

SUPER SCIENCE HIGHSCHOOL SCIENCE LABORATORY

NARA WOMEN'S UNIVERSITY SECONDARY SCHOOL



2007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

2007 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

2007 年 11 月 22 日

2007 年度 SSH 生徒研究論文集

目次

あいさつ	p.
奈良女子大学附属中等教育学校のカリキュラム	p.
物理班	
3DCG を描くための方法の開発	p.
三点直角法による空間座標の取得とその応用	p.
自動追尾型買い物カートの開発	p.
レーザー装置の温度と波長の関係	p.
LED についての研究	p.
数学班	
結び目理論を通してみる DNA	p.
グラフ理論で最短路問題を考える	p.
生物班	
ブレファリズマの巨大化メカニズムの解明に向けて	p.
プロトプラスト(細胞融合)による新植物開発過程	p.
奈良公園の生態—シカの糞とシバの関係—	p.
「万能乳酸菌」誕生への過程と課題の発見	p.
光合成の第四過程は光なしで行えるか	p.
ウニの人工授精	p.
チョウの翅の模様の構成について	p.
シバ種子の発芽とシカ糞中のシバ種子の発芽	p.
化学班	
SSH 化学プログラム 参加レポート	p.
地学班	
太陽の光のスペクトルについて	p.

はじめに

本校では、2005年度より文部科学省からスーパーサイエンスハイスクール（SSH）の指定を受け、5年間の計画で研究開発を進めてきました。中高6年一貫教育校の特色をいかして、前期課程生（中学生）から理数に興味や関心のある生徒には、より知的好奇心を刺激するプログラムを用意し、数学的および科学的リテラシーの育成を目指してきました。また、将来伸びていく科学技術系人材の育成のために「サイエンス研究会」を創設し、生徒たちがサイエンスの魅力を体験しながら、自由に実験・研究を行えるような環境作りを行ってきました。これらの活動も本年度で3年目になります。この間、サイエンス研究会の生徒たちは、自分たちの疑問から出発し、自由な発想で研究を深めてきました。得られた成果を全国SSH生徒研究発表会や各種の学会で発表し、数々の輝かしい賞を受賞しました。このたび、これまでの研究成果をまとめ、本論文集を刊行しました。いずれの論文にも生徒たちの工夫と努力のあとが窺われます。

末筆になりましたが、SSH運営指導委員の先生方を始め、さまざまな面でご支援いただきました多くの皆様に心から感謝を申し上げますとともに、これからも生徒たちの活動を温かく見守り、ご指導くださいますようよろしく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 前川昌子
(生活環境学部教授)

平成19年度教育課程表

奈良女子大学附属中等教育学校

学年 時間	1年		2年		3年		4年		5年		6年	
	共通	共通	共通	共通	共通	共通	文系	理系	文系	理系	文系	理系
1	国語基礎 (4)	国語基礎 (4)	国語総合 (3)	国語総合(5)	現代文(2)	現代文(2)	現代文(2)	現代文(2)	現代文(2)	現代文(2)	現代文(2)	現代文(2)
2												
3												
4												
5	社会・地理 (3)	社会・歴史 (3)	現代社会 (2)	現代社会(2)	古典(2)	古典(2)	古典(2)	古典(2)	古典(2)	古典(2)	古典(2)	古典(2)
6												
7												
8												
9	基礎数学 I (4)	基礎数学 II (4)	現代史 (2)	現代史(2)	古典講読(1)	古典講読(1)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)
10												
11												
12												
13	探究数学(1)	探究数学(1)	代数・幾何 I (2)	代数・幾何 I(2)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	日本史B(3) 世界史B(3) 地理B(3) *(3)	世界史B(3) 政治・経済(3) △(0)or(3)	世界史B(3) 政治・経済(3) △(0)or(3)	世界史B(3) 政治・経済(3) △(0)or(3)	世界史B(3) 政治・経済(3) △(0)or(3)	世界史B(3) 政治・経済(3) △(0)or(3)	世界史B(3) 政治・経済(3) △(0)or(3)
14												
15												
16												
17	基礎理科 I (3) TA	基礎理科 II (4)	解析 I (3)	解析 I(3)	世界史B(3) 文化と社会(3) △(0)or(3)	世界史B(3) 文化と社会(3) △(0)or(3)	物理 I (3) 生物 I (3) *(3)	物理 I (3) 生物 I (3) *(3)	物理 I (3) 生物 I (3) *(3)	物理 I (3) 生物 I (3) *(3)	物理 I (3) 生物 I (3) *(3)	物理 I (3) 生物 I (3) *(3)
18												
19												
20												
21	音楽(2)	音楽(2)	自然探究 I 地球環境 (4)	自然探究 I(4)	自然探究 II ・物質とエネルギー ・生命科学 (4)	自然探究 II ・物質とエネルギー ・生命科学 (4)	総合数学 I (3) *(3)	総合数学 I (3) *(3)	代数・幾何 III(3)	代数・幾何 III(3)	代数・幾何 III(3)	代数・幾何 III(3)
22												
23												
24												
25	美術(2)	美術(2)	音楽(2) 美術(2) 生活デザイン(2) *(2)	音楽(2) 美術(2) 生活デザイン(2) *(2)	音楽 I (2) 美術 I (2) 生活デザイン I (2) 科学と技術(2) *(2)	音楽 I (2) 美術 I (2) 生活デザイン I (2) 科学と技術(2) *(2)	代数・幾何 III(3) 音楽 II (2) 美術 II (2) 生活デザイン II (2) △(0)or(2)or(3)	代数・幾何 III(3) 音楽 II (2) 美術 II (2) 生活デザイン II (2) △(0)or(2)or(3)	解析 III(3)	解析 III(3)	解析 III(3)	解析 III(3)
26												
27												
28												
29	工創基礎1 生活基礎1 (3)	工創基礎2 生活基礎2 (2)	技術総合 家庭総合 (2)	技術総合 家庭総合(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)	Reading(2) △(0)or(2)
30												
31												
32												
33	工創基礎1 生活基礎1 (3)	工創基礎2 生活基礎2 (2)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(2) (4講座一斉展開)	情報B(2) TA	情報B(2) TA	情報B(2) TA	情報B(2) TA	情報B(2) TA	情報B(2) TA	情報B(2) TA	情報B(2) TA
34												
35												
36												
37	Introductory English(S) (3)	Introductory English(S) (3)	Integrated English (2)	Integrated English (3)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)	体育(3) (4講座一斉展開)
38												
39												
40												
41	NET(1)	NET(1)	Integrated English(S)(1)	Integrated English(S)(1)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)
42												
43												
44												
45	Basic English(1)	Basic English(1)	Basic English(1)	NET(1)	NET(1)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)	生活科学(2)
46												
47												
48												
49	道徳(1)	道徳(1)	環境学(2)	世界学(2)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)	Topic Studies(3)
50												
51												
52												
53	HR(1)	HR(1)	NSL講座(1) △(0)or(1)	NSL講座(1) △(0)or(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)	Writing(0.5) NET(0.5) *(1)
54												
55												
56												
57	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)	道徳(0.5)
58												
59												
60												
短期集中 9月	総合学習 探求	総合学習 探求	アカデミック ガイダンス	アカデミック ガイダンス	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)	アカデミック ガイダンス SSHテーマ研究(1) △(0)or(1)

*選択必修: 標記の科目から必ず1科目を選択する △自由選択: 選択しなくてもよいし、選択するときはその単位数になるよう標記の科目から選択する

6年の数学科の科目については、半期毎に単位認定を行う(但し、「総合数学Ⅱ」を除く)

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

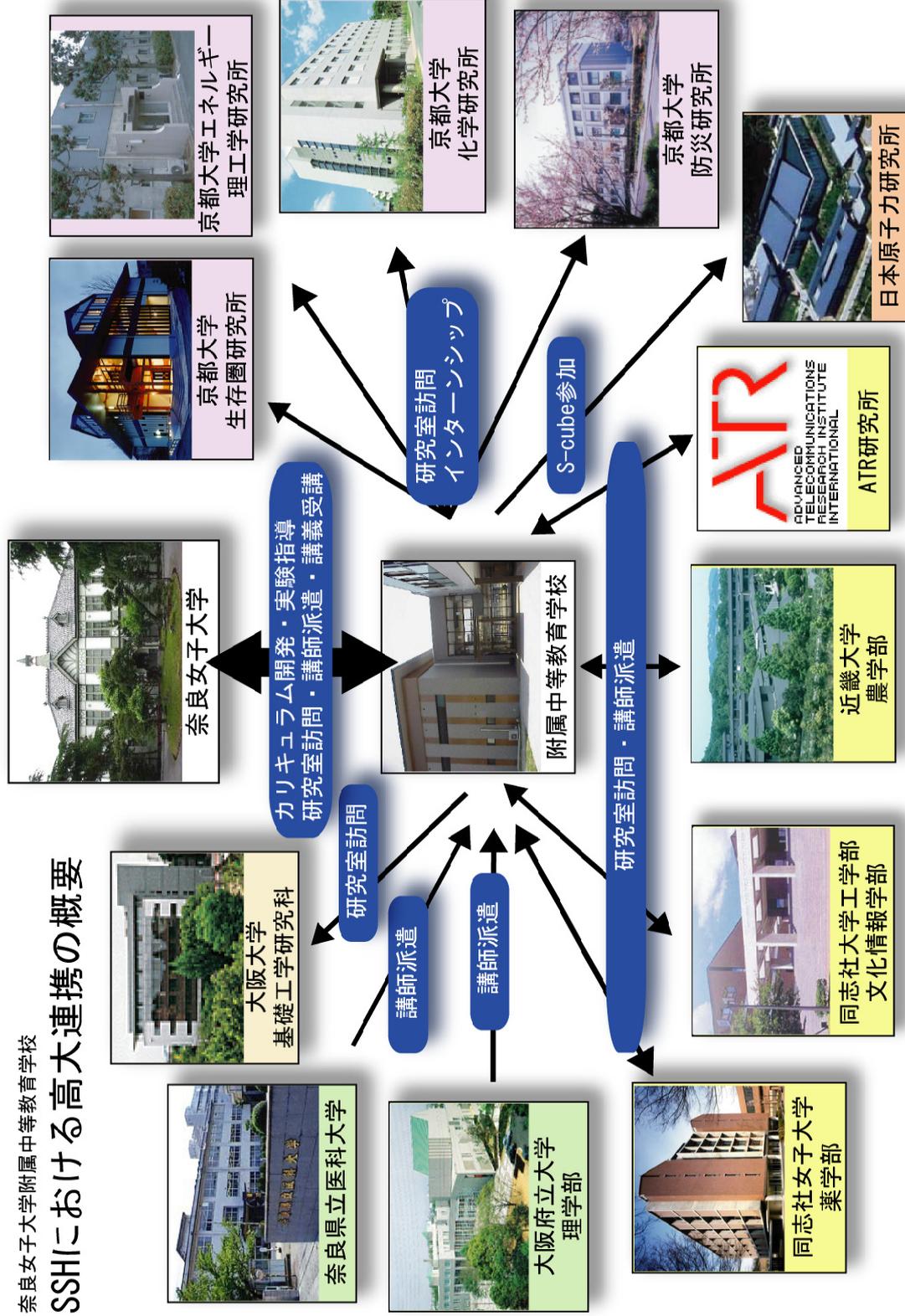
カテゴリー	1年	2年	3年	4年	5年	6年
授業	基礎・基本	「探究数学」 英語科20人授業 国語科「情報と表現」 創作科「情報基礎」	「環境学」 英語科「Integrated English」 国語科「表現」	「世界学」	「情報B」 英語科「Topic Studies」	
	数学的 リテラシー	作図ツールを活用した幾何学習 具体的操作活動 による幾何学習	グラフ電卓を活用した幾何学習			
	科学的 リテラシー	実験・観察技術の完全習得	理科「課題研究入門」		理科「課題研究」	
	問題解決能力	総合学習「探求」	「環境学」 「アカデミックガイダンス」 「NSL講座」	「世界学」		「数理科学」 「テーマ研究」
課外	基礎・基本		「サイエンス基礎講座」			
	数学的 リテラシー		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			
	科学的 リテラシー	「サイエンス夏の学校」	大学・研究所を訪問しての観察・実験			
	問題解決能力				「理数講義プログラム」 インターンシップ 本学の講義受講	

生徒全員が対象

「サイエンス研究会」・希望して選ばれた生徒が対象

奈良女子大学附属中等教育学校

SSHにおける高大連携の概要



3DCG を描くための方法の開発

6年A組 川口恭平

指導教諭 末谷健志

1. 要約

私は、3DCG (三次元コンピュータグラフィックス) を計算、描画するためのアルゴリズム、およびプログラムの研究を行い、既存の他アプリケーション、ライブラリ (DirectX, OpenGL 等) に依存せず 3DCG を描画することが出来るソフトの開発に成功した。

また、この成功により、3DCG 描画に関する基礎的な知識や技術を獲得でき、より高速、より高画質の 3DCG を描くための方法を考える足がかりを得ることが出来た。また、ヴァーチャルリアリティーの実現など、オリジナルの 3DCG 描画ソフトを応用したアプリケーションの開発が可能になった。

キーワード 3DCG、座標回転、透視図法、隠面処理、ワイヤーフレーム、レイトレーシング、Zバッファ

2. 研究の背景

今日、パソコンの普及と高速化によって、3DCG を利用したコンテンツが増え、Shade など、市販のアプリケーションを使えば誰でも手軽に 3DCG を楽しむことが出来るようになった。3DCG の描画は、今後さらに拡大する可能性をもった技術である。このような中、私は、より高速でより高画質な 3DCG を描くための方法を研究したいと考えた。

しかし、3DCG を描くための方法やその処理は、アプリケーションが自動で行うため、ユーザーにとってはブラックボックスになっている。かといって、3DCG 描画の方法を調査するだけで、実際にプログラムなどに生かすことができなければ、むなしい調べ学習に終わるだけである。

そこで私は、3DCG 描画の勉強もかねて、他アプリケーションやライブラリに頼らず 3DCG を描画することができるソフトを開発

することを試みた。

3. 目的

他アプリケーションやライブラリに頼らず 3DCG を描画することができるエンジンを開発する。搭載する描画手法は、次の 3 つとする。

- ① ワイヤーフレーム法 (図 1.1)
- ② レイトレーシング法 (図 1.2)
- ③ Zバッファ法 (図 1.3)

また、開発した描画エンジンの応用も検討する。

4. 研究内容

(1) 仮説

仮説 I

ワイヤーフレーム法で 3DCG を描画できる。

仮説 II

レイトレーシング法で 3DCG を描画できる。

仮説Ⅲ

Zバッファ法で3DCGを描画できる。

上記仮説を検証するソフトを開発する環境は以下の通りである

OS: Windows XP SP2

IDE: Microsoft Visual Basic 6.0

SP6 Enterprise Edition

(2) 研究の方法

研究Ⅰ ワイヤフレーム法

与えられた頂点座標を平行移動、座標回転、透視図法処理を行った後、各頂点を線分で結び、画面上に表示する。

研究Ⅱ レイトレーシング法

ベクトル方程式により直線(式 1.1)や球(式 1.2)を定義し、それらから交点の位置ベクトルまでの(相対)距離を導く式(式 1.3)を得る。この式から、交点距離の比較を画素ごとに行い、隠面処理を実現する。

研究Ⅲ 光の効果について

- ① 環境光(図 2.1)
- ② 局所拡散反射(図 2.2)
- ③ 局所鏡面反射(図 2.3)

の3種類の物理モデルをもとに、視点における光の見え方を計算し、3DCGとして表現する。また、視点や光源の位置などから、陰影になる条件(図 3.1~3.4)を導き、3DCGにおいてその結果を表示する。

研究Ⅳ Zバッファ法

まず描画の対象となる図形をポリゴン(多角形)で分割し、図形をポリゴンの集合として考える。座標回転や透視図法処理には

ポリゴンの頂点座標のみを考え、平面に投影後、多角形を塗りつぶす。塗りつぶす際に、Zバッファを用いて奥行きに関して比較を行い、隠面処理をおこなう。また、研究Ⅲにおいて実現した光の効果をZバッファ法においても実現し、画面上に表示する。

<隠面処理とは>

人が物体を見る際、奥にある物体は手前にある物体によって隠される。このことは現実ではあたりまえであるが3DCGとして計算する場合、奥にある物体の手前にある物体によって隠された面を描かないようにする処理が必要である。この処理のことを隠面処理といい3DCG描画において重要な処理のひとつである。

<Zバッファとは>

図形を平面に投影する際、その画像情報のメモリとは別に用意する、奥行きに関する一時メモリのこと。

(3) 研究の結果

研究Ⅰ ワイヤフレーム法によって次の画像(図 4.1, 図 4.2)を得た。

研究Ⅱ レイトレーシング法によって次の画像(図 5.1)を得た。

研究Ⅲ 反射光における結果として次の画像(①図 6.1、②図 6.2、③図 6.3、①+②+③図 6.4)を得た。また、陰影処理の結果として次の画像を得た。(6.5)

研究Ⅳ Zバッファ法によって次の画像(図 7.1)を得た。また、光の効果を考慮に

いた結果として次の画像(図 7.2)を得た。

以上の結果から、仮説Ⅰ,Ⅱ,Ⅲを実証することが出来た。

5. 考察

—研究Ⅰ—

実現がたやすく、処理が単純なので高速で、簡易的な3DCGとして様々なものに应用できそうである。しかし表現力に乏しく、位置や形状の正確な把握が難しく、フォトリアリスティックな利用には向いていない。出来るだけ高速な処理を必要とするシミュレーションや設計などでの利用が考えられる。

—研究Ⅱ—

結果の画像から、隠面処理が出来ているのがわかる。すべての画素ごとに距離を計算しているため、視点を近づけても得られる画像は荒くならないが、計算量が多く、描画に非常に時間がかかることが問題である。

—研究Ⅲ—

反射光における結果の画像から、光の効果によって物体表面の色が変化しているのがわかる。しかし利用した物理モデルは、厳密な解ではなく、あくまで近似であるため、多少の不自然さが画像にも見える。また、現実にある素材の見え方の再現をおこなうための各設定値(拡散反射係数など)を決定するのが難しい点などから、今回実現できた光の反射光の効果はあくまで擬似的なものであるといえる。このことから、より現実に近い光の反射光の表現、また、

映り込みや、屈折現象などの高度な光の効果の表現が課題として考えられる。

陰影処理の結果の画像からは、陰影処理によって物体に陰影がついたのが確認できる。現実の世界では影は境界がぼやけているが、それは光源が有限の大きさを持っているからであり、光源を点光源として計算したので今回の画像は影の境界がシャープになったと考えられる。このことから、次の研究では有限の大きさを持った光源についての影の出来方についての研究が考えられる。

—研究Ⅳ—

レイトレーシング法に比べると、処理そのものは複雑だが、画素毎ではなく図形毎に処理を行うので、比較的高速に処理が出来た。画質については、結果の画像(図 6.2)を見てもポリゴンに分割したことによる角ばりはあるものの、あまり差は無いようにみえるが、視点を図形に近づけた場合、ポリゴンの分割数が少ないと、角ばりが大きく出てしまう。また、透視図法処理は頂点座標のみに行われるので、面については透視図法処理による効果が考慮されず、ポリゴンの大きさが大きくなると、それが考慮されないことによるゆがみが増大するので、必要に応じてポリゴンによる図形の分割数を多くする必要があると考えられる。

光の効果を考えて描画した結果をみると、明らかに表面がゴツゴツしているのが分かる。これは、描画高速化のため、図形を多角形で分割したためであると考えられる。また、陰(自身による光の遮りによって生じる暗闇)の効果は出ているが、影(他の物体による光の遮りによって生じる暗

闇)の効果については反映されないことがわかる。以上のことから、レイトレーシング法と比較したとき、隠面処理についてはあまり差は出ないが、その後の光の効果を表現する処理について、大きく差が出るのが分かった。

—全体を通して—

今回実現できた3DCG描画方法の特徴を次の表(表1)のようにまとめることが出来る。これらの3DCG描画方法は表から読み取れる通り、他のものに秀でている部分と劣っている部分をもっている。たとえばレイトレーシングとZバッファの性能を比べると、レイトレーシングは光の効果の再現や画質でZバッファに勝るが、描画に非常に時間がかかるという欠点があり、Zバッファは高速に描画できるが、画質があまりよくないという欠点がある。もちろんZバッファも画質を高めることができ、Zバッファでは曲面をポリゴンで分割するため、描画した画像の曲面もカクカクしているが、分割せずなめらかな曲線が描画可能なことが分かっている。しかし、処理が複雑になるばかりか、その分処理が遅くなってしまい、画質だけならそれでもレイトレーシングが圧倒的に勝っているので、Zバッファのメリットがなくなってしまう。このことから分かるとおり、それぞれの3DCG描画方法は向き不向きがあり、用途に応じて、適切な3DCG描画方法を選ぶべきだということが分かる。

6 まとめと今後の課題

今回の研究において3種類の3DCG描画するためのアルゴリズム、およびプログラム

の研究を行い、既存の他アプリケーション、ライブラリ(DirectX, OpenGL等)に依存しない3DCG描画ソフトの開発に成功した。開発に成功し3DCG描画に関する基礎的な知識や技術を獲得できたことにより、より高速、より高画質の3DCGを描くための方法を考える足がかりを得ることが出来た。またオリジナルの3DCG描画ソフトを応用したアプリケーションの開発が可能になった。

今回実現できた3種類の3DCG描画アルゴリズムはどれも有名なものばかりで、無論自分自身で開発したものではない。これからの課題としては、これらの3DCG描画アルゴリズムの改良や新たな3DCG描画アルゴリズムの開発をしていくことが挙げられる。具体的な例としてはZバッファとレイトレーシングを組み合わせ、双方の利点を得られるような新たな3DCG描画アルゴリズムを現在開発中である。また、今回実現できたソフトの応用として、モーションキャプチャーと組み合わせることによるヴァーチャルリアリティーや、多次元シミュレーションの結果表示などを模索している。

7. 参考文献・サイト

<http://www.iamas.ac.jp/~tacwon/render.html#history>

8. 謝辞

今回の研究に協力して下さった末谷先生、河合先生、佐久間先生にこころよりお礼申し上げます。

□図、式、表□

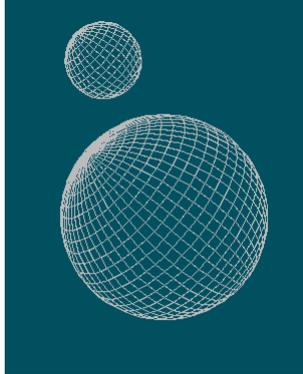


図 1.1

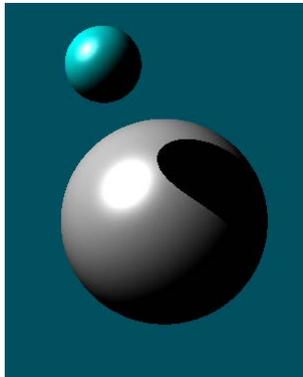


図 1.2

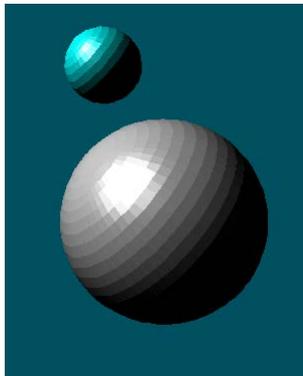


図 1.3

\vec{p} : 視線上の点の位置ベクトル
 \vec{e} : 視点からスクリーン上の一点までの方向ベクトル
 \vec{c} : 球の中心の位置ベクトル
 \vec{E}_0 : 視点の位置ベクトル

$$\vec{p} = \vec{e}t + \vec{E}_0$$

式 1.1

$$(\vec{p} - \vec{c}) \cdot (\vec{p} - \vec{c}) = r^2$$

式 1.2

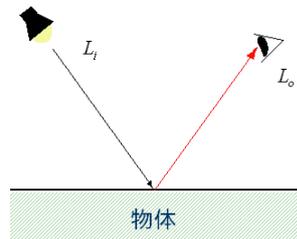
$$t = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \alpha\gamma}}{\alpha}$$

ただし
$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = |\vec{e}|^2 \\ \beta = \vec{e} \cdot (\vec{E}_0 - \vec{c}) \\ \gamma = |\vec{E}_0 - \vec{c}|^2 \end{array} \right\}$$

式 1.3

環境光反射の数理モデル

L_i : 入射する光の強さ
 L_o : 観測する光の強さ

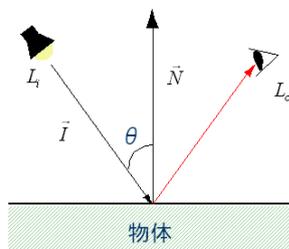


$$L_o = L_i$$

図 2.1

拡散反射の数理モデル

\vec{N} : 面の法線ベクトル
 \vec{I} : 光線ベクトル
 θ : \vec{I} と \vec{N} がなす角
 L_i : 入射する光の強さ
 L_o : 観測する光の強さ

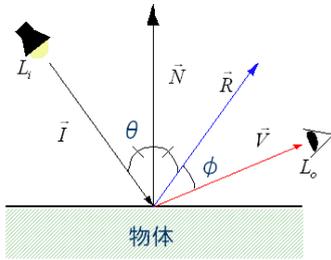


Lambert余弦則

$$L_o = (\vec{I} \cdot \vec{N})L_i = L_i \cos \theta$$
 (ただし \vec{I} と \vec{N} は共に単位ベクトル)

図 2.2

鏡面反射の数理モデル



\vec{N} : 面の法線ベクトル
 \vec{I} : 光線ベクトル
 \vec{R} : 反射ベクトル
 \vec{V} : 視線ベクトルの逆ベクトル
 L_i : 入射する光の強さ
 L_o : 観測する光の強さ

$$\vec{R} = 2(\vec{I} \cdot \vec{N})\vec{N} - \vec{I}$$

Phong鏡面反射

$$L_i = (\vec{R} \cdot \vec{V})^n L_o = L_o \cos^n \phi$$

(nはハイライトの特性を決める定数)

図 2.3

$$\pm \cos \theta \geq 0$$

$$\mp \cos \phi \geq 0$$

$$\therefore \cos \theta \cos \phi \leq 0$$

$$\Leftrightarrow (\vec{N} \cdot \vec{I})(\vec{N} \cdot \vec{V}) \leq 0$$

図 3.2

影になるパターン

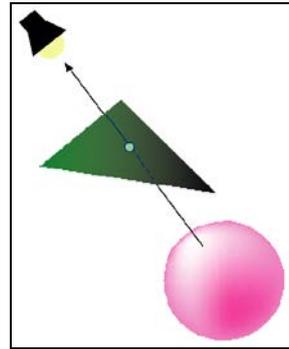
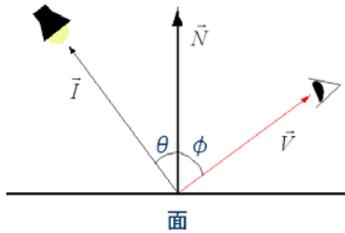


図 3.3

陰にならないパターン



$$\pm \cos \theta \geq 0$$

$$\pm \cos \phi \geq 0$$

$$\therefore \cos \theta \cos \phi \geq 0$$

$$\Leftrightarrow (\vec{N} \cdot \vec{I})(\vec{N} \cdot \vec{V}) \geq 0$$

図 3.1

影にならないパターン

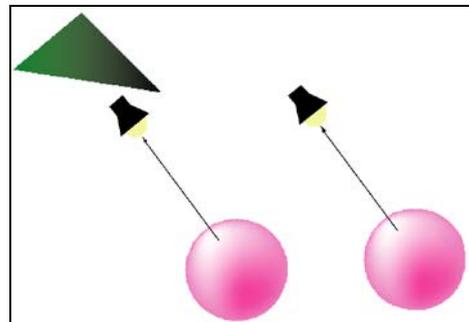


図 3.4

陰になるパターン

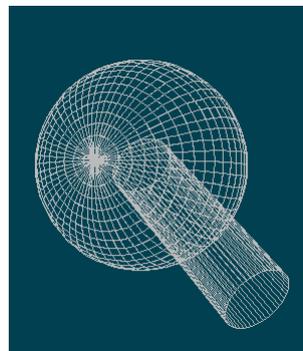
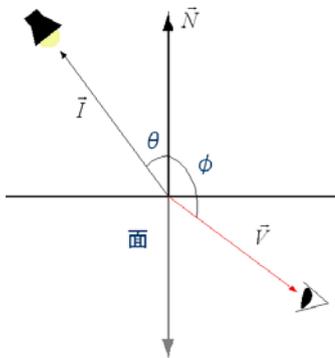


図 4.1

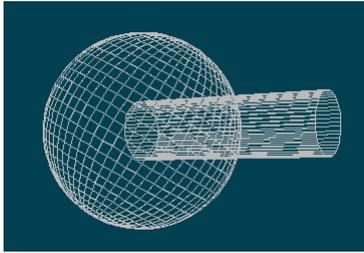


图 4.2

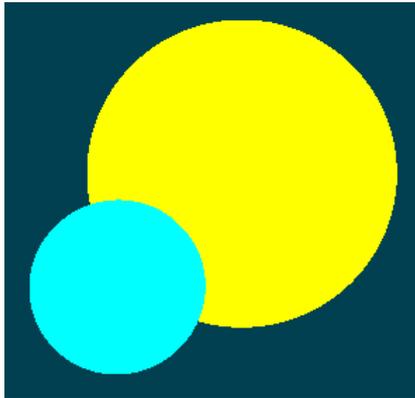


图 5.1

①周囲光

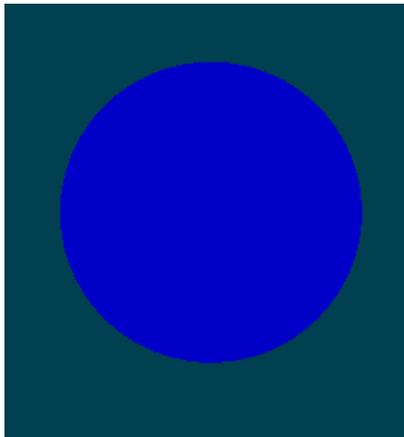


图 6.1

②局所拡散反射光

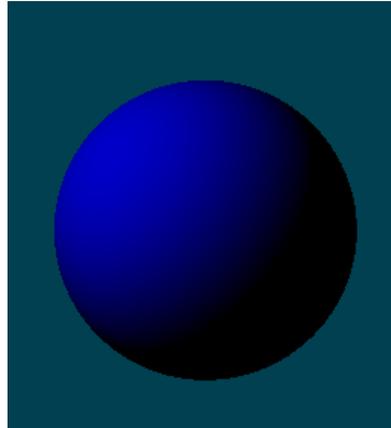


图 6.2

③局所鏡面反射光

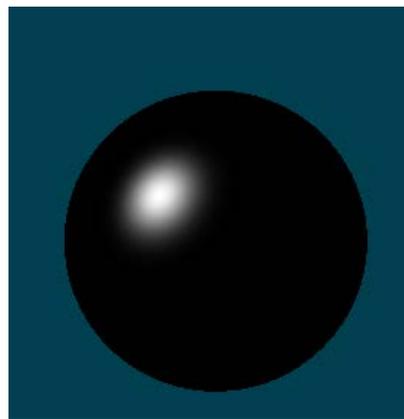


图 6.3

①②③統合

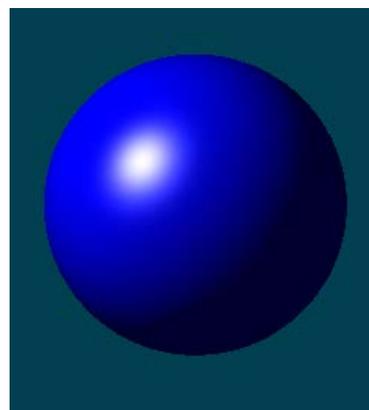


图 6.4

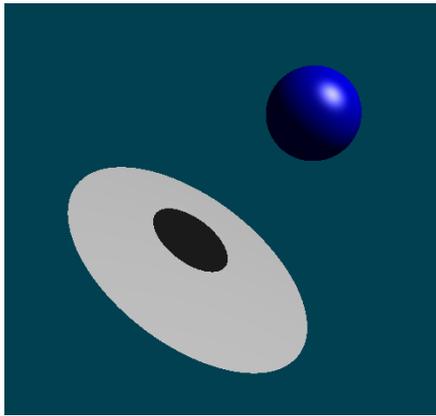


図 6.5

項目	ワイヤー フレーム	レイトレ ーシング	Zバッフ ァ
処理速度	◎	×	○
面の表現	×	○	△
光の効果	×	○	△
陰影の効果	×	○	△
モデリングのしや すさ	○	△	○

表 1

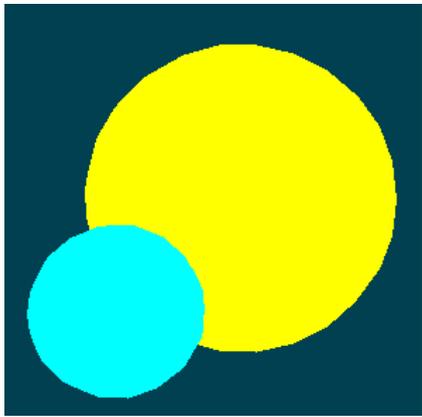


図 7.1

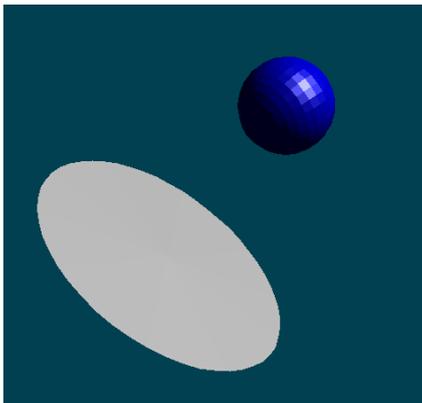


図 7.2

三点直角法による空間座標の取得とその応用

6年A組 川口 恭平

指導教諭 末谷 健志

1. 要約

特殊なマーカを使用することで、物体の空間座標をカメラ一台で正確に取得するアルゴリズム（これを三点直角法と名付けた）の開発に成功した。また、独自に構築した 3DCG の描画システムとあわせ、カメラにより得られた現実の映像にリアルタイムに 3DCG を合成するシステム（コンポジット 3D と名付けた）の構築に成功した。

キーワード モーションキャプチャ、YUV、3DCG、USB カメラ、透視投影

2. 研究の背景

近年、コンピュータの普及と高速化にはめざましいものがあり、一昔前までは処理能力的に不可能とされていたことも今では簡単に実現できるようになった。そこで、これまで高価な機材や設備を必要とした物体の座標取得—モーションキャプチャーが一般家庭にあるパソコンと安価な USB カメラを用いて実現できないかと考え、その研究に取り組むことにした。また、前回の研究において構築することができたオリジナルの 3DCG 描画システムとそのシステムをあわせることで、仮想的なヴァーチャルリアリティを実現できないかと考え、その研究に取り組んだ。

3. 目的

一般家庭にあるパソコンと安価な USB カメラを用いて、物体の正確な空間座標取得を実現するシステムを構築する。物体は大きさがああるので位置といっても一概には定められない。そこで物体のある点をその物体の位置の代表点として定め、その代表点の空間座標を取得する方法を考える。また、

そのシステムと 3DCG 描画システムを併用することで擬似的なヴァーチャルリアリティを実現する。

4. 研究の内容

(1) 仮説

仮説 I

三点直角法を用いてマーカの空間座標をリアルタイムに取得することができる。

仮説 II

仮説 I におけるシステムを用いて、実際の映像にリアルタイムに 3DCG を合成することができる。

なお上記仮説を検証するソフトを開発する環境は以下の通りである

OS : Windows XP SP2

IDE : Microsoft Visual Basic 6.0

(2) 研究の方法

研究 I

カメラで識別できる三つの点（以下、識別点）で直角二等辺三角形をつくった下記

のようなマーカを代表点につける。そして USB カメラでそのマーカを写し、その位置を三点直角法によって決定する。なお、識別点として今回は三つの異なった色の粘土を使い、YUV 形式に変換したカメラ映像から色の違いを利用してそのカメラ映像における座標を取得する。

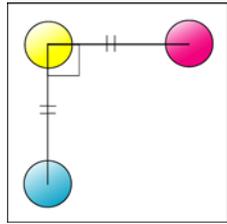


図 1

—三点直角法—

三点直角法とはカメラ映像が物体の空間座標を透視投影した結果として得られるものであると仮定し、カメラ映像上のマーカの位置情報から、物体の空間座標を算出する方法である。

なお、計算結果として得られる空間座標はカメラの位置を原点とし、カメラ映像の縦横、および奥行きを軸とした正規直交系の座標として得られる。

マーカ上の識別点の空間座標を

$$P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$$

とおくと、この三つの識別点が直角二等辺三角形をなすことから、

$$\begin{cases} \overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_1P_3} = 0 \\ \left| \overrightarrow{P_1P_2} \right| = L \\ \left| \overrightarrow{P_1P_3} \right| = L \end{cases}$$

(L は二等辺の長さ)

が成り立つ。

また、カメラ映像における、識別点の平面座標をそれぞれ $Q_1(x'_1, y'_1)$, $Q_2(x'_2, y'_2)$, $Q_3(x'_3, y'_3)$ とおくと、 $P \rightarrow Q$ は透視投影なので

$$Q_i = \frac{S}{z_i \tan \theta} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$$

($i=1,2,3$) S は映像の幅長 θ はカメラの画角

が成り立つ。

以上の式を未知変数 z_1, z_2, z_3 についての方程式として解くことで、マーカ上の識別点の空間座標 P_1, P_2, P_3 を決定する。実際に計算すると、次の方程式系を得る。

$$(p\gamma + 1)z_1^2 + \{(p\beta_2 + 1)z_2 + (p\beta_3 + 1)z_3\}z_1 + (p\delta + 1)z_2z_3 = 0$$

$$z_2 = \frac{(p\beta_2 + 1)z_1 \pm \sqrt{\{(p\beta_2 + 1)^2 - (p\alpha_2 + 1)(p\gamma + 1)\}z_1^2 + (p\alpha_2 + 1)L^2}}{p\alpha_2 + 1}$$

$$z_3 = \frac{(p\beta_3 + 1)z_1 \pm \sqrt{\{(p\beta_3 + 1)^2 - (p\alpha_3 + 1)(p\gamma + 1)\}z_1^2 + (p\alpha_3 + 1)L^2}}{p\alpha_3 + 1}$$

$$\begin{aligned} \beta_2 &= x'_1x'_2 + y'_1y'_2 & p &= \left(\frac{\tan \theta}{S} \right)^2 \\ \beta_3 &= x'_1x'_3 + y'_1y'_3 & \alpha_2 &= x'^2_2 + y'^2_2 \\ \gamma &= x'^2_1 + y'^2_1 & \alpha_3 &= x'^2_3 + y'^2_3 \\ \delta &= x'_2x'_3 + y'_2y'_3 \end{aligned}$$

この方程式系を z_1 について解くのだが、この方程式系を代数的に解くのは困難なので、解は二分法による近似解として計算する。

このとき、二分法の初期値として

$$z_m = 0,$$

$$z_M = \min\left(\sqrt{\frac{(p\alpha_2 + 1)}{(p\beta_2 + 1)^2 - (p\alpha_2 + 1)(p\gamma + 1)}}L, \sqrt{\frac{(p\alpha_3 + 1)}{(p\beta_3 + 1)^2 - (p\alpha_3 + 1)(p\gamma + 1)}}L\right)$$

を与えるのが適当である。なお、根号内が両方とも負になる場合、経験的にはあるが解が存在しないようである。

なお、解が2個以上である場合があるが、その判別は上記の式から行うことはできないので、実際の映像と比較し、現実適合するほうを選択する。

研究 II

三点直角法によって得られた座標を元に三次元座標の平行移動、回転を行い、その結果を 3DCG としてカメラ映像に上書きする形で合成する。この 3DCG を描くのに必要な描画エンジンは、独自に開発した。

なお、このときの座標変換の式は以下のとおりとする。

$$X' = \begin{pmatrix} \frac{\overrightarrow{P_1P_2}}{|\overrightarrow{P_1P_2}|} \cdot X \\ \frac{\overrightarrow{P_1P_3}}{|\overrightarrow{P_1P_3}|} \cdot X \\ \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}}{|\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3}|} \cdot X \end{pmatrix} + P_1$$

(3) 研究の結果

研究 I マーカの空間座標をリアルタイムに取得することができた。

研究 II カメラ映像のマーカの位置に 3DCG をリアルタイムに合成できた。

以上の結果より、仮説 I、II を実証することができた。

5. 考察

—研究 I—

三点直角法によりマーカ上の識別点の

正確な空間座標を取得することができた。また、単位を厳密に設定することで、空間座標の単位をメートル法など、現実に使っている空間距離の単位にすることができた。問題点としては、識別点の座標取得の精度がやや低かったため、算出した座標に多少のブレがあったことと、カメラの画素の限界やレンズのゆがみなどから、完全な透視投影モデルが実現されず、カメラからの距離が大きくなればなるほど、算出される空間座標の誤差が大きくなったことがある。また、三点直角法の解の判別に今回は識別点の見かけの大きさを用いたのだが、大きさの取得の精度が悪いためたびたび誤った解を選択していた。

—研究 II—

三点直角法によって算出された識別点の空間座標をもとに 3DCG をリアルタイムに合成することができた。また、光源の位置をうまく設定することでより現実味のある合成を可能にすることができた。問題点としては、三点直角法の処理と 3DCG 描画の処理を並行しておこなうため、全体として処理が重かったことが上げられる。また、マーカよりも手前に何か物体があっても、3DCG がその上に上書きされてしまうので、結果位置関係に矛盾が生じることがあった。

6. まとめと今後の課題

今回の研究で開発した三点直角法は、精度、処理速度ともに実用的であり、さまざまな分野に応用できることが確認された。今後は、その精度を向上させるために、識別点の座標取得精度の向上および最適解の

選択アルゴリズムの改良が考えられる。また、3DCG の処理をハードウェアに任せることによる処理速度向上が考えられる。三点直角法が高価な機器や高速なコンピュータを必要としない点から、インターネットショッピングなどでの模様替えのシミュレーションや、建物の建築後の景観をシミュレーションするなどの応用が考えられる。

7. 謝辞

今回の研究を通じて協力してくださった末谷先生にこころよりお礼申し上げます。

8. 資料

研究 I



図 2

	X	Y	Z
P1	0.5	-0.4	47.6
P2	-0.8	-1.9	43
P3	5.3	-0.6	46.2
誤差	4.7 E-2		



図 3

	X	Y	Z
P1	-1.2	-1.3	21.5
P2	-2.9	-2.5	17
P3	3.5	-1.8	19.9
誤差	4. E-2		

研究 II

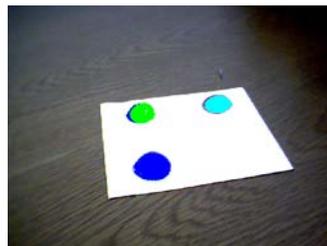


図 4

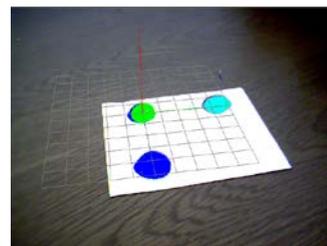


図 5

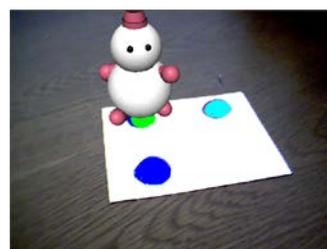


図 6

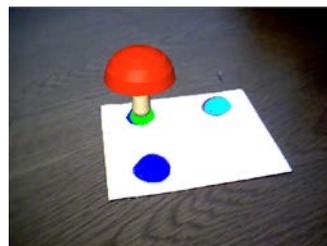


図 7

自動追尾型買い物カートの開発

6年A組 川口 恭平 5年B組 岡田 真太郎
5年B組 中島 研人 4年B組 西田 惇
4年C組 樋口 幸太郎 4年C組 前澤 俊哉
指導教諭 末谷 健志

1. 要約

私たちは、独自に開発したモーションキャプチャシステムとモーターコントローラを組み合わせて、特定のマーカを貼り付けた、人や車いすと一定の距離を保ちながら自動で追尾する買い物カートの製作に成功した。従来と異なり、この買い物カートはいちいち押す必要がなく、買い物中に常に両手が使えるというメリットがある。

キーワード モーションキャプチャ Web カメラ PIC DC モーター 買い物カート

2. 研究の背景

スーパーでカートを押しながら買い物をしているとき、カートの動作が非常に単純であることに気が付いた。買い物をしている自分の動きとカートとの動きは同じで、自分とカートの距離は常にうでの長さである。そこで、買い物客との距離を一定に保ちながら自動で追尾するカートを実現できたら、買い物の最中にいちいちカートを押す必要はないし、両手が常に使えて便利であろうと考えるようになった。これらのメリットは、特に、車いすを利用している人にとっては大きいだろうと推測された。

以前から私たちは、1台のカメラに映し出されたマーカを三次元座標を取得するモーションキャプチャシステムを研究するとともに、サーボモーターを利用したロボットの開発に取り組んできた。この自動追尾型買い物カートは、私たちが培ってきたハードウェアおよびソフトウェア技術を組

み合わせれば可能ではないかと思うようになり、研究を進めるようになった。

3. 研究の目的

事前に登録したマーカを人に貼り付け、そのマーカを自動で追尾する買い物カートを開発する。このカートは、機能毎に大まかに分けて次の3つの要素で構成される。

マーカの三次元座標を取得するモーションキャプチャシステム、三次元座標情報を解析してDCモーターを動かすパルス信号を生み出す制御システム、DCモーターの動きを車輪に伝えるなどする駆動システムである。

本レポートでは、それぞれの研究内容を報告したい。

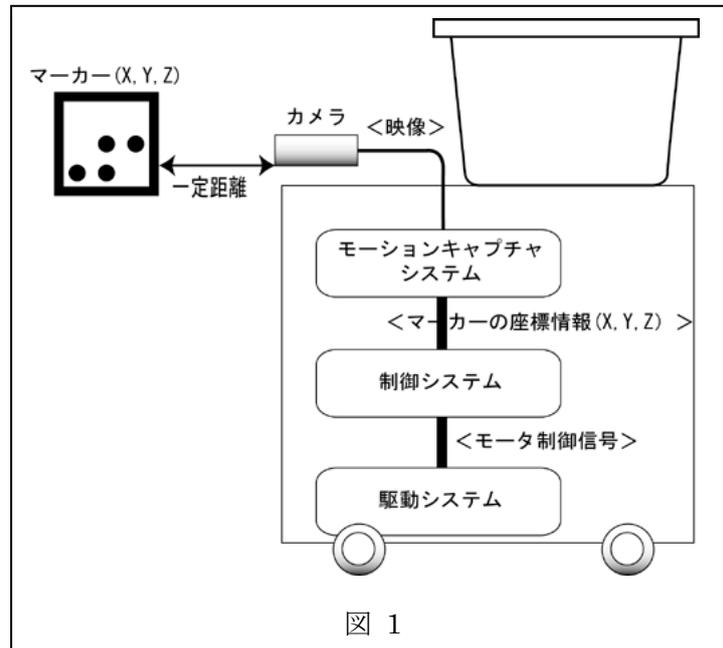


図 1

研究1 モーションキャプチャシステムの開発

特定のパターンをもったマーカ-の三次元座標を、精度よくリアルタイムに取得する。

研究2 制御システムの開発

(1) 制御ハードウェア・ソフトウェアの開発

モーターなど様々なデバイスを制御するハードウェアの開発と、マーカ-の三次元座標から必要な動作を判断し、そのハードウェアに指示を出すソフトウェアを開発する。

(2) 制御ロジックの開発

マーカ-を一定の距離を保って追尾する動作ロジックおよび、カメラの視野からマーカ-が外れたときに自動でマーカ-を探し出す動作ロジックをそれぞれ開発する。

研究3 駆動システムの開発

(1) モーターとギア

モーターの回転を車軸に伝えるギアな

どを検討し、製作する。

(2) 買い物かごを支える筐体を制作する。

システムを全て搭載し、荷物を置くことのできる筐体を検討し、製作する。

4. 研究方法

研究1 モーションキャプチャシステムの開発

C言語を用いて、1台のWebカメラに映し出された映像を元に、マーカ-の三次元座標を精度よく、リアルタイムに取得するシステムを開発する。

その方法として、私たちは、“三点直角法”および“パターン認識法”を組み合わせたものを採用した。これらの方法は、私たちが独自に開発したモーションキャプチャアルゴリズムである。

(1) 三点直角法

三点直角法とは、図のように、直角二等辺三角形を形作るように配置された三つのマーカ-を用いて、カメラから得られる見

③に関して

$$(X'1 * Z1 * K - X'0 * Z0 * K)(X'2 * Z2 * K - X'0 * Z0 * K) + (Y'1 * Z1 * K - Y'0 * Z0 * K)(Y'2 * Z2 * K - Y'0 * Z0 * K) + (Z1 - Z0)(Z2 - Z0) = 0$$

最後の3つの方程式をよく見ると、未知数は Z_0, Z_1, Z_2 の3つであるため、すべての未知数を求めることが論理的に可能である。さらに、これらの Z 値から、全てのマーカ-の正確な三次元座標を求めることができる。

実際の作業としては、カメラからの映像から得られる、各マーカ-の見かけ上の二次元座標をこれらの方程式に代入し、未知数を求めて、マーカ-の三次元座標を取得することになる。

方程式の解を求める方法としては、二分法を用いて近似解を得る手法を採用した。

これらの一連の作業をソフトウェア上で、次々とカメラから送られてくる画像に対して行い、マーカ-の三次元座標をリアルタイムに取得する。

(2) パターン認識法

カメラを用いてモーションキャプチャを行った場合、その精度を大きく左右するのがノイズ処理である。マーカ-を色の違いのみで認識した場合、マーカ-と同じ色をもつ全ての物体がノイズとなる。ノイズが入ると、マーカ-の座標を正確に得ることができなくなり、当然、買い物カートは、あさっての方向に動いてしまう。カラフルなパッケージの商品で満ちあふれているスーパーにおける実用化を考えた場合、この問題の解決は急務であった。

私たちは、これを根本的に解決する方法

を考えた。それがパターン認識法である。

これは、図のようなパターンをつけた正方形のマーカ-を用いることにより、形状とパターンからノイズや他マーカ-との認識分けを行い、マーカ-の4隅の座標を求めるアルゴリズムである。

これにより、ノイズを大幅にカットできるとともに、複数のマーカ-がカメラに写った場合でも、特定のパターンのマーカ-のみをキャプチャすることが期待される。

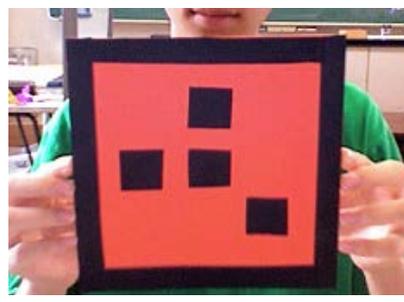


図 4

まず、正方形マーカ-の4隅の座標を得る手順を以下に示す。

- ① 大まかに画像を走査し、マーカ-が存在すると思われる二次元座標を見つける。
- ② 見つけた二次元座標から任意の方向へ走査していき、色が大幅に変わるところ、つまりマーカ-と背景との境界を見つける。そこから境界線を追跡していき、境界の二次元座標を記録していく。
- ③ 記録された二次元座標を順に三つずつ調べていくと、その三つの座標が成す角度が一定以下の座標と、そうでない座標とに分けることができる。
- ④ 前者を辺とみなし、後者を角とみなす。また、連続する角は一つの角と見なす。すると一つの境界線についてある多角形を得ることができる。

- ⑤ 得た多角形が正方形でなかった場合は、マーカーではないと判断し、正方形を形作る境界線が見つかるまでは、①から④の作業を繰り返す。
- ⑥ 最後に、見つけた4つの辺の座標群から最小自乗法を用いて4つの直線方程式を求め、それらの四つの交点、すなわち正方形を形作る4隅の座標を求める。

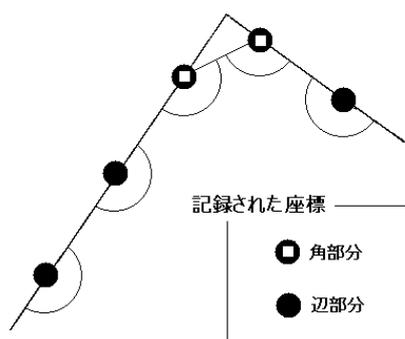


図 5

以上の手順で得られた4隅の座標から、三点直角法を使ってマーカーの三次元座標を計算することができる。

次に、マーカーのパターンを取得する手順について以下に示す。

- ① 先の手順で画像から抜き出したマーカーを格子に分割する。
- ② 格子の各点の色を求め、マーカー内のパターンを得る。
- ③ 登録したパターンと照合する。

これにより、複数のマーカーがカメラに写った場合でも、特定のパターンをもったマーカーのみをキャプチャすることが可能となる。

研究2 制御システムの開発

(1) 制御ハードウェア・ソフトウェアの開発

モーションキャプチャで取得したマーカーの三次元座標を解析し、動作に必要な命令をモーターコントローラ基盤にシリアル通信するソフトウェアを、VisualStudio 2005 を用いて開発する。この開発言語は、シリアル通信する際のパッケージが標準装備されているなど、開発上のメリットが大きい。

シリアル通信で出力されるデータプロトコルは、次のようなものである。

```
255:255:127:127:127
Startbit   Parameter
```

図 6

RS232C は一対一の通信しかできないため、多対多の通信が可能である RS485 を採用した。

また、シリアル通信で送られてきたデータを元に、モーターなどを制御する信号を生成するハードウェアコントローラを PIC により開発する。PIC とは、Microchip 社が製造開発しているマイコンで、内部にプログラムを書き込むことにより様々な周辺機器を制御できるものである。

このコントローラの概略図は次のようなものである。通信および全体を制御する PIC に、DC モーターやサーボモーターなどを制御する PIC がぶら下がる形になっている。これにより、信号処理の負荷が分散され、マーカーの動きとカートの動きの間に生じる時間的な遅れ（ディレイ）を軽減することをねらった。

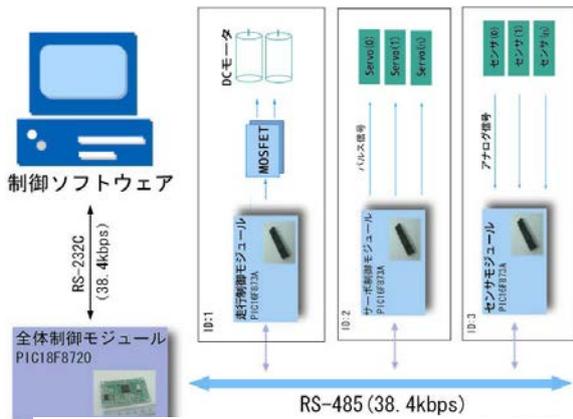


図 7

また、モータードライブ IC の出力電流が小さいという問題については、FET を用いた H ブリッジ制御回路を採用した。

(2) 制御ロジックの開発

① 通常追尾モード

マーカと一定の距離を保って追尾する動きのロジックは次のようなもの考えた。このロジックは、制御ソフトに組み込んだ。

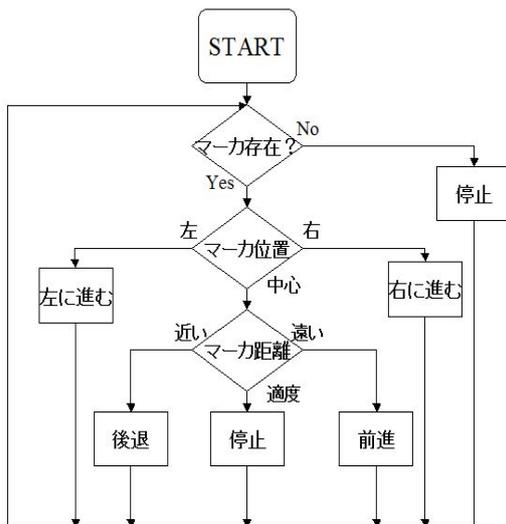


図 8

② マーカ探索モード

カメラの視野からマーカが外れたとき、自動でマーカを検索する動きのロジックは、次のようなもの考えた。これは人間が物を見失ったときに首を左右に振って探す、という動作から考えついた動きである。このロジックは、制御ソフトに組み込んだ。

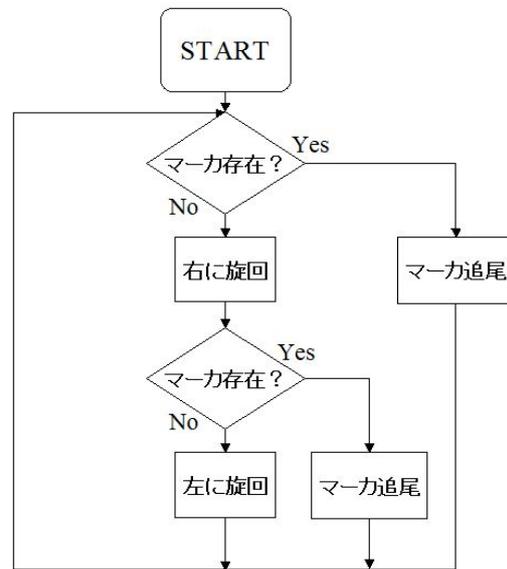


図 9

研究 3 駆動システムの開発

(1) モーターとギア

自動追尾型カートの速度とトルクを考える際に、モーターと車輪をつなぐギヤ比の計算が必要である。

カートの最大速度としては、買い物という状況から判断して、人が歩く速度の半分つまり、50cm/sec が必要だろうと考えた。

タイヤの直径とモーターの回転数を計測した結果、次のようになった。

$$\text{タイヤの直径} = 7.5\text{cm}$$

$$\text{モーターの回転数} = 2.7 \text{ 回/sec}$$

モーターとタイヤの回転数を一致させた場合、カートの様子は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{カートの速度} &= 7.5 \times \pi \times 2.7 \\ &= 63.585(\text{cm/sec}) \end{aligned}$$

これは必要な速度を満たしている。従って、特に速度を交換する必要は無いため、ギヤ比は1 : 1に決めた。

(2) 買い物かごを支える筐体の制作

DC モーターとタイヤそれぞれにギヤを取り付け駆動させることで、モーターの軸への負荷を減らし、重いものに乗せてもカートの移動ができるように工夫する。さらに、この方法により、モーターとタイヤを直付けするよりも、タイヤの空回りが少なくなることを期待される。

5. 研究結果

研究1 モーションキャプチャの開発

(1) 三点直角法

1台のカメラに映し出された3つのマーカーの三次元座標を得ることができた。

図は、3つのマーカーを通る平面の法線ベクトルを表示している。それぞれのマーカーの正確な三次元座標を取得できていることが分かるであろう。



図 10

また、このソフトウェアを実行しているノート PC (CPU;Core2Duo1.8GHz) においては、平均 20fps の処理速度を得た。

(2) パターン認識法

カメラの視野にマーカーと同色の大きなノイズが混じった場合でも、マーカーのみをうまく抜き出すことができた。



図 11

また、マーカーのパターンを読み取ることによって、複数のマーカーを識別することができた。

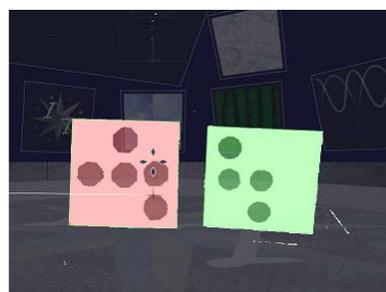


図 12

さらに、カメラからマーカーが少しはずれてしまい、角が少々欠けたとしても、うまく座標を抜き出すことができた。



図 13

研究2 制御システムの開発

(1) 制御ソフトウェア・ハードウェアの開発

制作した制御ソフトウェアは、次のようになった。

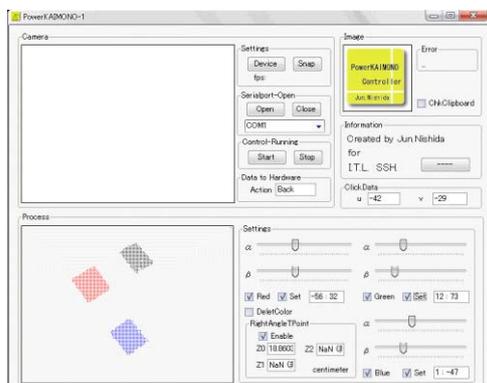


図 14

また、制作したモーターコントローラは、次のようになった。



図 15

特に、モーターコントローラでは、複数の PIC を階層的に用いることによって、機能の分散を図った。実際に動かしてみると、一つの PIC で構築した場合に比べて、データ通信の割り込み処理の内容が少なくなり、サーボモーターのジッタの問題が解決できた。

また DC モーター制御では、FET を用いた H ブリッジ制御回路によって電流不足の問題は解決された。

さらに、機能を分散させたことによって、複数の分散された最大 32 基の処理ユニットが同時並行的に処理を行うことができる。このため、モーター制御だけでなく、センサ入力、液晶表示から画像認識、音声認識などのモジュールを“信号線 2 本をつなげるだけ”で容易に追加することができるため、新規開発の場面で短期間にロボット等を設計、開発することが可能となった。

(2) 制御ロジックの開発

① 通常追尾モード

動作させた結果、マーカがカメラの視野内にあれば、それと一定の距離を保ってカートをスムーズに動作させることができた。

② マーカー探査モード

動作させた結果、画面外に出たマーカを自動的に探査し、再びとらえる時もあった。しかし、その頻度は低かった。

研究3 駆動システムの開発

(1) モーターとギア

作成したギアおよび車輪部分は、次のようになった。

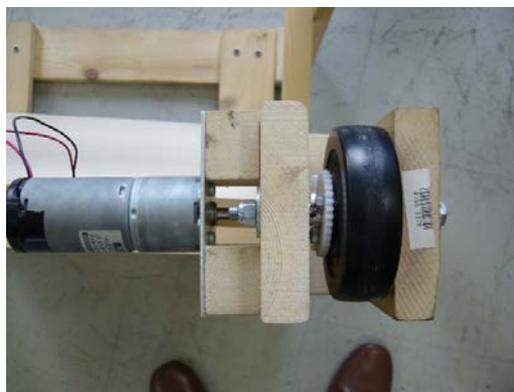


図 16

山が大きなギアを採用した結果、モーターが空転する頻度が減り、確実にカートを動作させることができた。さらに、摩耗を減らすことに成功した。

(2) 筐体の製作

本体のフレームと駆動部を組み立てた結果次のようになった。

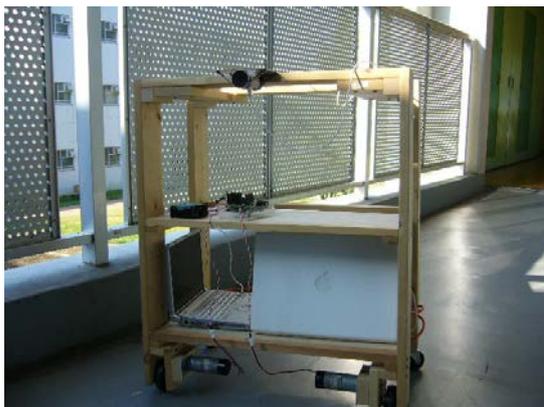


図 17

動作に必要な機材を全て搭載したところ、想定値の 0.6m/s の速度で動作した。筐体の上に 5kg 程度の荷物を乗せて動かすと、速度は 0.5m/s になった。

しかし、これ以上の負荷をかけると、重心が上になりすぎて不安定になったり、ギアが外れるなどした。

6. 考察

(1) モーションキャプチャに関して

私たちが独自に開発した三点直角法とパターン認識法の組み合わせによって、ノイズに強い、カメラ 1 台でマーカの正確な三次元座標を得るモーションキャプチャシステムを開発することに成功した。

また、複数のマーカが混在した場合でも、確実に特定のパターンをもったマーカのみをキャプチャすることができた。こ

れにより、スーパーの中で、複数台の自動追尾型買い物カートを走らせることが可能になった。

(2) 制御システムに関して

複数の PIC に処理を分散させることによって、安定してモーターを制御できるシステムを構築できた。また、このシステムにより、マーカとカートの動きの時間差(デレイ)を短くすることに成功した。

しかし、カメラがマーカを見失ったときのカートの動作アルゴリズムにはまだ改良の必要がある。カメラの左右からはずれる場合以外にも、ものの陰になってしまう場合など、マーカを見失う状況には様々あり、単純にカメラを左右に振っただけでは、マーカを見つけ出すことは難しいことが分かった。

(3) 駆動システムに関して

5kg 程度の負荷をかけた状態で、 0.5m/s の速度を得た。これは、十分に実用に耐えうる速度である。

しかし、これ以上負荷をかけて動作させるには難しく、さらに強力なモーターを採用したり、重心の位置を考慮した筐体を再検討する必要があることが分かった。

7. まとめと今後の課題

私たちは、特定のマーカをつけた人または車いすと、一定の距離を保って自動で追尾する買い物カートを開発するという研究目標をある程度達成できたと考える。

現時点において、カートに搭載されたカメラがマーカをとらえているときは、比較的スムーズに目的の動作が行える。

しかし、カメラがマーカを見失ったと

き、自動でマーカを探査できるには至っていない。この他にも、最大積載量の問題など、いくつかの課題が明らかになった。

今後は、実用化に向けて、ソフトウェアおよびハードウェア両面にわたって、さらなる研究をチームで進めていきたい。

8. 謝辞

この研究を進めるに当たり、ハードウェア技術やプログラミング技術などに関して、私たちの研究班の顧問である物理の末谷先生には数々のご指導をいただきました。また、児玉先生には、工作技術を教えて頂きました。さらに、数学の川口先生には、近似計算の方法などを教えて頂きました。先生方に深く感謝します。

また、予算面などで、植野前校長先生、前川校長先生、吉田信也副校長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、大変ありがとうございました。

9. 参考文献

[1] 「Effective C++」、スコット・メイヤーズ著、ピアソン・エデュケーション(2006)

10. 資料

① 自動追尾型買い物カートのスペック

最大速度	0.5m/s
最大搭載質量	5kg
駆動部分	30W DC モーター×2
モーションキャプチャ	光学式、三次元座標取得、複数マーカ-の識別が可能
CPU	ノート PC×2
カメラ	Web カメラ×1

特徴	特定のマーカ-を一定の距離を保って自動で追尾する。
----	---------------------------

② 自動追尾型買い物カートの外観



③ コントローラ基板

MPU : PIC18F8720

動作電源 : PIC9V

外部 I/F : RS485*1、RS232C*1



レーザー装置の温度と波長の関係

3年A組 小池 剛央

3年C組 大村 啓輔

指導教諭 末谷 健志

1. 要約

私たちはペルチェ素子を用いて、半導体レーザー装置の温度と出力されるレーザーの波長の関係についての研究を行った。その結果、半導体レーザーの温度が上がるほど、出力されるレーザーの波長が長くなることが分かった。

キーワード 温度変化、温度差、ペルチェ素子、回折、回折格子、干渉、
レーザー装置、波長

2. 研究の背景

前回の研究成果によって、ペルチェ素子を用いた冷却装置が完成した。この装置は、零下まで温度を下げる事が可能であるとともに、水分のある物質を用いていないために、温度を下げる物体を濡らさない点で優れている。今回の研究は、この冷却装置で半導体レーザーの温度を変化させ、出力されるレーザーの波長の変化を調べた。

3. 目的

回折格子を用いて、レーザー装置から出力されるレーザーの波長が、装置の温度によって、どのように変化するかを調べる。

<用語について>

回折

反射や屈折によらず波の伝わる方向が変わる現象のこと。

干渉

二つ以上の同一種類の波動が同一点に会したときに、その点において互いに強め

あったり弱めあったりする現象のこと。

レーザー

位相が揃っている整った光のこと。

回折格子

透明の板状のプラスチックの表面に1センチあたり何千本という数の溝が彫られており、光はそこを通ることができない。つまりこれはスリットの働きをすることができる。また溝と溝との間隔のことを格子定数という。

4. 研究内容

(1) 仮説

半導体レーザーの温度を上げると、出力されるレーザーの波長が長くなる。

(2) 実験方法

<実験原理① 光の干渉について>

光が単スリットを通過するとき、光はそのスリットを波源として空間に広がる(図1)。それをダブルスリットに通すと波動が2つでき、波動同士が重なりあう。す

ると波長の強め合う所と打ち消しあう所ができる (図2)。これを光の干渉という。

図2では、波長の最も高い頂点と最も低い頂点を結んだ線をそれぞれ線と破線で表している。つまり線から線、破線から破線までが1周期、1波長といえる。同じ種類の線が交わる交点では波は強めあう。つまり光の強さは増幅され明るくなる。

また、図3に示すように、入射するレーザーの進行方向にのびる光の筋は最も明るくなり、0次像という。そして次に明るくなる筋を+1次像および-1次像という。

波源Aから出た光および波源Bから出た光が、ちょうど重なり合ったときになったときに光は強め合う。従って、0次像ができる点では、2つの波源からの距離が等しくなるので、波はちょうど重なり合っ、強め合う。

0次像ができる外側では、2つの波源からやってくる波はずれてしまい、強め合うことはない。しかし、0次像から徐々に離れていくと、再び2つの波源と距離がちょうど1波長分ずれたところで、その点においては波がちょうど重なり合うために強め合う。これが1次像のできる点である。

従って、1次像ができる点をCとすると、

$$|AC - BC| = \lambda$$

が成り立つ。

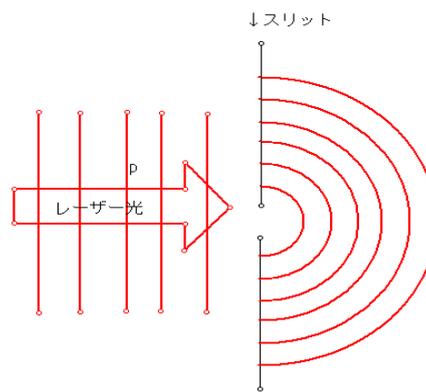
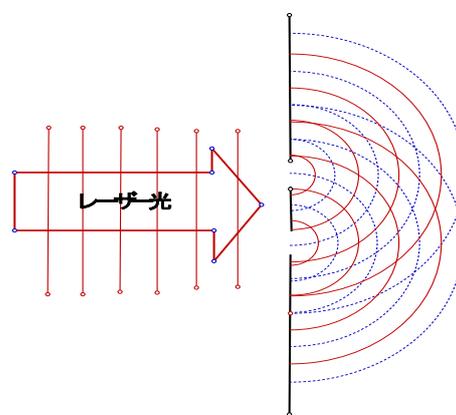


図1



—— 波長の最も高い点を結んだ線
 - - - - 波長の最も低い点を結んだ線

図2

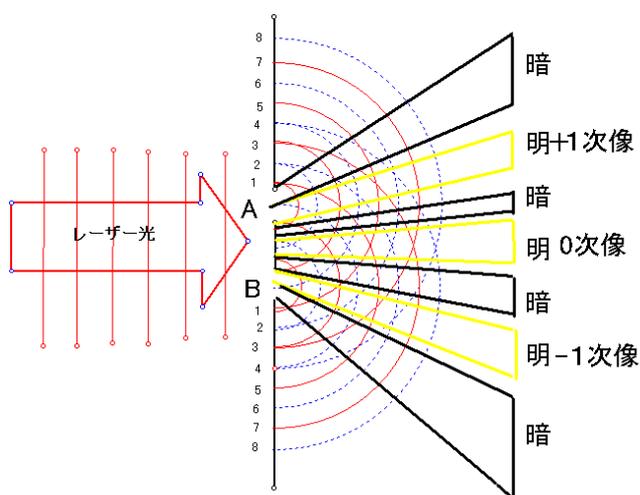


図3

＜実験原理② 波長λの測定について＞

光の干渉を利用すると、光の波長を求めることができる。

図4は、今回の実験の簡単な模式図を示している。レーザー装置からレーザー光が出て、スリットを通りスクリーンに映し出されるまでを表している。説明を簡潔にするため0次像と1次像以外は省いている。

図中のxは0次像と1次像の距離を表している。またLはスリットとスクリーン間の距離を表している。ここで、スリットから1次像までの斜辺の長さはピタゴラスの定理により、x,Lで表すことができる。

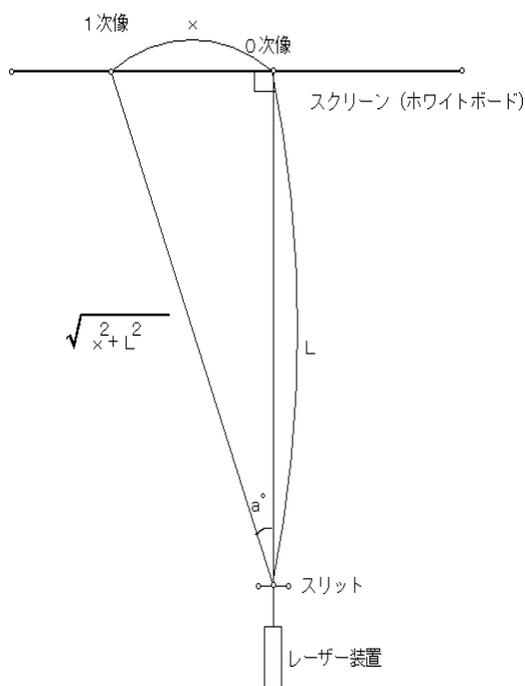


図4

次に図5を説明する。この図は、回折格子にレーザー光が通過するときの様子を拡大視して表している。P、Q、Rがスリットの穴を表していて、dが格子定数、線分CDがQとRからできた0次像と1次

像で違う一波長分の長さ、つまりλを表している。このとき、

$$a^\circ + b^\circ = 90^\circ .$$

また、 $b^\circ + c^\circ = 90^\circ$ だから、

$$a^\circ = c^\circ$$

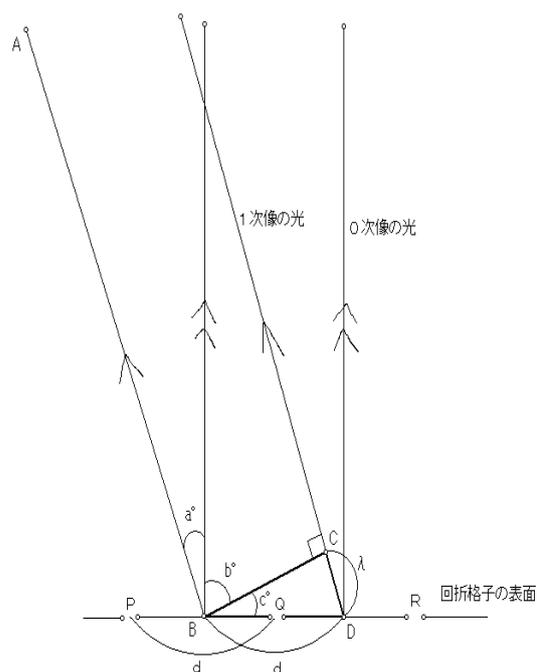


図5

すると、図4における、1次像と0次像、そしてレーザー光がスリットを通過している点を結んだ三角形と、図5の三角形BCDとが、互いの2角が共に等しいため、相似の関係があることが分かる。

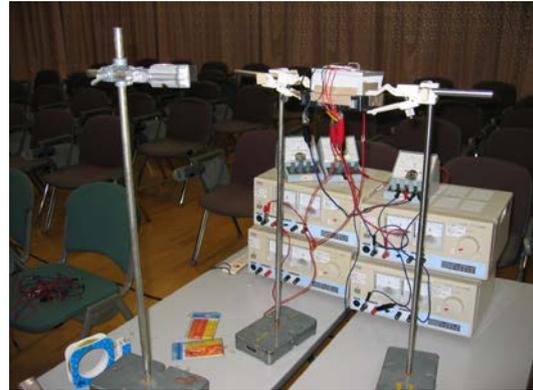
相似の関係を持つ三角形は対応する辺の比が等しい。このことから、次式に示すように光の波長λをd,x,Lで表すことができる。

$$\sqrt{x^2 + L^2} : x = d : \lambda$$

この式を $\lambda =$ の式に変換
すると...

$$\lambda = d \frac{x}{\sqrt{x^2 + L^2}} \text{ となる。}$$

つまり、回折格子の格子定数 d が分かり、
0 次像と 1 次像の距離 x を実験で求める
ことができれば、波長 λ を計算から導くこ
とができる。



<実験方法について>

そのため L の値はメジャーで測り、 1022.2 mm に設定した。またレーザー装置の温度調節をするためのペルチェ素子は直接セロハンテープで固定させ、ペルチェ素子とレーザー装置の温度は放射温度計で測定した。その実験の様子の写真を下に載せる。



(3) 実験結果

回折格子とスクリーンの距離

$$L = 10.0\text{m}$$

回折格子の格子定数

$$d = 5.0\ \mu\text{m} \quad (1\text{cm} \text{につき} 2 \text{千本})$$

装置の温度とレーザー波長の関係

※資料に添付

5. 考察

実験結果は予想通り 0 次像と 1 次像の間の距離 x が広がるにつれて光の波長 λ も長くなるというものになった。この理由について、私たちは以下のように考えた。

レーザー装置は、レーザー光を発生させるための共振器（キャビティ）と、その中に設置された媒質、および媒質をポンピング（電子をより高いエネルギー準位に持ち上げる）こと）するための装置から構成される。キャビティは典型的には、2 枚の鏡が向かい合った構造を持っている。波長がキャビティの長さの整数分の一となるような光は、キャビティ内をくり返し往復し、定常波を形成する。このとき、熱でキャビティの構造を構成する部品が膨張しキャビティの距離が長くなってしまったために通常時よりも長い波長の光しか共振条件を満たさず、より長い光の波長しか存在できないため、レーザー装置の温度を上昇させるとレーザー光の波長が長くなるので

はないかと予想を立てましたが、今回は実際に確認することは残念ながらできませんでした。

6. まとめと今後の課題

今回の実験のまとめは、レーザー装置の温度を上昇させるとレーザー光の波長が長くなるということがわかりました。今後の課題は今回の実験で立てた予想が本当に正しいかどうかを確認することです。

7. 参考文献・サイト

<http://www.fujitaka.com/peltier/experience/experience2.html>

http://www.n-tecmo.co.jp/custama/per_gen.htm

<http://www.ohmdenki.com/boxcool/catalog/peltier.htm>

<http://nkiso.u-tokai.ac.jp/phys/matsura/lecture/general/presentation/Diffract/Diffract.files/frame.htm>

<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A%E3%83%BC%E3%82%B6%E3%83%BC>

8. 謝辞

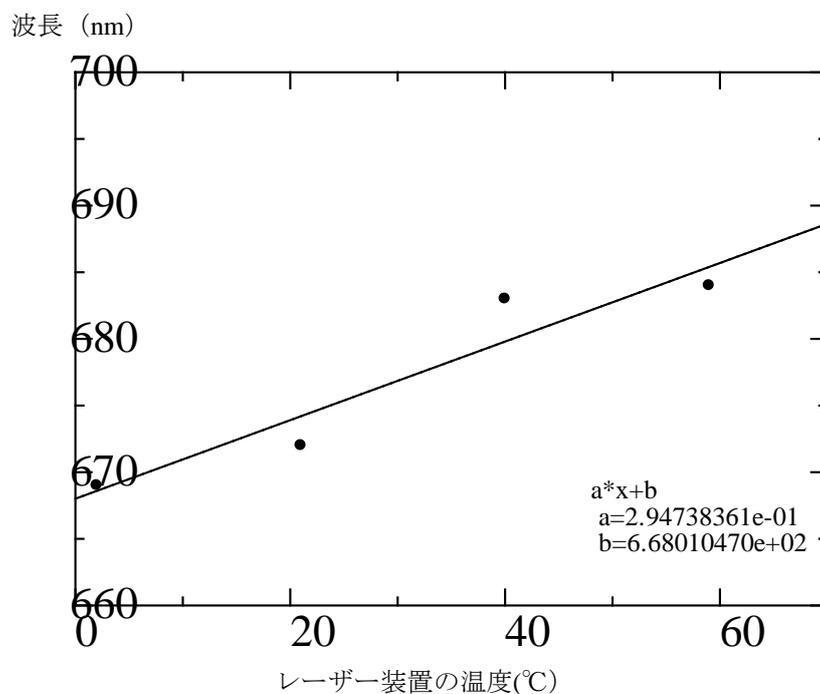
末谷先生今回の研究でいろいろと教えていただきありがとうございました。またその他の実験や研究を指導して下さった先生方ありがとうございました。

9. 資料

(1) 実験数値データ

レーザー装置の温度 (°C)	0 次像と 1 次像の距離 (cm)	レーザーの波長(nm)
2°C	135.0	669
°C	137.2	672
40°C	137.8	683
59°C	138.1	684

(2) レーザー装置の温度とレーザー波長の関係



LEDについての研究

1年A組 羽鹿 諒
1年C組 武田 優生
指導教諭 末谷 健志

1. 要約

LEDの臨界電圧に関する測定を行い、LEDが発する光が変われば、臨界電圧も変化することが分かった。また、その結果をふまえて、LEDを用いた光学式モーションキャプチャシステムのためのマーカーを設計し制作できた。しかし、このLEDマーカーを用いて、モーションキャプチャの精度などを向上することはできなかった。

キーワード LED 臨界電圧 三点直角法 マーカー

2. 研究背景

本校サイエンス研究会物理班で開発に取り組んでいるモーションキャプチャ(図1)は、カメラ1台でマーカーの色やパターンを認識し、マーカーの三次元座標をリアルタイムで取得するシステムである。これまでに用いてきたマーカーは、台紙に色紙を貼った簡単なものであった(図2)が、環境光の照り返しが起こったりして、色調が変化し、うまく取得することができなかった。また、暗い場所などではマーカーの色を認識できないため、使用することができないなどの問題があった。

そこで、私たちは、LEDの光をマーカーに用いることで、これらの問題を解決できるのではないかと考えた。このマーカーには、開発中のモーションキャプチャシステムの特性上、3色のLEDが必要である。赤、緑、青のLEDを取り寄せると臨界電圧(どの程度の電圧で点灯しはじめるのか)

に関する記述があり、この値を元にマーカーの回路設計をする必要があることが分かった。

今回のレポートでは、各色のLEDの臨界電圧を調べ、その原因について考察し、さらにこの値をふまえた回路の設計について報告する。

3. 研究目的

研究Ⅰ

赤、緑、青のLEDの各臨界電圧を測定し、その理由を考察する。

研究Ⅱ

赤、緑、青のLEDの各臨界電圧をもとに、モーションキャプチャシステム用のマーカーを設計し、制作する

4. 研究内容

(1) 仮説

研究 I

LEDの臨界電圧は発光色でそれぞれ違う。

研究 II

LEDをモーションキャプチャシステムのマーカーに用いることにより、モーションキャプチャの精度向上や夜間等の様々な場所で使用することが可能である。

(2) 研究方法

研究 I

電源装置, 電流計, 電圧計, LEDをつなぎ、LEDにかかる電圧とLEDに流れる電流をそれぞれ測定した。(図3)

研究 II

赤、緑、青のLEDの臨界電圧を考慮して、各LEDにかける電圧は、1V~5Vまでとした。各LEDの電圧調整は、1k Ω の固定抵抗と5k Ω の可変抵抗を用いた。また、マーカーに用いる電源は、00P 乾電池の9Vを、三端子レギュレータを用いて5Vに落としたものを用いた。それぞれのLEDに拡散キャップを取り付け、ある程度広がりのある光源にした。この回路図を(図4)に示す。

さらに、制作したLEDマーカーをサイエンス研究会物理班が開発中のモーションキャプチャシステムに用いて、マーカーの性能を検討する。

(3) 研究結果

研究 I

各LEDの電流-電圧グラフおよび、これらのグラフから読み取れる臨界電圧は、(図

5~図8)となった。

研究 II

完成したLEDマーカーを(図9)に示す。また、このマーカーをキャプチャした様子を(図10)に示す。

5. 考察

研究 I

結果に(図5~7)を示す。縦軸がV(ボルト)、横軸がA(アンペア)を表している。これらの図より、どのLEDも流れる電流は、ある電圧を境にして急激に大きくなることが分かった。この電圧を臨界電圧というが、グラフから簡単に求めることができた。また、この臨界電圧を超えると、LEDが点灯することが分かった。さらに、(図8)より、発する光の色によって、臨界電圧が変化することが分かった。

なぜLEDの種類によって放たれる色が異なるのかを文献で調べたり、物理の先生などに聞いたりした。

この理由は、LEDが光を出す仕組みにあることが分かった。

LEDが発光する部分の原子に注目すると、原子核の周りを電子がぐるぐる回っている。ここに電流を流すと、ぐるぐる回っている電子は一定量の電気エネルギーをもらって、今回回っている場所よりもさらに外側をぐるぐる回るようになる。しかし、この状態は電子にとって不安定で、すぐに内側、つまり原子核に近い方に戻ろうとする。電子は電気エネルギーをもらって外側に行ったため、もらった分のエネルギーを放出しないと戻ることができない。このとき電子は、光としてエネルギーを放出する。これが、電流を流すとLEDが点灯する理由

である。

電子が発する光のエネルギーは、次の式で表される。

$$E = hc/\lambda$$

Eは光エネルギー、hはプランク定数、cは光の速さ、 λ は波長を表す。c, hは定数であるため、Eが変化すれば λ も変化する。さらに、Eははじめに電子が吸収する電気エネルギーと等しく、この値は原子の種類によって異なる。従って、LEDが含む原子の種類によって、異なる色の光が放たれるのである。

研究Ⅱ

<失敗した理由>

失敗した原因として考えられるのは、拡散キャップを使用したにも関わらず、光が一点に集中してしまったためにカートがマーカーを認識することが出来なかった為だ。反対に光量を下げると少なすぎてまた認識することが出来なかった。(図11)にキャプチャ時のモニタの様子を示す。

6. まとめと今後の課題

今回の研究では、赤、緑、青の3色のLEDに関する電流と電圧の関係および臨界電圧について調べることができた。しかし、LEDには他にも白色や、黄色、紫色、などたくさんの種類があり、今後はこれらの色についても研究したい。また、今回の研究では、なぜ光の波長が短くなると臨界電圧が上がるのかを詳しく調べることができなかった。LEDの発光の仕組みをもっと調べることで、この疑問を解決していきたい。

LEDマーカーに関しては、結果的に今回は失敗してしまった。

実験時にマーカーの数センチ前にコピー用紙をかざした所、若干ではあるが認識しやすくなるのが分かっている。そこで、トレーシングペーパーや半紙などの薄い紙をLEDの少し前に貼ってマーカーを作る(図12)と良いのではないかと考えている。

又、光が混ざらないように区切りをつけたり(図13)、LEDをELシートなどに変えたり(図14)することで改善されるのではないかと考えている。

7. 参考文献・サイト

参考にさせていただいたサイトは次の通りです。

JLEDS - LEDの基礎知識

<http://www.led.or.jp/about/about.htm>

8. 謝辞

今回の研究にあたり、末谷健志先生、サイエンス研究会物理班の先輩方にアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

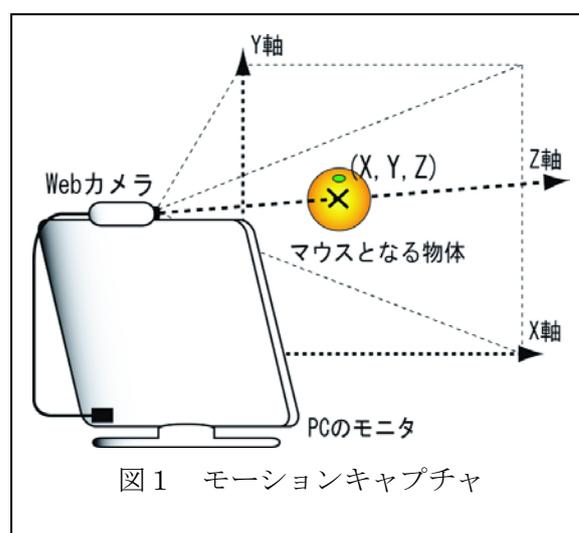




図2 従来のマーカー



図3 実験風景

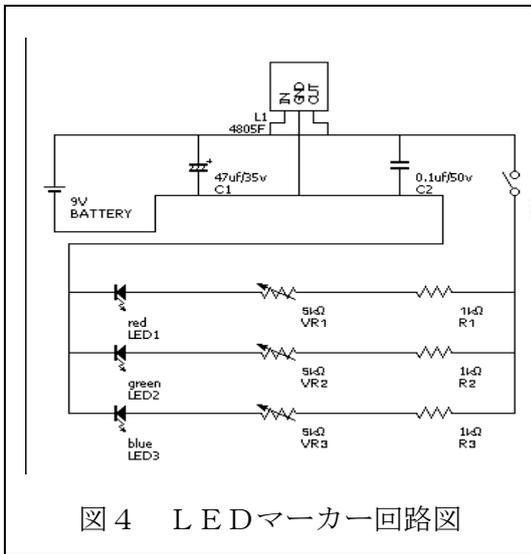


図4 LEDマーカー回路図

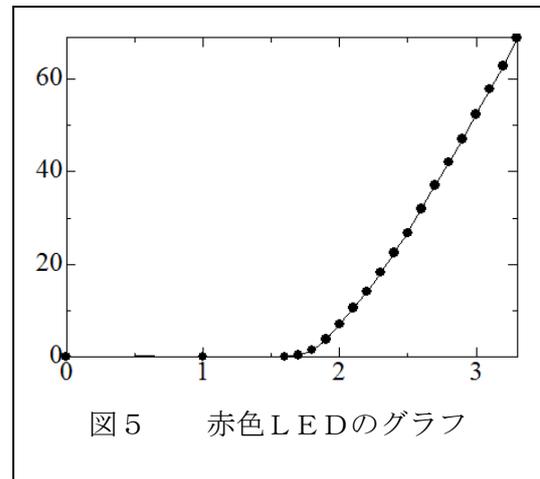


図5 赤色LEDのグラフ

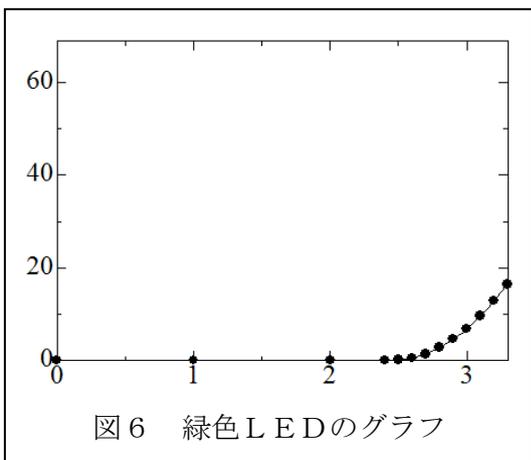


図6 緑色LEDのグラフ

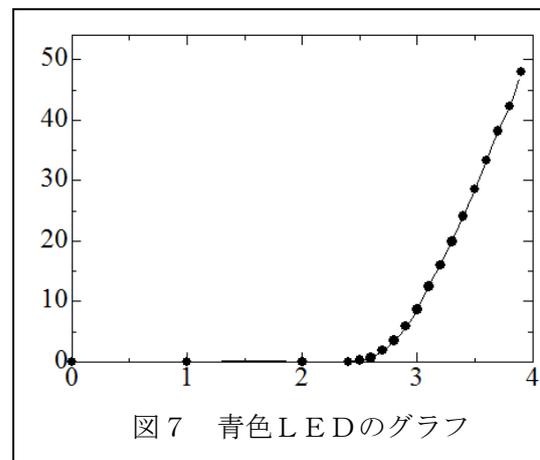


図7 青色LEDのグラフ

LEDの色	臨界電圧
赤	1.85V
緑	2.60V
青	2.70V

図8 実験結果



図9 製作したLEDマーカー



図10 キャプチャの様子

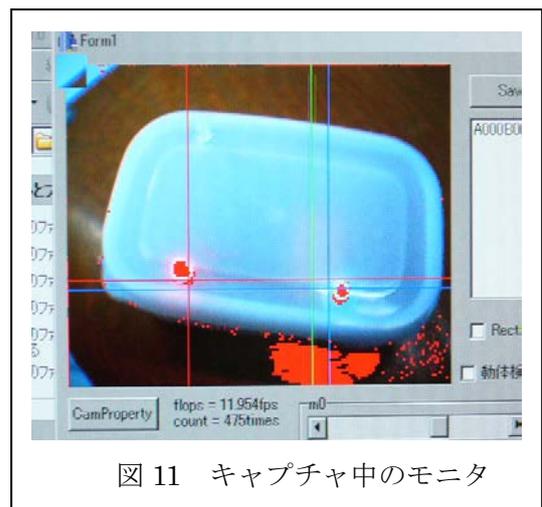


図11 キャプチャ中のモニタ

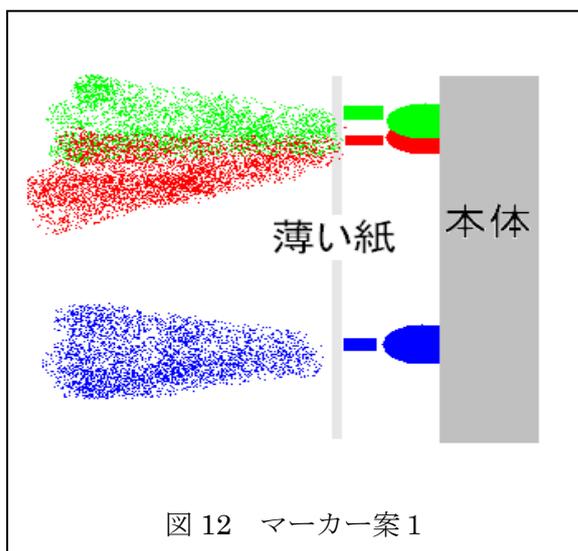


図12 マーカー案1

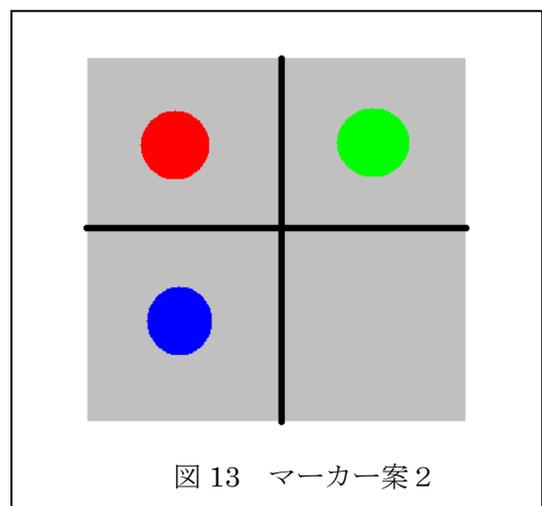


図13 マーカー案2

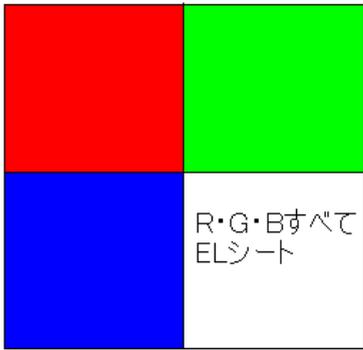


図 14 マーカー案 3

結び目理論を通してみるDNA

6年B組 土佐 悠生

6年C組 山岡 俊弥

指導教官 佐藤 大典

指導教官 川口 慎二

1. 要約

サイエンス研究会数学班6年生は、結び目について研究している。今回は、結び目の定義、ライデマイスター移動、不変量など、結び目理論の基礎事項に加え、応用として、DNAとの関連性を考察し、更に今後の研究のためにタングルの考え方について述べてみたい。

キーワード 結び目、絡み目、ライデマイスター移動、不変量、3彩色可能性、ブラケット多項式、絡み数、ねじれ数、ライジング数、DNA、二重螺旋構造、超螺旋、トポイソメラーゼII型(topo II)、タングル

2. 研究の背景と目的

塾の先生に雑学として多少教えていただいたのがきっかけで、数学にしては何か雰囲気が違う分野だと感じ、結び目理論に興味を抱いた。結び目理論とは、紐の絡みや結びつきを数学的に表す学問であり、「結び目が解けるか否か」や、「2つの結び目は同じものか」などを考えるもので、生物学（分子生物学）、化学（高分子合成物）、物理学（量子力学・統計力学）への応用も期待できる理論である。今回は応用として、細胞のDNAとの関連性を考察した。

3. 研究内容

■結び目・絡み目の定義

- (1)3次元空間内の、1個の絡まった輪のことを、**結び目(knot)**という。つまり、1次元球面(即ち円周) S^1 から3次元球面 S^3 への単射連続写像 $K:S^1 \rightarrow S^3$ あるいは K の像のことを結び目という。
- (2)3次元空間内の、複数の絡まった輪のこ

とを、**絡み目(link)**と呼ぶ。また、絡み目を構成する個々を**成分(component)**と呼ぶ。つまり、いくつかの1次元球面の(集合としての)直和 $S^1 \cup S^1 \cup \dots \cup S^1$ から3次元球面 S^3 への単射連続写像 $L:S^1 \cup S^1 \cup \dots \cup S^1 \rightarrow S^3$ 或いは L の像のことを絡み目という。また、絡み目を構成する個々の連結部分のことを成分という。

- (3)2つの絡み目が3次元空間内で同位となる(つまり、結び目を切ることなく、一方を縮めたり、伸ばしたり、ひねったりすることによって、もう一方に移ることができる)とき、2つの結び目は**同値(equivalent)**であるという。
- (4)単位円周(半径が1の円)と同値な結び目を**自明な結び目(trivial knot)**と呼ぶ。

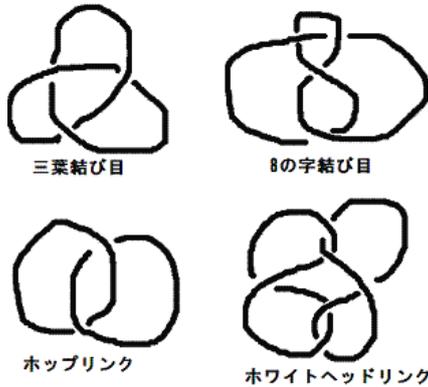


図1 結び目・絡み目の例

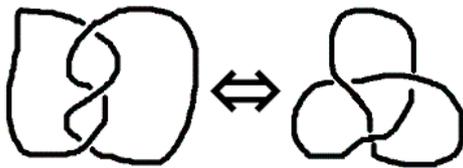


図2 同値な結び目の例

■ライデマイスター移動

ある2つの結び目が同値であるかを調べるために、結び目の一部分を変形することをライデマイスター移動(Reidemeister moves)という。具体的には以下の3つの操作である。同値な2つの結び目は、一方の図から他方の図へ、以下の単純移動を繰り返すことで必ず移すことができる。

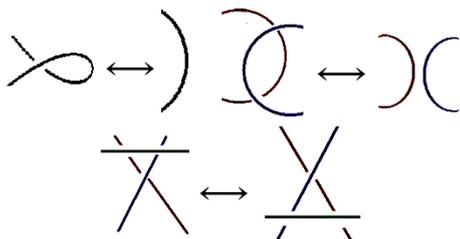


図3 ライデマイスター移動

■不変量

不変量(invariant)とは、結び目、絡み目を数値化して表したもので、実に多くの種類がある。それぞれの不変量は、結び目、絡み目をさまざまな方法・観点で分類する。根気があれば、上述のライデマイスター移動により全ての結び目を解き明かすのは可能に思われるが、実際にするのは困難である。そこで登場するのが不変量であり、結び目・絡み目に対して、何度ライデマイスター移動を行っても変わらないように数値化された指標が不変量であるともいえる。例としては、次の3彩色可能性という簡単な不変量があるものの、あまり有効とはいえない(次節参照)。

■3彩色可能性

簡単な不変量の一例として、例えば3彩色可能性(tricolorability)というものがある。3彩色可能性は、結び目を図示したときに切れている部分を一本の線と仮定して、それぞれに色をつけていくことを考えていく。結び目は、2つの条件

- (a) 少なくとも2色は使われている
- (b) 2色以上が現れる交点では、3色が必ず使われている

が満たされているとき、この結び目は「3彩色可能(tricolorable)である」という。

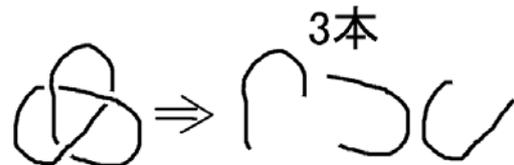


図4 3彩色可能な例

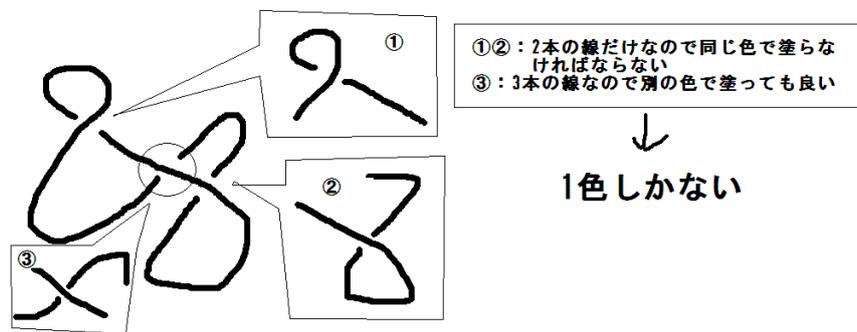


図5 3彩色不可能な例

図4の例では、いずれの条件も満たされるため、3彩色可能であり、図5の例では、条件(a)が満たされていないのでこれは3彩色可能ではない(図6参照)。

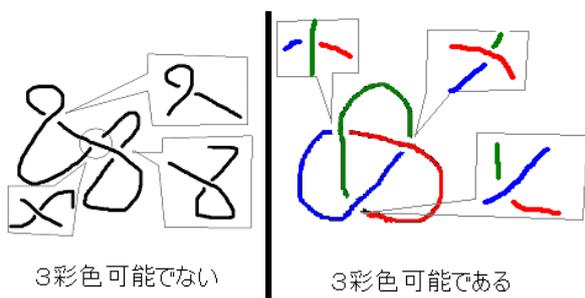


図6

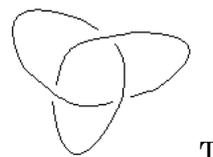
3彩色可能性はライデマイスター変形でも変わらないため不変量ではあるが「可能である」「可能でない」の2種類しか起こりえない。つまり3彩色可能性だけで「2つの結び目が同じである」とは判断することはできない。「2つの結び目が同じものであるとき、この2つはどちらも3彩色可能であるか、あるいはどちらも可能でないかである」ということがいえる程度である。

そこで有効な不変量として考え出されたのが、ブラケット多項式である。

■ブラケット多項式

1984年、新しい不変量としてある**多項式 (polynomial)**が発見され、結び目理論だけでなく、統計力学や量子場の理論、量子不変量、量子群など他の分野との関連した膨大な研究を生むことになった。この多項式(ジョーンズ多項式という)の初等的な定義のために、1987年に**ブラケット多項式 (bracket polynomial)**が考案された。

以下、ブラケット多項式について、図7の三葉結び目Tを使って説明しよう。



T

図7 三葉結び目T



図8 交叉でのラベルのつけ方

図8において、各交叉の近傍は2本の線分によって4つの領域に分割されている。そこでこれらの領域に対し、交叉の上側にある線分の反時計周り方向の領域にラベルAを、時計回り方向の領域にラベルBを付ける(図8参照)。

ある結び目の図Dに対して、そのすべての交叉を図9のどちらかのやり方で解消して得られる図を、結び目Dの**状態(state)**と呼ぶことにする。

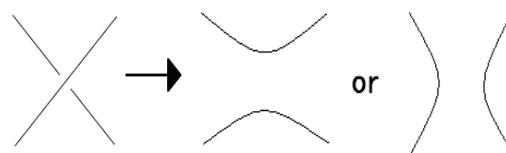


図9 交叉の解消

例えば、図7の三葉結び目Tは、次の図10にある8種類の「状態」を持つことになる(後々のために、ラベルA、Bを付けておく)。

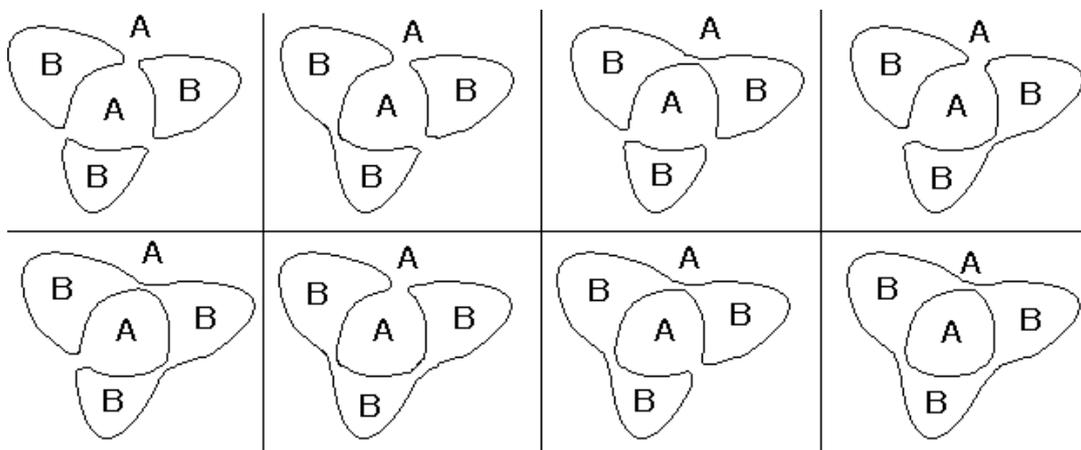


図10 三葉結び目Tの「状態」

さて、一つの「状態」をSと書くことにする。このときa(S)は「A領域をつなげる交叉点の数」を、b(S)は「B領域をつなげる交叉点の数」を、また|S|は図Sの中に含まれる「輪」の数をそれぞれ表している。このとき、dを変数として、

$$A^{a(S)} B^{b(S)} d^{|S|-1}$$

を状態Sのエネルギー(energy)ということにする。

例えば、図11の「状態S」について、

$a(S) = 2$, $b(S) = 1$, $|S| = 2$ となる。



図11 「状態」S

したがって、この「状態」Sのエネルギーは、

$$A^2 B d$$

となる。

さらに、ある結び目の図 D について、すべての状態のエネルギーを足し合わせたものを、 $\langle D \rangle$ と書くことにすると、図 7 の三葉結び目 T の状態については、

$$\langle T \rangle = A^3 d^2 + 3A^2 B d + 3AB^2 + B^3 d$$

となる。このような (d を変数とする) 多項式が結び目の不変量であり、これを **ブラケット多項式** と呼ぶ (正確には、結び目のもつ「ひねり」を考慮すべきである)。

しかし実はこの場合、結び目のひねりを取る操作に関しては正確な不変量とはいえない。そこで、結び目 D に一定方向の向きを与える。

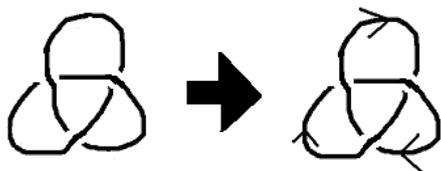


図 12 向きのつけ方(例)

このとき、それぞれの交叉に対して、図 13 のように数値 ± 1 を与える。結び目 D について、

$$(\text{正交叉の数}) - (\text{負交叉の数})$$

を、 D の **ひねり数(writhe number)** と呼び、 $w(D)$ で表す。

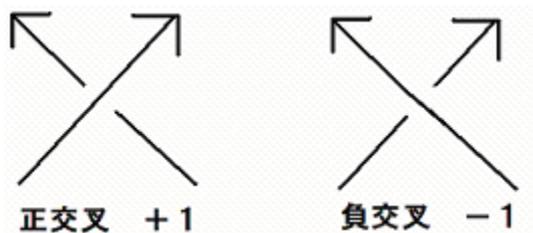


図 13 交叉の正負の定め方

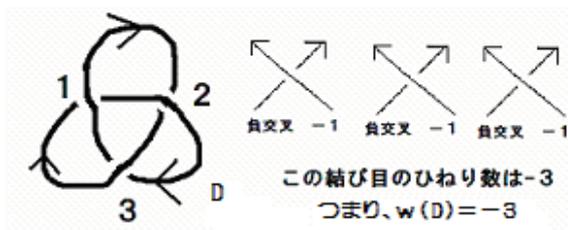


図 14 ひねり数の計算例

このひねり数 $w(D)$ を次のように用いて、不変量 $f(D)$ を次のように定義することができる。

$$f(D) = (-A)^{-3w(D)} \langle D \rangle$$

ここで、 $B = A^{-1}$, $d = -(A^2 + A^{-2})$ という変数変換を行っている。よって、三葉結び目 T の不変量は次のようになる。

$$\begin{aligned} f(T) &= (-A)^{-3w(T)} \langle T \rangle \\ &= (-A)^{-3 \times (-3)} (A^3 d^2 + 3A^2 B d + 3AB^2 + B^3 d) \\ &= -A^{16} + A^{12} + A^4 \end{aligned}$$

実際に、図 15 の 2 つの結び目で考えてみる。

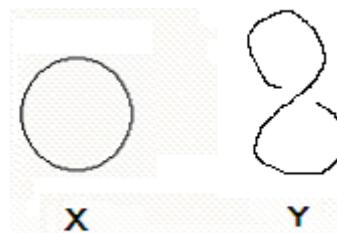
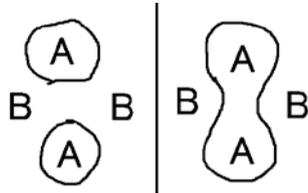


図 15 2つの結び目

この 2 つはどちらも自明な結び目である (つまり同値である) ことは明らかである。まず、ブラケット多項式を用いて、それぞれの総エネルギーを計算する。結び目 X については、

$$\langle X \rangle = A^0 B^0 d^{1-1} = 1$$

となる。これに対して、結び目 Y は



と分けられ、総エネルギーは

$$\langle Y \rangle = A^0 B^1 d^{2-1} + A^1 B^0 d^{1-1} = A + Bd$$

となる。つまり、ブラケット多項式は

$$\langle X \rangle \neq \langle Y \rangle$$

となり、一致しない。

では、ひねり数を導入してみたらどうなるだろうか。X はひねりがない(交叉をもたない)ため、 $w(X) = 0$ であることは直ちにわかる。一方、Y に図 16 のように向きを入れる。



図 16 Y に入れる向き

このとき、(向きをどちらに決めても結局同じになるのだが) ひねり数は $w(Y) = +1$ となる。そこで、それを

$$f(Y) = (-A)^{-3w(Y)} \langle Y \rangle$$

へ代入すると、

$$f(D) = (-A)^{-3 \times 1} (A + Bd) = (-A)^{-3} (A + Bd)$$

となる。ここへ $B = A^{-1}$, $d = -(A^2 + A^{-2})$ を代入すると、

$$f(Y) = -A^{-3} \{A - A^{-1}(A^2 + A^{-2})\}$$

より、 $f(Y) = 1$ であるため、 $f(X) = f(Y)$ が成り立つ。

■ 絡み数・ねじれ数・ライジング数

以下、今回のテーマ(結び目と DNA の関係の一端を考察すること)に必要な不変量を紹介する。

(1) 絡み数

絡み数(linking number)は、絡み目の 2 成分が、どれくらい絡み合っているかを示す数値であり、ライゲマイスター移動に関して不変である。以下にその定義を示す。

- ① 絡み目の個々の成分に向きをつける。
 - ② 下図のように、片方の交差点を +1、もう一方を -1 とし、これを絡み目の各々の交差点において当てはめる。
- ※ここでいう交差点とは、異なる結び目同士の交差点だけを指す。同じ 1 つの結び目の中での交差点は、ここでは含まない。
- ③ 各交差点に付けられた数の総和を求め、2 で割る。これが絡み数となる。

※絡み目の交差点数は必ず偶数個なので 2 で割っても整数となる。

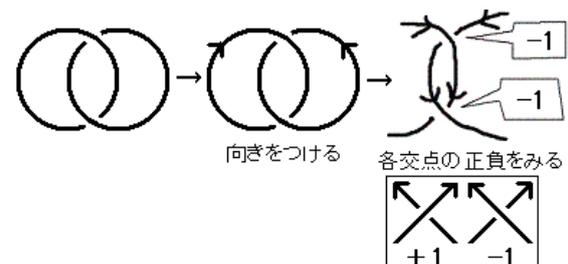


図 17 交差点での数字のつけ方

上図においては、絡み数は

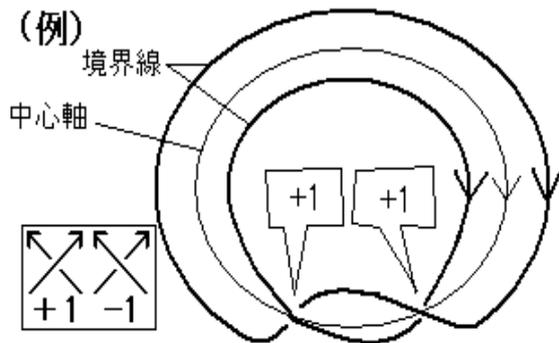
$$\frac{(-1)+(-1)}{2} = -1$$

となる。以下、絡み目 R の絡み数を、 $Lk(R)$ で表すことにする。

(2) ねじれ数

ねじれ数(twist number)は、リボンがどれくらい螺旋を描いているかを示す数値である。絡み目の一種であるリボンに対する不変量で、リボンが空間内を占める位置に依存し、リボンを動かすと、それに伴い変化する。

この不変量は、リボンの中心軸と、リボンの境界線の 1 本とが成す交叉点で定められる +1 と -1 の、総和の半分である(このとき、境界線は 2 本のうちどちらを選んでも、必ず同じ値になる)。以下、リボン R のねじれ数を、 $Tw(R)$ で表す。



$$\Rightarrow \text{ねじれ数 } Tw(R) = \frac{1+1}{2} = +1$$

図 18 ねじれ数の計算例

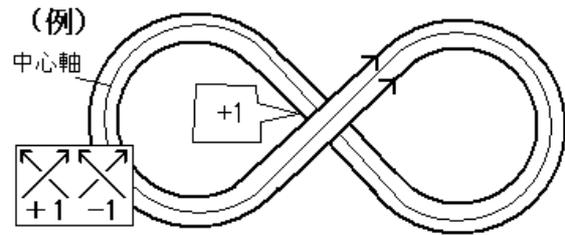
(3) ライジング数

ライジング数(writhing number)は、リボンがどれくらい重なっているかを計る量である。リボンの不変量であり、リボンが空

間内を占める位置に依存し、リボンを動かすと変化する。

この数は、リボンの中心軸同士が成す交叉点で定められる +1 と -1 の総和である。

ここでは、リボン R のライジング数を、 $Wr(R)$ で表す。



$$\Rightarrow \text{ライジング数 } Wr(R) = +1$$

図 19 ライジング数の計算例

■ 3つの不変量の関係式

まったく独立だったリボンに関する不変量に思われる絡み数、ねじれ数、ライジング数の間に、

$$Lk(R) = Tw(R) + Wr(R)$$

という関係が発見された。実際に、図 20 のようなリボン R で考えると、 $Lk(R) = +7$ 、 $Tw(R) = +8$ 、 $Wr(R) = -1$ であるので、上の関係式が成立している。

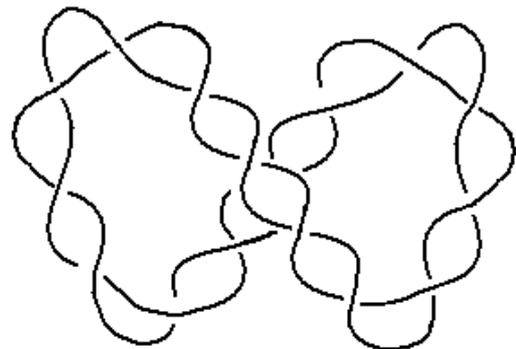


図 20 リボン R

■DNA と 3つの不変量

さて、以上の準備のもとで、結び目と DNA との関係について、考察してみたい。DNA は二重螺旋構造(double helix)であるから、これを一つのリボンがねじれているものとして考えることができる。よって、前項のリボンに関する

$$Lk(R) = Tw(R) + Wr(R)$$

という関係をもとに、DNA の変化を考えることができる。

ここで、トポイソメラーゼ(topoisomerase, 略称 **topo**)という酵素が DNA に及ぼす作用について考える。トポイソメラーゼは細菌からヒトに至るまで、すべての生物に広く分布しており、DNA の増殖に必須な、つまり生命維持に不可欠な酵素である。

トポイソメラーゼは、DNA 鎖を切断し、ねじれを作ったり解消したりした後、再結合する働きをもつ。

トポイソメラーゼ II 型 (topo II) の働きを下図に示す。この型は、二重螺旋を描く 2本の DNA 鎖を切断し、ねじれを作ったり解消したりしてから再結合する。例えば、DNA の一部分に topo II が作用して、そこに+1のねじれを作る。

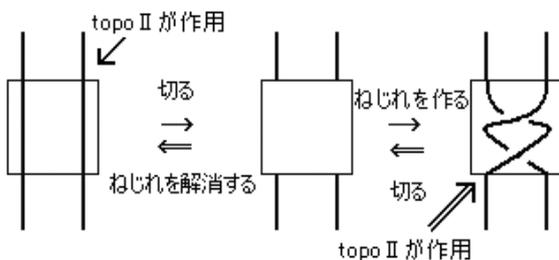


図 21 トポイソメラーゼ II (topo II) の作用

これを繰り返すと、その DNA は長さのわりにはねじれが多くなりすぎ、これを自

ら逆にねじれて、解消しようとする。つまり、 $Tw(R)$ が減るわけである。ここで、

$$Lk(R) = Tw(R) + Wr(R)$$

であり、 $Lk(R)$ はねじれの解消によって変動しないので、上の式が成り立つようにするために、 $Wr(R)$ が増えることになる。これは、もともと螺旋状だった DNA というリボンが、さらに空間内でよじれることを意味する。このようなよじれることを超螺旋(supercoiling)という(次頁図 23 参照)。このような超螺旋はわれわれの身近なところでも目にすることができる。例えば、絡み合った電話のコード(図 22)やドライヤーのコードなどである。



図 22 電話のコードにできる超螺旋

螺旋状態にあった DNA は超螺旋構造になってしまうが、実際には、酵素 topo II が作用して、密になった螺旋構造を解消する。この解消を繰り返しながら、mRNA は DNA を読み進める。これによって、DNA のねじれの数が増えすぎることなく、安定した状態を保って遺伝子情報を伝えることができ

る。

したがって、この考え方を使得、メッセージRNA (以下 mRNA) が DNA から遺伝子情報をどうやって読み取るのかを説明することができる。

- ① mRNA が DNA の二重螺旋のどこかに割り込み、そこから螺旋構造を押しやりながら徐々に情報を読み取っていく。
- ② DNA は押しやられることで二重螺旋構造が密になって (詰まって) いき、ついにこれ以上密になれないほど圧縮されてしまう。
- ③ これをさらに mRNA が読み取ろうとして前進すると、螺旋構造がほどけて、代わりに超螺旋が作られていく。こうなると、この螺旋構造や超螺旋構造を解消するとき、DNA は大きな被害を受けることになる。摩擦で発火する可能性すらあるといわれている。



図 23 超螺旋

このように、トポイソメラーゼは超螺旋を作ったり、逆に解消したりするのである。実は、DNA を複製するには、先にその超螺旋構造を解く必要がある。トポイソメラーゼは、以上の働きによって DNA を複製できる状態にし、複製終了後は、再び超螺旋

を形成するという役割を持っている。もし、トポイソメラーゼなしに、DNA が自らねじれて超螺旋を解こうとすれば、摩擦で発火してしまう。これこそ、トポイソメラーゼが生物に必須の酵素であるとされる所以である。

以上のように、結び目理論の考え方によって、DNA の変化を表し、考察することができるのである。

■ 細胞の視点から考える

DNA は自身のねじれを解消しようとして、超螺旋状態になるが、細胞の視点からみると、超螺旋状態が必ずしも悪いというわけでもない。例えば、図 24 において、P の部分が、A,B の遺伝子を働かせる指示を出しているとするとき、遺伝子 B は P の部分から離れすぎている。

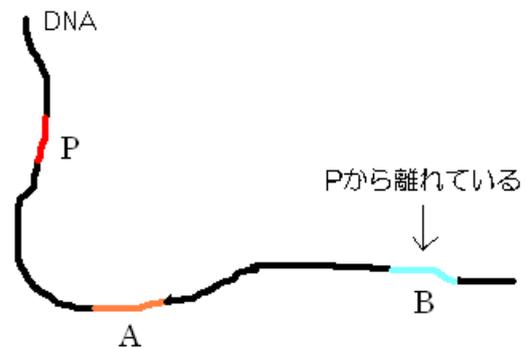


図 24 超螺旋ではない場合

しかし、DNA が超螺旋状態になると、DNA がねじれて絡まってくるため、図 25 にあるように、P の部分と A,B の部分の距離が縮まってくる。したがって、細胞からすると、遺伝子に指示を出しやすいという利点がある。したがって、DNA が超螺旋状態になっているほうがよい場合もある。

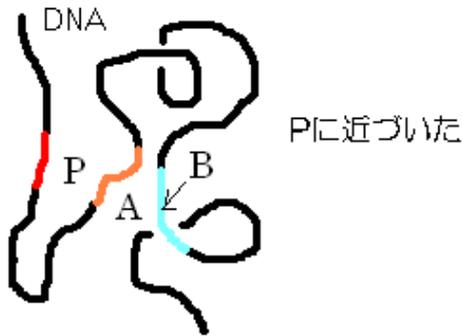


図 25 超螺旋である場合

■タングル

DNA の結び目問題に関して考える際、タングルを理解しておく都合が良い。

タングル(**tangle**)とは結び目や絡み目が射影されている平面において、結び目や絡み目がちょうど4点で交わるような円で囲まれた領域をいう。尚、結び目や絡み目が円と交わる4点はいつも磁石の4方向NW(北西), NE(北東), SW(南西), SE(南東)にあるとする。

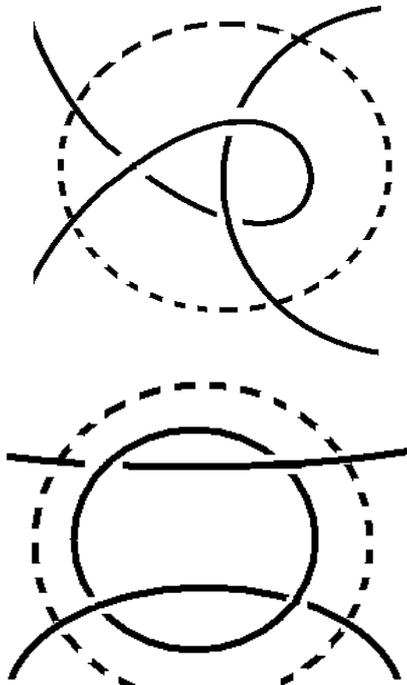


図 26 タングルの例

■タングルにおける同値

2つのタングルがあって、タングルの4端点は止めたままで、タングル内の結び目の部分が円領域の外を出ないようにしながら、ライデマイスター移動により他方に移り変わるとき、2つのタングルは**同値 (equivalent)**であるという。

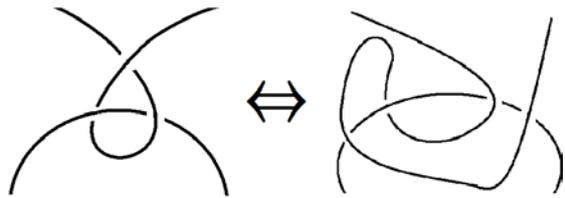


図 27 同値なタングルの例

■有理タングル

有理タングル(**rational tangle**)とは、タングルを数字に変えたものであり、以下の法則に従って構成されるタングルのことを表す。図 28,29 を参照されたい。

- ① 水平方向に2本の線を撚り合わせる。
- ② NWとSEの対角線に対して鏡映させる。
- ③ 右の2本の線を撚り合わせる。
- ④ ②~③の繰り返し。
- ⑤



図 28 有理タングルの構成(1)

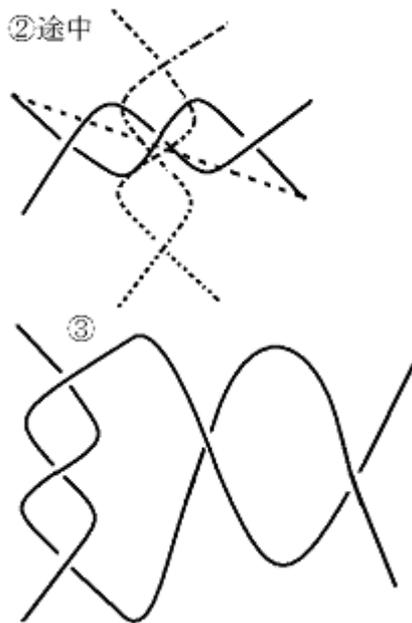


図 29 有理タングルの構成(2)

このとき、螺旋の回転方向を数値化するのだが、交点の上を通る結び目の部分(上道)が正の傾き(左下から右上の傾き)であるなら、それは正になる。例えば、①の図では上道が正の傾きであり、ねじれている回数は3回なので①は「3」と表す。

③では、最初に作った左の螺旋も上道が正の傾きでねじれている回数は3回なので、「3」である。次に作った右の螺旋は上道が負の傾きでねじれている回数は2回なので「-2」となり、③は「3 -2」である。

有理タングルが同値であるかを調べるのに極めて単純な方法がある。2つのタングル、「-2 3 2」と「3 -2 3」があるとして、この数列に対応するいわゆる**連分数(continued fraction)**を計算する。例えば「-2 3 2」なら、

$$2 + \frac{1}{3 + \frac{1}{-2}} = 2 + \frac{1}{\frac{5}{-2}} = 2 + \frac{2}{5} = \frac{12}{5}$$

として、「3 -2 3」なら、

$$3 + \frac{1}{-2 + \frac{1}{3}} = 3 + \frac{1}{-\frac{5}{3}} = 3 - \frac{3}{5} = \frac{12}{5}$$

と計算する。このような計算によって、2つのタングル「-2 3 2」と「3 -2 3」は同値であることがわかる。

4. 考察・感想

本研究を通して、結び目理論が DNA の話と密接につながっていることがわかった。また、酵素の働きや mRNA が遺伝子情報を読み取る仕組みが数学を使ってモデル化できることを知った。

超螺旋状態になっている DNA 程早く移動することが可能となり、電極に置くと長螺旋状態になっている DNA が+に集まる。超螺旋状態の DNA の割合や、ねじれ数を測定する事で酵素がどれだけ DNA に作用しているのかを理解する助けになるだろう。

また、数学的な側面としては、結び目という幾何の対象が、不変量を通して、多項式という代数の対象で語られていることに興味をおぼえた。

5. 今後の課題

ブラケット多項式以外によく知られている、ジョーンズ多項式やアレキサンダー多項式、コンウェイ多項式などの不変量を理解するとともに、ブラケット多項式がライデマイスター変形をしても不変である理由の裏づけを行いたい。

また、結び目理論を DNA と関係付けることはできたが、細胞の視点を加えて考察したい。そして、細胞の他にどのような視

点から結び目理論と DNA が関わっていくかを調べたい。

さらに、DNAだけではなく、他の分野にも応用できないか、さらなる研究を行いたい。

6. 参考文献

- [1] 「結び目の数学」、C.C.アダムス著、金信泰造訳、培風館(1998)
- [2] 「結び目と量子群」、村上順著、朝倉書店(2000)
- [3] 「曲面・結び目・多様体のトポロジー」、S.C.カールソン著、金信泰造訳、培風館(2002)
- [4] 「結び目のお話」、小林毅著、講義資料(2006)
- [5] 「DNA の冒険—二重螺旋から超螺旋へ—」、菊池韶彦著、岩波書店(1993)

7. 謝辞

今回の研究にご指導して下さった佐藤先生、川口先生に深く感謝します。また、本研究に際し、助言と激励をいただきました奈良女子大学の小林毅先生にも深く感謝いたします。さらに、助言を下さいました河合先生、近藤先生にも感謝いたします。

グラフ理論で最短路問題を考える

5年A組 太田 英利
5年A組 辻 春花
5年B組 中尾 邦光
指導教諭 川口 慎二
指導教諭 佐藤 大典

1. 要約

サイエンス研究会数学班（以下、数学班）は2つのテーマに分かれて研究活動を行っている。5年生は、グラフ理論について研究しており、身近な事象に関連付けて、グラフの諸性質を考察している。このレポートでは、その一例を紹介したい。

キーワード グラフ、重み、重みつきグラフ、経路、最短路問題

2. 研究の背景と目的

グラフ理論は、美しい。その美しさは、単に、グラフ理論そのものがわかりやすいからではなく、それ以上に、数学以外の場面でもグラフ理論がよく用いられることに由来するもいえるのではないかと考える。

このグラフ理論の美しさを知ることが目的とし、このレポートにおいては最短路問題を考えることを目標としたい。そのために、この問題の考え方をを用いることによって解決できる、JR西日本の移動も考えた

い。
なお数学班では、これまでオイラーの一筆書き定理などのグラフの性質を研究してきたが、これ以降もグラフ理論に関する研究をさらに進めようと考えている。

3. 研究内容

最短路問題を考える前に、問題の考察に必要なグラフ理論に関する基礎知識をはじめにまとめておく。

<グラフの定義>

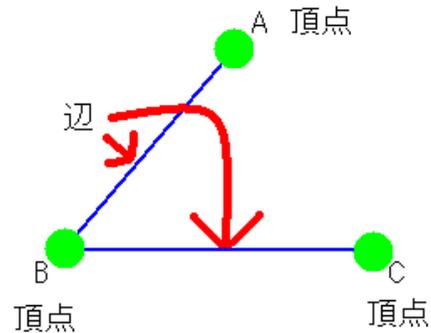


図1

グラフ(graph)とは、図1のように、いくつかの点があり、それらがいくつかの線で結ばれている図形のことである。

グラフにおいて、それぞれの点のことをグラフの**頂点(vertex)**、それぞれの線のことをグラフの**辺(edge)**という。

また、各頂点から出ている辺の数をその頂点の**次数(degree)**という。例えば図1の頂点A,B,Cの次数は、それぞれ1,2,1となる。

それでは次に、最短路問題を紹介しよう。この問題は、後に紹介するある種のアルゴリズム(algorithm)を用いて考えることができる。言い換えると、効率のよいアルゴリズム、つまり、有限回の着実な方法で、問題の解決にたどり着くことができる。

<最短路問題>

図2のような始点Aから終点Lへいたる経路を示した地図において、AからLへいたる最短の経路(最短路)を求めたい。ただし、それぞれの経路についている数字は、その2点間の距離を表している。

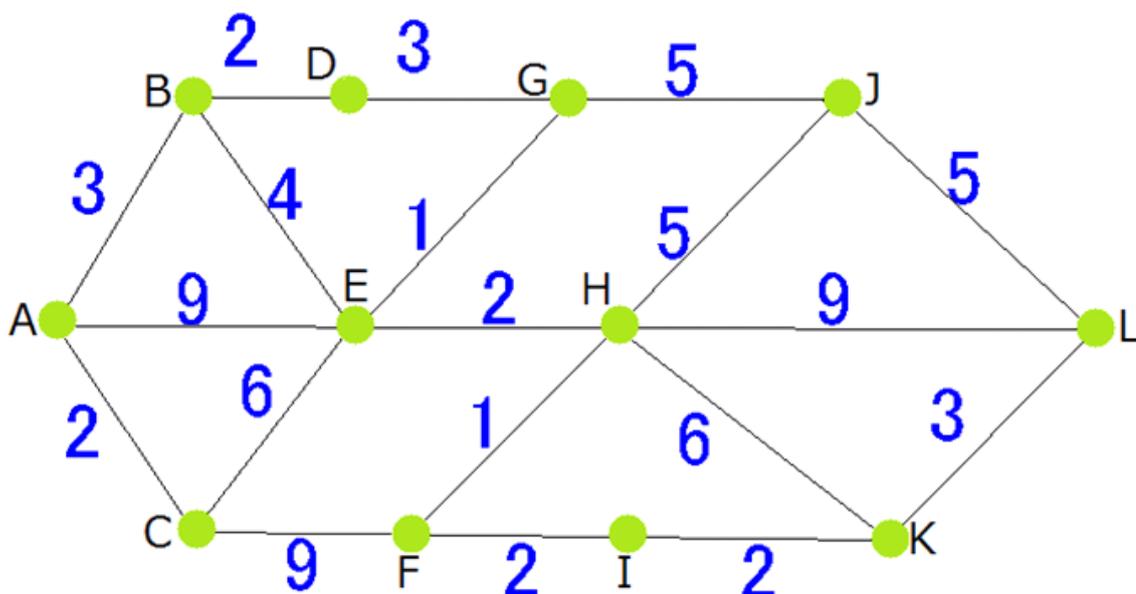


図2の中の数字を、グラフの各辺の重み(weight)といい、このようなグラフを重み

つきグラフ(weighted graph)という。ただし、一般にこの重みがいつも2点間の距離を表しているとは限らない点に注意が必要である。2点間を移動するのに必要な時間や費用を表している場合も想定できるわけである。

このグラフにおいて、AからLにいたる最短路を考えたい。そのためには、始点Aから各頂点までの最短距離を、Aに近い点から順番に、次の順序で各頂点につけていけばよい。

図2 (参考文献[4]より作成)

最短路の決定方法

- ①始点Aに最も近い頂点Cを考え、頂点Cにラベル2をつける。
- ②始点Aから次に近い頂点Bとその次に

近い頂点Eを考え、仮のラベル3と9をそれぞれにつける。

- ③ところが、頂点Eは始点Aから頂点Bを経由した方が近いので、頂点Eのラベルを7に訂正する。

④この作業を繰り返す。すると、図3のように各頂点にラベルをつけることができる。

⑤終点から、さかのぼって最短路を考えていくと、図3のような最短路が得られる。

<なぜ、終点から考えるのか>

さて、上の⑤において、最短路を求める際に、我々は終点から順番に考えていった。番号(ラベル)をつけるときには始点から付

けていったのに、最短路決定のときにはどうして始点から考えることをしないのだろうか。

始点から考えることをしない理由は、ひとつの頂点から、複数の頂点に向かう辺に同じラベルがついている可能性もあるからである。もしそうであれば、経路が何通りも考えられるが、それらのいずれもが最短であると言い切ることができない。一方、終点から考えれば、その問題が生じることはないため、終点から考えたわけである。

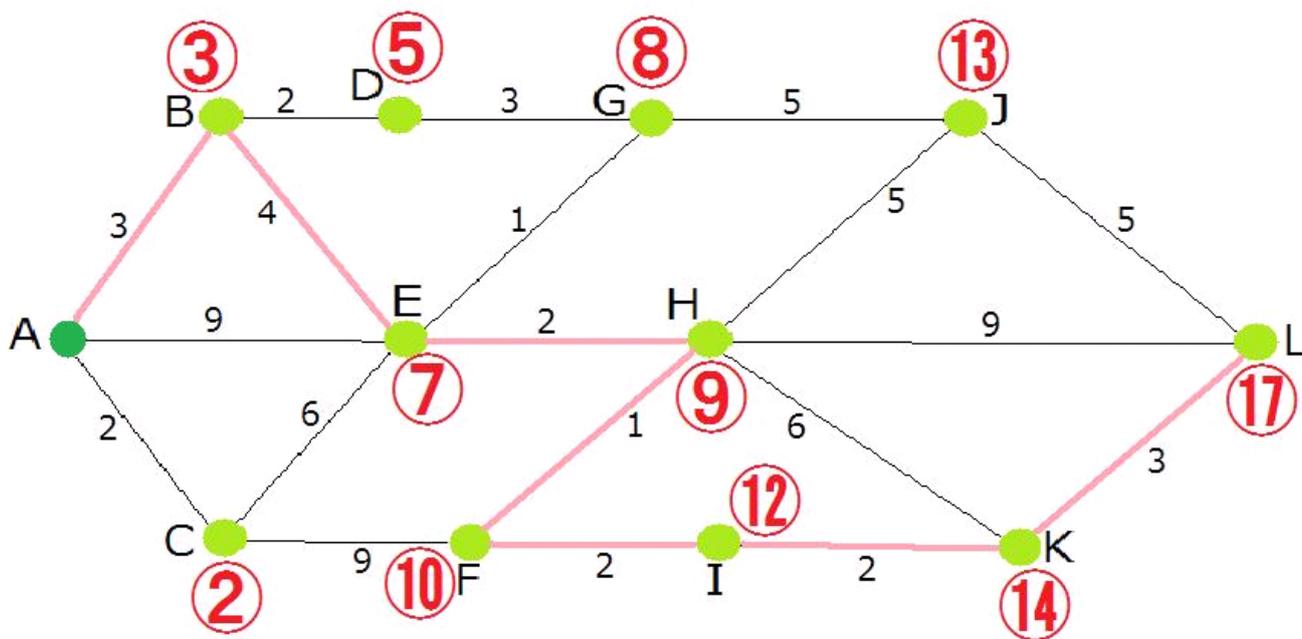


図3 (参考文献[4]より作成)

4. 考察

以上の準備のもと、実際の事例として、次の問題を考察してみよう。

<奈良から姫路までの移動問題>

問題 JRの路線を用いて、奈良から姫路まで移動したい。どの経路が最も効率的だ

ろうか。ただし、ここで効率的であるとは、通る駅数が最も少ない経路であることと考える。

<解法>

まず、JRの路線(次ページ図4)をグラフで表そう。グラフは下の図5のようにな

る。ただし、グラフの簡略化のために、一部の路線を省略している。

このグラフにラベルをつけ、最短路を求めると図 6 のようになる。以上より、問題

に対する答えとして、最短路は 57 の駅を通過する「奈良→王寺→天王寺→大阪→尼崎→加古川→姫路」という経路である。

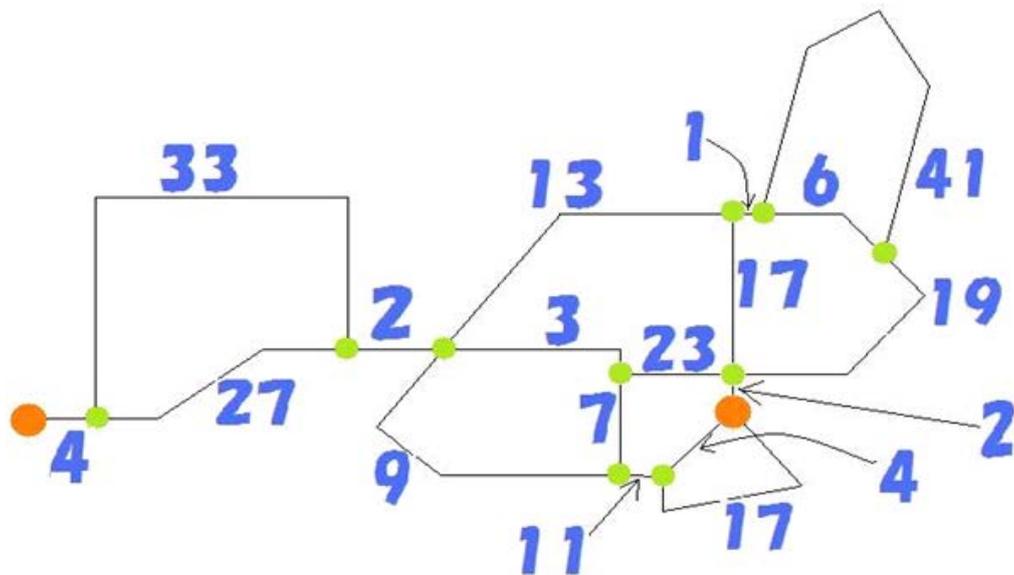


図 5 重みつきグラフ

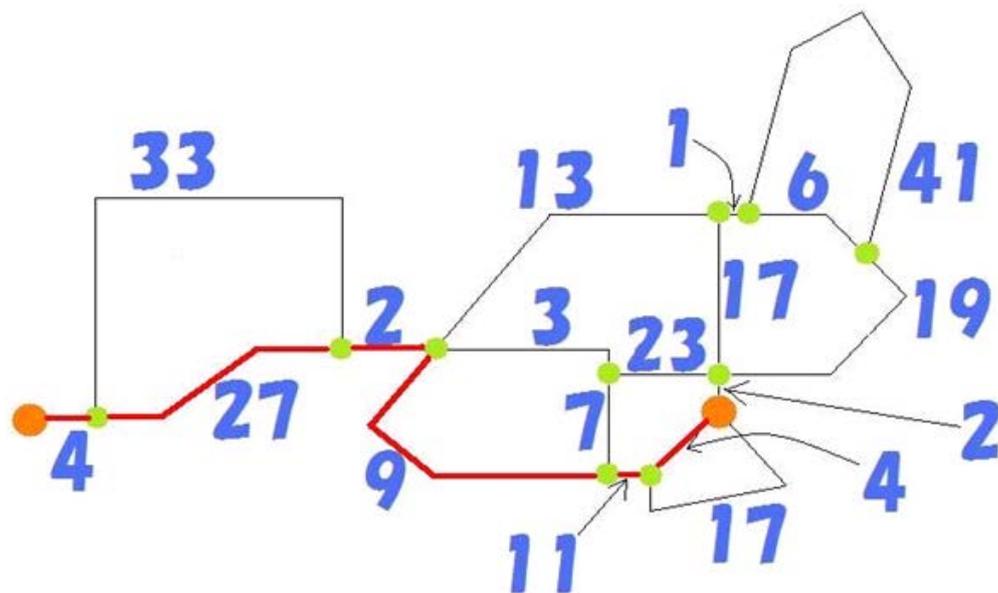


図 6 奈良－姫路間の最短路

JR西日本路線図

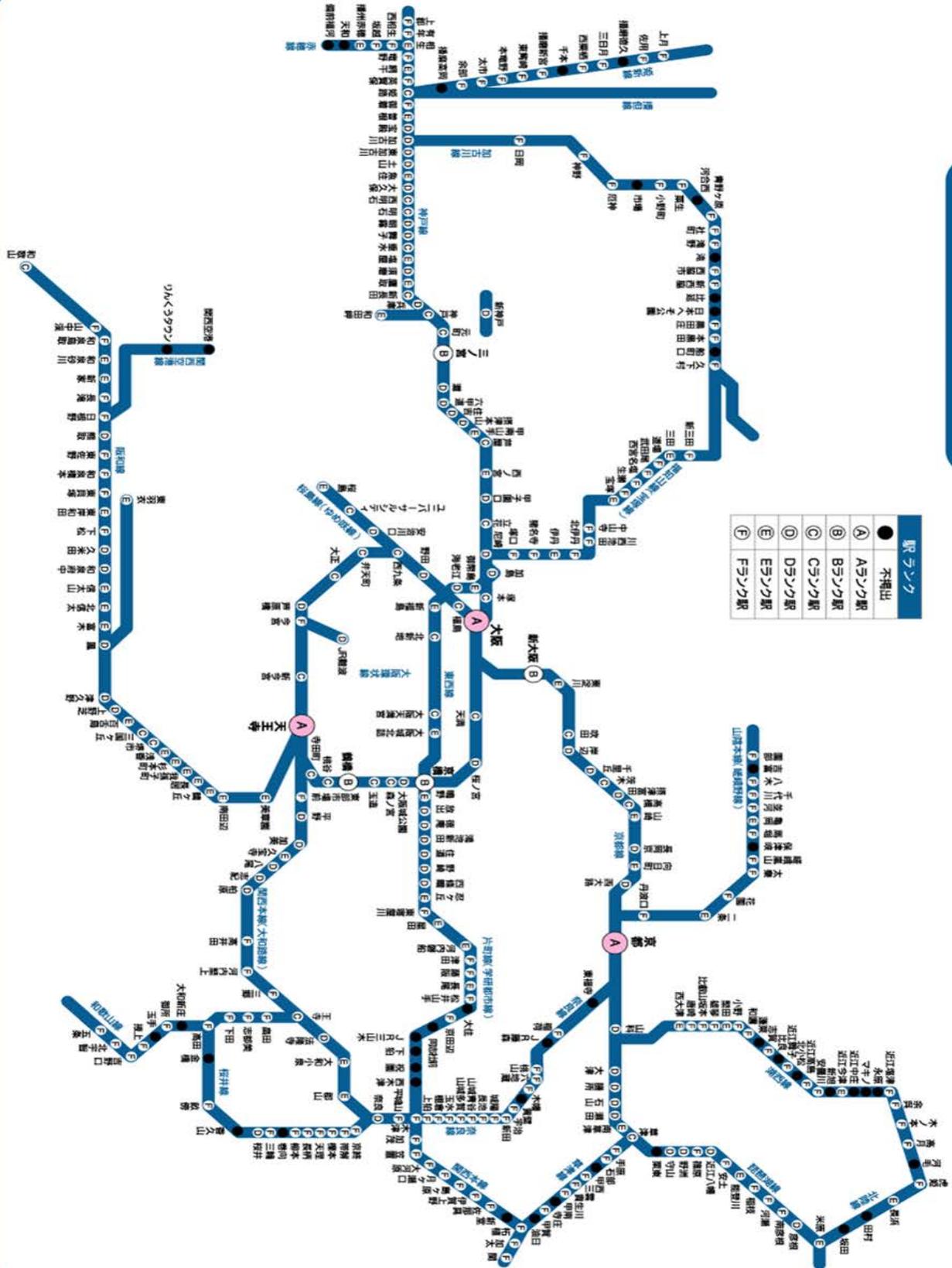


図4 (<http://www.nihonsenkousha.co.jp/railmap/jr.gif>)

ここでは、グラフの重みとして、「通過する駅数」を採用している。

5. 今後の課題

この論文では、最短路問題を考えることができた。最短路問題を解決するためには、着実に最短路を決定していく方法として、アルゴリズムというものを知る機会となった。

今後は、さらにグラフ理論の研究を進めたいと考える。

6. 参考文献

[1] 「数学とっておきの12話」(岩波ジュニア新書417)、片山孝次、岩波書店(2002)

[2] 「数学のひろば-柔らかい思考を育てる問題集-I・II」、ドミトリ・フォミン、セルゲイ・ゲンキン、イリヤ・イテンベルク著、志賀浩二、田中紀子訳、岩波書店(1998)

[3] 「NHK 高校講座 数学基礎 2004年度」、日本放送協会、日本放送出版協会編、日本放送出版協会(2004) p.86-89

[4] 「グラフ理論入門 原書第4版」、R.J.ウィルソン著、西関隆夫・西関裕子共訳、近代科学社(2002)

7. 謝辞

サイエンス研究会数学班の活動において、川口先生と佐藤先生に、多大なご指導を賜りました。

また、もうひとつのサイエンス研究会数学班(6年生)の先輩方には、多くのアドバイスをいただきました。

この場で、深く感謝申し上げます。

ブレファリズマの巨大化メカニズムの解明に向けて

6年C組 東野 友哉
4年B組 中澤 春香
4年B組 永井 伸明
指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

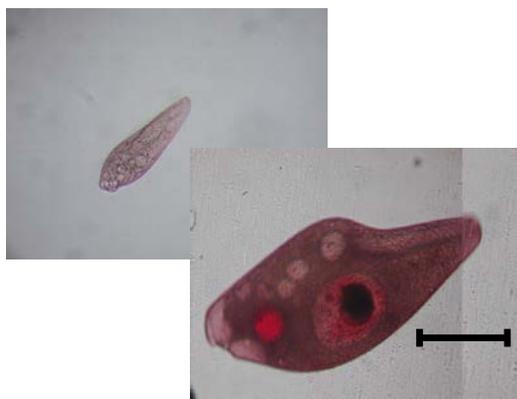
繊毛虫ブレファリズマは、飢餓状態になると共食いすることが知られている。この現象が起きる際の形態変化の基礎研究を行なった結果、共食いをすると、細胞サイズと大核が巨大化することが示唆された。しかし、細胞が巨大化するしくみはまだ明らかにされていない。そこで、本研究では、餌のサイズとブレファリズマの細胞サイズの変化との関連性を調べるために、ブレファリズマに大きさの異なる4種類の餌を与えて培養し、細胞サイズの変化を、日を追って観察した。その結果、ブレファリズマは大きい餌を食べると細胞サイズが大きくなるという傾向が見られた。

キーワード ブレファリズマ、共食い、大核、DAPI染色、銀染色

2. 緒言

ブレファリズマは特定の環境下（飢餓状態）に置かれると、共食いをし、巨大化するという性質を持っている。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」とよぶことにする。右の図は通常サイズのブレファリズマ（左）とジャイアントブレファリズマ（右）である。バーは200 μm 。（写真右下）

これだけ大きな変化を示すジャイアントブレファリズマだが、1980年のレナルツらの報告以降詳しい研究はなされていない。そこで、本研究では、ジャイアントブレファリズマが形成される過程を詳しく観察することにした。また、ジャイアントブレファリズマのでき方も共食いに注目して観察することにした。



3. 研究目的

- ・ジャイアントブレファリズマは、どのような細胞なのか調べる。
- ・細胞の巨大化がどのように起こるのかも調べる。

4. 研究内容

研究 I

I - (1) 仮説

ジャイアントブレファリズマの形態は、細胞サイズに対して口径サイズが肥大化する。

I - (2) 研究方法

①培養方法

実験材料：*Blepharisma japonicum*
R1072株、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する(25 $^{\circ}\text{C}$ 、2日間)。

②観察方法

カウント法とサイズ測定

毎日1000 μl ずつ3回サンプリングし、実体顕微鏡下で個体数のカウントを行う。また、光学顕微鏡を用い、デジタルカメラで細胞を撮影する。その後、パソコン画面上で長径と短径、そして口径のサイズを測定する。

大核の面積測定

ブレファリズマをカルノア液で固定し、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する。

繊毛列と膜板帯の測定

ブレファリズマを銀染色し、光学顕微鏡を用いデジタルカメラで細胞を撮影し、Scion Imageで繊毛列の幅と膜板帯の幅を測定する。(膜板帯とは、ブレファリズマの口の周りにある特殊化された繊毛であり、繊毛列とは、ブレファリズマの細胞表面に列を成すように並んだ繊毛である。)

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

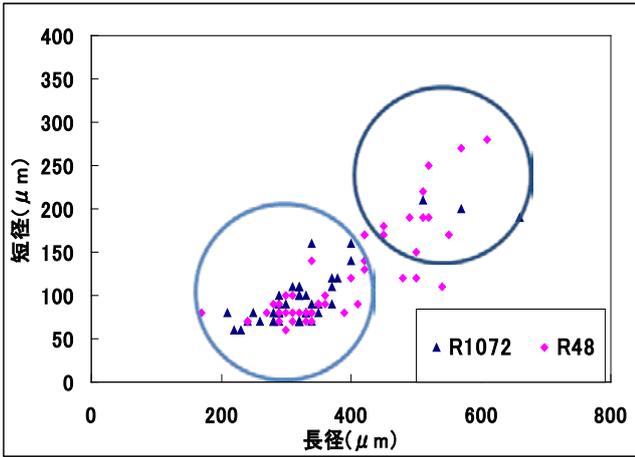


図1 長径と短径の関係

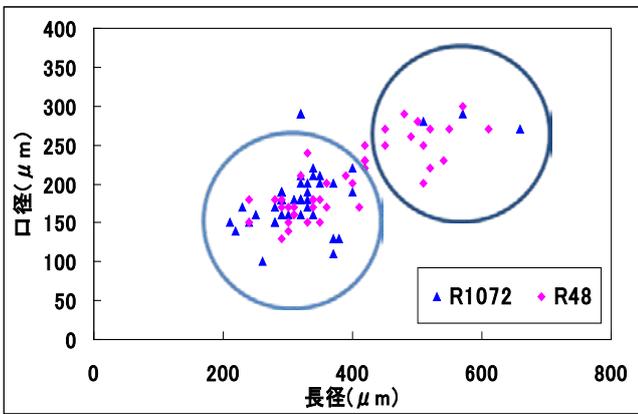


図2 長径と口径の関係

図1と図2は、サンプリングしたブレファリズマの長径、短径、口径の結果である。長径が約300 μm 付近のブレファリズマが通常型ブレファリズマであり、長径が約600 μm 付近のブレファリズマがジャイアントブレファリズマである。図1のグラフより、ジャイアントブレファリズマの長径に対する短径の比は、通常型ブレファリズマの長径と短径の比に等しいことが分かった。また、ジャイアントブレファリズマの長径と口径の比と、通常型ブレファリズマの長径と口径の比に等しいことが分かった。

図3は、大核面積の測定結果である。通常型ブレファリズマの大核に比べ、ジャイアントブレファリズマの大核は2.8倍もの大きさになっていることが分かった。また、図4のように1本の長い大核が途中で枝分かれして大核面積を大きくしているようであった。

銀染色を行った結果、図5のようにブレファリズマの繊毛の基部が染色された。そして、繊毛列の幅では、通常型ブレファリズマに比べ、ジャイアントブレファリズマのほうが大きくなっていた。しかし、膜板帯の幅は、通常型ブレファリズマとジャイアントブレファリズマでは違いがなかった(図6参照)。

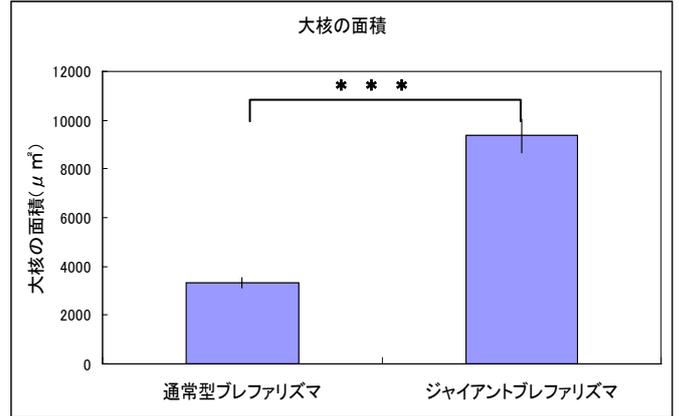
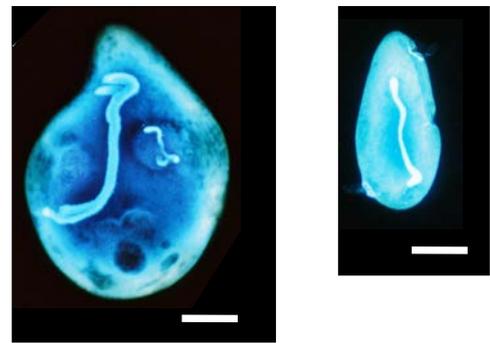


図3 大核面積の比較



(バーは100 μm)

図4 ジャイアントブレファリズマ(左)と通常型ブレファリズマ(右)の蛍光顕微鏡写真

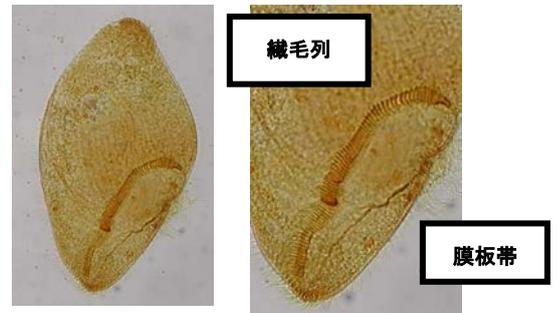


図5 銀染色によって染色されたブレファリズマ(左)と口部の拡大(右)

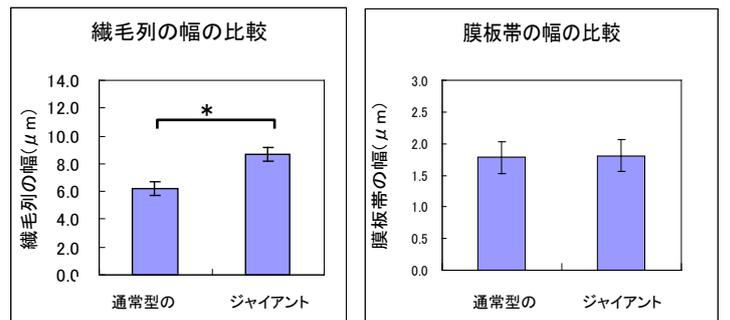


図6 繊毛列の幅の比較(左)と膜板の幅の比較(右)

ここで図1と図2を、ブレファリズマの株の違いに注目して検証してみた。すると、R1072株よりもR48株のほうがもとの細胞サイズにばらつきがあり、ジャイアントブレファリズマの発生個体数も多くなっている。これは、「共食い」をしやすい株のほうがジャイアントブレファリズマになりやすいのではないかと考えられる。そこで、餌のサイズによって細胞サイズが左右されるのか調べることにした。

研究Ⅱ

Ⅱ-① 仮説

餌のサイズが大きくなるとブレファリズマの細胞サイズも大きくなる。

Ⅱ-② 研究方法

① 培養方法

実験材料：*Blepharisma japonicum* R48株

餌の種類：

餌の名前 (学名)	細胞サイズ
小型のブレファリズマ (<i>Blepharisma</i> sp:A)	200 μm
ゾウリムシ (<i>Paramecium</i> sp:B)	100 μm
小型の繊毛虫 (<i>Sathophilus</i> sp:C)	40 μm
バクテリア (<i>Enterobacter aerogenes</i> :D)	1 μm

培養方法：4種類の餌を定常期になるまで培養し、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ガラス)に600 μl ずつ分注する。その中に10匹のブレファリズマを入れて、ブレファリズマの個体数変化と細胞サイズ変化を測定する。このとき、コントロールとしてSMB(ブレファリズマの生理食塩水、以下E)を600 μl 加えたものを用意する。

② 観察方法 (カウント法とサイズ測定法)

一日ごとにディプレッションスライド一枚(3サンプル)の細胞数を実体顕微鏡でカウントする。また、サイズ測定は実験Ⅰと同様に行った。

Ⅱ-③ 実験結果

4種類の餌を与えたそれぞれのブレファリズマは、図7と図8のような培養日数に対する個体数変化と細胞サイズ変化を示した。個体数変化においては、ゾウリムシ以外は培養日数に対して、個体数は順調に増えていった(図7)。また、培養3日目までは、大きい餌を食べたものほど細胞サイズが大きくなっ

ていた。しかし4日目以降では、細胞サイズは小さくなったが、コントロールよりは大きい状態を保っていた。ただし、ゾウリムシ(B)では細胞サイズに大きな変化は見られなかった(図8)。

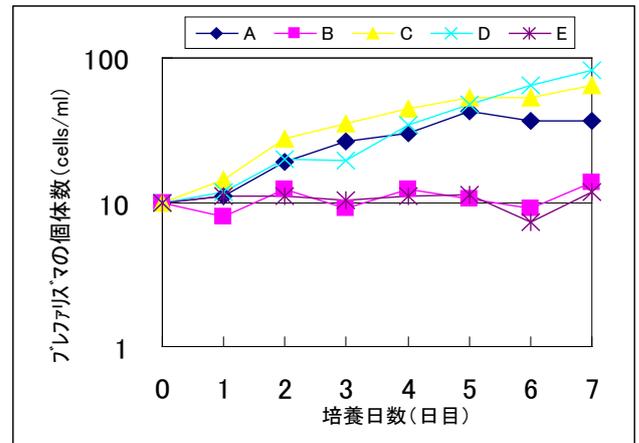


図7 個体数の変化

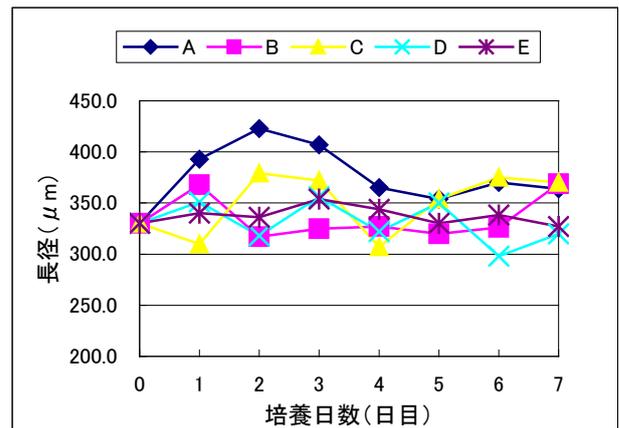


図8 細胞サイズの変化

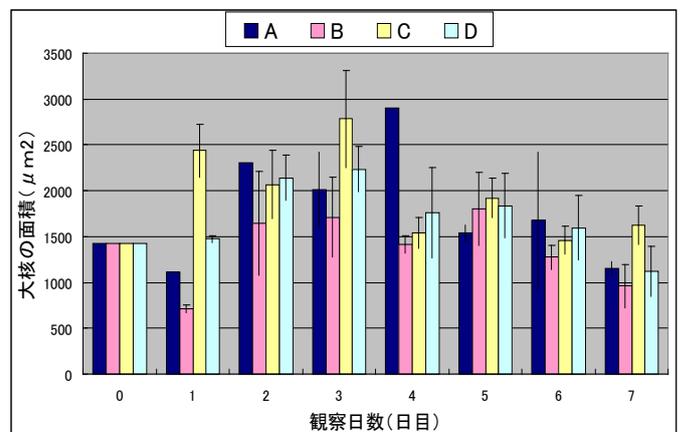


図9 大核の面積の変化

次に、与えた餌の違いによりブレファリズマの大核の面積は図9のような変化を示した。小型のブレファリズマ(A)はバクテリアに比べて、2日目から

大核の面積が大きくなっていた。また、小型の繊毛虫 (C) はバクテリア (D) に比べて、1日目からほぼ大核の面積が大きくなっていた。しかし、小型ブレファリズマは5日目に、小型繊毛虫は4日目に、ほぼもとの大核の面積に戻ってしまった。一方で、ゾウリムシ (B) を餌にしたブレファリズマの大核の面積は、バクテリア (D) に比べて大きくなっておらず、返って小さくなっていた。

5. 考察

通常型ブレファリズマとジャイアントブレファリズマの大核の面積の比較から、ジャイアントブレファリズマの大核は通常型のそれに比べて巨大化させていると考えられる。また、長径と短径、長径と口径の比が、通常型ブレファリズマとジャイアントブレファリズマでほぼ等しかったことから、ジャイアントブレファリズマは、体の一部が局所的に大きくなっているのではなく、全体的に大きくなっていると考えられる。そして、繊毛列の幅は大きくなっているのに、膜板帯の幅はほぼ変わらなかったことから、ジャイアントブレファリズマの繊毛列の数は、通常型のそれに比べて増えていない。しかし、口径が大きくなっているにも関わらず、膜板帯の幅が大きくなっていないことから、膜板帯の数が増えていると考えられる。

最も細胞サイズの小さいバクテリアを餌としていたブレファリズマと、小型繊毛虫、小型ブレファリズマを餌として食べたブレファリズマの細胞サイズの比較から、大きい餌を食べると細胞サイズもおおきくなると考えられる。そして、それらのブレファリズマは、細胞サイズが大きくなってからも個体数を増やしていることから、細胞サイズを大きく保ったまま分裂・増殖をしていると考えられる。さらに、それらのブレファリズマの細胞サイズが大きくなったとき、大核の面積も大きくなっていることから、細胞の巨大化には大核の巨大化が関係していると考えられる。そして、細胞の増殖が弱まり、細胞サイズが小さくなっていく(元のサイズに戻る)ところに、大核の面積がもとの大きさに戻ってきたことから、大きな餌が得られなくなると大核の面積が減少し、細胞サイズも減少すると考えられる。しかし、どちらが先に生じるのか、どのようにもとの細胞サイズに戻るのか今回の実験だけでは分からない。最後に、ゾウリムシで培養したブレファリズマの細胞数はほとんど増えず、細胞サイズと大核の面積ともに、巨大化するような変化が見られなかった。また、捕食されるはずのゾウリムシの個体数は、培養日数が多くなっても、減少しているようには感じられなかった(正確なカウントは行ってない)。これらのことから、ゾウリムシはブレファリズマの餌にならな

ったために、細胞サイズが大きくならず、それに伴い大核の面積も大きくならなかったと考えられる。つまりブレファリズマの細胞サイズには餌が大きく影響していると考えられる。

6. 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のできる過程は次のように予想できる。まず、最初に、餌を捕食したブレファリズマは分裂するための準備に入る。そして、大核を倍化させ、新しい口の原基を、既存の口の下部に形成する。分裂準備の整ったブレファリズマはこの後分裂をしてもとのサイズに戻るはずである。しかし、何らかの理由で分裂できずに、口の原基が、もともとあった口と合体してしまう。その結果、大核が倍加させた、細胞サイズの大きい細胞となり、口を形成する膜板帯の数も増えてしまうのではないか。

この仮説を検証するため、大核の巨大化がどの時点で生じるものなのか、その巨大化が分裂する細胞の大核の倍化と同じ過程を経ているのかを調べる必要がある。また、今回の実験では、細胞サイズがもとのサイズに戻ると、大核の面積ももとのサイズに戻るといふ結果を得たが、先にどちらが減少するのかも明らかにできなかった。よって、今後はこの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工夫を加え、調べていきたい。

7. 参考文献・サイト

- [1]「ブレファリズマの接合」、春本晃江・杉浦真由美、原生動物学会誌、第36巻(2003)
- [2] http://protist.i.hosei.ac.jp/Protist_menu.html 「原生生物情報サーバー」
- [3] <http://mail2.nara-edu.ac.jp/~masaki/> 「Call Biology Lab.」

8. 謝辞

ブレファリズマの株を分けていただき、培養方法をはじめ色々と助言を戴きました、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、ありがとうございます。また、ご指導いただきました、櫻井昭先生、矢野幸洋先生ありがとうございました。

プロトプラスト（細胞融合）による新植物の開発過程

3年C組 山中祥五

3年B組 市瀬拓人

指導教諭 矢野幸洋

1. 要約

本校私たちサイエンス研究会生物部プロトプラスト班は、プロトプラストによる、植物細胞の分離と融合による新植物（細胞）の開発過程の研究を行いました。

キーワード プロトプラスト 細胞壁 分解酵素液 細胞融合

2. 研究の背景

生き物はすべて細胞でできていて、植物は全て幹細胞でできているため1つの細胞から1つの個体としての植物へ育てられる全能性という能力を持っていることがわかっています。トマトとポテトを混ぜてポマトという植物を作った人がいるという話を聞いて、自分たちで新しい植物を作ることにはできないかと考え実験によって実際にやってみることにしました。

3. 研究目的

植物同士を融合させるために細胞を、細胞壁のない「プロトプラスト」という状態にしないといけないので、今回の実験ではプロトプラストにする最も効率のよい方法を実験により考える。最終的には2つの植物からプロトプラストをとり、それを細胞融合しできた細胞を育てて新しい植物を作る。

4. 研究内容

今回は、細胞融合による新植物の開発の第一過程として、まず、プロトプラストの作成を試みた。その中でも、最も効率よくかつ、良好な状態のプロトプラストを製作するため、いくつかの方法で実験をした。まず、プロトプラストを作るのには、1つの細胞をばらばらにする必要があるというのを基本とし、葉そのままの状態、葉をすりつぶしたもの、酵素液、簡易 DNA 抽出液、中性洗剤の方法でプロトプラストを作成し、観察した。液につけ、分解をさせたものについては、1時間後と1日後の状態を観察した。

(1) 仮説

簡易 DNA 抽出液は中性洗剤に比べ、食塩が入っており、更に、蒸留水で薄めているため、浸透圧が調節され、中性洗剤に比べ、より、良好な状態でプロトプラストを作ることが可能だと考えた。

(2) 研究方法

実験にはシロツメグサを用いた。様々な方法で実験をする必要があるので、次の方法で実験、観察を行った。

- 実験1 葉をそのままの状態を観察する
実験2 葉を乳鉢内で乳棒ですりつぶしたもの
実験3 DNAの簡易抽出液で細かく切った葉を1時間つけておいたもの
実験4 DNA抽出液につけて更に一日おいたもの
実験5 プロトプラストを作る方法で一般的な、酵素液で葉を細かく切って

1時間つけたもの

実験6 実験5の液にさらに1日つけておいたもの

<用いた薬品>

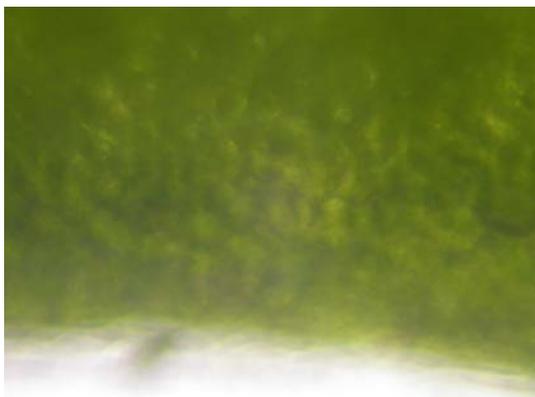
- DNA抽出液
- 食塩と台所用中性洗剤を混合したもの
- プロトプラスト酵素液
- セルラーゼ 1g、ペクチナーゼ 0.4g、マンニトール 13.2g に蒸留水を加えて 100ml にしたものである。

なお、これらの実験は25℃の恒温室の中で行った。

(3) 研究結果

	方法	時間	細胞壁の様子	細胞同士の変化
実験1	そのまま	なし	変化なし	変化なし
実験2	すりつぶし	なし	変化なし	バラバラになった
実験3	簡易DNA抽出	1時間	変化なし	変化なし
実験4	簡易DNA抽出	1日	変化なし	少しバラバラになった
実験5	酵素液	1時間	変化なし	変化なし
実験6	酵素液	1日	壊れていた	バラバラになった

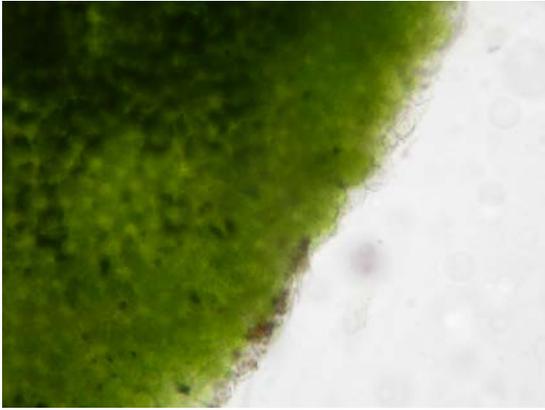
実験1 葉そのままのもの



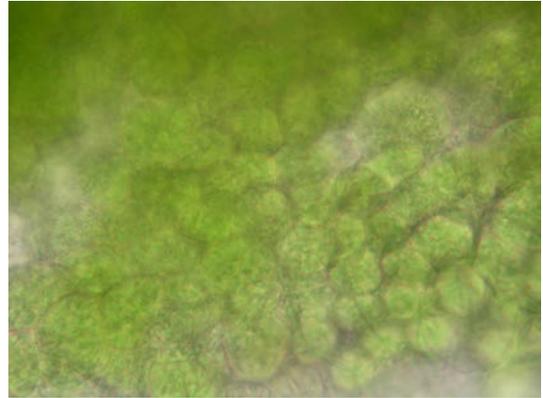
実験2 葉をすりつぶしただけのもの



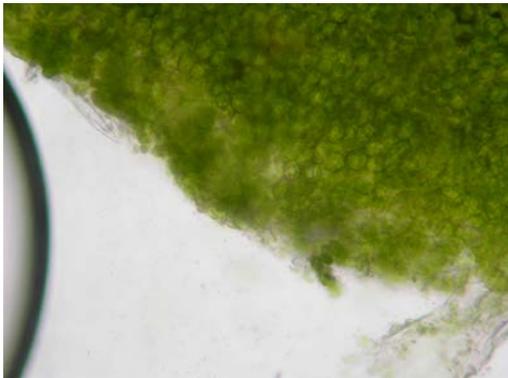
実験3 簡易DNA抽出液 1時間のもの



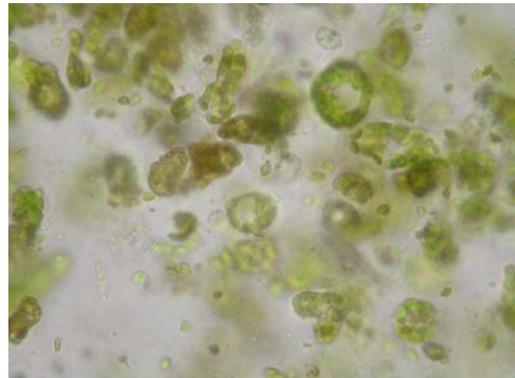
実験4 簡易DNA抽出液に1日つけておいたもの



実験5 酵素液に1時間つけたもの



実験6 酵素液に1日つけておいたもの



5. 考察

予想していた通り簡易 DNA 抽出液でも細胞同士をばらすことをできた。しかし、細胞壁を壊すことができるとまではいかなかった。

失敗の理由として考えられるのは、細胞壁を壊しつつ細胞のすべてを壊さない程度に薬品を調整することや食塩による浸透圧の調節は難しく、薬品の量のバランスが悪かったのではないかと考えられる。酵素液

を使う方法でプロトプラストを作るのは一般的な方法だったので比較的簡単にプロトプラストを作れることを実験によって確かめられた。

6. まとめと今後の課題

この実験を行うまでは、この先の実験も酵素液でやっていく予定だったが、簡易 DNA 抽出液による方法も洗剤、食塩、蒸留水だけを使う簡単な方法なため薬品の微調整を

してからこの方法でやっていこうと思う。
今後はプロトプラストを細胞融合する方法
や一つの細胞から植物を育てる方法を研究
していこうと思う。また、洗剤そのものを
使うのではなく界面活性剤のみでの実験も
行なおうと思う。

7. 参考文献・サイト

[1]「高等学校生物Ⅱ」、太田次郎・本川達
雄編、啓林館、p.101～103.

8. 謝辞

本研究では国立大学法人 奈良先端科学
技術大学院大学の高山教授、柴助教、岩野
助教から貴重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。

奈良公園の生態系 —シカの糞とシバの関係—

3年A組 林 由佳里

2年B組 古川 雄規

指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

奈良公園の生態系について、主にシカの糞とシバの関係を中心に研究を行った。その結果、生産者としてのシバが捕食者であるシカに食べられ、その種子が糞として奈良公園内に散布されていることが明らかになった。

キーワード シカ、シカの糞、シバ、シバの種子、日光、散布

2. 研究の背景

本校の近くには奈良公園があり、シカ達がシバを食べているのどかな風景を眺めながら、毎朝私達は学校へ通っている。奈良公園のシバはシカが食していることで常に短くカットされている。この自然の営みにシカとシバが強く繋がっているようで気になっていた。

また、本校3年の平井が2006年の研究でヤギとシカの糞を調べており、その中でシカの糞の中にシバの種子と見られる粒が見つかったことを報告している。その粒は本当にシバの種子なのか、なぜシバの種子が含まれているのか、糞内のシバの種子は本当に発芽するのか、発芽した芝はどうなるのかなどを疑問に思い、この研究に着手した。

3. 目的

本研究の目的は次の4点について明らかにすることである。

- ① シカの糞の内容物
- ② シバの生育環境と糞中のシバの種子数
- ③ 糞中のシバの種子が増加する時期
- ④ 糞中のシバの種子の発芽について

シカとシバの関係を中心に奈良公園の生態系を理解することによって、環境保護を考えるきっかけをつかむことができればよいと思

う。

4. 研究内容

<研究1>奈良公園のシバとシカについて

奈良公園に生息するシバは *Zoysia japonica* という日本によく生えているニホンシバで、5月～6月にかけて花が咲き、果穂は3～5cmとなる。(図1)



図1 シバの果穂(5月19日飛火野にて撮影)

また、奈良公園に生息するシカは天然記念物に指定されているニホンジカ (*Cervus nippon*) で、主にシバを食して生活する。シカの消化時間は食してから、だいたい48～72時間ぐらいである。

<シカの1日>

シカの1日を図2に示す。シカは日の出の

数分前～30分前から行動する。そして「朝の泊まり場」から1～数頭に分かれて1～2時間シバを食す。食後は数頭単位で食事場所から立ち去り、ゆっくりと日中休息する「休み場」にと移動する。ここで朝9～10時頃から夕方までそこに滞在する。午後3時を過ぎると歩き回って食事をするシカが目立ちだし「夕方の泊まり場」に1～数頭で食事をしながらゆっくり移動する。日没後あたりの真っ暗になった頃、シカは泊まり場に座り込んで反芻しながら休息をとる。2～3時間後再び立ち上がって食事をする。午前2時頃までは食事をして、「朝の泊まり場」で反芻しながら休息する。5月～6月頃まではシバの花や種子を食していることもある。「朝の泊まり場」と「夕方の泊まり場」の場所は決まっており、それぞれのシカは決まった泊まり場に集まって休息する。



図2 シカの1日の生活

<研究2>シカの糞の観察実験

(1) 仮説

- ① シカの糞にはシバの種子のほかに、繊維状のものが入っているだろう。
- ② シバの生育環境（例えば林の中、日なた、木の陰など）が違えば、糞の中のシバの種子の数も違うだろう。
- ③ シバは5月～6月にかけて種子が形成されるので同じ時期にシバの種子が糞の

中に多く含まれているだろう。

(2) 研究方法

- ① 採集場所を6区画にわけて調査する。分け方は次の図の通り。(図3)



図3 シカの糞の採取場所

また、A地区は昼前のシカの休息場所で、少し小高く風通しがよい。

B地区は昼過ぎの休息場所で、木陰ですずしい。

- ② シカの糞を採取し、実験室に持ち帰る。
- ③ 実験室で、糞を水の入ったシャーレに入れ、ピンセットで分解する。(図4)



図4 糞からシバの種子を取り出す

- ④ 実体顕微鏡を見ながら、糞の中からシバの種子と思われる細長い粒を取り出して別のシャーレに入れ、冷蔵庫で保存する。これは糞の中に入っている細菌やカビに種子が汚染されにくくする

ためである。

- ⑤ 飛火野にて採集したシバの種子と、糞の中から取り出した種子を細部まで比較するため、走査型電子顕微鏡で観察する。

(3)研究結果

シカの糞の調査および採集は、5/15、5/17、5/19、6/8、6/19、7/4、7/20、8/6 の8回である。

① シカの糞の内容物について

シバの種子は見つかったが、ほぼ完全なものの一部欠けたものの両方があった。その他に、植物の繊維やわずかな砂などが見つかった。

また、シカの糞の大きさとその中に含まれていたシバの種子数との関係においても調べた。その結果を表1に示す。いずれもI区で5/15と5/17に採取したものである。

表1 I区で採取した糞の大きさと1個の糞に含まれる種子数

番号	月日	大きさ (縦×横×高さ)	数
1	5/15	0.5×1.0×0.5	5
2	5/15	1.5×1.0×1.0	7
3	5/15	1.5×1.0×1.0	7
4	5/15	0.5×1.0×0.5	0
5	5/15	1.0×2.0×1.0	7
6	5/17	0.5×1.5×1.0	0
7	5/17	1.0×2.0×1.0	3
8	5/17	0.5×1.0×0.5	5
9	5/17	1.7×2.0×0.5	5
10	5/17	0.5×1.0×0.5	0

I区では、シカの糞1個から最大7個のシバの種子が見つかった。また、表からもわかるように、糞の大きさとその中に含まれるシバの種子数はあまり関係がないことがわかる。今後は大きさを調べる必要性がないということがわかった。

② シバの生育環境と1個の糞中のシバの種

子数について

II～VI地区については、5/19にシカの糞を採取し、1個の糞の中に含まれるシバの種子数を調べた。

表2 シカの糞1個の中にあつた、シバの種子数 (5月19日 採取)

個体番号と地区	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	平均
II地区	6	1	1	0	1	0			1.5
III地区	1	3	2	2	3	0	4	5	2.5
IV地区	6	5	0	3	3				3.4
V地区	0	5	2	4	0	1			2
VI地区	0	0	0	0	2				0.4

表1および表2より、I～V地区については、日なたでシバが青々と茂っており、ほとんどの糞中に種子が含まれていた。VI地区については、日陰でシカの休息場となっており、糞はほとんど見られなかったし、含まれる種子数も少ない。この結果より、今後は地区に分けず、日なたで、シバが茂っているところの糞だけを採取することにした。

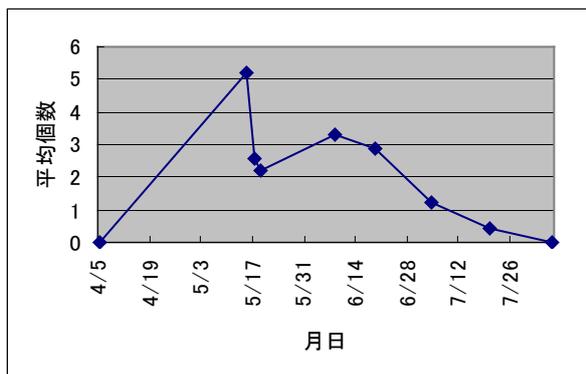
③ 糞中のシバの種子が増加する時期

4月の初めにシカの糞を調べたとき、糞の中にシバの種子は含まれていなかった。しかし、5月15日に採集したシカの糞にはシバの種子は含まれていた。

その後の調査結果は以下の通りである。ただし、どの採取日も複数個調査している。

表3 シバ種子数の推移

月日	4/5	5/15	5/17	5/19	6/8
平均種子数	0	5.2	2.6	2.2	3.3
月日	6/19	7/4	7/20	8/6	
平均種子数	2.9	1.2	0.4	0	



④ 電子顕微鏡で観察した結果

糞の中のシバの種子と自然に形成されたシバの種子を 35 倍に拡大観察したものは、ほとんどかわらなかった。

だが、13000 倍に拡大観察すると、とげの様な表面の形態が観察できる。糞中からとりだした種子の方は、表面のとげの様なものが、研磨された様になっており、しかもどの個体も一部外観が欠けていることが確認できた。

(図 5)

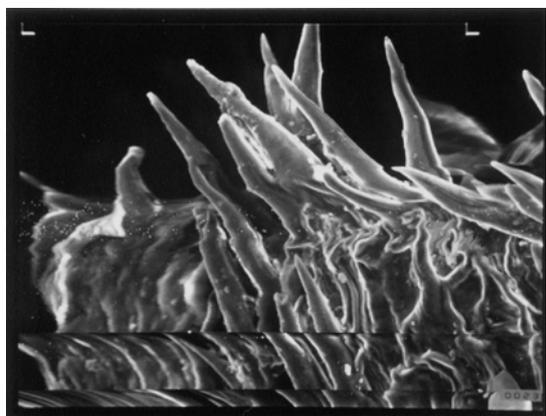
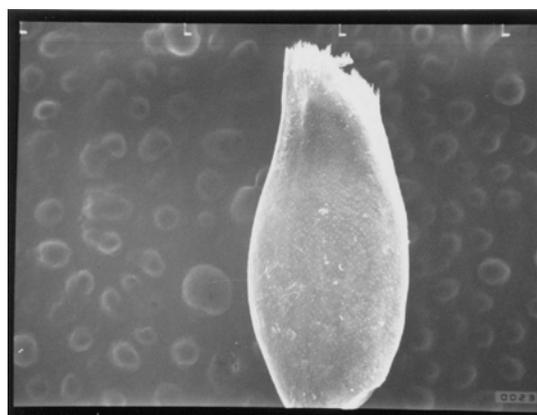
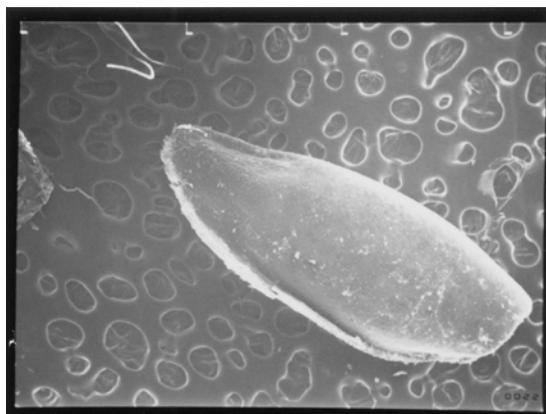


図 5 シバの走査型電子顕微鏡の写真

上が×35、下が×13000 で上部付近を拡大したものである。

左側：自然形成されたシバの種子、右側：糞の中からとりだしたシバの種子

<研究 3>シバの発芽実験

(1) 仮説

- ・シバの種子の発芽には、自然のものも糞中のものも、温度、水分、空気などの条件が影響するだろう。
- ・種子に傷をつけたものの方がよく発芽する

であろう

(2) 研究方法

- ① 以下の 3 つの条件で行った。
 - ア. 自然形成されたシバ種子
 - イ. 刀で種皮に傷をつけたシバ種子
 - ウ. 糞中のシバ種子



図6 種子の発芽実験

- ② 各対象になる種子を50粒ずつ用意し、ろ紙をしいたシャーレに入れて毎日水を与え、同じ環境を保ち、実験を開始した。

(3) 研究結果

- ・6/21に実験を開始したが、カビだらけになったので日陰から日なたに移したところ、一粒だけ発芽した。その後、しばらく観察したが発芽しなかった。
- ・7/13より別のものを用意し、再び、実験を開始した。日なたに出したが、今年は梅雨の期間が長く、再びカビに悩まされた。途中、各個体すべてをアルコールで拭いたりもしたが、また失敗に終わった。
- ・8/24より濾紙を綿にかえて種子にカビが生えない様に、はじめにアルコールで拭いて、紫外線に当ててから観察しているが、発芽を確認することができていない。

5. 考察

今回の実験より以下のことが分かった。

- (1) <研究2>の結果①より、シカの糞にはシバの種子がふくまれていることが分かった。しかも、完全なものや一部欠けたものなどさまざまであるが、大きさはほとんど同じであることが分かった。
- (2) シカは泊まり場、及び休息するところでは糞をあまりしない。また、<研究2>の結果①、②より、シバの種子が多く含まれる糞は、日なたでシバのよく茂っているところにあるということが分かった。
- (3) 4月のはじめに採集した糞の中にはシバの種子は含まれていなかったが5月15日

に採集した糞にはすでにシバの種子が含まれていた。<研究2>の結果③より、その後、7/20には少なくなり、8/6についてはほとんど含まれていないことがわかった。このことからシバの種子が形成される時季と糞中に含まれる種子の数が多い時期はほぼ一致していることがわかった。

以上のことよりシバの種子が多く含まれる糞は、5月中旬から6月下旬にかけての日なたでシバのよく茂っているところだということがわかった。

- (4) 走査型電子顕微鏡で観察した結果、糞中からとりだした種子の方は、表面のとげの様なものが、研磨されたようになっていたし、どの個体も一部外観が欠けていることが確認できた。このことは、種子の発芽と何らかの関係があるかもしれないと思い、文献を調べた。その結果、次のようなことが分かった。

○平吉(1969)によるシバ種子の発芽率

①何も処理をしないものの

15日目の発芽率 13%

②種皮をはいだものの

15日目の発芽率 70%

③種皮の一部を剃刀で切ったものの

15日目の発芽率 68%

この結果から種皮になんらかの傷があった種子の方の発芽率が高くなることがわかる。

○高槻氏(1999)によるシバ種子の発芽率

無傷のもの 13%

シカに食べられ排泄されたもの 26%

この結果からも糞中の種子の方の発芽率が高くなることが伺える。

ただし、いずれも光を十分与えた場合である。

つまり、シバはシカに食べられることによって、種子をより遠くへ散布できて、しかも

発芽しやすくなっているのではないかと推測できる。

[3]<http://naradeer.com/prof-ecology.htm>

6. まとめと今後の課題・反省

5月～6月にかけてシバは花を咲かせ種子を実らす。それをシカがシバと一緒に食べて、糞のなかにシバの種子を含んで排泄する。

光に当たった糞中のシバの種子は発芽し、いずれ成長してシバになり、またシカが食し、そのシカがまた種子を散布するのだろうとまとめることができる。(図7)

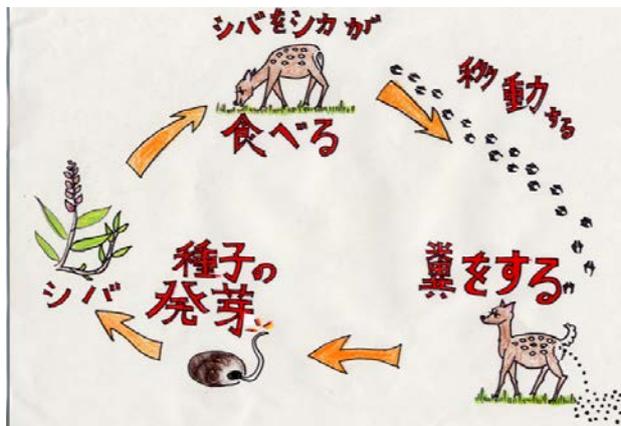


図7 シカの糞とシバの種子の関係

私達は、今後はシカの糞とシバの種子の詳細な関係を知り、それをもとに環境保護について考え、役立てようと思っている。

また、今回は種子の発芽実験の結果がうまくいかないまま、用意した種子がなくなってしまった。来年は、もっとたくさん種子を用意しようと思う。できれば、奈良公園以外のシバの種子を使って、予備実験として種子発芽の成功率の高い方法を見つけ出しておきたいと思う。

7. 参考文献・サイト

[1]「種子散布」、高槻 成紀著(上田恵介編著)、築地書館(1999) p.65-85.

[2]「奈良シカの行動 I 土地利用と日周活動」、福永 洋・川道 武男著(1984)

8. 謝辞

資料を提供して下さった奈良鹿愛護会の皆様と麻布大学獣医学教授 高槻先生、助言して下さいました本学の植野洋志先生、には深く感謝いたします。



図8 奈良公園飛火野のシカ

「万能乳酸菌」誕生への過程と課題の発見

3年B組 市瀬拓人

指導教諭 矢野幸洋

1. 要約

細菌のより有効な培養法や、細菌の性能向上を乳酸菌を用いて1から実験や研究をした。その結果、乳酸菌の長所や短所、および最も良い生育環境のための条件などが分かった。今後は、短所のない万能乳酸菌の製作を目指していきたい。

キーワード 乳酸菌、発酵、無酸素呼吸、乳酸、嫌気性細菌、乳酸桿菌、カタラーゼ反応、グラム染色法、ペプチドグリカン



乳酸菌桿菌モデル CG

2. 緒言

カルシウムを摂取する方法として代表的な例が、牛乳を飲むという方法が挙げられる。しかし、牛乳が嫌いな私にとっては、かなり苦痛である。そこで、乳製品を食べれば、カルシウムを摂取できると考えたため、このヨーグルトの研究を思いついた。

また、乳酸菌について調べると、乳酸菌は健康状態を良くしたり、重病を予防、改善することが分かった。主にヨーグルトに用いられている菌には、乳酸菌とビフィズス菌があり、乳酸菌は縦に長い形（桿菌という）をしており、ビフィズス菌はY字型をしている。今回は、この

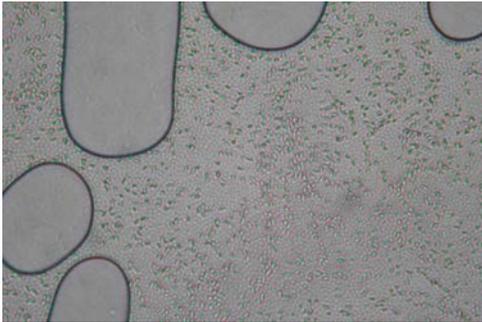
中の乳酸菌について研究をすることにした。乳酸菌は原核生物に分類され *Lb.casei*（カゼイ菌）などが有名である。乳酸菌も種類により様々な特徴があるが、全ての乳酸菌についていえることは、ペプチドグリカンと呼ばれる細菌特有の細胞壁が一般的な細菌よりも厚いという特徴である。これはグラム陰性とよばれる特徴である。

3. 目的

2つの目的のうちの1つは、細菌のより有効な培養条件や培地を見つけ出すことである。もう1つは、乳酸菌の短所を排除した「万能乳酸

菌の開発」である。これらのことが成功すると、細菌類を利用して病気を直したり、健康を維持していくことのできる方法の糸口が分かると考えている。

その目的達成のため、まず乳酸菌を確実に殖やす方法や条件を調べた。あわせて、乳酸菌の分類の位置づけや、そのグループの特徴についても調べる実験をした。



乳酸菌 L G 21 (光学顕微鏡にて)

4. 研究内容

<実験 I> ヨーグルトを作る

乳酸菌の特徴や最も良い生育環境の条件などを調べるために、以下の実験を行った。

(1) 仮説

ヨーグルトに含まれる乳酸菌は人間の腸にもともと生息しているため、人間の体温と同じくらいの約 37℃で活発に発酵を進めると思われる。

(2) 実験方法

- ① 滅菌した紙コップに市販のヨーグルトと牛乳を混ぜ、サランラップまたはガーゼで口の周りをおさえ、輪ゴムでとめた。
- ② a～dのようにヨーグルトと牛乳、または低脂肪乳を 1：5 の割合に混ぜる。
 - a. 市販のヨーグルトと牛乳
 - b. 市販のヨーグルトと低脂肪牛乳
 - c. 市販のヨーグルトから作った自家製のヨーグルトに牛乳を混ぜたもの
 - d. 牛乳だけのもの
- ③ 温度については、a は 4℃、常温（約

25℃）、35℃、45℃の条件で行い、b、c、d については常温（約 25℃）で行う。

- ④ 4 日目には pH についても測定する。
- ⑤ a～c については、始めはサランラップでふたをしていたが、水分がついたため、途中からガーゼに変えて実験した。

(3) 実験結果

実験の結果は次のとおりである。

表 1 ヨーグルトに混ぜるものの違い（常温）

月日	a	b	c
5月6日	実験開始	実験開始	実験開始
5月7日	おおむね固まった。	やや柔らかかった	やや固かった
5月8日	変化なし	変化なし	やや固まっていた
5月9日	変化なし	変化なし	かなり固まった
5月10日	固まった	やや固まった	固まった
5月11日	変化なし	大体固まった	変化なし
5月12日	変化なし	固まった	変化なし

表 2 温度による違い（a を用いる）

月日	4℃	35℃	45℃
5月6日	実験開始	実験開始	実験開始
5月7日	変化なし	チーズのようだった	やや固まった
5月8日	変化なし	刺激臭がした	—
5月9日	変化なし	水分がなくなった	—
5月10日	変化なし	処分	—
5月11日	変化なし	—	—
5月12日	変化なし	—	—

・pHについて

4日目の時点でのpHを以下のとおりである。

a. 牛乳+ヨーグルト（常温）：pH=4.5

d. 牛乳だけ：pH=4.8。

牛乳とヨーグルトの混合物の方が、酸度が高かった。

◎参考資料

○使用したヨーグルト

種類別 発酵乳

無脂乳固形分 11.5%

乳脂肪分 3.0%

原料名 乳製品、生乳、乳たんぱく質濃縮物

・栄養成分（100g）

エネルギー 70kcal

たんぱく質 5.0g

脂質 3.0g

炭水化物 5.8g

ナトリウム 48mg

カルシウム 160mg

○使用した牛乳

無脂乳固形分 8.3%以上

乳脂肪分 3.5%以上

原料名 生乳 100%

・栄養成分（100ml）

エネルギー 64kcal

たんぱく質 3.1g

脂質 3.6g

炭水化物 4.7g

ナトリウム 4.6mg

カルシウム 103mg

(4) 考察

温度が45℃のときや、4℃のときよりも、35℃のときの方が、発酵は早く進んだ。これについては、10℃以下になると乳酸菌の働きが止まるということが文献から分かった。つまり、人間の体温と同じくらいの温度で発酵が最も効率よく進んだといえる。

低脂肪牛乳を混ぜたものは、発酵が遅かった。牛乳は、置いていると悪臭がしたのに対し、ヨーグルトを混ぜると、まろやかな香りになった。

一方、サランラップでおおったものは、カビは発生しなかったのに対し、ガーゼでおおったものは発生したため、カビは、ヨーグルト自体から発生したのではなく、外から進入したものだと思われる。

市販されたヨーグルトを牛乳に混ぜてできたヨーグルトは、固まる速度が速かったため、乳酸菌の力が強くなっているかもしれないと考えられる。

<実験Ⅱ> 乳酸菌のDNAを抽出する。

今回は、ヨーグルトが本当に乳酸菌で発酵しているのか確かめるために、乳酸菌のDNAを抽出しようとした。対照実験として、ヨーグルト、牛乳、低脂肪牛乳でも同じ実験を行った。

(1) 実験方法

クロロホルム法を用いてDNA抽出を行った。

◎抽出方法

①TE20 バッファーは、0.5M Tris-HCl 10ml と 0.5M EDTA 4ml に蒸留水 86ml を入れ、オートクレーブにかけた後、冷暗所に保存する。TE20 バッファーを 20 倍に薄めたものを TE1 とする。

②試料を 1.5ml チューブに入れ、TE20 バッファーを 30 μ l 加えてすりつぶす。

③TE20 を 170 μ l 入れて混ぜた後、フリーザーにわずかの間入れる。

④クロロホルムを 100 μ l 加え、5 分間振って混ぜる。

⑤ 5 分間 4℃で 15000rpm で 5 分間遠心分離する。

⑥新しいエッペンチューブにガラスウールを少量（10-30mg）下方にまとめて入れ、⑤の上澄みを移す。

⑦ 3 酢酸 Na を 20~30 μ l と冷エタノールを 500 μ l 入れゆっくり上下に回転させ、その後、フリーザーに 3~5 分静置させる。

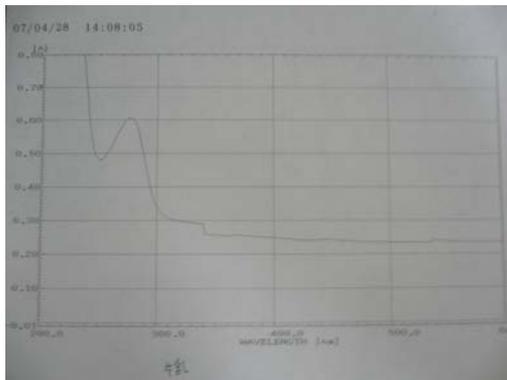
- ⑧遠心分離した後上澄みを捨てる。
- ⑨冷やした 70%エタノールで内壁を洗い、遠心分離後、上澄みのエタノールは捨てる。
- ⑩自然乾燥後、TE1 を 25 μ l 入れ、更に蒸留水を 125 μ l 入れ、65°Cのまま 5 分間保つ。
- ⑪新しいチューブに入れフリーザーに入れ保存する。ガラスウールは捨てる。ガラスウールにより DNA がより効率的に吸収できる。
- ⑫DNA の含まれた溶液を分光光度計にかける。

(2) 仮説

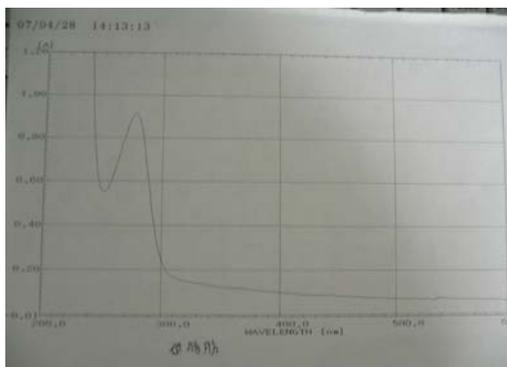
ヨーグルトには乳酸菌が含まれているため DNA があるが、牛乳と低脂肪牛乳には DNA が無いと思われる。

(3) 実験結果

分光光度計にかけ、分析した結果、牛乳と低脂肪牛乳の場合は 280 nm にピークが確認できたことよりタンパク質の存在が確認できた。DNA は無いと分かったが、ヨーグルトは何も確認できなかった。



分光光度計の結果（通常の牛乳）
ピークが 280nm にしか確認できないためタンパク質しか無いことが分かる



分光光度計の結果（低脂肪牛乳）
ピークが 280nm にしか確認できないため、

タンパク質しか無いことが分かる

(4) 考察

クロロホルムを用いて DNA 抽出を行ったが、DNA が確認できなかった。これはヨーグルトに含まれている DNA の量がかなり少ないからであろうと予測できる。

後日、乳酸菌のみについて簡易抽出法で抽出を何度も行った結果、わずかではあるが、DNA を目で確認することができた。おそらく、ヨーグルトで DNA 抽出を行った場合、乳酸菌の DNA 量に対して、ヨーグルト中に他のタンパク質などが多く含まれていたため、DNA の抽出が困難になったと思われる。

<実験Ⅲ> 乳酸菌を培養する

(1) 目的

前回の実験でヨーグルトを増やすことについては成功したものの、それが何の働きで行われているのかが不明なので無菌状態で乳酸菌のみを培養することにした。そこで、乳酸菌をプレート LB 培地で培養し、乳酸菌の集まったコロニーをこれからの実験に利用することにした。

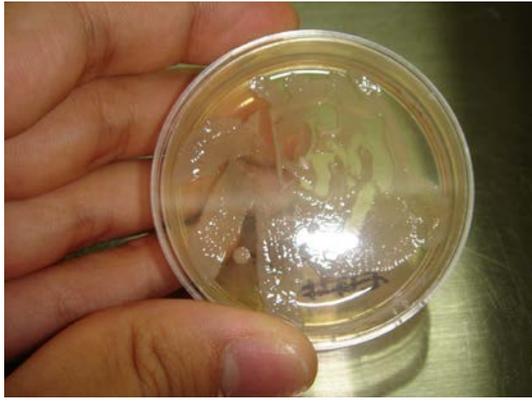
(2) 実験方法

まず、Luria-Bertani (LB 培地用試薬: Tryptone, Bacto 10g · Yeast extract, bacto 5g · NaCl 10g) と Agar, Powole (寒天粉末 1.5g) を計り取り、蒸留水を 100ml 入れ、よくかき混ぜたあとペトリ皿に入れ、オートブレイクにかける。よく冷めたら、クリーンベンチ内で白金耳でヨーグルト水を薄くぬる。1~2 日程おいておくとコロニーが出来る。

(3) 実験結果

大体のものは下の写真のように薄橙がかったコロニーができ、うまく培養できたといえる。





寒天培地 (LB 培地で培養した乳酸菌)

<実験Ⅳ> 乳酸菌ということ確かめる[Ⅰ]

カタラーゼ反応

乳酸菌には他の細菌と違い、カタラーゼという物質が含まれていないのでカタラーゼ反応によりカタラーゼ陰性になるので、区別できる。

(1) 実験方法

培地で培養した乳酸菌のコロニーと思われるものを白金耳でかき集め、過酸化水素水にひたす。ここで酸素が発生すればカタラーゼ陽性(枯草菌類)となる。酸素が発生しなければ、カタラーゼ陰性(枯草菌類以外)となり、乳酸菌のグループであると分かる。

(2) 実験結果

あるお菓子に含まれている乳酸菌はカタラーゼ陽性だったが、それ以外の一般的なヨーグルト(プレーンヨーグルト)では、カタラーゼ陰性だった。



枯草菌類と過酸化水素水での反応

(カタラーゼ反応・陽性)

(3) 考察

カタラーゼ陽性だったお菓子に入っている乳酸菌は、普通の乳酸菌とは違い、分裂ではなく孢子で増える「バチルス・コアグラス」という乳酸菌が含まれていることが分かったため、さらに詳しく研究する。

<実験Ⅴ> 乳酸菌ということ確かめる[Ⅱ]

グラム染色法

細菌類は主にグラム染色法という染色で2つの種類に分けることができ、その例としてグラム陽性が枯草菌類、グラム陰性が大腸菌類があげられる。これらの細菌の違いは、細菌の細胞の表面を覆っているペプチドグリカンといわれる物質の厚みで区別されている。つまり、このペプチドグリカンが厚ければグラム染色法で染めた後、アルコールで洗浄しても染色液が抜けないが、ペプチドグリカンが薄ければグラム染色法で染めた後、アルコールで洗浄した際に染色液が抜けてしまうという仕組みである。

(1) 実験方法

・使用薬品

ルゴール(Lugol)液: ヨウ素 1g, ヨウ素カリウム 2g, 蒸留水 300ml (先ずヨウ素カリウムを少量の蒸留水に溶かし、次にヨウ素液を加え、溶かしてから残りの蒸留水を加える。)

A液: クリスタルバイオレット 0.3g, 95% エタノール 20ml

B液: シュウ酸アンモニウム 0.8g, 蒸留水 80ml

混合液: 前日にA液とB液を混合し、使用当日に濾過する。

・染色方法

(1) スライドガラスに白金耳で蒸留水を1滴と菌をいれ、よく伸ばす。

(2) 乾かす

(3) ガスバーナーの上を3回ほど通す。(固定)

(固定)

(4) 染色用混合液を1滴、滴下する。(1～

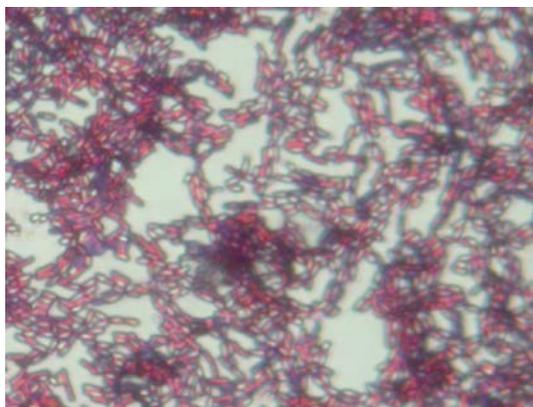
3分)

- (5) 染色トレーで洗う。(2回)
- (6) 乾かす。
- (7) ルゴール液を1滴、滴下する。(1分)
- (8) 染色トレーで洗う。(2回)
- (9) 乾かす。
- (10) エタノールを1滴、滴下する。(30秒)
- (11) 染色トレーで洗う。(2回)
- (12) 乾かす。
- (13) サフラニン液を1滴、滴下する。(1分)
- (14) 染色トレーで洗う。(2回)
- (15) 完全に乾かす。
- (16) 顕微鏡で観察する。

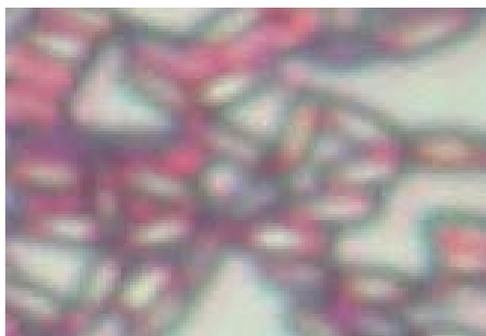
※ これについて染色時間を1分、2分、3分とかえて実施し、合計15種類を実施した。

(2) 実験結果

プレパラート15枚中13枚の乳酸菌の細胞壁(ペプチドグリカン)が紅色やうすい黒色に染まった。



グラム染色法により染まった乳酸菌



楕円形に見える一つずつがペプチドグリカンの染まった乳酸菌

(3) 考察

グラム染色法で乳酸菌が染まったので、枯草菌類と同じグループに分類され、乳酸菌のペプチドグリカンは厚いということが分かる。

<実験VI>

ヨーグルトの養分を利用した培養法

前回の実験Iでカビが発生した事を利用して、ヨーグルト水で植物を育てた場合と、通常の水で育てた場合の比較実験を行った。

(1) 仮説

普通の水で植物を育てた場合より、カビが育ちやすかったヨーグルトの養分が入っているものの方が植物は効率よく育つと考えられる。

(2) 実験方法

同じ種類の植物を、同じ条件で、通常の水で育てる場合：Aと、ヨーグルトを溶かした水で育てる場合：Bを製作して育てる。



(3) 実験結果

通常の水で育てた場合：Aより、ヨーグルトを溶かした水で育てた場合：Bの方が3日間ほど長く生育できた。

(4) 考察

ヨーグルトには、ヨーグルトの乳酸菌か牛乳のどちらかは分からないが、養分が蓄えられていることが分かったが、しかし、これが乳酸菌の働きによるものであるかは分からない。

<実験Ⅶ> 無酸素状態で乳酸菌を培養する

乳酸菌は、嫌気呼吸を利用する嫌気性通気菌のため、酸素が無い状態の方が育ちやすいという仮説をたて、次のような実験をした。

(1) 実験方法

密閉容器（すりきりの付いた容器）に乳酸菌をまいた LB 培地を入れ、その中に水の電気分解で発生させた水素を満たして培養した。

(2) 実験結果

通常の空气中で培養したもののように薄橙色のコロニーが複数個でき、見た目の変化は無かった。

(3) 考察

嫌気性呼吸とはただ酸素が必要ないというものであって、酸素が無いからといって元気になったり成長が速くなったりするものではないといえる。

<実験Ⅷ> 乳酸菌でダイズを発酵させる

この実験は、納豆が嫌いな人のために納豆菌を使わずに、乳酸菌で発酵させるという実験である。

(1) 実験方法

実験Ⅲで製作したコロニーの上にダイズを載せる方法を A とし、ヨーグルトの中にダイズを入れたものを B とした。

(2) 仮説

ダイズには乳酸菌が発酵をするために必要なガラクトースという糖が含まれていないため発酵しないと思われる。

(3) 結果

A, B ともに発酵しなかった。

(4) 考察

仮説の通り、乳酸菌は、大豆を発酵させなかった。理由がわからないため、これから調べていきたい。

5. まとめと今後の課題

今回の様々な実験を通して乳酸菌の基礎

から応用までの様々なことを学ぶことができた。今回、分かったことをまとめると、以下のとおりである。

(1) 乳酸菌の生育に最も関わる条件は、温度で、最もよく（早く）生育する温度は 37℃（人間の体温と同じくらい）であり、10℃以下では生育が止まるということ。

(2) 乳酸菌には何らかの養分があるということ。

(3) 乳酸菌は培養した際、コロニー（集団）を作るということ。

(4) 乳酸菌は何らかの特定の物質を持っているものにしか働かず、その物質を持っていないければその個体を発酵させないということ。

(5) 乳酸菌の DNA はとても少なく、抽出が困難であるということ。

(6) 乳酸菌には、分裂して増えるものと孢子で増えるものがあり、それは、カタラーゼ反応で区別できるということ。

(7) 嫌気性呼吸を利用している嫌気性通気菌は、酸素を嫌うのではなく、酸素を利用しない菌であるということ。

(8) 細菌は主にグラム染色法で二種類に分けられ、それは、ペプチドグリカンの厚みで区別できるということ。

次に、今後の課題としたいのは、孢子で増える乳酸菌があるので、コケのように孢子で増える植物と組み合わせることができるようにして、より強い乳酸菌を作ることである。

また、乳酸菌が働く特定の物質の解明や、より正確な DNA 抽出方法の開発なども今後の課題としたい。より適切な方法で、実験・研究を進めていこうと思う。

6. 参考文献・参考資料

- ・ダイナミックワイド「図解生物」 東京書籍
- ・ヨーグルトの科学
- ・遺伝工学実験ノート DNA を得る

- ・2007年 公開講座 実験試料
- ・明治乳業 HP
- ・グリコ乳業 HP
- ・建部ヨーグルト HP
- ・社団法人 全国日本発酵乳乳酸菌飲料協会発酵乳、乳酸菌飲料公正取引協議会 HP
- ・信州大学農学部 細野明義教授 HP
- ・京都大学大学院農学研究科 応用生命科学専攻 岸野、小川、清水さん論文
- ・生物学辞典 岩波文庫

7 謝辞

今回の研究では株式会社グリコ乳業 発酵乳Gの瀧澤さんに様々な実験方法について、適切なアドバイス等をいただき、研究の大きな手助けをしていただいたことに、大変感謝しております。

また、今回の研究において、特に貴重なご助言をして下さり、グラム染色法で指導して下さった本校教諭の櫻井先生にも、深く感謝しております。ありがとうございました。

光合成の第四過程は光なしで行えるか

3年C組 國松 大悟
3年B組 行松 和輝
指導教諭 矢野 幸洋
指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

光合成の第四過程は光なしで反応が進行することが分かっている。そのことを確認する実験を考えるための予備実験として、ベンソンの実験を実際に行ってみた。その結果、実験はうまくいかなかったが、装置の組み立てや実験方法で改良すべき点が明らかになった。

キーワード ベンソンの実験、ATP、光合成の第四過程

2. 目的

ベンソンの実験を実際に行い、今後の自分たちの実験の方法を考える参考とする。

また、ATPを含ませた脱脂綿の上に植物を載せたとき、そのATPを植物が利用できるのかということについても調べる。

3. 研究内容

<実験1>

(1)実験目的

植物はATPを脱脂綿に含ませるだけで吸収できるかを調べる。

(2)実験内容

図1のように、8個の容器ア～セに同じ大きさのカイワレダイコンを同じ本数入れて、右の表1のような条件で暗室で育てる。

表1 カイワレダイコンを育てた条件
(○が有り、Xが無し)

	ATPの有無	水素の有無
ア	X	○
イ	○	X
ウ	X	○
エ	X	X
サ	X	○
シ	○	X
ス	X	○
セ	○	X



図1 実験のようす

(3)仮説

A T P を含ませた脱脂綿上で育てた方が呼吸量が多くなるため、容器によく水滴がつくと予想される。

(4)実験結果

表 2 のように、予想した通りの結果になった。

表 2 A T P と水素の有無による容器内の変化

(水滴がついていたものを○、ついていないものを×で示す)

	水滴の有無
ア	×
イ	○
ウ	×
エ	×
サ	×
シ	○
ス	×
セ	○



図 2 実験の結果

(5)考察

仮説通り、A T P を加えた方が容器に水滴がよくつき、呼吸がさかんに行われたといえる。

しかし、水滴の有無だけでは呼吸量が増加かどうかは分からないので、もう一度この実験はやり直す必要があると思う。

また、水素の有無については違いが確認できなかった。

<実験 2 >

(1) 目的

ベンソンが行った実験について、装置を工夫して確認する。つまり、光を与えるが C O₂ 無しの状態の後、光を与えないが C O₂ 有にしたとき、光合成を行うかを調べる。

(2)仮説

光を与えるが C O₂ 無しの状態の後、光を与えないが C O₂ 有にしたときには、光合成を行うであろう。

(3)実験方法

- ① 土台となる箱に穴を開ける。
- ② 穴の中に、ガラス管にゴム管を付けたものを入れ、ピンチコックでゴム管を止めておく。
- ③ ガラスの円筒の中に、シャーレに土を入れてシロツメクサを植えたものと、粒状の水酸化カリウムを入れた小型シャーレとを入れる。円筒と箱をビニールテープで空気の入らないように止める。
- ④ 実験前に二酸化炭素濃度を気体検知管で測定する。
- ⑤ 二酸化炭素無しで 30 分間光を当てる。

- ⑥ 二酸化炭素有りて 30 分間光を当てる。
- ⑦ 実験後、気体検知管で二酸化炭素濃度を測定する。

なお使用した光源は 2000 ルクスの明るさのものである。



図 3 実験の準備の様子

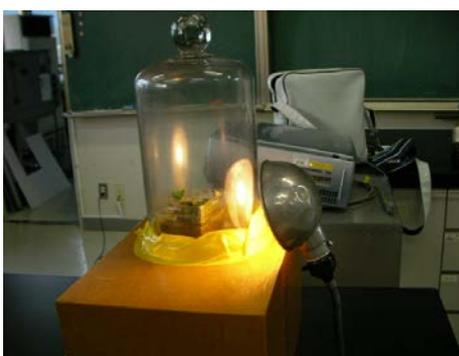


図 4 光照射の実験中



図 5 二酸化炭素濃度の測定

(4)実験結果

実験結果は、表 3 のようになった。

表 3 I～Ⅲの条件における二酸化炭素濃度の濃度変化

	二酸化炭素濃度
I 実験前	0, 05%
II 光あり CO ₂ なし	0, 1%
III 光なし CO ₂ あり	0, 1%

(5) 考察

空気中の二酸化炭素濃度は 0.03%といわれているので、実験する前からかなり二酸化炭素濃度が高かったといえる。

しかも、実験後のデータから二酸化炭素濃度は増えており、水酸化カリウムの二酸化炭素の吸収が十分ではなかったと推測できる。ただし、水酸化カリウムは実験前には粒状だったのが、最後には液体になっており、空気中の二酸化炭素や水蒸気などを吸収したと推測できる。

二酸化炭素が増えた原因として、準備してから実験開始まで日数を置いたことも影響していると思われるが、I から II の二酸化炭素の増加については植物の呼吸により増えたものだと考えられる。

II から III については、ベンソンの実験では光合成が行なわれ、二酸化炭素を吸収していたが、今回の実験では変化がなかった。

4. 今後の課題

実験結果の数値が不正確だったので、そのあたりをよく考え直し、もういちど実験を行なう必要がある。

その際には以下の点を改善したいと思う。

(1) ガラス鐘と、木の台座との間をしっかりと密封するため、その隙間に油粘土を詰めること。

(2) 気体検知管が正確に働いているのかを調べること。

以上の点が改善できた上で、実験で正確な測定を行うことができるようになれば、当初の目的である光を当てなくても暗闇で植物が光合成を行えることを確かめる実験をしていきたいと思う。

5. 参考文献

フォトサイエンス生物図録

数研出版

先生と生徒のための新しい生物実験

共立出版

ウニの人工受精

2年B組 井上 なずな

2年C組 永戸 みちる

指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

私たちは、和歌山県にある京都大学瀬戸臨海実験所で行われた「SSH夏の学校」に参加し、その実習の1つとしてウニを人工授精させ、その発生過程についての研究を行った。その結果、ムラサキウニの受精からプルテウス幼生期までを確認することができた。

キーワード ムラサキウニ、人工授精、発生、プルテウス幼生

2. 研究背景

2007年度の「夏の学校」のテーマのひとつがウニの発生実験であり、ウニのような棘皮動物がどのようにして繁殖しているのかに興味があったからである。また、先生の勧めもあり、今年にはウニの発生に絞って実験をすることにした。



3. 研究目的

人工的にウニの卵と精子を受精させ、受精後の各過程を観察する。特に、どのように繁殖しているのか、どこまで成長するのか、各時期にどのくらいの時間がかかるのかを知ることが目的とする。

4. 研究内容

(1) 仮説

ウニは体外受精をする。よってウニから採取した卵と精子を混ぜれば受精し、発生をはじめるとはならないかと予想した。

(2) 方法

- ① ムラサキウニの雄、雌を一匹ずつ用意する。ただし、見分けが難しいため何匹か試すこともある。
- ② ウニの口（生殖口）あたりの棘を切っておく。
- ③ ウニの口あたりの柔らかい部分に5箇所、塩化カリウム溶液を注射する。

- ④ ビーカーにろ過した滅菌海水をみだし、その上にウニをあお向けに置いて生殖口が海水につかるようにする。
- ⑤ 薬品で刺激を与えたので、雌であれば黄色い粒状の卵が、雄であれば白っぽい液状の精子が5つある生殖口からでてくる。
- ⑥ 卵についてはビーカーのそこに沈殿するのをまち、上澄みを捨てる。精子についてはガラス棒でまぜて精子液にする。
- ⑦ 沈殿した卵をシャーレにいれ、精子液をピペットで加えて少しかき混ぜる。
- ⑧ 顕微鏡でみて、卵の周りに薄い膜（受精膜）が確認できたら受精完了。
- ⑨ しばらくして、シャーレにはいつている卵の沈殿した海水の上澄みをすて、新しい海

水を足していく。

受精をすることができなくて、死んでしまった卵がたまってしまうのを防ぐためであ

(3) 研究結果

受精卵からプルテウス幼生まで観察することができた。27℃で実施。

	受精	2細胞期	4細胞期	8細胞期	胞胚期	原腸胚期	プリズム幼生期	プルテウス幼生期 1
時刻	15:58	16:30	16:51	17:27	9:05	10:16	13:03	9:26
合計時間	0	0.53	0.88	1.5	17.1	18.2	21	41.5



受精卵



4細胞期

桑実胚期



8細胞期

胞胚期



原腸胚期

プリズム幼生期

プルテウス幼生期(4腕期)

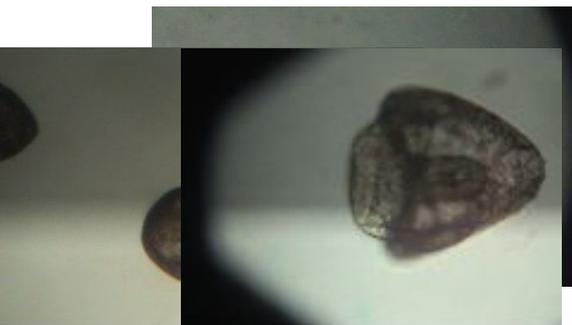
プルテウス幼生期(初期)

5. まとめ

観察の時

京都大学瀬戸臨海実験所の宮崎先生には、実験材料

および薬品の準備



から人工授精のしかたおよび、プ

間が不定期だったので、次の機会には一定の間隔を持って観察したいと思う。初めての事ばかりだったが、プルテウス幼生まで進めることができてよかった。

ルテウス幼生までの各時期の観察の指導など大変お世話になりました。感謝します。

6. 参考文献・サイト

[1] フォトサイエンス「生物図録」、鈴木 孝仁監修、数研出版

7. 謝辞

チョウの翅の模様の構成について

2年B組 飯島 麻穂
2年B組 井上 なずな
指導教諭 櫻井 昭

1. 要約

私たちは、チョウの翅の色、模様とリンプンの関係について調べた。その結果、チョウの翅の色は、リンプンの色と一致した。しかし、リンプンの形も翅の模様に影響しているようであった。

キーワード チョウ、リンペン、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡

2. 研究背景

以前からチョウの美しい翅に興味を持っていた。翅の色・模様の色は何によるものなのか。インターネットで検索したところ、チョウの翅のリンペンによるものらしいと分かった。それならば、リンペンはどのようにして模様を構成しているのか、また色の違いはリンペンに関係があるのか疑問に思い実際に自分たちで調べてみることにした。

下に黒い紙、白い紙を敷いた2種類の状態で凍った状態のチョウを撮影した。

全体の様子や、翅の模様のアップなども撮影した。

*リンペンの光学顕微鏡観察

観察したい部分に適度な長さのセロハンテープを軽く押しつけて、リンペンを採取した。テープをスライドガラスに貼り付け、サンプリングした。どの個体のリンペンか、見た目の色は何色かなども記録しておいた。

3. 研究目的

リンペンを顕微鏡で観察し、「リンペンの配列の仕方」、「リンペンの見た目の色と顕微鏡で見たときの色の違い」を調べる。

これを複数の個体で繰り返し、目的にあったサンプルを作成した。

*リンペンの走査型電子顕微鏡観察

試料を両面テープで試料台にはりつけた。金で約1分間蒸着した。これを走査型電子顕微鏡で観察した。

4. 研究内容

(1) 仮説

- ・ひとつひとつのリンペンは規則的に並んでおり、模様を作っている。
- ・リンペンの並び方によってチョウの翅の色と模様が異なる。

(3) 研究結果

次ページからの図1～図21を研究結果の参考とする。合計で8個体調べることができた。

(2) 研究方法

① チョウの捕獲

リンペンの観察のためにチョウを捕獲した。捕虫網を使用するが翅を傷めてしまわないように注意した。今回は身近なチョウということで学校の敷地内で捕獲に取り組んだ。

② 保存方法

捕獲したらリンペンが落ちないように翅をたたみ、トレーシングペーパーの上から軽く胸を押しつぶし、腐らないようにそのまま冷凍した。

③ チョウの観察と記録

*全体像

リンペンは魚のうろこのように規則正しく並んでいる。(図18) またよく見ると、リンペンの配列は、柄と関係している。

リンペンによってチョウの翅には模様が描き出されている。(図7、図15) 翅についているリンペンを詳しく見てみると、翅の色はリンペンの色と一致している。(図3、図11) しかし、図10より、リンペンの形が、先が分かれているのと、分かれていないという違いも見られるため、リンペンの色だけでなくリンペンの形も翅の色に関わっているように見える。

色の境目ではリンペンが規則正しく並んでいる。(図14) 特に、色の境目はその2つの色が規則正しく交互に並んでいる(アゲハチョウ図8の光学顕

微鏡像で確認されたが今回の結果には載せていない)。

図 17 の写真の上の方を電子顕微鏡で見ると、白く浮かび上がっているものが見える。よく見ると、この翅には手前側と奥側に 2 層に分かれていることが分かった。

チョウは背側と腹側ではまったく異なる模様をしている。実験をやっていく上で、リンプンがはがれたチョウの翅は模様がほとんど見えなくなり薄く、もろい翅となってしまふ (図 21)。



図 21

5. 考察

研究結果から、このような考察があげられる。

リンプンが剥ぎ取れたチョウの翅がもろくなってしまった結果から、規則正しくリンプンが並ぶことによって身を守る強度が上がり、リンプンがなければ全身 (翅) が弱くなってしまふと考えられる。さらに、リンプンの自体の色が翅の色に反映されていた結果から、リンプンの配列の仕方がチョウの翅の模様を決めると考えられる。

リンプンは 1 つ 1 つが細胞で出来ていると言われている。そこで今回の結果を見ると、リンプン 1 つの色や形がチョウの種類により異なっている。これは、チョウの種類によって持っている細胞の性質 (色や形) が異なるからであると考えられる。(サナギの中で翅の表面にある細胞の一部が最後に分裂したとき一方はリンプンに、一方はリンプンの根元がはまるソケットとなる。リンプンとソケットは、共に完成すれば細胞としては死ぬ。)

アゲハチョウで観察されたリンプンが 2 層を成している結果を見ると、これは文献にも載っており、実際にチョウのリンプンは、そのような構造をとっていると判明した。他のチョウで見られなかったものが、何故アゲハチョウのみで見られたのか。これ

はそのアゲハチョウが羽化してすぐに採取したものであったので、リンプンが傷つく可能性が低く、他のチョウと異なり、チンプンの形状が壊れることなく、明確にリンプンの 2 層構造を判断することが出来たのだと考えられる。

6. まとめと今後の課題

私たちはこの研究において、主にリンプンがチョウの翅の模様を左右し、リンプンの色や形を細胞が左右するということが分かった。このことから今後は、

- ① どういうふうに関リンプンになるであろう細胞が作られ、どの段階でリンプンとなる時の色や形が決定されるのか?
- ② リンプンの色と形は、もともと持っている細胞によって決められているのか、食生活や生活環境によって異なるのか?

という 2 つのことを調べていきたいと考えている。そのためには、チョウの生態についての知識や、観察するチョウの種類数を増やしていく必要がある。この研究を進めていけば、自分たちが望む模様のチョウを育成することが可能になるかもしれない。

7. 参考文献・サイト

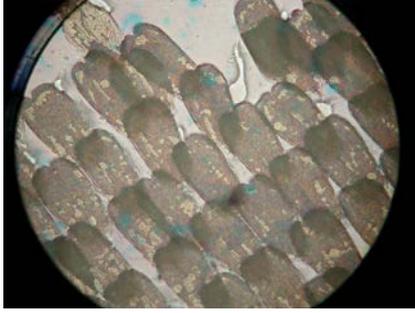
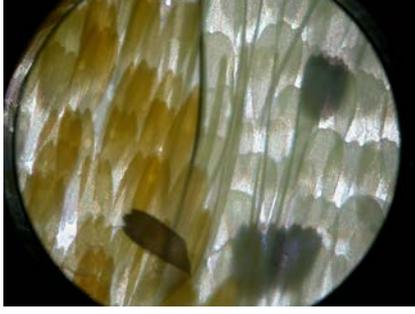
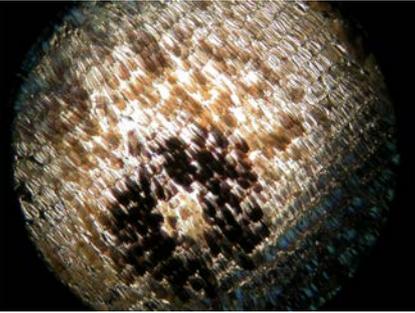
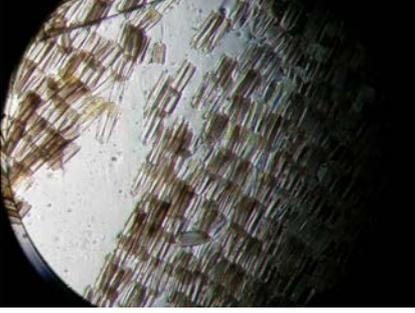
- [1] 「原色日本昆虫図鑑」今井龍雄著、(株) 保育社
- [2] DO 科学

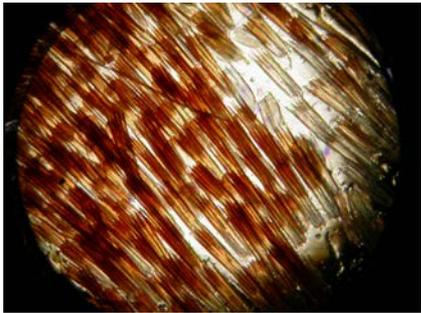
<http://www.asahi.com/edu/nie/tamate/kiji>

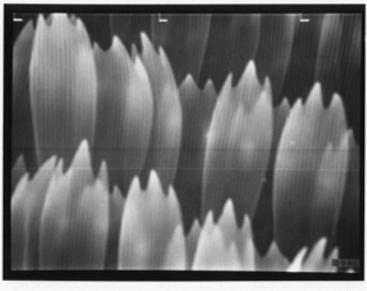
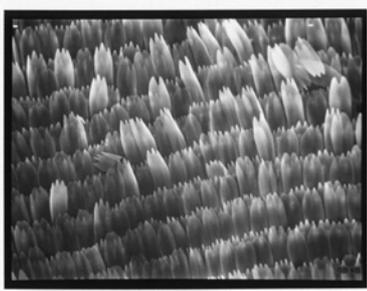
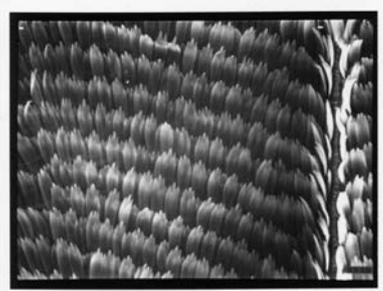
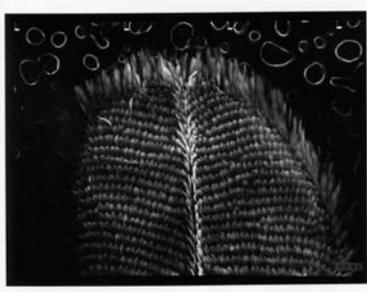
8. 謝辞

指導して下さった櫻井先生に深く感謝致します。

資料

種名	全体像 (チョウの写真)	光学顕微鏡像 (リンポン写真)
モンシロチョウ	 <p style="text-align: right;">図 1</p>	 <p style="text-align: right;">図 9</p>
モンシロチョウ	 <p style="text-align: right;">図 2</p>	 <p style="text-align: right;">図 10</p>
ヒカゲチョウ	 <p style="text-align: right;">図 3</p>	 <p style="text-align: right;">図 11</p>
ヤマトシジミ	 <p style="text-align: right;">図 4</p>	 <p style="text-align: right;">図 12</p>
ヤマトシジミ	 <p style="text-align: right;">図 5</p>	 <p style="text-align: right;">図 13</p>

不明	 <p data-bbox="762 439 820 472">図 6</p>	 <p data-bbox="1310 439 1383 472">図 14</p>
不明	 <p data-bbox="762 797 820 831">図 7</p>	 <p data-bbox="1310 797 1383 831">図 15</p>

種名	全体像	走査型電子顕微鏡写真
アゲハチヨウ	 <p data-bbox="762 1290 820 1323">図 8</p>	 <p data-bbox="1310 1200 1383 1234">図 16</p>
	 <p data-bbox="762 1592 820 1626">図 17</p>	 <p data-bbox="1310 1547 1383 1581">図 18</p>
	 <p data-bbox="762 1973 820 2007">図 19</p>	 <p data-bbox="1310 1973 1383 2007">図 20</p>

シバ種子の発芽とシカ糞中のシバ種子の発芽

3年A組 林 由佳里

指導教諭 矢野 幸洋

1. 要約

奈良公園のシカの糞中からシバの種子が見つかった。果たしてこのシバの種子は発芽するのか？それを確かめるために寒天培地で発芽実験を行ったがうまくいかなかった。そのため、市販されているシバ種子を購入した実験を行った。その結果、寒天培地より土で栽培したほうが良いということがわかった。そして、高い発芽率を得るために、温度を一定に保つ(25℃前後)という条件が良いことが分かった。また、低温処理した後、明るいところに移したものは発芽率が高くなった。さらに、一日の温度差が大きいほうは発芽率が高くなる傾向がみられた。

キーワード シバの種子、日光、日陰、温度、種皮の傷、発芽率

2. 動機・目的

奈良公園に生息するシカの糞1粒には最高で7個のシバの種子があることが私達の研究で確かめられた。シバたちはシカの糞に混じることによって分布を広げていると推測できるが、その見つかった糞中の種子は本当に発芽できるのかを以前に調べた。シバの発芽は簡単にできると、軽く考えていたが、“カビ”に苦しめられ、糞中のシバ種子を発芽させることができなかった。シバの発芽はどうすることで、発芽するのか？ということ調べてみることにした。本研究ではシバの発芽のメカニズムに迫ろうと思う。

・種皮の一部を剃刀で切ったもの 68%

この結果から種皮になんらかの傷があった種子の方の発芽率が高くなることがわかる。

②高槻氏(1999)によるシバ種子の発芽率

・無傷のもの 13%

・シカに食べられ排泄されたもの 26%

この結果から糞中の種子の方が、発芽率が高くなることが伺える。(①、②いずれも光を十分与えた場合)

3. 研究内容

3-1 文献調査

文献調査をした結果、次のようなことがわかった。

私達はこの結果を確かめるため、シバ種子の表面を電子顕微鏡で観察し、次に発芽実験を行った。

3-2 シバの種子の観察

自然形成されたシバの種子と糞中の種子について電子顕微鏡で観察した。

①平吉(1969)によるシバ種子の発芽率

・処理をしないもの(15日目) 13%

・種皮をはいだもの(15日目) 70%

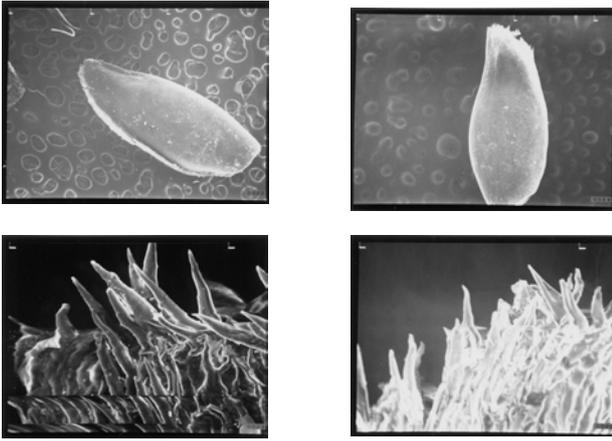


図4 自然形成されたシバの種子（左）と糞の中
から取り出したシバの種子（右）
上段が×35、下段が×13000

<観察結果と考察>

電子顕微鏡で観察した結果(図4)、糞の中のシバの種子と自然に形成されたシバの種子を35倍に拡大観察したものは、ほとんどかわらないことがわかった。

だが、13000倍に拡大観察すると、棘の様な表面の形態が観察できる。糞中からとりだした種子の方は、表面の棘の様なものが、研磨された様になっている。また糞の中からとりだした種子は、どの個体も一部外観の欠損を確認した。よって、文献調査(3-1)からもわかる様に、種子に何らかの傷があるため、発芽率は上がることが予想される。しかし、糞中の種子には外観に欠損があることが多く、その欠損部分が種子の胚の部分であれば、発芽することはできないであろう。

3-3-1 シバ種子の発芽について(実験その1)

奈良公園で、自然形成されたシバの種子と糞中のシバの種子を採取した。以下の条件下で、種子の発芽率を調べた。

- a. 自然形成されたシバの種子
- b. 剃刀で種皮に傷を付けたシバの種子
- c. 糞中のシバの種子

以上3つにわけて種子の発芽を観察することを試みた。

<仮説>

a～cのうち、bの条件が一番発芽率が大きく、二番目に糞中のシバの種子の発芽率が大きく、自然形成された条件の種子が一番発芽率が小さいだろうと予測した。

<実験方法>

- (1) a～cをそれぞれ各対象になる種子を50粒ずつ用意し、濾紙を敷いたシャーレに入れて毎日水を与え、同じ環境を保ち、実験を開始した。
- (2) 実験は3回に分けて行った。

<結果>

- ①6/21から6/28まで観察したものはついでにはカビだらけになった。発芽には十分な日光が必要と文献調査でわかったので、日陰から日向に移した。その結果、7/3に一粒だけ発芽した。その後、しばらく観察したが発芽しなかった。
- ②7/13から別のものを用意し、再び実験を開始した。今回は日の当たるところに置いた。が、今年は梅雨の期間が長く、再びカビに悩まされた。途中、各個体すべてをアルコールで拭いたりもしたが、カビが発生し発芽しなかった。また失敗に終わった。
- ③8/24～濾紙を綿にかえて種子にカビが生えない様に、はじめにアルコールで拭いて、紫外線に当ててから観察したが、なかなか発芽を確認することはできなかった。

①～③の結果をうけて、奈良公園内のものではない市販されている各対象以外のシバの種子を使って発芽率を調べることにした。

3-3-2 西洋シバの発芽について(実験その2)

使用した西洋シバの種類は“ケンタッキーブルーグラス”(容易に園芸店等で手に入れることができ、育てやすい)。生産地はアメリカ。発芽率は70%。まく時期は、地域により、冷涼・中間・暖地に区別してあったが、中間を選び、3月下旬～6月下旬、9月中旬～10月

中旬に植えることにした。次のように販売の袋に明記してあった(図1)。実験は期間中にあたる、9月29日から開始した。

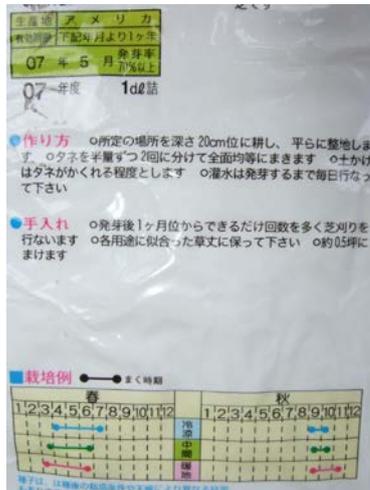


図1



図2

(1) 西洋シバの発芽条件について

培地は2種類で、環境条件が5種類の合計10通りの条件で、発芽率を調べることにした。

① 市販の西洋シバの袋には、『土に種子をまいて、種がかくれる程度に土かけをする』と明記されているが、「きのこ実験マニュアル」(善如時厚・渡辺直明/著)より、3%ショ糖の寒天培地を使用した。また、培地は2種類。一つには発芽を促す成長ホルモン(オーキシン)が多く含まれている大根の根の先を入れた。もう一方は市販されている粉末で、発根促進剤。成分は α -ナフチルアセトアミド…0.40% 鉱物質等…99.6%を使用した。

② ①のものを、それぞれ次の環境において、それぞれ100粒ずつ用意した。
a. 冷蔵庫で一週間、その後温室の明るい所

で一週間。

- b. 冷蔵庫で一週間、その後室内の暗い所で一週間。
- c. 室内の暗い所で一週間、そのまま室内でさらに一週間。
- d. 室内の暗い所で一週間、その後温室の明るい所に一週間。
- e. 日向の明るい所で二週間。

<仮説>

- ① 種子の発芽には太陽の光はいらぬはずなので、暗所でも発芽はできるだろう。が、太陽光があれば発芽率は上がるだろう。
- ② シバの種子の発芽には温度が影響するだろう。
- ③ 低温処理(春化处理)をすると発芽しやすくなるだろう。
- ④ シバは休眠打破出来る植物だと思うので、
a. が一番発芽率が大きくなるだろう。

<実験方法>

3%のショ糖で発芽実験を行う。その培地には大根の根をすりおろしたものと発根促進剤を入れたものの2種類を準備する。それをシャーレに寒天を入れ、それぞれ上記の a~e の5種類の条件で行う。2週間行い、すべて100粒の種子を用いた。



図4 発芽実験の様子

<結果と考察(実験その2)>

a~e 全てにカビが発生し、発芽はしなかった。加えた植物の成長ホルモンがシバの種子ではなく、カビの増加に影響しているからだろう。カ

ビの種類の中には“稲馬鹿苗病菌”といわれる、赤紫色のカビがあり、それは植物の成長を促すホルモン(ジベレリン)を分泌するらしいので、このカビによって発芽させることができなかと期待したが、このホルモンも他の黒いカビに作用しているようだ(図5)。さらに一週間観察を続けたが発芽しなかった。次に本来の環境に適していると思われる土に、10月14日より二週間、植えて観察した(実験その3)。(図6・7)



図5 稲馬鹿苗病菌と黒カビ

3-3-3 土を培地として植える(実験その3)

<実験方法>

- ①牛乳パックの底に穴を開け、土(種・挿し木用土)を入れる。
- ②ケンタッキーブルーグラスの種子をそれぞれに100粒ずつ入れ、上から薄く土をかぶせる。
- ③それを5つ用意し、5通りの条件で10/14から二週間に渡り、実験をとりおこなう。

以下の条件で実験を行った。

- a. 冷蔵庫で一週間、その後温室の明るい所で一週間。
- b. 冷蔵庫で一週間、その後室内の暗い所で一週間。
- c. 室内の暗い所で一週間、そのまま室内でさらに一週間。
- d. 室内の暗い所で一週間、その後温室の明るい所に一週間。
- e. 日向の明るい所で二週間。



図6 牛乳パックに土をいれて植える



図7 温室で気温調節

<仮説>

- ①発芽に日光は関係ないはずなので暗所でも発芽は可能だろう。
- ②シバの種子の発芽には温度、水分、空気などの条件が影響するだろう。
- ③シバは休眠打破できる植物だろうから、冷蔵庫→暗所、冷蔵庫→日向が多く発芽できるだろう。
- ④暗所→日向は温度が一定しているので、休眠打破できず、仮説③で述べたよりも発芽率は小さくなるだろう。
- ⑤暗所→暗所は光が十分に当たらないので、発芽率は大きくなるだろう。
- ⑥日向→日向は光が十分に当たるので、発芽率が一番大きくなるだろう。
- ⑦ 仮説①～⑥をもとに発芽率の大きい順に並べると e→a、b→d→c となるだろう。

<結果>

実験の結果は、次の表のようになった。

表1 ケンタッキーブルーグラスの発芽

	一週間後	二週間後
a	0	26
b	0	10
c	7	17
d	8	17
e	1	84

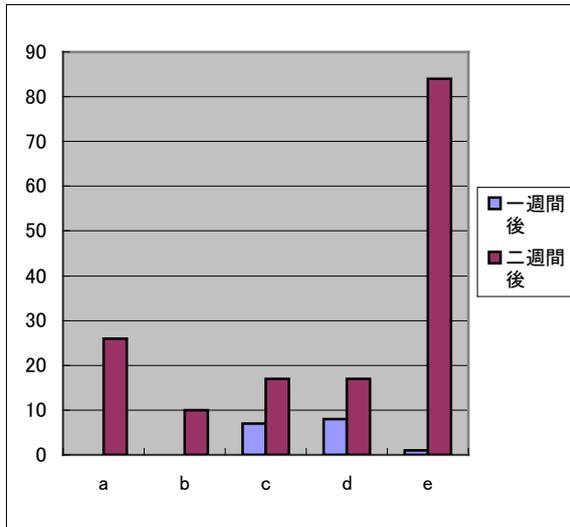


図8 ケンタッキーブルーグラスの発芽



図9 ケンタッキーブルーグラスの発芽

表1より、e→a→c、d→bとなった。初めの一週間では気温が一定している室内の暗所で発芽率が高かったのも、次の一週間は明るい気温が一定している温室に移した。日向で一週

間置いたものは次の一週間もそのまま戸外に出して置いたが、発芽率は83%ととても高かった。日が当たる方が発芽率は高いということがわかる。

<(実験その3)考察>

- ①シバの種子発芽の培養は土であることのほうがよいことがわかった。このことから、土中にはなにかしらの作用が働いているのでは?と思われた。調べてみると、土中には“放線菌”といわれる菌があり、それにより植物はカビ等から守られているようである。この“放線菌”については、次の課題にしようと思った。
- ②(表1)より、発芽には適度な温度(25℃前後)が必要なことがわかった。また、(表1)の日向→日向より、適度な温度と、さらに急激な朝夕の気温差があることが発芽をより促進させる傾向がある。
- ③一週間気温の一定した(25℃前後)暗室に放置した後に気温の一定した温室(25℃)に置いても、暗室に置いても発芽率が同じだった。しかも、発芽率はあまり高くないことがわかった。
- ④aの結果より、冷蔵庫から温室(明るいところ)に出したものの発芽率が急に高くなったことから、シバの発芽は日光が当たった方がよいのではないかとされる。
- ⑤シバの種子は表1より、休眠打破ができるのではないかと考えられる。
- ⑥急激な温度差のある日向では発芽に2週間かかることがわかる。
- ⑦温度の低い冷蔵庫から急激に温度の高い温室に移すと一週間という短い期間で発芽率が急増する。

以上のことより、シバの発芽は朝夕の気温差が激しく、寒い時期からの春に起きることがもっとも多く、長いシバの育成において日光に当たったほうが好ましいと考えられる。

4. これからの課題

この研究はシカの糞の中からシバの種子は発芽するのか？という疑問から始めた研究である。これまで、私は鳥のみが様々な種子を散布すると考えており、哺乳類が種子を散布すると考えていなかった。だが、さまざまな文献調査を行った結果、哺乳類であるシカが種子を散布する事はすでに実証されていた。そこでシバの種子の発芽にチャレンジするが、カビに悩まされて夏を越してしまう。紆余曲折した結果、小学校1年の”アサガオの観察”での「土に埋める」という初心の発想に帰ることで簡単に解決した。しかし、この実験観察の失敗を通して私は新しいことを知った。それは”稲馬鹿苗病菌”、そして”放線菌”である。これら二つは次回の研究課題にしたいと思う。

また、今回は糞中のシバの発芽を成功させることが出来なかった。これも次回の研究課題にしたいと思う。

5. 参考文献・サイト

- [1] 「シカが育てるシバ草原」、高槻 成紀著
- [2] 「奈良シカの行動Ⅰ 土地利用と日周活動」
福永 洋、川道 武男著
- [3] 「きのこ実験マニュアル」(講談社サイエンティフィック)、善如寺 厚、渡辺 直明著
- [4] 「細胞培養技術」(講談社サイエンティフィック)、杉野 幸夫著

<http://naradeer.com/prof-ecology.htm>

6. 謝辞

資料を提供して下さった奈良鹿愛護会の皆様、助言して下さいました本学の植野洋志先生、資料を提供していただいた麻布大学獣医学教授高槻先生には深く感謝いたします。

SSH 化学プログラム 参加レポート

5年C組 青木沙羅

1. 要約

2007年8月24日(金)、SSH化学プログラム「右手分子と左手分子の世界 ―生命活動の源一」(講師:奈良女子大学理学部長 池原健二教授)に参加し、光学異性体について学んだので、以下に報告する。

(午前) 講義: 人間をはじめとするこの地球上の生物は、アミノ酸や糖などで一对の光学異性体(L体・D体)のうち的一方(アミノ酸ではL体、糖ではD体)から構成されている。生物が光学異性体的一方のみを使う理由は何なのか、また、通常の方法で人工合成した時には一对の光学異性体が等量生成されるのに、なぜ生物は一方のみを合成できるのかを考えた。

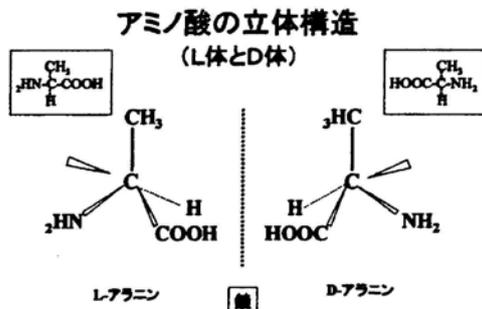
(午後) 実験: 平面偏光が光学活性な有機化合物の溶液中を通過する際、偏光面が回転する性質『旋光性』について学習した。その後、平面偏光が通過するスクロース水溶液の条件を変えることで旋光度がどのように変化するかを実際に測定した。

キーワード 光学異性体、アミノ酸、タンパク質、糖、平面偏光、旋光性

2. 講義

(1) 光学異性体とは

分子式が同じ、原子同士のつながり方も同じであるが、ぴったり重ねようとすると重ならない、右手左手の関係をもつ物質のことを光学異性体と呼んでいる。これは鏡に映したときの実体と鏡像の関係と同じといえる。



例えば、上図に示すように、アラニンにはD-アラニン、L-アラニンの2種類の光学異性体がある。グリシンは上図のメチル基

が水素に置き換わった分子なので、不斉炭素原子をもたず光学異性体がないが、それ以外のアミノ酸には全て光学異性体がある。

(2) タンパク質の構成成分がα-アミノ酸である理由

タンパク質はアミノ酸からできている。アミノ酸はアミノ基とカルボキシ基をもつためペプチド結合でタンパク質を構成していく。ペプチド結合には、水素給与性と水素受容性の性質をもつ部分があるので、長い一本鎖が螺旋状に巻いたときに水素結合で鎖をとめることができ、頑丈な螺旋構造をつくることできる。

また、タンパク質はα-アミノ酸のみからつくられている。α-アミノ酸はα-炭素にアミノ基を有しているので、複数のアミノ酸がペプチド結合でつながった際に、ペプチド結合の平面部分と、単結合の回転可能

な部分とを適度にもつことができる。この適度な硬さと軟らかさが色々なタンパク質をつくるのに必要となる。

(3) 光学異性体がなぜ重要か[1]

私たちの体は光学異性体の一方を主に使っている。例えば、タンパク質を構成しているアミノ酸は、不斉炭素原子をもたないグリシン以外はすべてL体である。このことは、右巻き的一本鎖螺旋構造をつくるのに好都合であり、さらに球状構造になって出来上がるタンパク質表面の基本的な非対称の構造にも好都合となる。この非対称な表面をもつタンパク質（酵素）によって化学変化が促進されるため、生成される物質もすべて非対称な分子となる。また、酵素表面の上側からしか反応しないので、L体みの物質を生成することも可能となる。

(4) 光学異性体がなぜ重要か[2]

光学異性体の物質をタンパク質表面に結合させることで、私たちは味やにおいを感じることができる。例えば、L-グルタミン酸は、旨味を感じるタンパク質表面に結合するので旨味を感じることができる。しかし、D-グルタミン酸はこの旨味を感じるタンパク質表面には結合せず、苦味を感じるタンパク質に結合してしまうため、D-グルタミン酸を摂取すると苦く感じてしまう。

また、1960年前後に国際的な問題となったサリドマイド剤にも下図のような光学異

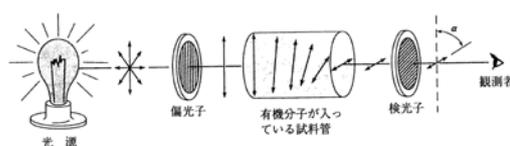
性体がある。R体には睡眠・鎮静作用がありS体には催奇性があるために起こった薬害事件もあった。

このように、2つの光学異性体の生体内での作用が異なることから起こる副作用の危険性など、私たちは光学異性体のことを理解した上で使い分ける必要がある。

3. 実験「旋光度の測定」

(1) 『旋光性』とはどのようなものか

2枚の偏光板を重ね、光源を見ながら片方の偏光板を回転させると、あるところで真っ暗になる。これは、光はあらゆる方向に振動しているが、偏光板を通したとき偏光板の軸と平行な方向の振動のみになり、この平面偏光がさらにもう1枚の偏光板によって遮断されるために起こる現象である。この状態で2枚の偏光板の間に光学活性な有機化合物の溶液をはさみ、光を通過させると偏光面が回転し、わずかな光が通過できるようになる。このように偏光面を回転させる性質が旋光性である。



(2) スクロースが示す『旋光度』を測る

スクロース水溶液の濃度・高さによって旋光度が変化することを確認する2つの実験を行った。

実験1「濃度と旋光度の関係」

[実験器具]

角砂糖（スクロース）、水、ビーカー、ガラス棒、メスシリンダー、偏光板2枚、光源、スクリーン、分度器

サリドマイド事件

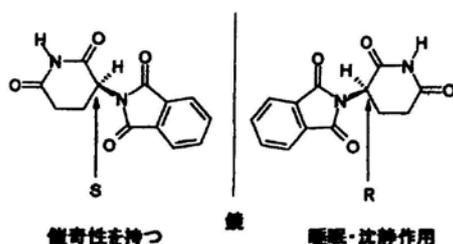




図 旋光度測定装置

[方法]

- ① ビーカーに角砂糖 62.9 g を入れ、水を加えた。よく攪拌して角砂糖を全て溶かした後、溶液をメスシリンダーに移し、全量を 160ml にした。
- ② 容器に①の溶液全てを移した。
- ③ 上写真の装置で、光源から出た光を 1 枚目の偏光板を通過させて平面偏光にし、2 枚目の偏光板を回転させて光を完全に遮断した。このとき、回転させた偏光板の角度を分度器で測定した。
- ④ 2 枚の偏光板の間に②の溶液を置き、③と同様 2 枚目の偏光板を回転させて完全に光が遮断したときの角度を測った。
- ⑤ 次に、容器内の溶液を半分捨てて、そこに同じ量の水を加えることで、2 倍希釈の溶液を調製し、操作③、④を行った。
- ⑥ 操作⑤をもう一度行い、4 倍希釈の溶液についても操作③、④を行った。

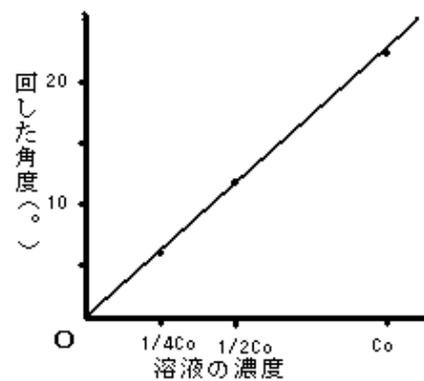
[結果]

偏光板のみの角度は 269° であった。2

枚の偏光板の間に溶液を置き、偏光板を回したときの角度、 269° との差(回した角度)を表にまとめると以下の通りになった。

濃度	角度	回した角度
もとの溶液	247°	22°
2 倍希釈	257°	12°
4 倍希釈	263°	6°

溶液の濃度と回した角度の関係をグラフにすると以下のようになり、これらには比例関係があることが分かった。



実験 2 「溶液の高さと旋光度の関係」

[実験器具] 実験 1 と同様。

[方法]

実験 1 と同じ方法で、⑤のみを以下のような操作に変更した。

- ⑤ 容器内の溶液を半分捨てた後、水を加えることなく溶液の高さを 1/2 にして操作③、④を行い、さらに 1/4 にして同様の操作を行った。

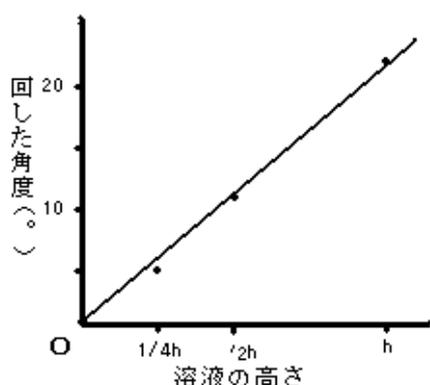
[結果]

偏光板のみの角度は 269° であった。2 枚の偏光板の間に溶液を置き、偏光板を回したときの角度、 269° との差(回した角度)

を表にまとめると以下の通りになった。

溶液の高さ	角度	回した角度
もとの溶液	290°	21°
1/2 の高さ	280°	11°
1/4 の高さ	274°	5°

溶液の高さと回した角度の関係をグラフにすると以下のようになり、これらには比例関係があることが分かった。



[考察]

2つの実験結果から、2枚の偏光板の間にスクロース水溶液を置くと、決まって右回りに平面偏光が回転した。このことから、水に溶けているスクロースには旋光性があり、しかも右旋光性をもつ分子のみの集合であるということが分かった。

さらに、実験1、実験2とも比例関係にあることから、旋光度は濃度と高さに比例することもわかった。これは、偏光板を通った光が次の偏光板を通過するまでに衝突するスクロース分子の粒子数に比例しているからだと思われる。

4. 化学プログラムの参加した感想

今回学んだ光学異性体はまだ学校で学習

していない内容だったが、身近な具体例を取り入れての講義だったので、とても分かりやすく、理解することができた。

本プログラムで特に印象に残った内容は、生体内で一方の光学異性体しか生成されないことに酵素などのタンパク質が深く関わっているということである。また、タンパク質表面でこのような特異的な反応が起こるのも、タンパク質を構成しているアミノ酸がすべて α -アミノ酸であることに起因していることも知った。

講義や実験の中で、池原先生はよく「学ぶことの面白さ」を口にされていた。「試験勉強のための勉強ではなく、『なぜそうなるのか?』を考えながら勉強し、それが分かったときの面白さが研究につながっていく」と話される池原先生のお姿に、研究に対する情熱を垣間みさせていただいた。私も楽しみながら化学の研究を進めてみたいと心から思った。

5. 参考文献・サイト

- [1]「化学大事典」、大木道則、大沢利昭、田中元治、千原秀昭編 東京化学同人 (1989)
- [2]「マクマリー有機化学上 第3版」、JOHN McMURRY 著、児玉三明ら訳、東京化学同人 (1995)
- [3]「高等学校化学 I 改訂版」、齋藤烈、山本隆一編、新興出版社啓林館 (2006)
- [4]「高等学校化学 II」、坪村宏、齋藤烈、山本隆一編、新興出版社啓林館 (2003)
- [5]大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎、岡博昭の HP

<http://www.tennoji-h.oku.ed.jp/tennoji/oka/okaindex.html>

太陽の光のスペクトルについて

4年A組 古川 琴詠

4年B組 今井 咲季

指導教諭 屋鋪 増弘

1. 要約

私達SSH地学班は、太陽の光のスペクトルを調べることにより、太陽にはどのような原子が存在するのかについて調べる研究を行いました。

キーワード 太陽の光のスペクトル

2. 研究の背景

とても身近な太陽ですが、「太陽がどんな種類の原子から出来ているか」と聞かれると、代表的な水素などの原子の名前は出てくるのですが、その他の原子については自信を持って答えることは出来ません。文献で調べればすぐに知識を得ることが出来ますが、せっかくSSHに入っているのだから、自分たちで実験を行うことで確かめた方が良いのでは、と思い、研究を行いました。

※ (光の)スペクトル:(太陽の光などの)白色光をプリズムに通すと、光が色(波長)の違いにより分けられて(=分光されて)、波長の短いものから長いものへ綺麗に配列されて横に並べられたもののこと。

※ 光を分光するときには分光器(図1, 2)を使用しました。

※ 連続スペクトル:電球のフィラメントなど、高温の物体が放射する光のスペクトルで、すべての波長の光が連続して配列されているもの(普通の白色光のスペクトル)。ただし、恒星のスペクトルにのみ、白色光のスペクトルとは違い、吸収線(暗線)が見えます

3. 研究目的

太陽の光のスペクトルを調べることで、太陽にある原子の種類を知る。

4. 研究内容

(1) 仮説

太陽には水素、ナトリウム、カリウム、カルシウム、水銀が存在する。

(2) 研究方法

太陽光の連続スペクトルの吸収線(暗線)の位置と、原子の線スペクトルの輝線の位置を比較することで、太陽にどのような原子があるのかを調べる

※ 吸収線(暗線):(太陽の場合、)太陽の内部から放射された光(この時点では完全な連続スペクトル)が太陽表面のガス層の中を通過してくるときに、ガス中の原子により、特定の波長の光

が吸収されてしまうために出来る黒い線。

- ※ 線スペクトル:原子はその種類によって決まった波長の光を出したり吸収したりします。こうして原子が出した光のスペクトルのこと。スペクトルは帯状ではなく、線(輝線という)となって見られます。
- ※ 太陽の連続スペクトルの写真と原子の線スペクトルの写真をデジタルカメラで撮り、画像をパソコンに取り込むことで比較しました。
- ※ 原子の線スペクトルの位置が、太陽の連続スペクトルの吸収線の位置と重なった場合、その原子は太陽には存在して、光を吸収したことになります。

(3) 研究の結果

それぞれのスペクトルの写真は図3～図4のようになりました。

5. 考察

図3(太陽の連続スペクトル)の中には文献に書いてあったとおり、吸収線がいくつも見られました

図4(太陽の連続スペクトルNa吸収線付近の写真)と図5(Naの線スペクトルの写真)と比較してみると、図4の目盛りの5.88あたりに分かりやすい吸収線が一本見られます。それに対し、図5の目盛り5.88あたりには、Naの輝線が見られます。よって、太陽にはNaが存在することが確認できました。

しかし、図9(水素の写真)については

輝線の位置と目盛りの位置がずれているため、水素の輝線の位置を太陽の連続スペクトルの吸収線の位置と正確に比較することが出来ませんでした。スペクトルの写真を撮るときに、蛍光灯の明かりを分光器に入れることで、目盛りをスペクトル上に表示させることが出来ます。この光を入れる際に、正確な角度で入射させず、少し斜めの角度から光を入射させたため、うまく目盛りを表示させることが出来なかったものと思われます。

また、図6、7、8の各原子の線スペクトルは、輝線の位置と目盛りの位置がずれてはいないのですが、比較するために使う太陽の連続スペクトルの写真に、吸収線が鮮明には表示されておらず、きちんと比較することが出来ません。

よって、残念ながら、H、Ca、K、Hgの四つの元素が太陽に存在するかどうかを確認することは出来ませんでした。

連続スペクトル上の吸収線を鮮明に撮影することが出来なかった理由として、

- ・ 目盛りを表示させるために入れた蛍光灯の光が強すぎた
 - ・ 太陽の光を入れるときに、スリット(非常に細い隙間)の幅を調整するが、その時にスリットの幅を十分に細くしていなかったため、画像がぼやけてしまった
 - ・ デジタルカメラと分光器の固定がしっかりとしていなかった
- などの原因が考えられます。

6. まとめ・今後の課題

今回の研究は、カメラの固定が不十分であったり、蛍光灯の光が強すぎたり、と実験設備が整っていなかったのが、本

研究における失敗の最大の原因といえます。今後、いかにして実験設備を整えていくかが最大の課題と思われます。

今後、新たな研究をするときには、文献に書いてある事柄を確かめるための実験ではなく、自分たちで新たな疑問を持ち、その疑問を解くための実験・研究を行うことが出来れば一番良いと思います。

7. 参考文献

- [1]「高等学校 地学 I」、松田時彦・山崎貞治編、啓林館(2003)
- [2]「詳説 化学」、藤原鎮男・細矢治夫・野平博之編、三省堂(1993)
- [3]「ニューステージ 新訂 地学図表」、浜島書店編集部著、浜島書店(2003)

8. 謝辞

屋鋪先生、実験準備から資料集めまで、わざわざやっていただき、誠にありがとうございました。



図1・分光器



図2・分光器内部

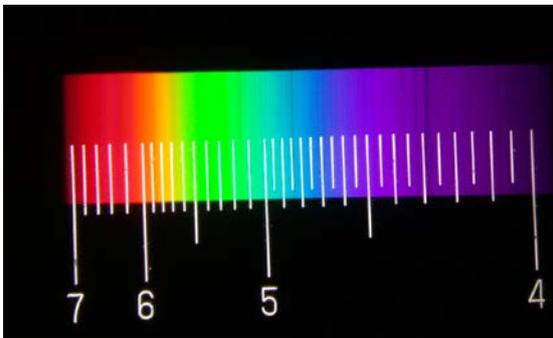


図3・太陽の連続スペクトル

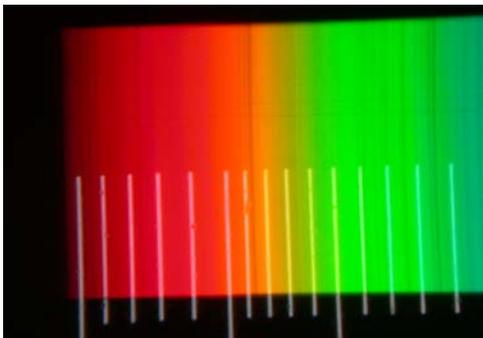


図4・太陽の光の連続スペクトル Na吸収線付近

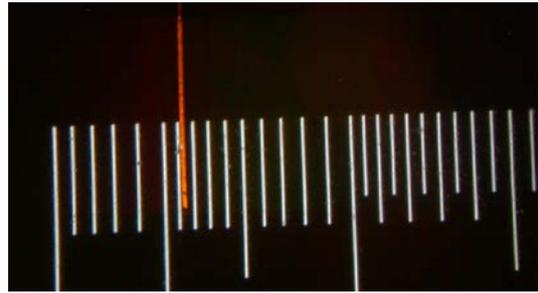


図5・Naの線スペクトル

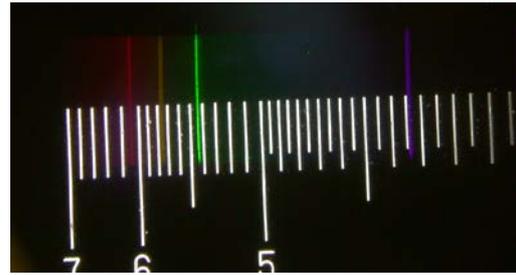


図6・水銀の線スペクトル

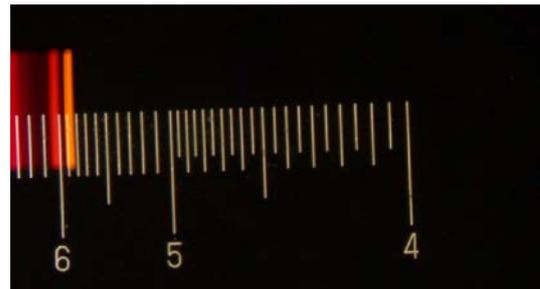


図7・カリウムの線スペクトル

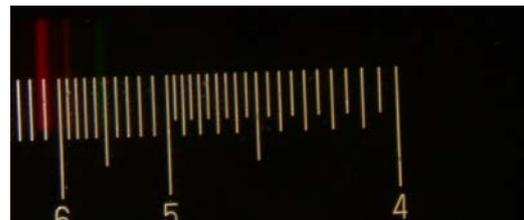


図8・カルシウムの線スペクトル

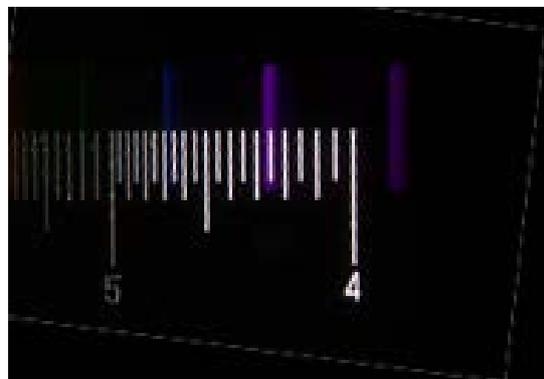


図9・水素の線スペクトル

2007年度SSHサイエンス研究会
生徒研究論文集

2007年(平成19年) 11月22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/>



SUPER SCIENCE HIGHSCHOOL

SCIENCE LABORATORY

NARA WOMEN'S UNIVERSITY SECONDARY SCHOOL