れるもの
 - ②アスピレーターにより真空状態にして光を 30 分間当てた後そのまま暗

闇に入れるもの

③何もしないで暗室に30分間入れるもの

の3つに分ける。

- (3) 試験管にエタノールを入れ、そこに 先ほどの葉をそれぞれ入れ、30分間 約70℃で湯煎し、漂白する。
- (4) 漂白後のシロツメクサをそれぞれョウ素液で染色し、その後染まり具合を画像解析ソフトでピクセル強度として計測する。

3-3. 実験結果

(実験結果の説明)

Number	Area	Average	AVERAGE
1	6988	53.4536	
2	6267	56.0496	
3	6297	61.9612	45.17916
4	6777	21.8656	
5	5714	32.5658	
6	4673	45.6254	
7	6881	34.4936	33.96892
8	7742	31.0062	
9	5643	35.9384	
10	5218	22.781	
11	5971	17.3684	
12	5914	30.0478	
13	8370	41.783	36.43413
14	7112	60.4364	
15	5588	48.6554	
16	5653	20.3138	

1~5 が実験方法で述べた①の状態のシロツメクサの葉

6~10 が実験方法で述べた②の状態のシロ ツメクサの葉 11~16 が実験結果で述べた③の状態のシロツメクサの葉

ここで、Number が番号、Area が面積、Average がピクセル強度(高ければ高いほど 染まり具合が悪いことになる)、AVEREGE が上から順に、①の状態すべての平均、②の状態すべての平均、③の状態すべての平均をそれぞれ指している。

4. 考察

まずは良かった点を述べよう。

実験結果をみる限り、精度が上がったのは一目瞭然だと思う。前回は pH を測定したが、小数点第1位までしか測定することができなかった。それに対し今回は画像解析ソフトを用いることによって面積、そしてピクセル強度までも小数点第3位まで出すことが可能になり、実験誤差が縮小したといえる。そしてもう一つ良かった点は、画像解析ソフトを用いているため、数値化してデータ処理するのも容易になった点である。

しかしながら残念なことに、この実験には、デンプン量を測定したために、ある欠点が生じた。それは、光を当てたのが30分、暗闇に入れていた時間が20分だけ当てたのでこの実験中に合成されたデンプン量が実験結果として表れていないと思われる。デンプンはたとえ光合成によって合成されたとしても、シロツメクサの葉にしっかりと吸着しないため、エタノールによる脱色のときに、葉緑体の色素と共に消えてしまい、今回の実験のヨウ素液による反応には現れてこないということだ。

このことにより、実験の前に葉に蓄積さ

れていたデンプンだけが染まってしまい、 実験中に合成されたデンプンが染まらなかったので、正確なデータが出ない可能性が あり、実験が不透明になってしまった。

5. まとめと今後の課題

失敗した要因の一つである、実験の前の 段階で固定されているデンプンについては、 実験を行う一日前に採取して暗闇に置いて おくことで、解決できると思う。

また、葉でのデンプンの合成量を上げる ためには、光を当てる時間を長くすること が一番良い方法だが、今回の実験では、水 を与えないため、光を長く当てすぎると、 シロツメクサがしおれてしまう。

これに関して、生息範囲が水中のオオカナダモで試みてみた。しかし、アスピレーターで真空状態にするとき、水から空気を抜くのにあまりにも時間がかかり効率が悪いことが判明した。効率の良い実験という観点を重視するためには、水分を与えつつ長い時間光をあてる方法を見つけることが必要であると考えている。

最後になるが、僕たちは既になされたベンソンの実験の追実験をする立場であるため、これまでずっと、研究をする前から実験結果を予想しすぎていた感がある。つまり、自分たちの実験結果をベンソンの実験と照らし合わせて判断し、理解しようとしすぎ、本来の実験の結果をしっかりと見ていなかったように思う。そこでこれからは、理論的に分かっていることでも、研究前から思い描く結果にこだわらず、実際の実験結果をしっかりと吟味し、そこから得られる発見を大事にしていこうと思う。

6. 謝辞

指導してくださった矢野先生、櫻井先生 有り難うございました。

7. 参考



図2 脱色後のシロツメクサ



図3 染色後のシロツメクサ

プラナリアの白色死について

5年B組 寒河 裕人 指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

以前プラナリアに光を照射して分裂の様子を観察していたときに、すべての個体が白くなって死んでしまっていたことに興味を持ち、光がプラナリアの白色死を誘発するのではないかとの仮説を立てて実験を行った。結果、光ではないということが分かったのだが、その後の死因追求実験で、水温上昇が死亡原因であるという実験データが得られた。そこで、今回は水温とプラナリアとの関係性をより詳細に調べた。また、以前行った死因追求のための光照射実験では、光をあてながら水温も上昇させてしまう方法であったため、水温を上昇させないように追実験を行った。すると水温に関係なく、赤色光をあてた個体だけが死ぬという現象を確認することができた。

キーワード プラナリア (Dugesia austroasiatica)、白色死、プロテアーゼ、 波長

2. 研究背景•目的

プラナリアは水の中の暗い所に生息している。プラナリアは有性生殖するが、分裂も行うといわれている。そこで以前異なる波長の光がプラナリアの分裂に及ぼす影響について調べるために分裂実験を行った。すると、実験開始から2、3日後に全個体が白くつぶれたように死んでしまった。その異常な死に方に興味を持ち、死因解析をした結果、水温上昇によるものだろうというデータを得た(2008 寒河)。そこでさらに温度とプラナリアとの関係を探るために、プラナリアの生存できる限界の温度と、温度変化におけるプラナリアの状態の変化について調べた。

また、前回の死因追求のための光照射実験では、光源から発せられる熱によって水温が上昇してしまっていたので、水温が上

昇しないように実験方法を改善し、追実験 を行って死因解析をした。

本研究の目的は以下の2つである。

- ・温度が変化したときプラナリアはなぜ 白色化するのかを調べる
- ・プラナリアを死亡させた原因について 再検討する



図1 テクノポット内のプラナリア

3. 研究内容

≪実験 I:プラナリアの死ぬ温度≫

(1) 仮説

31~34℃の間で死ぬ。

(2) 実験方法

- ① 水温を調節した水をいれたテクノ ポットにプラナリアを3匹入れる。
- ② 1日放置し様子を観察する。

(3) 実験結果

水温	31℃	30℃	29℃	28℃
結果	×	×	×	\circ

○…全ての個体が生きていた

×…全ての個体が死亡

(4) 考察

29℃で死ぬということが分かった。また、 今回仮説と大きく差がでてしまった。前回 の実験は約20℃の水にプラナリアを入れた 状態から水温を上げていった。しかし、今 回の実験は、調べる温度に水温をあらかじ め調節してから、プラナリアを入れてその 温度をキープし様子を観察した。このよう な準備条件の違いが、仮説と差ができた原 因ではないかと推測できる。

(5) まとめ

今回の実験結果より、プラナリアの生存できる限界の温度は、28℃であるとわかった。

≪実験Ⅱ:激しい温度差におけるプラナリ アの状態について≫

冷たいところから熱いところへ、激しい 温度差があるところに入れれば、実験 I で 示した温度より低い温度でも死んでしまう のではないかと考えた。

(1) 仮説

激しい温度差の環境に適応できず 29℃ より低い温度で死ぬ。

(2) 実験方法

① テクノポットにプラナリア 3匹を 入れたものを1日冷蔵庫 (4°) に 入れる。 ② 翌日28度に水温を調節したテクノ ポットに、プラナリアを移し替えて 3~4日放置し様子を観察する。

(3) 実験結果

移し替えた直後、体をよじる動きを見せたものの、 $3\sim4$ 日放置しても結局死ぬことはなかった。

(4) 考察

体をよじる動作は、環境が変化した一時だけで、その後は元気に動いていることから、激しい温度差で見せた動きは、急激な温度変化による、一時的な苦しみによる動きにすぎないだろうと考えられる。

(5) まとめ

急に激しい温度差のある環境に変化して も、プラナリアの生死に影響はないとわか った。

≪実験Ⅲ:死因追求追実験≫

これまでプラナリアが白色死するのは、 水温上昇によるものとして実験を行ってきた。しかし、以前行った、「光に当たると死ぬ」という仮説を確かめる実験が、プラナリアに温度の影響も与えてしまうような方法で行われていた。そこで、光からだけの影響を受けるように、光源とプラナリアの入ったテクノポットの間に、水槽を置き、テクノポット内の水温上昇を抑制するよう工夫し、追試実験することにした。

(1) 仮説

前回の光照射実験では死ななかったので、 今回の追実験でも死なないのではないかと 考えた。

(2) 実験方法

① テクノポットに約 120ml 水を入れ、 プラナリアを 3 匹入れる。 ② ①に温度計を差し込み、光源とテク ノポットの間に水を入れた水槽を 置き、1日放置し観察する。

(3) 実験結果

光	赤外線	赤色光
実験期間	11/26~11/27	1/13~1/14
1日目水温	18.0℃	10.8℃
2日目水温	19.1℃	11.0℃
生死	0	×

光	青色光	緑色光	
実験期間	1/26~1/27	1/26~1/27	
1日目水温	10.4℃	10.4℃	
2日目水温	9.9℃	9.9℃	
生死	0	0	

○…全ての個体が生きていた

×…全ての個体が死亡

(4) 考察

プラナリアは、赤色光にさらされると死ぬのだということが分かった。前回死ななかったのは、温度上昇を避けるため、光の強さをあまり強くできなかったためだと考えられる。

ここで問題となるのが、なぜ赤色光にさらされると死ぬのかということである。そこで、光照射による生体への影響はあるのかどうかを調べてみたところ、気になった点があった。それは光感受性物質についてである。

現在、癌治療にPDT(光線力学的療法) という治療法がある。これは、光感受性物質が赤色光線にさらされると、光エネルギーを吸収して活性化し、基底状態に戻る際のエネルギー転換により生じる活性酸素によって、細胞を変性、壊死に陥らせるというメカニズムを利用し、癌細胞を破壊する という治療法である。この治療法では、数 多く存在する光感受性物質の中から、体に 害がなく、さらに癌に選択的に多く集まる 物質を用いている。

この調べた結果から、プラナリアにおいても、何らかの光感受性物質が存在し、それが強い赤色光にさらされることによって、前述したようなメカニズムでプラナリアの細胞も破壊されたのではないかと考察した。

(5) まとめ

プラナリアは赤色光によって殺されてしまうということがわかった。

≪実験IV:死亡過程観察実験≫

前回にも同じ実験を行ったが、温度による死と、光による死とに違いが見られるのかどうか調べるために再度実験を行った。

(1) 仮説

温度の時と同様に、体が裂けていき、白いものが体の中から出てくるだろうと考えた。

(2) 実験方法

- テクノポットに約 120ml の水を用意 する。
- ② ①にプラナリアを3匹入れ、ふたをする。
- ③ ②を光照射装置の中に置き、光源とテ クノポットの間に水槽を置く
- ④ コマ撮りをするカメラをその恒温室 に設置し1日中コマ撮りをさせ、プラ ナリアが死亡する過程を観察する。

(3) 実験結果

インターバル 10 分でコマ撮りをしたと ころ、96 枚目あたり(実験開始からおよそ 16 時間後)にプラナリアに異常が確認され (図3)、116 枚目あたり(実験開始からお よそ 19 時間 20 分後) に死亡が確認された (図 4)。

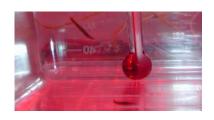


図2 実験開始直後のプラナリア



図3 プラナリアの異常確認



図4 プラナリアの死亡確認

(4) 考察

仮説通り、水温上昇による時と同じく、 実験途中からプラナリアは体をよじって苦 しんでいる様子を見せ、最終的に体が裂け ていき、白いものが体の中から出てくる様 子がわかった。しかし、前回と異なる点が あった。それは、死ぬまでの時間である。 水温上昇での実験では、実験開始から約4 時間半で死亡したのに対し、今回は約19時 間半とかなり時間がかかっている。しかし これは水温の高さや光の強さの変化によっ てそれぞれ死亡までの時間も変わるかもし れないので、今のところまだ水温上昇の方 が赤色光に当たるより死亡しやすいとは言 えない。

また、後日、京都大学の阿形教授にお話をうかがったところ、プラナリアの白色死は、個体として死んでしまうと、体内に残

っているプロテアーゼという酵素が個体の タンパク質を分解するため、内側がやぶれ て内部のものが外に出ていくことによると いうことを教えていただいた。この、白く なって死ぬのではなく、プラナリアの死後 に白くなるという事実から、温度や赤色光 は白色化には関係がないのだということが 分かった。

(5) まとめ

死亡過程には、光照射の場合と水温上昇の場合に違いが見られない、ということが 分かった。

4. 今後の課題

なぜ赤色光でプラナリアは死ぬのか、原因を突き止めるとともに、水温の高さや光の強さを調節してそれぞれプラナリアが死亡するまでの時間に変化が表れるかどうか調べたい。

5. 参考文献

- [1] 「水槽のプラナリア」情報 http://www2u.biglobe.ne.jp/~gen-yu/ta nkpla.html
- [2] 顔が違う(プラナリア: Dugesia spp.) http://planarian.net/gf/2000/pla2.html
- [3] 手術不要、肺がんのレーザー治療 PDT http://home.j07.itscom.net/pdt/about.ht ml
- [4] DOJIN NEWS/Topics on Chemistry http://www.dojindo.co.jp/letterj/132/topic/01.html

6. 謝辞

今回の研究をするにあたり、指導してい ただいた櫻井先生に深く感謝いたします。

"草薙剣仮説" 実証

シカのフンが作る生態系

5年C組 林 由佳里 指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

現在、外来植物が侵入し、在来植物を脅かしている。なぜ、外来植物は繁茂できるのだろうか。これを説明する仮説『新兵器仮説』が 2000 年に雑誌サイエンスに掲載され、支持を集めつつある。ところで奈良公園には古くから、青いシバが広がり、シカがシバを食んでいる。ここのシバは日本古来ある在来植物だ。ここには、シバ以外の植物、特にクローバーなどの外来植物は繁茂していない。上記の説が支持を集める中、なぜ奈良公園には未だに在来種のシバが主に生息していけるのか?

私は考えた。日本武尊(ヤマトタケルノミコト)が草薙剣(クサナギノツルギ)で外来植物を薙ぎ払って古来の風景を守りつづけたというのか。とすれば薙ぎ払う『剣』はどこにあるのか。この答は昔から落ちているシカのフンにあるのではないだろうかと。

この論文で、以下の5つの事を実験や観察を繰り返し一つ一つ証明していった。

- 1. シカのフンがシバ以外の発芽を抑制する選択性があること。
- 2. その原因はシカの食べる植物にあったこと。
- 3. 世界で初めて、シカ(動物)のフンから原因物質を抽出・解析した結果、植物のアレロパシー物質が確認できたこと。
- 4. シカのフンを用いた防草剤のようなものを作成し、その効果を検証したこと。
- 5. シカのフンがあることで、奈良公園には外来植物が繁茂できないと証明したこと。

キーワード シバ、シカ、フン、外来植物、アレロパシー、アレロパシー物質、 新兵器仮説

2. 研究の背景と目的

この研究の舞台となるのは、奈良公園の 飛火野という場所である。ここには多くの シカ(学名 Cervus nippon)が生息している。 シカはおもにノシバ(学名 Zoysia japonica、 以下シバ)を食して生活している。また5月 と10月には、シバは種子を実らせる(図1)。 このため、シカのフンの中には5月と10月 頃にシバの種子が入っていることがある。 シカはフンを排出し、公園内に黒いシカの





図1 シバ(5月中旬撮影)

図2 シカのフン

フンをばらまく(図 2)。この環境が、在来種であるノシバの繁栄を支えているのではないかと考え、「草薙剣仮説」を提唱し実証することにした。

3. 研究内容

3-1. 基礎研究

この節では2の事柄について考察したことを述べる。

- i)シカのフンが奈良公園のシバ以外の植物の発芽率を抑えること。
- ii) その原因はシカの主食であるシバにあること。

0)シカのフンの不思議

10月頃に奈良公園から採取した、シカのフンを土の中に埋めた。すると、フンの中に入っているシバの種子だけが発芽、成長し、他の植物は枯れた(図3)。そこでシカのフンがシバ以外の発芽を抑えるのではないかと考えた。



図3 フンから発芽したシバ

i)シカのフンの発芽抑制効果の検証

i - 1 目的

シバを食したシカのフンがシバ自体と、 シバ以外の植物(アブラナ、ナガハグサ)に対 してどのような影響を及ぼすか調べる。

i - 2 仮説

コントロール(今回はフンの入っていない ものとする)よりもシカのフンを入れた条 件の方が低い発芽数となる。

i-3 実験方法

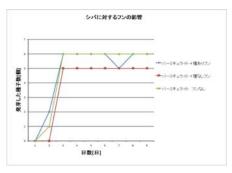
図4のようにシカのフンを入れ、装置の 真ん中にノシバ以外の植物、双子葉植物ア ブラナと単子葉植物ナガハグサ (*Poa pratensis*)の種子(25 粒)と、ノシバの種子 (100 粒)をまき、日ごとの種子の発芽数を計測した。



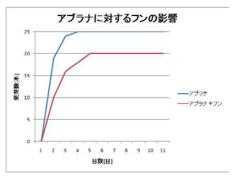
図4 実験中のポット

i - 4 結果・考察

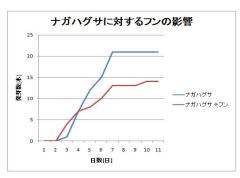
グラフ(No.2, 3)で、ナガハグサ、アブラナの実験において、フンと一緒に埋めた方の発芽数が少なかった。故に、シバを食べたシカのフンはシバの発芽には影響を与えず、シバ以外の植物の発芽を抑えることがわかった。



グラフ1 シバに対するフンの影響



グラフ2 アブラナに対するフンの影響



グラフ3 ナガハグサに対するフンの影響

ii)発芽抑制効果の原因特定

ii - 1 目的

なぜシカのフンはシバ以外の植物の発芽 を抑えるのだろうか。奈良公園のシカのフ ンを分解すると、公園に生息するシバの繊 維が多くみられた。この繊維は、シカが食 したシバの未消化物質ではないかと考えた。 つまり、シカが食べた植物とフンの発芽抑 制作用は関係しており、シカのフンの発芽 抑制作用は植物による影響が大きいのでは ないかと思われる。そこでシカのフンの発 芽抑制効果が、この未消化物質である植物 の繊維によるものかどうか調べることにし た。今回の実験は奈良鹿愛護会の協力のも と行った。この鹿愛護会には2種類のシカ が保護されている。ネズミムギ(Lolium mutiflorum Lam.)だけを食すシカと、アル ファルファ(Medicago sativa.L)だけを食す シカの2種類である。 鹿愛護会にいるシカ は、ネズミムギもしくはアルファルファの どちらか一方しか食していない。この2種 類のシカのフンを用いて、実験を行なった。 ii - 2 仮説

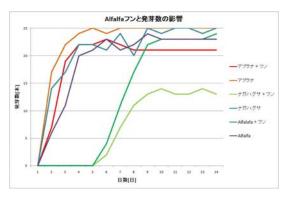
アルファルファは他の植物の成長を抑制する効果が強く、ネズミムギは他の植物の成長を抑制する効果は弱い(参考文献[1])。故にアルファルファ、シバを食べたシカのフンの抑制力は強く、ネズミムギを食べた

シカのフンの抑制力は弱い。

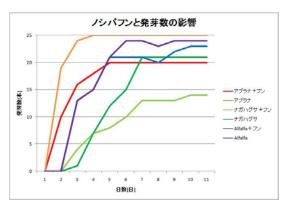
ii-3 実験方法

- ① 実験対象とする植物は、ナガハグサ、 アブラナ、アルファルファの3種類と し、実験で用いるフンはアルファルファ、ネズミムギ、シバのフンの3種類とした。
- ② それぞれシバ、ネズミムギ、アルファルファの3種類のシカのフンを違った 牛乳パックに入れた。
- ③ シバ、ネズミムギ、アルファルファの 3種のフンを入れた牛乳パックにそれ ぞれナガハグサ、アブラナ、アルファ ルファの種子を25粒入れた。
- ④ 日ごとの種子の発芽数を計測した。

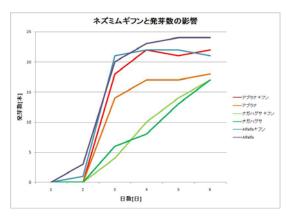
ii - 4 結果



グラフ4 アルファルファ入りフンの発芽数への影響



グラフ5 シバ入りフンの発芽数への影響



グラフ6 ネズミムギ入りフンの発芽数への影響

ii - 5 考察

アルファルファ入りフンは、アブラナ、 ナガハグサの発芽を抑制するが、アルファ ルファ自身の種子の発芽を抑制しない(グ ラフ4)。

シバ入りフンは、アブラナ、ナガハグサ において発芽抑制効果を示すが、アルファ ルファに対しては発芽抑制効果を示さない。

一方、抑制効果の弱いネズミムギ入りフンではアブラナ、ナガハグサ、アルファルファ、どれに対しても抑制効果は見られなかった(グラフ5)。

ii − 6 まとめ

なぜフンの中に入っている植物と同じ種子は、発芽抑制されないのか。なぜシカのフンには、発芽を抑制する植物としない植物があるのか。シカのフンの発芽抑制効果はシカが食べる植物(フンに含まれる植物)特に植物のアレロパシーの影響にあると考えた。

アレロパシーの特徴的な性質は、選択性と特異性である。シカのフンは(殊にノシバ、アルファルファ入りのものでは)この2つの点を示している。また、植物のアレロパシーの効果が強いものは、他の植物の発芽を抑制することも知られている。私はここ

で、間違いなく、フンの中にはアレロパシ 一物質が含まれていると確信した。

3-2. アレロパシー物質の抽出と解析

前回の実験から、シカのフンの発芽抑制 効果には、アレロパシーが関わっていると 考えた。アレロパシーとは「植物が放出す る化学物質が他の生物に阻害的、あるいは 促進的な何らかの作用を及ぼす現象」と定 義されている。シカのフンにも同じような 現象がおきた。故にシカのフンの中に植物 由来のアレロパシー物質があると考えた。 そこで、筑波農業環境技術研究所、藤井義 晴氏の指導の下、シカのフンのアレロパシ 一効果を調べる実験と、アレロパシーの原 因となるアレロパシー物質を解析する実験 を行った。実験は合わせて3つ行った。こ の章では、以下、3つの実験について、そ れぞれ述べる。

- i)溶媒分画法による実験
- ii)サンドウィッチ法による実験
- iii)アレロパシー物質の解析結果

また、実験で用いたフンはすべて、アルファルファのフンである。これはアルファルファの葉には強いアレロパシー物質が含まれていることが、既に明らかになっているからである。

i)溶媒分画法による実験

溶媒分画法というのは、アレロパシー物質を探す方法として最もよく使われる方法である。これでどの溶媒にアレロパシー物質が一番溶けやすいかを調べることができる。

i-1 仮説

シカのフンには植物由来のアレロパシー 物質が含まれる。

i-2 実験方法

① 実験は3反復(実験を一度に3回行うこと)行った。今回の実験ではフンを溶かす溶媒を8種類使用した。故に、1 反復の実験につき、9種類の条件が(8種類+コントロール1種)ある。

8種の溶媒は極性の高いもの順で

極性	溶媒	
高い	水	
1	80%エタノール+20%水	
	(以下 80%エタノール)	
	メタノール	
	無水エタノール(以下エタノール)	
	酢酸エチル	
	アセトン	
↓	クロロホルム	
低い	nーヘキサン	

② これらの8種類の溶媒 40ml の中にシ カのフン 2g を入れ、25℃で 15 時間抽 出する。



図5 抽出の様子

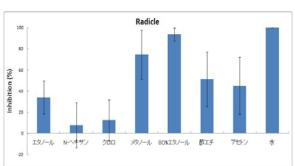
- ③ 濾紙をひいたシャーレの中に抽出溶液 を 5ml ずつ入れ、溶液の揮発成分をとばす。
- ④ シャーレの中に 0.1%ジメチルスルホ キシド溶液を 5ml 分注する(種子に抽 出した成分を吸収させる為)。

- ⑤ シャーレーつにつきレタスの種子を5 粒まく。
- ⑥ これらのシャーレを 25℃で4日暗室 に置き、発芽させる。
- ⑦ このレタスの種子の幼根、幼軸の長さ を測定し、計算して抑制率は次の式で 導き出した。

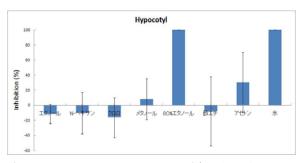
(抑制率)=100-[(a/b)×100] (%) a=ある溶媒で抽出した条件の平均 b=コントロールの平均

すなわち、ある溶媒から抽出した条件 の抑制率が高ければ、その溶媒にはア レロパシー物質がよく溶けていると判 断した。

i-3 結果



グラフ7 レタスの種子に対する根の抑制率



グラフ8 レタスの種子に対する幼軸の抑制率

i-4 考察

幼根、幼軸共に抑制率が高いのは、水と 80%エタノールであった。故に、水と80% エタノールにアレロパシー物質がよく溶け ていると推測できる。 自然界では、水は雨によってもたらされる。フンのなかのアレロパシー物質が常に雨によって、奈良公園のシバに与えられているのではないか。

ii)サンドウィッチ法による実験

先ほどの i)のフンのアレロパシー物質を抽出する実験の、アレロパシー物質抽出確認実験を行なった。

ii - 1 仮説

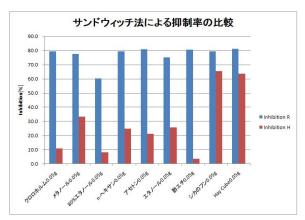
シカのフンからアレロパシー物質が抽出 できていれば、抽出して残ったフンにはア レロパシー活性は見られない。

ii − 2 実験方法

i)の実験で、フンを抽出して残ったもの を用いる。

- ① 低温ゲル化寒天を、オートクレーブに かけて溶かし、荒熱をとる。
- ② 寒天を5ccずつマルチプレート(1つのプレートに6つ穴があいている)の中に分注する。
- ③ 寒天が固まらないうちに、抽出した後のフン 0.05g ずつを、5つの穴に入れる。残り1つの穴はコントロール用として何も入れないでおく。
- ④ 寒天が固まったら、③の上からさらに5cc ずつ寒天を分注する。
- ⑤ ④の寒天が固まったら、レタスの種子 を5粒ずつ撒く。
- ⑥ マルチプレートを25℃で5日間暗室に入れる。
- ⑦ 5日たったところでマルチディッシュを取り出し、幼根と幼軸の長さを測定する。

ii - 3 結果



グラフ 9 サンドウィッチ法による抑制率の比較 青線 "Inhibition R"は幼根、赤線 "Inhibition H" は幼軸の抑制率

ii - 4 考察

80%エタノールにおいて、根の抑制率が他と比べて低い。既に先のi)の実験で抽出され、抑制物質が余り残っていないからと考えられる。フンから80%エタノールで抽出したものに、アレロパシー物質が溶け出しているという可能性が、より確実なものになった。

iii)アレロパシー物質を解析する

GC-MS (ガスクロマトグラフィーGC と質量分析器 Mass を組み合わせたもの) を用いて、溶媒中に溶けている物質の構造解析を行った。



図 6 GC-MS の様子 左:GC-MS 右:GC-MS の結果解析用 PC

iii-1 実験方法

i)で得られた溶液を解析に用いた。ただ し、水で抽出した溶液はカラムが劣化する ので用いなかった。

GC-MS の条件は、200℃で保持 30 分である。アレロパシー候補物質は、OH 基、C=O 基、あるいは S→O 基を持ち、分子内に酸素原子を多く含むものと、励起されやすい二重結合や三重結合を持つものが多い。今回、解析した物質をアレロパシー物質と判断するにあたり、上記の方針に従って判断することとした。

iii-2 結果

ここでは解析の結果、アレロパシー物質 とわかったものだけを記載する(図 $7 \sim 10$)。

解析結果の資料の見方について、ここで少し触れておく。一番上の四角、<<ターゲット>>と書いてあるものは、観測したピークを解析した結果である。その下5つの四角内には解析結果、類似していると判断された候補物質が表示されている。これら5つの四角は候補物質のシミラリティ(類似度)の高い順に並んでいる。("SI"の後にシミラリティ【%】が表示されている)

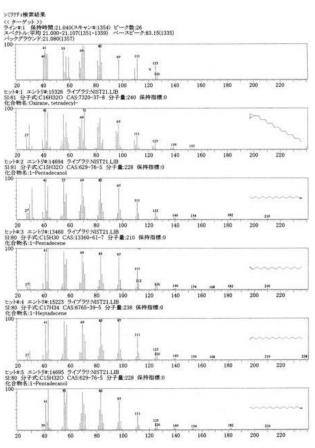


図7 80%エタノール抽出したクロマトグラフィーの解析結果

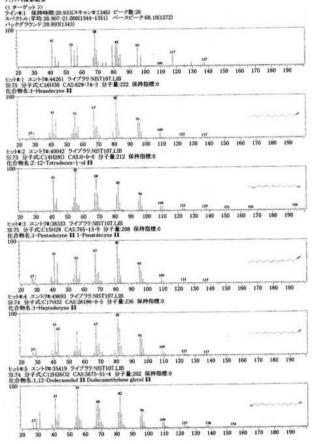


図8 無水エタノール抽出したクロマトグラフィーの解析結果

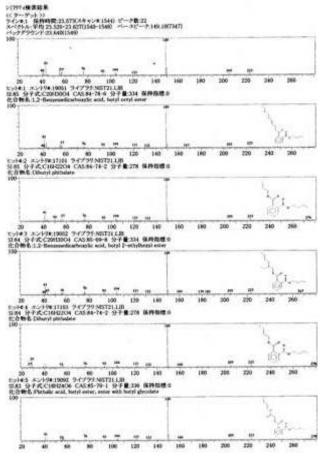


図9 メタノール抽出したクロマトグラフィーの解析結果

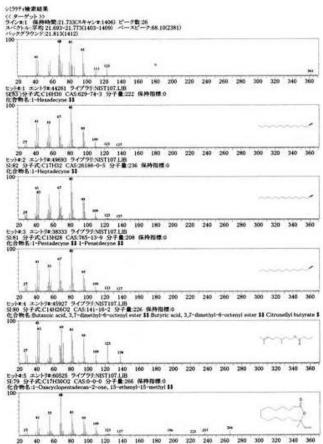


図 10 酢酸エチル抽出したクロマトグラフィーの解析結果

iii-3 考察

図7の結果より、端が二重結合の物質が 見られた。また、シミラリティが高く、数 値(四角の中、縦線の上にある数値)もほぼ一 致しているため、確実な結果といえる。 こ れはアレロパシー物質候補物質として挙げ られているものの中に含まれるため、アレ ロパシー物質候補の一つと考えられる。

図8と図10の結果より、端が三重結合の物質が見られる。これはセイタカアワダチソウのアレロパシー物質として知られているものである。だが抽出できた物質の量が少なかったので、あまり発芽抑制の影響が見られなかったのではと考えられる。

図9の結果より C=O 結合を持つ物質が確認できる。しかし、物質の量が少なかったため、発芽抑制力にはならないと考えられる。

iii−4 まとめ

以上の結果より、アレロパシー物質がシカのフンに含まれていることが確認できた。これまで、動物に食された植物が消化されて、フンとして排出されたもののなかにアレロパシー物質があるとは誰も考えていなかった。しかし今回、誰も確認しなかったことを地道な実験を繰り返し証明することができた。シカのフンの中には植物のアレロパシー物質が含まれている。

3-3. シカのフンを用いた防草剤の作成とその効果の検証

我が校では、バミューダグラスというシバを用いた校庭緑化事業を行っている。しかし、周囲の環境を考慮して、除草剤などの農薬は使えない。3-1の基礎実験から、シカのフンはシカの食べる植物によって、抑制する植物や、その効果も違うことがわかった。故に、食べる植物を替えることで、フンの特性が変わるのではと考えた。そこでフンを利用した環境にやさしく、雑草の侵入を防ぐ防草剤のようなものを考案し、その効果を検証した。

<仮説>

実験ポットにおけるローバーの発芽数は、以下に示す順番で多い(1番が最も多い)。

- 1. コントロール (何もおかない)
- 2. シバの葉をポットに入れたもの
- 3. シカのフンをポットに入れたもの
- 4. シバの葉とシカのフンの両方をポットに入れたもの
- 5. シカのフンを、3の二倍量ポットに 入れたもの

<実験方法>

この実験は鹿愛護会と本校の副校長先生の協力のもと行った。

- ① 我が校のシバの種類はバミューダグラスというものである。これを刈ったものを 5kg ほど毎日用意する。
- ② 鹿愛護会にもっていき、これをシカに 食べさせる。
- ③ 鹿愛護会から学校のシバ、バミューダ グラスの入ったフンを持ち帰る。
- ④ 学校のシバを想定して、牛乳パックに 学校のシバを植える。

- ⑤ 実験条件は5つ。1.シバだけを植えたもの(コントロール)、2.シバの葉を加えたもの、3.シカのフンを加えたもの、4.シバの葉とシカのフンを加えたもの、5.シカのフンを3の二倍量加えたもの。
- ⑤ 学校のシバに入り込む代表的な雑草として、クローバーをそれぞれ 50 粒ずつ植えた。



図 11 実験の様子

左上: フンとシバの葉の両方、右上: フン2 倍量、左下: シバの葉のみ、中下: シカのフン のみ、右下: コントロール

く結果・考察>

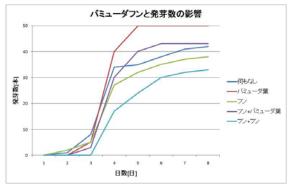


図 12 フンによる発芽数の変化

シバの葉(赤線)とフン(黄緑の線)を比べると、シバの葉の方が多く発芽している。 フンとシバの葉両方(紫線)とフン2倍量(水 色の線)を比べると、フンとシバの葉の両方 の方が多く発芽している。フン(黄緑の線) とフン2倍量(水色の線)を比べると、フン (黄緑の線)の方が多く発芽している。もとも と、シバの葉はアレロパシーが弱く、葉や 根を刺激すると、根からアレロケミカルが 放出されると文献調査でわかっている。コ ントロール(青線)は、発芽数が少なくとどま っているが、これは実験中にシバの根を傷 つけたために、根からアレロケミカルがで て、発芽抑制してしまったからだと考えら れる。

以上のことからシカのフンを多く使えば、それだけ発芽抑制効果が高くることがわかった。シバの葉そのものよりも、シカのフンを利用した方が、より効果的に雑草の発芽を抑制することがわかった。故にシカのフンがシバの雑草管理にふさわしいものであると考えられる。

3-4. 新仮説「草薙剣仮説」の提唱と実証

この章では、今までの研究をさらに発展 させた内容を述べる。最新の仮説「草薙剣 仮説」についての検証である。

<目的>

2000年、大手科学誌のサイエンス誌にある新仮説を述べた論文が掲載された。その仮説の名は「新兵器仮説」。なぜ外来植物が新天地に侵入し、繁茂できるかについて述べた仮説である。外来植物は新天地に踏み込む際、その土地にはない新兵器、すなわちアレロパシー物質を持ってその土地に踏み込む。新天地に踏み込んだ外来植物は、新兵器を利用して在来種の植物を征服する。結果、その土地には新兵器を持ちこんだ外来植物が繁茂する。これが新兵器仮説の内容である。だが、私が考えるに、奈良公園

において、なぜかそれがあてはまらない。 奈良公園には、在来種であるノシバが生い 茂っている。その一方で外来種であり、か つアレロパシーが強いとされるネズミノシ ッポ(ナギナタガヤ)や、クローバーなどの植 物も生息している。しかも古くからその生 息は確認されていた。しかし、その分布を みると、外来植物である彼らの領域は小さい。 新兵器仮説によれば、彼らの繁茂は約 東されているはずなのに、奈良公園においては、彼らの肩身は非常に狭い。なぜ、奈 良公園には新兵器仮説のような外来植物の 繁茂はないのか。

この節では、この疑問を探っていくことにした。

<仮説>

奈良公園に生息する外来植物が繁茂しないのは、シカのフンの影響である。シカのフン以外の要因(シバの葉から染み出るアレロパシー物質、シカの足などによる踏みつけの作用)は外来植物の発芽抑制には関係しない。

故に、ネズミノシッポ、クローバー共に 発芽数の多い条件から順に

コントロール≧枯葉入り≧圧力≧フン となる。

<実験方法>

実験は3反復行った。

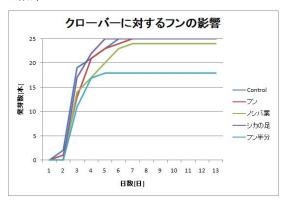
- ① 奈良公園の環境を想定し、すべての牛乳パックにノシバを植えた。
- ② 条件は3つある。
 - 1. コントロール(シバを植えたもの)
 - 2. シバの枯葉を入れたもの
 - 3. シバに対して毎日圧力をかけたもの
 - 4. フンをパックの4辺に埋めたもの
 - 5. フンをパックに2辺に埋めたもの

の5つである。

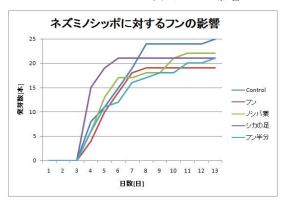
また、4,5の条件を入れた理由は、 少ないシカのフンでも、外来植物の発 芽抑制ができると考えたからである。

③ 奈良公園の外来種の代表として、単子 葉のネズミノシッポ、双子葉のクロー バーを、それぞれ 25 粒ずつ種子を撒い た。

<結果>



グラフ 10 クローバーに対するフンの影響



グラフ 11 ネズミノシッポに対するフンの影響 <考察>

クローバーにおいて、一番発芽数が低いのはフンを 2 辺においたものである。そのほかの条件についてはあまり発芽数が変わらない。藤井氏によると、アレロパシー実験において、あまりにたくさんのアレロパシー物質があると、活性を示しにくいことが多々あるという。これはそのうちの一つの現れではないだろうか。

ネズミノシッポにおいて、最終的に一番 発芽数が低いのはフンを4辺においたもの である。ネズミノシッポにおいて、フンを 4辺においた条件と、フンを2辺に置いた 条件との間に、優位な差が見られなかった ものの、これにおいては量が多めの方がア レロパシー物質の活性が明らかであった。

つまり、仮説通りの結果が示された。

4. まとめ

クローバー、ネズミノシッポにおいて、シカのフンによる発芽抑制効果が見られた。この実験により、さらにわかることがある。シカは在来種であるシバを食べる。シバを含んだフンを排出する。フンは在来種にとっての栄養剤となれる。しかし、外来植物は、フンの中に含まれるアレロパシー物質によって発芽を抑えられる。故に在来植物だけが繁茂し、外来植物はあまり成長しない。つまり、在来種の動植物同士がアレロパシー物質を媒介として、共栄関係にあるということだ。すなわち、これは新兵器仮説とは違う立場の仮説ということである。

これを私は"草薙剣仮説"と名付けた。 今回、私が実証した"草薙剣仮説"はその 土地で古くからある植物とそれを食べる動 物、その動物のフン、さらには外来植物を 含めた四者関係におけるアレロパシー物質 の働きについて述べたものである。いまま で植物と消費者の二者関係のアレロパシー 物質について述べた論文は多くあった。し かし、在来植物、消費者、消費者の排泄物、 さらには外来植物までを含めた四者関係の アレロパシーについての論文は大変珍しい ものである。このことは、専門の研究者か ら高い評価を受けた。

5. 今後の課題と展望

今回の研究を通して、奈良公園の生態 系の維持(在来種が繁茂できる要因)の 解明と、シカのフンを用いた防草剤の開 発という2つの成果を得ることができた。

私が「草薙剣仮説」と名付けた理由は、 日本武尊(ヤマトタケルノミコト)が、草薙 剣で草を薙ぎ払ったところに注目したか らである。神話めいているが、奈良公園 では未だに、日本武尊が古来の風景を守 るために外来種の草を草薙剣で薙ぎ払っ ているのかもしれないと空想してつけた。 因みに、草薙剣の「クサ」の音は「臭い」 を意味しているらしい。臭い剣は今日も 外来種を薙ぎ払っているのだろう。この シカとシバのような関係は他の植物、動 物同士でも成り立つのだろうか。そこで 今後は、シカとシバ以外でも、この様な 関係は成り立つのか、検証していきたい。

次に私が開発した、フンによるオーダー メイド「防草剤」は、コスト面、環境面、 そして効率の良さの面から、優れた防草剤 になる可能性を持っていると考えている。 それは、この防草剤には2つの良い点を持 つからである。それは、作成するコストが 極めて低いこと、そして化学農薬を使わな いので、環境に負荷をかけないことである。 動物(シカ)にシバを食させるだけで「防草 剤」ができるので、シバを刈るコストだけ で作成できる。さらに、今回の研究により、 フンの中にあるアレロパシー活性は非常に 高く、シカの食べる植物の葉よりも高い発 芽抑制効果が示された。アレロパシー物質 が動物の体内で変化して構造が変わって いるのか、変化してアレロパシー活性が

強くなるのかどうかを検討していきたい。 そして、強くなっているのであれば、農 薬や薬としても応用できるのではないか と考えている。牧草地の管理、飼料の確 保がよりしやすくなるのではないだろう か。

6. 参考文献

- [1] 「アレロパシー」,藤井義晴著,農協社出版
- [2] 「アレロパシー研究の最先端」,藤井義晴著、研修テキスト
- [3] Study on the allelopathy of alfalfa
 (Medicago sativa L.), Kana
 NAKAHISA, Eiji TSUZUKI,
 Hiroyuki TERAO and Seiji
 KOSEMURA, Jpn.J Crop Sci.
 63(2): 278-284 (1994)

7. 謝辞

今回の論文を書くにあたり、奈良鹿愛護 会の方々、本学副校長の勝山元照先生、筑 波農業環境研究所の藤井義晴氏をはじめと する研究所の方々、そして指導していただ いた櫻井昭先生にこの場をかりて御礼申し 上げます。

細胞サイズの変化の過程

6年A組 中澤 春香 指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

繊毛虫ブレファリズマは、飢餓状態になると共食いすることにより、細胞が巨大化することが知られている。本研究では巨大化したブレファリズマを「ジャイアントブレファリズマ」と呼ぶことにする。

この形態変化の基礎研究においてジャイアントブレファリズマは比率を変えずそのまま巨大化し、大核は二股になっていることがわかっている (2007 東野)。また、餌がない状態にジャイアントブレファリズマを分注すると何らかの過程を経て細胞サイズを小さくすることが観察されている。しかし、それらの形態変化のメカニズムはいまだ明らかにされていない。

そこで、本研究ではジャイアントブレファリズマがどのような細胞なのかを知るため、ジャイアントブレファリズマがどのようにして細胞サイズを小さくするのか、その過程を調べることにした。その結果、ジャイアントブレファリズマは細胞分裂をし、比率を変えずに元の細胞サイズに戻るという傾向がみられた。このことから、ジャイアントブレファリズマは細胞分裂することで細胞サイズを小さくしていることがわかった。

キーワード ブレファリズマ(Blepharisma japonicum)、大核、細胞周期

2. 研究の背景と目的

繊毛虫ブレファリズマは、特定の環境下 (飢餓状態)におかれると共食いすること により、そのまま細胞サイズを巨大化させ る(以下、巨大化したブレファリズマをジャイアントブレファリズマとよぶ)。また、 普通サイズのブレファリズマ(以下、通常 型ブレファリズマとよぶ)に比べ、大核が 二股になり、約2.8倍の大きさになる(2007 東野)。このことから、分裂直前で分裂できなくなった個体が、ジャイアントブレファリズマではないかと考えられる。しかし、 細胞と大核のどちらが先に巨大化しているのかは明らかになっていない。また、生理 的塩類溶液にジャイアントブレファリズマを分注すると、何らかの過程を経て細胞サイズを小さくすることが観察されている。 けれども、どのような過程を経て細胞サイズを小さくさせるのか、明らかになっしていない。そこで、細胞サイズを小さくしている過程を明らかにすることによって、ジャイアントブレファリズマが一体どのではないかと考えた。ジャイアントブレファリズマが再び細胞サイズを小さくする過程をいかと考えた。ジャイアントブレファリズマが再び細胞サイズを小さくする過程を、細胞形態の変化に注目して追うことにした。また、巨大化が細胞サイズの変化を引き起こしているのかどうか、細胞サイズの小型 化と核サイズの変化の関係を調べるために、 細胞サイズと大核の形状の変化を観察した。 本研究の目的は次の通りである。

- ジャイアントブレファリズマの細胞サイズの縮小過程を明らかにする。
- ・ジャイアントブレファリズマの大核が、 細胞サイズを縮小させる過程でどのよう な変化を見せるかを明らかにする。

3. 研究内容

研究 I

I-1 仮説

ジャイアントブレファリズマは、そのまま縮むのではなく細胞分裂により細胞サイズを縮小している。

I-2 研究方法

①培養方法

実験材料: Blepharisma japonicum

R48 株

培養液:滅菌したレタスの絞り汁に、バクテリア(Enterobacter aerogenes)を増殖させたレタス培養液をエサとして用い、インキュベーターで培養した(25°C、10 日間、500ml から 4000ml まで植えついで増やした)。

②観察方法:カウント法とサイズ測定

まずコントロールとして、1000µl ずつ3 回培養液ごと細胞をサンプリングし、光学顕微鏡を用いてデジタルカメラで細胞を撮影した。その後、パソコン画面上で長径・短径・面積のサイズを測定した(測定には画像処理ソフト Scion Image を使用した)。また、1ml まで入る穴が3つ開いた厚いスライドガラス(ディプレッションスライド)25枚、計75ホールに500µl ずつ SMB(ブレファリズマの生理的塩類溶液)を分注し

た。そこにジャイアントブレファリズマを1Cell ずつ入れ、25 $^{\circ}$ で保存した。

16 時間後、分注しておいた細胞の個体数に変化があるかカウントし、それぞれ同様に光学顕微鏡を用い、デジタルカメラで細胞を撮影した。その後パソコン画面上で長径・短径・面積のサイズを測定した。以後、同様の操作を 24 時間後まで1時間おきに繰り返した。

観察時には、他の菌が混ざらないよう、 熱殺菌、消毒など、無菌操作を心掛けた。

I-3 結果

以下の各グラフの表記はホール内の個体 数の違いである。

1Cell:ホール内の個体が 1Cell 2Cell:ホール内の個体が 2Cell 3Cell:ホール内の個体が 3Cell

4Cell:ホール内の個体が 4Cell

Deth:ホール内の個体が死んでいたもの

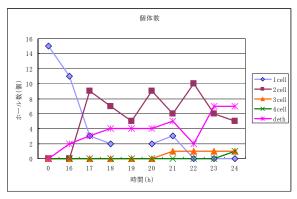


図1 細胞個体数の変化

1 ホール内の細胞の個体数の変化の結果である。図 1 は、ブレファリズマ 16 時間後から 17 時間後にかけて 1Cell(ジャイアントブレファリズマ)のホールが急激に減り、2Cell のホールが増えている。また、24 時間後には 4cell のホールが観察される。

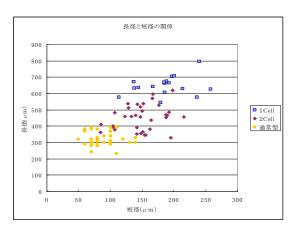


図2 長径と短径の関係

図 2 は、サンプリングしたブレファリズマの長径と短径の関係である。長径が約300μm 付近のブレファリズマが通常型のブレファリズマ(通常型)であり、長径が約600μm 付近のブレファリズマがジャイアントブレファリズマ(1Cell)である。そのおよそ中間に分布している個体は1ホール内に2個体みられたときのブレファリズマのサイズである(2Cell)。

1Cell (ジャイアントブレファリズマ)、 2Cell、通常型のそれぞれの長径と短径の比 が一直線上に並んでいる。

I-4 考察

結果より、生理的塩類溶液に分注した1ホール中のジャイアントブレファリズマが2Cellになり、細胞サイズを縮小させていたことから、ジャイアントブレファリズマは分裂することによって細胞サイズを縮小していると考えられる。また、図1の細胞個体数の変化より、生理的塩類溶液に入れてから、およそ12~17時間で分裂が行われると考えられる。

また、図2より、分裂した細胞と、ジャイアントブレファリズマの長径と短径の比がほぼ等しいことから、形態を変えること

なく(長径のみ長くなるなどの部分的な変化はなく)分裂によって細胞サイズを縮小させていると考えられる。ジャイアントブレファリズマは分裂するとき、細胞サイズを小さくしただけの形になり、分裂した個体はジャイアントブレファリズマの細胞サイズまで戻らない。

長径と短径のサイズ変化においては、図2より、一度細胞分裂したジャイアントブレファリズマは、分裂前と通常型ブレファリズマの細胞との中間程度の細胞サイズになっているため、ジャイアントブレファリズマは2度の細胞分裂によって通常型ブレファリズマのサイズに戻るのではないかと推測できる。

研究Ⅱ

II-1 仮説

ジャイアントブレファリズマの巨大化し た大核は、細胞サイズの縮小と同様に通常 型ブレファリズマの大核の形態にもどる。

Ⅱ-2 研究方法

研究Ⅰと同様に細胞を培養・観察する。

大核の面積測定

ブレファリズマをカルノア液(酢酸:エタノール=1:6)で固定し、DAPI 染色を行い、蛍光顕微鏡を用いデジタルカメラで細胞を撮影する。その後、画像処理ソフト(Scion Image)で大核の面積を測定した。

Ⅱ-3 結果

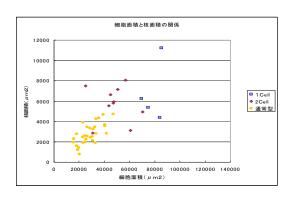


図3 大核と面積の関係

図3は、サンプリングしたブレファリズマの大核、細胞面積の関係を示している。 図2同様、1Cell(ジャイアントブレファリズマ)、2Cell、通常型それぞれの、大核と細胞面積の比が一直線上に並んでいる。

Ⅱ-4 考察

図3の、ジャイアントブレファリズマ(1 Cell)と、ジャイアントブレファリズマが一回細胞分裂した細胞(2Cell)と、通常サイズのブレファリズマの、大核と細胞面積の比が一直線上に並んでいることから、ジャイアントブレファリズマは、大核と細胞の面積の比を変えることなく細胞サイズを巨大化させ、又、分裂していると考えられる。

しかし、研究Ⅱにおいては細胞固定がうまくいかず、大核のサンプル数が非常に少なくなったため、大核の形状を観察できる満足なデータを得ることが出来なかった。

4. まとめと今後の課題

今回の実験より、ジャイアントブレファ リズマが細胞サイズを縮小させる過程は細 胞分裂によるものだという仮説が実証され た。よってジャイアントブレファリズマは 細胞分裂する能力を持っているとわかった。 今回の実験よりジャイアントブレファリズ マが細胞サイズを小さくするメカニズムの 特徴に、「長径と短径の比を変えないこと」、 および「二回の細胞分裂により通常型の大 きさに戻ること」があると考察できた。

また、ジャイアントブレファリズマは生理的塩類溶液内(餌のない環境)で分裂することができた。では何がジャイアントブレファリズマの大きな細胞サイズを保たせているのだろうか。基礎研究より、分裂直前で分裂できなくなった個体がジャイアントブレファリズマではないかと考えられる(2007 東野)。このことから何らかの物質が細胞分裂を止めているのではないかと考察できる。細胞は、細胞周期のM期に分裂するため、直前のG2期チェックポイント(図5参照)が関わっているのではないだろうか。このG2期チェックポイントを通過出来なかった場合は細胞分裂できない状態に切り替わる。

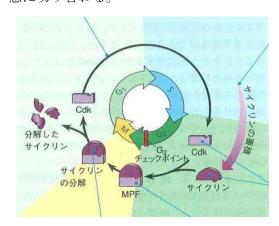


図5 細胞周期の調節にかかわる分子機構

このとき、G2 期チェックポイントに至る までに共食いされたブレファリズマ、また は同様な大きさの餌が細胞分裂を阻害して いる可能性が考えられる。今、細胞分裂に 必要とされるのではないかと研究されている分子が、G2期のジャイアントブレファリズマにおいて、その分子が分裂に十分な量生成されているかどうかを調べることにより、ジャイアントブレファリズマの出来方を明らかにすることができるかもしれない。

また、二股になった大核の形状の変化は、 鮮明な写真を撮ることが出来ず、分裂過程 の大核変化を観察できなかった。大核の観 察において、今後は固定するサンプル数を 増やすことと、細胞を破裂させることなく 固定する工夫が必要である。

次回の実験では、大核の面積と細胞サイズの関係について、より観察間隔を細かくするなどの工夫を加えジャイアントブレファリズマの形態変化を調べていきたい。

5. 参考文献

- [1]「繊毛中における接合誘導機構の解析」, 春本 晃江
- [2]「キャンベル生物学」, Neil A.Campbell, Jane B.Reece

6. 謝辞

ブレファリズマの株を分けていただき、 培養方法をはじめいろいろとアドバイスを いただきました、奈良女子大学理学部生物 科学科細胞情報学分野 春本晃江教授、指 導してくださった櫻井 昭先生、本当にあ りがとうございます。

ブレファリズマのシスト形態

6年C組 西本 舞 指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

ブレファリズマは、水田に多く生息している単細胞の繊毛虫である。この生物は、環境が悪化するとシストと呼ばれる休眠状態に変化する。しかし、ブレファリズマのシストについては詳しい研究が成されていなかったため、シストの形態を追及しようと試みた。そして光学顕微鏡・電子顕微鏡などを用いた観察から、シスト形態の一部を明らかにした。また、観察結果をもとに、"シスト化"の過程について、一つの仮説を立てた。

キーワード シスト、乾燥、水田、endcyst、ectocyst、コムシスト

2. 研究の背景と目的

通常型ブレファリズマとシストでは外形が大きく異なる上に、「シストは乾燥に強い」ことで知られている。実際にシストを乾燥させてみると、シストの表面に細胞壁が形成されているように観察された。乾燥に耐えるために、シストには特殊な膜が形成されているのではないかと考えた。そこで、まずはシストの外形から観察を始め、シストの乾燥に対する耐性と、膜構造の関係を探ることにした。

2-1. 基本事項

(1) ブレファリズマ

赤色色素をもつ単細胞生物で、繊毛虫の一種である。野生では水田や沼地に生息し、環境の悪化によってシストを形成する。その証拠に乾燥した田んぼの稲株には、シストが付着していることが多い。

本校では、500~1000ml フラスコ内で、 <研究 I 細胞外形の変化> バクテリアを餌に培養している。 シスト化における外形の変

(2) シスト

「原生動物やごく下等な動物がからだの 表面に厚い膜をつくり、一時的な休止状態 に入ったもの」の総称をシストという。ま わりの環境変化に影響されて、シスト化・ 脱シスト化が誘導されると言われている。

繊毛虫の一種である「コルポーダ」のシストについては研究が進んでいるが、ブレファリズマのシストについては研究報告が少ない。

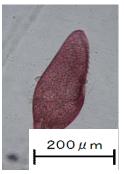


図1 通常型ブレファリズマ

3. 研究内容

<研究 I 細胞外形の変化> シスト化における外形の変化を明らかに すべく、光学顕微鏡で観察を行った。

(1) 観察方法

- ① ディプレッションスライド 6well に、 それぞれ 1ml o SMB を入れる。
- ② ①の 6well それぞれに、通常型ブレファリズマを 1cell ずついれ、乾燥しないよう小箱に入れたのち、インキュベーター (15°) 内で保存する。
- ③ 1日おきに、光学顕微鏡で細胞外形を 観察する.

(2) 観察結果・考察

シスト化の過程は、外形の違いから大きく3つに分類できた。

. • 1 段階目 (図2)

外形から「しずく形」と命名した。細胞 質が凝縮を始め、口部は消失していた。繊 毛は存在し、回転・前後運動が観察された。

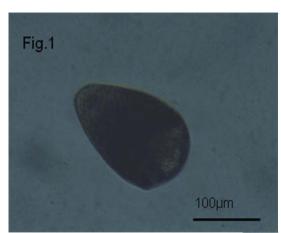


図2 シスト化 1段階目

• 2段階目(図3)

細胞質がさらに凝縮して外形が球状に近づいた。繊毛は存在するが、回転運動のみ観察された。

• 3 段階目 (図4)

繊毛が消失して運動は停止した。そして新たな膜が観察された。外側の膜をectocyst、内側の膜をendcystと呼ぶ。膜の間の空間は時間とともに広がるが、ある地

点で止まった。結果、はっきりと2重の膜 に分かれて見えた。



図3 シスト化 2段階目

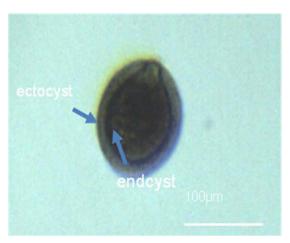


図4 シスト化 3段階目

<観察Ⅱ シストの大核・小核の形>

観察Iにおいて、外形に大きな変化が生じたことから、遺伝子レベルで変化が起きているのではないかと考え、以下の観察を行った.

(1)仮説

シストの大核には凝縮が生じ、シスト固 有の遺伝子が活性化されている。

(2)観察方法

通常型ブレファリズマとシストの固定・ 染色は、以下の手順で、それぞれ容器を分けて行った。

●細胞の固定

- ① 細胞を遠心機で集める
- ② 細胞を固定させるプレパラートをアル コール消毒する
- ③ マイクロピペット (200µl) を 35µl に設定し、①の細胞を顕微鏡で見ながら確実に吸い取る
- ④ ②のプレパラートの中央にのせる
- ⑤ カルノア液を1、2滴落とす
- ⑥ 乾燥させる
- ※カルノア液で固定後、1ヶ月以内に DAPI染色を行う。

●脱色

(ブレファリズマの赤色色素があると、 DAPI 染色時に観察しにくいため)

- ① 70%エタノールを容器にいれる
- ② 固定した細胞がついたプレパラートを 容器内に並べる
- ③ プレパラート全体が浸るまで①を注ぎ 通常型ブレは 1overnight、シストは 3 overnight おく。

●DAPI 染色

- ① エタノールから取り出したプレレパラートを約10分間乾燥させる
- ② 顕微鏡で細胞のある場所を確認した後、 プレパラート 1 枚につき約 10µl の DAPI をかける
- ③ ②の上からカバーグラスをかけ、その 縁にマニキュアを塗って密封する
- ④ アルミホイルをかける
- ※完成したプレパラートを、蛍光顕微鏡で 観察する。

(3)結果

シストの大核は折りたたまれた状態で観察された(図5,6)。小核に変化は見られなかった。

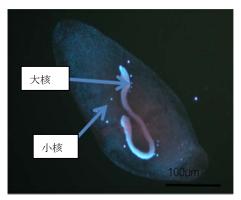


図5 通常型ブレファリズマの大核と小核

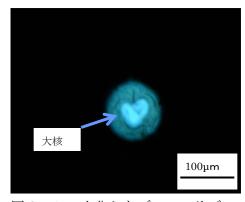


図 6 シスト化したブレファリズマの大核 (4)考察

シスト化の過程で著しい細胞質の凝縮が おこるため、大核もそれに従って折りたた まれたと考えられる。しかし、平面図では 核サイズを詳しく検証できないため、核の 凝縮が生じているかどうかの確認はできな かった。

<観察Ⅲ 細胞小器官>

膜構造を調べるため電子顕微鏡でさらに 詳しい観察を行った。

(1)観察方法

●細胞固定

- ① 集めた試料をガラスチューブにいれ、 水位を 500ul に合わせる
- ② サンプルをドラフトに持っていき、グルタルアルデヒド固定液を 500 μl 加える
- ③ ときどき混ぜながら、30分放置する

- ④ 先を細くしたプラスチックピペットで 上清を吸い取る
- ⑤ リンス液を 500µl 加え、混ぜる
- ⑥ 細胞が沈殿した後、上清を吸い取る
- ⑦ オスミウム固定液を 500µl 加える
- ⑧ 時々混ぜながら、30分放置する
- ⑨ 細胞が沈殿した後、上清を吸い取る
- ⑩ 蒸留水を 500µl 加えて混ぜる
- 卸 細胞が沈澱した後、上清を吸い取る (ここまでドラフト内で行う)

●脱水・包埋

- ① チューブに 50%エタノールを 1000μl 程度加える
- ② 時々混ぜながら、20分間放置する
- ③ 先を細くしたプラスチックピペットで 回収する
- ④ 70%, 90%, 95%, 99%, 100%エタノールについても、①~③と同様に置換を繰り返す。
- ※SEM (走査型) 試料は90%エタノール の段階でストップし、冷蔵庫に保存する
- ※TEM (透過型) 試料は100%エタノー ルの置換を2回繰り返す

(以下 TEM 試料について)

- ⑤ 試料をエッペンチューブに移し、100%エタノールを 500µl える
- ⑥ サンプルをドラフトに持っていき Sppur 樹脂を加え全量を 1000μl にする
- ⑦ 軽く混ぜた後、冷蔵庫で lovernight お
- ⑧ 遠心機にかける
- ⑨ ドラフト内で、上清を半量吸い取る
- ⑩ 新しい Spurr 樹脂を加えて全量 1000µl とする
- ① 15 分置きにボルテックスで攪拌しなが

- ら1時間放置する
- ① 8~①の作業をもう一度繰り返す
- ③ 遠心機にかける
- (4) ドラフト内で上清を全量吸い取る
- 動 新しい Spurr 樹脂を2、3滴加える
- 16 ビームカプセルに細胞懸濁液を移す
- ⑰ 遠心機にかけて、カプセルの底に平均的に液を沈ませる
- ® ドラフト内で、カプセルの9分目まで Spurr 樹脂を加える
- ⑨ 重合オーブンに入れ、70℃で8時間重合する

●観察

- ・SEM 試料
- ① 99%, 100% (2回) エタノールでの置換を、前述の通りに行う
- ② amyl acetate を 1ml 加える
- ③ 軽く攪拌し、5分間放置する
- ④ 上清を半量捨てる
- ⑤ 新しい amyl acetate を 2 倍量加える
- ⑥ 軽く攪拌し、20分間放置する
- ⑦ 上清を全量捨てる
- ⑧ 新しい amyl acetate を 1ml 加える
- ⑨ 軽く攪拌し、20分間放置する
- ⑩ 上清を全量捨てる
- ① 8~0を2回繰り返す
- ② 試料を臨界点乾燥器にかける
- ③ 試料をイオンスタッパーコーティング 処理する
- ④ 走査型電子顕微鏡に試料をセットし観察する

・SEM 試料

- ① 重合後の試料をカプセルから取り出す
- ② 特殊カッターでスライスし、超薄切片 をつくる
- ③ ②を 3%ウラン水溶液とクエン酸鉛染

色液で染色する

④ 試料を透過型電子顕微鏡にセットし観察する

(2)観察結果

試料には、通常型ブレファリズマとシストの混合液を用いたが、結果は別に記す。 「通常型ブレファリズマ」

· SEM

表面はなだらかで、無数の小さな穴があるように見えた(図7)。

\cdot TEM

細胞の表面から、フィラメント状の物質 (=コムシスト)が分泌されていた(図8)。

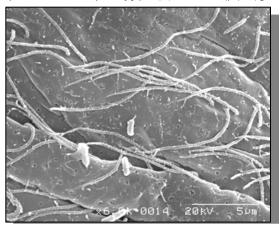


図7 通常型ブレファリズマの細胞表面(SEM)

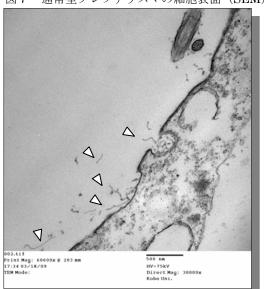


図8 通常型ブレファリズマの細胞表面 (TEM)

[シスト]

· SEM

膜の表面が網目状の構造をしているよう に観察された。繊毛はなく、バクテリアが 多く付着していた(図9)。

• TEM

2層の膜(ectcyst, endcyst)に分かれて見 えた(図 10)。細胞の内部から分泌物が放出 されている(図 11)。

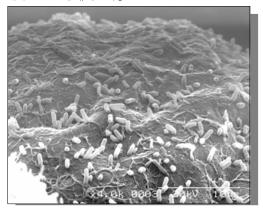


図9 シストの細胞表面 (SEM)

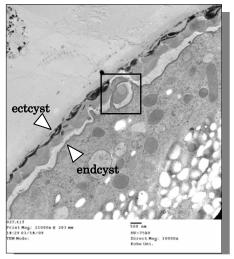


図 10 シストの細胞表面 (TEM)

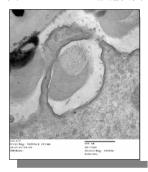


図 11 シストの細胞表面に 見られる分泌胞

(3)考察

観察した細胞の中には、実際にシスト化した細胞も多数見られたことから、観察した通常型ブレファリズマはシスト化の準備段階にあった可能性が比較的高いと言える。こう考えると、コムシストはシスト形成に深く関係する物質であると考えられる。

シスト表面にはバクテリアが付着していたことから、シストの膜には粘性があると考えられる。

また、外形観察で観察されたシストの新 しい膜は、細胞内部からの分泌物によって 徐々に形成されたものと推測される。

4. まとめ

ブレファリズマはシスト化に時間がかかるため、リアルタイムでの観察はできなかった。よって立証はできないが、観察結果よりシスト化の過程につい以下の①~⑤の仮説をたてた。

- ①環境の悪化を感知する
- ②通常型ブレファリズマの細胞質が凝縮を 始め、細胞表面から粘性のあるコムシス トが放出される
- ② 外形が球状に変化し、コムシストが繊毛や細胞膜に絡まる
- ③ 繊毛の動きが妨げられ、次第に運動は停止に向かう
- ④ 繊毛が消失する(基部はそのまま残る)
- ⑤細胞内部からシストの膜の構成物質が分泌され、endcyst と ectocyst の2層にはっきりと分かれた状態になる

はっきりと分かったことは、「ブレファリズマのシストは2重膜構造をもつ」ことである。ブレファリズマが主に生息する田んぼは、季節によって水の有無が決まってい

る。シストが特殊な膜構造を持つことで、 長期間の乾燥を乗り切り、子孫繁栄に繋が ったのではないか。

また、今回観察した *japonicum* 以外の種や生息地域の異なるブレファリズマのシスト形態を比較すると、違いがみられる可能性もある。

5. 参考文献

- [1] FENCYSTMENT AND EXCYSTMENT
- [2] 「ENCYSTMENT-SPESIFIC mRNA IS ACCUMULATE CYSTS OF THE CILIATE」

6. 謝辞

貴重な時間を割いて協力して下さった奈良女子大学大学院 春本晃江教授、神戸大学理学部 州崎敏伸教授には深く感謝申し上げます。また、今回の観察を進めるにあたって、櫻井先生に多大なご指導を賜りました。誠にありがとうございました。

ブレファリズマの脱シスト化

6年B組 山村梨絵 6年C組 梅﨑千里 指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

繊毛虫ブレファリズマなどの原生動物は環境が悪化すると外環境から身を守るためにシストと呼ばれる休眠状態になる。その仕組みを探るためにシスト化と脱シスト化の環境条件について調べた。

キーワード ブレファリズマ (Blepharisma japonicam)、シスト

2. 研究の背景と目的

繊毛虫のブレファリズマは、水田などの水中に生息しており、乾燥に弱い。しかし、緩やかな周囲の環境の変化を感じて、乾燥に強い「シスト」という形態をとり、乾田でも生育し続けている。ブレファリズマの環境に対する形態変化の仕組みに興味を持ち、調べることにした。研究をするに当たり、奈良女子大学理学部生物科学科の春本晃江教授から、ブレファリズマの株(B.Japonicum)を分けていただいた。また、自ら水田より野生のブレファリズマを採取し、単離培養をすることにより、自然界のブレファリズマについても調べてみることにした。

ブレファリズマのシスト化では、細胞膜の表面に分泌された膜や壁が見られる用になり、一時的な休止状態になっていくことが分かっている(2009 西本)。では、ブレファリズマは何を感じ取ってシスト化するのであろうか。外液が及ぼすシスト化への影響と、温度、密度によるシスト化への影響を調べてみることにした。また、シスト

は環境条件が整うと、再び通常形態のブレファリズマに戻る。しかし、この環境も詳しく分かっていない。そこで、脱シストを誘導する環境についても調べてみることにした。

なお、本研究では一時的な休止状態になることを「シスト化」、休止状態からもとにもどることを「脱シスト化」と呼ぶことにする。

3. 研究内容

<研究 I シスト化と温度>

通常ブレファリズマは、27℃で培養している。しかし、長期保存するときには、15℃に移す。すると、シスト形態の個体が見られるようになる。そこで、温度がシスト化に影響しているのではないかと考えた。

(1) 仮説

通常培養している 25℃よりも、低い温度 (15℃) に置いておくと、シスト化が誘導される。

- (2) 実験方法
- ブレファリズマの培養方法

バクテリア(Enterobacter aerogenes)を 増殖させたレタス培養液をエサとして用い、 インキュベーターで培養する。

● 実験方法

- ① 奈良女子大学から頂いたブレファリズマの株(B.Japonicum)を培養する。
- ② ブレファリズマを 1cell ずつ、SMB (繊 毛虫用生理的塩類溶液) に移す。
- ③ ② e^{15} C e^{25} C に設定したインキュベーターの中に、それぞれ静置する。
- ④ ③のブレファリズマを継続観察し、通 常型(通常のブレファリズマの形態)、 とシストの個体数変化をカウントする。

(3) 結果と考察

結果は、図1のようになった。15℃に静置しておいたブレファリズマの通常型の個体数は、増加しある地点で減少する。その通常型の個体数が減少する地点で、シストの数が増えることから、通常型の個体数が減った分シストになっていることが分かった。また、25℃に静置しておいたブレファリズマの通常型の個体数は、増加し続けてシストは見られなかった。以上より、15℃の方が 25℃よりもシスト化を誘導しやすい。ほぼ仮説どおりであった。

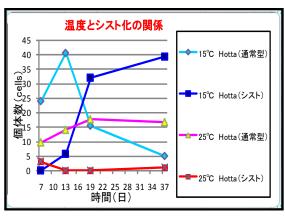


図1 温度とシスト化の関係

<研究Ⅱ シスト化と細胞密度>

研究 I において、ブレファリズマを 1cell ずつ SMB へ移していくと、高密度で SMB へ移して培養するより、シスト化した個体が早く見られるようになった。そこで、細胞密度がシスト化に影響しているのではないかと考えた。

(1) 仮説

細胞密度が小さいと、シスト化され易い。

(2) 実験方法

- ① ブレファリズマの細胞密度を 5cells/ml、10cells/ml、100cells/ml に揃える。
- ② 温度を5 \mathbb{C} 、15 \mathbb{C} 、25 \mathbb{C} に設定したインキュベーターの中に静置し全体におけるシストの割合をグラフ化する。

(1) 結果と考察

結果は、図2のようになった。 5 $^{\circ}$ に静置しておいたブレファリズマは、どの細胞密度でも研究 I の実験で、シスト化がみられ始めた 7 日目よりも早い、6 日目までにシスト化が見られた。しかし、15 $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ $^{\circ}$ に静置しておいたブレファリズマは、どの細胞密度でも、6 日目までにシスト化が見られなかった。以上のことよりシスト化は、あまり細胞密度に依存せず、温度に依存することが分かった。

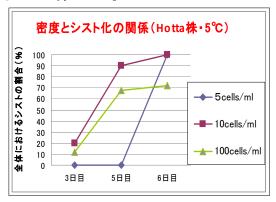


図 2 密度とシスト化の関係(5℃)

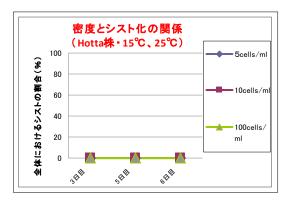


図3 密度とシスト化の関係(15℃、25℃)

<研究Ⅲ 脱シスト化を誘導する環境>

15℃で長期保存していたブレファリズマを、25度のレタス培養液に植え継ぎすると、シストの状態のブレファリズマはいなくなる。このことから、低温、飢餓状態という環境を取り除くことが、脱シスト化につながると考えられる。そこで、脱シスト化にはレタス培養液の何が、ブレファリズマに作用するのか調べることにした。

(1) 仮説

レタス培養液にバクテリアを繁殖させた 条件で、最もブレファリズマの脱シスト化 が誘導される。

(2) 実験方法

- ① 奈良女子大学から頂いたブレファリズマの Hotta 株(*B.Japonicum*)と、自分たちで水田から採取し、単離培養に成功した株(*Blepharisma.sp*)をそれぞれ培養する。
- ② シスト化したブレファリズマを遠心機で収集する。
- ③ 温度 25℃、密度 5cells/ml にそろえる。
- ④ ③の外液のみ換えて、脱シスト化の個体 数の変化を調べる。

外液は以下の条件にして観察した。

• SMB(SyntheticMediu for *Blepharisma*)

- ・レタス抽出液
- ・レタス抽出液+バクテリア
- ・レタス抽出液+バクテリア+SolutionA
- ・稲抽出液+バクテリア
- 稲抽出液
- ・SMB+シカの糞

※ SMB

NaCl(1.5mM),KCl(0.05mM),CaCl2 (0.4mM),MgCl2(0.05mM), MgSO4(0.05mM)

%SolutionA

NaCl,KCl,CaCl2 · 2H20,MgCl2 · 6H2O, MgSO4 · 7H2O

(3) 結果と考察

表1のような結果が得られた。レタス抽 出液のみでは脱シストせず、バクテリアを 含んだレタス抽出液と、稲抽出液では脱シ ストしていた。また、どの外液においても 100%脱シストすることはなく、個体によっ て脱シストに要する時間は異なっていた。

Hotta株	
レタス抽出液	_
レタス抽出液+バクテリア	++
レタス抽出液+SolutionA+パクテリア	+++
イネ抽出液	_
イネ抽出液+パクテリア	+
SMB	_
SMB+牛乳	_
SMB+シカのフン	+++

表1 外液に対する脱シスト化

-: 脱シスト化しない、+:1 cell 脱シスト 化した、++: 過半数の個体が脱シスト化し た、+++:全て脱シスト化した。

脱シスト後の個体数の変化では、図4のような結果が得られた。シカの糞+バクテリアでは脱シスト後分裂せず、バクテリア入りのレタス培養液では分裂している。以上のことから、脱シスト化には動物性成分

と植物性成分の両方が必要であり、脱シスト化した後の細胞分裂には、餌(バクテリア)が必要ではないかと考えられる。

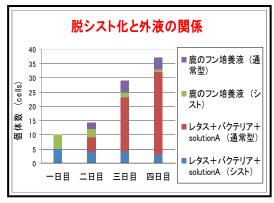


図4 脱シスト化と外液の関係

4. 考察

以上の研究からシスト化には温度が影響していて、脱シスト化にはバクテリアが必要であることが分かった。ブレファリズマが生息する水田においてもバクテリアが存在するので、湿田においても温度が高温(25℃)に保たれていると脱シスト化できることが予想される。ブレファリズマは、水田という環境の変化(低温、乾燥など)の多い場所に生息するためにシストと呼ばれる休眠状態になることによって生き延びている。このことから、ブレファリズマは水田という環境に適していったため「種の保存」という点で水田は適していると考えられる。

5. まとめと今後の課題

現在報告されている繊毛虫コールポーダのシストはかなり小さく軽いため、風によって遠くへ運ばれることもあるが、これに対してブレファリズマのシストは乾田の稲株にしっかりと付着しているため、遠くへ飛ばされる可能性は非常に低い。そのため

ブレファリズマはその土地固有であると考えられるのではないか。つまり様々な地域の田から稲株を採取し、地域別にブレファリズマを調べることによって、ブレファリズマのシストの脱シスト化の条件についての地域差が見られるかもしれない。

6. 参考文献

- [1] 「繊毛虫コルポーダのシスト形成・脱シスト誘導因子」,高知大学
- [2] ENCYSTMENT AND EXCYSTMENT
- [3] CAPSULE SHEDDING

7. 謝辞

奈良女子大学の春本晃江教授、神戸大学 理学部の洲崎敏伸教授、そして本校の櫻井 昭先生には助言、ご指導をいただきました。 諸先生方、大変ありがとうございました。

講義「ヒカリゴケの人工培養法」参加レポート

4年A組 飯島 麻穂 4年C組 井上 なずな

1. 要約

信州大学の田口悟朗准教授が本校にお越しくださり、ヒカリゴケの人工培養法についての講義をしてくださった。SSH生物班が参加し、ヒカリゴケの培養などについて学んだ。主に講義内容について報告する。

2. 背景

以前行っていた蝶のリンプンに関する研究を通じて、光る生物に興味を持つようになった。蝶の中でもモルフォチョウは、翅が光を反射し、美しい光を放つ。ヒカリゴケも、モルフォチョウと同じように、自発光するのではなく光を反射することにより光って見える生物である。ここからヒカリゴケに興味をもち、今回信州大学の田口悟朗准教授にヒカリゴケについての講義をしていただくに至った。

3. 講義内容

(1)ヒカリゴケとその発光の仕組み

学名: Schistostbga pennata

ヒカリゴケ目ヒカリゴケ科に属し、一属 一種である。ヨーロッパ北部、北米、シベ リア等冷涼な地域に分布する。日本では北 海道や本州の中部地方以北に分布する。生 存競争に弱いため、絶滅が危惧される。

主に土の上、岩の上にも生育する。洞窟や岩陰など暗く湿った環境を好む。ヒカリゴケの好む湿度は90%程度とも、乾燥している状態とも諸説ある。原糸体については40~300lux程度の光条件で生える。

小型のコケ植物で、配偶体は 1cm 程度で

ある。原糸体は、一般的な蘚類がもつ糸状細胞のほかに、直径 15μm の球状のレンズ状細胞を持つ。ヒカリゴケは和名の通り暗所においてエメラルドグリーンに光るが、これは自発光しているのではない。原糸体のレンズ状細胞が、細胞の奥にある葉緑体に集光しており、この光を反射することによりヒカリゴケはエメラルドグリーンに光って見える。このメリットはレンズ状細胞の集光機能のため、比較的暗い場所でも光合成が効率的に行え、生育が可能になることである。

このことにより、生存競争に弱いヒカリゴケはこの特徴を生かし、ほかのコケ植物が生育しにくい環境において生き延びてきたのだろうと推測できる。



図1 光を反射するヒカリゴケ

(2)ヒカリゴケの人工培養法の開発

ヒカリゴケの人工培養の課題として、ヒカリゴケは生存競争に弱いため、混在するほかの細菌やカビを取り除き純粋培養することが必要であることが挙げられる。他にも、個体を得にくいことや細胞を生きた状態で維持することが難しいなどが挙げられる。

細菌やカビを取り除くという課題に対して、無機塩のみの培地を使用することにより、細菌やカビが増殖することを防ぐことが可能になった。

また茎葉体から直接糸状体を作らせることに成功し、安定して継代することができるようになった。

その方法で培養したヒカリゴケ細胞の塊を、ミキサーで粉砕し液体培地で培養した。 これによりヒカリゴケ細胞の大量増殖ができる。

想定される用途として絶滅危惧種の保護、 自生地での再生に貢献できることや、鑑賞 用として使用できることなどが期待される。

4. 感想

今回初めてヒカリゴケの実物を見せていただき、その光る様子や細胞を実際に見ることができ、よかったと思います。

5. 謝辞

信州大学の田口悟朗准教授には、わざわ ざ本校にお越しいただき講義をしていただ きました。深く感謝いたします。

タンパク質分解酵素のはたらき

3年A組 勝野友紀菜 3年B組 今江 菜摘 3年B組 矢野 仁美 指導教諭 野上 朋子

1. 要約

わたしたちは「生のパイナップルを使うとゼリーが固まらない」という現象に注目し、パイナップルに含まれているタンパク質を分解する酵素とその性質について研究することにした。サンプル瓶を用いることで少量の実験材料で簡単に行える実験方法を確立し、その実験方法で、パイナップルに含まれているタンパク質分解酵素の存在、酵素のもつ基質特異性や熱変性を確認することができた。また、扱いやすいカラーネガフィルムや洗濯用合成洗剤を用いることで、より簡便な実験方法の開発を試みることができた。研究成果の一部は「かがくのひろば」(2008年11月実施)や公開研究会のポスター発表(2009年2月実施)などで発表したが、本研究は2009年度をもって終えるので、最後にこれまでの研究内容をまとめておくこととする。

キーワード タンパク質、タンパク質分解酵素、基質特異性、熱変性、発酵食品、 洗濯用合成洗剤、カラーネガフィルム

2. 実験 1 『食品に含まれるタンパク質分解酵素』

(1) 実験 1 - 1 「タンパク質を分解する酵素」

《目的》

パイナップルにはタンパク質を分解する 酵素が含まれることを確認する。また、そ の酵素は、タンパク質にのみ作用すること を確認する。

《準備物》

ゼリー(タンパク質)、葛(デンプン)、生のパイナップル片(1cm 角、2個)、サンプル瓶(2個)、爪楊枝(2本)、薬さじ(2本) 《方法》

ゼリー、葛の入った2個のサンプル瓶に、 爪楊枝に刺した生のパイナップルの小片を それぞれ加え、30 秒間振り放置した。こ のとき、瓶のふたと底を親指と人差し指で 挟むように持ち、軽く振ることに注意した。 これは手から伝わる体温によってゼリーが 溶けるのを防ぐためである。5分間後、サ ンプル瓶内の様子を確認した。

《結果》

ゼリーは徐々にとけていき、最終的には 液状になった。それに対し、葛では変化が 見られず固体のままであった。



図1 ゼリーが液状になった様子

《考察》

パイナップルには、ゼリー(タンパク質)を分解する物質が含まれていることがわかった。調べた結果、この物質はタンパク質分解酵素(プロテアーゼ)であることがわかった。また、デンプンである葛が分解されなかったことから、タンパク質分解酵素はタンパク質にのみ作用する(基質特異性がある)ことがわかった。

(2) 実験 1-2「酵素の熱による影響」

《目的》

実験1-1で確認したタンパク質分解酵素のはたらきと熱の関係を調べる。

《準備物》

ゼリー、生のパイナップル片(1cm 角、1 個)、加熱したパイナップル片(1cm 角、1 個)、缶詰のパイナップル片(1cm 角、1 個)、サンプル瓶(3 個)、爪楊枝(3 個)、薬さじ(1 本)

《方法》

ゼリーの入った3個のサンプル瓶に生のパイナップル片と缶詰のパイナップル片、レンジで加熱したパイナップル片をそれぞれ入れ、30 秒間振り放置した。5分後、サンプル瓶内の様子を確認した。

《結果》

生のパイナップルはゼリーを分解したのに対し、加熱したパイナップルや缶詰のパイナップルはゼリーを分解しなかった。

《考察》

酵素反応が見られた生のパイナップルを 加熱したあとで変化が見られなくなったこ とから、パイナップルに含まれるタンパク 質分解酵素は熱に弱い(熱変性する)ことが わかった。また、缶詰のパイナップルでは 反応が見られなかったことから、缶詰のパ イナップルはタンパク質分解酵素のはたら きがないことがわかった。これは、缶詰の 製造行程で熱処理がされ、パイナップル中 のタンパク質分解酵素が失活するため、反 応しなくなったといえる。

(3) 実験1-3「タンパク質分解酵素をもつ食品」

《目的》

パイナップル以外の食品の中から、タン パク質分解酵素を含むものを見つける。

《準備物》

ゼリー、大根片(1cm 角、1個)、キウイフルーツ片(1cm角、1個)、リンゴ片(1cm角、1個)、リンゴ片(1cm角、1個)、サンプル瓶(4個)、爪楊枝(4個)、薬さじ(1本) 《方法》

ゼリーの入った4個のサンプル瓶に大根 片、キウイフルーツ片、リンゴ片、レモン 片をそれぞれ入れ、30 秒間振り放置した。 5分後、サンプル瓶内の様子を確認した。 《結果》

キウイフルーツはゼリーを分解したのに対し、大根、リンゴ、レモンはゼリーを分解することはなかった。

《考察》

キウイフルーツにはタンパク質分解酵素が含まれていると推測した。調べた結果、キウイフルーツには「アクチニジン」というタンパク質分解酵素が含まれていることがわかった。また、今回の実験では使用しなかったが、表1に示すような食品もタンパク質分解酵素をもつことがわかった。

表1 様々な食品に含まれるタンパク質分解酵素

食品	タンパク質分解酵素
パパイヤ	パパイン、キモパパイン
イチジク	システインプロテアーゼ、
	フィシン
マンゴー	プロテアーゼ
生姜	システインプロテアーゼ、
バナナ	ショウガプロテアーゼ

大根は「消化によい」食品としてよく知られている。その理由を探るため、ゼリーを葛に代えて追実験を行ったところ、葛は分解されて液状になった。この結果から、大根にはデンプンの分解にはたらきかける酵素「ジアスターゼ」が含まれていることを確認できた。

(4) 実験1-4「発酵食品に含まれる酵素」《目的》

発酵食品にはタンパク質分解酵素が含まれるかどうかを確認する。

《準備物》

ゼリー、味噌、納豆(3粒)、サンプル瓶(2個)、爪楊枝(2個)、薬さじ(1本)

《方法》

ゼリーの入った2個のサンプル瓶に味噌、納豆をそれぞれ入れ、30 秒間振り放置した。5分後、サンプル瓶の中の様子を確認した。

《結果》

納豆はタンパク質を分解したのに対し、 味噌はタンパク質を分解することはなかっ た。

《考察》

この実験結果から、納豆にはタンパク質を分解するはたらきがあり、味噌にはタンパク質を分解するはたらきがないことがわかった。調べた結果、納豆にはタンパク質分解酵素「ナットウキナーゼ」が含まれていることがわかった。

(5) 実験 1 - 5「合成洗剤に含まれる酵素」 《目的》

「タンパク質分解酵素入り」の表記がある洗濯用合成洗剤には、タンパク質分解酵素が含まれることを確認する。

《準備物》

ゼリー、洗濯用合成洗剤(洗剤 A:アタック

高活性バイオ EX [花王(株)]、洗剤 B: Daily Needs バイオホワイト [三協(株)])、サンプル瓶(2個)、ピンセット、薬さじ(2個) 《方法》

ゼリーの入った2個のサンプル瓶に洗剤A、洗剤Bをそれぞれ入れ、30秒間振り放置した。5分後、サンプル瓶の中の様子を確認した。

《結果》

洗剤Aを加えたゼリーは溶けて液状になった。それに対し、洗剤Bを加えたゼリーは変化が見られなかった。

《考察》

洗剤Aで変化が見られたことから、洗濯用合成洗剤に含まれている酵素は、タンパク質を分解するとわかった。洗剤Bの結果について、洗剤に含まれる酵素の量が少量であったため、変化を確認するに至らなかったと思われる。

3. 実験2『洗剤に含まれるタンパク質分解酵素』

実験1『食品に含まれるタンパク質分解酵素』における実験1-4の結果、洗濯用合成洗剤に含まれている酵素はタンパク質を分解することがわかった。また、洗剤によってタンパク質を分解する能力が異なることもわかった。この分解能力の違いと合成洗剤中に存在する2種の粒(青、白)に何か関係があるのではないかと考え、さらなる実験を進めることとした。そのとき、実験で用いるタンパク質素材をゼリーからフィルムに代え、生ものより扱いやすく、実験の簡便化も試みることにした。

(1) 実験 2 - 1 「洗剤の粒の種類による反応性の違い」

《目的》

洗濯用合成洗剤について、2種類の粒(青、

白)による反応性の違いを確認する。

《準備物》

洗濯用合成洗剤(アタック高活性バイオ EX [花王(株)])、サンプル瓶(3個)、カラーネガ フィルム片(SUPERIA X-TRA400 [FUJICOLOR]、1cm 角、3個)、ピンセット(2個)、蒸留水

《方法》

合成洗剤を青い粒と白い粒の2種類に分けた。そして、3つのサンプル瓶 a, b, cにそれぞれ、5mlの水と1cm 角に切ったカラーネガフィルム(以下、フィルム)の小片を入れ、表2に示すように、サンプル瓶 a, bに合成洗剤の青い粒、白い粒を加えた。比較のため、合成洗剤を加えないサンプル瓶 c も作成した。そして、3つのサンプル瓶を同時に泡が立たない程度に10秒間ふり、その後、室内で放置してフィルムの様子を観察した。

表2 サンプル瓶に加えた粒の種類と数

	瓶a	瓶b	瓶 c	
青い粒	10 粒	0 粒	0 粒	
白い粒	0 粒	10 粒	0 粒	

ただし、時間の計測は、洗剤を入れた時 点から開始した。

《結果》

時間経過とともに変化したサンプル瓶内 の様子を表3にまとめた。

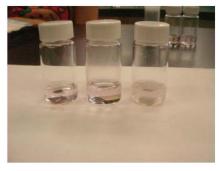


図2 サンプル瓶内の様子

表3 時間経過に伴う変化の様子

時間	瓶a	瓶 b	瓶 c
10 秒	水が赤く染 まった	水が赤く 染まった	水が赤く染まった(以
195 秒	青色の粒が 析出	(以降、変化なし)	降、変化なし)
450 秒	赤色の粒が 析出		
780 秒	黄色の粒が 析出		
1220 秒	無色透明の プラスチッ ク板のみが 残った		

《考察》

この実験から、合成洗剤の青い粒にのみタンパク質を分解する酵素が含まれていることがわかった。フィルムは図2のように、プラスチック製のフィルムベースの上に感光性の異なる3種類(赤、緑、青)の層から成っている。また、これら3種類の感層は色素で染められたデンプン粒子できてプンな合成洗剤に含まれているタンパク質分解酵素により分解されることで、色素が水相へ出てきたと考えられる。しかし、全ての瓶において10秒間で水が赤変したこと、時間経過とともに青、赤、黄の順に発色した粒が析出したことなどについて疑問の残る結果となった。

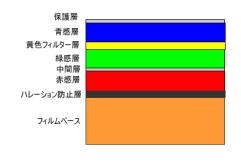


図3 カラーネガフィルムの構造(断面) HP「camera's room」より引用

(2) 実験2-2「温度による反応性の比較」 《目的》

実験 2-1 で確認したタンパク質分解酵素のはたらきと熱の関係を調べる。

《準備物》

洗濯用合成洗剤、サンプル瓶(3個)、フィルム片(1cm角、3個)、湯(50℃)、ピンセット(2個)

《方法》

実験 2-1 と同様に、サンプル瓶 a, b, c を用意し、3 つのサンプル瓶を同時に泡が立たない程度に 10 秒間ふった。その後、50 \mathbb{C} の湯中に放置してフィルムの様子を観察した。

《結果》

50 $^{\circ}$ $^{\circ}$ 0条件下では室温での実験と比べて 半分の時間で、実験 2-1 の結果と同じ現 象が見られた。

《考察》

この実験結果から、洗剤は室温より高温 の条件の方が、酵素のはたらきが活発であ ることがわかった。

4. 問題点と今後の課題

実験で用いるタンパク質素材をゼリーからフィルムに代えたことにより、生ものより扱いやすく、さらなる実験の簡便化に成功した。しかし、フィルムは水や光に弱いという性質があり、洗剤を加えることで水溶液の液性が弱アルカリ性になっている。これらが実験結果にどのような影響を与えるのか検証する必要がある。

5. 参考文献

- [1] 「ニューステージ新訂化学図表」, 浜島書店編集部編、浜島書店
- [2] 「酵素の ABC」, 中村隆雄著、学会 出版センター (1998)
- 「3〕 朝日子供新聞わくわく理科タイム

- http://www.asagaku.com/rika_time/2006/5/0531.
- [4] camera's room「カラーフィルムの 構造と現像プロセス」 http://members.jcom.home.ne.jp/c amera/color/kouzou.htm
- [5] 科学技術の礎 http://www.monokowashi.com/ind ex.html

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの先生に 大変お世話になりました。本校教諭の米田 隆恒先生には、実験概要を提供していただ きました。奈良女子大学教授の植野洋志先 生には、酵素について興味深いお話をして いただきました。奈良高等学校教諭の藤澤 育子先生には、実験に協力していただきま した。この場を借りて、御礼申し上げます。 また、実験方法からポスターなどまで指導 して下さった指導教諭の野上朋子先生、本 当にありがとうございました。

レーザーの波長の変化と温度の相関性

4年A組 古川 雄規 4年B組 小山 諒子 4年B組 山本 奈都美 4年C組 大橋 美紗希 4年C組 中井 美嘉 指導教諭 藤野 智美 指導教諭 米田 隆恒

1. 要約

私たち地学班は天文分野について関心をもって活動を行っている。中でも空に浮かぶ天体について興味があり、その詳細を調べてみようと考えた。しかし、天体を直接手で触って調べることはできない。そこで天体の光によって伝達される情報に注目した。まずは光そのものにどのような性質があるかを調べてみようと思案していたところ、過去の先輩の論文の中に途中で終了しているレーザーの研究を見つけた。そこで私たちはこの研究を精密化し、光の基本性質を理解するための研究を行った。

キーワードレーザー、波長、回折、干渉、ペルチェ素子、熱膨張

2. 研究の背景と目的

身近な光の中に、レーザーの光というも のがある。このレーザーの光を回折格子に 通すと、下の図1のように光の点が横に並 ぶ現象が起こる。

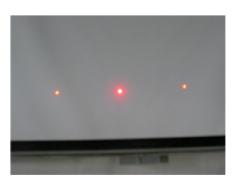


図1 光の点が横に並ぶ

先輩の過去の論文では、この現象を利用 したレーザーの波長と温度変化の相関性の 解析が行われていた。この研究では、レー ザー本体を温めると、光の点の間隔が広く なっていくことが観測されており、この理 由として、温度上昇によるレーザーの波長 の伸びを挙げていた。

しかしこの論文には、以下のような課題 点が見つかった。

- データ数が少ないため、全体の傾向 がつかみにくい。
- 2) 波長の伸びの原因としてレーザーに 使用されている金属の熱膨張を想定し ているが、実証されていない。

そこで私たちは、データの精密化と金属の熱膨張と波長の伸びの関係性を深く追求し、光の基本性質を検証することを目標とした。

3. 研究内容

<仮説>

私たちは以下の仮説をたて、これらを検 証する実験を行った。

- 1) レーザー装置を温めると、レーザー 光の波長が長くなる。
- 2) 波長が伸びる原因はレーザー内部に

ある金属の熱膨張である。

<実験原理 光の回折と干渉>

光がスリットを通過するとき、光の波は そのスリットを中心に放射状に広がる。こ の現象を光の「回折」という。

さらにスリットを増やすと波動が増え、 それらが重なり合う。これを光の「干渉」 という。ある地点で出会った波の山と山ま たは谷と谷(同位相の波)が重なり合うと、 振幅の絶対値は大きくなり、波の山と谷

(逆位相の波)が重なり合うと振幅の絶対値は小さくなる。同位相の波が重なり合った部分は、光の強度が大きくなるためより明るく見える。反対に逆位相の波が重なり合った部分は、光の強度が小さくなるため暗く見える。以下の図2ではこの様子を模式化した。黒い実践部分は波の山を、黒いは線分は波の谷を、赤い実線は強め合っている部分をつないだものである。このような回折と干渉の結果、図2の赤丸のように、スクリーン上にはある一定間隔ごとに明るい点が映し出される。

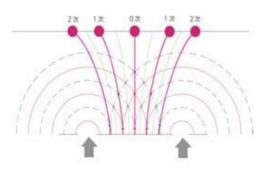


図2 光の回析と干渉

今回はこの光の回折と干渉を利用して、 レーザーの波長を求めた。求め方の詳細は 後述する。

4. 実験方法

[1] 実験装置の組み立て

今回の実験では、図3のようなレーザー 装置を組み立てて実験を行った。この実験 装置にはレーザー、回折格子、ペルチェ素 子、熱電対温度計が使用されている。以下 にこれらの器具の説明を行う。

<ペルチェ素子>

半導体の一種で、二枚の金属板でできている。電流を流すと熱エネルギーが片側の板に移動するため、一方が吸熱するにつれて他方が発熱する仕組みになっている。主に小型冷蔵庫の温度制御などに用いられている。本研究ではレーザー本体の温度制御に使用した。

<熱電対>

先端部で2種類の金属が接合している 温度計で、熱による金属の膨張率から温 度を測定する。本研究ではレーザー本体 に取り付けて、その温度変化を測定した。

<回折格子>

1mm の間に 500 本や 1000 本もの細かい溝が彫られているシートで、このシートを通った光は回折と干渉という現象によりいくつもの光の点に分かれる。溝が細かいほど精度が高い。本研究では1mm あたり 500 本および 1000 本の溝を持つ 2 種類の回折格子を使用した。

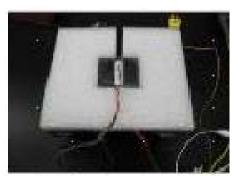


図3 ペルチェ素子の実験

このようなレーザー装置の光を回折格子 に通してスクリーンに明線を映し出す。実 験の精度を高めるために、以下のような工 夫を施した。

- 1) レーザー本体をのせた装置全体をあら かじめ氷で冷やしておき、温度制御を 広範囲で行うことを可能にした。
- 2) 発泡スチロールで装置を密閉して外気 を遮断し、温度測定の誤差をできる限 り少なくした。
- 3) 実験を精密にするため、回折格子は1 mm あたり 500 本、1 mm あたり 1000 本の精度の高いものを使用した。図4に実験装置の様子を示す。



図4 実験の工夫

[2] 実験1

光の回折と干渉によって映し出された明 線用して、波長を求めた。図5は今回の実 験の模式図である。

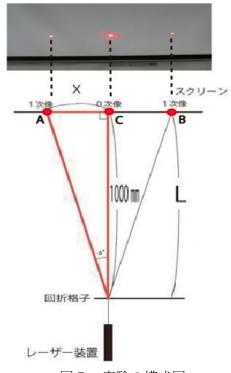


図5 実験の模式図

図 5 において、0 次象と 1 次像の間の距離を x、スリットとスクリーン間の距離を L と表すと、ピタゴラスの定理より、スリットから 1 次像までの斜辺の長さは以下のように表すことができる。

$$\sqrt{x^2 + L^2}$$

次に光が回折格子のスリットを通過した際の様子を考える。図6はこの様子を拡大して記載したものである。

スリット間の距離をd、光の波長を λ とおく。このとき線分 CD は一波分の差、つまり λ に等しくなる。

図 5 における太実線の三角形と、図 6 の 色つきの三角形が二角共通の相似の関係に なる。相似な三角形は対応する辺の比が等 しいことから、次のような式を作り、光の 波長 λ を求めることができる。

$$\sqrt{x^2 + L^2} : x = d : \lambda$$

この式を λ について整理すると、以下のようになる。

$$\lambda = \frac{xd}{\sqrt{x^2 + L^2}}$$

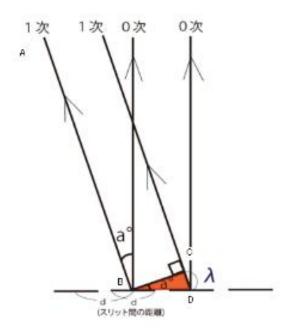


図6 回折格子のスリットを通過する光

式中の各変数について、実験では以下の ように値を設定し、波長 λ を求めた。

- ・スクリーンと回折格子の間の距離 $\it L$
 - \rightarrow 1000mm に固定したので、

$$L = 1000$$

- スリット間の距離 d
 - →1 mm あたり 500 本および 1000 本の回折格子を使用したので、

$$d = \frac{1}{500}$$
 および $d = \frac{1}{1000}$

- ・明線間の距離x
 - → 実測により求めた

[3] 実験結果

レーザー本体の温度を上げていくと、図 7のようにスクリーン上に映し出されたレーザー光の明線が外側に向ってゆっくり移動していく様子が観測できた。

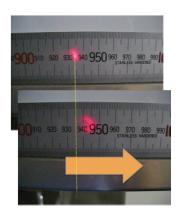


図7 温度上昇による明線の移動

前述した式を用いて各温度での光の波長を算出したところ、温度上昇に伴って光の波長が長くなることが確認された。 これらの実験データをグラフ化したところ、以下の図 8 および図 9 のようなグラフを得た。グラフ中の赤線のデータは前ページ図 5 のAC 間の明線の移動から算出した波長を、青線は同図の BC 間の明線の移動から算出した波長を表している。加えて、全体の傾向をつかむために、赤線と青線の数値を平均化したグラフを作成した。図 10 および図 11 のグラフがこれにあたる。

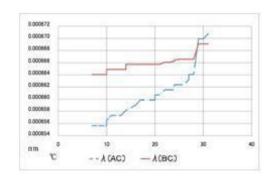


図8 スリット数 500 本/mm の回折格子 (横軸:温度, 縦軸:波長)

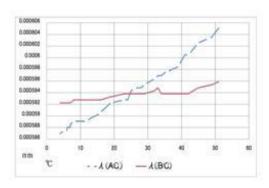


図 9 スリット数 1000 本/mm の回折格子

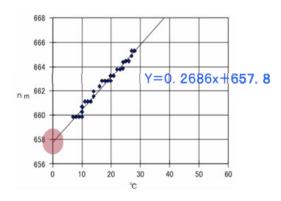


図 10 図 8 の 2 本のグラフを平均化した もの(横軸:温度, 縦軸:波長)

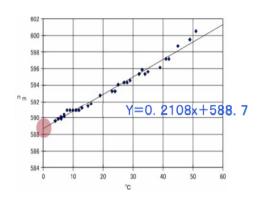


図 11 図 9 の 2 本のグラフを平均化した もの

図 10、図 11 のグラフからわかるように、 今回の実験により、正の傾きを持つ、直線 に近いデータを得ることができた。なお、 図 10、図 11 では、最小二乗法を利用して 直線の近似を行った。過去の論文に比べて データ数を増やしたため、より精度の高い 結果を得ることができた。このデータより、 0℃のときのレーザーの波長の長さを求め ることに成功した。この値は製品に記載さ れている値と非常に近い値となった。

[4] 実験1の考察

仮説通り、レーザー装置の温度の上昇に伴いレーザーの光の波長が長くなることが確認できた。しかし、図8および図9のグラフを見ると、左右のデータにかなりの差が生じている。この原因として以下のようなことが考えられる。

- 1)回折格子とスクリーンの位置関係が 完全に直角になっていなかった。
- 2)実験途中でレーザーの位置がずれた。 より精密に装置の位置関係を設定する必 要があり、次回への課題として検討したい。

[5] 実験2

仮説に示したとおり、私達はレーザーの 波長の伸びる原因を金属の熱膨張によるも のと考え、実験で得られた値を用いてレー ザー装置に使われている金属の熱膨張率を 調べた。図 12 の上の図は加熱前の金属の 様子を、下の図は加熱後の金属の様子を示 している。

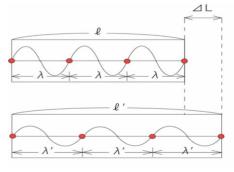


図 12 金属の熱膨張

図 12 において、 λ は加熱前のレーザー の波長を、 λ' は加熱後のレーザーの波長 を表している。実験により得られたそれぞれの波長を以下のように表される熱膨張率の式に代入する。

熱膨張率 =
$$\frac{\lambda - \lambda}{\lambda}$$

このようにして2種類の回折格子のそれぞれを使用した場合について、金属の熱膨張率を求めた。この値と一般的に赤色レーザーに使われている金属である GaAs(ガリウムヒ素)の熱膨張率の値とを比較した。

[6] 実験結果

測定の結果から、以下のような値を得た。

- ・スリット数が 500 本/mm の回折格子 →4.803×10⁻⁴ (1/K)
- ・スリット数が 1000 本/mm の回折格子 →3.580×10⁻⁴ (1/K)
- ・GaAs(ガリウムヒ素)の熱膨張率 →5.7×10⁻⁶ (1/K)

[7] 考察2

私達の実験により得られた値はいずれも 一般的な GaAs との値と比較して 100 倍近 く異なることがわかった。

この原因として以下のような仮説をたて ることができる。

- 1)今回使用したレーザー光に使用されて いる金属が GaAs ではない。
- 2) 熱膨張以上に影響力のある要因が原 因となってレーザーの波長が伸びてい る。

今後はこれらの課題に取り組みたい。

6. まとめ

今回私たちはレーザーの光の回折と干渉 について実験を行い、レーザーの波長が温 度変化によって伸びていくことを確認した。 そこで得られたデータを公式を用いて計算し、0℃のときのレーザーの波長の長さを得ることにも成功した。得られた値が製品に記載されているものとよく一致しているため、よい精度での実験を行うことができた。過去の研究の場合とは異なる温度制御を行ったことが、その精度を上げることに成つながったものと感じられる。

また、実験から得られた波長の値を用いてレーザー装置の金属が熱膨張率を求めることに成功した。今後は熱膨張について考察し、今回の実験で得られた値の研究をしたいと考えている。

最終的な目標は天体の光から情報を得ることであり、今回レーザー光を用いて実験をしたように星の光を分析したいと考えている。その過程として、発光ダイオードやナトリウムランプなどレーザー光とは異なる光についても実験を行う予定である。

7. 参考文献

[1] 「レーザー装置の温度と波長の関係」, 小池剛央,大村啓輔著,2007年度 奈良女子大学附属中等教育学校 SSH 生徒研究論文集

8.謝辞

今回の研究をするにあたってご指導いた だいた藤野先生と米田先生に深く感謝しま す。

高高度発光現象の観測にむけて

4年C組 大鳥 佐紀 4年C組 栗生 優芽 指導教諭 藤野 智美

1. 要約

私たちサイエンス研究会地学班の研究テーマの一つに高高度発光現象の観測がある。現在、高知工科大学と全国 29 の SSH 校が連携してスプライトの同時観測に関する研究会立ち上げており、昨年から本校もその参加校として活動している。そして今年、私たちは「高高度発光現象同時観測に関する平成 21 年度第一回研究会」に参加した。ここでは研究会での活動内容および今後の展望について報告する。

キーワード 高高度発光現象、スプライト、ジェット、同時観測

2. 研究背景

地学班の中で天文に興味のある私たちは、高高度発光現象の一つであるスプライトの研究を先輩方から受け継ごうと考えた。そこで、高高度発光現象とはどういった現象なのかを知るところから始めた。次に観測の準備として、カメラの組み立てと画像取り込むソフトウェアである UFO Captureの試行を試みた。しかし不明な点がいくつか見つかったため、研究会に参加しこれらの疑問点を明確にしようと考えた。加えて、高高度発光現象を観測するにあたって注意すべき点や、調べる必要のある事柄を知り、今後の活動に方向性をあたえることも目標とした。

3. 研究内容

(1) 高高度発光現象とは

高高度発光現象とは、高度約 40~90km の上空で起こる瞬間的な発光現象のことを 指す。スプライト、ジェット、エルブス、 ハローなどがあり、発光形態や高度は各現 象によって様々である。

(2) スプライトとは

高高度発光現象の一つで、主に中間圏 (高度 50km~80km 付近)で起こるとされている。

雷や雷雲に帯電されている電子が窒素分子に衝突し、窒素分子が負電荷によりイオン化され発光したものであると考えられている。オレンジ色あるいはワインレッドに光り、筋状の構造を持つ。また、スプライトは天の川の数千倍から数万倍の光度をもつ発光現象である。その発生場所や時刻を予想することは難しいが、運が良ければ肉眼で見ることもできる。

スプライトは、発光形態の違いから「キャロットスプライト」と「カラム状スプライト」の2つに大別される。「キャロットスプライト」は人参の形をしているのに対し「カラム状スプライト」はそれを東ねたよ

うな形をしている。この2つの本質的な違いは、もととなる雷放電の発生時刻からの 遅延時間の差と、発光の広がりの違いにあ る。以下にキャロットスプライトの図を示 す。



図1 キャロットスプライト

(3) 同時観測の意義

この研究会では、同時観測が大きな目標のひとつに挙げられており、多くの学校がいくつかのブロックに分かれて同じスプライト現象を撮影することを試みている。このように同じ時刻に同じスプライトを他地点から観測することにより、高さ・場所などの立体構造の解析ができるようになる。

また、多数の同時観測データを集めることにより、広範囲での空間分布や出現状況の変化なども調べることができる。この分野での同時観測は世界的に見ても数が少なく、本研究会での同時観測には大きな意義がある。

(4)本校の活動

[1]カメラの組み立て

スプライトの撮影に用いる超高感度ビデオカメラ(Watec Neptune-100)を組み立てた。「高校生天体観測ネットワーク編 スプライト観測ハンドブック 2005」を見ながら、

必要な物やそれぞれの部品の役割、操作を 確認した。

[2]UFO Capture ソフトの使用

UFO Capture とは動体自動検出用ソフトウェアである。このソフトウェアは入力ビデオ信号の変化を捉え、突発現象の開始数秒前から終了の数秒後までの動画をパソコンのハードディスクに記録することができる。しかし、カメラ視野の中での変化を感知し記録する仕組みになっているため、虫や鳥、宇宙線などを撮ってしまうことも多い。そのため、人がデータフォルダの画像を目視し、必要なデータのみを取り出すという作業が必要になってくる。

このソフトウェアの試行を試みたが、設定方法の理解が困難であった。そこで、研究会でこのソフトウェアの使い方についての情報を得ることにした。

[3] 研究会への参加

10月24日、25日の2日間、大阪府立三 国丘高等学校を会場として「高高度発光現 象同時観測に関する平成21年度第一回研 究会」が開かれた。本校からは一日目は栗 生、二日目は大鳥が参加した。日程別の研 究会の内容を、それぞれ以下に報告する。

● 1 日目(10 月 24 日)

1日目の研究会では全国 SSH コンソーシアム参加各校からの報告後、初のアマチュア観測者によるスプライト観測に成功した植原敬さんにお話を聞かせていただいた。

- i)各校からの報告内容
- ○観測方法について○

各校で行われている以下のような観測方 法の報告があった。

- ・スプライト発光持続時間と、雷発光開始 からスプライト発光開始までの時間の観 測について
- ・スプライトの画像の色解析について
- ・発光時間、形状、発生位置、気象条件、 地形との関係について
- ○観測結果と考察について○各校での観測結果とその考察について、以下のような報告があった。
- ・スプライトの発生頻度はカラム型がキャロット型を上回っていた→発光に必要なエネルギーはカラム型の方がキャロット型より小さいのではないかという仮説が立てられる
- ・高度が上がるほどカラム型スプライトは 赤くなる
- ・スプライトは低い周波数の電磁波を発生 している
- ・雷が多い月にスプライトを多く観測でき るという傾向がある
- ・南九州では、種子島北部の海上で多くス プライトを観測できる
- ・ジェットは対流圏、成層圏、中間圏、熱 圏の四層にわたって発生する
- ・エルブスの形状が楕円形である可能性を 発見した

○工夫点について○

- ・カメラの視野に自動車や家の光が入らないように斜め上に向ける
- ・ 夜間はカメラの後ろに暗幕を引き、窓からの映りこみを防ぐ
- ・グラウンドの照明や外灯の影響を軽減す るため、ガラス下面は黒画用紙で遮光す る
- ii)アマチュア観測者 植原敬さんのお話 を聞いて

植原敬さんは NMS (日本流星研究会) の 会員であり、子供の頃から天体に興味を抱 いていたという。天体観測やプラネタリウ ムの自作など、とにかく星が大好きであっ た。そんな彼は 2003 年 12 月 16 日、いつ ものように大阪市東淀川区の自宅で流星観 測を行っていた。午前2時過ぎ、冬季雷を 伴う上方への放電現象を CCD カメラによ って撮影し、後にそれがスプライトである ことがわかった。これが初のアマチュア観 測者によるスプライト観測となった。また、 UFO Capture はもともと防犯用のソフト ウェアであったが、流星観測に使えるので はないかと目をつけた彼は、Sonotaco に UFO Capture を天体観測用に改良しても らえるよう頼んだ。こうして流星をはじめ とする天体観測は、高校生にもできる、よ り身近なものとなった。

彼は今まで、流星やスプライトの他にも様々なものを観測している。その例として、とても強い光を放つ魚群火球や、地球の周りを火のついたまますり抜けていったアースグレージング火球などが挙げられる。また、型にはまらない変わったスプライトも観測しており、ジェット状に次々と上に上がっていくスプライトや、1回消えかけてまた発光する、発光時間の長いスプライトなども観測している。

今回の研究会で上記の現象の映像を見せていただき、私はとても衝撃を受けた。その理由は、今までのスプライトに対する画ー的なイメージにあてはまらないものであったからだ。植原さんにお話を伺うことで、スプライトは観測史の浅いものであり、これからの観測によって新たな物事が発見される可能性は無限であるということが実感

できた。

● 2 日目(10 月 25 日)

2日目の研究会では、前日の全国 SSH コンソーシアム参加各校からの質問への回答が行われた。その後、観測地点ごとのグループ討論によって各校の進行状況や今後の情報共有の方法が確認された。

i)質疑応答で学んだこと

以下に示すような観測に関わる具体的な 作業方法について学ぶことができた。

- ・UFO Capture の設定や時刻合わせの方法
- ・同時観測における高高度発光現象の解析 方法
- ・スプライトの電波観測の方法
- ・高高度発光現象の解析に必要な UFO Analyzer というソフトウェアの使用方法

ii) グループ討論

グループ討論では、観測地点ごとにグループに分かれて、今後の観測の方針と各校の役割を確認した。本校の観測地点は福井県・京都府に面している若狭湾上空であり、同時観測の可能な同地点観測校(大阪府泉北高等学校・香川県三本松高等学校・高知県高知小津高等学校など)とグループ討論を行った。この討論では、各校での画像処理に関する情報交換が行われた。

5. まとめ

今回、研究会に参加し、他校の高高度発 光現象の観測状況や工夫点について知るこ とができた。また、自分たちの疑問点や観 測の注意点およびソフトウェアの使い方等 を知ることができ、これからの本校におけ る観測の道筋が見えてきた。また、アマチ ュア観測者の植原敬さんのお話を伺うこと で、より天体に興味を持つことができた。 同地点観測校ともグループ討論ができ、今 後の同時観測におけるコンソーシアムとし ての意義を見出すことができた。

6. 今後の展望

研究会の参加目的にも記したが、まずカメラで現象を撮る練習をする。それによってピント合わせがより上手くできるようになるため、スプライトの観測の前段階として、様々な現象の撮影を練習として行うことが必要である。また、今回の研究会で得た情報を活用し、UFO Capture と UFO Analyzer を使いこなせるように練習する必要がある。最終的には、高高度発光現象に対する仮説を立て、観測で確かめること、同地点観測校との同時観測を行い、現象の空間分布や出現状況の変化を調べることを目標とする。

7. 参考文献

- [1]「高校生天体観測ネットワーク編 スプライト観測ハンドブック 2005」
- [2] \[\sum \] Sprite Journal 2005 Autumn-Winter \]
 http://sonotaco.sub.jp/sprite/\[\sum \] \[200510/\] index.html
- [3]「SonotaCo.com★ソノタコドットコム」 http://sonotaco.com/

8. 謝辞

今回の研究にあたって、ご指導してくださった藤野先生、研究会においてボランティアとしてお話をしてくださった植原敬さん、観測方法を教えてくださった高知工科大学の先生方、他校の研究協力者の方々に心より御礼申し上げます。

第Ⅲ部

活 動 報 告

「NSL講座」参加報告

 3年A組
 浪江
 智子

 3年A組
 野依
 莞奈

 3年A組
 東
 美弦

 3年A組
 藤岡
 侑里

 3年A組
 細井
 映美

 指導教員
 川口
 慎二

1. 要約

2009 年 8 月 25 日(火)~27 日(木)および 12 月 21 日(月)、22 日(火)の 5 日間、SSH プログラムの一つである「NSL 講座」に参加し、宇宙をテーマに学んだ内容を以下に報告する。 NSL 講座とは、自然科学リテラシー(Natural Science Literacy)の頭文字をとってつけられた名前であり、3,4年生を対象に集中講義形式で行わる。各日程を下記に示す。

テーマ:「宇宙への誘い」

日時	場所	講師(所属)	内容
8月25日(火)	本校物理教	米田隆恒先生	オリエンテーション
9:00~15:00	室	(本校教諭)	講義:「星の光は語る」
			実習:光のスペクトルを見る
8月26日(水)	きっづ光科	佐々木和也先生	実習:燃料電池の仕組み
9:00~16:00	学館ふぉと	(きっづ光科学	講義:エネルギー問題と科学技術
	ん	館ふぉとん実験	(Sキューブに参加)
		指導員)	
8月25日(木)	奈良女子大	小林 毅先生	講義:「宇宙の形を見る」
9:00~16:00	学理学部	(奈良女子大学	
		大学院教授)	
12月21日(月)	奈良女子大	山内 茂雄先生	講義:「X線で観る宇宙」
9:00~16:00	学理学部	(奈良女子大学	
		理学部教授)	
12月22日(火)	本校メディ	林 左絵子	講義:「宇宙の観測方法」
9:00~12:00	ア教室	(国立天文台ハ	(テレビ会議システムによる遠隔授
		ワイ観測所準教	業)
		授)	

参加者は4年生3名、3年生8名の合計11名であった。

NSL講座(1日目)参加レポート

3年A組 浪江智子

1. 概要

2009 年 8 月 25 日(火)、NSL 講座「宇宙への誘い」(講師: 奈良女子大学附属中等教育学校教論 米田隆恒先生)に参加し、宇宙について学んだので、以下に報告する。

講義:宇宙に存在している銀河の種類や宇宙の距離の単位を学んだ。また、ハッブルの 法則や相対論から宇宙の膨張と宇宙の年齢の関係性を理解した。さらに、光の性 質や光の発生の仕組み、スペクトルの種類を学んだ。そして、吸収スペクトルを 読み取ることでその光を発する天体に含まれる元素、星の進化段階、星の温度な どを知ることができることが分かった。

工作:星のスペクトルを見ることのできるプリズムを内蔵したものを分光器という。今回は誰にでも作れる簡易分光器を作った。

キーワード ハッブルの法則、プリズム、電磁波、スペクトル

2. 講義

(1)宇宙の概要

まず、宇宙の構成について説明を受けた。

■銀河系

夜空を見るとたくさんの天体が見える。 このうち、太陽のように核融合をして自ら 光る天体を「恒星」という。また、この恒 星が集合してできたものを「銀河」という。

「星雲」とは、星間ガスの集まりのことを 指す。特に、太陽系が所属する銀河を「銀 河系」あるいは「天の川銀河」と呼ぶ。銀 河には「渦巻型銀河」と「棒渦巻型銀河」 の2種類がある。

■距離の単位

・地球の距離:6357キロメートル

・太陽の半径:696000=地球の9個分

・1 天文単位(地球と太陽の距離):1億5

千万キロメートル=太陽 108 個分

- ・1 光年: 9.46×10¹²キロメートル=6万3 千天文単位
- ・1pc (パーセク): 3.26 光年
- ・光の速さ:30万 km/s (地球1周4万 km)

次に、宇宙の膨張と宇宙の年齢について 説明があった。

■ハッブルの法則

ハッブル(Edwin Hubble, 1889-1953) は 1929 年、天体スペクトルの赤方変位と天体までの距離を観測した結果、遠い天体ほど地球から速く遠ざかっており、速さが距離に比例するというハッブルの法則を発表した。相対論によれば、光速より速いものではない。しかし、ハッブルの法則で、速さが距離に比例すると、いつか光速を超えてしまうのでないだろうか。しかし、宇宙

がどこも一定の割合で膨張しているとすると、地球 E に対する天体 A の速さと、天体 A に対して、天体 B は天体 A の 2 倍の速さで地球の速さで地球から遠ざかっているように見えるのである。

これがハッブルの法則の意味である。宇 宙は一定の速さで膨張している。

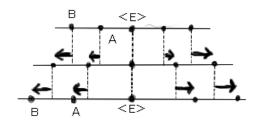


図1 ハッブルの法則

地球から遠い星ほど地球から速く遠ざかる。時間を逆戻しすると、全ての天体は地球に向かって集まる。だから、地球は宇宙の中心といえるだろうか。そんなことはない。下の図2は、宇宙が2倍に膨張した場合を模式的に表したものである。天体Aから見ても、天体Bから見ても、違いは天体程速く遠ざかっているように見えるのである。

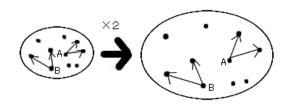


図2 宇宙が2倍に膨張した場合

■宇宙の大きさ

宇宙の広がりは速くなったり遅くなった りする(宇宙の膨張は一定の速さではない)。 宇宙はどのようにできたのかを説明する 理論のひとつに有名な「ビッグバン説」が ある。ビックバン以前の宇宙については、 次の2つの説がある。

- ① ビッグバンの前は「無」であった。
- ② ビッグバンの前にも宇宙はあり、点になる少し前にまた膨張した(こちらが有力な説である)。

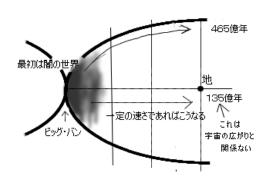


図3 ビックバンと宇宙の膨張

(2)光の性質

光は真空中に伝わる波である。また、水 面などの波は水の振動が伝わり、音は空気 などの振動が伝わる波である。プリズムは 「赤橙黄緑青藍紫(せきとうおうりょくせ いらんし)」という色を分けることができる。



図4 赤橙黄緑青藍紫

(3)光の発生の仕組みとスペクトルの種類

■スペクトル

成分と各成分の強度を示したものを「スペクトル」という。また、光のスペクトルとは光をプリズムで分けたもののことであり、どの波長の光がどのような強度で混ざっているかを示す。光のスペクトルには、

光の発生の仕方の違いにより、連続スペクトルと線スペクトルに分類される。

■連続スペクトル

原子や分子が振動すると電磁波を出す。 物質を構成する粒子は、温度が高いほど激 しく震動する。1000℃だとすると、その物 質中には、ゆっくり振動する(波長の長い 電磁波を出す)ものもあれば、激しく震動 する(波長の短い電磁波も出す)ものもあ るので、結果として、長い波長から短い波 長までの連続した波長の電磁波を出すこと になる。このような場合、スペクトルを見 ると波長が連続しているので「連続スペク トル」という。

■線スペクトル

原子一つに注目すると、原子核の周りを電子が回っている。この電子の通り道を「電子の軌道」という。電子は原子核に近い程位置エネルギーが小さく、電子が原子核から遠い軌道から、原子核に近い軌道に移動(「遷移」という)すると、そのエネルギーの差に相当する電磁波を出す。原子の種類によって軌道は決まっているので、電子の遷移によって出る電磁波のエネルギーにしたがって波長は特定の値を持つ。スペクトルを見ると特定の波長の部分が線上に光るので「線スペクトル」という。水素原子の場合は、バルマーが発見した「バルマー系列」であり、これは可視光領域の光である。

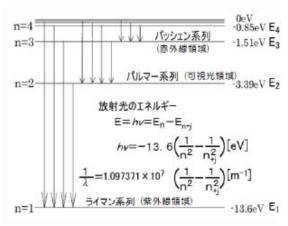


図5 線スペクトル

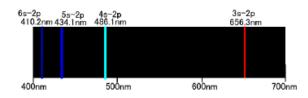


図6 水素原子の電子の遷移による線スペクトル

■吸収スペクトル

高温の星からは、連続スペクトルが出でいる。その星の表面に存在する低温ガス中の原子は、その原子の線スペクトルに相当する光を吸収してしまう。地球から見ると、連続スペクトルの中に星の表面の低温ガスが吸収した部分が黒い線として見える。この黒い線を「吸収スペクトル」という。

(4)星のスペクトルからわかること

■星の温度を知る

下図 7 のグラフは、天体の連続スペクトルと、表面温度の関係を示す各グラフの頂点、つまり最大強度部分の波長 λ (m)と物体の表面温度 T (K)は反比例している。この関係を「ヴィーンの変位則」といい、観測値 λ から表面温度を求めることができる。

$$T = \frac{2.90 \times 10^{-3}}{\lambda}$$

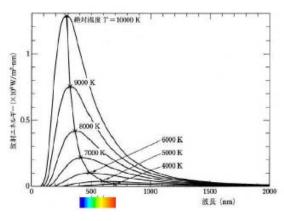


図7 ヴィーンの変位則

■星の構造元素を知る

吸収スペクトルを調べれば、星に含まれる原子を知ることができる。

■星の進化と元素の合成

ビッグバンにより、宇宙は光で満たされた。このとき電子や陽子はまだ宇宙に存在しない。ビッグバンと共に宇宙は膨張し、膨張につれて温度が下がると高エネルギーの光子(光の粒子)は電子と陽電子、陽子と反陽子など、素粒子とその反物質を作り出した。

2. 星のスペクトルを見る方法

■分光器

光のスペクトルをつくるには、ただ単に、 光をプリズムに通せばよい。プリズムを内 蔵したものを「分光器」という。望遠鏡の 接眼レンズの部分にこれを取り付ければ、 天体のスペクトルを見ることができる。

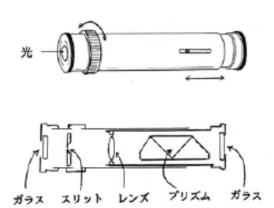


図8 直視分光器とその構造

■プリズム

プリズムは、ガラスの屈折率が、光の波 長によって異なることを利用するものであ る。青は、赤よりも屈折率が大きいので、 よりたくさん屈折する。

■回折格子

CD の表面に光を当てると虹が見える。

CD 表面の無数の溝が光を反射するときに 回折・干渉によって、色ごとに反射あるい は透過する角度が異なるためである。この 溝の集まりを「回折格子」という。

■簡易分光器の製作

回折格子を用いると簡単に分光器を作る ことができ、波長を計算することができる。

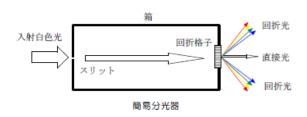


図 9 簡易分光器

3. この講義を受けて

私は今まで宇宙はただ単に広くて星があ

るだけの暗い世界だと思っていました。しかしこの講義を受けて宇宙は広いだけでなく、様々な光に満ち溢れているということが分かりました。

特に、何万光年も離れた星から放出される光の吸収スペクトルを調べることで、その星が何年生きているか、何度の天体なのか、どのような成分で出来ているのか、などがわかるということに驚きました。

光にはまだまだきっと知られていないことがたくさんあるのではないでしょうか。 そして、それはこれからどんどん解明されていくことと思います。私もその一部に関わることができるよう、さらに宇宙や光について学習・研究してみたいと思います。

NSL講座(2日目)参加レポート

3年A組 東 美弦

1. 概要

2009 年 8 月 26 日(水)、私たちは「きっづ光科学館ふぉとん」へ行き、NSL 講座の1つのして、新エネルギーに関する実験を行い、午後には S キューブ参加し、科学技術と環境問題について学んだので、以下に報告する。

講義:現在盛んに研究されているいろいろな特殊材料について学んだ。また「エネルギーと科学技術」について永井士郎先生の講演会に参加した。

実験: 今回は熱電素子、特殊樹脂の2つの特殊材料がエネルギー変換にどのように関わる かについて、実験を通して検証・体験した。

キーワード ペルチェ、固体高分子膜、導電性高分子、エネルギー、科学技術

2. 講義内容

(1) ペルチェ

2つの異なった金属に電流を流すと吸熱、また発熱が起こる。この現象を「ペルチェ効果」という。今までの冷却装置にはフロンガスが使われていたが、オゾン層の破壊という環境破壊につながるため、使用を禁止された。「ペルチェ素子」は電流を流すことで温めたり冷やしたりできるので、地球に優しい冷却装置として注目されている。騒音が出ないことから、冷蔵庫、パソコン、ドクターへリなど、静かにかつ冷たくしなければならないところで利用されている。《実験》

- ① ペルチェ素子に電流を流す。結果:片面が熱く、もう片面が冷たくなった。
- ② ペルチェ素子の片面を熱し、もう片面を冷やした。

結果:①とは逆に電流が流れた。



図1 ペルチェ効果の実験

(2)固体高分子膜

地球に優しいクリーンエネルギー、また 地球温暖化・オゾン層破壊対策としてでき たのが「燃料電池」(水素燃料)である。最近 は固体高分子膜(イオン交換膜)の出現によ り、電気自動車用電源としても注目されて いる。

《実験》

簡易水素ガスボンベから小型燃料電池セルに水素を注入し、端子にソーラーモーターをつなぐ。

結果:モーターが回転する。

注意:水素と酸素が混ざると大きな爆発

が起こる。

(3) 導電性(プラスティック)高分子

導電性高分子とは電気伝導性を持つ高分子化合物の呼称である。通常の高分子化合物(ポリマー)は絶縁状態だが、1970年代に白川秀樹氏らによるポリアセチレンフィルムの合成により、電気が流れる高分子、つまり導電性高分子に関する研究が飛躍的に発展した。

この導電性高分子は一般に二重結合と単結合が交互に並んだ構造「共役系高分子」にキャリア、つまり自由に動ける電荷移動体が加わり、有機物でありながら金属に匹敵する導電性を持つことになる。現在電解コンデンサー、電子機器のバックアップ用電池、携帯電話やノートパソコンに使用されるリチウムイオン電池の電極などに応用されている。

《実験》

ポリビニールアルコール水溶液(5%)に三塩化鉄を溶かし、触媒溶液を作る。この溶液の上澄み液をスポイトで取り、OHPシート上に塗布し、乾燥させる。塗布膜を作成後、シャーレの上蓋にOHPを貼り付け、下蓋にピロール試薬を1~2滴落とし、乾燥させる。

するとピロールが蒸発し、上蓋の OHP 上で反応が起こり、ポリピロール(高分子)膜ができる。



図2 導電性高分子

十分に反応が進んだ後、電池とダイオード「ふぉとん・ひかる君」を使い、プラスティックに電流が流れるかを調べる。

結果: ふぉとん・ひかる君が光り、電流 が流れ、導電性を確認した。



図3 「ふぉとん・ひかる君」 を用いた実験



図4 実験の様子

(4) エネルギーと科学技術

私たちの社会および生活は、大量のエネルギーを消費しており、その大部分を石油、 天然ガスなどの化石資源とウランに依存している。化学資源は、その一部を化学原料として利用する以外はほとんどすべて燃焼して電気エネルギーおよび熱エネルギーとして利用している。しかし、この燃焼のときに発生する二酸化炭素が地球温暖化の主な原因なのである。

大気中の二酸化炭素、メタンなどの温室 効果ガスは気体を構成している分子が赤外 線を共鳴吸収する。吸収するときに分子の 振動と回転運動が激しくなって気体の温度 が上昇する。よって、大気中の二酸化炭素 濃度の増加が地球温暖化の原因かどうかは、 二酸化炭素濃度が減少したときの気温変化 によってはじめて明確になると考えられて いる。

現在、注目されている燃料電池は、現状では最もエネルギー変換効率の高い発電装置であるといえる。



図5 永井先生による講演の様子



図6 燃料電池自動車の模型

3. この講義に参加した感想

今回、この講義に参加して、現在行われ ている最先端の研究を身近に体験した。

地球温暖化について詳しく学ぶことができ、現在、温暖化防止のためにどのような研究がされているのかを知ることができた。

特に導電性高分子の実験では、ノーベル 賞受賞者の白川秀樹先生が行った実験と同 じ実験を行い、いつも何気なく使っている タッチパネルと同じものを自分の手で作る ことができて、とても面白かった。

NSL講座(3日目)参加レポート

3年A組 藤岡 侑里

1. 概要

2009 年 8 月 27 日(木)、NSL 講座「宇宙の形を見る」(講師:本学大学院人間文化研究科教授 小林毅先生)に参加し、空間の形の数学的考察について学んだので、以下に報告する。

講義: 2次元空間に現れた図形を3次元空間の視点から、3次元空間に現れた図形を4次元空間から考えた。

キーワード 2次元空間、3次元空間、4次元空間、球面

2. 講義内容

(1)2次元空間とは

縦・横の二つの方向に広がりを持った空間のことを「2次元空間」と呼ぶ(より厳密な数学的な用語としては「2次元多様体」という言い方がある)。例えば、球面やドーナツ面は2次元空間の例になっている。

(2)2次元空間を観る

縦・横の広がりだけが無限に広がっている空間(平面)を「平面国」、平面国の住人を「平面人」として考える。

①ある日、平面国に異変が起こった。突然点が現れて、それがすぐさま小さな円に変化した。次にその円がみるみる大きくなっていったかと思うと、あるところから次第に小さくなってゆき、最後は点になって消えてしまった。いったい何が起こっただろうか。

よう。これは、3次元空間に存在し、動き回っている球面(中身はつまっていない)が平面国を通ったという現象を表している。球面が平面と交わる様子が時間とともに変わっていっている。図2を見よ。

図1の現象を3次元空間で見ることにし

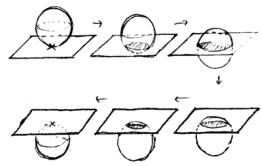


図2 3次元空間の視点から見る

②別の日には次のような事件が起こった。 これは何を意味しているのだろうか。

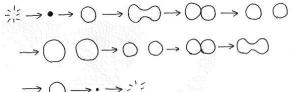


図3 平面国で起こった現象②

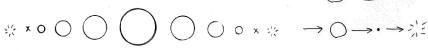


図1 平面国で起こった現象①

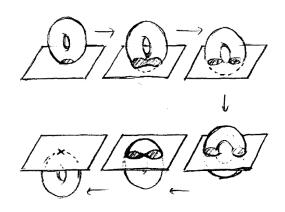


図4 3次元空間の視点から見る

3次元空間に存在し、動き回っていたドーナツ面がたまたま平面国の中を通り抜けていった。

このように、平面人は3次元空間の中を 移動する際の連続的な断面図として2次元 空間を「観る」ことができる。ドーナツ面 の切り口が変化する様子を眺めると、

- ・切り口の様子が変わる場所は有限個(この 場合は4個)しかない
- ・この有限個の場所以外では切り口形は変化しない

というようなことがわかる。

(3)3次元空間を観る

平面人が2次元空間を「観た」方法を参 考に、私たちが3次元空間を観る方法を考 える。



図5 3次元空間での現象

4次元空間に存在するある図形が、私たちの住んでいる3次元空間を通過していったと考えられる。

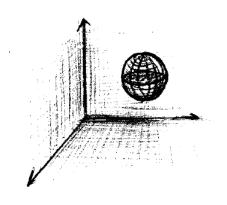


図6 4次元空間の図形が通過する

ある図形とはどんな図形なのだろうか。

図7において、左のボールから出ようとすると、右のボールに移動してしまう。また、右のボールから出ようとすると左のボールに移動してしまう。このように、2つのボールの世界から抜け出すことはできない。つまり、この2つのボールの表面がつながった図形が、4次元空間の中を動いていた。それを3次元空間で見ると、図5のような現象に見えるのである。

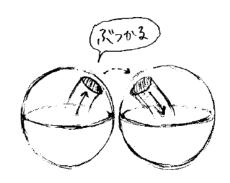


図7 2つのボールの表面がつながった図形

(4)平面国の冒険①

AさんとBさんは平面国に住んでいる。

①Aさんは、図8の×地点から赤い糸を 延々と引っ張って西へ進んだ。

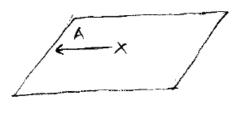


図8 Aさんの移動

②Aさんは東から×地点へ戻ってきた。そこでBさんは、×地点から黄色の糸を延々と引っ張って南に進んだ。

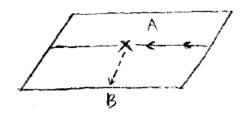


図9 Bさんの移動

③Bさんは北から×地点へ戻ってきた。しかし、BさんはAさんの張った赤い糸を途中で横切ることはなかった。

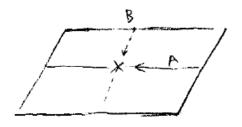


図 10 A さんとB さんは交差しない

平面国が球面であったと仮定して、同様に、×地点からAさんは赤い糸を、Bさんは黄色い糸を引いて別々の方向に進み、一周してまた×地点に戻ってくる場合を考えよう。しかし、2つの糸が必ず交わることになる。したがって、平面国は球面ではない。

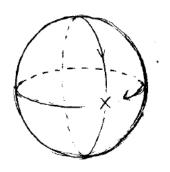


図 11 平面国が球面だと仮定した場合

(5)平面国の冒険②

平面国に、遠くまでよく見える性能の良い望遠鏡があったとする。図 12 の×地点から、互いに反対方向に同じ星Aが見えた。他の方向に星Aは見えなかった。

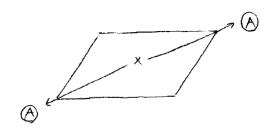


図12 平面国で星Aを観察する

平面国がドーナツ面であったと仮定して、同様に、×地点から互いに反対方向に同じ星Aが見えた場合を考えよう。この場合は、図13のように、反対方向にも同じ星を観察することができる。

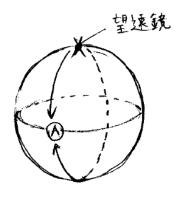


図13 平面国が球面だと仮定した場合

(6)平面国の冒険③

平面国がドーナツ面であったと仮定しよう。図 14 のように、たくさんの方向に星A を見ることができるようになってしまうだろう。

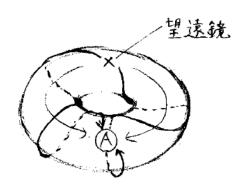


図 14 平面国がドーナツ面だと仮定した場合

平面国の人には図 **15** のように見えると 考えられる。

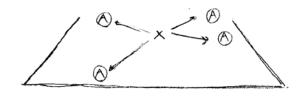


図 15 平面国の人からの見え方

望遠鏡の性能が良くなる程、星Aは様々な方向にたくさん見えるようになる。

現在、このような考え方をもっと発展させて、宇宙の形を数学的に探ろうという研究が行われている。

3. 感想

今回この講座を受講して、宇宙を普段は あまり考えることのない「空間」という視 点から考えることができた。2次元空間を 3次元空間から観るという発想は、考えた こともなかったので新鮮に感じた。 宇宙の形を考えるなかで、数学の力も必要だということが分かった。実際に人工衛星などで観察するだけでなく、様々な角度から仮説を立てて考えることも大切だと思った。

NSL講座(4日目)参加レポート

3年A組 細井 映美

1. 概要

2009 年 12 月 21 日(月)、NSL 講座「宇宙への誘い」(講師: 奈良女子大学理学部物理科学科教授 山内 茂雄先生)に参加し、宇宙物理学について学んだので、以下に報告する。

キーワード 宇宙物理学、電磁波、X線

2. 講義内容

■宇宙の観測

- ・宇宙そのものや、成り立ちを調べる(宇宙の遠くを観測すると昔の宇宙がわかる)。
- ・宇宙全体を大きな実験室のようにとらえ て、高密度、超高温など、極限状態にお ける自然法則の研究をする。

■宇宙物理学の研究

宇宙天体の発した電磁波を観測する。電磁波は波長の長いものから、電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線と呼ばれている。

※電磁波の周波数と波長の関係

(光の波長)×(振動数)=(光の進む速さ)

※電磁波のエネルギー

(光のエネルギー)

=(プランク定数)×(振動数)

この関係からわかるように、波長の短い 電磁波ほど大きなエネルギーを持っている。

■宇宙物理学の特徴

・研究対象に直接働きかけて反応を調べる ことができない。ゆえに、電磁波を用い る

・宇宙で起こる現象は人類の一生よりもずっと長いので、人間は現象の一部しか見られない

■地球大気による電磁波の吸収

- ・紫外線、X線、ガンマ線は大気によって 吸収されるので、人工飛翔体を利用して、 上空まで観測装置を運ぶ必要がある。
 - ・大気圏外では大気のゆらぎがなく、観測しやすい。
 - ・例えば、ハッブル宇宙望遠鏡やあすか衛 星がこれに相当する。

■様々な波長での観測

- ・ X線…数千万度の熱い
- ・可視光線…恒星からの光
- ・電波…冷たい世界、星の材料となる星間 ガス

■X線で見える世界

- ・銀河団にある高温ガス
- ・ブラックホール
- ※ X線は、超高温でダイナミックな激動の 宇宙を観測する最良の手段である。

■星の誕生と進化

超新星残骸・中性子星・ブラックホール

- ・赤色巨星の段階では、星から宇宙空間へ 緩やかなガスの流出がある。
- ・超新星爆発は、太陽の8倍以上の質量の 恒星が最期に起こす。
- ・星の内部の核融合反応によって作られた 重元素は、超新星爆発で宇宙空間へ配給 される。こうして宇宙空間に戻ったガス から新しい星が生まれる。
- ・元素は星の進化の中で進化するので、私 たち人間は星くずでできているともいえ る。
- ・星の一生は生まれたときに質量で決まっている。

大質量星: 青白くて明るい。寿命は短い。 小質量星: 赤くて暗い。寿命は長い。

■ブラックホール

ブラックホールはX線によって観測できる。これは、ブラックホールに飲み込まれる直前の物質がX線を出すためである。

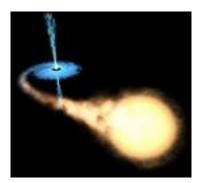


図1 ブラックホール

■銀河

銀河とは、星、星団の集合のことである。 ガスやちりも含まれる。

- ・渦巻銀河、楕円銀河がある。我々の銀河 系は渦巻銀河である。
- ・銀河の中心には巨大ブラックホールがある。



図2 銀河

■銀河群・銀河団

銀河の集合を「銀河群」または「銀河団」という。

- ・銀河群:数個から数十の銀河の集まり。
- ・銀河団:50 個以上の銀河の集まり。
- ・銀河群、銀河団には、銀河のほかに数千 万度の温度のガスが存在している。
- ・銀河群、銀河団の集合を「超銀河団」といい、宇宙の大規模構造をつくっている。

3. NSL 講座に参加した感想

宇宙には以前から興味を持っていたが、 今回の NSL 講座に参加してさらに関心を 持った。今まで知らなかった、宇宙からや ってくる電磁波を利用して、そこで起こっ ている現象を観察するという「宇宙物理学」 という学問を知ることができたのはよかっ た。

また、宇宙の遠いところを観察することで、昔の宇宙の姿が分かるというのはとても不思議なことである。私たちの体を構成する元素、この世にあるすべての元素が、星の爆発時(超新星爆発)に出来たものであることを知って、人間と宇宙との密接な関わり合いがわかった。とにかく、宇宙はとてつもなく巨大で謎だらけであることが、興味深かった。

NSL講座(5日目)参加レポート

3年A組 野依 莞奈

1. 概要

2009 年 12 月 19 日、NSL 講座「宇宙の観測方法」(講師:国立天文台ハワイ観測所準教授 林左絵子先生)に参加し、天文台や様々な宇宙の観測手段について学んだので、以下に報告する。

キーワード 天文台、世界天文年、望遠鏡、衛星

2. 講義内容

(1) 分光観測とは

光の成分を分けて調べることを「分光 観測」という。分光観測により、以下の情 報を得ることができる。

- ・波長ごとのエネルギー配分
- 成分分析
- ・温度や密度の情報
- ・もとの物質の運動の情報

星に隕石をぶつけ、飛び散った物質を分 光観測で調べてみると、表面と内部では成 分が違うことがわかる。星の色によって温 度が違うのもこれによる。

(2) 天体の表面温度

水が液体として存在できるのは意外と狭い範囲であり、地球と月のみである。

表1 天体の表面温度

太陽	5500°C	月	50°C
水星	260°C	火星	-23°C
金星	-33°C	木星	-150°C
地球	20°C	冥王星	-220°C

(3)実験室のデータ比較で宇宙を知る

実験室において、宇宙を知る方法があ

る。以下にその手順を示す。

- ①宇宙で起きているかもしれない化学反応を実験室で試す。
- ②できた物質を分光する。
- ③そのときに見えたスペクトル(光を分 光器で波長順に分解したもの)を比較 する.
- ④同じ波長の所にスペクトル線があった。 おそらく、そこにその化学物質がある。 つまり、星間物質の成分分析が実験室 でできるということ。

(4) ガリレオによる発見

イタリアの科学者ガリレオ・ガリレイが 初めて望遠鏡で夜空を観測してから 400 年 の節目の年として、国際天文学連合が 2009 年を世界天文年(International Year of Astronomy: 略称 IYA)と定めた。

ガリレオは、以下のような天文学上の事 実を観察により確認した。

- 月にクレーターがある
- ・金星は月のように満ち欠けする
- ・木星には衛星があり、周回している
- ・天の川は光の帯ではなく、たくさんの 星の集まりである
- ・太陽には黒点があり、日に日に移動し

ている。つまり、太陽は自転している。

(5) 宇宙観測の様々な手段

宇宙観測の方法として、次のものが知られている。

①電磁波(普通は受けるだけ)

※図1において、上へ行くほど周波数は高く(波長は短く)、下へ行くほど周波数は低く(波長は高く)なる。

ガンマ線、X線は地上に到達しないので 宇宙望遠鏡を使用して観測する。この他、 紫外線、可視光線、赤外線、電波(長波長、 短波長)などで観測する。受けるだけではな いものの例外として、リモートセンシング があげられる。

②宇宙線

高エネルギーの粒子検出や、大気中の分子や原子などとの相互作用による放射光・可視光望遠鏡によって観測する。

- ③重力波
- ④現地で資料分析・採掘を行う (ただし、太陽系内天体でのみ可能である)
- ⑤飛来物の収集・分析 隕石などを分析することがこれにあたる。

(6) 宇宙観測の手段-日本の場合-

①電磁波

X線天文衛星「すざく」、太陽観測用衛星「ひので」、赤外線天文衛星「あかり」、電波天文衛星「はるか」などの衛星がある。

また、口径 2m の国内最大望遠鏡「なゆた」(兵庫県立西はりま天文台公園)、口径 8.2m の大型光学赤外線「すばる」(国立天文台ハワイ観測所)、「188cm 反射望遠鏡」(岡山天文物理観測所)、光学赤外線望遠鏡

「かなた」(広島大学)、ミリ波を観測できる電波望遠鏡としては世界最大の口径を持つ「45m電波望遠鏡」(国立天文台野辺山宇宙電波観測所)、「なんてん」(なんてん電波天文台)などの望遠鏡がある。

その他、リモートセンシングも観測に用いられる。

②宇宙線

- ・太陽中性子線を世界各地の高地で観測する
- ・大気中の分子・原子などとの相互作用に よる放射光や可視光線望遠鏡を用いて 観測する
- ・例えば、「カミオカンデ」はニュートリ ノと水の相互作用による放射光を光電 子増倍管で受光して観測する
- ・他にも、「ASHRA(全天高性度素粒子望遠鏡)」による観測方法もある。
- ・「高エネルギー研究所(LHC)」では特殊 な粒子を作り出している

③重力波

- ・TAMA300(国立天文台三鷹キャンパス) で観測されている
- ④現地で資料分析・採掘を行う
 - ・小惑星探査機「はやぶさ」は小惑星イトカワに着陸、シャベルで資料を採掘 し、現在地球へ向かって帰還中である。
 - ・月周回衛星「かぐや」は月の情報収集 をもとに、精密な月面図製作をした後、 最終的に月に落下した。
- ⑤飛来物の収集・分析
 - ・隕石や雪玉などを調べることにより、 分析可能になる。

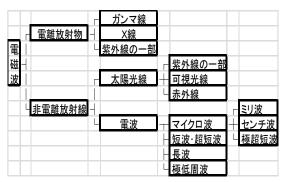


図1 電磁波の分類

3. NSL 講座に参加した感想

宇宙といえば、分からない事だらけなイメージだったが、自分が思っていた以上に分かっていることも沢山あることを知った。しかし、まだまだわからないことも多く、今後解明それらがされていくのを楽しみに思う。様々な観測手段を知ることができたのが、自分にとって一番よかったことだと思う。また、日本も世界に負けず劣らずの観測所を、国内だけに限らず世界各地に持っていることに驚いた。

ただ漠然と空を見上げるだけでなく、今回学んだ事柄を思い返しながら夜空を見たり、そういったニュースについて考えたりしていきたいと思う。

「韓国 ISSS」参加報告

4年A組吉川啓明4年B組小山諒子4年B組山本奈都美4年C組井上なずな4年C組大橋美紗希4年C組中西夏輝指導教諭櫻井昭指導教諭藤野智美

1. 要約

2009 年 8 月 24 日(月)~28 日(金)にわたり、韓国の忠南科学高校の生徒と、韓国の臨海実習所において、相互の研究成果の発表会および共同実習を行った。英語をコミュニケーションツールとし、共同実習での相互理解はもちろん、研究発表(口頭発表とポスター発表)も英語で行った。

また、忠南科学高校との交流だけでなく、公州大学の先生の特別講義を受講したり、先生のご自宅にホームステイさせていただいたりした。他にも、国立扶余博物館や国立中央科学館を見学した。これらを通して、韓国と日本の歴史的関係や、現代の韓国の発展の様子など、現地に行ったからこそ感じ取ることのできる貴重な体験ができた。

■目的

他国の同年代の生徒と共に、一つの課題に取り組むことにより、コミュニケーション能力と思考力を養う。また、他国の文化を知ることにより、グローバルな見識を身に付ける。

ISSS

International Salon of Super Science Student の略

- ・海外先進校に出向き、議論や共同研究を行なう
- ・海外先進校で生徒の研究指導を行っている教師へのインタビュー等により、「発見する力」を伸ばす指導方法を探る。

■研究場所

研究交流: 忠南科学高校(韓国・公州)

研修:公州大学(韓国・公州)

国立扶余博物館(韓国·公州) 国立中央科学館(韓国·大田)

景徳宮(韓国・ソウル)

キーワード 国際交流、コミュニケーション、プレゼンテーション、グローバル

2. スケジュール

- 1 日目【移動・研究交流 I 】
 - 9:30 集合

(関西国際空港4階 南団体受付付近)

11:30 関西国際空港 発

<OZ1115 便(アシアナ空港)>

昼食:機内食

13:20 金浦空港 着 金浦空港 発 <専用車>

- 17:00 忠南臨海修練院 着
- 17:30 夕食
- 19:00 研究発表会

(忠南科学高校からの発表)

- · Find Cancer Cells
- ・Save Our Silver by Neo Technology (本校からの発表)
- 学校紹介(井上)
- ・生物班の発表

ブレファリズマの膜形成(井上) 鰹節菌の培養方法(中西) 納豆菌による水質浄化作用(吉川)

・地学班の発表

発光源の温度変化と回折格子

(小山、大橋、山本)

- 21:30 翌日の打ち合わせ
- 22:00 自由時間
- 23:00 就寝
- 2 日目【研究交流 II·Home Stay】
 - 6:30 起床
 - 7:00 朝食
 - 9:00 干潟体験

- ① 干潟の生物についての講義
- ② 干潟での実習
- 15:00 部屋の掃除、荷物整理
- 16:00 忠南臨海修練院 発<専用車>
- 17:00 公州大学 着 公州大学関係者との交流会
- 17:30 公州大学 発各自ホームステイ先へ移動ホームステイ宅にて夕食、入浴
- 23:00 就寝
- ■3日目【Home Stav·特別講義】
 - 6:30 起床
 - 7:00 朝食
 - 9:00 公州大学 着

<生徒>

- ・特別講義1(韓国と百済の歴史)
- ·特別講義2(先端科学·技術)

<引率教師>

- 公立中学校見学
- · 教員交流会
- 12:00 昼食
- 13:00 公州大学 発 <専用車>
- 14:00 忠南科学高校 着
 - 学校訪問(施設見学)
- 15:00 忠南科学高校 発 <専用車>
- 15:30 自然史博物館見学
- 16:30 博物館 発 <専用車>
- 17:30 ホテル (大田) 着 チェックイン、荷物整理
- 18:00 ロビー集合、夕食
- 19:30 反省会、翌日の打ち合わせ

21:00 解散、自由時間 23:00 就寝

■ 4 日目<科学館見学・移動>

7:00 起床

7:30 ロビー集合、朝食 荷物整理、チェックアウト

8:50 ホテル 発 <専用車>

9:30 国立扶余博物館 見学

11:30 博物館 発 <専用車>

12:00 昼食

13:00 国立中央科学館 着

・現地案内人による展示物の説明

・宇宙体験館の自由見学

16:00 科学館 発 <専用車>

18:00 ホテル (ソウル) 着チェックイン、荷物整理

18:20 ロビー集合、夕食

21:00 反省会、明日の打ち合わせ

22:00 解散、自由時間

23:00 就寝

■ 5 日目<景徳宮見学・移動>

6:30 起床

7:00 ロビー集合、朝食 荷物整理、チェックアウト

8:15 ホテル 発 <専用車>

9:00 昌徳宮 見学

10:30 昌徳宮 発 <専用車>

12:00 仁川国際空港 着 出国手続き、昼食

14:00 仁川国際空港 発

<OZ1114 便(アシアナ航空)>

15:50 関西国際空港 着

16:30 解散

3. 研修報告

■ 1 日目(8月24日)報告

関西国際空港を離陸し、一時間半ほどかけて韓国の金浦空港に到着した。その後、ガイドの朴さんと合流し、バスに乗り込む。バスから見た韓国の町並みは日本の町並みと似ているような気がした。長時間のバス移動の後、忠南科学高校の臨海修練院に到着した。到着したのが夕方だったのですぐ夕食を食べた。大量のキムチを除いては、日本で普通に食べるような料理で特に違和感のあるものではなかった。

その後、研究発表会が行われた。忠南科 学高校側の発表、本校側の発表、それぞれ 2本ずつが行われ忠南科学高校の発表が先 だった。忠南科学高校の発表内容はとても 進んだことをしていて、正直にすごいと思 った。日本の高校レベルではできないよう に思えることをしていて、韓国が科学技術 やその教育に力を入れていることがよくわ かった。また、実験器具も確かにすごいが、 個人の能力もとても高いと感じた。

その後、我々も発表を行った。研修に行った生物班と地学班がそれぞれ一つずつ発表を行い、地学班が複数で一つのテーマについて発表したのに対し、生物班は3つのテーマについて、3人がそれぞれ発表した。結果的に言うと、こちらの発表の内容を理解してもらえたかは分からない。しかし、発表をしているときに、忠南科学高校の学生さんたちがうなずいていたり、リアクションをとってくれていたところを見ると、こちらの発表の内容はわかってもらえたのだろう。しかし、発表の内容ではやはり忠南科学高校側の発表の方がレベルが高かったように思う。しかしプレゼンテーション

の方法やわかりやすさでは我々の方が勝っ ていたように思う。忠南科学高校側の発表 は、用いたスライドに文字がいっぱいで読 みにくく、また発表も若干棒読みだったよ うに考えられる。対して我々のスライドは 極力文字を少なくし、図などを大きくし、 伝えたい単語を強調するように作っていた。 このような方式は韓国ではあまり見られな いらしく、韓国の先生方は「まったく新し い発表の仕方だ」とおっしゃっていた。つ まり発表を助けるというスライドショーの 役割を果たせていた我々の発表の方が相手 に発表を聴かせるという点において優れて いたように思う。だが、いくらうまくプレ ゼンテーションができたとして発表する内 容がお粗末では意味がない。忠南科学高校 並みにとはいかなくても自分たちができる 範囲で工夫して研究を進めていき、周りに 提示できるものにしてから発表することが 我々に課せられた課題であると感じた。



図1 研究発表の様子

■ 2 日目 (8月25日)報告

この日の主な行事は干潟体験であった。 まず干潟にいる生物についてなどの講義を 忠南科学高校の学生さんとともに受け、そ の後バスで干潟に向かった。干潟では班に 分かれ、我々は一人ずつ忠南科学高校の班 に入り実習を行った。

干潟ではカニ、タカラガイの仲間、ハゼの仲間、二枚貝などが多数確認できた。日本の干潟に入ったことがあるわけではないが、日本の干潟にいる生物と特に大きな違いがあるとは思わなかった。



図2 干潟体験の様子

その後、忠南科学高校の学生さんと別れて、バスで公州大学に向かった。そこで簡単な挨拶の後、二人一組になりホームステイ先のお宅に向かった。ホームステイ先のお宅はとても大きいマンションで周りも大きなマンションがたくさんあった。韓国は日本に比べて地震が少ないので大きな建物が建てられるらしい。ホームステイ先で食べたご飯は、伝統的な韓国料理だった。日本で毎日和食を食べないように、韓国でもそのような料理は食べないらしい。



図3 ホームステイ先の食事

その後、ホームステイ先の方たちと、団 地の周りを散歩した。町並みは日本によく 似ていたが、韓国ではキリスト教信者が多 いらしく、キリスト教の教会がよく目に入 った。また、10時くらいになっても子供が たくさん遊んでいたのを疑問に思い、ホー ムステイ先の方に訪ねたところ韓国の学校 は9時くらいまであるといい、とても驚い た。

■ 3 日目 (8月26日)報告

ホームステイ先の方にお礼を言い、公州 大学に向かった。公州大学では韓国と百済 の歴史、先端科学技術についての講義を受 けた。一つ目の講義では、韓国の衣食住は 大陸文化と海洋文化が合わさってできてい るということを習った。例えば、韓国の味 噌は大陸の発酵という技術と、海洋の塩漬 けという技術が合わさってできている。伝 統衣装のパジチョゴリ、オンドル部屋も同 じように大陸文化と海洋文化の融合によっ てできているらしい。とても興味深かった。 二つ目の講義は、家の至るところを自動制 御し、様々なことを機械にやらせるという 技術の話であった。講師の先生は実験のた めに、自分の家に様々な機械を設置してい るらしい。雨を感知し、スプリンクラーを

止める、湿度や気温を感知し換気を行うなどの技術を試しているらしい。実用化されたら便利だとは思ったが、停電になった場合など課題も多いのだろうと思った。



図4 講義の様子

その後、公州大学の教授やホームステイ 先の方などと食事をし、忠南科学高校を視 察しに行った。韓国でも屈指のエリート高 校だからなのかも知れないが、設備が日本 の学校と桁違いで天体望遠鏡やその他の器 具が豪華だった。学校自体はそこまできれ いな校舎ではないのだが、においてある設 備はすごいものだった。このあたりのお金 の使い方に韓国の科学教育に対する考え方 が垣間見えた。さらに生徒の研究について のポスターが校舎のあちこちにはってあり、 これは他の人に自分の研究を見てもらうこ とでアドバイスをもらったりできるので、 とてもいいことだと思う。このあたりでも 学校全体で生徒の研究をサポートしている ことがわかった。



図5 忠南科学高校の天体観測用設備

またその後、自然史博物館に行った。展示の方法が日本とすこし異なっているところがあり、特におもしろかったのは昆虫標本の展示であった。日本の博物館だったら種類ごとに規則正しく昆虫を配置するところを、韓国の展示は一枚の絵のように工夫して配置しており、その分野に興味がない人でも楽しめるように工夫してあったのが独特で興味深かった。



図6 昆虫標本の展示

■ 4 日目 (8月27日)報告

この日は国立中央博物館を見学するのが メインだった。

まず、百済の古墳群、国立公州博物館な

どを見学した。遺跡の雰囲気は日本のものとよく似ており、相違点は出土品であった。 細かく金などをあしらったきらびやかな装飾品などが大量に見られ、韓国の方が技術も進んでいたのだと実感し、また韓国が日本に技術を教えていたというのも納得できた。

その後、国立中央科学館を見学した。日本の同じような施設と規模が格段に違い、体験して学習することを目的としていて楽しんで学ぶことができた。日本にも同じような施設をたくさん作ればいいと思った。ただ、文字がわからなかったことがもったいなかった。

見学の後はバスでソウルに移動し、南大 門市場などを散策した。あまり日本の市場 などには行かないが、活気に溢れていてキ ムチなどが売っていて韓国らしかった。

■ 5 日目 (8月 28 日)報告

この日は最終日でまず朝鮮王朝の王宮で ある昌徳宮の見学を行った。日本の歴史的 建造物とすこし異なっており、屋根、装飾 などが独特だった。



図7 昌徳宮

その後仁川国際空港に向かい、日本に帰

国した。

4. まとめと感想

今回私たちはこのプログラムに参加し、 様々な体験をすることができた。研究発表 には専門用語が多く、知識も必要となる。 互いの母国語ではない英語を使って、いか にわかりやすく研究内容を伝えられるかと いうことが重要だと感じ、その意欲を持っ て研修に参加した。

相手の研究内容を最低一つは理解して帰 りたいという目標を持って当日を迎えたが、 実際は忠南科学高校の生徒の発表内容は高 度な上、英語が聞き取れず内容がほとんど 把握できずに戸惑うこともあった。ここに 大きな言語の壁を感じずにはいられなかっ た。質問をしたくてもなかなか言いたいこ とが伝わらなかったり、逆に何かを質問さ れてもわからない、答えるための言葉が出 てこなかったりして歯がゆい思いをするこ ともあり、今回の経験では英語でプレゼン テーションを行うということの難しさを実 感した。そして言葉が伝わらない場合の発 表においては、スライドに入れる図が重要 な役割を果たすと考えた。そのため、プレ ゼンテーションを作る際には様々な工夫を し、見てわかりやすくなるように心掛けな がら準備を進めた。

もし次回このような機会があれば、専門 用語や知識を勉強しておくと大まかな内容 は掴めるようになるだろうと思った。また、 事前に発表内容のレジュメを作っておけば、 もっとお互いに内容を理解し合えると考え た。

しかし、今回は生徒同士の交流の時間が 極端に少なかったように感じる。研究につ いて意見を交換できる時間がほとんど取れなかったため、話し足りなさ、物足りなさも感じている。

研究だけでなく、自分から取り組むという積極性の必要性、英語でコミュニケーションをとることの難しさ、重要さを知った。しかし、発表することに楽しさを感じることもできた。また学校見学では、私たちの学校にはない設備や教室などを見て驚いたが、その違いが研究体制の違いにもつながっているのではないかと考えた。

今回のプログラムは、海外の同年代の学生がどのような研究を行っているかを知る良いきっかけになったと思う。他国の同年代の研究者と交流することで、刺激を受けることができ、自分の研究に対する見方が変わることもあった。そして同時に、次回へ向けての課題も見つかった。

はじめに、発表準備にかける時間の使い 方がポイントだと感じた。研究を行い、発 表するための内容をまとめ、プレゼンテー ションを作る。さらに発表の練習や手直し などをしていくと、時間はどれだけあって も足りない。そんな中で、どれ程自分の納 得いくものが作れるかが重要になってくる と実感した。

準備計画を立てたが、それができずに 徐々にずれていき、最後のあたりで詰まっ てしまって心の余裕がなくなることもあっ た。それは改善すべき大きな反省点、課題 となった。

また、伝えたいことを上手くまとめ、表 現する力も必要になる。それは経験を積み 重ねていくことで、効率よくできる方法を 学んでいけるのではないかと考えた。

そして何より、海外研修には語学力が必

要となり、発表準備とともにしっかりと英語の勉強をしておくことが重要である。言葉の壁に挫折して、話しかける・伝えるという積極性がなくなってしまうと後悔するし、非常に勿体ない。

しかし、逆にそれを自分で努力して克服することによって自信がつき、自然と積極性も出てくるのではないか。そして、積極性が生まれれば得られるものはたくさん増えるはずだと思った。

海外研修は、国内で発表・交流するよりはるかに大変なことだろう。しかし自分なりに目的を設定し、それをやり遂げることによって、大きな自信がつく。そして何より、楽しんで参加することができたなら、その経験は大きな意味を持つと思う。

今後このような機会があれば自分も積極 的に参加していきたい。そして、多くの人 がこのようなプログラムに参加して、研究 者としての視野を広げていければ素晴らし いと思う。

2009年度SSHサイエンス研究会 生徒研究論文集

2010年(平成22年) 3月1日 発行

国立大学法人 奈良女子大学附属中等教育学校 〒630-8305 奈良市東紀寺町1丁目60-1 TEL. 0742-26-2571 FAX 0742-20-3660 http://www.nara-wu.ac.jp/fuchuko/

