

環境奨励賞

第37回沖縄青少年科学作品展

皮が資源に生まれ変わる？

沖縄市立美里小学校
6年 多和田 早希

1. 研究のきっかけ

沖縄のお盆はウケケ(先祖の迎え)ナカ(中)ウケイ(先祖の送り)の3日間行われます。仏壇にはお供え物として果物やお菓子が無駄なく残るまで最終日のウケイ(送り)が終わると仏壇にお供えされた果物が我が家にやってきます。




お盆の仏壇飾り 果物が両端に飾られます

今年も私が楽しんでいた果物がやってきました。果物の皮を見ながら、私は皮を使っている生活を振り返っていました。皮を利用して汚水を落としたり、油汚れはクレーパーで取り、たり新聞紙で拭き取り、生活排水をきれいにして川や海を守る行動をしてみよう。汚れ落としに使用した皮にEMポカシを加えてEM肥料を作り、花壇の土に混ぜ、野菜を栽培、収穫して料理して料理を作った、やっている生活など...

皮が川を救う?生活





1:口の油を落とします 鍋の油はクレーパーで取る 食後の皿は高く

EM肥料でめざせ!自給自足生活





皮とEMポカシは肥料 花壇の土に混ぜる ヒーマンの苗植え

1

2. 調べ学習!

(1) バイオエタノールとは「植物等のバイオマスを原料として製造されるため、燃焼しても大気中のCO2を増加させない特性を持った燃料であり、ガソリンと混合して利用することにより、ガソリンの燃焼時に発生するCO2の排出を減少させる効果を有する。」(農林水産省のホームページより)

(2) エタノール製造プロセス (農林水産省ホームページより)

```

    グライン → 粉碎 → 糖化 → 発酵 → 蒸留 → 脱水 → 無水エタノール
                ↑           ↑
            糖化酵素       酵母
    
```

糖化酵素 → 粉碎 → 発酵 → 蒸留 → 脱水 → 無水エタノール
作物 ↑ 酵母

(3) バイオマスとは「動物植物から生まれた再生可能な有機性資源です。」(代表的なものに家畜排せ物や庄ごみ、木くず、もみからあります。)(農林水産省ホームページより)

2

④)エタノールとは「エチルアルコール」とも呼ばれる。お酒の成分で注射の時や消毒やなど身近に使われている。(理科ホムページ)

⑤)CO2とは「動物が息を吐いたりする呼吸や、石油や化石燃料を燃やすことで発生する気体。CO2は地球の大気をつくる成分のひとつです。それ自体は有害ではあありませんが、地上から出る熱を吸収する温室効果があるため、CO2の量が多くなると、環境問題である地球温暖化につながります。地球温暖化は異常気象や自然の生態系、農業などへの影響が心配されています。CO2量を減らすことは、地球に住む私たち全員課題です。(ホムページより)

③調べ学習を終えて...

石油や石炭が少なくなりました。たう、今の生活がどう変わってしまうのかと思ひ、母に聞いてみると「電気・ガス・水道水制限され、おはあちゃんたちが送、た昔の生活を送ることになるんじゃないか」と言われました。そこで、「昔の生活はどんな生活だったのか」調べてみることにしました。

3. 調べ学習2

④) 国指定重要文化財の中村家住宅を見学して、昔の家とはどんなだったのかを調べました。

◎中村家住宅とは(パンフレットより).....
18世紀中ごろに建てられたと伝えられています。建...
造構造は、鎌倉・室町時代の日本建築の流儀を伝えて...
います。各部に特殊な手法が加えられて、独特な住...
居建築になっています。この建物は土族屋敷の形式に...
農家の形である高倉、納屋、番倉等が付随して沖繩...
の住居構築の特色を全て備えています。屋敷は南抜き...
南向きの暖かい傾斜地に切り開いて建てられており、東...
南、西を琉球石灰岩の石垣で囲い、その内側に防風林

の役目を果たしている楠木をよ、台風に備えています。



中村家住宅

屋敷の囲りと取り囲む防風林

②昔の暮らしについて祖父に話を聞いてみました。(昭和3年生まれの豊子おばあちゃんと昭和17年生まれの幸子おばあちゃんの話より)

聞き取った内容 中村家の写真

①電気について
米電気はなく「石油ランプ」
に石油を入れた使、た。
(石油は買、た)ススを吸、
吸るのが大変、た。

米アイロンは「燻、た炭」を入
れて使、た。炭の灰が箱
に散、り、取、つ、か、ない、は
うに、する、のが、大変、た。

②ガスコンロについて
ガスコンロはなく「柏、た作、
」大、葉、に、薪、を、詰め、柏、た、葉、
に、火、を入、れ、料理、し、た。火
加、減、調節、は、難、し、か、た。
炊、飯、シ、ー、は、なく、お、釜、で
ご、飯、を、炊、いた。

石油ランプとアイロン

③水廻りについて
水道はなく、敷地の井水
を汲んだり、近くの川に水を
汲みにいった。



③調べ学習を終えて...

午後2時頃の暑い時間の中村家を見学に行きました。ク...
ーナーがないのに、風通しが良く、室内は涼しかった。作業内...
係になせ、涼しいのと質問すると、住宅に施された暑さ...
と工夫について説明してもらいました。昔の人は生活を...
改善しながら快適な生活を送、てきたんだなと感、じ、ま、し、た。
祖父から話を聞き、昔は、自給自足、食、物、も、え、し、く、電、気、...
ガ、ス、水、道、も、なく、不、便、で、変、な、生、活、を、送、て、い、た、こ、と、を...
知、り、ま、し、た。昔の生活に比べて、現代の生活は天国のよ、う、な...
生活、だ、よ、う、な、言、葉、も、印、象、的、だ、と、思、い、ま、し、た。も、し、今、の、生、活...
が、昔の生活に変わると想像するだけで不安を感、じ、ま、し、ま、す。
限、り、た、資、源、を、使、い、切、る、前、に、自、分、た、う、資、源、を、作、り、出、す...
こ、と、が、必、要、だ、と、感、じ、ま、し、た。

これまでの調べ学習を通して、今年は「
果物の皮をバイオエタノールをつくること」ができるか、
を研究(実験)することにしました。

4. 実験計画

④) 実験方法
糖度を含む皮を選、び、粉、砕、し、酵、母、を、活、用、し、て、発、酵、さ、
せ、圧、力、鍋、で、蒸、留、し、て、蒸、留、液、(バ、イ、オ、エ、タ、ノ、ール)を、集、め、
ま、す。

④) 実験の手順

①果物の皮で糖度高そうなものを選びます。(学校
から糖度計を借ります。)

②皮を粉砕します。(包丁で細かく皮を刻みます。)
③酵、母、(家、に、あ、る、イ、ース、ト、E、M、ホ、ル、カ、リ、の、3、種、類、を、使、用、
し、ま、す)を、活、用、し、た、発、酵、を、行、い、ま、す。
④圧、力、鍋、の、蒸、気、が、で、る、部、分、に、熱、に、強、い、ホ、ース、を、固、定、し、
ホ、ース、を、水、で、冷、や、し、な、か、う、蒸、留、液、(バ、イ、オ、エ、タ、ノ、ール)を、集、
め、ま、す。



圧力鍋

蒸気部分にホース固定

ホースを水で冷やす



圧力鍋を活用した蒸留装置

⑤家庭の身近なもので脱水をする葉が洋かばず今回は
脱水を行います。

⑥父のアルコールセンサーを使、て、アル、コ、ール、セ、ン、サ、ー、状、度、配、
すれば、バ、イ、オ、エ、タ、ノ、ール、が、つ、く、れ、た、と、判、断、し、ま、す。そ、う、判、
断、し、た、理、由、は、よ、う、ち、ら、う、↓

アルコール、エタノール、エチルアルコール、酒類のうちい、は、？
アルコール、エタノール、エチルアルコール、酒類とそれ以外が
いますが、同じものです。アルコールは広義には、エチルアルコ
ール、メチルアルコール、アロピルアルコールなどアルコール類
の総称です。しかし、一般的にはアルコールといえばエチルア

アルコールを指します。「エタノール」は国際科学命名法で「エチルアルコール」は慣用名、「酒精」は日本語の名称です。(経済産業省のホームページより)

アルコールセンサー HC-2BS TANITA (測定表示)

表示(%)	酔い具合
0.01-0.05	飲みはじめ
0.10	酔いはじめ
0.15	気分爽快で気持ちが良い 顔や皮膚がエスする
0.20	猶次昏々
0.25	適度に酔った良い機嫌になる
0.30	多動・多弁になる
0.35	感情の抑制が小さくなる
0.40	
0.45	
0.50	飲み過ぎ
0.50点減	腹をたてやすくなる
E	測定不能



5.予想

果物の皮からバイオエタノールをつくることはできないと思います。

理由:家庭でバイオエタノールをつくることのできるのなら、まずが実践していると思うからです。また、一般家庭にも普及されみんながバイオエタノールをつくらせて活用していると思うからです。バイオエタノールという言葉も今回はじめて聞き、調べてわかったくらいで、周囲でも認知度も少なく、普及していないと思うので、簡単につくることはできないと思います。

6.実験1 バナナの皮を使った実験

①バナナの皮を選んだ理由
我が家では、夏になると沢山のバナナを凍らせて

バナナアイスを作、て食べ、暑い夏を乗り切っています。母がエールで安く、たバナナを沢山買、てきてバナナアイス作るから手伝、てと声か、かかり、皮をむき、ラップに包んでいました。すると目の前にある皮に目を付け、まずはバナナの皮で実験してみようか?というこ、とで学校から借出した糖度計(PAL-1)で糖度を測定しました。すると16.5%という高い数値が得られたので、バナナの皮で実験してみることになりました。



①良品のバナナ(一部)皮をもさら、アイス包みます!凍らせてあげよう!

②材料内容

種類	基本材料	酵母
A	バナナの皮 200g + 水 200ml	なし
B	バナナの皮 20g + 水 200ml	イースト
C	バナナの皮 200g + 水 200ml	米こうじ
D	バナナの皮 200g + 水 200ml	EMポカシ

③実験方法

①糖度計で完熟バナナから測っている汁の糖度を測ります。



②バナナの皮を細かく刻み、200gずつ保存用袋に入れます。



③④に酵母を加えて混ぜ合わせます。



④③を室内(温度30~35度 湿度60~70%)に24時間置きます。



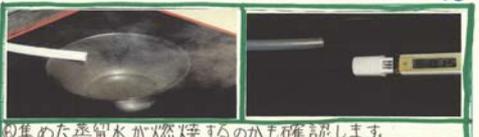
⑤アルコールセンサーを使用して、袋内アルコール反応を確認します。



⑥24時間後、圧力釜を使用して蒸留を行います。



⑦アルコールセンサーに蒸気をかざして、アルコール反応を確認します。(アルコール反応があらはれればバイオエタノールのできあがり)



⑧集めた蒸留水が氷然と凍るのをも確認します。



実験1-1 酵母なし・酵母あり(イースト・米こうじ・EMポカシ)発酵の様子・結果

Aバナナの皮+水の汁(酵母なしの場合)バナナの皮200gと水200mlを加えました。変化はありませんでした。



6時間後には変色は見られ、12時間後から水分が多くなり、小さな氷ができてきました。



11

18時間後、アツアツと泡立ち、袋にふくらみが見られます。0.45m³/Lのアルコール反応も確認できました。



24時間後には、0.50m³/Lの数値も確認できました。蒸留するための圧力鍋へ



B-イーストを加えた(酵母あり)の場合
イーストを10g混ぜると液が白くになり、泡がではじめました。



20分頃から袋がふくれはじめ、徐々に大きな泡立ちが見られました。50分頃から空気抜きはじめました。



11

12

1時間後には水分と共に大きな泡立ちが見られました。10分頃にも空気を抜きながら、所々に大きな泡立ちが見られました。



100分頃にも空気抜きをすると泡が敷き詰められた状態になりました。



2時間後泡立ちが少なくなりました。5時間後には袋が腫れあがなくなりました。



6時間後には0.50m³/Lのアルコール反応も確認できました。



C-米こうじを加えた(酵母あり)の場合
米こうじを100g加えました。米こうじの形も確認できました。



12

13

6時間後 ゆくりにした泡立ちが見られ、袋がふくれはじめ、空気抜きをはじめました。0.20m³/Lのアルコール反応も確認できました。



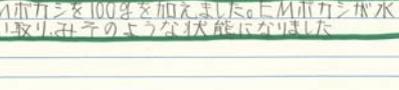
6~18時間後、空気を抜きながら、ゆくりにと大きな泡がアツアツと泡立っていました。時間が経つにつれ、米こうじの形もくずれ、白くはこびりました。



24時間後、アツアツと細かい泡立ちが見られました。空気抜きをしながら、ドロドロした、おかゆのような状態になりました。



D-FMホカシを加えた(酵母あり)の場合
FMホカシを100gを加えました。FMホカシが水分を吸い取り、みそのような状態になりました。



13

14



12時間後、水分がでてきました。



18時間後には水分がでてきて、ぼつぼつと小さな泡がはじめてきました。24時間後には、少しずつ袋が腫れあがり始め、水分がでてきました。



14

15

実験1-1 袋内のアルコール反応結果

種類	中身	袋内のアルコール反応 (6時間後)			
		6時間後	12時間後	18時間後	24時間後
A	6	E測定不能 なし	E測定不能 なし	0.45 あり	0.50 あり
B	4	0.50mg/L あり	0.50mg/L あり	0.50mg/L あり	0.50mg/L あり
C	4	0.50mg/L あり	0.50mg/L あり	0.50mg/L あり	0.50mg/L あり
D	4	E測定不能 なし	E測定不能 なし	E測定不能 なし	0.50mg/L あり

グラフ① 袋内のアルコール反応結果

①イーストと米こうじは発酵の様子は異なりましたが、6時間後の測定から同じアルコール反応が確認されました。
②酵母なしは18時間後の測定時にアルコール反応が確認されました。
③EMホカシは24時間後の測定時にアルコール反応が確認されました。

15

16

以上の結果から酵母の種類に応じて発酵時間に差があることが確認されました。

※蒸留方法の紹介(イーストの場合)※

①バナナの皮+水+イーストを混ぜ合わせ、24時間発酵させた中身を圧力鍋に入れます。その後、鍋の蓋を閉め弱火で煮めます。

②圧力鍋の蒸気口から出てくる蒸留水をホースで洗い器に集めます。

③ホースから出てくる蒸気をアルコールチェッカーで測定し、アルコール反応を確認します。

④圧力鍋から焦げ臭いがしたら火を止め、器に集めた蒸留水量を計算します。計算後、蒸留水が天然火を通るのかを確認します。最後に、鍋に残った材料のアルコール反応とPHを確認します。

16

17

実験1-2 蒸留結果

水	蒸気のアルコール反応	蒸留液	燃焼	朝に残った材料のアルコール反応	残った材料のPH	蒸留時間
A	0.10mg/Lあり	22ml	しない	E測定不能	5PH	19分
B	0.25mg/Lあり	24ml	しない	0.15mg/Lあり	4PH	21分
C	0.50mg/Lあり	24ml	しない	0.50mg/Lあり	4PH	13分
D	0.50mg/Lあり	19ml	しない	0.50mg/Lあり	4PH	10分

実験1の実験結果より

①バナナの皮+水+イーストだけでも時間を置くことで発酵できることが確認できました。
②酵母の種類によって発酵の仕方にそれぞれ特徴があることが確認できました。
③圧力鍋を活用した蒸留装置で蒸留液を集めることができました。
④蒸留中に出てきた蒸気にアルコールセンサーが反応したので、蒸留液はバイオエタノールだと判断しました。
⑤アルコールセンサーに反応したので蒸留液は燃焼すると思いましたが、燃焼しませんでした。なぜ燃焼しなかったのか父に質問すると「アルコールと言われている酒(10~40度)・ビール(3~6%)には火を灯すだけでも燃焼しないけれど、与那国産など、なんというお酒はアルコールが60度と高く、燃焼するんだよ。蒸留液はアルコールセンサーが反応したのでバイオエタノールなんだろうけど、アルコール度が低いから燃焼しなかったよ」と答えてくれました。

17

18

②材料、バナナ200g+水200gの計400gから蒸留された液は22mlでした。とても効率が悪いです。水を確認できました。

実験結果①

発酵が早い!アルコール反応が高いケンケン

発酵時間	袋内のアルコール反応	蒸気のアルコール反応	私の感想
A 3位	3位	4位	発酵に時間がかかりました。蒸留液を洗い器で集めることができませんでした。
B 5位	*1位	*2位	蒸留の速さはイーストの種類によって変わります。
C 2位	*14位	*1位	アルコール反応の速さはバナナが良かったです。
D 4位	4位	*1位	発酵に時間がかかりました。

気づき...実験1の結果から糖度と酵母の様子が異なり、アルコール反応に違いがあると感じました。そこで、お盆で買った果物を利用して糖度とアルコールの速さについて調べてみることにしました。

7 実験2 糖度とアルコール反応の速さを調べる

①果物(マンゴー・桃・バナナ)を選んだ理由
お盆の供え物でもらった果物の中から実際に食べてみて「甘くて、おいしい」と感じた果物(マンゴー・桃・バナナ)の皮を選びました。

②酵母としてイーストを選んだ理由
実験1の結果から、3種類(イースト・米こうじ・EMホカシ)の内、イーストが一番早く発酵の様子から確認できたので酵母としてイーストを選びました。

③材料内容(今回は水を加えません)

18

19

種類	基本材料	酵母
A	マンゴの皮や種と周りについていた身 400g (沖縄県産)	イースト10g
B	桃の皮や種と周りについていた身 400g (長野県産)	イースト10g
C	バナナの皮のみ 400g (オリーブ産)	イースト10g

①糖度計で糖度を、地球環境調査モードNEQでPHを測定します。

Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮
PH5(弱酸性)	PH5(弱酸性)	PH5(弱酸性)

②の皮をそれぞれ各400gずつ保存用袋に入れます。

Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮

19

20

③④に酵母(イースト10g)を加えてよく混ぜ合わせます。

--	--

⑤の容器内(温度20度へ30度 温度60へ70%)に時間置きます。

マンゴ	桃	バナナ

⑥発酵液をそれぞれを調えます。空気抜きをする前に、アルコールセンサーを使用し袋内のアルコール反応を確認します。アルコール反応が0.50%になる時間を確認します。

Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮

⑦約1時間後、圧力鍋を使用し(蒸留)を行います。アルコールセンサーに蒸気を当ててアルコール反応を確認します。

Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮

⑧平身の菓子

--	--	--

⑨完成

--	--	--

20

21

①集めた蒸留水を計測します。蒸留水が溢れるのかも確認します。

	Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮
蒸留水量			
蒸留	しない	しない	しない

②圧力鍋に残った材料のアルコール反応とPHを確認します。

	Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮
反応			

③表2-1 糖度とアルコール反応の調査結果

材料	糖度(%)	PH	材料のPH	イースト	空気抜き	指定時間(1時間)
Aマンゴ	19.6%	PH5	アルコール	15分後	4分後	60分後
B桃	10.5%	PH5	アルコール	15分後	26分後	60分後
Cバナナ	4.0%	PH5	アルコール	15分後	37分後	60分後

21

22

④アアアのアルコール反応の調査結果

(%)	投入前	15分後	空気抜き	60分後
マンゴ	0	0.50	0.50	0.50
桃	0	0.30	0.30	0.30
バナナ	0	0.30	0.30	0.30

⑤イーストを加え、糖度が10%以上15%以内であればほぼ同じ糖度で蒸留水進行。同じ数値のアルコール反応を確認することになりました。

⑥実験2-2
⑦の3種類糖度の皮にイーストを加えると3種類ともすぐに泡がはじめる。蒸留水が溢るまでは発酵水は溢りませんでした。

	Aマンゴの皮	B桃の皮	Cバナナの皮
投入前			
投入後			

22

23

①15分後アルコールチェッカーで測定してみるとすぐには0.50mg/Lの反応が確認できませんでした。

	Aマンゴーの皮	B桃の皮	Cバナナの皮
15分後			
空気抜き前			
袋の中			
60分後			

②空気抜きをした時と指定時間1時間後の蒸留前に測定すると0.50mg/Lの反応が確認できました。

23

24

実験2-2 蒸留結果

糖類成分	アルコール濃度 (mg/L)	糖類成分	残水材料のアルコール反応のPH	残水材料のPH	蒸留時間	加熱時間
A	0.50mg/Lあり	0.14PH	なし	0.80mg/L	5PH	8分
B	0.50mg/Lあり	0.14PH	なし	0.80mg/L	5PH	13分
C	0.50mg/Lあり	0.14PH	なし	0.80mg/L	5PH	12分

実験2の実験結果より

- ①イーストを加え、糖度が10%以上15%以内であればほぼ同じ濃度で発酵が進行し、同じ数値のアルコール反応を確認することができました。
- ②1時間という短時間発酵でも蒸留アルコール反応の数値は高かったことを確認できました。
- ③皮のみで水を加えないで実験を行いました。蒸留水の濃縮反応はみられませんでした。
- ④糖度が10%以上15%以内で水を加えないで実験を行いました。材料が焦げやすく、蒸留時間8〜15分と短く、蒸留液も6〜20%と少なくなりました。

チャレンジ!!
蒸留液に酵母を容器内(50〜30度 湿度約70%)に置いてみました。するとマンゴーの皮(6mg/L)は4時間で、バナナの皮(15mg/L)は24時間で、桃の皮(20mg/L)は92時間で蒸留してしまいました。

了きとめ(実験1と実験2の結果から)

- ①果物の皮からアルコール(バイオエタノール)を作ることができた。
- ②バナナの皮は、酵母を加えずとも時間をかければ発酵することがわかった。
- ③酵母の種類によって発酵の様子やアルコール反応時間が異なることがわかった。

24

25

④アルコールの度数により、燃焼しないアルコールと燃焼するアルコールがあることがわかった。

⑤材料量には、蒸留された量も非常に少ないことがわかった。特に糖度が高く、水分量が少ないものと、蒸留時に焦げやすく集めた蒸留液も少なくなることもわかった。

私の予想 果物の皮からバイオエタノールをつくることはできないはずだと思っていました。思えば簡単に作れるのだから、びっくりしました。ただ、この実験を通して材料が油出されるバイオエタノール量も非常に少ないということが、家庭で普及していない原因なのかなと感じました。

8. 今後(未来)の課題
今の目標は、限りある資源を大切に節約して、私も資源を大切に、節約生活を心がけてきました。それだけ地球環境を守る活動につながると思いましたが、調理学習を通して、限りある資源が無くなることを考えた時、このままではいけないと感じました。資源が無くなる前に自分たちでエネルギーをつくること、水も必要になるのではないかと感じました。

最近、再生可能な自然エネルギー(太陽光発電・バイオマス発電・風力発電・水力発電・地熱発電など)という言葉を目にします。近頃の屋根にソーラーパネルが設置されていき、太陽光パネルを販売する業者は「太陽光発電で自分の電気として使用し、余った電気は電力会社に売ることができると誇りました。この実験を通して、糖度が高い皮は、皮だけ1時間かけると、発酵できず、酵母を加えれば短時間発酵できることを知りました。その特性を活かして、家庭で捨てられる皮に材料500mgより50g以上の蒸留水が得られるような酵母や蒸留・配水が簡単にできる機械を開発し普及できれば、家庭でバイオエタノールを作り出し化石燃料代わりを利用して、余ったバイオエタノールを売ってお金に変えることも可能になるのではないのでしょうか(生ゴミ)が資源に生まれ変わるのです。いままでゴミとして捨ててきたものを家庭内で簡単に資源

25

26

について使用することができ、売ることができたら、ご質問が解決できます。化石燃料を使わずにバイオエタノールを使用すればCO2削減にもつながります。化石燃料に頼らず、自然界から得られるエネルギーを活用し、家庭(自分たち)で資源をつくって、生活することが地球環境を守る一歩につながると思います。

私の今後(未来)の課題は、家庭(自分たち)で資源を作り出すことで生活できる環境を提供できる人になることです。

みんなのおかげで、研究をまとめることができました!

感謝
(します)

26

9. 参考文献

仲村 家住宅のみつ 地球屋敷丸の屋根に学ぶ 著者: 木下 光 発行所: 学芸舎 環境リサーチBOOKのネット推進
研社ミホ学講座 など

10. インターネット検索・引用

農林水産省ホームページ
理研ホームページ
キッズ900ホームページ
経済産業省のホームページなど

講 評

お母さんの影響を受け、普段から資源を大切に節約生活を心がけてきた早希さん、地球環境を守るため油は拭き取る、生ゴミは肥料にするなどの努力も素晴らしい取り組みです。節約だけでなく限りある資源がなくなる前に、自分たちでエネルギー源を作り出すことが大切ではないかと考え、本研究に取り組んでいます。

バイオエタノールについて調べ、調べたことを実際に自分で実験して確かめる、確かめた中から、新たな疑問やアイデアが生まれ、さらに確かめていく。科学で大切な「探究していく」姿勢が見られます。

予想を立て、見通しを持ち、なぜその実験を行うのか、どの条件をそろえるのか、何で判断するのか、はっきり示しているところが素晴らしいです。実験装置を圧力鍋やバット、ゴムホースと、身近なもので自作し、アルコールセンサーや糖度計で数値を出して、結果を判断する流れが、レポートで丁寧に説明されています。

果物の皮に酵母を加え、時間ごとに発酵の様子をよく観察し記録しています。センサーの記録の他に「におい」など記録することも大切です。五感も大いに使いましょう。グラフ②は3種類ともアルコールセンサーの示す値は同じですが、果物の種類によって発生したアルコール量が異なる表示になっているので、気をつけましょう。

また、それぞれの実験を複数回行って、同じ結果になるかどうか確かめると、さらによい研究になります。今回のアルコールセンサーで測定できる範囲が0.5 mg / Lなので、0.5 mg / L 以上測定できるセンサーを使い、バイオマスとなる材料や加える酵母の種類、量など変えてみるなど、効率の良いバイオエタノール作りを今後も挑戦して下さい。

環境奨励賞

第37回沖縄青少年科学作品展

イソヒヨドリの研究

南城市立知念中学校

2年 青柳 楽

1. 研究の動機

私は、昨年、沖縄と新潟の野鳥の種類とさえずり始める時刻を比較した。その結果、さえずり始める時刻と日の出の時刻は関係があり、季節によって変化することが分かった。そして、ほとんどの野鳥が日の出に合わせて、午前5時から6時の間にさえずり始めていた。しかし、イソヒヨドリは夜でもさえずることがあり、時間帯が他の野鳥と違っていたので興味をもった。また、人間の近くで生息していて、頻繁に観察でき、民家や構造物などに巣を作ることが多い。天敵などが近づきにくく、人間の生活を上手く利用しているように思えるが、人工的な光の影響も受けているような気がする。

3月頃、自宅周辺で巣を作っているイソヒヨドリの個体を3ペア見つけたため、繁殖の様子を観察して、比較してみようと思った。また、繁殖後のなわばりの変化も調べたいと思った。雨の日にイソヒヨドリが近づいても飛べずに、地面をはねて逃げることに気がついた。どうして飛べなかったのか調べるために羽根の構造も調べた。

2. 研究の目的

(1) 繁殖期の観察

- ① 3ペアのイソヒヨドリの繁殖の様子を観察し、行動や繁殖期間を比較する。
- ② イソヒヨドリの巣の素材と重さを比較する。

(2) 非繁殖期の観察

繁殖期と非繁殖期のなわばりの変化と行動の違いを観察して調べる。

(3) ツグミ科のイソヒヨドリとシロハラ、カワセミ科のアカショウビンの3種類の羽根の構造を比較する。

3. 調査場所

沖縄県南城市玉城の自宅周辺

繁殖期は以下の3か所の巣のイソヒヨドリの繁殖を中心に観察し、その後の非繁殖期は範囲を広げて観察する。

- ・ 巣① 自宅のアパートのガスタンクの中
- ・ 巣② 隣のアパートのベランダの非常口
- ・ 巣③ 隣のアパートの4階の玄関

<巣①>





<巢②>



<巢③>



4. 調査方法

(1) 調査期間

- ① 繁殖期 2014年3月～8月
- ② 非繁殖期 2014年9月～12月

(2) 調査に使用したもの

○双眼鏡（10倍） ○温度系・湿度計 ○デジタルカメラ ○顕微鏡 ○双眼実態顕微鏡

(3) 調査方法

<繁殖期>

① 繁殖の様子を観察

観察時間は、行動が活発になる朝の5時30分から6時30分、夕方の17時30分から18時30分までの1時間ずつ行い、朝から夕方までの1日観察を4日行った。基本的には、3か所の巣を回りながら親鳥や雛を観察したが、動きが活発で全部のペアを観察できなかった時は、巣①のペアを中心に観察した。

② 巣の作り方の比較

繁殖が終わった後に使われなくなった巣を分解し、巣材を種類別にまとめ、重さを比較した。

③ 羽根の構造の比較

羽根が濡れたときに飛べなくなった理由を知るために、水に潜ってえさを取るカワセミ科のアカショウビンと、イソヒヨドリと同じツグミ科のシロハラの3種類で羽根の構造を比較した。以前、3種類の死体を発見した時に、冷凍庫で凍らせて保管してあったものを解凍し、羽根を抜き取った。その羽根を水につけて、違いを顕微鏡などで観察する。

<非繁殖期>

1時間で観察できる範囲をラインセンス法で歩き回りながら観察した。10月24日までは、繁殖期と同じ時間帯で観察を行い、その後は、日の出、日没の時間の変化に合わせて、朝の6時から7時と夕方の17時から18時に観察時間を変更した。さえずり場所や行動、移動範囲から個体のなわばりの範囲を調査した。

以下の5つを観察の視点にした。

- I. 鳴き方の種類とさえずる場所（ソングポスト）
- II. 個体のなわばりの範囲
- III. イソヒヨドリ同士の関係
- IV. イソヒヨドリと他の野鳥の関係
- V. 繁殖期との違い



巢材を巢に運ぶメス (3/26)



ソングポストでさえずるオス(3/26)



水浴び後、毛づくろいをするメス (3/27)



柵に止まってからエサを巢に運ぶオス(4/26)



巣立ったばかりの雛 (5/3)



巣立った雛にエサを運ぶオス(5/3)



雛にエサをあげるオス (5/10)
巣立ってから7日目



巣立ってから15日目の雛 (5/18)



巣立ってから28日目の雛 (5/30)



巣立って29日目、オスの羽根が生えてきた雛 (5/31)

<巣②の写真>



巣材を巣に運ぶメス (3/27)



巣材を探し回るメス (4/2)

<巣③ 1 回目の写真>



エサを巣に運ぶメス (4/2)



巣立つ 1 日前の雛 (4/2)



巣立つ 1 日前に巣の周りを動き回る雛 (4/2)



巣立ったばかりの雛 (4/3)

<巣③ 2 回目の写真>



卵 2 個 (4/13)



卵 3 個 (4/14)



卵 5 個 (4/17)



卵を産んで 6 日目のメス (4/18)



孵化して 3 日目の雛 4 羽 (5/3)



孵化して 8 日目の雛 (5/8)



巣①に迷い込んできた雛 (5/19)



巣立って 14 日目の雛 (5/31)

② 育てた雛の数

表 3、各巣で観察できた雛の数

	卵の数	雛の数	死亡した数	行方不明の数	親離れした数	生存率
巣①	? 個	5 羽	0 羽	0 羽	5 羽	100%
巣②						
巣③ ₁ 回目	4 個	3 羽	2 羽	1 羽	0 羽	0%
巣③ ₂ 回目	5 個	4 羽	1 羽	0 羽	3 羽	75%

<巣①について>

- ・ 巣①の卵の数は巣の周囲には柵があり、巣の中の様子が観察できなかつたのでわからなかつた。でも、巣立った後に卵は残っていなかつた。
- ・ 雛が 5 羽すべて無事に巣立って親離れし、成功率が高かつた。

<巣③について>

- ・ 2 回とも、卵がひとつだけ孵化していなかつた。
- ・ 卵は何日間かかけて増えていったが、一日 1 個ずつかは、メスが温めていて卵が観察できない日があつたので、はっきりしない。
- ・ 1 回目では、巣立った日 (4/3) に、1 羽は同じアパートの飼い猫に食べられ、次の日にもう 1 羽は車にひかれ、残りの 1 羽も行方不明になつてしまつた。雛が猫に食べられたときに、メスはいつもさえずる門の場所で 55 分間、鳴き続けた。車にひかれて死んだ雛には、エサを運び、食べさせる行動を繰り返した。しかし、死んでいることが分かつたのか、エサをあげるのをやめて、近くで 44 分間ほど鳴き続けた。
- ・ 2 回目の繁殖は、雛が食べられてから、9 日後に卵を温め始めた。巣立った 4 羽のうち、1 羽がアパートの窓から部屋に入り、飼い猫にやられて死亡した。



雛を食べた猫 (4/3)



巣立って1日目に猫に食べられた雛 (4/3)



巣立って1日目に車にひかれた雛 (4/3)



窓から入り、飼い猫にやられた雛 (6/9)



死んだ雛の近くで鳴くメス (4/4)

④巣作りの時の行動

表 4、巣①のオスとメスの行動

日	オス	メス
3/26	<ul style="list-style-type: none"> オスが巣の近くの電柱でさえずる。 	<ul style="list-style-type: none"> いない
3/27	<ul style="list-style-type: none"> 巣の前に来るが入らない。 求愛行動？羽をパタパタさせながら歩く。 2羽のオスがさえずって、威嚇し合う。 巣①の近くでさえずる。 	<ul style="list-style-type: none"> 巣の近くまで来て、入らないで飛んでいく。溝に入る。 18分後、何も加えないで巣に入り、出ることを4回繰り返す。 1回目はすぐ出る。 3分後に2回目に入り、3分以内で出る。 自動販売機の上にたまった水で、水浴びをする。 3回目は2分12秒間、巣の中に入る。出た後すぐ入る。 4回目は12分以上、出てこなかった。
3/28	<ul style="list-style-type: none"> アパートの4階にいる。さえずらない。 アパートの屋上でさえずる。 電線に止まっている。さえずらない。 	<ul style="list-style-type: none"> 電線に止まっている。
3/29	<ul style="list-style-type: none"> 1回目、巣の近くの電柱でさえずる。 停まっているトラックにとまる。 2回目、電柱でさえずる。16分 3回目、電柱でさえずる。3分 	<ul style="list-style-type: none"> いない
3/30	<ul style="list-style-type: none"> 電柱にとまる。 	<ul style="list-style-type: none"> いない
3/31	<ul style="list-style-type: none"> オスが2羽、4階の上にいる。 	<ul style="list-style-type: none"> いない
4/1	<ul style="list-style-type: none"> いない 	<ul style="list-style-type: none"> いない
4/2	<ul style="list-style-type: none"> 2羽のオスがさえずりながら、追いかけあいをする。 2羽のオスがさえずって、威嚇し合う。 	<ul style="list-style-type: none"> 巣の周りを飛び回る。 巣の中に入る。

- ・ 巣材をもってガスタンクの中に入出入りするメスを発見したので、3月26日から観察を始めた。9日目には、メスが本格的に卵を温め始めたので、8日間だけの観察だった。
- ・ 観察時間内では、一度も巣材をもったメスとオスを観察できなかった。

<オスの様子>

- ・ 8日間のうち5日間、さえずりを観察した。
- ・ さえずり場所は、電柱の上が2日間、アパートの屋上が1日、巣の近くが1日だった。
- ・ 2日間、2羽のオス同士で、さえずり合って、威嚇していた。威嚇の時のさえずりは、声に勢いがあって、普通のさえずりとは違っていた。

- ・ 2日間、電柱や4階にとまっているだけだった。さえずらないで、高いところにとまっているときは、様子を見ているようだった。
- ・ 一度も巣に入らなかった。

<メスの様子>

- ・ 8日間のうち5日間、いなかった。
- ・ 2日間、巣の中に入った。多い日は4回出入りした。巣材は一度もくわえていなかった。
- ・ 卵を温める前に、メスが観察できない日が4日間続いた。

④ 巣の中で卵を温めた時間（巣①）

抱卵の期間（4月3日～15日）の朝と夕方のそれぞれ1時間に、オスとメスが巣の中にいた時間を [図 2] に表した。
（拡大した図 2 は、資料 1 の中）

表 5、巣①で卵を温めた時間

	5:30	35	40	45	50	55	6:00	5	10	15	20	25	6:30			
4月3日 ♂														0	分	
朝 ♀														60	分	
4月3日 ♂														0	分	
夕 ♀														60	分	
4月4日 ♂														0	分	
朝 ♀														60	分	
4月4日 ♂														0	分	
夕 ♀														60	分	
4月6日 ♂											S			0	分	
朝 ♀														2	分	
4月6日 ♂														0	分	
夕 ♀														42	分	
4月8日 ♂							S							0	分	
朝 ♀								S						32	分	
4月8日 ♂														0	分	
夕 ♀														60	分	
4月9日 ♂			S	S					S					0	分	
朝 ♀														43	分	
4月9日 ♂												S		0	分	
夕 ♀														60	分	
4月10日 ♂														0	分	
夕 ♀														60	分	
4月11日 ♂		S	S											0	分	
朝 ♀														38	分	
4月13日 ♂			S	S										0	分	
朝 ♀														40	分	
4月13日 ♂														0	分	
夕 ♀														60	分	
4月14日 ♂														0	分	
朝 ♀														60	分	
4月15日 ♂				S	S									0	分	
朝 ♀														51	分	
4月15日 ♂														0	分	
夕 ♀														45	分	
1日の平均														♂	0	分
														♀	43.2	分
														♂	0	分
														♀	55.88	分

表 6、オスとメスの巣の外での行動

日にち	オスの行動	メスの行動
4/3 朝	いない	巣の中
4/3 夕	いない	巣の中
4/4 朝	いない	巣の中
4/4 夕	いない	巣の中
4/6 朝	電柱でさえざる	バッタを食べる
4/6 夕	いない	巣から出て入る
4/8 朝	アパート屋上さえざる	電線でさえざる
4/8 夕	いない	巣の中
4/9 朝	アパート 4 階さえざる アパート 2 階さえざる 巣①周辺でさえざる	伸び 羽づくろい バッタを食べる
4/9 夕	電線でさえざる	巣の中
4/10 朝	いない	地面にあるものを食べる
4/10 夕	いない	巣の中
4/11 朝	アパート 4 階でさえざる 隣のアパート屋上でさえざる	オスに追いかけるられる
4/13 朝	暗い中をさえざる アパート 4 階でさえざる	バッタを食べる
4/13 夕	いない	巣の中
4/14 朝	いない	巣の中
4/15 朝	隣のアパートでさえざる (2 度)	オスに追いかけるられる
4/15 夕	いない	巣から出る入る

<オスの様子>

- ・ オスは、観察時間には一度も巣に入らなかった。
- ・ 18 回、観察したうち、10 回は観察できなかった。
- ・ エサは一度も食べなかった。
- ・ 朝に 2 日間、ペアのメスを追いかけて回した。
- ・ オスは朝 6 日間、夕方 1 日さえざっていた。さえざる場所は、巣に近い電線や屋上や 4 階などの高い場所だった。巣作りのときによくさえざっていた電柱の上では、さえざっていないかった。さえざりを観察したのは、朝がほとんどだった。

<メスの様子>

- ・ メスが温め続けた時間の平均は、朝 43.2 分間、夕方 55.9 分間で、12.7 分間夕方の方が長かった。
- ・ 60 分間、温め続けた日は、朝で 3 日間、夕方で 6 日間だった。
- ・ メスが巣から出ているときは、朝に 4 日間、バッタなどのえさを食べていた。2 日間、オスに追いかけて逃げていた。1 日ずつ、羽根や体を伸ばしたり、さえざったりしていた。

⑤巣の中へエサを運んだ時間と回数（巣①）

卵が孵化してから、雛が巣立つまでの期間（4月17日～5月1日）の朝と夕方それぞれ1時間に、オスとメスが雛にエサを運んだ回数と巣の中に時間を表7に表した。

（拡大した表7は、資料1の中）

	5:30	35	40	45	50	55	6:00	5	10	15	20	25	6:30							
4月17日	♂						■		■	■				4	分	4	回			
朝	♀			■	■	■	■	■	■	■				10	分	7	回			
4月17日	♂													0	分	0	回			
夕	♀						■	■						2	分	1	回			
4月18日	♂			■										2	分	2	回			
夕	♀										■	■		4	分	1	回			
4月21日	♂													0	分	0	回			
夕	♀					■	■	■						3	分	3	回			
4月22日	♂				■	■	■	■	■					4	分	3	回			
朝	♀													1	分	1	回			
4月22日	♂													3	分	1	回			
夕	♀											■	■	0	分	0	回			
4月23日	♂			■										3	分	3	回			
朝	♀			■										1	分	1	回			
4月23日	♂				■									2	分	2	回			
夕	♀				■								■	2	分	2	回			
4月24日	♂													0	分	0	回			
朝	♀													0	分	0	回			
4月25日	♂				■									5	分	3	回			
朝	♀													2	分	2	回			
4月30日	♂													4	分	3	回			
朝	♀													3	分	2	回			
4月30日	♂													2	分	1	回			
夕	♀													0	分	0	回			
5月1日	♂				■	■	■	■	■	■				6	分	3	回			
朝	♀				■	■	■	■	■	■				13	分	5	回			
5月1日	♂													5	分	2	回			
夕	♀												■	2	分	1	回			
5月1日	♂													0	分	0	回			
夕	♀													12	分	4	回			
														1日の平均		♂	4	分	2.556	回
																♀	3.889	分	2.222	回
																♂	3.3	分	1.5	回
																♀	4.9	分	1.7	回

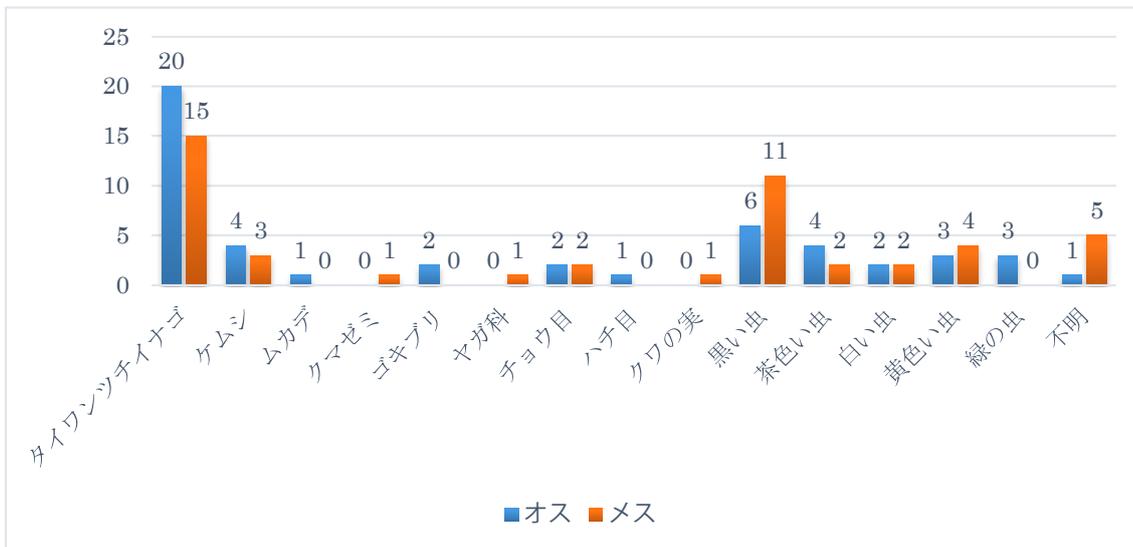
表7、巣①にエサを運んだ時間と回数

- 60分間に巣にエサを運ぶ回数の平均は、朝はオス2.6回、メス2.2回、夕方はオス1.5回、メス1.7回で朝の方が多かった。メスとオスの回数は、ほぼ同じだった。
- 4月24日は、一度も巣に入らなかった。この日は大雨で風も強かった。
- 雛が大きく成長してくる後半の方が、回数も巣の中に入る時間も、オスもメスも増えてきた。10分以上の日が7回あり、そのうち後半が6回だった。

⑥ エサを運んだ回数と種類（巣①）

観察距離が近い巣①で、オスとメスがどんな種類のエサを運んでいるか観察した結果をグラフに表した。（4月17日～6月2日）

グラフ 1、巣①におけるエサの種類比較



- ・ どの種類か識別できない虫は、色で表示した。バッタ（タイワンツチイナゴ）が一番多く、次にハチやゴキブリ、ヤガ科が多かった。
- ・ 写真などで識別できたエサの種類は、クマゼミ、ゴキブリ、ムカデ、タイワンツチイナゴ、ヤガ科、チョウ目、クワの実であった。
- ・ エサの種類でのオスとメスの差はあまりなかった。
- ・ エサを運んだ回数は、オスは48回、メスは44回で、あまり差がなかった。そのうち、巣立ち前に巣の中へエサを運んだ回数は、オス38回で、メスは37回でほぼ同じだった。ヒナの成長に合わせて回数は多くなり、巣への出入りが頻繁になった。
- ・ エサを巣に運ぶ前に、柵に泊まって警戒した後、地面に降りて巣に入った。階段に人がいると警戒していて、なかなか巣に入らなかった。
- ・ タイワンツチイナゴは、羽根と足を地面に打ち付けて取り、籠に運んでいた。
- ・ 後半の4月26日と4月28日は、メスが10分以上巣に入っていることがあった。



バッタとチョウ目を運んでいるオス



タイワンツチイナゴを運んでいるメス



クワの実を運んでいるメス



ムカデを運んでいるオス



白い虫を運んでいるメス



チョウ目の幼虫を運んでいるオス



チョウ目の幼虫を運んでいるメス

⑦ 巣立ちの様子

- 巣立たせるときは、巣③の1回目は、巣立つ前日(4/2)の午前10時半にオスが屋上でさえずっていた。メスは午前11時8分に巣の近くで、巣には入らずにしきりに鳴き、巣立ちを促した。午後1時36分に、雛が巣から出て巣の周りの物置で動き始めた。1時49分に雛の1羽が、巣がある4階から落下した。落下途中、1階の高さまで来たときに、オスが体当たりして、雛は壁にぶつかった。地面に落ちた雛は、生きていたが動かなかった。ぼくは、動揺して思わず、4階の巣まで落ちた雛を戻してしまった。午後2時4分に巣の近くまでオスが来て、15分にメスがエサをあげた。その日は、メスが巣立ちを促す姿は見なかった。次の日(4/3)の朝5時50分には、2羽は巣立っていて、最後の1羽は午前6時37分に巣立った。
- 巣①は、5/2の朝6時16分に、メスが何も加えずに巣の近くまで来て、入ろうとするが入らないで飛んでいった。その行動を繰り返した。雛がジージージーと親がいてもいなくてもよく鳴いていた。翌日5/3の午前5時半には、すでに5羽巣立っていた。オスとメスが巣の近くの小屋で雛にエサをあげていた。

⑧ 親離れの様子

- 巣立ってから親離れする時は、親が雛を追いかけ回して、なわばりから追い出していた。巣①では、オスの育てていた3羽は、オスが追いかけて同じ日(6/2)に離れていった。メスは追い払う場面は見えないが、午前6時11分に雛2羽といる姿を見て、午後5時39分にメスだけなり、その後、雛と一緒にいる姿は観察できなかった。だから、5羽は同じ日に親離れした可能性が高い。
- 巣③では、4羽中3羽が同じ日だった。1羽だけ成長が遅れていたのも、エサを与え続けて、3日後に観察できなくなった。その5日後に、隣のアパートの住人が羽根を抜かれてけがをした雛を自宅に連れてきた。その日、部屋に雛が入ってきて、飼っている猫につかまったところを助けたということだった。預かった雛は翌日に死んだ。巣③と同じアパートだったので、巣立った4羽の雛のどれかではないかと思った。まだ親から離れていなかったのか、いったん親離れした後に、また親のなわばりに戻ってきたのかかわからない。

⑨ 子育ての方法

- 巣③は、巣立った後、車の下で隠れたり、エサを食べたりすることが多く、地面にすることが多かった。その結果、猫に襲われたり、車にひかれたりしてしまった。一方、巣①の親は、地面ではなく、柵の上でエサをあげていた。雛も巣立った時から地面ではなく、木や人工物の上にいることが多かった。
- 巣①のオスは、雛が巣立った後に、雛がいる木と地面を何度も往復して、雛が地面に降りてくるように促していた。その後、オスがバツタの羽根と足を取らないで雛の前に持っていき、地面に置いた。雛は、そのまま食べようとしたが、のどに詰まって飲み込めないのも、オスが雛の口の中にくちばしを入れて、取り出した。そして、オスがエサを地面に打ち付けて、また、雛の口に入れて、雛が飲み込めないと、口から取り出し、エサ地面に打ち付けるといった行動を繰り返した。
- 巣①の子育ては、巣の中でも巣の外でも、オスとメスで分担し合い、オスは丁寧にエサの取り方や食べ方の手本を見せながら、雛に教えていた。一方、巣③は、巣の中にエサを巣に運ぶ回数はメスが多く、オスは少なかった。巣の外での子育ても、メスが中心でオスは、屋上でさえずっていることが多かった。

- ・ 巣③のメスが死んだ雛にエサをあげようとしたり、死んだ雛の近くで約 50 分間も鳴き続けたりしていた。鳴き声もさえずりや地鳴きとは違っていた。
- ・ 巣立った後、オスが 3 羽の雛、メスが 2 羽の雛を分担して違う場所で子育てしていた。オスは巣の近くで、メスは近くの畑で子育てしていた。畑は、巣④のオスの縄張りで、巣材やえさを取っていた場所だ。
- ・ オスが自分の雛にエサをあげているときに、巣③の雛が近くにやってきた。オスは、威嚇して追い出す行動ではなく、エサをもって雛を巣③の方に誘導していった。

【 バッタの食べ方を雛に教えるオス 】



バッタを地面に何度もたたきつけ、羽根や足をとる姿を雛に見せる



羽根や足がとれていないまま口に入れる



雛の口からバッタを取り出す

(2) 巣の作り方の比較

比較は、巣③の繁殖の終わった巣 (A) と学校のイソヒヨドリの巣 (B) で行った。

巣①は、ガスタンクの中にあっただため、外部からの影響が受けにくく形がきれいだったので、巣の標本にすることにして分解しなかった。



A(繁殖を観察した巣③)



B(学校で繁殖した巣)



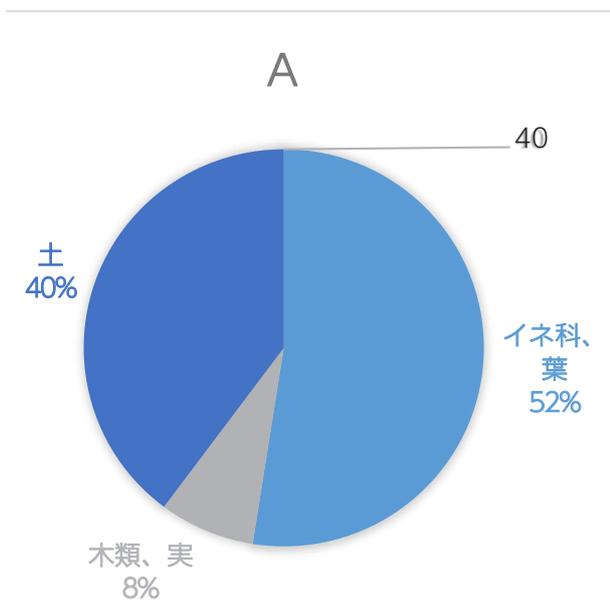
繁殖を観察した巣①

A、Bの巣を分解し、巣材を種類別にわけて重さを量った。その結果を「表8」にまとめた。

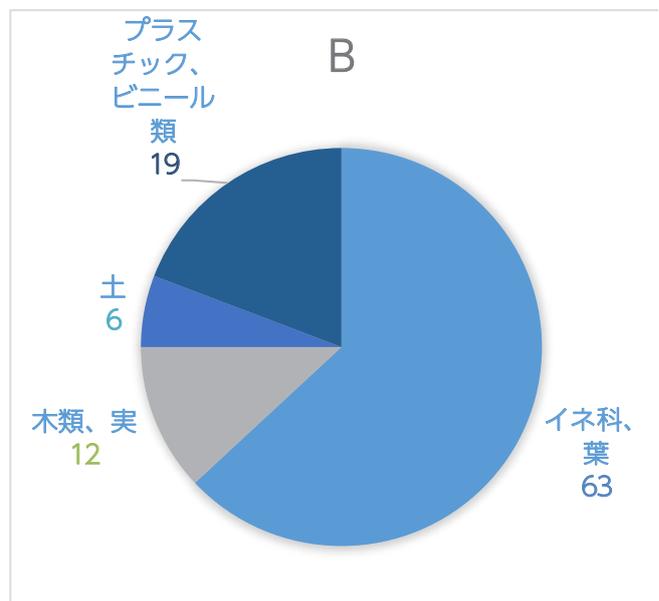
表8、巣材の種類別の重さ

	A(繁殖を観察した巣③)	B(学校で繁殖した巣)
イネ科、葉	47.5 g	75.9 g
木類、実	7.0 g	14.4 g
土	36.0 g	7.0 g
プラスチック、ビニール類	0g	23.1 g
合計	90.5 g	120.4 g

グラフ2、巣材の種類別の割合 A



グラフ3、巣材の種類別の割合 B



<Aについて>

- ・ 巣材は、ススキ、木の皮、黒木の枝、土で、すべて自然のものであった。
- ・ 土がBよりも29gも多かった。巣が物置場に作られていたため、土は巣の中でこぼこしているところを平にするために使われていた。土質は、畑と同じ粘土質（クチャ）だった。
- ・ 巣を分解していると、巣から白い粉のようなものが出てきた。顕微鏡で見ると小さい白い筒がたくさん見えた。
- ・ Bにはプラスチックやビニールなどの人工物が入っていたが、Aにはぜんぜん入っていなかった。
- ・ 全体の重さが、Aの方がBより29.9 g軽かった。

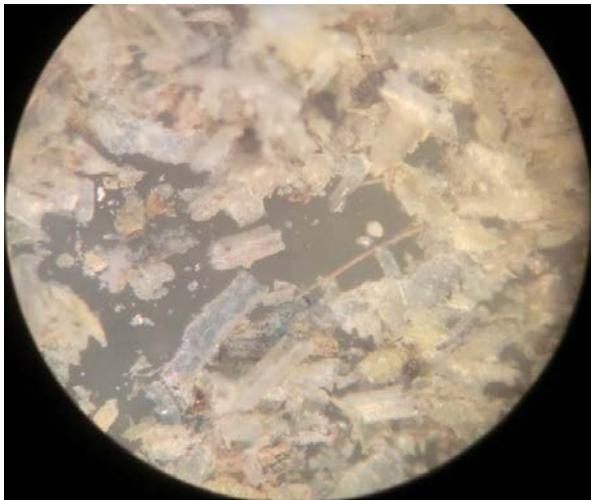
<Bについて>

- ・ 巣材は、ススキ、松の葉、ほうきの枝、黒木の枝、つる、ビニールのひも、土であった。
- ・ 周りにススキがたくさん生えていたため、Bはイネ科が1番多かった。
- ・ 雛の座るところの下に、木の実がいくつか置いてあった。
- ・ BではAとは違いプラスチックやビニールをたくさん使っていた。
- ・ 巣の中に魚の鱗があった。
- ・ 土質は、近くの畑で使われている腐葉土だった。
- ・

<巣①について>

- ・ 巣材は、黒木の枝、木の皮、ススキ、落ち葉、わた、つる、ビニールのひも、お茶のパック、土であった。
- ・ 土質は、A（巣③）と同様に粘土質であった。

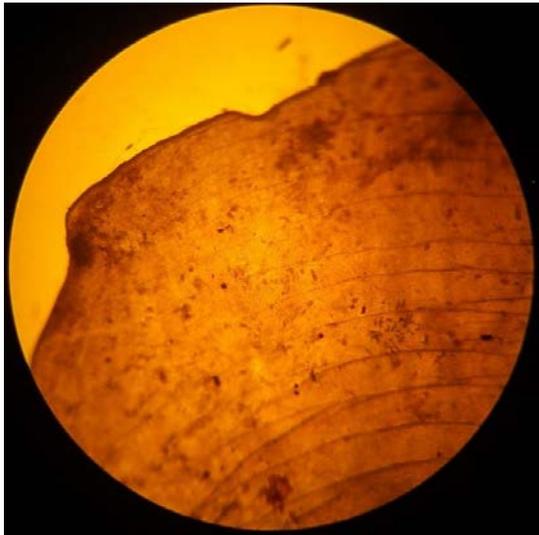
【 巣の中にあつたもの 】



巣から出てきた白い筒（40倍）



魚の鱗



魚の鱗 (150倍)



巣①にあったビニールのひもとお茶のパック



Bにあった木の実

(2) 非繁殖期

【1次調査】

<調査期間>

2014年9月5日～2014年10月13日(朝18日、夕方16日)

<観察範囲>

繁殖期に巣①②③があった周辺(地図1参照)

<なわばりをもっていた個体>

メスの成鳥A、メスの成鳥B、オスの成鳥C

繁殖期に観察した巣①、巣②、巣③のオスがいなくなって、A(メス)と☒(オス)に代わっていた。

① さえずる場所と鳴き方の種類

3個体がさえずる場所と鳴き方の種類を調べた。鳴き方は、3種類に分けて調べた。

さえずり：様々なさえずりの声

地鳴き1：ジェジェジェジェジェ (時々聞かれる地鳴き)

地鳴き2：チーチーチーチー (繁殖期の特別な時に聞かれた地鳴き)



メス A



メス B



オス幼鳥 C

表 9、さえずる場所と鳴き方の種類

個体	さえずり場所	さえずり	地鳴き 1	地鳴き 2	
A	隣のアパート屋上	0	1	0	
	アパート 4 階	3	1	0	
	砂利道の電柱	1	0	0	
	砂利道の電線	1	1	0	
	アパート門	1	0	0	
	コンテナ近くの電柱	1	0	0	
	駐車場の電柱	2	0	0	
	空中	1	0	0	
	アパート周辺	1	0	0	
	畑の電柱	1	0	0	
B	信号の上	11	0	0	
	交差点電柱の上	1	0	0	
	南城市看板の上	4	0	0	
	奥武駐車場の電柱	5	0	0	
	小屋の屋根	1	0	0	
	空中	1	0	0	
C	バス停	1	0	0	
	屋上	5	0	0	
	アパート 2 階	1	0	0	
	自動販売機	1	0	0	
	アパート門	1	0	0	
	小屋	3	0	0	
	空中	1	0	0	
	アパート横電柱	1	0	0	
合計	A	12	3	0	15
	B	23	0	0	23
	C	14	0	0	14

<さえずる場所>

- ・ さえずる場所は、Aが10か所、Bが6か所、Cが8か所で、Aが一番多かった。
- ・ メスAは、決まった場所でなく、広い範囲の様々な場所でさえずっていた。
- ・ メスBは、さえずる場所は少ないが、はっきりとした3か所（信号の上、電柱、看板の上）のソングポストをもっていた。
- ・ オスの幼鳥は、アパートの屋上がソングポストで、5回観察できた。

<鳴き方の種類>

- ・ 一番多くさえずっているのは、成鳥のメスBであった。
- ・ 鳴き方は、さえずりが合計49回で、地鳴き1は3回、地鳴き2は0回だった。地鳴き2は、繁殖期に雛が巣立つときや、警戒するとき、ヒナが死んだときに聞かれた。非繁殖期には一度も聞かれなかった。

②観察した行動

表 10、各個体の行動

名前	性別	日にち	合計											
			足環	全体	飛	食	飲	留	警	威	求	逃	歩	追
A (ミドリ)	♀	緑		26	8	0	0	16	0	0	0	0	1	1
B (シロ)	♀	白		15	4	0	0	10	0	0	0	1	0	0
C	♂			21	7	2	1	10	0	1	0	0	0	0
その他				1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		合計		63	20	2	1	36	0	1	0	1	1	1

- ・ 行動は、「留まる」が1番多く、次に、「飛ぶ」が多かった。
- ・ 繁殖期に、たくさん見られた「食べる」の行動が2回しか見られなかった。
- ・ 求愛や警戒などの繁殖期に頻繁に見られた行動が1度も見られなかった。

③なわばりの範囲

<メスA>

3個体の中で一番広いなわばりをもっていた。繁殖期に3個体が持っていたなわばりをすべて持っていた。他の個体に比べて、なわばりの中には、サトウキビ畑や畑が多く、アパートなどの人工物もたくさんあった。また、よくとまる場所は、ふたつのアパートの屋上と駐車場の電柱と、砂利道の電柱が多かった。

<メスB>

交通が多い、交差点になわばりをもっていた。観察できたなわばりの中には、墓などの人工物が多かった。よくとまる場所は、信号機、電柱、看板などだった。メスAは、普段はあまりさえずらないが、メスBは、いつもさえずって行動が活発であった。

<オスC>

3個体の中で1番なわばりの狭い個体であった。よくバス停の近くに行き、一生懸命ガジュマルの実を食べていた。なわばりは、メスAやメスBのなわばりと重なっていた。よくとまる場所は北東側の屋上と電柱であった。

④イソヒヨドリ同士の関係

観察したA B Cの関係がわかる行動を表にした。

表 11、イソヒヨドリ同士の関係

日	メスA	メスB	オス幼鳥C
9/5			・バス停でメスを追いかける
22			・バス停でオスを威嚇
23		・交差点周辺で侵入してきた2羽を追いかける	
24	・メスをアパートから、さえずりと地鳴きをしながら、広範囲を追いかける ・5羽をアパートから広範囲を追いかける		
25		・メスと交差点でじっと動かない	
26	・オスCとアパート屋上で一緒にいる		・メスAとアパート屋上で一緒にさえずる
27		・交差点周辺でメスを2羽追いかける	
10/4	・オスCと門でさえずり合う。威嚇しない		・メスAと門でさえずり合う。威嚇しない

- ・メスAは、他のイソヒヨドリが来ると、なわばりの外まで追いかけて回していた。5羽を一度に追いかけて、5羽は2羽と3羽に分かれて、逃げて行った。一瞬の出来事で、オスかメスか識別できなかった。
- ・メスAとオス幼鳥Cは、アパートの屋上で一緒にいた。別の日に、アパートの門の所でさえずり合っていた。さえずりの鳴き声は、威嚇している時の鳴き声ではなく、おだやかな鳴き声だった。メスAは、他のイソヒヨドリは追い払うのに、幼鳥Cには態度が違うように感じた。親子かもしれないと思った。
- ・メスBは、交差点周辺に来るイソヒヨドリを追い払っていた。追い払わずに、他のメスとじっと動かないで、威嚇してにらみ合っているような様子を見せた。

【2次調査】

＜調査期間＞

2014年10月14日～2014年12月30日（朝30回、夕30回）

＜観察範囲＞

繁殖期に巣①②③があった自宅周辺を中心に範囲を広げた。（図2参照）

＜なわばりをもっていた個体＞

3回以上観察した個体は、オスが9個体とメスが7個体で、合計16個体だった。そのうち、6個体は琉球大学の院生が調査をするためにリングを付けた個体だった。



ネズミを食べる A



換気扇の上で寝る C



柵にとまる D



船にとまる E



屋根にとまる G

①観察した個体数と行動

観察できた個体がどんな行動をしていたかを表にした。

〈 行動の記号の意味 〉

- 鳴=さえずりと地鳴きをしている
- 飛=空中を飛んでいる
- 食=エサを食べている
- 飲=水を飲んでいる
- 留=どこかにとまっている
- 威=他の個体を威嚇している
- 逃=他の個体から逃げて場所を移動する
- 歩=地面を歩いている
- 追=他の個体を追いかけて飛んでいる

表 12、観察した個体とその行動

名前	性別	日にち	合計										
		足環	全体	飛	食	飲	留	警	威	求	逃	歩	追
A (ミドリ)		緑	26	5	1	0	20	0	0	0	0	0	0
B (シロ)		白	32	4	0	0	26	0	1	0	0	0	1
C			34	6	2	0	25	0	1	0	0	0	0
D (リンゴ)		赤	8	1	0	0	6	0	0	0	0	0	1
E (ムラサキ)		紫	7	1	0	0	6	0	0	0	0	0	0
F (ミカン)		オレンジ	12	2	0	0	10	0	0	0	0	0	0
G (ウミ)		水色	13	1	0	0	12	0	0	0	0	0	0
H			6	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0
I			3	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
J			12	1	0	0	11	0	0	0	0	0	0
K			3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
L			7	4	1	0	2	0	0	0	0	0	0
M			11	1	0	0	9	0	0	0	0	0	1
N			12	1	0	0	11	0	0	0	0	0	0
O			7	1	0	0	6	0	0	0	0	0	0
P			6	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0
その他			9	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0
		合計	208	33	5	0	158	0	2	0	0	0	3

〈観察できた個体〉

- 観察できた個体は 16 個体でそのうち 9 個体はオスで 7 個体はメスだった。
- 10 回以上観察できた個体は 8 個体いて、そのうち A、B、C の 3 個体は頻繁に 20 回以上も観察できた。

〈行動〉

- 行動は、「留まる」が 182 回で 1 番多かった。次に「鳴く」「飛ぶ」が多かった。
- 「威嚇」は B と C だけだった。「逃げる」も、B が C から逃げていた。
- 「追う」は、どれもなわばりに侵入した他の個体を追いかけるという行動だった。
- 「食べる」を観察できたのは 5 回のみだった。確認できたエサは、ネズミ、コオロギ、幼虫、クロキの実であった。

②観察した個体のなわばり

個体の識別がしやすい足輪の付いた 6 個体と、その他のなわばりをもっていると思われる個体の観察場所を地図で表した。

図 1、非繁殖期に観察した個体のなわばり

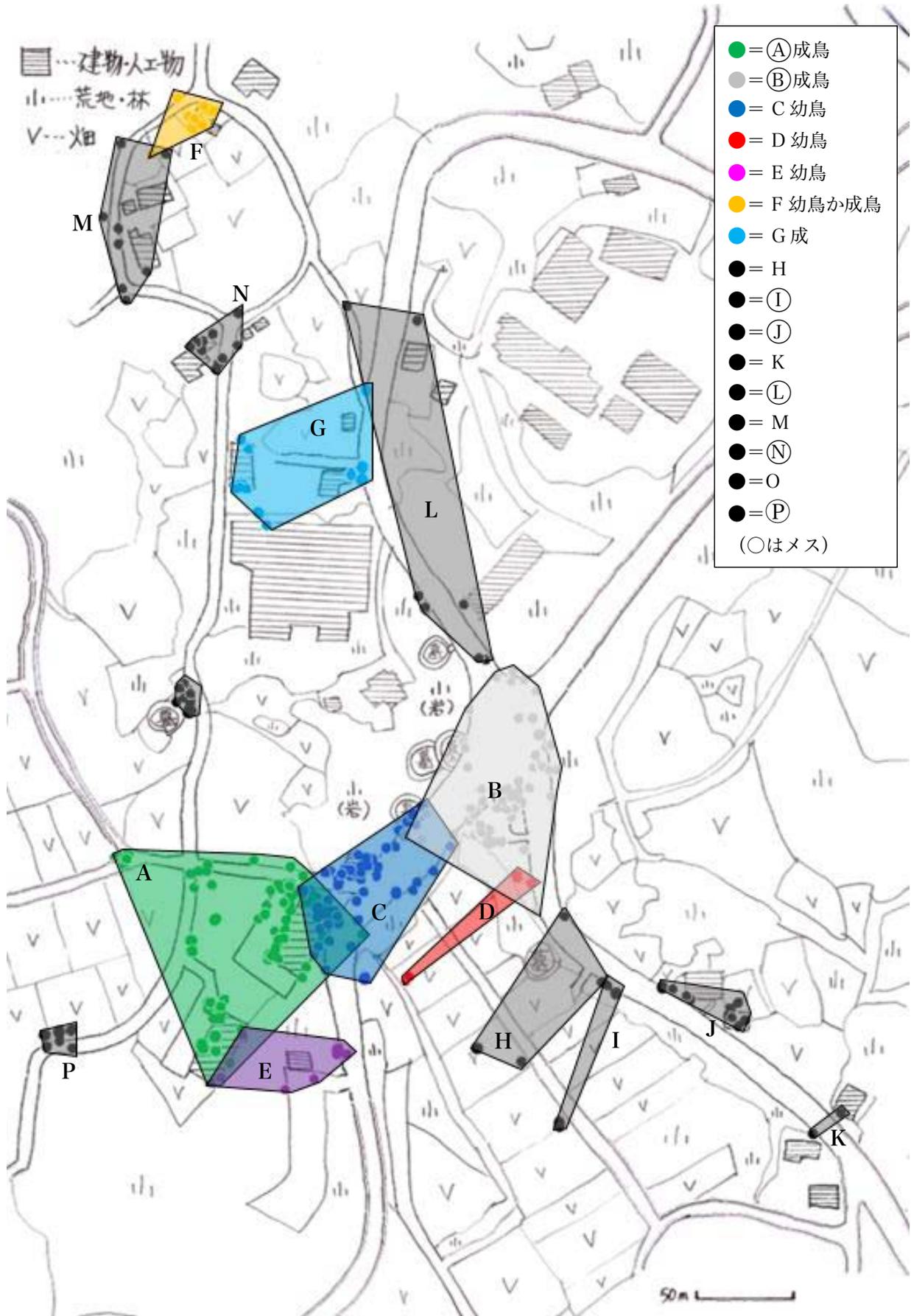


図 2、繁殖期に観察した個体のなわばり (9月)

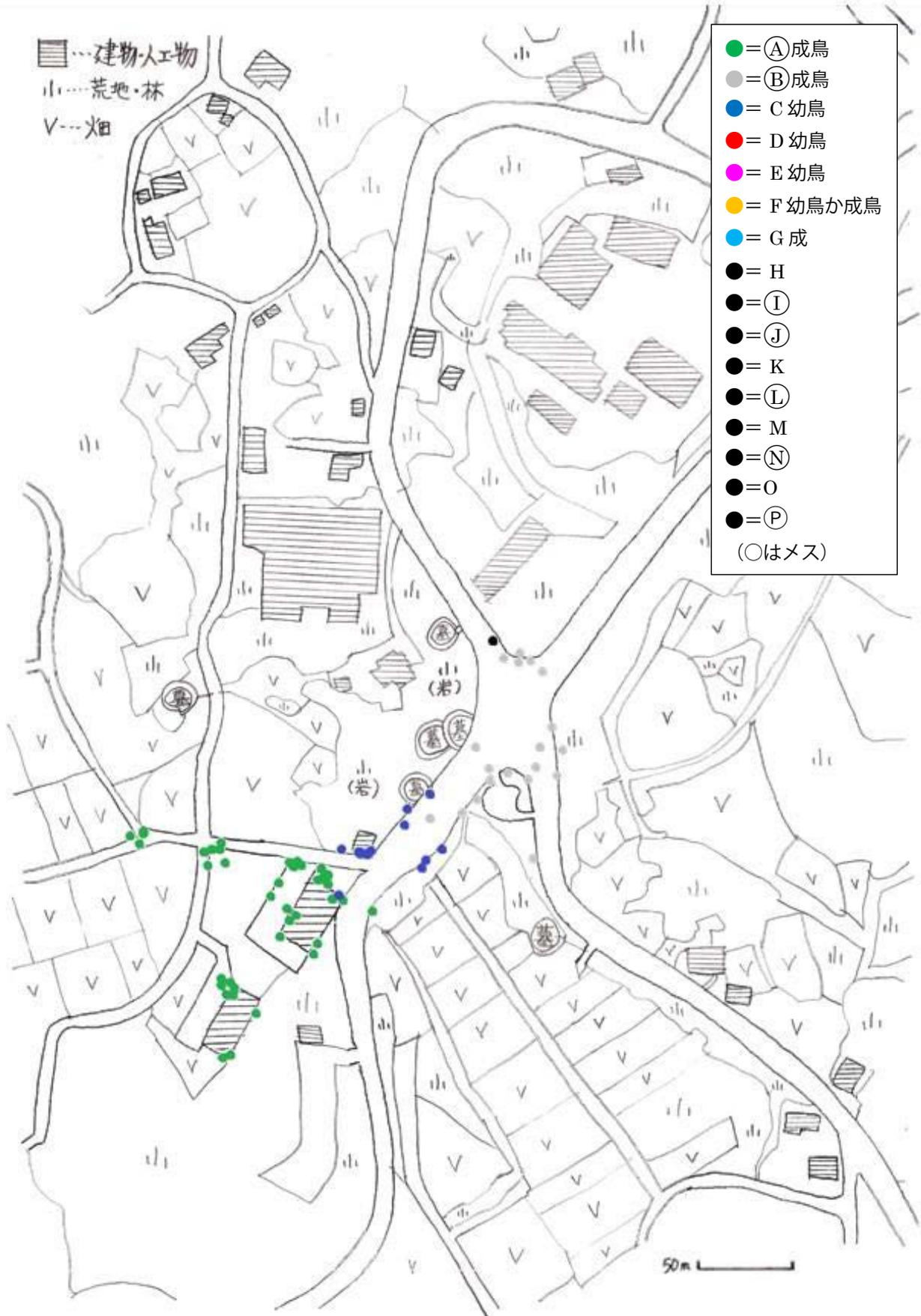


図 3、繁殖期に観察した個体のなわばり (10月)

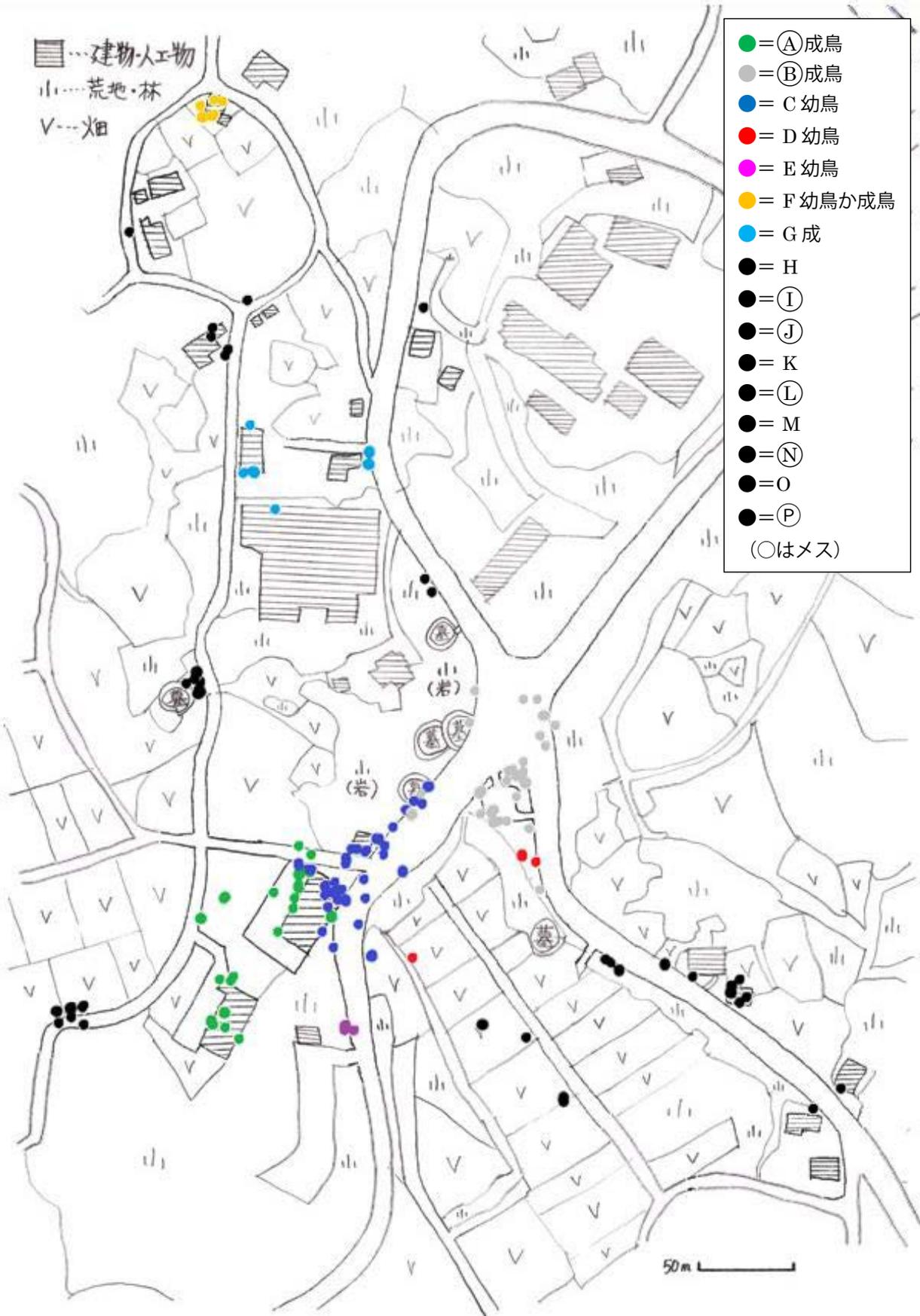


図 4、繁殖期に観察した個体のなわばり (11月)

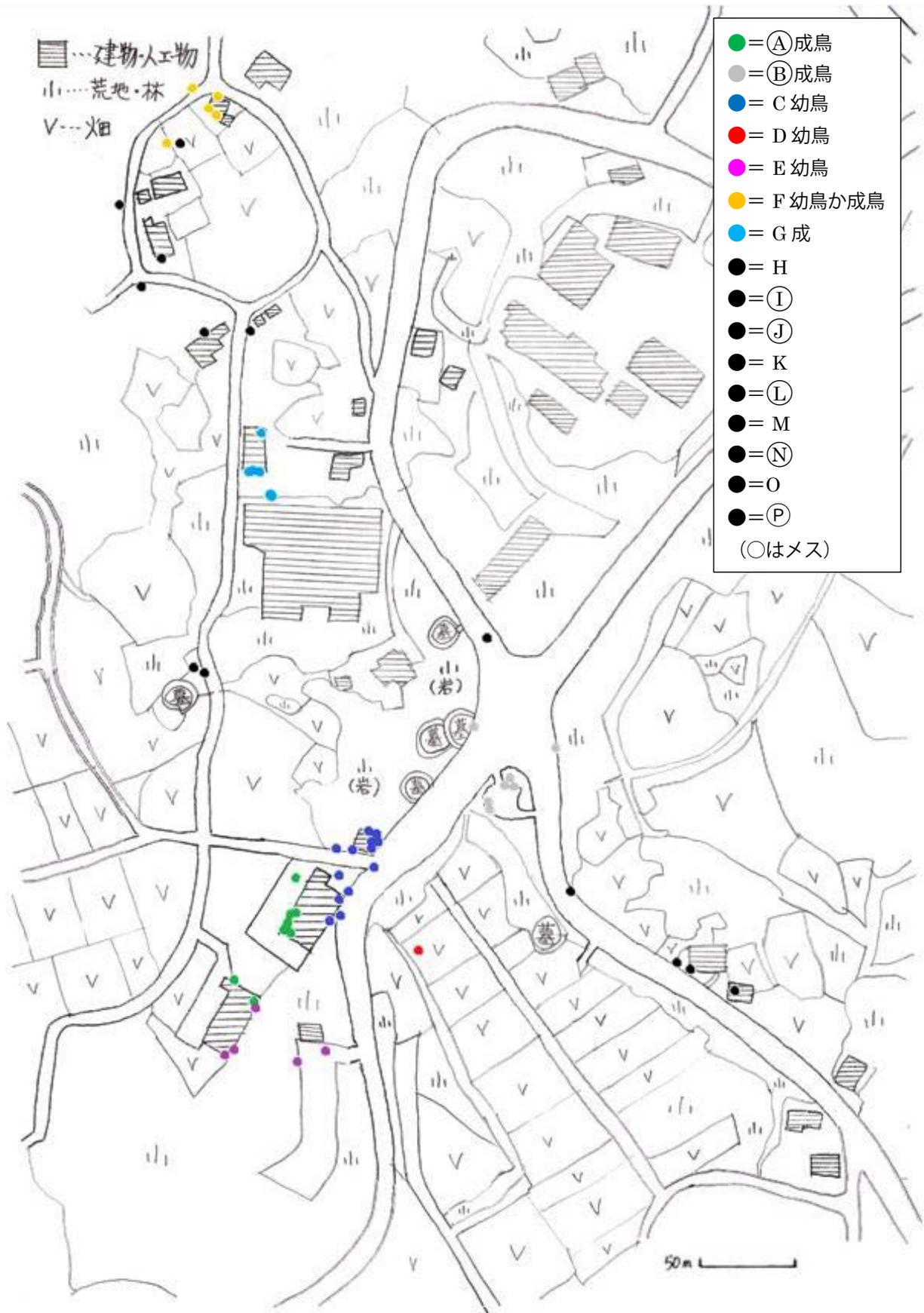
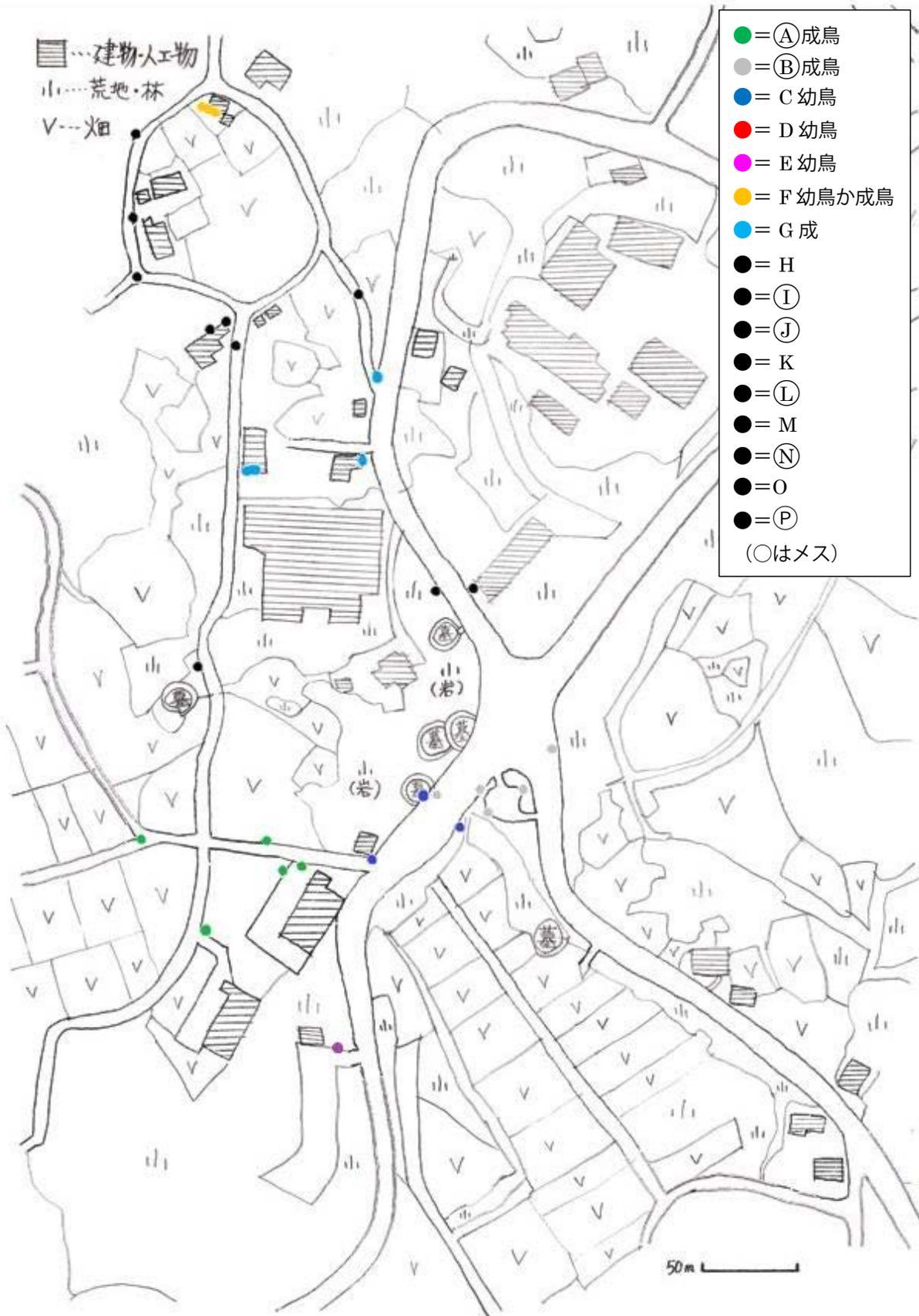


図 5、繁殖期に観察した個体のなわばり (12月)



- 4月は、3個体だったが10月に観察範囲を広げると、16個体に増えた。
- 11月になるとH、I、K、Pの4個体がいなくなった。
- 12月になると、さらにDもいなくなった。
- いなくなった5個体のうち4個体は建物などの人工物がなわばりの中にない個体だった。また、残っている個体は、すべてなわばりの中に建物などの人工物がある個体だった。
- 11個体はなわばりが他の個体と重なっていたが、2個体と重なっていたのは、AとBだけだった。
- Aは他の2個体となわばり争いはしなかったが、Bは他の2個体となわばり争いをしていた。
- J、K、N、O、Pの5個体は、どの個体ともなわばりが重なっていなかった。
- BとOは、墓になわばりをもっていた。

表 13 観察した個体のなわばり

記号	足環	場所	回数	記号	足環	場所	回数
A	緑	隣のアパート3階	3	C	なし	アパート2階	3
		砂利道	1			アパート前電柱	4
		アパート4階	9			駐車場	1
		隣のアパート屋上	4			小屋の上	10
		隣のアパート4階	7			アパート4階	8
		砂利道の電柱	5			アパート1階	2
		アパート屋上	6			バス停	10
		アパート駐車場	1			自動販売機	1
		隣のアパートアンテナ	1			岩	1
		アパート前電柱	1			駐輪場の電柱	1
		アパート前自動販売機の上	1	小屋前の電柱	1		
		アパートアンテナ	1	D	赤	柵	4
畑の電柱	1	畑	1				
B	白	信号機上	12	E	紫	船の上	1
		南城市の看板の上	9			隣のアパート4階	4
		駐車場の電柱	8			電柱	3
		バス停	3	F	オレンジ	屋根	2
		道路の電柱	2			塀	1
		奥武電柱	3	G	水色	屋根	4
		柵	1				
		道路の真ん中	1				

- なわばりは、個体によって広さが違っていた。なわばりが一番広がったのは、A（メス）で観察の時にとまっていた場所は13か所あった。なわばりが狭かったのはKで、2か所しか観察できなかった。
- C（オス）は、A（メス）とB（メス）となわばりが少し重なっていた。E（オス）もA（メス）となわばりが重なっていた。
- 繁殖期の巣①、巣②、巣③のオスのなわばりは、非繁殖期にはA（メス）と☒（オス）のなわばりに変わっていた。

③ イソヒヨドリと他の鳥の関係

自宅周辺で、観察期間内に観察できた野鳥を表にした。

表 14、観察できた野鳥と回数

名前	科	目	見た	さえずった	地鳴き	追いかけられる	合計
ダイサギ	サギ科	コウノトリ目	3	0	0	0	3
ウグイス	ウグイス科	スズメ目	6	36	13	0	55
セッカ	ウグイス科	スズメ目	0	9	0	0	9
ハシブトガラス	カラス科	スズメ目	37	3	0	0	40
アカショウビン	カワセミ科	スズメ目	0	0	0	0	0
サンショウクイ	サンショウクイ科	スズメ目	1	0	0	0	1
シジュウカラ	シジュウカラ科	スズメ目	0	1	0	0	1
キセキレイ	セキレイ科	スズメ目	5	1	0	0	6
セキレイsp	セキレイ科	スズメ目	1	0	0	0	1
ハクセキレイ	セキレイ科	スズメ目	6	0	0	0	6
イソヒヨドリ	ツグミ科	スズメ目	65	1	0	0	66
シロハラ	ツグミ科	スズメ目	8	6	0	2	14
ジョウビタキ	ツグミ科	スズメ目	1	0	0	0	1
リュウキュウツバメ	ツバメ科	スズメ目	45	2	0	0	47
スズメ	ハタオドリ科	スズメ目	1	0	0	0	1
ヒヨドリ	ヒヨドリ科	スズメ目	20	44	3	0	67
シロガシラ	ヒヨドリ科	スズメ目	19	31	1	1	51
メジロ	メジロ科	スズメ目	9	6	28	0	43
サシバ	タカ科	タカ目	12	3	0	0	15
ミサゴ	タカ科	タカ目	4	1	0	0	5
ハヤブサ s p	ハヤブサ科	タカ目	1	0	0	0	1
イソシギ	シギ科	チドリ目	2	0	0	0	2
キジバト	ハト科	ハト目	38	14	0	0	52
ズアカアオバト	ハト科	ハト目	2	0	0	0	2
ウ s p	ウ科	ペリカン目	1	0	0	0	1
合計			286	158	45	3	489

- ・ 自宅周辺で観察できた野鳥は 25 種類で、頻繁に 10 回以上も観察できた野鳥は、10 種類であった。3 回以下が 8 種類であった。よく観察できる野鳥とあまり観察できない野鳥が、はっきりと 2 つに分かれた。
- ・ よく観察できた野鳥で、イソヒヨドリより体長が大きい野鳥は、ハシブトガラスとキジバト、ヒヨドリ。同じくらいが、シロガシラ。イソヒヨドリより小さい野鳥は、ウグイス、リュウキュウツバメ、メジロ。この中で、ハシブトガラスとキジバト、シロガシラ、シロハラがイソヒヨドリのなわばりによく入ってきて、とまっている。他の野鳥は、生息する環境が違っているので、通過するだけのことが多かった。
- ・ A (メス) は、一度、シロガシラがなわばりに入ってくると追い回して、シロガシラが逃げて行った。

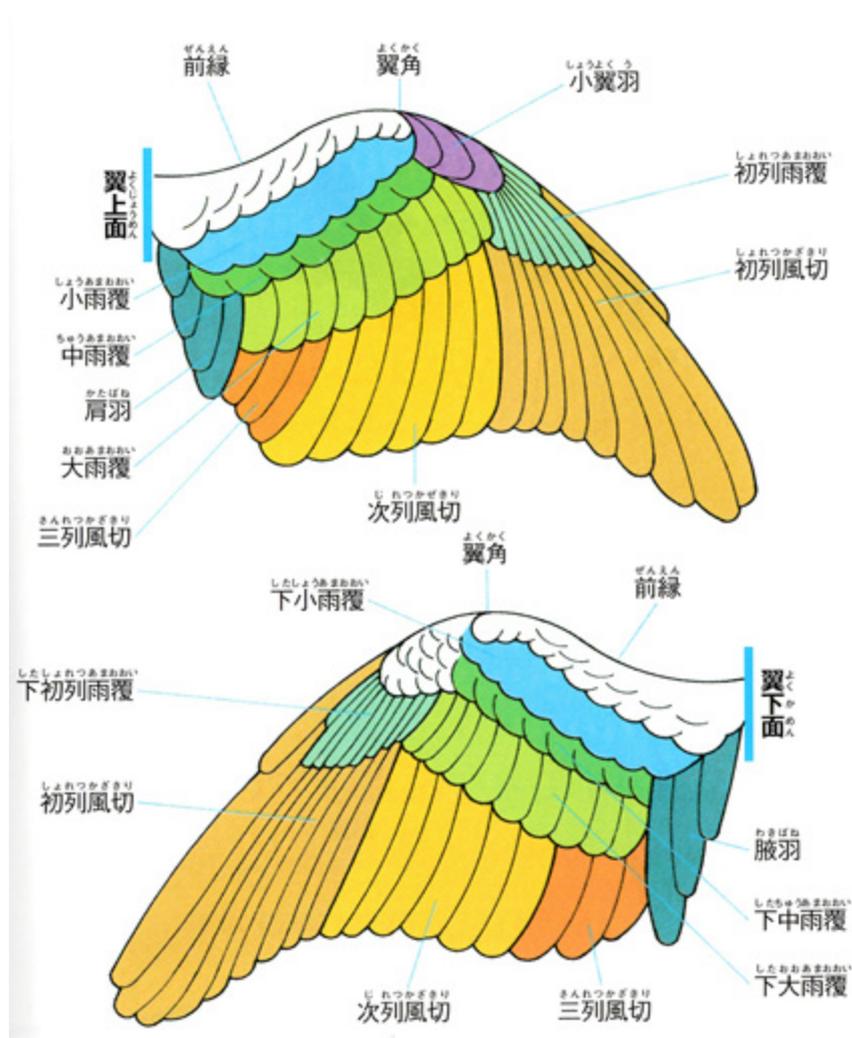
- ・ ハシブトカラスは、隣のアパートの上にとまるとる。ハシブトカラスが来ると他の野鳥が全体的に鳴き止んだ。イソヒヨドリも鳴かなくなったが、攻撃し合ったり逃げたりする行動は観察できなかった。
- ・ キジバトがいても、お互いに威嚇する行動はなかった。
- ・ C (オス) はなわばりに入って来たシロハラを追い出した。
- ・ F (オス) がソングポストにとまると近くにいるシロハラが逃げていた。

(3) 羽根の構造の比較

比較は、昨年、学校の周りで死んでいる野鳥を冷凍庫で凍らせていたので、その死体を使って行った。死体は、水に潜って魚を捕るカワセミ科のアカショウビンと雨の日に飛べなかったツグミ科のイソヒヨドリ、同じツグミ科のシロハラを使った。

死体から採取した羽根の種類は、初列風切の1本目から4本目、次列風切の1本目、尾羽、羽毛の4種類。イソヒヨドリの尾羽は、血がついていて、採取できなかった。

図6、翼の各部の名称



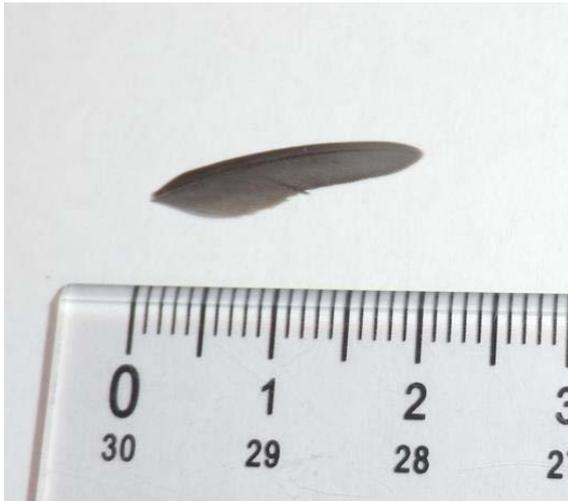
(叶内 2011)

表 15、羽根の長さの比較

	初列風切 1本目	初列風切 2本目	初列風切 3本目	初列風切 4本目	次列風切 1本目	全長
イソヒヨドリ	2.2	7.2	7.5	7.8	5.5	23
シロハラ	1.9	8.2	8.5	8.3	5.7	25
アカショウビン	7.0	7.8	8.0	7.2	7.5	27

(単位はセンチメートル)

【 初列風切 1本目 】



イソヒヨドリ



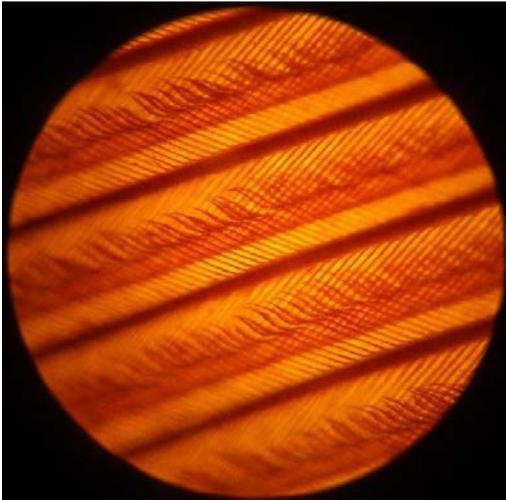
シロハラ



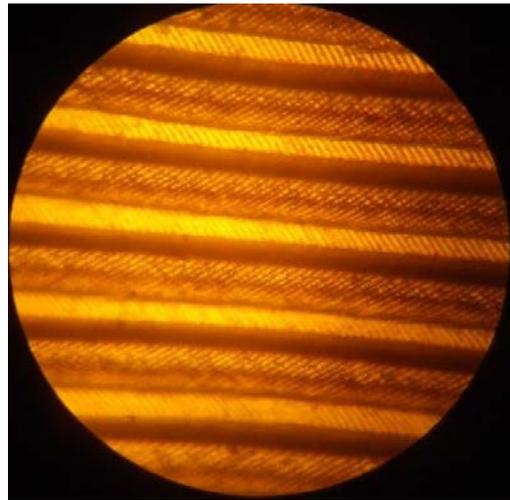
アカショウビン

- ・ 1本目の初列風切は、カワセミ科のアカショウビンは、約7cmで、ツグミ科のイソヒヨドリとシロハラは2cm以下で、アカショウビンが5cmも長かった。
- ・ イソヒヨドリやシロハラにはなかったが、アカショウビンは、羽の下の方に毛のようなものが生えていた。

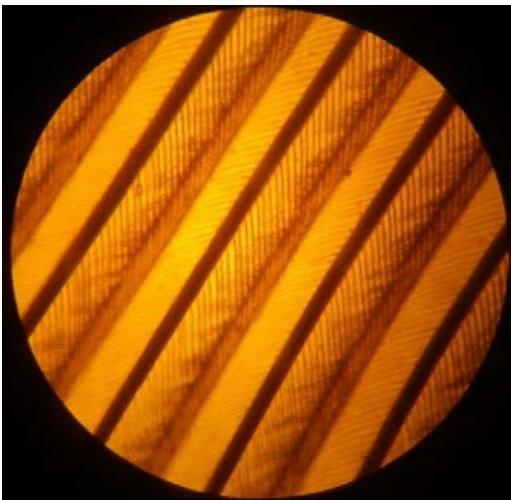
【 顕微鏡で見た初列風切 2 本目 】



アカショウビン



シロハラ



イソヒヨドリ

- 初列風切の 1 本目はツグミ科が短かったので、2 本目を顕微鏡で観察した。写真は、羽軸から出ている一回目の枝分かれの部分。
- 羽根は、中心に羽軸が通っており羽軸から枝分かれし、そこからまた枝分かれするという構造だった。顕微鏡で見える限界は、3 回の枝分かれだった。
- イソヒヨドリ、シロハラ、アカショウビンの初列風切の構造は、あまり変わらなかった。

【 スポイトで水を垂らした初列風切 2 枚目 】



アカショウビン



イソヒヨドリ



シロハラ

- 3種類とも、浸み込まずに水をはじいた。違いは見られなかった。

【 水に付けた後の初列風切 2 枚目 】



アカショウビン



イソヒヨドリ



シロハラ

- コップの水に羽根を付けると、イソヒヨドリとシロハラは水をはじかなかったが、アカショウビンは他の2種よりもはじいているように見える。

6、考察

(1) 繁殖期

① 繁殖の様子と比較

I 巣の作られていた場所の比較

巣①の親は、人間や猫などが侵入できないガスボンベの扉の隙間の中に巣を作り、とても安全だと思った。一方、巣③の親は、巣を玄関前の物置に巣を作っていて、雛が人間や猫に発見されやすい危険な場所だと思った。その部屋の住人が、同じ階の猫を飼っている人に、雛が巣立つまで猫を外に離さないようお願いしていたので、巣の中で無事だったと思う。巣②は、ベランダにあり、住人の出入りが多かったと予想できる。理由はよくわからないが、巣②の親のように巣作りを途中でやめることもあるとわかった。

II 繁殖の回数（表1と表2の結果より）

巣①の親は繁殖が1回だったが、巣③の親は2回繁殖したので回数に違いがあった。巣③の親は1回目の繁殖は全部雛が死ぬという結果だったが、9日後にまた卵を温め始めて4羽中3羽が成功したのでよかった。同じ巣で2度繁殖することもあることがわかった。1回目で失敗したので、2回繁殖したのか、それとも最初から2回繁殖するつもりだったかどうかはよくわからない。

III 繁殖の期間（表1と表2の結果より）

卵を温める期間については、巣①は巣の中が観察できない場所だったので、メスが巣から出てこなくなった日を温める1日目と数え始めた。巣③は、巣の中が観察できたので、卵をひとつ産んだ日を1日目と数えた。キンカチョウやジュウシマツは、卵が一定の数にならないとメスが卵を温め始めないので、もしイソヒヨドリも同じだとすれば、4日間の違いは正確でない可能性がある。

巣立ってから親離れするまでの期間が、巣①に比べて15日も巣③の方が短かったのは、繁殖が2回だったからかもしれない。巣①の親の子育ての期間が長かったので、より丁寧にエサの取り方などを教えられて、生存率が高かったように感じた。

IV 巣①におけるオスとメスの行動の比較

<巣作りの時>（表4の結果より）

卵を温める前に、メスが観察できない日が4日間続いたのは、卵をひとつずつ産んで、一定の数になるまで温めないで待っていた可能性もある。

<卵を温める時>（表5の結果より）

オスが卵を温める野鳥もいるが、イソヒヨドリの抱卵期間は、メスのみが巣で卵を温めていた。メスが卵を温めているときに、オスはさえずっていることがあり、警戒をしていたのだと思う。さえずる場所は、普段のソングポストより巣に近い場所でさえずっていて、卵を温めている時の方がオスは丁寧になわばりを主張していると思った。

メスが朝の温める時間が夕方より少ないのは、朝の観察時間の5時半は日の出の時刻に近くて、野鳥が活発に活動を始める時間帯なので、巣から出て行動することが多かったためだと考えられる。

<エサを運ぶ>（表7の結果より）

巣にエサを運ぶ回数は、オスもメスも朝の方が活発で、オスとメスの差はほとんどなかった。このことから、オスとメスは協力して給餌をすることがわかった。ヒナの成長に合わせてエサを運ぶ回数は多くなり、巣への出入りが頻繁になったのは、エサがたくさん必要だったからだと思う。

好きなエサの種類は、昆虫類でタイワンツチイナゴだと思った。エサの種類でのオスとメスの差はあまりなかった。食べるときはエサのサイズをそろえるということがわかった。

V 子育ての方法の比較（繁殖期の結果⑨子育ての方法より）

巣①と巣③の結果からオスとメスが協力や分担して子育てをした方が、雛の生存率が高いと思った。特に巣立ってから親の行動で、雛が無事に育つかどうかは決まってくると感じた。安全な場所を教えられる親の方が雛は安全に生活できると思った。

②巣の作り方の比較（表 8、グラフ 2、グラフ 3 の結果より）

巣は、ススキの葉や木の枝や皮、葉などを組み合わせ、土を使って固めたり修正したりするという結果だった。環境によって使われる材料の割合は違い、人工物も上手に利用していた。A の巣が自然物で作られていたのは、周りが畑や林など自然が多かったためだと思う。B の巣は学校に作っているため巣材になるような人工物がたくさんあったのだと思う。巣①は、A の巣③と環境は同じだが、すぐ近くにゴミ捨て場があったので、人工物が使われていたと考えられる。

巣を形成しやすいように、ススキ、枝、つる、松の葉、ひものような長細い形のものが、多く利用されていると思った。巣の形はきれいな円ではなく、どの巣も雛がいた場所が壁に付くように作られていて、巣を安定させていると思った。

A の巣から出てきた白い筒は、「羽鞘（うしろう）」といい、一本一本の羽を包む白いケースのようなものということが調べてわかった。顕微鏡で見たら、白い筒はいろんな大きさがあった。B や巣①からは出てこなかったのは、どうしてか不思議だった。

(2) 非繁殖期

【 1 次調査 】

<繁殖期との比較>

①なわばりの比較（表 9 の結果より）

- 繁殖期には、2 つのアパートにオスの 3 個体のなわばりがあって、子育てをしていたが、繁殖が終わるといつの間にか個体が入り替わっていた。今までなわばりをもっていたオスは、どこに行ってしまったのか疑問だ。繁殖後は、3 個体のオスのなわばりがあったところに、メス A が 1 個体でなわばりをもっていたので、メス A のなわばりは、広いと思った。ぼくはエサが多く取れると小さいなわばりで、エサが少ないと大きななわばりになると思っていた。しかし、メス A のなわばりは、繁殖期に 2 つの巣のヒナを育てられるほどエサが豊富なのに、広がった。メス A は、繁殖した時の 3 つの巣のうち、どれかのメスの可能性がある。
- オス C は、メス A と仲が良いと思われる行動が見られたので、親子関係かもしれないと思った。巣①や巣③から、巣立った幼鳥の可能性があったと思った。幼鳥がよくさえずる電柱のソングポストは、巣①のオスがよくさえずっていた場所だ。だから、巣①の幼鳥の可能性が高い。繁殖期はオスがなわばりをもっていて、メスはオスのなわばりの中にいたと思う。しかし、非繁殖期は観察した個体の約半分がメスだったので、メスもなわばりをもつことがわかった。
- 繁殖期になわばりをもっていた 3 個体のオスが、いなくなった理由がよくわからないが、個体が変わることもあるということがわかった。
- なわばりは、A、B、C の個体のように長く観察してデーターが多くあった方が、範囲がはっきりとわかるといった。

②非繁殖鳴き方の比較（表 9 の結果より）

- 親鳥が繁殖期に、ヒナにエサを運んで巣に入るときや巣立ちを促すとき、ヒナが死んだときに鳴いていたチーチーチー（C 2）という地鳴きは、繁殖期以降は一度も聞けなかった。繁殖期の特別な鳴き声だと思った。

③行動の比較（表 10、表 11 の結果より）

- ・ 繁殖の時よりも、なわばり争いが活発になっていると感じた。幼鳥が巣立って個体の数が増えて、幼鳥がなわばりをもとうとしているためだと思う。
- ・ 繁殖期は、オスが他のオスに対してさえずっていて、メスには威嚇していなかったように感じられた。繁殖期後は、メスがメスを追い回したり、さえずったり、警戒し合ったりしていた。
- ・ 繁殖期には、よくオスがメスを追いかけたり、羽根を広げてピョンピョンと跳ねたりする求愛の行動や警戒の行動が観察できた。しかし、繁殖後は、なわばり主張でメスが他のオスを追いかけることはあったが、オスがメスが追いかけられることは、一度もなかった。
- ・ 繁殖期に頻繁に見られたエサを捕まえたり食べたりする行動が、あまり観察できなかった。これは、繁殖期は雛を育てるために、エサがたくさん必要だったからだと思った。
- ・ メス B を観察しているときにさえずりのビデオを再生すると、メス B は看板から電柱、電柱から柵、柵から看板などと僕の周りを回るように場所を変えてさえずっていた。何回か再生してみると、同じ行動を繰り返した。他の個体が来て反応したときの行動のパターンがあるのだと思った。

【 2次調査 】

①観察した個体の行動（表 12 の結果より）

- ・ 求愛や警戒は、非繁殖期も行う行動だと思っていたが一次調査と同じで一度もなかったので繁殖期だけの行動だとわかった。
- ・ 給餌の回数も一次調査と同じで、繁殖期よりずっと少なかった。観察中にネズミを食べていたので、エサは昆虫や植物だけでないことがわかった。
- ・ 他のイソヒヨドリの個体が入ってくると追いかけるので、なわばりを守っていると思った。

②観察した個体のなわばり（図 1～図 5、表 13 の結果より）

- ・ いなくなった個体のほとんどがなわばりの中に建物をもっていなかったため、繁殖期に向けて準備をしているのだと思った。
- ・ 自分はイソヒヨドリは畑でエサをとっていて、なわばりには必ず畑があると思っていたけれどなわばりに畑をもたない個体もいた。
- ・ イソヒヨドリは、本来海岸などの岩に巣を作るが、なわばりの中に自然の岩が無い個体がたくさんいた。岩より建物などの人工物のほうが巣を作りやすいのだと思った。
- ・ なわばりは、重なっている個体が多いことがわかった。A が重なっていてもなわばり争いをしないのは、なわばりが広く、建物も畑もあるからかもしれない。

③イソヒヨドリの生息する環境（表 14 の結果より）

- ・ イソヒヨドリがシロハラやシロガシラを追いかけたので苦手だということがわかった。ハシブトガラスも来ると鳴き止むので苦手だと思った。
- ・ キジバトのように体長が大きくてもイソヒヨドリがあまり気にしない個体もいることがわかった。
- ・ 観察した野鳥のうち、イソヒヨドリと争わない種類がたくさんいた。それは、巣の作る場所やよく止まる場所など生息環境が違うからだと思った。

(3) 羽根の構造の比較

1 本目の初列風切の長さは、野鳥の種類によって違っていた。2 本目からは、ほぼ同じ長さだった。初列風切を顕微鏡で見たら、構造は同じで違いは見られなかった。スポイトで水を一滴垂らしたときは、3 種ともはじいた。でも、コップに水を入れて浸したときは、ツグミ科のイソヒヨドリとシロハラは、ぐっしょりと濡れてしまったが、カワセミ科のアカショウビンは、他に比べ、少しはじいているように思えた。アカショウビンの羽根がはじいたことや初列風切りが長いこと、羽根の付け根に毛が生えていることが、水の中に入っても飛ぶことができる理由かもしれないと思った。

雨に濡れるといつも飛べないわけではないので、飛べなかった理由は他にあるかもしれない。もっと観察しないとよくわからない。

7 今後の課題

次の繁殖期に近づくとつれて、なわばりがどのように変化していくのか興味があるので、今後も観察を続けていきたいと思う。特に今回の繁殖期に繁殖したオス達がまた戻ってくるか、巣が同じ場所に作られるのかどうか知りたい。観察の範囲を広げたので、もっと複数の巣作りや子育てを観察して、比較してみたい。

8 感想

巣から落ちる雛を助けようと体当たりをしたり、死んでしまった雛にエサを運んだり、オスが侵入してきた雛を誘導したりしている姿を見て、イソヒヨドリにも人間のように感情があるのだと思った。

今回の研究で、イソヒヨドリと人間は、共生していると思った。イソヒヨドリには、人間といることで天敵から逃れられる、夜に明かりに集まってくる虫をたべられる、建物に巣を作れるなどのメリットがあると思った。逆に人間にはイソヒヨドリといることで人間があまり好かないゴキブリやネズミを食べてくれるということや、人間にとって害鳥のシロガシラを追い払ってくれるなどのメリットがあると思った。

琉球大学の伊澤雅子先生、宇井大顕さん、小林峻さんにご協力いただきました。
ありがとうございました。

引用文献

叶内拓哉 2011 増補改訂新版 日本の野鳥 山と溪谷社 P 31

講 評

イソヒヨドリが街灯や自販機の明かりがあるところで夜間鳴いていることに興味を持ち、人間活動の影響が強い環境下における生態を調べた研究です。3月～6月にかけて3ペアのイソヒヨドリの繁殖行動を丹念に観察し、非繁殖期にも16個体を識別してナワバリや行動を調べています。その中で、繁殖ペアにおける行動の性差や、1回目の繁殖に失敗したペアが2回目の繁殖を行ったことなど、興味深い観察結果が得られています。合計12羽のヒナのうち、少なくとも2羽がネコに補食され、1羽が自動車に轢かれたという事実からは、野生生物が生きて行くことの難しさを考えさせられます。

ただ、結果の記述や考察には理解しにくいところもあります。パネルの図表にはタイトルを付けましょう。繁殖に成功した2ペアの比較で、巣①の方が、ヒナが巣から出て給餌されるようになってから親離れするまでの期間が巣③のヒナより15日長く、その後のヒナの生残率が高いと述べています。巣③の1回目のヒナは親離れする前に死亡・消失しているので、上記の比較は巣①と、巣③の2回目のことだと思われます。しかし、パネルの図からその期間をみると、巣①は5月3日～6月2日(31日間)、巣③の2回目は5月18日～6月9日(23日間)となっており、その差は8日ということになります。また、生残率も5分の5(100%)と4分の3(75%)の1組の数値の比較のみで、結果を一般化することはできません。

観察例数を積み重ねた上でしっかり考察すると、すばらしい研究になると思いますので頑張ってください。

環境奨励賞

第37回沖縄青少年科学作品展

津波の速さの研究 ～即避難！猛スピードで襲ってくる津波～

国立大学法人琉球大学教育学部附属中学校

3年 與那嶺 李佳

西原町立西原東中学校

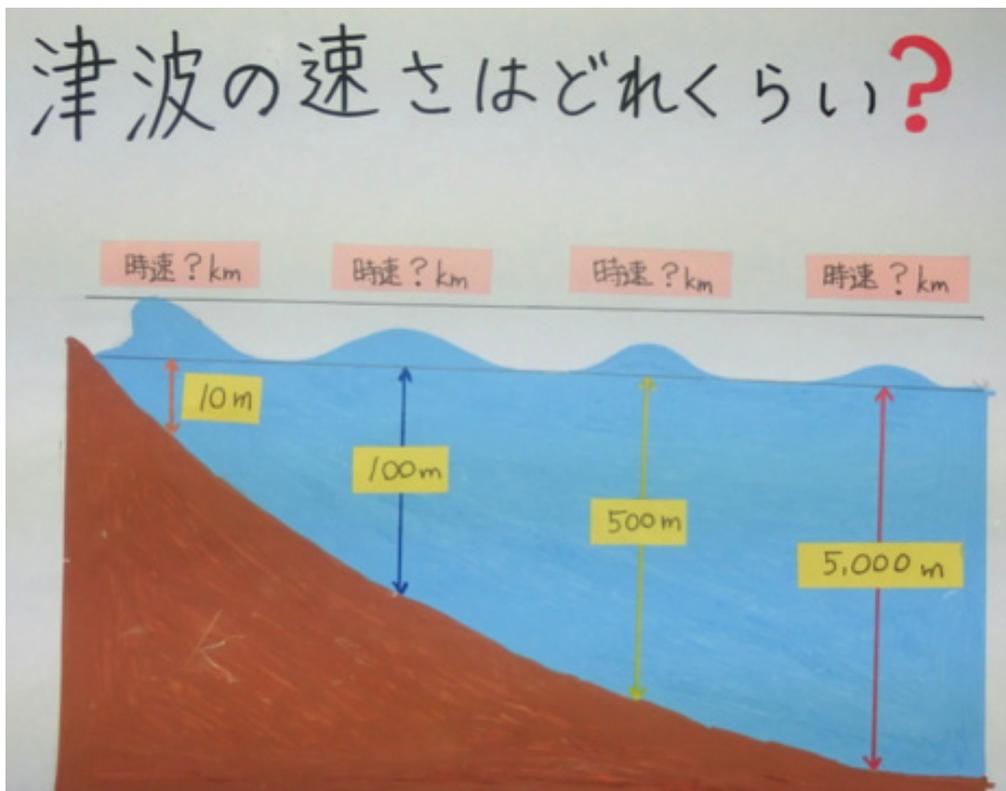
3年 與那嶺 孝明

1. 研究の動機

2011年3月11日、東日本大震災のとき、津波によって破壊される街のようすをテレビのニュース番組や図書館の本で見たことがある。もし、私たちの沖縄で同じような大地震が発生し大津波に襲われたら、助かるのだろうか、どうすれば安全な場所まで避難できるのだろうかと不安になった。

図書館の関連図書に、津波の速さは深さと関係があることが書かれていた。そこで、その関係について自分自身で実験をして調べることにした。

さらに、海底構造の異なる場所では津波の到達時間にどんな違いがあるのかを調べることにした。そこで、沖縄本島沖の琉球海溝で地震が発生したと想定して、本島3地点での津波の到達時間について調べ比較することにした。また、その時、私達の自宅（西原町）から津波から避難することが可能なのか、また、どこへ逃げればいいのかを実際の避難訓練を通して考えることにした。



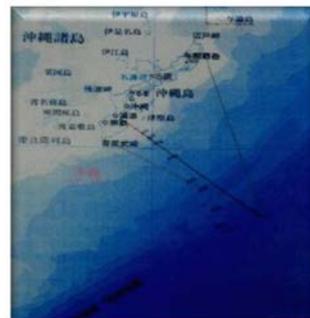
2. 研究の目的

(1) 津波の速さについて調べる。

- ① 地震（衝撃）の大きさと津波の速さの関係を調べる。
- ② 海の深さと津波の速さの関係を調べる。

(2) 沖縄本島沖の琉球海溝で地震が発生したと想定して、津波の速さの公式を利用して

- ① 本島東海岸（3地点）への「到達時間」を算出し、海底構造と到達時間の関係を調べる。
- ② ①の結果と自宅（西原町）からの避難訓練を通して、避難が可能か、どこへ避難すればいいのかを考える。



3. 予想

(1) ① 地震の衝撃の大きさと津波の速さは変わり、衝撃が大きいほど速くなる。

- ② 水の深さによって、速さは変わらない。

(2) ① ゆっくり歩いても避難場所まで移動することができる。

- ② ゆっくり歩いても避難できる場所がある。（東日本大震災の津波の様子から推測して、沖縄本島沖の琉球海溝で地震が発生した場合は、津波の到達所要時間は30分以上かかると思うから）

4. 実験道具

◎目的（1）を確かめるための実験

実験用用具

- ・透明なプラスチック容器（奥行き33.5cm、幅26cm、高さ10.5cm）1個
- ・カセットテープのケース6本
- ・ストップウォッチ1個
- ・ミニ定規1本
- ・輪ゴム1個

◎目的（2）を確かめるための実験

- ・沖縄本島周辺の地図（125000分の1縮尺）1枚
- ・計算機1個（平方根計算可能）

掲示用

- ・沖縄本島周辺の地図（625000分の1縮尺）1枚
- ・コルク掲示板1枚
- ・発泡スチロール1枚



5. 研究の方法

(1) 津波の速さを研究する。

① 地震の大きさ（衝撃）と津波の速さの関係を、モデルを使って調べる。次の手順で実験する。

ア. 容器に1cmの深さまで水を入れる。そして、輪ゴムを浮かべる。（深さ1cmは固定する）

イ. 容器の下にカセットテープのケース1本をはさみこみ、水面の波がなくなるまで待つ。

（輪ゴムの動きが止まったとき、水面の波がなくなったと判断する。）

ウ. 水面に波がなくなったら、ケースを引き出して波を起す。このとき、初めの波が起きて容器の壁にあたってから、波が1往復するのにかかる時間を、ストップウォッチで測定する。測定は20回くり返し行い、平均を求める。

※ ケースの本数を、2本、3本、4本、5本、6本と変えて（重ねて高くし）、②、③と同じようにして測定する。（深さ1cmは固定する）

※ 地震（衝撃）の大きさを、ケースの高さで表すこととする。

※ さらに、深さ 2 cm（固定）でも同様の実験をする。

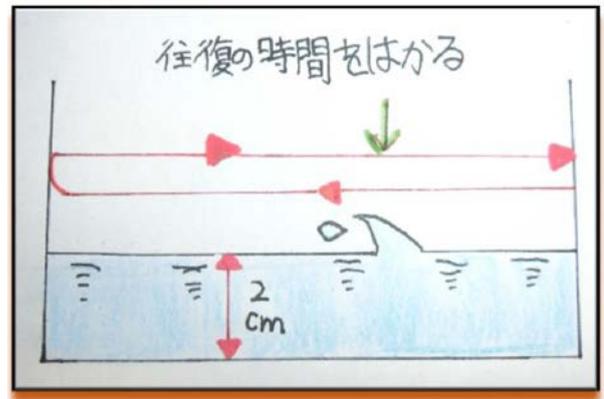
② 海の深さと津波の速さの関係を、モデルを使って調べる。次の手順で実験する。

ア. 容器に 1 cm の深さまで水を入れる。そして、輪ゴムを浮かべる。

イ. 容器の下にカセットテープのケース 2 本をはさみこみ、水面の波がなくなるまで待つ。

ウ. 水面に波がなくなったら、ケースを引き出して波を起こす。このとき、初めの波が起きて容器の壁にあたってから、波が 1 往復するのにかかる時間を、ストップウォッチで測定する。測定は 20 回くり返し行い、平均を求める。（ケース 2 本は固定する）

※ 容器の水の深さを 2 cm、3 cm、4 cm、5 cm、6 cm と変えて（順次深くし）、②、③と同じようにして測定する。



(2) ① 沖縄本島沖の琉球海溝で起きた地震から発生したと想定し、そのとき発生した津波の「到達予想時間」を次の手順で求める。

ア. 地震発生地点から沖縄本島西原町までの区間を、いくつかの【深さごとの階級】に分ける。

イ. それぞれの【階級ごとの距離】を、(地図上の実測値) × (縮尺の逆数: 1 2 5 0 0 0 0) から計算する。

ウ. それぞれの階級の階級値を【階級ごとの深さ】と定めようとして、他の文献から得られた

★『速さの公式』 $速度 (m / 秒) = \{ (9.8 \times 深さ (m)) \text{ の平方根 } \}$

に当てはめ、それぞれの階級ごとの速さを計算する。（※深さは、速さの 2 乗に比例する。）

エ. それぞれの【階級ごとの要した時間】を、②、③の結果を用いて求める。つまり、

【階級ごとの距離】 ÷ 【階級ごとの深さ】 から計算する。

オ. 階級ごとに要した時間を合計し、津波の到達時間を求める。

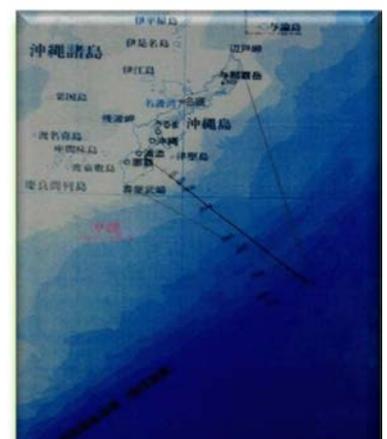
※ 同様な方法で、本島東海岸の北端、南端における津波の「到達予想時間」を算出する。

※ その結果から、海底構造と到達時間の関係を考察する。

② ①の結果と自宅（西原町）から避難訓練を通して、避難が可能か、どこへ避難すればいいのかを考える。次の手順で行う。

ア. 地震・津波が発生したと想定して、自宅（海拔 2 m）から避難場所（海拔 35 m 以上）までの移動時間とそのときの海拔高度を記録していく。2 つの避難場所で測定を行う。

イ. 2 つの避難場所までの到着時間が (2) の①で調べた津波到達予想時間内であるかを調べ、適切な避難場所を決める。さらに、この避難訓練を通して分かったことをまとめる。



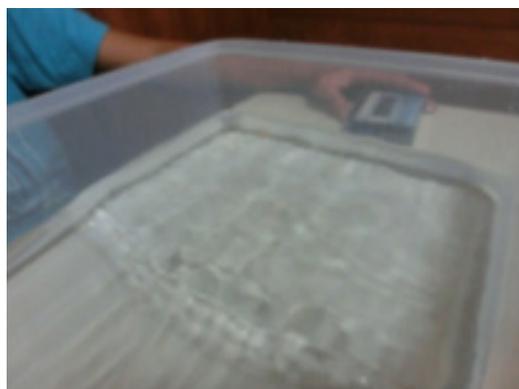
6. 研究結果

【実験1の結果】

① 1往復に要する時間（秒）

(水の深さ1cmの場合) 往復距離67cm

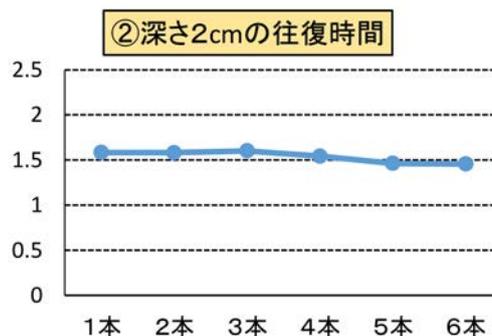
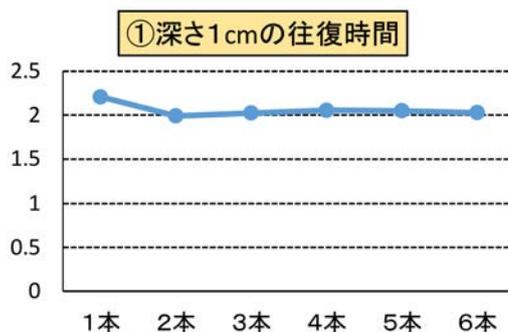
カセット	1本	2本	3本	4本	5本	6本
1回目	2.02	1.86	2	2.08	2.1	2.15
2回目	2.19	2.07	2.03	2.04	2.1	2.04
3回目	2.15	2.04	2.1	2.1	2.07	2.01
4回目	2.1	1.85	1.93	2.01	1.98	1.94
5回目	2.08	2.02	1.86	2.11	1.86	1.93
6回目	2.09	1.4	1.97	2.06	2	1.92
7回目	2.22	1.98	2.09	2.06	2.07	2
8回目	2.12	1.96	2.06	2.1	2.14	1.88
9回目	2.18	2	2.14	2.09	2.14	2.06
10回目	2.08	2.01	2.06	2.14	1.91	2.08
11回目	2.13	2.11	2.01	2.04	2.05	2.02
12回目	2.23	2.08	2.06	2.01	1.95	2.07
13回目	2.52	1.97	1.97	2.1	2.06	2.17
14回目	2.28	2.03	2.02	2.06	2.05	1.99
15回目	2.3	2.1	1.97	1.96	2.01	2
16回目	2.46	2.01	1.99	1.91	2.26	2.02
17回目	2.15	1.97	1.98	2.1	2.12	2.14
18回目	2.39	2.11	2.07	2.08	2.13	2.02
19回目	2.18	2.07	2.12	1.96	2.01	2.04
20回目	2.32	2.18	2.05	2.09	2	2.09
平均値	2.21	1.991	2.024	2.055	2.051	2.029



② 1往復に要する時間（秒）

(水の深さ2cmの場合) 往復距離67cm

カセット	1本	2本	3本	4本	5本	6本
1回目	1.57	1.51	1.68	1.59	1.44	1.43
2回目	1.16	1.56	1.59	1.56	1.44	1.48
3回目	1.71	1.62	1.66	1.52	1.43	1.44
4回目	1.57	1.61	1.56	1.52	1.52	1.52
5回目	1.53	1.68	1.6	1.59	1.64	1.4
6回目	1.6	1.68	1.63	1.72	1.4	1.49
7回目	1.58	1.68	1.52	1.63	1.46	1.46
8回目	1.57	1.56	1.3	1.6	1.5	1.44
9回目	1.54	1.66	1.63	1.49	1.54	1.44
10回目	1.32	1.62	1.69	1.53	1.33	1.52
11回目	1.72	1.6	1.61	1.52	1.35	1.44
12回目	1.73	1.51	1.56	1.48	1.45	1.57
13回目	1.52	1.45	1.69	1.49	1.48	1.39
14回目	1.54	1.45	1.63	1.57	1.5	1.47
15回目	1.63	1.61	1.6	1.54	1.39	1.37
16回目	1.64	1.55	1.62	1.44	1.51	1.4
17回目	1.71	1.48	1.62	1.44	1.46	1.53
18回目	1.66	1.64	1.62	1.59	1.66	1.5
19回目	1.68	1.56	1.58	1.54	1.33	1.5
20回目	1.71	1.6	1.63	1.51	1.42	1.33
平均値	1.585	1.582	1.601	1.544	1.463	1.456



【実験2の結果】

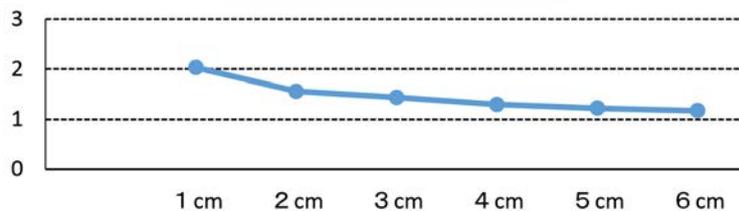
1 往復に要する時間 (秒) 往復距離 6 7 cm ケース 2 本

深さ	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm
1 回目	2.04	1.59	1.48	1.25	1.39	1
2 回目	2.16	1.64	1.44	1.46	1.16	1.1
3 回目	1.46	1.49	1.36	1.18	1.3	1.12
4 回目	2.13	1.73	1.45	1.39	1.11	1.7
5 回目	2.00	1.48	1.63	1.11	1.19	1.11
6 回目	2.06	1.53	1.48	1.34	1.18	1.2
7 回目	1.9	1.67	1.56	1.45	1.19	1.1
8 回目	2.1	1.64	1.59	1.36	1.22	0.98
9 回目	1.67	1.49	1.46	1.29	1.07	1.72
10 回目	2.1	1.5	1.41	1.37	1.23	1.02
11 回目	2.16	1.52	1.72	1.36	1.24	1.08
12 回目	2.18	1.59	1.17	1.25	1.25	1.14
13 回目	2.01	1.63	1.31	1.18	1.28	1.18
14 回目	1.98	1.47	1.41	1.25	1.16	1.1
15 回目	2.08	1.42	1.32	1.21	1.23	1.19
16 回目	2.18	1.58	1.37	1.28	1.17	1.14
17 回目	2.12	1.6	1.36	1.26	1.3	1.05
18 回目	2.1	1.45	1.48	1.31	1.32	1.18
19 回目	2.12	1.56	1.3	1.34	1.14	1.15
20 回目	2.04	1.58	1.44	1.28	1.32	1.18
平均値	2.03	1.558	1.437	1.296	1.223	1.172



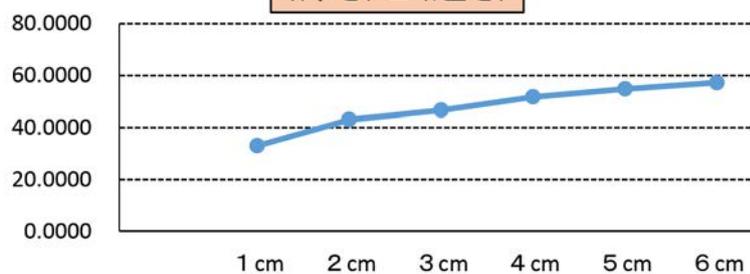
①水の深さ	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm
②往復時間 (秒)	2.03	1.558	1.437	1.296	1.223	1.172

(深さ)と(往復時間)



①水の深さ	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm
②往復時間 (秒)	33.0049	43.0039	46.6249	51.6975	54.7833	57.1672

(深さ)と(速さ)



●水の深さが2 cm と6 cm の波の伝わり方の違いをみる実験

・ 1つの容器を2つに仕切り波が伝わる様子を撮影（連写）した。手前は水の深さ6 cm。

2の画像から、深さが6 cmの方が2 cmの場合より波の伝わる速さが速いことが観察できる。

1



4



2



5



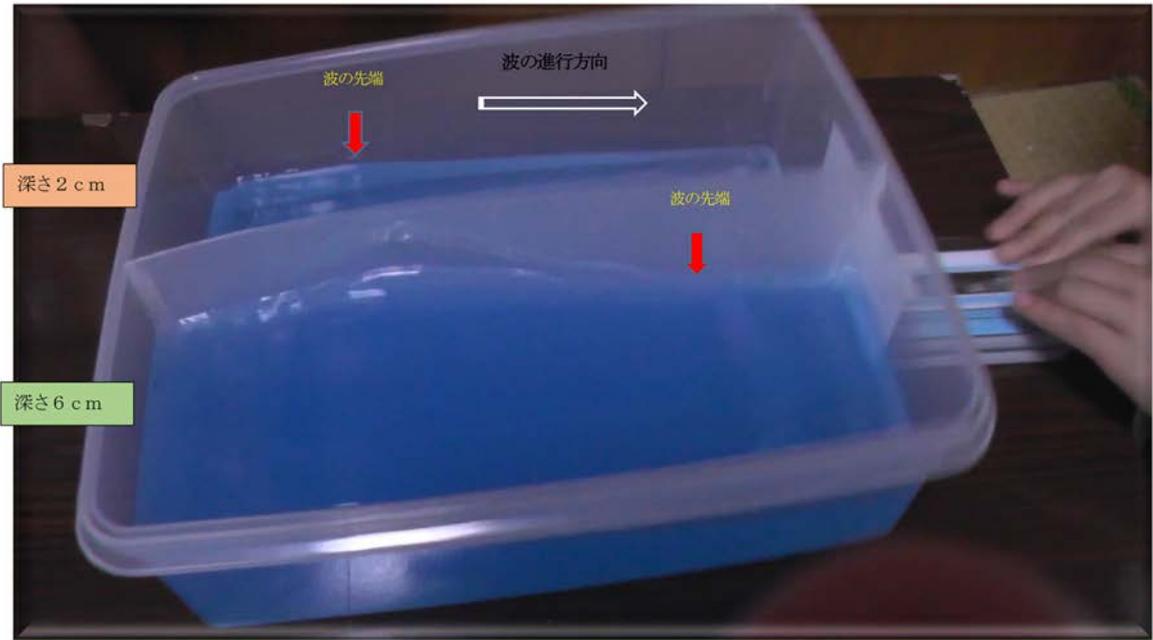
3



6



2

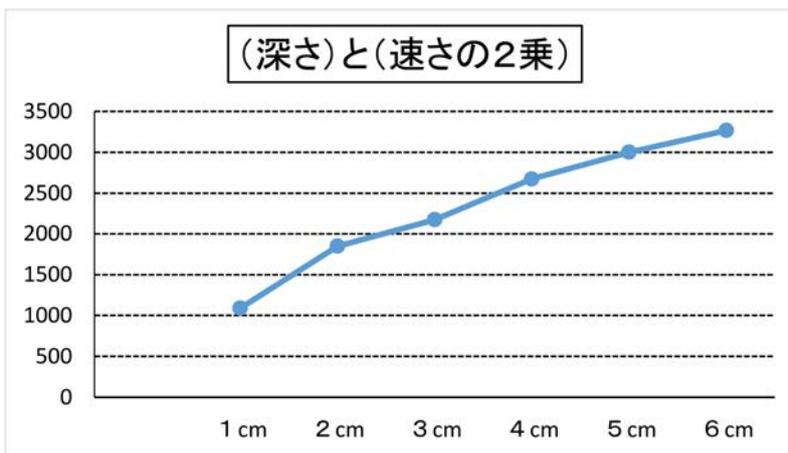


◎津波の速さに関する資料（気仙沼市総務部危機管理課のホームページ）によると、津波の速さは深さに関係があり、深さは速さの2乗に比例する。深さを y 、速さを x とすると次の式が成り立つという。

$$x = \sqrt{9.8y} \text{ m/秒} \quad \dots \star$$

◎私達も、実験2の結果から、深さと速さの関係を調べてみました。以下は私達が導き出した関係式です。

①水の深さ (cm)	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm
③速さの2乗	1089	1849	2174	2673	3001	3268



①水の深さ (cm)	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	
③速さの2乗	1089	1849	2174	2673	3001	3268	
①÷②	0.00092	0.00108	0.00138	0.0015	0.00167	0.00184	0.00140 平均

おおよそ

$$y = 0.0014 x^2$$

$$x = \sqrt{714.286y} \quad \text{cm/秒}$$

$$x = \sqrt{7.14286y} \quad \text{m/秒}$$

◎私達の実験では、「深さは速さの2乗に比例する」という結果と「正しい関係式★」を導き出すことはできませんでした。

◎ 津波の速さ、区間での所要時間の求め方

Q1 [深さ2000m～3000mの階級]での津波の平均の速さを求めよう。

① 階級値 (中間の値。この値を階級の深さと決める。) を求める。

$$(2000+3000) \div 2 = 2500 \quad 2500 \quad (\text{m})$$

② 速さを求める。

$$\begin{aligned} \cdot \text{津波の速さ (m/秒)} &\approx \sqrt{9.8 \times \text{水深(m)}} \\ &\approx \sqrt{9.8 \times 2500} \\ &\approx 156.52 \quad (\text{m/秒}) \\ &\approx 156.52 \times 60 = 9391.2 \quad (\text{m/分}) \\ &\approx 9391.2 \times 60 = 563472 \quad (\text{m/時}) \\ &\approx \underline{563472 \div 1000 \approx 563} \quad (\text{km/時}) \end{aligned}$$

③ この階級の地図上の実測値は 19 mmであるから

$$\begin{aligned} \cdot \text{実際の距離} &= 19 \times 1250000 = 23750000 \quad (\text{mm}) \\ &= 23750000 \div 1000 = 23750 \quad (\text{m}) \\ &= \underline{23750 \div 1000 \approx 23.75} \quad (\text{km}) \end{aligned}$$

④ [深さ2000m～3000mの階級]での津波の通過する所要時間を求める。

$$\begin{aligned} \cdot \text{所要時間} &\approx \underline{23.75 \div 563 \approx 0.0421 \text{ (時間)}} \quad (\text{時間}) \\ &= \underline{0.0421 \times 60 = 2.526} \quad (\text{分}) \\ &2.526 \times 60 = 151.56 \quad (\text{秒}) \end{aligned}$$

Q2 [深さ6000m~7000mの階級]での津波の平均の速さを求めよう。

⑤ 階級値(中間の値。この値を階級の深さと決める。)を求める。

$$(6000 + 7000) \div 2 = 6500$$

6500 (m)

⑥ 速さを求める。

$$\cdot \text{津波の速さ (m/秒)} = \sqrt{9.8 \times \text{水深(m)}}$$

$$= \sqrt{9.8 \times 6500}$$

$$= 252.39 \quad (\text{m/秒})$$

$$= 15143.4 \quad (\text{m/分})$$

$$= 908.604 \quad (\text{m/時})$$

$$\approx \underline{\underline{909}} \quad (\text{km/時})$$

⑦ この階級の地図上の実測値は 11 mmであるから

$$\cdot \text{実際の距離} = 11 \times 1250000 = 13750000 \quad (\text{mm})$$

$$= 13750000 \div 100 = 137500 \quad (\text{m})$$

$$= \underline{\underline{137500 \div 1000 = 13.75}} \quad (\text{km})$$

⑧ [深さ6000m~7000mの階級]での津波の通過する所要時間を求める。

$$\cdot \text{所要時間} = \underline{\underline{13.75 \div 909 = 0.0151}} \quad (\text{時間})$$

$$= \underline{\underline{0.0151 \times 60 = 0.906}} \quad (\text{分})$$

$$0.912 \times 60 = 54.36 \quad (\text{秒})$$

●津波の「深さと速さの関係」および「深さと速さの2乗の関係」について（一般式より）

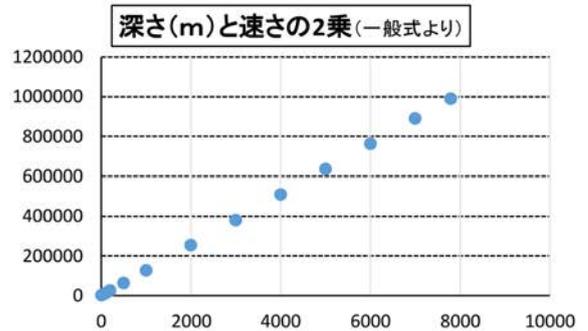
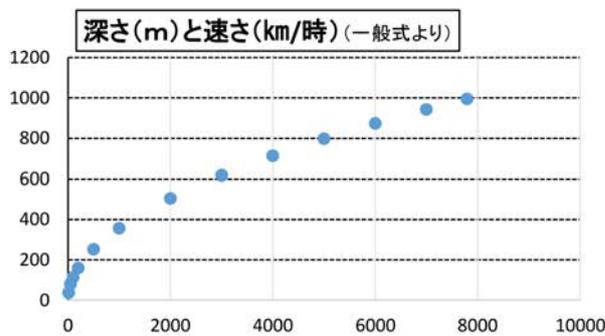
・津波の速さ = {速さ = (9.8 × 深さ) に平方根} をもとに、次のことを調べてみました。

●深さと速さの関係（公式より）

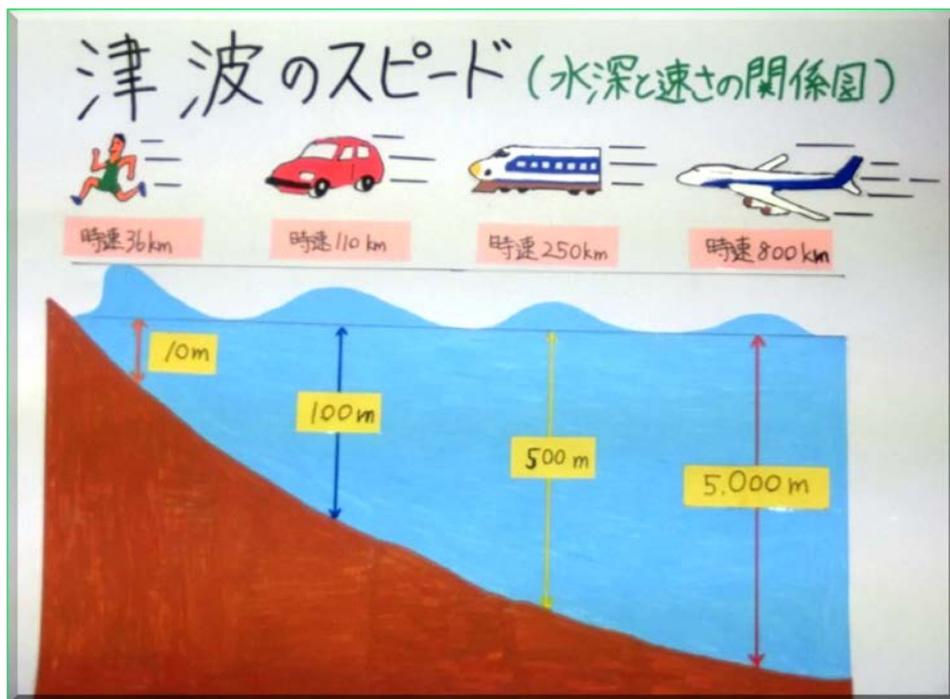
深さ (m)	7790	7000	6000	5000	4000	3000	2000
速さ (km/時)	995	943	873	797	713	617	504
深さ (m)	1000	500	200	100	50	10	
速さ (km/時)	356	252	159	113	80	36	

●深さと速さの2乗の関係（一般式より）

深さ (m)	7790	7000	6000	5000	4000	3000	2000
速さ (km/時)	990025	889249	762129	635209	508369	380689	254016
深さ (m)	1000	500	200	100	50	10	
速さ (km/時)	126736	63504	25281	12769	6400	1296	

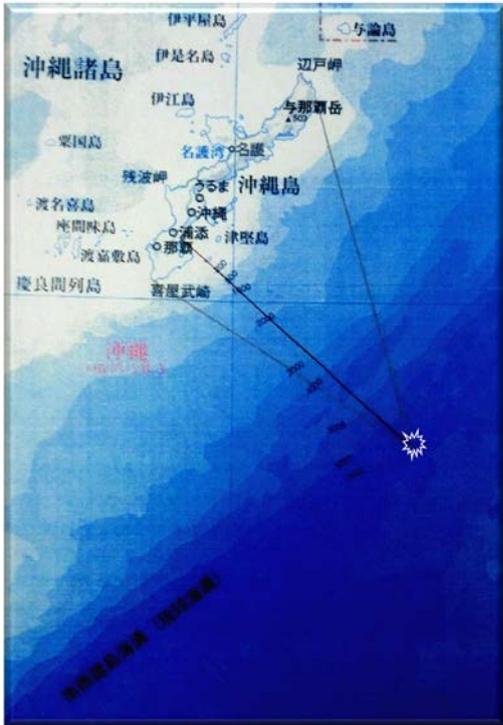


◎津波の速さの公式から、深さごとの速さが算出される。深いほど速くなる。この結果をもとに、津波のおよその到達時間を求めます。

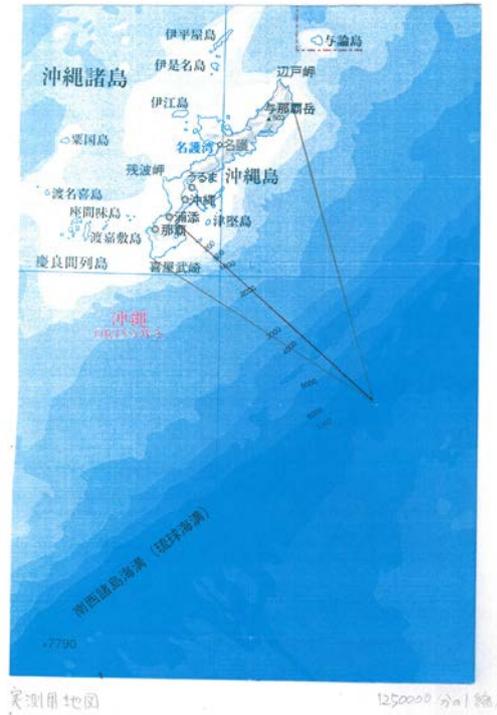


○沖縄近海（琉球海溝）での地震・津波が発生したと想定して、次の3つの地点（本島東海岸）への到達時間を調べる。

- ①西原町へ到達する津波 ②南端へ到達する津波（糸満市） ③北端へ到達する津波（国頭村）

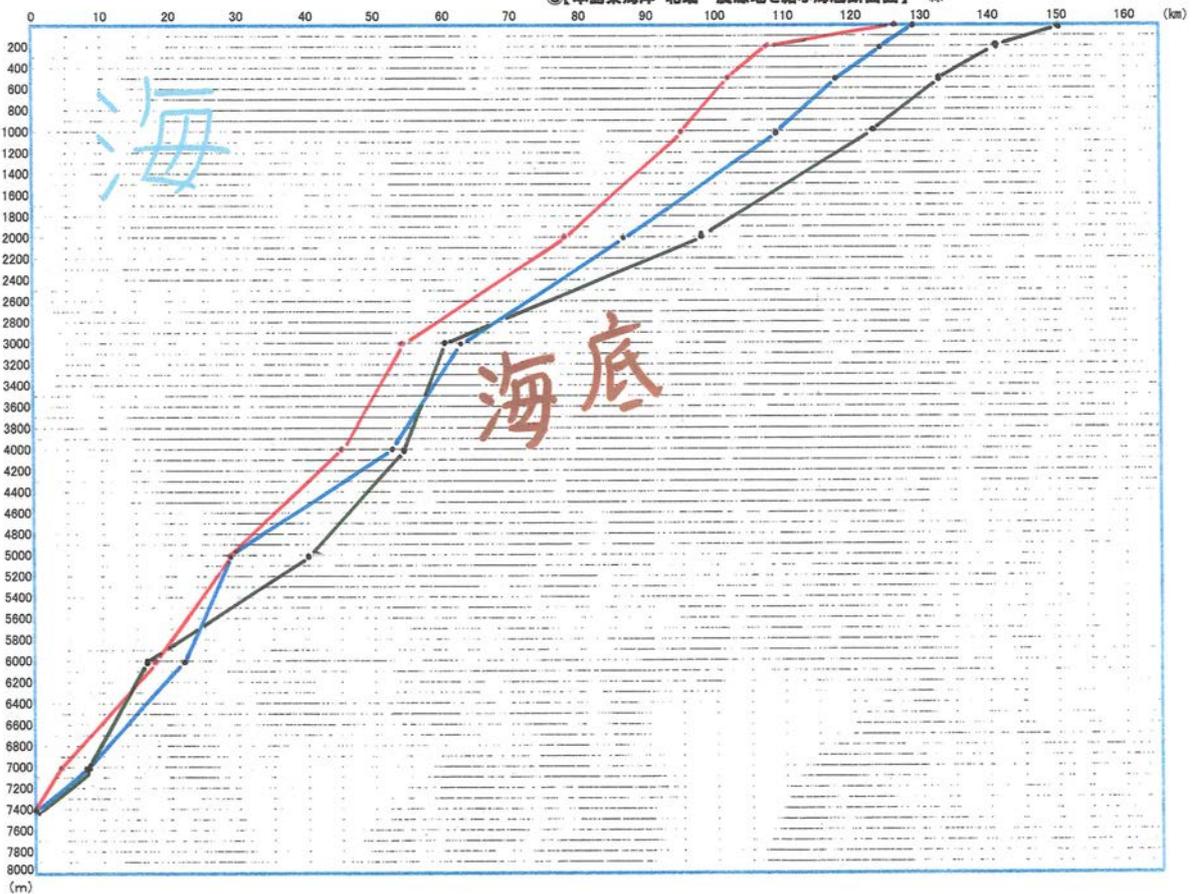


2



3つの地点と震源地を結ぶ海底断面図の比較

- ①【本島東海岸・西原町～震源地を結ぶ海底断面図】 赤
 ②【本島東海岸・南端～震源地を結ぶ海底断面図】 青
 ③【本島東海岸・北端～震源地を結ぶ海底断面図】 緑



●琉球海溝津波における速さ、距離、時間の計算結果・・・津波の速さの公式[速さ=(9.8×深さ)に平方根]をもとに、琉球海溝地震による津波の速さ、到達時間を調べてみました。
【本島東海岸・西原町に到達する津波】

① 区間 (m)	0 ~ 200	200 ~ 500	500 ~ 1000	1000 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 ~ 4000	4000 ~ 5000	5000 ~ 6000	6000 ~ 7000	7000 ~ 7790	合計																				
② 階級値 (m)	100	350	750	1500	2500	3500	4500	5500	6500	7395																					
③ 速さ (km/時)	0	113	159	159	211	252	252	309	356	356	436	504	504	563	617	617	667	713	713	756	797	797	836	873	873	909	943	943	969	995	
④ 地図上の距離 (mm)	15	4	6	14	19	7	13	9	11	3	101	合計																			
⑤ 実際の距離 (km)	18.75	6.00	7.50	17.50	23.75	8.75	16.25	11.25	13.75	3.75	128.75	合計																			
⑥ 時間 (時間)	0.1658	0.0236	0.0242	0.0401	0.0421	0.0131	0.0214	0.0134	0.0151	0.0038	0.363	合計																			
⑦ 時間 (分)	9.95	1.42	1.45	2.41	2.53	0.79	1.28	0.8	0.91	0.23	21.78	21分54.72秒																			
⑧ 時間 (秒)	597.24	84.96	87.12	144.36	151.56	47.16	77.04	48.24	54.36	13.68	1305.72	秒																			

※全体の平均速度は、 $126.25 \div 21.762 \times 60 = 348.09$ (km/時) 切り上げ または $126.25 \div 0.3627$ 分

残18.75km (107.5km進む) ... 1.42 1.45 2.41 2.53 0.79 1.28 0.8 0.91 0.23 11.81 11分54.48秒

※ここまでの平均速度は、 $107.5 \div 11.808 \times 60 = 546.24$ (km/時) 切り上げ

残23.75km (102.5km進む) ... 1.45 2.41 2.53 0.79 1.28 0.8 0.91 0.23 10.39 10分23.52秒

※ここまでの平均速度は、 $102.5 \div 10.392 \div 60 = 591.81$ (km/時)

残31.25km (95km進む) ... 2.41 2.53 0.79 1.28 0.8 0.91 0.23 8.94 8分56.4秒

※ここまでの平均速度は、 $95 \div 8.94 \times 60 = 637.59$ (km/時)

残48.75km (77.5km進む) ... 2.53 0.79 1.28 0.8 0.91 0.23 6.534 6分32.04秒

※ここまでの平均速度は、 $77.5 \div 6.534 \times 60 = 711.67$ (km/時)

残72.5km (53.75km進む) ... 0.79 1.28 0.8 0.91 0.23 4.008 4分0.48秒

※ここまでの平均速度は、 $53.75 \div 4.008 \times 60 = 804.65$ (km/時)

残81.25km (45km進む) ... 1.28 0.8 0.91 0.23 3.222 3分13.32秒

※ここまでの平均速度は、 $45 \div 3.222 \times 60 = 837.99$ (km/時)

残97.5km (28.75km進む) ... 0.8 0.91 0.23 1.938 1分56.28秒

※ここまでの平均速度は、 $28.75 \div 1.938 \times 60 = 890.10$ (km/時)

残108.75km (17.5km進む) ... 0.91 0.23 1.134 1分8.04秒

※ここまでの平均速度は、 $17.5 \div 1.134 \times 60 = 925.93$ (km/時)

残122.25km (3.75km進む) ... 0.23 0.228 13.68秒

※ここまでの平均速度は、 $3.75 \div 0.228 \times 60 = 986.85$ (km/時)

残126.25km (0km進む) ... 0 0分0秒

- 計算式
- ①の2数の平均値、中間の値。
 - ②：階級値の速さを求めている。[(深さ×9.8)の平方根]×60÷1000、つまり、[(深さ×9.8)の平方根]×3.6 ※理由：(深さ×9.8)の平方根は速さを表し、単位は m/秒である。次に、[(深さ×9.8)の平方根]×60 は速さを表し、単位は m/分。さらに、[(深さ×9.8)の平方根]×60×60 は速さを表し、単位は m/時。[(深さ×9.8)の平方根]×60×60÷1000 は速さを表し、単位は km/時。
 - ③：地図上の実測値 (mm)。地図は、1250000分の1の縮尺。
 - ④より、(実際の距離) = (地図上の実測値) × 1250000 (mm) で求める。km単位にするには、(地図上の実測値) × 1250000 ÷ 1000000 (km)、つまり、(地図上の実測値) × 1.25 (km)。
 - ⑤÷③。単位は時間。切り捨て。
 - ⑥×60。単位は分。
 - ⑦×60。単位は秒。

●琉球海溝津波における速さ、距離、時間の計算結果・・・津波の速さの公式[速さ=(9.8×深さ)に平方根]をもとに、琉球海溝地震による津波の速さ、到達時間を調べてみました。
【本島東海岸・南端へ到達する津波】

① 区間 (m)	0 ~ 200	200 ~ 500	500 ~ 1000	1000 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 ~ 4000	4000 ~ 5000	5000 ~ 6000	6000 ~ 7000	7000 ~ 7790	合計																				
② 階級値 (m)	100	350	750	1500	2500	3500	4500	5500	6500	7395																					
③ 速さ (km/時)	0	113	159	159	211	252	252	309	356	356	436	504	504	563	617	617	667	713	713	756	797	797	836	873	873	909	943	943	969	995	
④ 地図上の距離 (mm)	4	5	7	18	19	8	19	6	11	6	103	合計																			
⑤ 実際の距離 (km)	0	6.00	0.00	8.25	0.00	8.75	0.00	22.50	0.00	23.75	0.00	10.00	0.00	23.75	0.00	0.00	7.50	0.00	0.00	13.75	0.00	0.00	7.50	0.00	0.00	7.50	0.00	0.00	128.75	合計	
⑥ 時間 (時間)	0.0442	0.0296	0.0283	0.0516	0.0421	0.0149	0.0314	0.0089	0.0151	0.0077	0.274	合計																			
⑦ 時間 (分)	2.65	1.76	1.7	3.1	2.53	0.88	1.88	0.53	0.91	0.46	16.43	16分25.68秒																			
⑧ 時間 (秒)	106.56	101.88	102.96	187.56	151.56	53.64	113.04	32.04	54.36	27.72	985.68	秒																			

※全体の平均速度は、 $128.75 \div 16.4285 \times 60 = 470.22$ (km/時) 切り上げ

残5km (123.75km進む) ... 1.76 1.7 3.1 2.53 0.88 1.88 0.53 0.91 0.46 13.78 13分48.56秒

※ここまでの平均速度は、 $123.75 \div 13.776 \times 60 = 538.99$ (km/時) 切り上げ

残11.25km (117.5km進む) ... 1.7 3.1 2.53 0.88 1.88 0.53 0.91 0.46 12 12分

※ここまでの平均速度は、 $117.5 \div 12 \div 60 = 587.50$ (km/時)

残20km (108.75km進む) ... 3.1 2.53 0.88 1.88 0.53 0.91 0.46 10.3 10分18.12秒

※ここまでの平均速度は、 $108.75 \div 10.302 \times 60 = 633.38$ (km/時)

残42.5km (86.25km進む) ... 2.53 0.88 1.88 0.53 0.91 0.46 7.206 7分12.36秒

※ここまでの平均速度は、 $86.25 \div 7.206 \times 60 = 718.16$ (km/時)

残66.25km (62.5km進む) ... 0.88 1.88 0.53 0.91 0.46 4.68 4分40.8秒

※ここまでの平均速度は、 $62.5 \div 4.68 \times 60 = 801.29$ (km/時)

残76.25km (52.5km進む) ... 1.88 0.53 0.91 0.46 3.786 3分47.16秒

※ここまでの平均速度は、 $52.5 \div 3.786 \times 60 = 832.02$ (km/時)

残100km (28.75km進む) ... 0.53 0.91 0.46 1.902 1分54.12秒

※ここまでの平均速度は、 $28.75 \div 1.902 \times 60 = 906.95$ (km/時)

残107.5km (21.25km進む) ... 0.91 0.46 1.368 1分22.08秒

※ここまでの平均速度は、 $21.25 \div 1.368 \times 60 = 932.02$ (km/時)

残121.25km (7.5km進む) ... 0.46 0.462 27.72秒

※ここまでの平均速度は、 $7.5 \div 0.462 \times 60 = 974.03$ (km/時)

残128.75km (0km進む) ... 0 0分0秒

- 計算式
- ①の2数の平均値、中間の値。
 - ②：階級値の速さを求めている。[(深さ×9.8)の平方根]×60÷1000、つまり、[(深さ×9.8)の平方根]×3.6 ※理由：(深さ×9.8)の平方根は速さを表し、単位は m/秒である。次に、[(深さ×9.8)の平方根]×60 は速さを表し、単位は m/分。さらに、[(深さ×9.8)の平方根]×60×60 は速さを表し、単位は m/時。[(深さ×9.8)の平方根]×60×60÷1000 は速さを表し、単位は km/時。
 - ③：地図上の実測値 (mm)。地図は、1250000分の1の縮尺。
 - ④より、(実際の距離) = (地図上の実測値) × 1250000 (mm) で求める。km単位にするには、(地図上の実測値) × 1250000 ÷ 1000000 (km)、つまり、(地図上の実測値) × 1.25 (km)。
 - ⑤÷③。単位は時間。切り捨て。
 - ⑥×60。単位は分。
 - ⑦×60。単位は秒。

● 琉球海溝津波における速さ、距離、時間の計算結果・・・津波の速さの公式(速さ=(9.8×深さ)に平方根)をもとに、琉球海溝地震による津波の速さ、到達時間を調べてみました。
【本島東海岸・北端へ到達する津波】

① 区間(m)	0 ~ 200	200 ~ 500	500 ~ 1000	1000 ~ 2000	2000 ~ 3000	3000 ~ 4000	4000 ~ 5000	5000 ~ 6000	6000 ~ 7000	7000 ~ 7900	合計
② 階級値(m)	100	350	750	1500	2500	3500	4500	5500	6500	7395	
③ 速さ(km/時)	0 113 159	159 211 252	252 309 356	356 436 504	504 563 617	617 667 713	713 756 797	797 836 873	873 909 943	943 969 995	
④ 地図上の距離(mm)	0 7 0	0 7 0	0 8 0	0 20 0	0 30 0	0 5 0	0 11 0	0 19 0	0 7 0	0 6 0	120
⑤ 実際の距離(km)	0 0.75 0.00	0.00 3.75 0.00	0.00 10.00 0.00	0.00 25.00 0.00	0.00 37.50 0.00	0.00 6.25 0.00	0.00 19.75 0.00	0.00 32.75 0.00	0.00 47.75 0.00	0.00 7.50 0.00	150.00
⑥ 時間(時間)	0 0.0774 0	0 0.0414 0	0 0.0223 0	0 0.0573 0	0 0.0696 0	0 0.0093 0	0 0.0181 0	0 0.0284 0	0 0.0096 0	0 0.0077 0	0.348
⑦ 時間(分)	4.64	2.48	1.94	3.44	4	0.56	1.09	1.7	0.58	0.46	20分53.16秒
⑧ 時間(秒)	278.4	149.04	116.28	206.28	239.76	33.48	65.16	102.24	34.56	27.72	1253.16 秒

※全体の平均速度は、150÷20.886×60=430.92(km/時) 切り上げ

残8.75km (141.25km進む)	2.48	1.94	3.44	4	0.56	1.09	0.58	0.46	16.24	16分14.52秒
※ここまでの平均速度は141.25÷16.242×60=521.80(km/時) 切り上げ										
残17.5km (132.5km進む)・・・	1.94	3.44	4	0.56	1.09	1.7	0.58	0.46	13.76	15分45.48秒
※ここまでの平均速度は、132.5÷13.758×60=577.85(km/時) 切り上げ										
残27.5km (122.5km進む)・・・	3.44	4	0.56	1.09	1.7	0.58	0.46	11.82	11分49.28秒	
※ここまでの平均速度は、122.5÷11.82×60=621.83(km/時) 切り上げ										
残52.5km (97.5km進む)・・・	4	0.56	1.09	1.7	0.58	0.46	8.382	8分22.92秒		
※ここまでの平均速度は、97.5÷8.382×60=697.93(km/時) 切り上げ										
残90km (60km進む)・・・	0.56	1.09	1.7	0.58	0.46	4.386	4分23.16秒			
※ここまでの平均速度は、60÷4.386×60=820.80(km/時) 切り上げ										
残96.25km (53.75km進む)・・・	1.09	1.7	0.58	0.46	3.828	3分49.68秒				
※ここまでの平均速度は、53.75÷3.828×60=842.48(km/時) 切り上げ										
残110km (40km進む)・・・	1.7	0.58	0.46	2.742	2分44.52秒					
※ここまでの平均速度は、40÷2.742×60=875.28(km/時) 切り上げ										
残133.75km (16.25km進む)・・・	0.58	0.46	1.042	1分2.52秒						
※ここまでの平均速度は、16.25÷1.042×60=935.71(km/時) 切り上げ										
残142.5km (7.5km進む)・・・	0.46	0.462	27.72秒							
※ここまでの平均速度は、7.5÷0.462×60=974.03(km/時) 切り上げ										
残150km (0km進む)・・・	0	0分0秒								

- 各地点まで所要時間と進行距離および海岸までの距離
- 計算式
- ①: ①の2数の平均値、中間の値。
 - ②: 階級値の速さを求めている。[(深さ×9.8)の平方根]×60×60÷1000、つまり、[(深さ×9.8)の平方根]×3.6 理由:(深さ×9.8)の平方根は速さを表し、単位は m/秒である。次に、[(深さ×9.8)の平方根]×60は速さを表し、単位は m/分、さらに、[(深さ×9.8)の平方根]×60×60は速さを表し、単位は m/時。[(深さ×9.8)の平方根]×60×60÷1000は速さを表し、単位は km/時。
 - ③: 地図上の実測値(mm)、地図は、1250000分の1の縮尺。
 - ④: ④より、(実際の距離)=(地図上の実測値)×1250000(mm) で求める。km単位にするには、(地図上の実測値)×1250000÷1000000(km)、つまり、(地図上の実測値)×1.25(km)。
 - ⑤: ③÷④、単位は時間、切り捨て。
 - ⑥: ⑤×60、単位は分。
 - ⑦: ⑥×60、単位は秒。

● 時間と進行距離の関係(琉球海溝地震・津波)

● 【沖縄本島東海岸・西原町に到達する津波】

時間(分・秒)	0	13.68秒	1分8.04秒	1分56.28秒	3分13.32秒	4分0.48秒	6分32.04秒	8分56.4秒	10分23.52秒	11分48.48秒	21分45.76秒
時間(分)	0	0.228	1.134	1.938	3.222	4.008	6.534	8.940	10.392	11.808	21.762
進行距離(km)	0.00	3.75	17.50	28.75	45.00	53.75	77.50	95.00	102.50	107.50	126.25

到達所要時間 21分45秒、 震源までの距離 126.25km

● 【沖縄本島東海岸・南端に到達する津波】

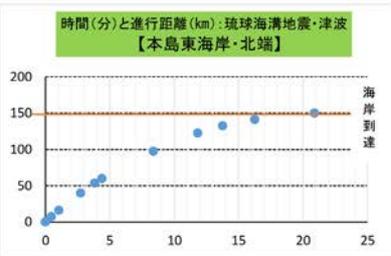
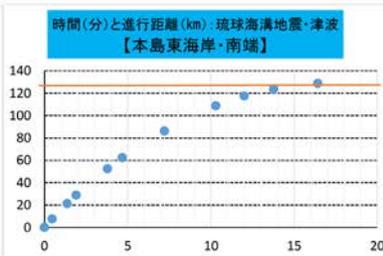
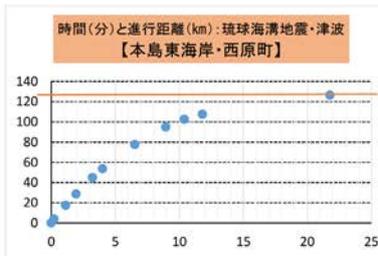
時間(分・秒)	0	27.72秒	1分22.084秒	1分54.12秒	3分47.16秒	4分40.8秒	7分12.36秒	10分18.12秒	12分	13分46.56秒	16分25.68秒
時間(分)	0	0.462	1.368	1.902	3.786	4.680	7.206	10.302	12.000	13.776	16.428
進行距離(km)	0.00	7.50	21.25	28.75	52.50	62.50	86.25	108.75	117.50	123.75	128.75

到達所要時間 16分25秒、 震源までの距離 128.75km

● 【沖縄本島東海岸・北端に到達する津波】

時間(分・秒)	0	27.72秒	1分2.52秒	2分44.52秒	3分49.68秒	4分23.16秒	6分22.92秒	11分49.2秒	13分45.48秒	16分14.52秒	20分53.16秒
時間(分)	0	0.462	1.042	2.742	3.828	4.386	8.382	11.820	13.758	16.242	20.886
進行距離(km)	0.00	7.50	16.25	40.00	53.75	60.00	97.50	122.50	132.50	141.25	150.00

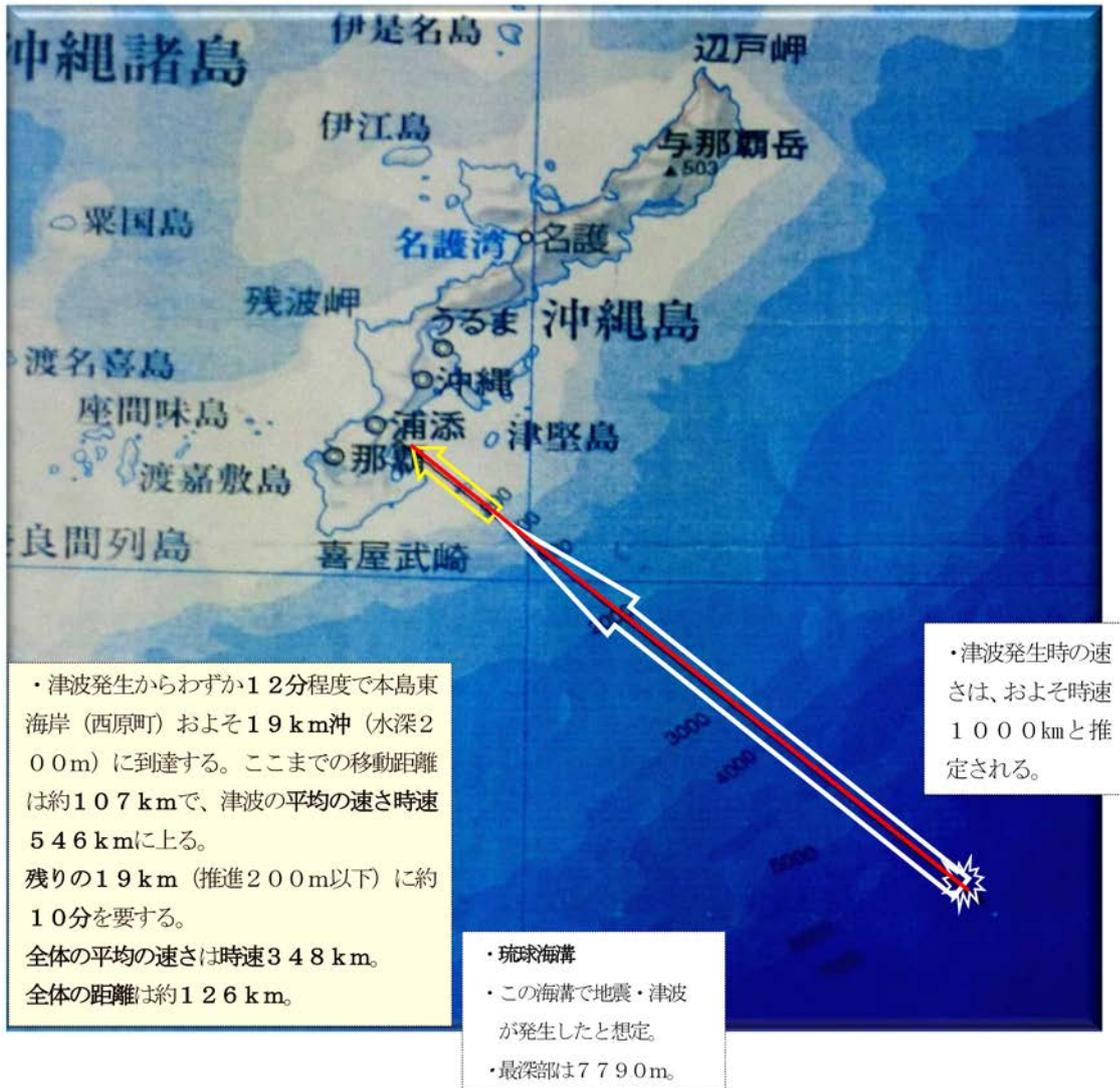
到達所要時間 20分53秒、 震源までの距離 150.00km



※グラフの捉え方
 ・点と点の横の間隔は、階級を通過する時間を表す。
 ・点と点の縦の間隔は、階級の幅(距離)を表す。
 ◎ わずか10分で、進行距離は、100kmを超えている。
 ◎ 2点を結ぶ線分の傾き具合から、津波発生時の速さがとても速く、次第に遅くなる様子がわかる。

○沖縄近海（琉球海溝）での地震・津波が発生したときのおおまかなイメージ

①. 西原町へ到達する津波の場合

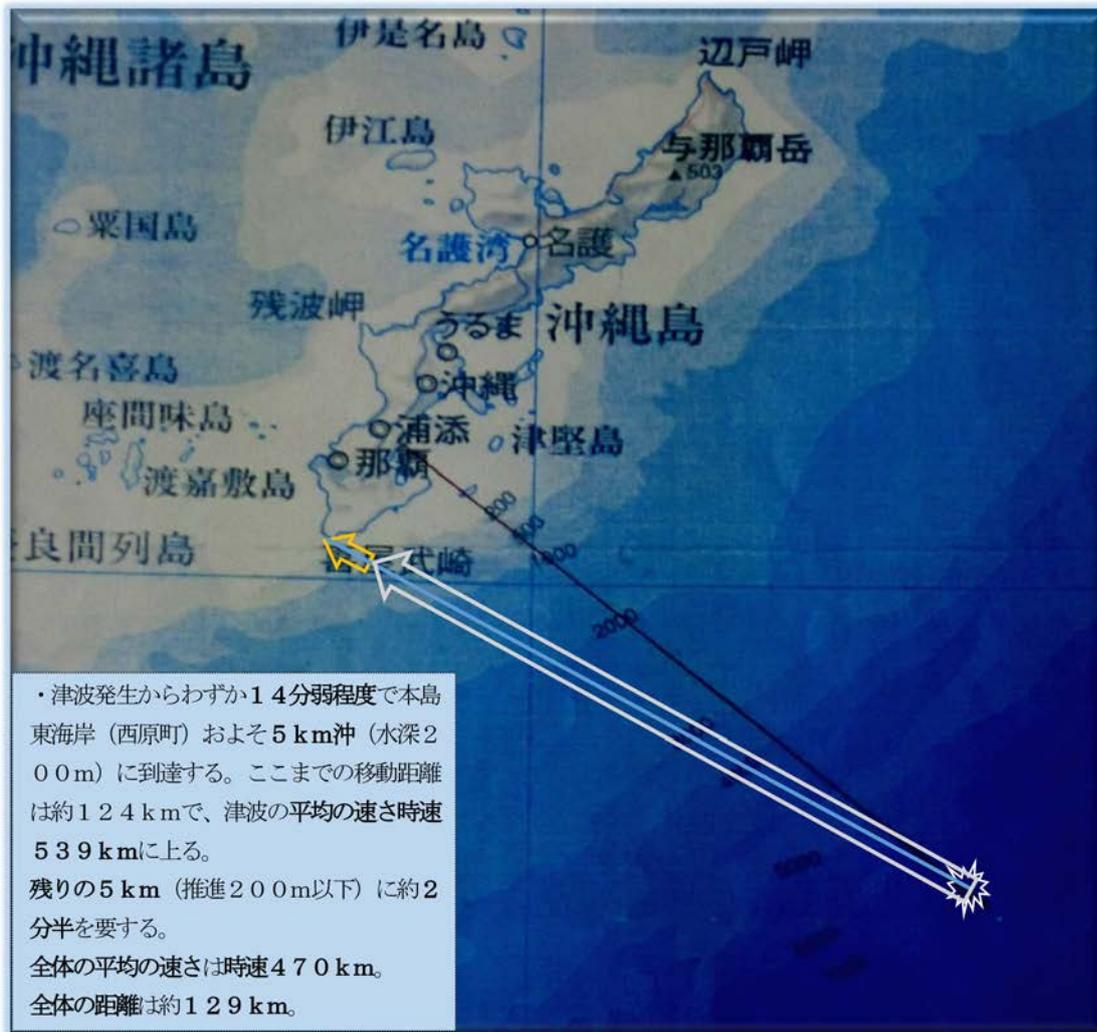


- ・西原町海岸まで約126kmをおよそ22分弱で到達する。
- ・浅瀬（19km）が長いため、平均速度（348km）が比較的遅い。
- ・津波は発生から短時間で本島・西原に到達する。すぐに避難する必要がある。

※ここでの浅瀬は水深200m以下。

○沖縄近海（琉球海溝）での地震・津波が発生したときのおおまかなイメージ

②. 南端へ到達する津波の場合（糸満市）

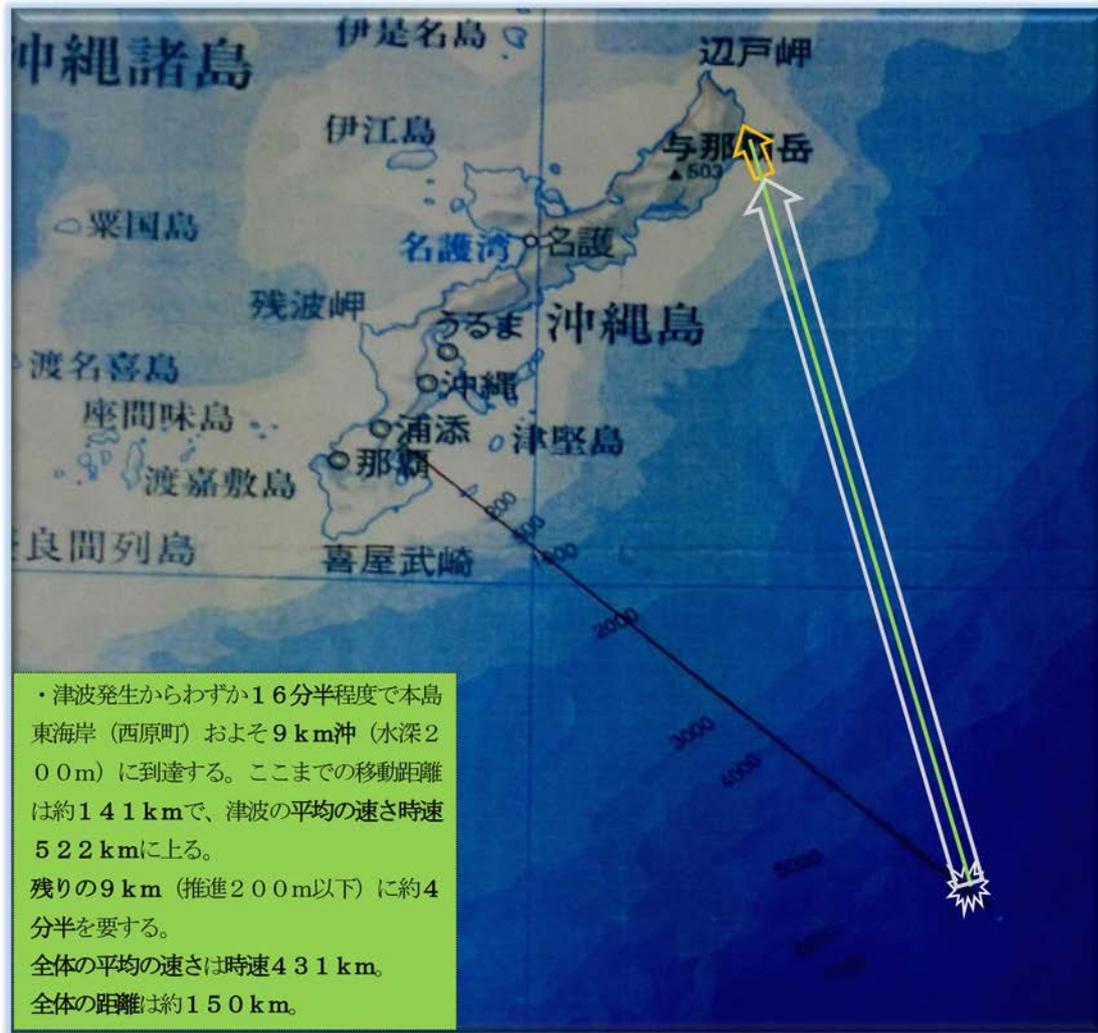


- ・南端の海岸（糸満市）まで約129 kmをおよそ16分半で到達する。
- ・西原町の海岸に対して、その距離は3 km長いにもかかわらず、浅瀬（5 km）が短いため平均速度（470 km）が速い。その結果、約5分も短い時間で到達している。

※ここでの浅瀬は200 m以下

○沖縄近海（琉球海溝）での地震・津波が発生したときのおおまかなイメージ

③. 北端へ到達する津波の場合（国頭村）



- ・北端の海岸（国頭村）まで約150kmをおよそ21分弱で到達する。
- ・西原町の海岸に対して、その距離は25kmも長いにもかかわらず、浅瀬（9km）が短いため平均速度（431km）が速い。その結果、約1分短い時間で到達している。

※ここでの浅瀬は水深200m以下

わが家の避難訓練の様子

・以下の写真は、避難訓練で通過した場所の一部です。



西原町立図書館（海拔8m）



西原ハイツ入口（海拔8m）



西原ハイツ自治会集会所（海拔3.5m）



西原町役場前を流れる兼久川
（海拔1.0m、危険箇所）



安室入口バス停前（海拔2.5m付近）

7. 考察

- (1) ①ケースの本数を増やしても、波が1往復するのにかかる時間はほとんど変わらない。
このことから、地震の衝撃の大小と波の速さとの間には関係がないことがわかる。
- ②水の深さが大きいほど、波が1往復するのにかかる時間は小さい。
このことから、水の深さが大きいところほど、波の速さが速いことがわかる。
- (2) ①沖縄本島沖の琉球海溝で地震が発生し、津波が発生したと想定した場合、津波の速度の計算式をもとに算出した結果から次のことがいえる。
- ◎津波は沖縄本島東海岸に16分～21分程度で沖縄本島に到達する。
この結果は、震源地までの距離がほぼ等しかった東日本大震災の時の津波よりも、到達時間が短い。これは、三陸沖の海に比べて、沖縄本島の太平洋側の海は、水深が200m以下の海域はわずかで、それ以上の水深の深い海域が大部分を占めているからだと考えられる。
 - ◎沖縄本島東海岸のどの3つの地点も津波発生から、わずか10分～13分以内でそれぞれの海岸から20km沖の地点まで津波が到達している。
 - ◎西原町は本島北端及び南端よりも震源地からの距離が近いにもかかわらず、津波の到達時間は最も遅い。
これは、西原町一帯の海が、他の2つの地点に比べ、水深200m以下が比較的遠くまで続いているという中城湾の特有の遠浅の海であるからだと考えられる。このことから、津波の到達所要時間は、震源地からの距離だけで決まるのではなく、海底の構造も大きく関係していることがわかる。
 - ②想定した津波に対する自宅（西原町）からの避難訓練を通してわかったこと
 - ◎当初、避難場所と考えていた場所は時間がかかり過ぎるため避難場所としては不適切であり、2つ目の避難場所はかろうじて間に合う場所であることが確認できた。
 - ◎津波発生後、自宅から避難できる場所はあるものの、津波の到達時間が短いため、すぐに駆け足で逃げなければ間に合わないことが分かった。沖縄の低地帯の大部分は即避難しなければ危険であるといえる。

8. まとめ

- 地震（衝撃）の大きさでは津波の速さが変わらないことがわかった。
- 水深が深いところほど、津波の速さは速くなることがわかった。
- 沖縄本島沖の琉球海溝で地震が発生した場合、津波の速さは想像以上に速いことがわかった。
- 20数分以内で沖縄本島東海岸に到達するため即避難が必要である。
- 津波到達時間は、震源地までの距離だけで決まるのではなく、海底の構造が大きく影響する。
- 自宅から避難できる場所はあるが、すぐに駆け足で逃げなければ間に合わないことがわかった。

※津波発生時にどこにいるかによって安全な場所への避難に要する時間に差が出る。そのため、どの家庭でも避難訓練を実施して避難経路や避難方法を確認しておくことが大切だと思う。

9. 研究の反省と今後の課題

- (1) 研究の反省
- 波の速さを測定する実験では、1往復する瞬間を正確に目でとらえることはかなり難しかった。
 - 私達の研究では、深さは津波の速さの2乗に比例し、波の速さ = $\{(9.8 \times \text{深さ})\}$ の平方根 という関係を導くことはできなかった。実験の精度が低かった。特に、水深が深いほど往復時間の測定が難しい。
- (2) 今後の課題
- 波が1往復する瞬間を正確にとらえるための測定方法を工夫し、実験の精度を上げたい。
 - 次は、同心円状に広がる津波の特性を調べ、沖縄本島西海岸における到達時間を算出したい。
 - 避難訓練を何度も繰り返し実践することが大切であるため、今後も避難訓練を継続したい。
 - 将来、物理や流体力学を学び津波の速さの公式を理解できるようになりたい。

10. 参考文献

- ①学研 中学生の理科 自由研究2・・・発行人（青木健太郎） 編集人（富垣文夫） 学習研究社
- ②Newton巨大地震のしくみ・・・ 編集（土屋健） 発行：ニュートンプレス
- ③インターネット「気仙沼 津波ミュージアム」・・・企画制作：気仙沼市総務部危機管理課
- ④標高マップ【西原町】…沖縄県警察
- ⑤朝日新聞（2011年3月12日、3月14日）

講 評

「津波の速さは、水深が深くなるほど速くなる」という疑問から、津波の速さと水深の関係を検証し、琉球海溝で地震が発生したことを想定し、津波が到達するまでの時間の差を調べたものです。実際に疑問に思ったことを確かめてみることは、研究していく上でとても大切な姿勢です。

まず、波の速さと深さの関係を具体的に実験してみるところはとても良いと思います。また、方法も簡単で、身近にある材料を利用して測定しているところがよいアイデアだと感じました。琉球海溝で地震が起こり津波が発生したという想定も、極めて現実的で、今回の研究の信憑性を高める重要なポイントになっています。津波の到達地点の設定も、自分が住んでいる所を含め、海底地形の異なる地点を選んでいることが、より現実的で、理解しやすい内容になっています。

地震到達までの時間は、シミュレーションとしてはずいぶん細かく行っています。現在津波の動きに関してはCGを使って再現しているものが多く、理解しやすい反面、津波の科学的な特性が見えにくくなっています。本研究のような、津波の特性から導き出した到達までの時間は、とても重要な意味を持っています。この結果から導き出された考察で、「20分以内に即避難する」という提言はかなり現実的なものだと思います。まさにテーマに沿っている良い内容の研究です。

設定にあげた3地点で、20分以内で避難できるかどうか、少々気になりますが、まずは身近な所から、避難環境の整備を考えてみてください。



沖縄本島西屋部川におけるネツタイテナガエビ の分布と成長に関する研究

沖縄県立名護高等学校

1年 北村 育海

1. はじめに

西屋部川は、あまりきれいな川とはいえないが、その川にたくさんの生き物がいる（北村育海、2010）。昨年度の研究で、エビ類の抱卵期を調査した結果、抱卵期が長い種類が多いことが分かった。また、希少なテナガエビであるネツタイテナガエビの生息を確認できた。ネツタイテナガエビは環境省RDBで絶滅危惧Ⅱ類、沖縄県RDBで順絶滅危惧種に分類されている希少種である。西屋部川では河口～中流の登川橋にかけて護岸工事のため河川改修を実施することが決定している。河川改修予定区間でネツタイテナガエビを確認したため、河川改修が実施されれば、この種は生息できなくなる可能性が考えられる。この種を保全するためには、西屋部川での生息環境を詳細に把握することが必要である。そこで、本研究では、西屋部川におけるネツタイテナガエビの流程分布と微細分布を調査した。また、この種が再生産されるためには抱卵メスの出現状況と野外での成長を追うことが必要であるので、昨年度からの継続調査を実施した。

2. 調査対象生物

西屋部川の調査対象生物は以下の通りとしました。

- ・ネツタイテナガエビ

3. 調査場所

西屋部川は長さ5.2kmで、流域面積は8.0km²である。中山から旭川を通り、屋部中学校の北方で東屋部川と合流する河川である。調査場所は下流にあり、左岸はコンクリートで護岸されていて、川底には砂や泥がたまっている。川の両側に雑草が茂っている。大雨が降ると赤土が流れ出し川の水がオレンジ色になる。見た目の水はあまりきれいに見えない。調査に行くたびに、水量や川の形態（瀬と淵）が変化する。河口～上流にむけてSt.1～St.6を設置した（図1、写真1～6）。このうち、河川改修予定区間と重なっている地点は、St.1～4である。

調査場所の様子は次のとおりである。

St.1は、西屋部橋からコンクリートの堰までとした。この場所は河口に近いので、潮が満ちてくると海水が流入する。

St.2は、コンクリートの堰の上流の勝見橋から前田橋上流の「ラバー堰」までとした。川幅は10m程度で、川の中でも一番広い。浅くて流れのはやい瀬と深くて流れのほとんどない淵が見られた。瀬には石がゴロゴロとしている場所が多く見られた。

St.3は、ラバー堰の上流とした。川幅は5mくらいで狭くなっていた。瀬には石がゴロゴロしている場所が少しだけ見られた。

St.4は、「あけみおの里」の上流とした。川幅は4mぐらいでさらに狭くなっていました。瀬がさらに少なくなつて、深い場所が多くなっていた。

St.5は、「旭川農園」の向かいとした。川幅は7mぐらいで少し広がっていた。河床が軟らかくて、歩くと足が埋まった。

St.6は、上流にあるそば屋の「大家」の近くとした。川幅は4mぐらいで石がゴロゴロとした瀬が見られた。川が曲がった所では淵も見られた。リュウキュウハグロトンボやオオシオカラトンボ、ベニトンボ、ショウジョウトンボ、アカナガイトトンボなど、多くのトンボが飛んでいた。



写真1 St.1 西屋部橋



写真2 St.2 勝見橋～前田橋



写真3 St.3 ラバー堰上流



写真4 St.4 あけみおの里傍



写真5 St.5 旭川農園向かい



写真6 St.6 大家傍

4. 調査方法

(1) 調査期間

2012年10月～2013年9月、2014年7月～11月に調査を実施した。

(2) 水質調査

パックテストによる水質調査を行った。調査項目は次のとおり。pH, COD, 全硬度, リン酸態リン, アンモニウムイオン, 亜硝酸イオン, 硝酸イオン。その他に、水温計による水温の測定、測定器による溶存酸素(DO)電気伝導度、濁度の測定を行った。

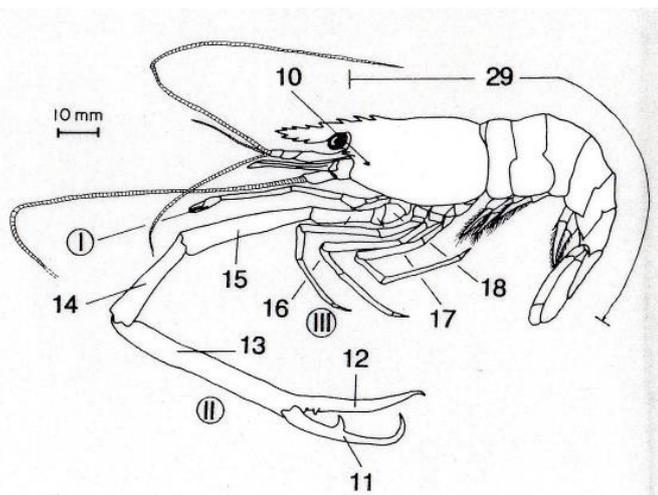
(3) 生物調査

①分布調査

柄の長いタモ網で川岸や川底をすくって採集した。特に川底では網を逆さにして置き、流れに沿って川底を足でけり込む「キック・スウィーピング法」を行った。瀬や淵、川岸など多様な環境で採集した。ネットイテナガエビを採集した場所およびその周辺では流速と水深を測定した。ネットイテナガエビを採集した場所およびその周辺では流速と水深を測定した。

②甲殻類の体サイズの測定

採集したネットイテナガエビを、肉眼で種の同定が可能な個体は、現地で測定後に逃がした。種の同定に実体顕微鏡が必要な場合は、自宅にて実体顕微鏡で観察・同定後に測定を行った。体サイズの測定部位は、体長と頭長(頭胸甲長)とした。体長は、眼の窪みから中央尾肢末端までとし、頭長(頭胸甲長)は眼の窪みから頭胸甲の末端までとした。(図2)



各部の名称. 1 頭胸部, 2 腹部, 3 額角, 4 第1触角鞭状部, 5 第1触角柄部, 6 第2触角鞭状部, 7 第2触角葉片部, 8 毛束, 9 第1-5腹肢, 10 肝上棘, 11 可動指(指節), 12 不動指, 13 掌節, 14 腕節, 15 長節, 16 座節, 17 基節, 18 底節, 19 指節, 20 前節, 21 額角棘, 22 眼後棘, 23 頸溝, 24 尾節, 25 尾肢, 26 尾扇, 27 前側縁, 28 後側縁, 29 体長, 30 甲幅, I-V I 第1-6腹節, ①-⑤ 第1-5胸脚.

図2 甲殻類の各部の名称と測定部位

エビ類は体長(29番)と頭長(頭胸甲長)(A番)を測定した。

図の出版: 鈴木廣志・佐藤正典, 1994. かごしま自然ガイド 淡水産のエビとカニ. 西日本新聞社.

5. 調査結果

(1) 水質調査

パックテストや測定器による水質調査結果を図3に示した。塩分はSt.1で0.2%であり、海水の流入が見られた。全硬度は100mg/Lとなることが多く、硬水であった。アンモニウムイオンはSt.3で、硝酸イオンはSt.5～6でやや高めであった。電気伝導度はSt.1が高いのは海水の流入が見られるためであるが、中流域のSt.5でも高かった。その他は、概ね良好な状態であった。

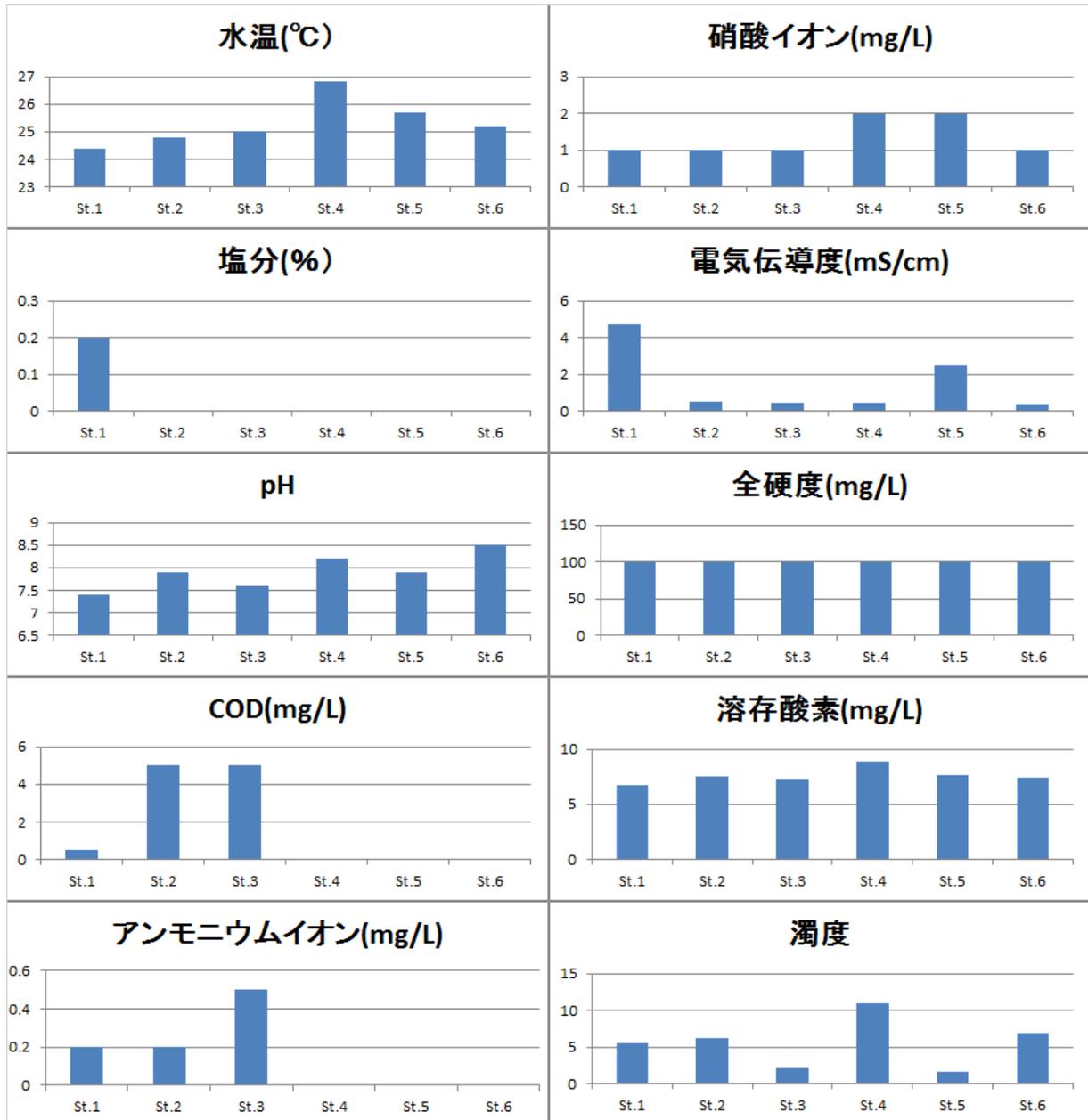


図3 西屋部川における水質調査結果

西屋部川 St.2 における水温の測定結果を図 4 に示した。調査期間中、水温は 19.5 ～ 25.3℃ の範囲であり、冬期においても 19℃ 以上であった。

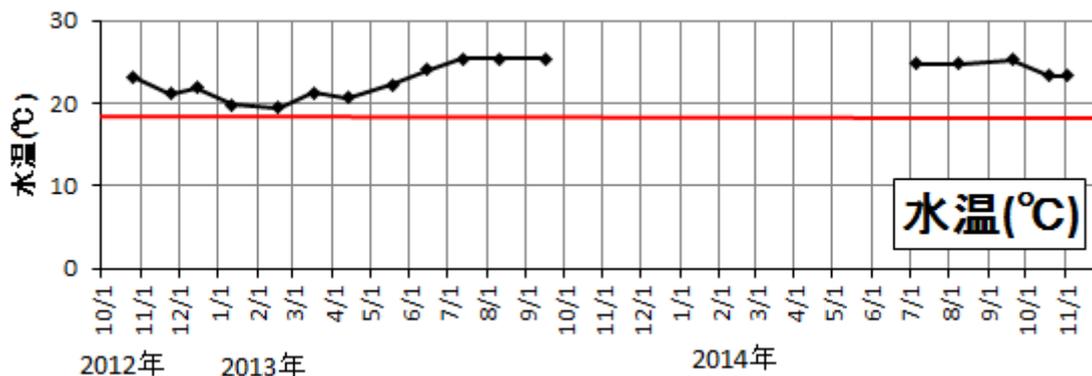


図 4 西屋部川 St.2 における水温測定結果 (調査期間: 2012 年 10 月～ 2013 年 9 月、2014 年 7 ～ 11 月)

(2) 生物調査

① 流程分布

西屋部川におけるネツタイテナガエビの流程分布を図 5 に示した。

St.2 で 15 個体 (うち、抱卵メス 7 個体) と最も多く、次に St.3 で 8 個体 (うち、抱卵メス 5 個体) その次に St.4 で 1 個体 (抱卵メス) であった。ネツタイテナガエビの大部分が St.2 に集中的に分布していた。

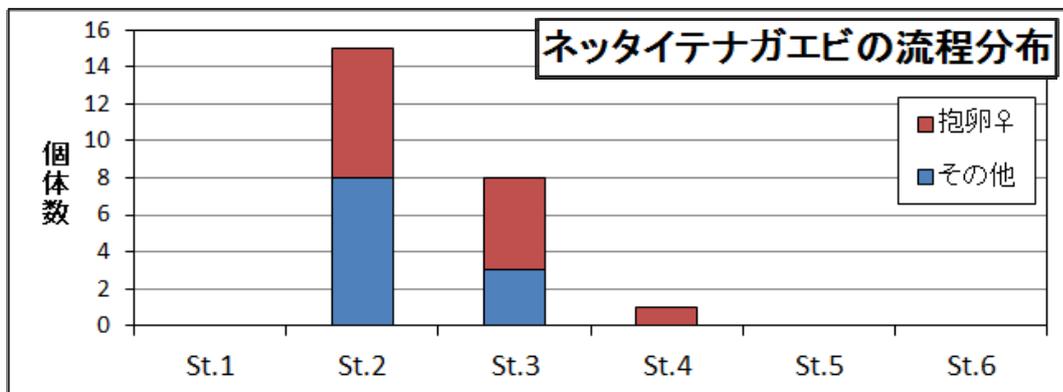


図 5 西屋部川におけるネツタイテナガエビの流程分布 (2014 年 8 月)

② 微細分布

St.2 に集中的に分布することが分かったので、次に St.2 の中で瀬と淵に分けて採集した結果を図 6 に示した (2014 年 7 ～ 11 月)。ネツタイテナガエビは全て瀬に分布していた。採集場所で、流速と水深を測定して結果を図 7 ～ 8 に示した (2014 年 9 ～ 11 月)。ネツタイテナガエビは流速 40 ～ 60cm/ 秒を特に好むことが分かった。

なお、ネツタイテナガエビが採集できた場所では、同時にヒラテナガエビが採集される場合もあった。しかし、ヒラテナガエビはネツタイテナガエビよりも流速の速い場所でも多く採集できていた。

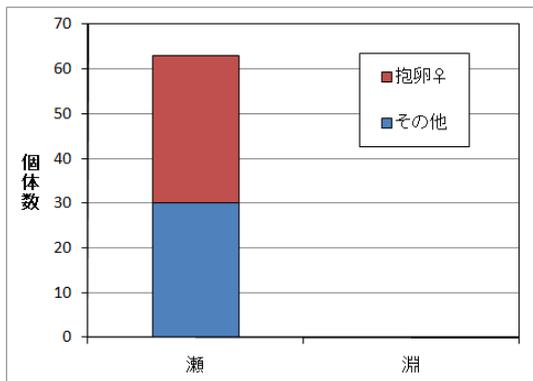


図6 ネットイテナガエビの微細分布（瀬と淵）

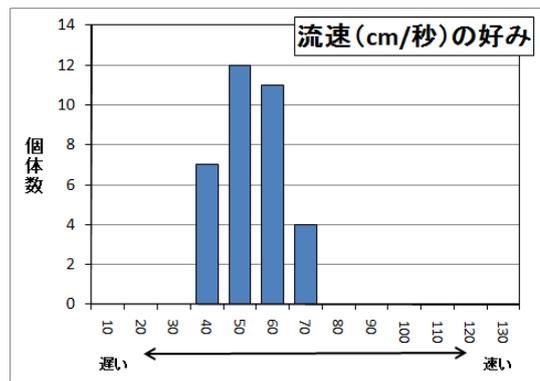


図7 ネットイテナガエビの流速の好み

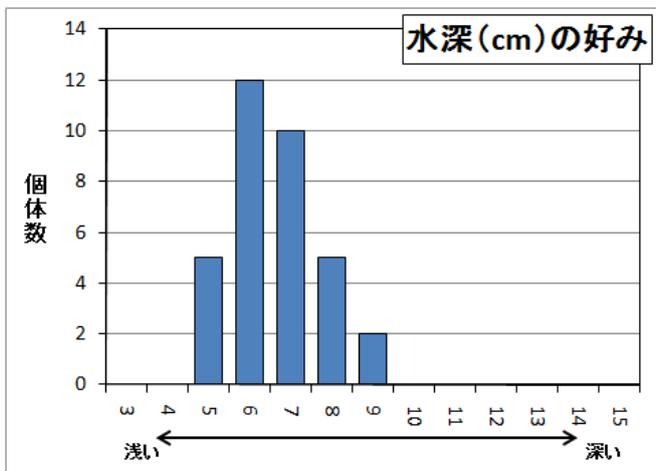


図8 ネットイテナガエビの水深の好み



写真7および写真8 ネットイテナガエビの生息する河床の様子

③甲殻類の月別体長組成

図9にネットイテナガエビの月別体長組成を示した。

ネットイテナガエビでは、常に30～55mmの大型個体が確認でき、体サイズの2つのピークが見られた。個体数の最も多い体長組成は10～5月にかけて10～15mmから30～35mmへと変化した。H25年の6月では40～45mmと50～55mmの個体数が最多となった。7月では10～50mmまで幅広く確認されている。8月では15～20mmの小型の個体数と、35～40mmの個体数が最多となった。抱卵メスは3～11月まで確認できた。H26年の7月～10月にも常に抱卵メスが確認できた。しかし、H26年の7月～11月では30mm未満の小型個体が1個体しか確認できなかった。



写真9 ネットイテナガエビ



写真10 ネットイテナガエビ



写真11 ネットイテナガエビ (♂)



写真12 ネットイテナガエビ (抱卵)



写真13 ネットイテナガエビ (抱卵♀赤色個体)

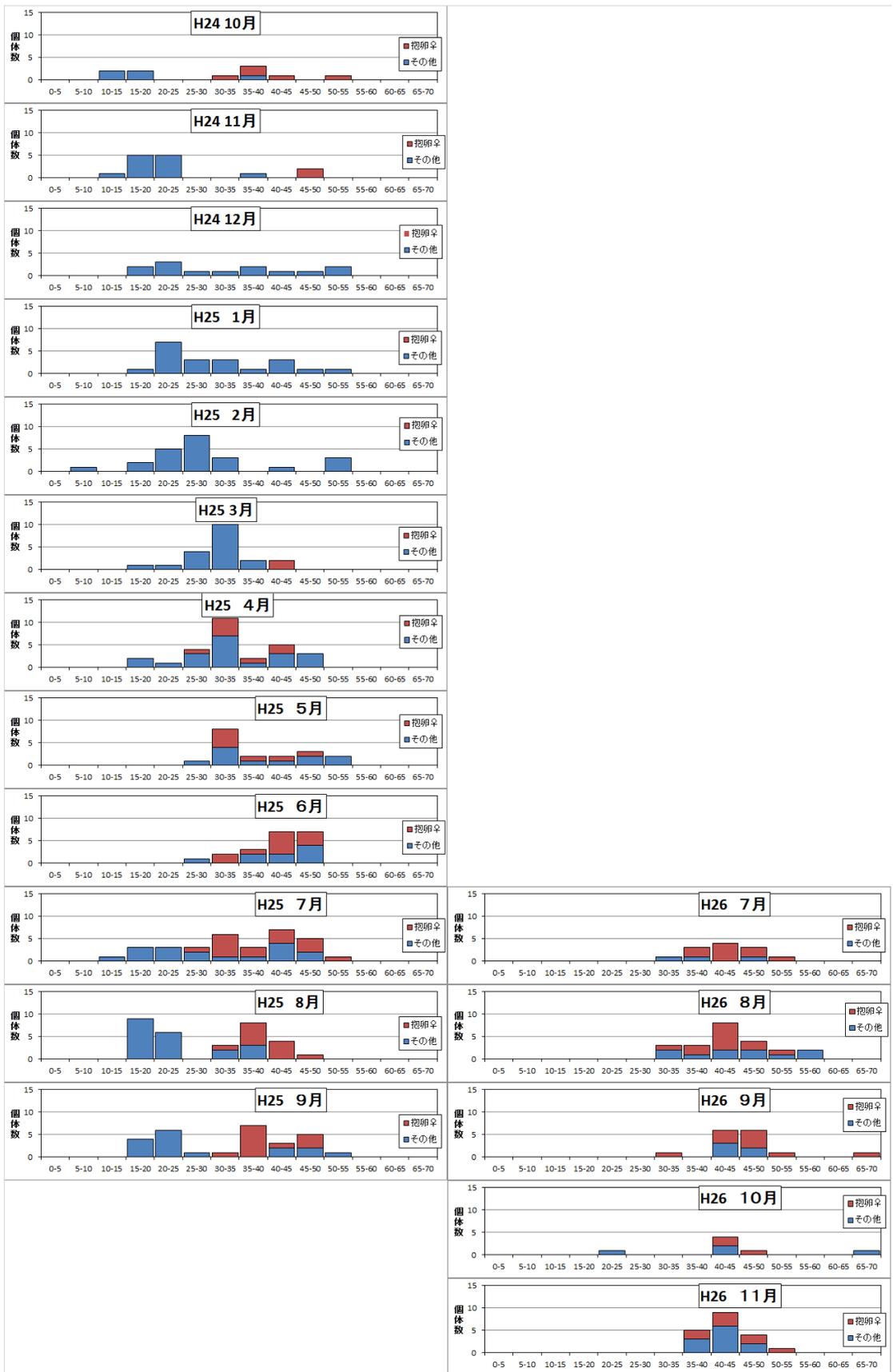


図9 西屋部川におけるネットイテナガエビの月別体長組成 (mm)

西屋部川で確認できたエビ類抱卵メスの体長組成を図10に示した。ネツタイテナガエビの抱卵メスは体長の最大値が65mm、平均値が39.56mm、最小値が27mmであり、西屋部川で確認できたテナガエビ類の中では、最も小さいサイズで抱卵することが分かった。

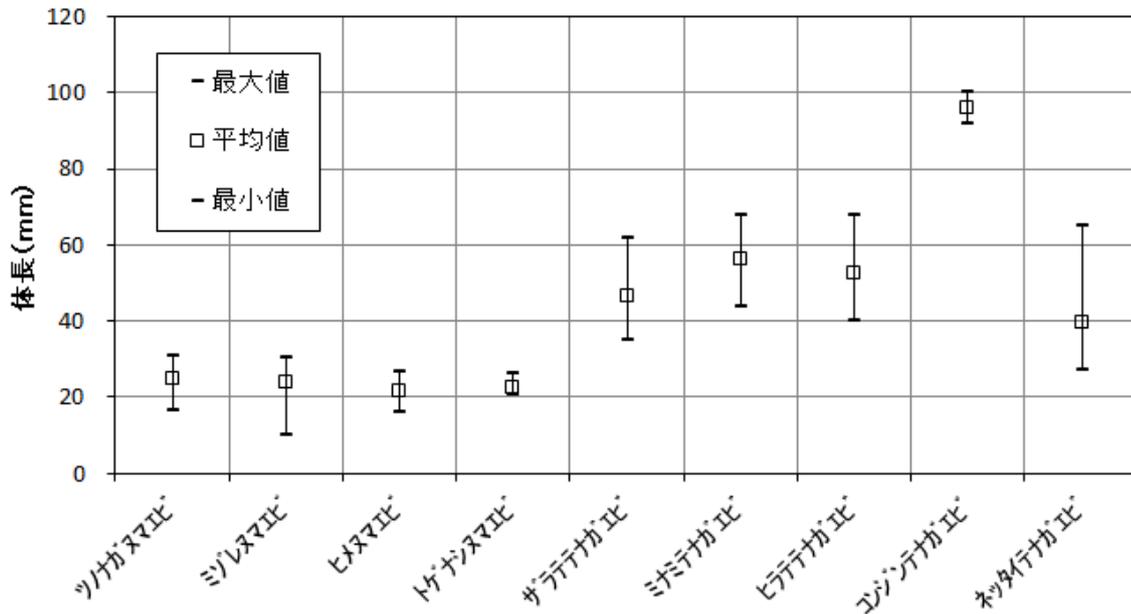


図10 西屋部川におけるエビ類の抱卵メスの体長組成

6. 考察

①水質

西屋部川の下流においては、冬季の1月と2月においても19℃以上であり、比較的高い水温を維持できている。このことは、西屋部川が比較的開かれた場所を流れており、日光が差し込みやすい状態にあることが影響している可能性がある。各水質項目は比較的安定しており、見た目よりもきれいな水の状態であった。現在の調査結果からは、水生生物にとって比較的生息可能な範囲の水質であることが分かった。

②流程分布と微細分布

西屋部川におけるネツタイテナガエビの流程分布は、St.2～4であり、特にSt.2に集中分布している。山崎(2008年)によると、本種は琉球列島において河川の中流域に生息するとされている。西屋部川においては、汽水域を含まない下流に集中的に分布している。また、流速40～60cm/秒の瀬で水深が約6cmの石の組み合わせの河床を、生息環境として好むと考えられる。このような生息環境は、常に維持できる訳ではないと考えられる。今年の10月3日には台風17号が、10月11～12日には台風18号が沖縄本島を通過した。台風通過後の10月19日の調査では、St.2～3の河床の土砂が流されてしまい、平坦になっていた。このため、ネツタイテナガエビの個体数が減少した。台風や集中豪雨などの自然災害においても、河床はかなり影響を受けると考えられる。

また、同所的にヒラテナガエビが生息していることが確認できたが、ヒラテナガエビはネツタイテナガエビよりも流速が速い場所にも生息していたため、一部生息場所が重複すると考えられる。今後は、ネツタイテナガエビとヒラテナガエビとの競合についても考えていきたい。

③抱卵メスの出現時期

昨年のネツタイテナガエビの抱卵メスの出現期は3～11月であった。今年も調査を実施した7～10月では抱卵メスが確認できた。西屋部川で確認された個体では、抱卵メスの出現期が比較的長い種が多かった。このことは、年間の水温の高さと、冬季の水温が20℃付近で高く安定していることが、影響していると考えられる。

甲殻類の抱卵メスが放卵するまでにどのくらいの期間を持つか不明であるが、もし、短期間であるならば、抱卵メスの出現時期が繁殖期であると考えられる。この場合、西屋部川においてネツタイテナガエビの繁殖期をある程度把握できたと考えられる。

④ネツタイテナガエビの成長について

ネツタイテナガエビでは、体サイズに2つのピークを持つ時期が見られる時期が多く、2年程度の寿命があると考えられる。また、抱卵メスの体長が25～70mmと広範囲であるため、複数年にわたって産卵・成長していると考えられる。

⑤護岸工事のための河川改修によるネツタイテナガエビへの影響予測

ネツタイテナガエビが集中分布しているSt.2は河川改修予定区間に含まれており、生息環境の破壊が懸念される。改修された直後はネツタイテナガエビが激減する可能性が考えられる。水深の浅い、流速50～60cm/秒程度の石組みのある河床を再生する必要があると考えられる。

7. 今後の課題

流程分布調査をさらに範囲を広げて実施していきたい。河川改修予定区間の登川橋まで広げて分布調査を行いたい。野外での成長も追いつけて、保全対策の立案ができるようにデータを蓄積していきたい。

8. まとめ

- (1) 西屋部川におけるネツタイテナガエビの流程分布は、St.2～4であり、特にSt.2に集中分布している。したがって、本種は西屋部川においては、汽水域を含まない下流に集中的に分布している。
- (2) 本種は、流速40～60cm/秒の瀬で水深が約6cmの石の組み合わせさせた河床を、生息環境として好むと考えられる。
- (3) 台風などの集中豪雨により、河床が流されると、本種の生息環境は激減する。
- (4) 西屋部川における本種の抱卵メスの出現期は3～11月である。冬期でも19℃以上ある水温が抱卵メスの出現期間を長くしていると考えられる。
- (5) ネツタイテナガエビでは、体サイズに2つのピークを持つ時期が見られる時期が多く、2年程度の寿命があると考えられる。また、抱卵メスの体長が25～70mmと広範囲であるため、複数年にわたって産卵・成長していると考えられる。

9. 参考文献（著者名50音順）

- 岡内完治、2002. 新版 だれでもできるパックテストで環境しらべ. 合同出版.
- 沖縄生物教育研究会、2004. フィールドガイド 沖縄の生きものたち. 新星出版.
- 河合唯史・中田和義、2011. エビ・カニ・ザリガニ 淡水甲殻類の保全と生物学. 生物研究社.
- 幸地良仁、1992. おきなわの川. むぎ社.
- 幸地良仁、1999. 名護市天然記念物調査報告・4 名護市の淡水魚. むぎ社.
- 鈴木廣志・佐藤正典、1994. かがしま自然ガイド 淡水産のエビとカニ. 西日本新聞社.
- 武田正倫、1995. エビ・カニの繁殖戦略. 平凡社.
- 豊田幸詞・関慎太郎、2014. ネイチャーウォッチングガイドブック 日本の淡水性エビ・カニ 日本産淡水性・汽水性甲殻類102種. 誠文堂新光社.
- 西島信昇、2003. 琉球列島の陸水生物. 東海大学出版会.
- 山崎浩二、2008. 淡水産エビ・カニ ハンドブック. 文一総合出版.

講 評

希少種を題材に自然環境の保全という大きな目標を持って取り組んだ素晴らしい研究です。

これまで継続して研究してきた河川の甲殻類の中で、昨年度初めて発表した希少種に的をしぼり、その生活史を明らかにしようとしている点に大きな躍進が見られます。そしてさらに、得られた結果を根拠に河川改修の在り方について提言しようと、高校生らしく果敢に挑んでいるところに感銘を受けました。河川を含め、自然環境を守ろうとするとき、ともすれば景観や水質ばかりに気をとられ、小さな生き物たちには、たとえ希少種でもその存在にすら気づかないことがあります。この研究では、そこに敢えてスポットを当て、自然環境の保全に生かそうとしている点が高く評価できます。

少し気づいた点としては、各調査地点で水質を調査しながら、ネッタイテナガエビの出現状況との関連について考察されていないことが気になりました。何か理由があるのかもしれませんが、せっかく水質をしらべたのですから生息状況との関連について考えたことを書いてみてはいかがでしょうか。また、他種との相互作用や、他の河川との比較も、今後何らかの形で加えていくとさらに発展すると思います。

今後は、ネッタイテナガエビの種の保存だけでなく、河川全体の生物多様性を維持できるような保全策について提言してくれることを期待します。



植物の塩耐性

沖縄県立球陽高等学校

2年 渥美 静流 2年 川上 日菜子 2年 名嘉真 沙彩

1. はじめに

沖縄県には毎年多くの台風が接近・通過し、そのたびに大きな被害が出ている。特に海水の飛沫が吹き込み、植物を枯らしてしまうことがあり、これを「塩風害」と言う。塩風害が葉に及ぼす影響についてはよく知られているが、それが土壌を介して植物に与える影響については検証されていない。海水の突発的な浸水による土壌の塩性化は、多量の塩化ナトリウムによって引き起こされる。海水は多量の塩分を含むために、農地に多量の塩化ナトリウムだけではなく、マグネシウムや硫酸イオンなどももたらすことがある。このようにして農地では塩化ナトリウムを主体とした塩分濃度が高まり、土壌中の水溶液の浸透圧が高くなるために作物は水を吸収しにくくなり、成長阻害が起こる。この現象が、農作物の生育を妨げ、大きな損害を及ぼしている。

今年の台風8号による沖縄県内の農林水産業への被害額は、合わせておよそ22億9900万円に上り、このうち農作物の被害額はおよそ11億円で、被害内容として、塩害がそのひとつとしてあげられた。私達は、今年の台風8号の後、畑によって植物の枯れ方に違いがあることに気づいた。これは、土壌が塩を吸着したことによって植物が枯れているのではないかと考えた。つまり、土壌ごとに植物が受ける塩害の大きさには違いがあるのだと思った。そこで、沖縄の代表的な土壌を用いて、植物の塩耐性の比較をすることにした。沖縄の代表的な土壌は国頭マーヅ、島尻マーヅ、ジャーガルである。国頭マーヅは沖縄本島北部と八重山群島に主に分布し、島尻マーヅとジャーガルは沖縄本島中部と離島を含む南部および宮古群島に主に分布している。ジャーガルは、粘着性や付着性が著しく強い、重粘土壌である。重粘土壌とは、土壌の粒径組成がはなはだしく粘土分に傾いている土壌で、水分を含むと強い粘性を示す。また、本県で最も肥沃な土壌である。島尻マーヅは、粘土含量が非常に高く強粘質であるが、構造が強度に発達しているため透水性は良好である。国頭マーヅは粘質～強粘質である。肥沃度は最も低い土壌である。

私達は、土壌に塩が多く付着しているほど、植物の成長阻害が大きくなるのではないかと考え、塩を吸着しやすい土壌が塩害を受けやすいと考えた。

2. 材料および方法

《実験1》塩耐性の実験に用いる植物の検討

予備実験として、夏野菜のオクラおよびキュウリのどちらがより強い塩耐性を示すかを調べるために、水および海水、海水の1/2倍、1/4倍濃度の塩水を、各種10個ずつの種子に20ml与え発芽率を比較した。この時、発芽しなかった種子については、塩分の影響で発芽しなかったかどうかを調べるために、種子から塩を洗い流し、水を与えて発芽するかどうかを確認した。このとき、塩水は、「パーフェクトマリンピュア」で作製した人工海水を用いた。

《実験2》塩耐性におよぼす土壌の影響実験

キュウリの仲間である沖縄の夏野菜モーウイの苗を用いて、塩耐性におよぼす土壌の影響を調べる実験を行った。その時に使用する土壌は、沖縄の代表的な土壌であるジャーガル、島尻マーヅ、国頭マーヅを用いた。

- ① モーウイの苗をジャーガルおよび島尻マーヅ、国頭マーヅに植え替えて、順化期間として2週間、半水耕栽培した。【図1】
- ② 塩処理前の試料として、各土壌から苗を5本ずつサンプリングした。残りの苗は、海水の1/4倍および1/8倍濃度の塩水で24時間、半水耕栽培で塩処理をした。この時、対象区として塩処理をしない苗も用意した。【図2】
- ③ すべての苗を水だけで半水耕栽培をし、1週間後すべての苗のサンプリングと乾燥重量の測定を行った。



【図1】栽培初日のモーウイ



【図2】塩処理一週間後のモーウイ

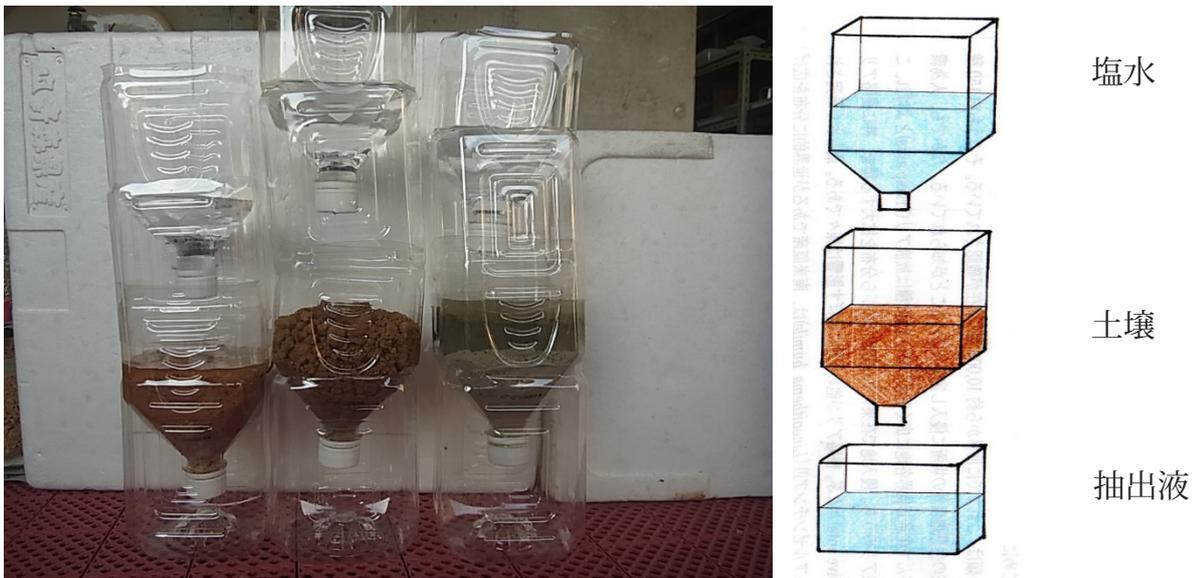
《実験3》土壌の塩の吸着実験

実験2で用いた土壌が塩を吸着しているか調べる実験を行った。

土壌500gに海水の1/4倍濃度の塩水500mlを点滴し、土壌を通過した抽出液の塩濃度を、自動温度補正手持屈折計(ATAGO製)【図3】を用いて測定した。【図4】



【図3】自動温度補正手持屈折計



【図4】土壌別塩の吸着実験 (左から、国頭マージ、島尻マージ、ジャーガル)

3. 結果

《結果1》

①オクラとキュウリの発芽率

オクラとキュウリの種子に海水の1/2倍濃度の溶液を与えて育てたとき、オクラは発芽しなかったが、キュウリは発芽した。よって、オクラとキュウリでは、キュウリの方に耐塩性があることがわかった。【表1】【図5】【図6】【図7】【図8】

【表1】オクラとキュウリの塩濃度別の発芽した本数

	1倍	1/2倍	1/4倍	0倍
オクラ	0/10	0/10	9/10	9/10
キュウリ	0/10	9/10	10/10	10/10



【図5】塩処理前のオクラの種子 (1/2倍)



【図6】塩処理後のオクラの種子 (1/2倍)



【図7】 塩処理前のキュウリの種子 (1 / 2 倍)



【図8】 塩処理後のキュウリの種子 (1 / 2 倍)

②塩処理下で発芽しなかった種子を水で育てたときの発芽率

塩処理下で発芽しなかったオクラの1/2倍とキュウリの1倍が発芽した。従って塩処理下で発芽しなかった種子は塩の影響で発芽しなかったことが分かった。ただし、オクラの1倍の種子は腐っていたため発芽しなかった【表2】

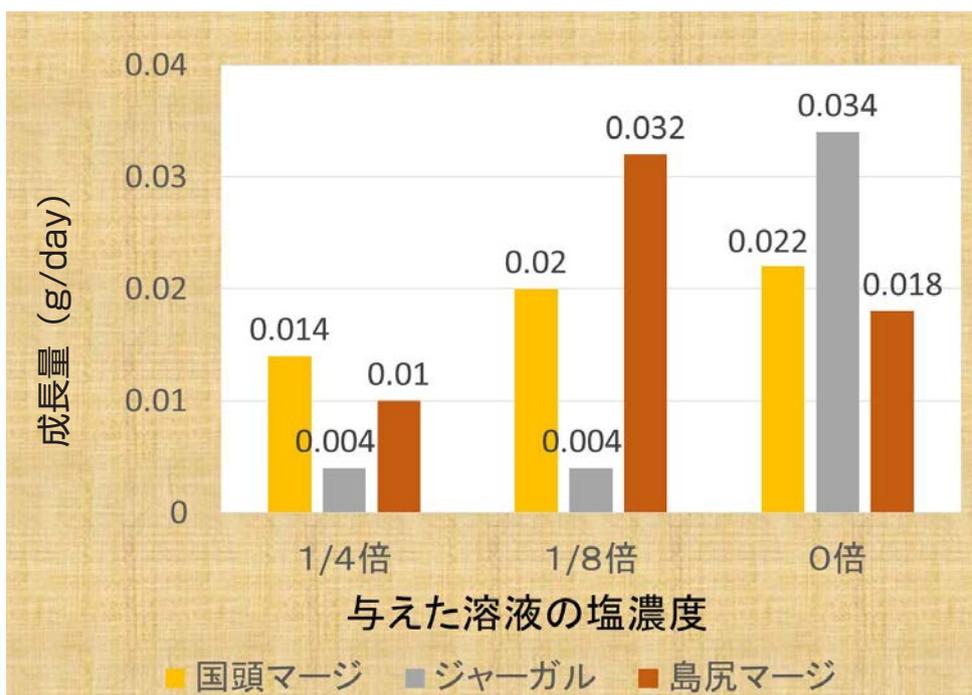
【表2】 塩処理下で発芽しなかった種子を水で育てたときの発芽した本数

	1倍	1/2倍	1/4倍	0倍
オクラ	0/10	6/10	—	—
キュウリ	9/10	—	—	—

《結果2》 1日の1個体あたりの成長量

図9より、用いた塩水の濃度の高い順に成長阻害が大きくなっている。島尻マージの1/8倍と0倍の苗の成長量が逆転してしまっただが、塩処理を行ったときの成長阻害の大きさについては、他の苗と同じように塩濃度の高いほうの苗の成長量が低くなるという傾向が見られた。

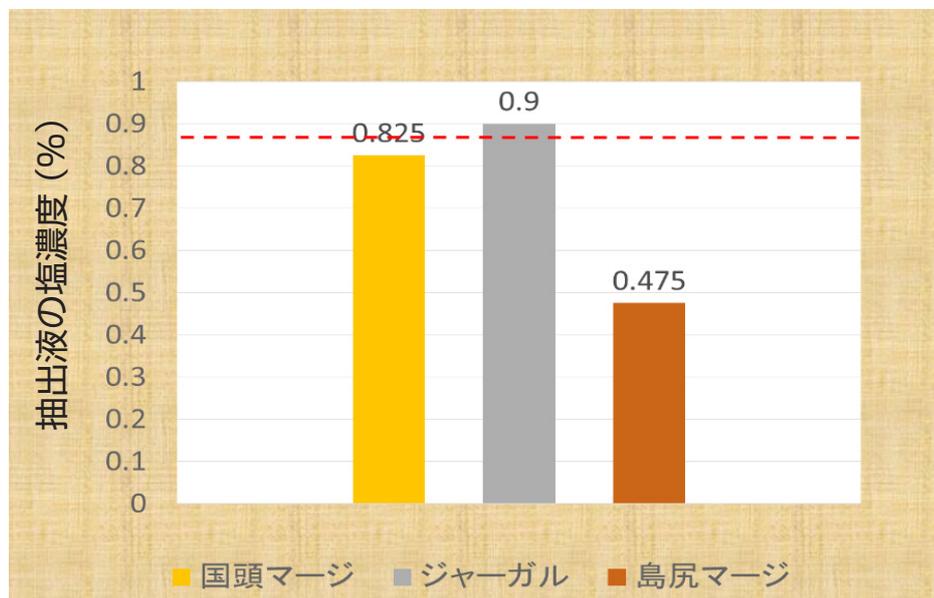
また、土壌によって塩処理をしたときの成長阻害の度合いに差があった。塩処理を行ったとき、一番成長量が減少した土壌はジャーガルであった。



【図9】 1日の1個体あたりの成長量

《結果3》抽出された溶液の塩濃度の平均

ジャーガル・島尻マージ・国頭マージに海水の1/4倍濃度(0.875%)の溶液を点滴し、土壌を通過した抽出液の塩濃度を測定したところ、図10より、国頭マージからの抽出液の塩濃度は、点滴した溶液の塩濃度と大きな差がなかった。ジャーガルでは点滴した溶液より高い塩濃度の抽出液が得られた。島尻マージでは点滴した溶液より低い塩濃度の抽出液が得られた。



【図10】抽出された溶液の塩濃度の平均

4. 考察

国頭マージは、実験3の土壌の塩の吸着実験より、抽出した溶液の塩濃度が点滴した溶液の濃度より低くなった。このことから多少の塩が土壌に吸着したと考えられ、その結果、実験2の塩耐性におよぼす土壌の影響実験で塩処理をしたとき多少の成長阻害が起こったと思われる。

島尻マージは、実験3の土壌の塩の吸着実験より、抽出した溶液の塩濃度が点滴した溶液の塩濃度より低くなった。このことから多くの塩が土壌に吸着し、その結果、実験2の塩耐性におよぼす土壌の影響実験で多くの塩を与えた1/4倍のときの成長阻害は1/8倍のときより大きくなったと考えられる。

ジャーガルは、実験3の土壌の塩の吸着実験より、抽出した溶液の塩濃度が点滴した溶液の濃度より少し高くなった。ほぼ同濃度の溶液が抽出したにも関わらず、成長の阻害が大きかったので溶脱が考えられる。ジャーガルには土壌中に様々なイオンが含まれており、塩水を点滴したときに塩水中のイオンとの溶脱が起こり、抽出液の塩濃度が高くなったと考えられる。

また、一般的に粘土質の土壌では、ナトリウムイオンが多く吸着した粘土は水に分散しやすくなり、土壌の団粒構造が壊れやすくなる。分散した塩の粒子は土壌の間隙に詰まり、透過性を悪化させ、作物の根の酸素不足や、除塩の効率を低下させるなどの問題を引き起こす。ジャーガルは粘土質の土壌なので、この現象が起こっていると考えられる。

今回の実験では、土壌に塩が付着していると植物の成長を阻害することが分かった。また、土壌によって塩害の被害の大きさは変化するということが分かった。土壌の塩吸着力と塩害の大きさは比例しなかった。

5. 今後の課題

ジャーガルで実際に溶脱が起こったのかを確かめるためには、ジャーガルの土壌中に含まれているイオンと塩水に含まれているイオンを調べ、溶脱が起こり得る可能性のあるものが存在するか探さないと考えている。

また、各土壌の性質や含まれている物質などについてさらに詳しく調べたい。

植物の成長阻害の実験の反復実験を行いより正確な結果を得る必要がある。

6. 参考文献

- ・一般社団法人 日本土壌肥料学会 2011年 津波関連情報(1):津波・高潮による塩害(1)
<http://jssspn.jp/info/nuclear/post-23.html>
- ・琉球朝日放送 報道部 ニュースQプラス 2014年7月11日
<http://www.qab.co.jp/news/2014071155640.html>
- ・渡嘉敷義浩 1993年 CiNii 論文 V-3 島尻マージ、ジャーガルの特性(V 沖縄の土壌特性)日本土壌肥料学会要旨集
- ・久場峯子 1993年 CiNii 論文 V-4 沖縄の農地の実体と土壌管理:土壌の化学性とサトウキビ畑における施肥管理(沖縄の土壌特性)日本土壌肥料学会要旨集

講 評

本研究のきっかけとして、台風による塩風害があり、さらに海水と植物の関係ではなく、その仲立ちとしての土壌に着目して実験をおこなったことは良い事だと思います。科学的研究に必須の過程として、現状把握に立脚した検証可能な仮説の創出とその検証があります。実施したサンプル数は多くはありませんが、検証可能な仮説を立て、シンプルな実験によってその検証を試みており、論理的で検証結果の分かりやすい内容となっています。

さらに素晴らしいことは、マイナスデータの検証をおこなっていることです。2種類の野菜の発芽率における塩分の影響を検証した実験では、その発芽率だけでなく、発芽しなかった原因をしっかりと検証し、考察における余計な要因の排除をしっかりと行っています。加えて、データへの影響因を取り除くため、栽培条件への順化や実験開始から一定時間経過した後、データの収集を開始しています。こういった作業は見過ごされがちですが、純度の高い正確なデータを獲得し、適切な考察を行うためにはとても重要な視点です。

土壌の種類と塩分吸着の関係調べた実験では、簡単な実験器具を作成し、その結果を比較して得られた知見に対し、文献学的知見を踏まえた独自の考察を行っています。また作成パネルも必要な情報を、理解し易い容量とシンプルで正確な表現で整理しており、第三者の視点で良く作成されています。研究内容は他者に正確に伝わらなければ、その価値を落としてしまうことになりかねません。ただ研究内容としては、さらに深める必要があります。例えば、土壌生物の溶出成分の分析とそれらの成長阻害に関する因果関係の解明といった具合です。発芽・生育実験では栽培種だけでなく、海岸に生育する野生種でも同様の実験を行いながら、栽培種との比較をおこなったり、同じ科(ファミリー)内の種を比較すると(オクラならアオイ科、キュウリならウリ科)、塩耐性の仕組み解明にさらに一歩近づけるかも知れません。



セルロース系バイオマス燃料の研究（その3） ～シュレッター裁断紙の酵素糖化法による E15 ガソリンの製造実験～

沖縄県立沖縄工業高等学校

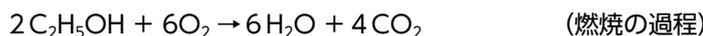
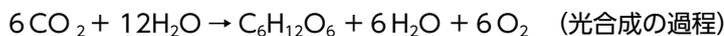
2年 新垣 賢悟 2年 我那覇 武 3年 宮里 実咲 3年 大城 光祐
1年 新里 涼 1年 中村 海斗 1年 廣瀬 真大 1年 宮城 朝俊

第1章 序論

1-1 はじめに

近年の科学技術の発展は、私たちの生活を豊かで快適なものにしているが、その反面、環境破壊やエネルギー資源の枯渇が問題となっている。これからは、大量生産、大量消費、大量廃棄というこれまでの経済活動や生活スタイルを変え、天然資源の消費の抑制や環境への負荷をできる限り低減し、持続可能な循環型社会を構築していく必要がある。

現在、石油代替燃料の研究が進められ、中でもバイオエタノールは、植物の成長過程における光合成による二酸化炭素の吸収と、生成した糖の発酵、燃焼による排出の複合であり、化学反応式は以下のようになる。



発酵、燃焼の過程で6モルの二酸化炭素が排出されるが、光合成により同量の二酸化炭素が吸収・相殺され、実際には大気中の二酸化炭素の増減に影響を与えないと考えられる。

このように、化石燃料に代わるバイオマスエネルギーの利用はカーボンニュートラルだと考えられ、二酸化炭素の発生と固定を平衡にし、地球上の二酸化炭素を一定量に保つことができるとされている。

しかし、バイオエタノールの原料は、サトウキビやトウモロコシを主原料としており食料と競合するため、穀物価格の上昇、新たな農地の開発など様々な問題が顕在化しており、食料と競合しないセルロース系バイオマス燃料の開発・導入を推進することが重要である。

全国のセルロース系バイオマスの賦存量は、林地、残木、紙を合わせて原油換算量で約1430万kLであり、主なバイオマス賦存量の約37%を占めている。そのうち紙の廃棄量は約1080万kLのうち約20%にあたる215万kLが未利用となっている（付録1参照）。

1-2 セルロースについて

セルロースとは、分子式 $(C_6H_{10}O_5)_n$ で表され、植物細胞の細胞壁および繊維の主成分からできており、植物体の重量の 30% ~ 50% を占め、自然界に最も多量に存在する有機化合物である。また、図 1-1 に示すようにセルロースは β -グルコースと 2 個のグルコース単位が結合したセロビオースが縮合重合してできた多糖類の高分子化合物である。

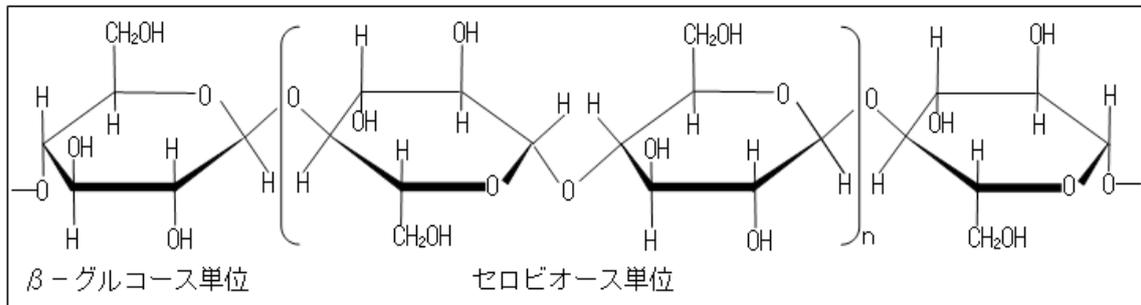


図 1-1 セルロースの構造式 (参考文献 1 に基づいて作成)

紙の原料である木材に含まれる成分は樹種によって構成が異なる。図 1-2 は木材の構成を示しており、その主要成分であるセルロースからは糖化により、基本的にグルコースが生成するが、多種の糖が混ざっているヘミセルロースからは樹種によって得られる糖の種類が異なる。

広葉樹では C 5 の糖であるキシロースが多く含まれ、C 6 の糖、グルコースやマンノース等から構成されており、針葉樹では、C 6 の糖であるグルコースやマンノース等が多く C 5 の糖であるガラクトースやアラビノースも含有している²⁾。

次いで樹種によらず多く含まれるリグニンは、ベンゼン環を持ったフェノール類で構成されているため、糖類を含まず発酵等によって、バイオエタノールを製造することはできず、有効利用が課題となっている。また、リグニンは層状に重なったセルロースを密着させる性質があり、木の組織は強固になっているため、容易に糖に加水分解されにくくなっている。

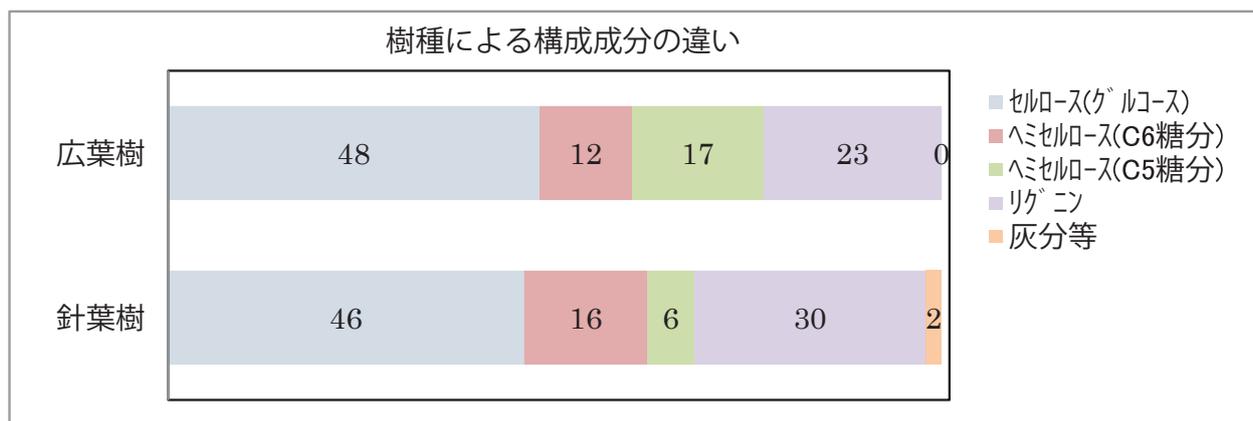


図 1-2 樹種による構成成分の違い

1-3 本研究で用いる試料

本研究ではセルロース系バイオマスとして、廃コピー用紙（シュレッター裁断紙）（以下基質と呼ぶ）を用いることにした。

基質は、近年、個人情報保護の観点から焼却処分が主流となっているが、化学パルプと呼ばれる木材チップはアルカリなどの薬品によって処理され、糖化の際、反応の阻害となるリグニンは除去されている。

セルロースからバイオエタノールを生成するためには、その主成分を糖化することが必要である。糖化方法には、大別して「酸糖化法」と「酵素糖化法」がある。「酸糖化法」に関する研究開発は歴史が古く、木材を工業原料等に転換することを目的に行われてきた。一方「酵素糖化法」は、約 50℃の緩和な条件下で行われ、分解が進行しすぎて最終的には炭化する過分解（フルフラール）の生成も理論的には起きず、高効率で低環境負荷な方法である³⁾。

そこで本研究では、基質中のセルロース系バイオマスに着目し、その主成分であるセルロース、ヘミセルロースの硫酸、酵素による糖化、及び糖化液の酵母発酵によるバイオエタノール生成について実験的に検討することにした。

第2章 酵素による糖化実験

2-1 実験概要

酵素によるセルロースの糖化実験では、前年度の研究結果から崩壊力の強かった2種類の粉末状の酵素 CELLUASE[®] ONOZUKA[®]RS（以下酵素 A と呼ぶ）（図 2-1）、メイセララーゼ（以下酵素 D と呼ぶ）を用い、酵素による糖化実験を行った。実験条件は基質 10g に蒸留水を 100mL 入れ、さらに2種類の酵素を半分ずつ混合し、それぞれ 0.2、0.4、0.6g ずつ加え7日間実験を行った。

また、1日おきに pH を測定し乳酸を加え pH 調整を行った。

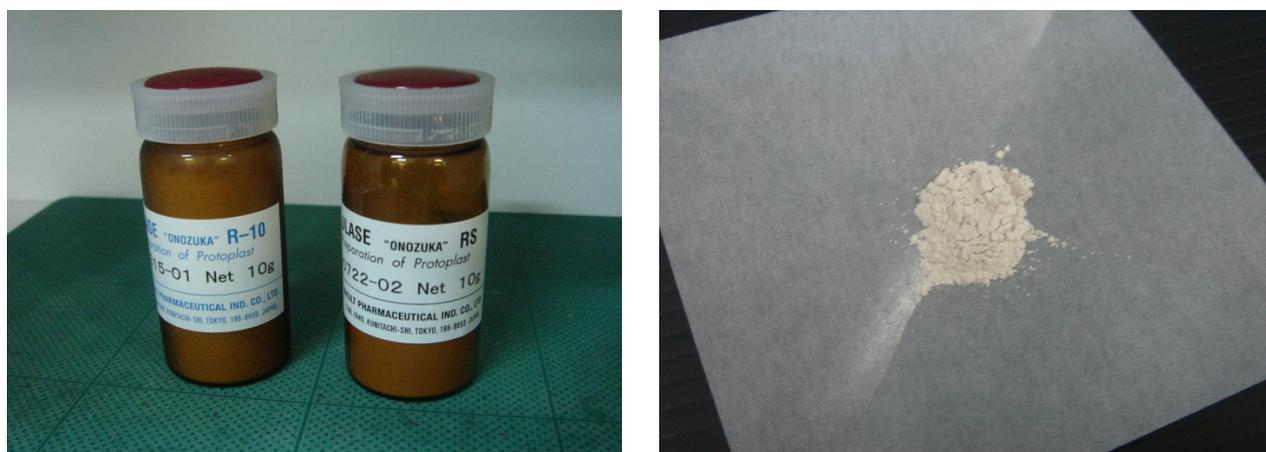


図 2-1 本研究で用いた粉末状の酵素

2-2 実験方法

実験操作は以下の手順で行い、使用した薬品・器具類は表 2-1 に示す。

- (1) 試料の前処理は、硫酸時の操作（1）と同様に行った。
- (2) 基質 10g を9個の三角フラスコ（300mL）に入れ、全ての試料に蒸留水 100mL を加えた。さらに、3個の三角フラスコに酵素 A と酵素 D をそれぞれ半分ずつ混合し 0.2、0.4、0.6g ずつ加えた。
- (3) 三角フラスコを6連式マグネチックスターラー（ホットプレート付き）上で、40～55℃に加温し、約 250rpm で攪拌しながら実験を行った。また、混合した酵素の至適 pH を確認しながら、1日おきに乳酸 1 mL を加え、pH 調整を行った。
- (4) 1日おきに試料約 1 mL を測り採り、ポケット糖度計を用いて糖度を測定した。

表 2-1 使用した薬品・器具類

器具	ワンダーブレンダー WB-1 (大阪ケミカル)、ポケット糖度計 PAL-J (アタゴ)、マグネチックスターラー RSH-60R (AS ONE)、三角フラスコ (300mL)、駒込ピペット (5mL)
薬品	酵素 (A, D)、乳酸

2-3 実験結果及び考察

基質 10g に酵素 A、D を半分ずつ混合した酵素をそれぞれ 0.2、0.4、0.6g 加え 7 日間実験を行った結果を図 2-2、図 2-3 及び図 2-4 に示し、表 2-2、表 2-3 及び表 2-4 に糖濃度を示す。

本実験条件では、混合した酵素では 13.4 ~ 20.0% のセルロースを糖に分解することができた。混合した酵素において、酵素の量が多いほど、高濃度の糖に分解していることが分かった。

酵素 A 及び酵素 D は前年度の研究からセルロースを糖に分解する崩壊力が強く、本実験条件において、基質の糖化に適していることが分かった。これは、酵素の種類によるものと考えられる。

酵素は、大別するとエンド型とエキソ型に分類することができ、エンド型はセルロースをランダムに分解していき、この種のセルラーゼは、セルロース分子に取り付いて分解し離れて、また別のセルロースを分解するという反応を繰り返す。その際、セルロース分子の配列が乱れている非結晶部分を良く分解するとされている。一方、エキソ型はセルロース分子の端からグルコース 2 個単位で、セルロース分子から離れることなく順々に分解していく性質がある。

そのため、エキソ型の酵素は結晶部分を認識して分解していく性質がある。本実験条件では、この 2 つの性質を持つ酵素が混合されたため、結果、糖濃度が単独で用いる場合より、約 1.6 倍高まったと考えられる。

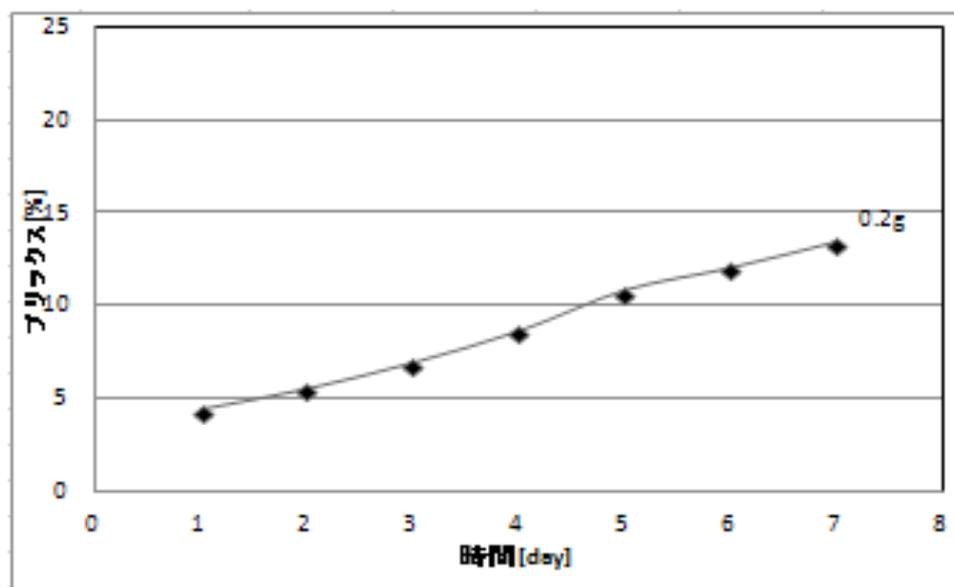


図 2-2 酵素 A・D を混合し 0.2g 加えた実験結果

表 2-2 酵素 B による実験結果

時間 (日) \ 酵素量 (g)	1	2	3	4	5	6	7
0.2	4.7	5.2	6.5	8.8	11.2	12.2	13.4

Brix 濃度 (%)

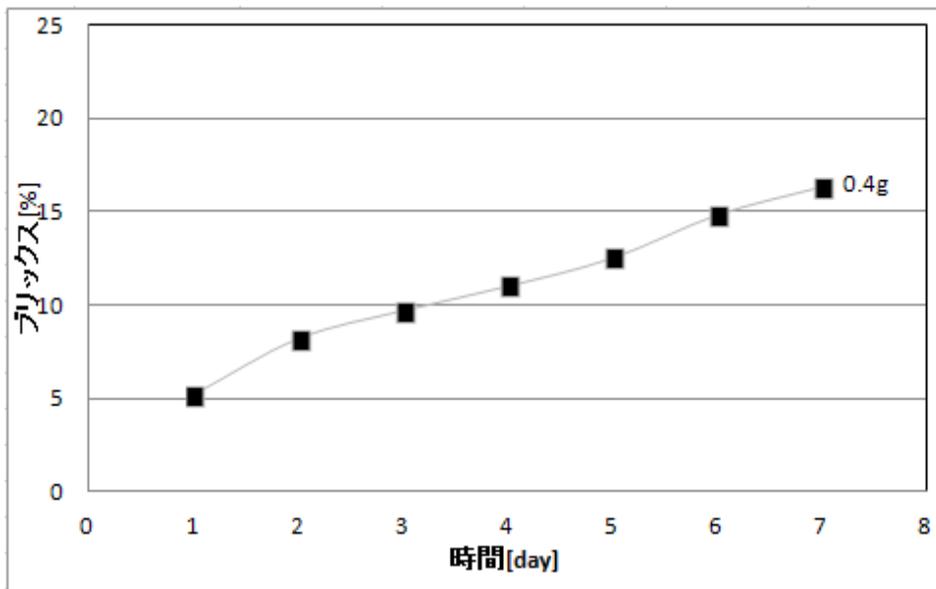


図 2-3 酵素 A・D を混合し 0.4g 加えた実験結果

表 2-3 酵素 B による実験結果

時間 (日) \ 酵素量 (g)	1	2	3	4	5	6	7
0.4	5.2	8.2	9.7	11.0	12.5	14.8	16.3

Brix 濃度 (%)

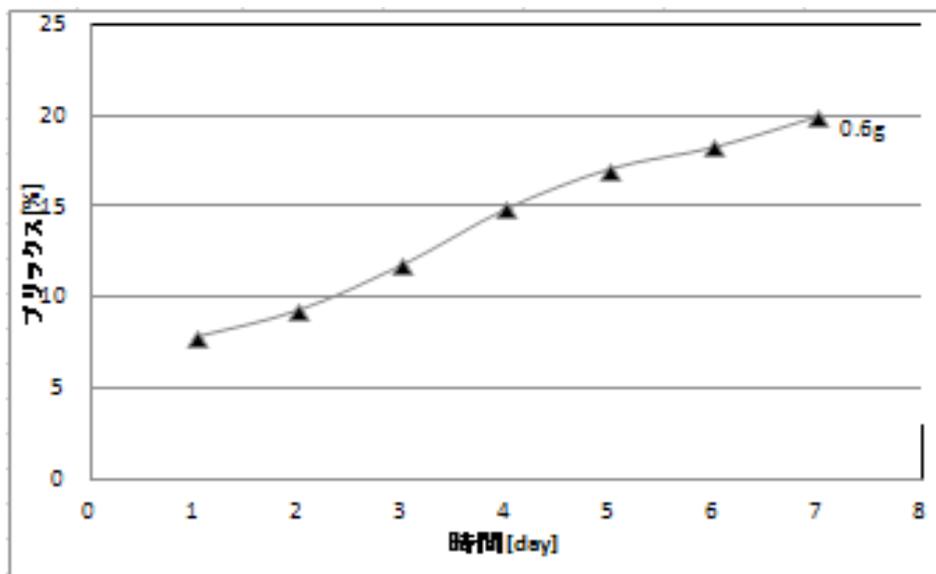


図 2-4 酵素 A・D を混合し 0.6g 加えた実験結果

表 2-4 A・D を混合し 0.6g 加えた実験結果

時間 (日) \ 酵素量 (g)	1	2	3	4	5	6	7
0.6	7.7	9.1	11.9	14.8	16.9	18.3	20.0

Brix 濃度 (%)

2-4 基質の酵素による糖化実験のまとめ

基質の糖化では、酵素糖化法では、濃硫酸法とほぼ同程度の濃度の糖を得るために、約1週間を要するが、使用する薬品が少量で取り扱いやすく、精密な温度管理が必要で無いことなど、低環境負荷な糖化法であるため教材化には適していると考えられ、本研究では酵素による糖化法を採用した。

また、酵素を単独で使用するより、2種類の酵素を混合し糖化させることでより高濃度の糖を得ることも分かった。

2-5 糖化に及ぼす試料の粉碎方法の影響

2-5-1 実験概要

バイオエタノールを安定して生成させるためには基質と酵素との活性を高めるため粉碎処理について検討した。前年度までの実験結果を紹介する。

これまでの実験では、ワンダーブレンダー（図2-5、2-6）で行っていたが、さらに微粉碎ができると予想される卓上型ボールミル（図2-7、2-8）を用いることにした。

実験は、セラミックボールミルの容積の1/3程度に基質と直径2cmのセラミックボールを入れ、約30rpmで約8時間回転させ、粉碎の結果、糖化率に与える影響について実験的に検討した。また、糖化液は高速液体クロマトグラフ分析装（HPLC）を用いて、破碎の違いによる糖の種類について分析を行った。



図 2-5 ワンダーブレンダー（左）、処理後の基質（右）



図 2-6 ワンダーブレンダー内部



図 2-7 卓上型ボールミル (左)、処理後の基質 (右)



図 2-8 卓上型ボールミル (1500mL) とその内部

2-5-2 実験方法

実験操作は以下の手順で行い、使用した薬品・器具類は表 2-5 に示す。

- (1) セラミックボールミル (1500mL) に基質 200g とアルミナボール (直径 2cm) を入れ、約 30rpm で 8 時間回転させ粉砕させた。
- (2) (1) で得られた基質 10g を量り取り「酵素による糖化実験」と同条件で実験を行った。

表 2-5 実験で使用した薬品・器具類

器 具	高速液体クロマトグラフ分析装置 (HPLC) (島津製作所) 卓上型ボールミル AV 型 (アサヒ理化製作所)、ポケット糖度計 PAL-J (株式会社アタゴ)、マグネチックスターラー RSH-60R (AS ONE)、三角フラスコ (300mL)、駒込ピペット (5mL)
薬 品	酵素 (A、B、C、D)、乳酸

2-5-3 実験結果及び考察

基質を卓上型ボールミルとワンダーブレンダーで処理し、酵素 A、酵素 B、酵素 C、酵素 D をそれぞれ 0.2、0.4、0.6g ずつ加え、糖化した結果を図 2-10、図 2-11、図 2-12 及び図 2-13 に示し、表 2-6、図 2-14、表 2-7 及び表 2-8 に糖濃度を示す。

卓上型ボールミルによる糖化では、酵素 A、酵素 B、酵素 C、酵素 D はそれぞれ 8.4 ~ 12.3%、6.8 ~ 8.6%、5.2 ~ 6.6% の高濃度の糖を得ることができ、ブレンダー処理した場合の実験結果と比較すると、糖濃度は約 1.2 から 1.4 倍増加していることが分かった。

卓上型ボールミルで粉砕した場合、基質を微粉砕することができ、積層構造を持つセルロースの結晶が細かく分断され（図 2-15 ~ 図 2-21）、酵素がセルロース及びヘミセルロースを分解することができたため、糖濃度が高まったと考えられる。分断されていることを確認するため、マイクロスコープ（VW-6000）（KEYENCE）を用いて観察を行った。

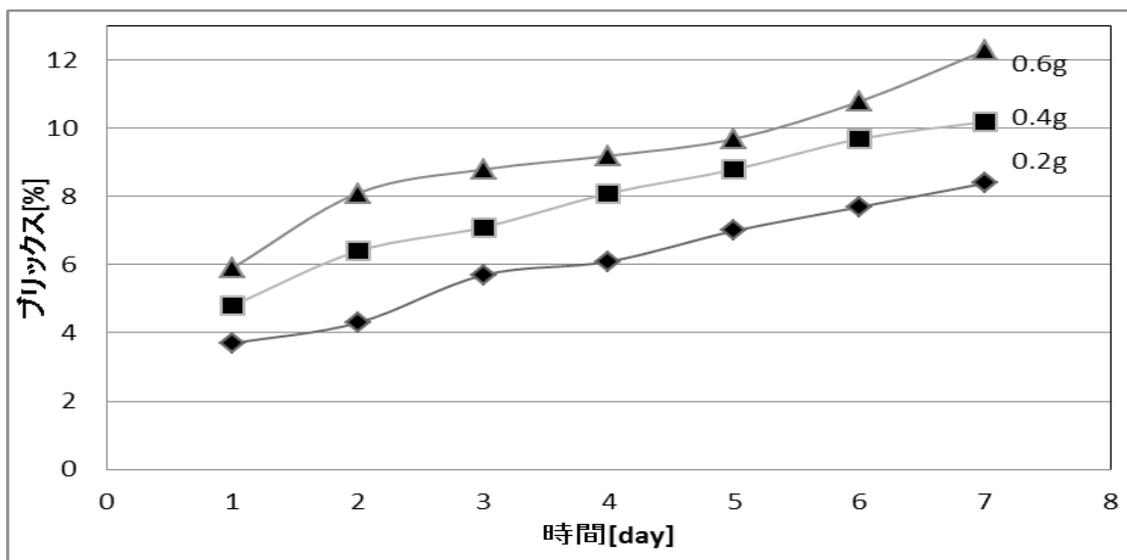


図 2-10 卓上ボールミル処理 (酵素 A) による実験結果

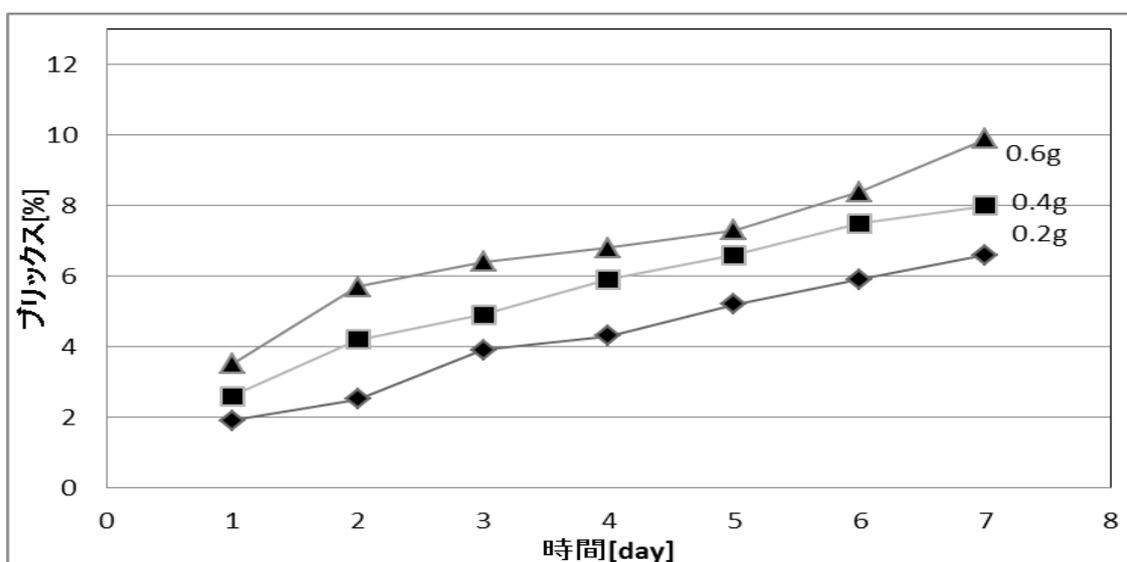


図 2-11 ワンダーブレンダー処理 (酵素 A) による実験結果

表 2-6 酵素 A を用いた 2 種類の前処理による実験結果

酵素名 (量 g) \ 時間 (日)	1	2	3	4	5	6	7
酵素 A (0.2) ボールミル	3.7	4.3	5.7	6.1	7.0	7.7	8.4
酵素 A (0.4) ボールミル	4.8	6.4	7.1	8.1	8.8	9.7	10.2
酵素 A (0.6) ボールミル	5.9	8.1	8.8	9.2	9.7	10.8	12.3
酵素 A (0.2) ブレンダー	1.9	2.5	3.9	4.3	5.2	5.9	6.6
酵素 A (0.4) ブレンダー	2.6	4.2	4.9	5.9	6.6	7.5	8.0
酵素 A (0.6) ブレンダー	3.5	5.7	6.4	6.8	7.3	8.4	9.9

Brix 濃度 (%)

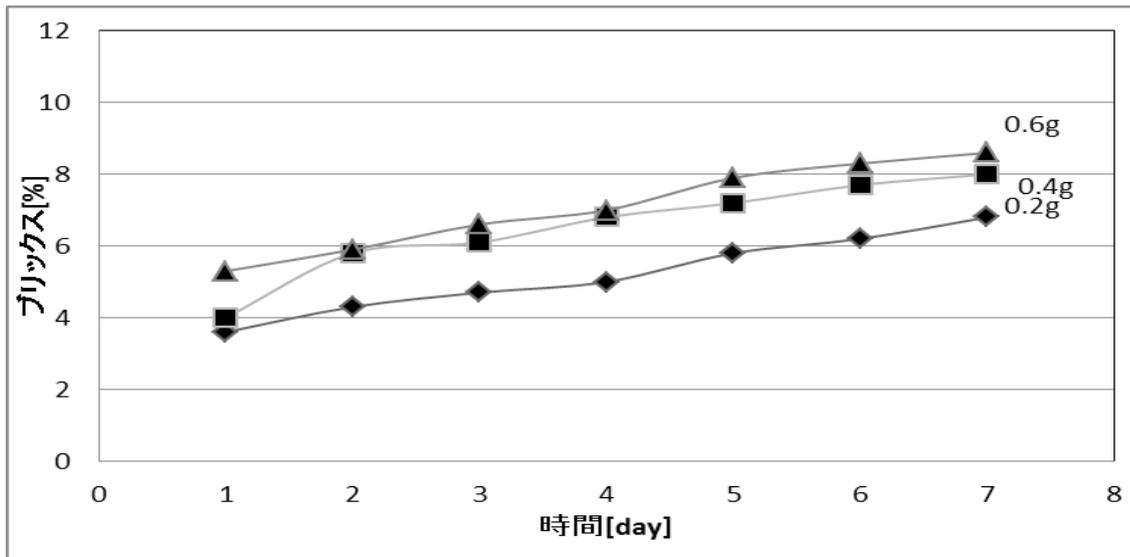


図 2-12 卓上型ボールミル処理 (酵素 B) による実験結果

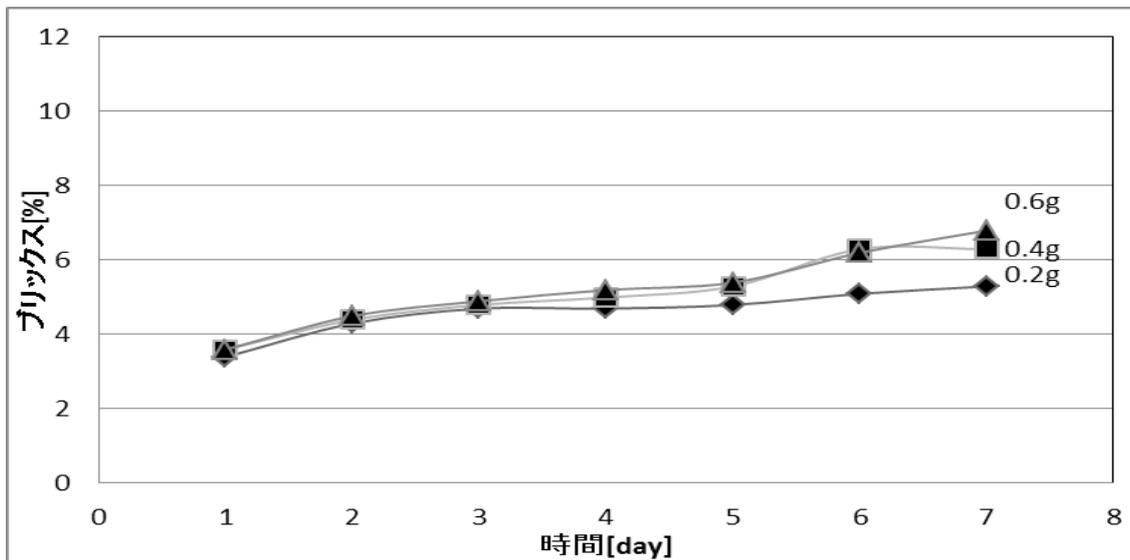


図 2-13 ワンダーブレンダー処理 (酵素 B) による実験結果

表 2-7 酵素 B を用いた 2 種類の前処理による実験結果

酵素 (量 g)	時間 (日)						
	1	2	3	4	5	6	7
酵素 B(0.2) ボールミル	3.6	4.3	4.7	5.0	5.8	6.2	6.8
酵素 B(0.4) ボールミル	4.0	5.8	6.1	6.8	7.2	7.7	8.0
酵素 B(0.6) ボールミル	5.3	5.9	6.6	7.0	7.9	8.3	8.6
酵素 B(0.2) ブレンダー	3.4	4.3	4.7	4.7	4.8	5.1	5.3
酵素 B(0.4) ブレンダー	3.6	4.4	4.8	5.0	5.3	6.3	6.3
酵素 B(0.6) ブレンダー	3.6	4.5	4.9	5.2	5.4	6.2	6.8

Brix 濃度 (%)

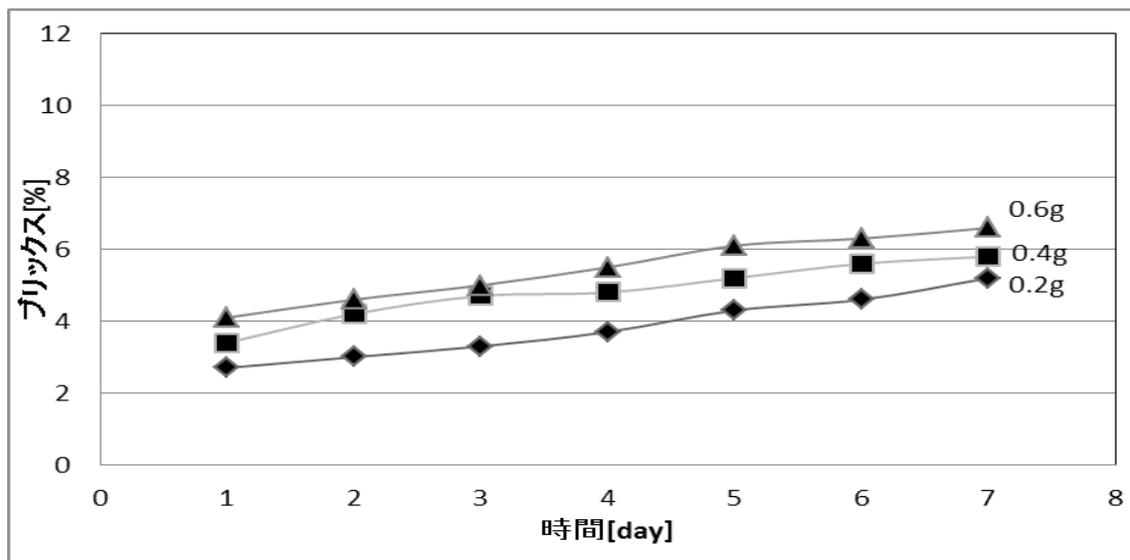


図 2-14 卓上型ボールミル処理 (酵素 C) による実験結果

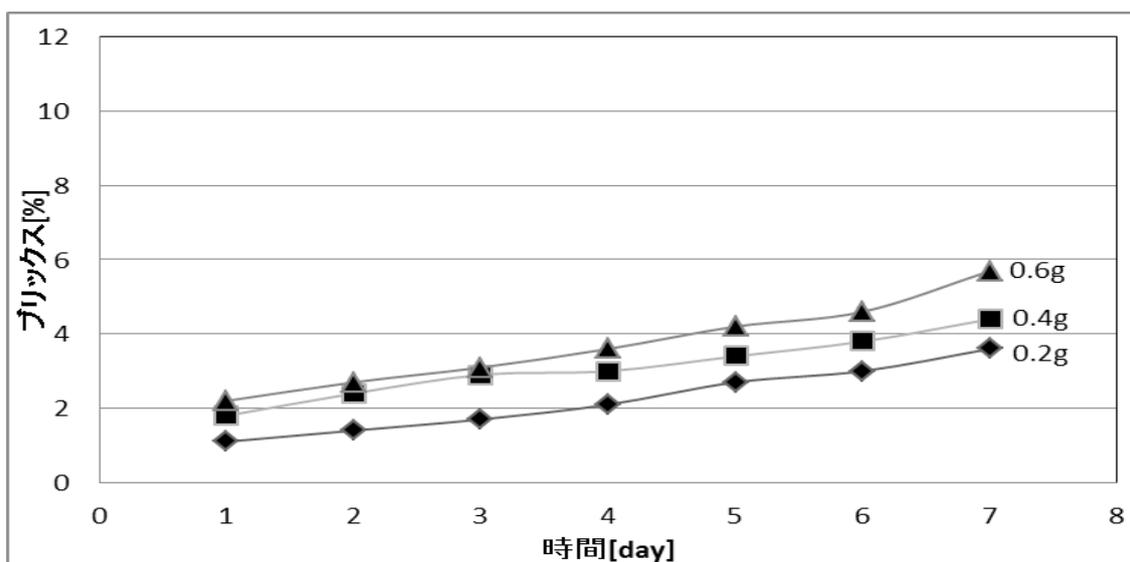


図 2-15 ワンダーブレンダー処理 (酵素 C) による実験結果

表 2-8 酵素 C を用いた 2 種類の前処理による実験結果

酵素 (量 g) \ 時間 (日)	1	2	3	4	5	6	7
酵素 C(0.2) ボールミル	2.7	3.0	3.3	3.7	4.3	4.6	5.2
酵素 C(0.4) ボールミル	3.4	4.2	4.7	4.8	5.2	5.6	5.8
酵素 C(0.6) ボールミル	4.1	4.6	5.0	5.5	6.1	6.3	6.6
酵素 C(0.2) ブレンダー	1.1	1.4	1.7	2.1	2.7	3.0	3.6
酵素 C(0.4) ブレンダー	1.8	2.4	2.9	3.0	3.4	3.8	4.4
酵素 C(0.6) ブレンダー	2.2	2.7	3.1	3.6	4.2	4.6	5.7

Brix 濃度 (%)

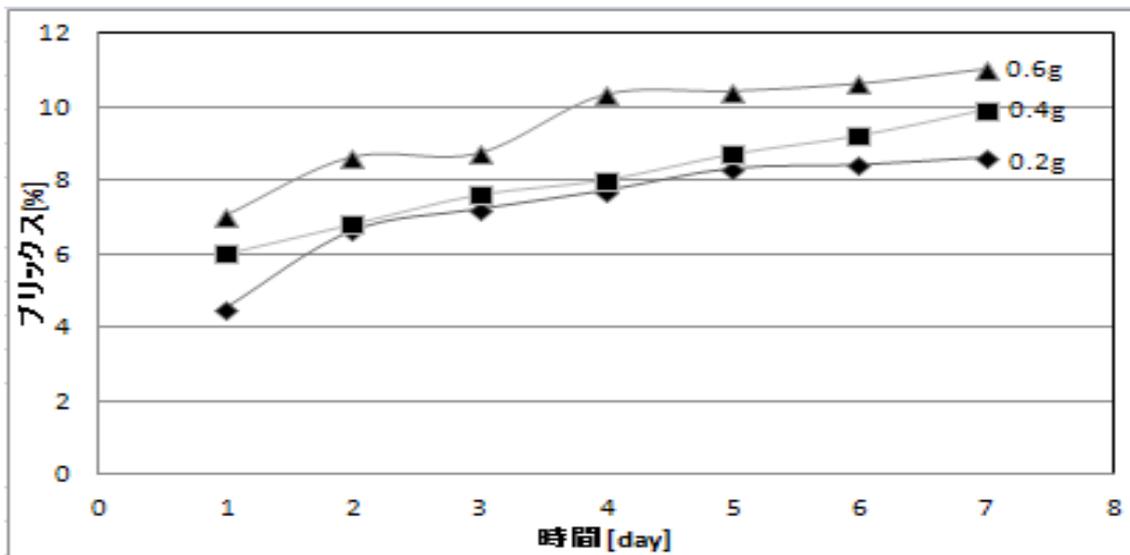


図 2-16 卓上型ボールミル処理 (酵素 D) による実験結果

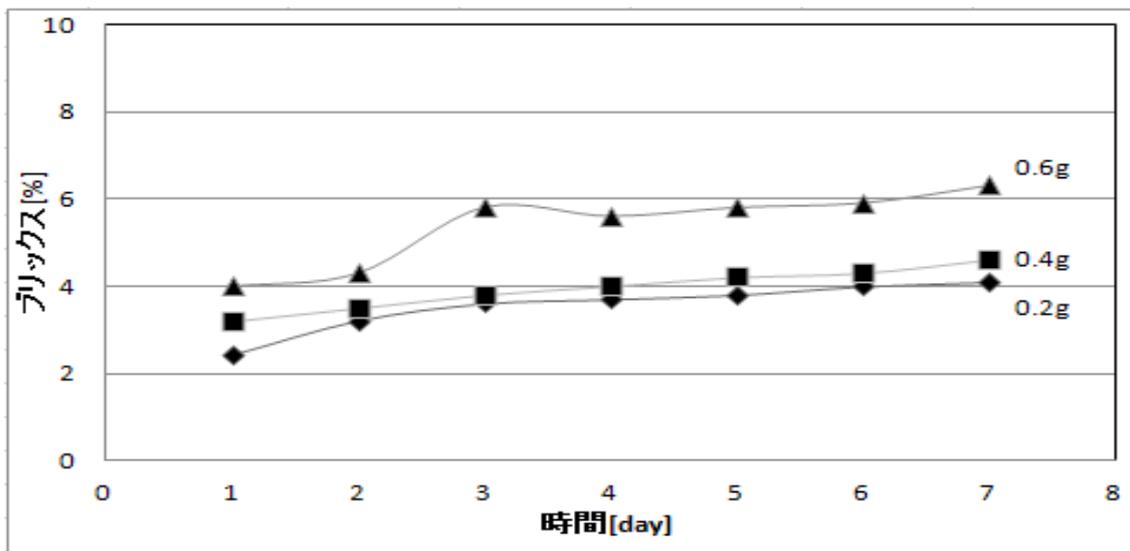


図 2-17 ワンダーブレンダー処理 (酵素 D) による実験結果

表 2-9 酵素 D を用いた 2 種類の前処理による実験結果

酵素 (量 g) \ 時間 (日)	1	2	3	4	5	6	7
酵素 D(0.2) ボールミル	4.2	6.4	7.6	7.9	8.1	8.2	8.4
酵素 D(0.4) ボールミル	6.0	6.4	7.8	8.0	8.3	9.6	9.9
酵素 D(0.6) ボールミル	6.9	8.3	8.4	10.2	10.3	10.6	11.0
酵素 D(0.2) ブレンダー	2.3	3.1	3.5	3.7	3.8	4.0	4.1
酵素 D(0.4) ブレンダー	3.4	3.6	3.7	4.0	4.2	4.3	4.6
酵素 D(0.6) ブレンダー	4.0	4.2	5.8	5.7	5.8	5.9	6.2

Brix 濃度 (%)

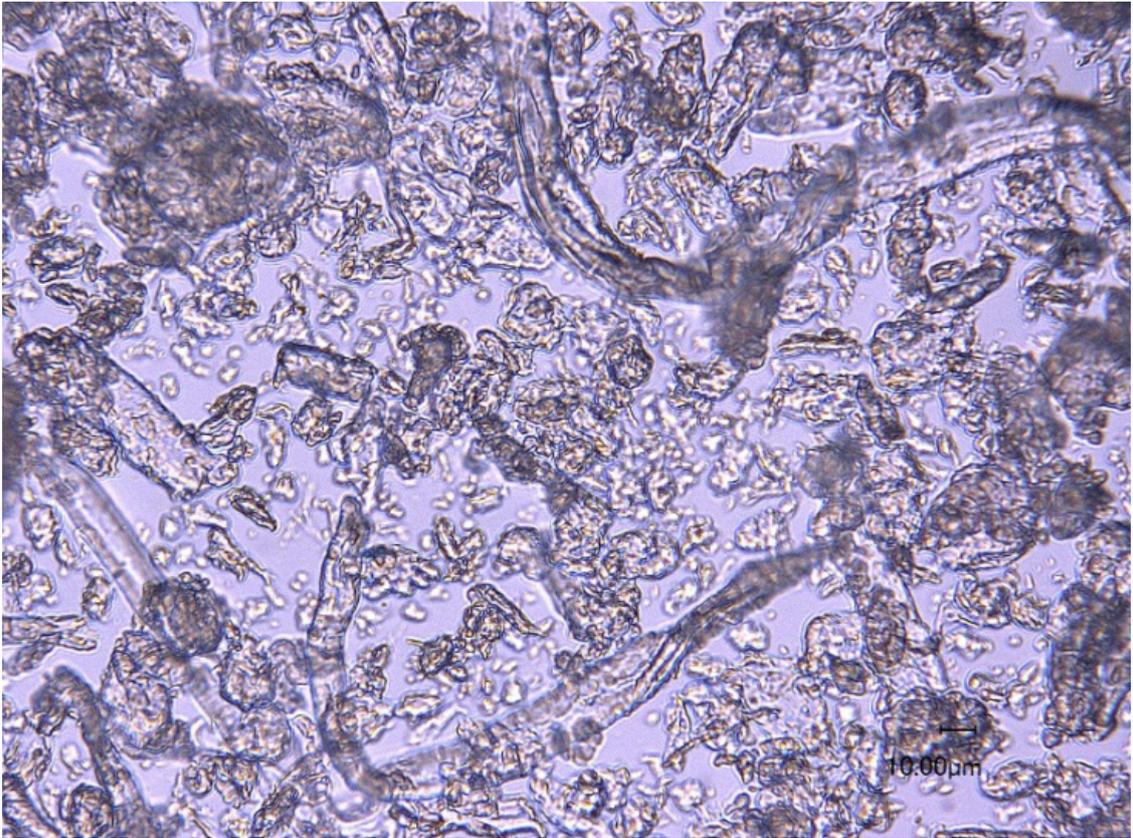


図 2-18 卓上型ボールミル処理 (× 1000 倍)

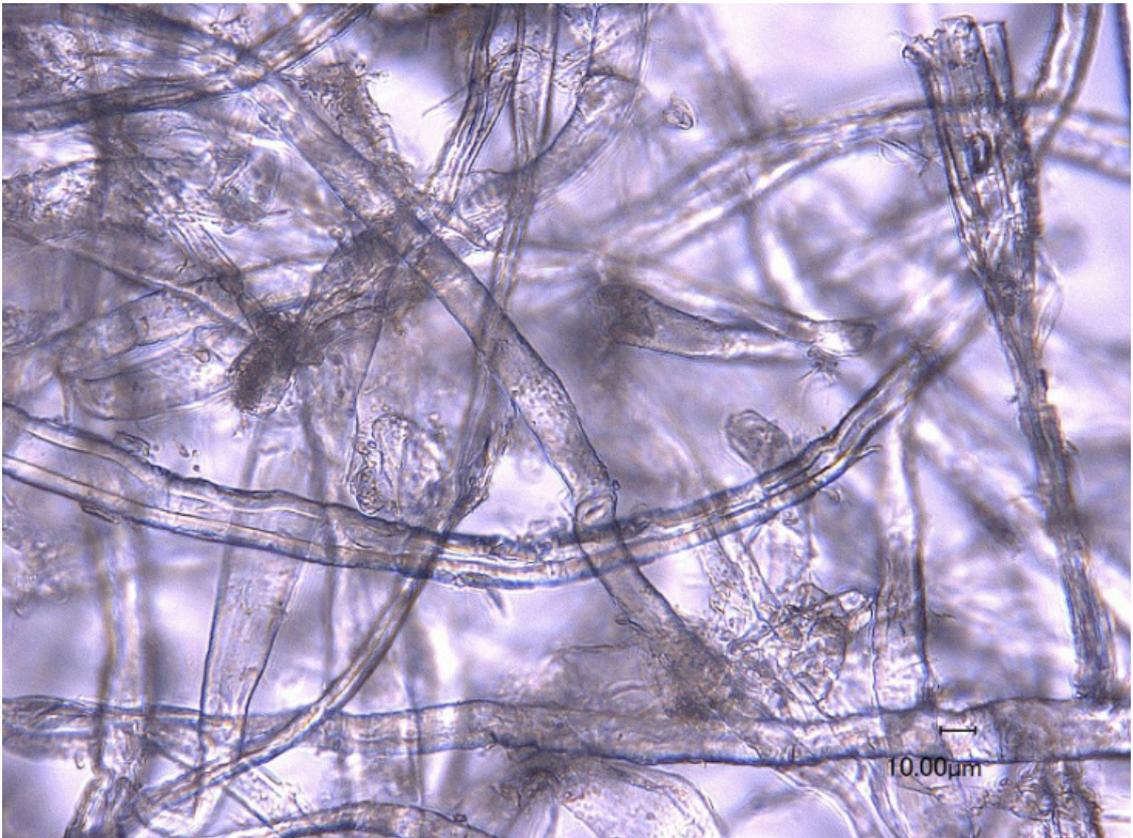


図 2-19 ワンダーブレンダー処理 (× 1000 倍)



図 2-20 卓上型ボールミル処理 (× 1500 倍)

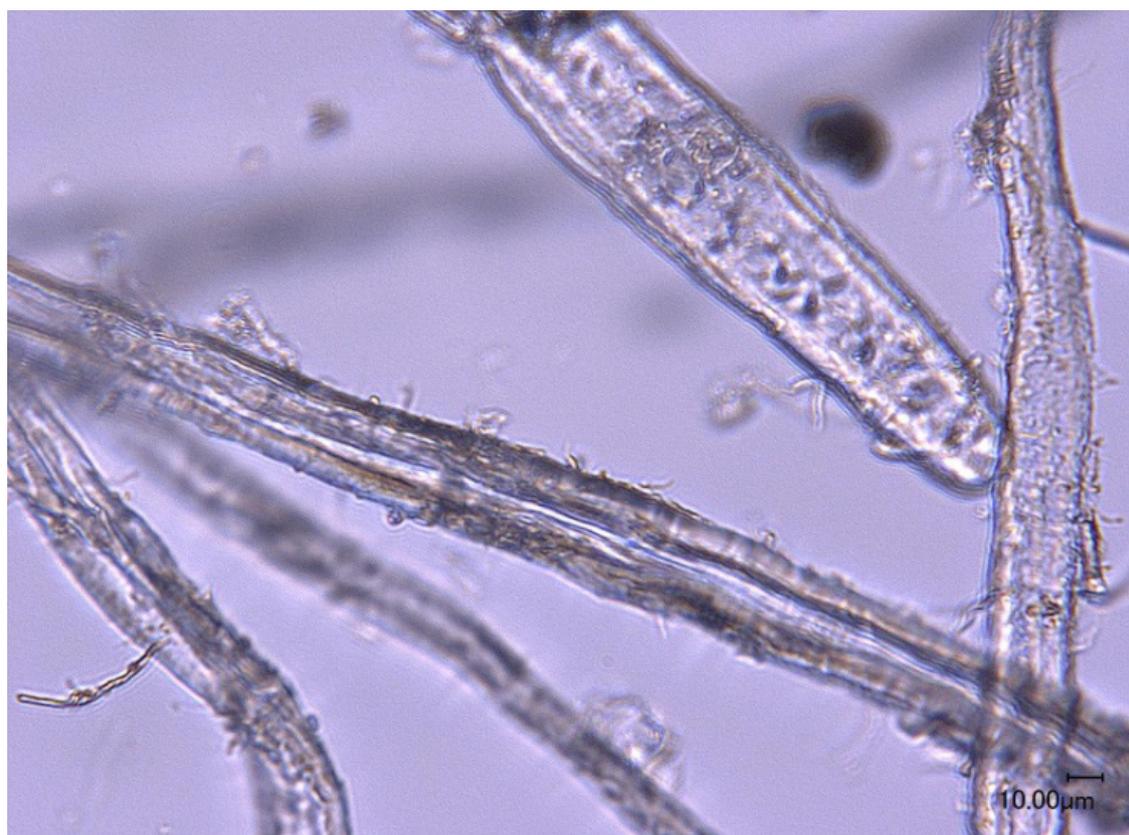


図 2-21 ワンダーブレンダー処理 (× 1500 倍)

2-6 高速液体クロマトグラフによる糖化液の成分分析

2-6-1 実験概要

基質を2種類の酵素混合した0.6gの酵素で糖化した糖化液について、エタノール発酵できる糖であるグルコースやフルクトース、スクロースなどが含まれているか検討した。また、実験2-5の前処理の違いによる糖化液の成分分析を行い、糖成分に与える影響について実験を行った。分析機器は高速液体クロマトグラフ分析装置(HPLC)を用い、カラム：Shim-packSPR-Ca(250mmL.×7.8mmI.D)、移動層：水、温度：80℃、流量：0.6mL/min、検出：示差屈折率を分析条件とした⁶⁾。

2-6-2 実験方法

実験操作は以下の手順で行い、使用した薬品・器具類は表2-10に示す。

- (1) 卓上型ボールミルの処理により2種類の酵素を混合した酵素で得られた糖化液について、高速液体クロマトグラフ分析装置(HPLC)を用いて分析を行った。
- (2) スクロース、グルコース、フルクトース標準試料を1g取りメスフラスコを用いてメスアップし、標準溶液を調製した。
- (3) 標準溶液と3種類の糖化液の分析を行った。

表 2-10 使用した薬品・器具類

器 具	卓上型ボールミル AV 型 (アサヒ理化製作所)、高速液体クロマトグラフ分析装置 (HPLC) (島津製作所)、メスフラスコ (100mL)
薬 品	スクロース、グルコース、フルクトース標準溶液

2-6-3 実験結果及び考察

図2-22にスクロース、グルコース及びフルクトースの標準溶液の屈折率単位とリテンションタイムとの関係を、表2-11にピークレポート示す。7.250min、9.184min、10.140minにそれぞれ糖成分のピークが検出されている。2-5の実験で得られた糖化液を高速液体クロマトグラフ分析装置(HPLC)を用いて、糖成分を分析した結果で、図2-23に試料のクロマトグラフを、表2-12にピークレポートを示す。

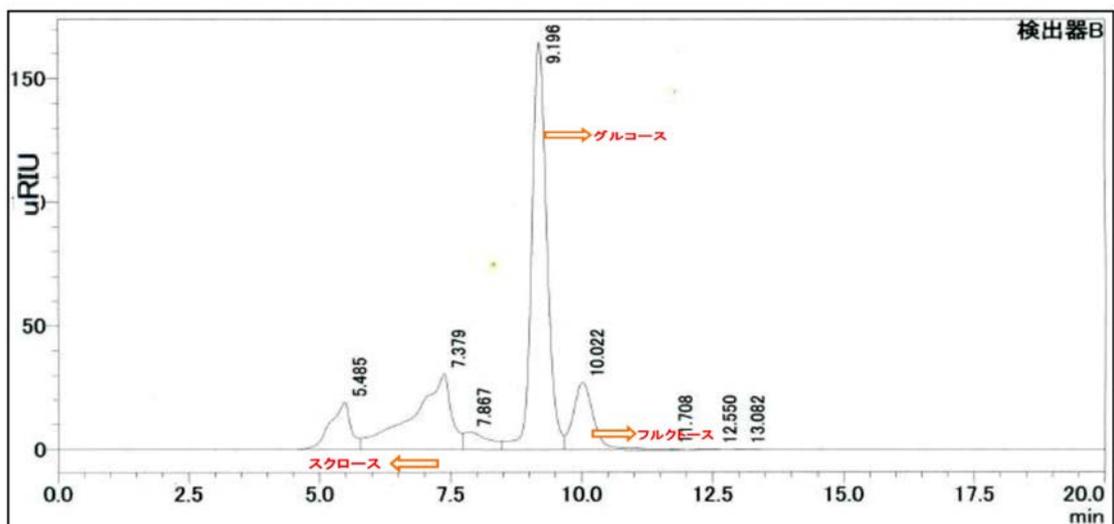


図 2-22 グルコース、フルクトース、スクロース標準溶液のクロマトグラフ

表 2-11 スクロース、グルコース、フルクトース標準溶液のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	7.250	882698	47563	1.000	スクロース
2	9.184	1201549	60416	1.000	グルコース
3	10.140	1205144	53156	1.000	フルクトース

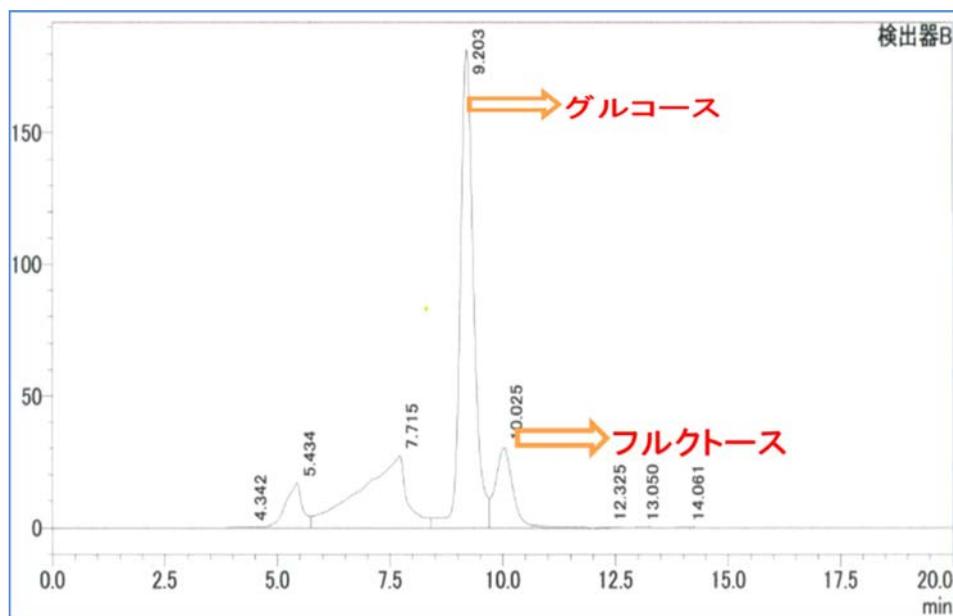


図 2-23 卓上型ポ-ルミルで粉砕し酵素 A・D0.6g で糖化したクロマトグラフ

表 2-12 卓上型ポ-ルミルで粉砕し酵素 A・D0.6g で糖化したピークレポート

ピーク	保持時間	濃度 (%)	化合物名
1	14.724	5.040	グルコース
2	16.040	11.918	フルクトース

卓上型ボールミルによる前処理では酵母がアルコール発酵できるグルコース、フルクトースが含まれていることが分析の結果から分かった。

卓上型ボールミルでは、基質が微粉碎できたため、そのヘミセルロースと酵素が反応することができたことで糖化されたためだと考えられる。

ヘミセルロース中には、スクロースが含まれており、卓上型ボールミル処理ではスクロースのグルコシド結合が酵素により切断され、グルコースとフルクトースが生成したため、その濃度が高くなったと考えられる。

第3章 アルコール発酵に関する実験

3-1 アルコール発酵の概要

アルコール発酵とは、グルコース、フルクトース、スクロースなどの糖を分解してエタノールと二酸化炭素を生成する酵母の代謝プロセスであり、酵母が酸素を必要としない嫌気的反応のみで行われる。その反応式は以下の通りである。



なお、酵母と酸素が接触する好気呼吸の場合には糖を水と二酸化炭素に変える反応が起こる。その反応は以下通りである。



本実験ではエタノール発酵を検討するため、酵素 A・D を混合した酵素、卓上型ボールミルにより前処理した Brix20.0% の糖化液を用いて、4 日間エタノール発酵を行った。生成したエタノールはポケットエチルアルコール計、ガスクロマトグラフ分析装置 (GC) (島津製作所) を用いて濃度を測定した。

また、エタノール発酵で得られたバイオエタノールは、濃度を高めるため単蒸留を行った。なお、本研究では、アルコール度数 1% 以上のバイオエタノールを生成させるため、内閣府沖縄総合事務局よりアルコール試験研究製造承認を受け、平成 26 年 10 月 6 日からエタノール発酵実験を進めた。

3-2 実験方法

実験操作は以下手順で行い、使用した薬品・器具類は表 3-1 示す。

- (1) 300mL 三角フラスコに糖化液 50mL (図 3-1) に 3 種類の酵素ドライイースト (日清フーズスーパーカメラヤ)、ワイン酵母 (レットスター赤、レットスター青) を用いた。
- (2) マグネチックスターラーを用いて約 30rpm で攪拌しながら 5 日間発酵させた (図 3-2)。
- (3) 1 日おきにポケットエチルアルコール計 PAL-34S (アタゴ) (図 3-3) を用いてエタノール濃度を測定した。
- (4) (3) で得られた試料のエタノール濃度を高めるため、単蒸留 (図 3-4) を行った。
- (5) (4) で得られたエタノール (図 3-5) に火を付けて、燃焼することを確認した (図 3-6)。
- (6) 発酵で得られたエタノールと単蒸留後のエタノールの定量分析をガスクロマトグラフ分析装置 (GC) を用いて行った。装置はガスクロマトグラフ (TCD) を用い、設定条件として、カラム充填剤 PEG、カラム長さ 2 m、キャリアーガスはヘリウム、カラムオープン温度 110℃、キャリアーガス流量 50mL/min、水素圧力 55kPa、空気圧力 55kPa とした¹⁰⁾。

表 3-1 実験で使用した薬品・器具等

器 具	ポケットエチルアルコール計 PAL-34S (アタゴ)、マグネチックスターラー RSH-60R (AS ONE)、三角フラスコ (300mL)、単蒸留器具、ガスクロマトグラフ分析装置 (GC) (島津製作所)
薬 品	ドライイースト (日清フーズスーパーカメラヤ)



図 3-1 ろ過した糖化液

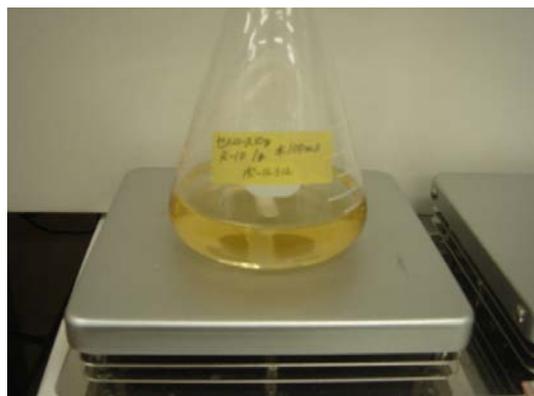


図 3-2 発酵実験の様子



図 3-3 ポケットエチルアルコール計



図 3-4 単蒸留実験の様子



図 3-5 単蒸留で得られたエタノール

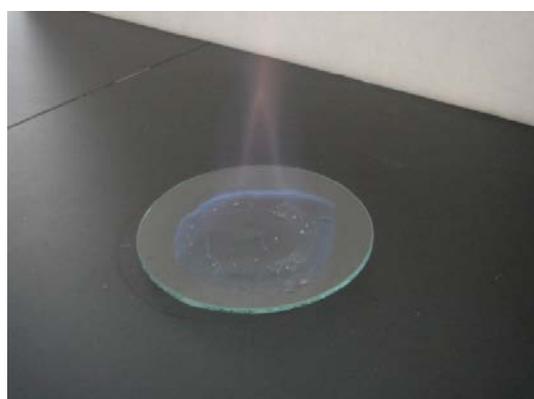


図 3-6 エタノールの燃焼実験

3-3 実験結果及び考察

実験 2-5 で得られた Brix20.0% との糖化液に 3 種類の酵母をアルギン酸ナトリウムを用いて固定化し、バイオリアクターを作製し、アルコール発酵実験を行った実験結果を図 3-7 に示し、表 3-2 に発酵によって得られたエタノール濃度を示す。

糖化液に酵母投入後、1 日目には 28.6%、2 日目には 31.9%、3 日目には 39.8%、4 日目には 48.0% のエタノールを得ることができ、1 回目の単蒸留後にはエタノール濃度は約 62%、2 回目単蒸留後には約 78% までエタノール濃度が高まった。

表 3-3 に示すようにポケットエチルアルコール計とガスクロマトグラフ分析装置 (GC) で測定したエタノール濃度の関係を表しているが、両機器を用いた測定では値にばらつきがみられる。これは、エタノール発酵後の試料には、未反応の糖があることが原因と考えられる。屈折率を利用するポケットエチルアルコール計は糖とエタノールを同時に測定しているため、エタノール濃度が高く測定されたと考えられる。

したがって、糖分とエタノールが混合している試料のエタノール濃度測定には屈折計は測定誤差が大きいので、簡易的な濃度測定にのみ用いることが望ましい。

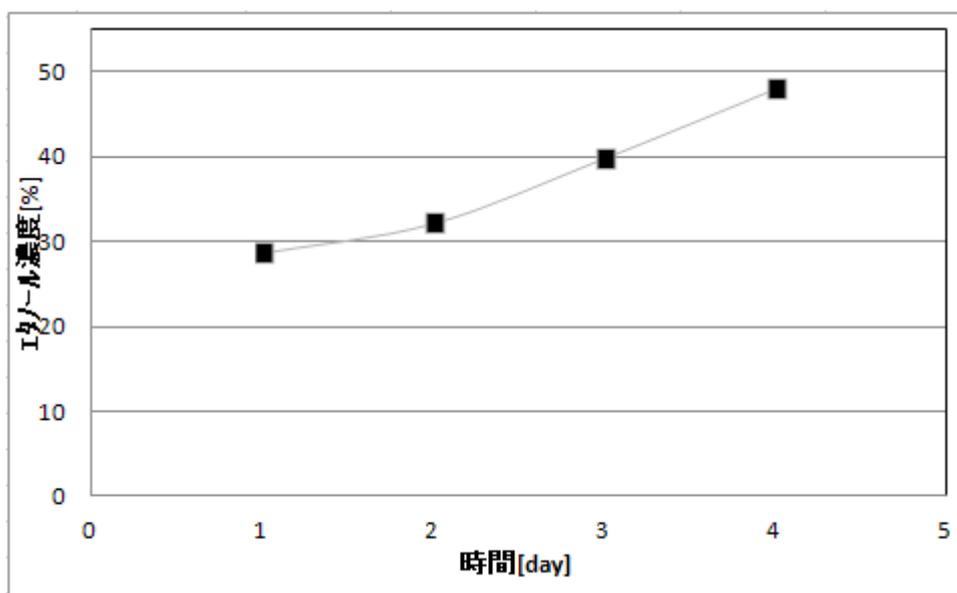


図 3-7 エタノール発酵実験結果

表 3-2 エタノール発酵実験結果

時間 (日)	1	2	3	4
エタノール濃度 (%)	28.6	31.9	39.8	48.0

単位 (%)

表 3-3 各測定機器で測定したエタノール濃度

試料 / 測定機器	エタノール発酵後のエタノール濃度	1 回目の単蒸留後のエタノール濃度	2 回目の単蒸留後のエタノール濃度
ポケットアルコール計	48.0	62	78
ガスクロマトグラフ分析装置	46.8	60.1	76

単位 (%)

第4章 エコガソリン (E15) の製造に関する実験

4-1 エコガソリン (E15) の概要

E 15 は、植物由来の原料から作られたバイオエタノールを約 15%混合したレギュラーガソリンです。

E は Ethanol(エタノール)を表しており、15 はバイオエタノールの混合率約 15%を指している(エタノール 15%)。

バイオエタノールは、原料となる植物が生長過程で既に CO₂を吸収しているため、燃焼させても大気中の CO₂の量は増えず、使用に伴う排出量はゼロとみなされる。つまり、E 15 にはこのバイオエタノールが混合されているため、CO₂排出量削減効果がある。

また、バイオエタノールは再生可能なエネルギーであることから、限りある化石燃料の節約にもつながり、CO₂は地球にやさしいガソリンと言える。

本実験では E 15 で使用するエタノール濃度を高めるためバイオリアクターによるエタノール発酵法、単蒸留並びに脱水法について実験的に検討した。

4-2 実験方法

実験操作は以下手順で行い、使用した薬品・器具類は表 4-1 示す。

酵母の固定化

- (1) 200mL のビーカーにアルギン酸ナトリウム 1g をとり、水 50mL を加えてかき混ぜながら溶解させる。
- (2) 別のビーカーにドライイースト 10g をとり、水 25mL を溶かす。
- (3) (1) (2) の液を混合し、均一になるように十分混ぜる。
- (4) 200mL のビーカーに水 100mL を入れ、塩化カルシウム 1g を溶かす。
- (5) (3) の液を漏斗を使い、(4) の液に 1 滴ずつ適下し、固定化酵母のビーズを作る。

アルコール発酵

- (1) リービッチ冷却管を利用し、バイオリアクター装置を組み(図 4-1)、アルギン酸ナトリウムで固定化した酵母を冷却管内に充填する。
- (2) 実験 2-4 で得られた糖化液 300mL を 5 日間連続エタノール発酵させ、バイオエタノールを得る。
- (3) (2) で得られたバイオエタノールを単蒸留を 2 回繰り返し、酵母菌や未反応のブドウ糖等を除去する。
- (4) (3) で生成したバイオエタノールの濃度をさらに高めるため分液ロート内に重鎮したモリキュラシープを用いて脱水を行う(図 4-2)。
- (5) 発酵で得られたエタノールと単蒸留後のエタノールの定量分析を実験 3-2 と同条件でガスクロマトグラフ分析装置(GC)を用いて行った。

表 4-1 実験で使用した薬品・器具等

器 具	ガスクロマトグラフ分析装置 (GC) (島津製作所)、単蒸留器具、リービッチ冷却管、ビーカー (200mL)、三角フラスコ (300mL)
薬 品	アルギン酸ナトリウム、塩化カルシウム、ドライイースト (日清フーズスーパーカメラヤ)、モリキュラシープ

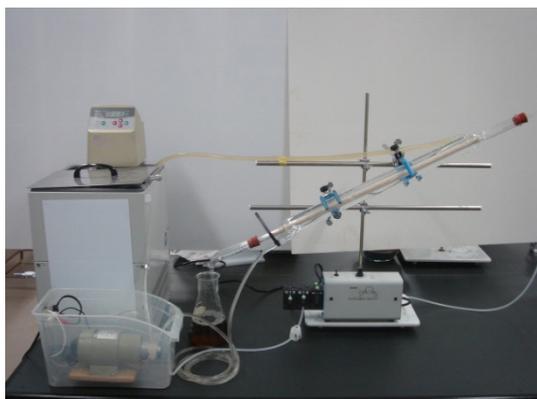


図 4-1 バイオリクター装置 (左) 循環している糖化液 (右)



図 4-2 モリキュラシーブによる脱水

4-3 実験結果及び考察

実験 2-4 で得られた糖度約 20% の糖化液をバイオリクターを利用してエタノール発酵を行った実験結果を図 4-3 に示し、表 4-1 に発酵によって得られたエタノール濃度、表 4-2 に 2 回の単蒸留、脱水後のエタノール濃度を示す。

糖化液を循環後 1 日目には 28.6%、2 日目には 31.9%、3 日目には 39.8%、4 日目には 48% のエタノールを得ることができ、1 回目の単蒸留後には 62%、2 回目の単蒸留後には 78%、脱水後には 93% のさらに高濃度のバイオエタノールを得ることができた。

実験結果から糖化液に直接、酵母菌を投入するよりも酵母を固定化し、バイオリクターを製作し、エタノール発酵させる方がより高濃度のエタノールが得られることが分かった。

また、単蒸留を繰り返すことでエタノール濃度は高まるが、収量が減少する為、今後は蒸留法の検討が必要である。モリキュラシーブを用いた脱水処理では、モリキュラシーブを直接作用させるのではなく、いったん 150℃程度で約 2 時間乾燥させ、デシケーター中で放冷後、使用した方が脱水率が高いことも分かった。

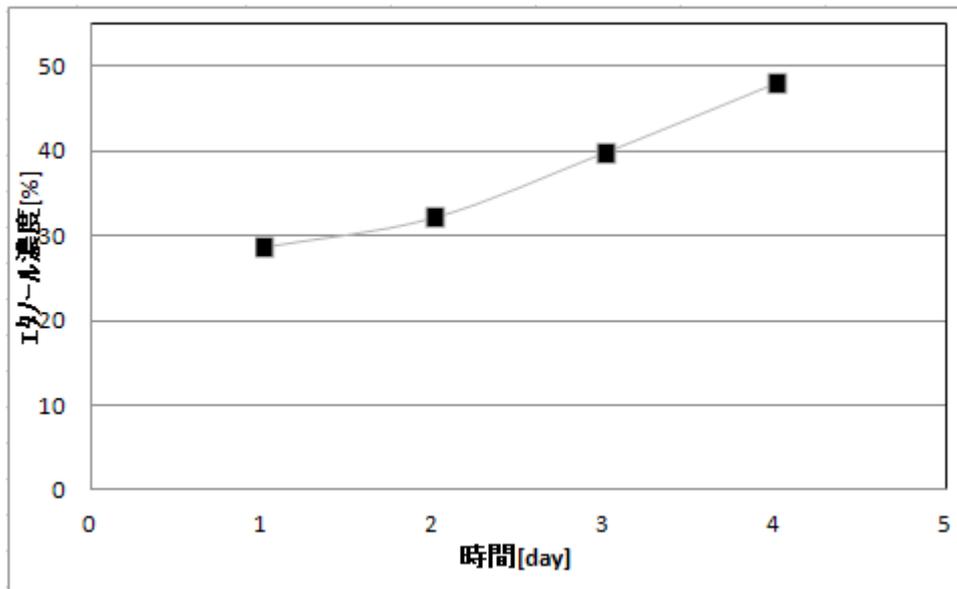


図 4-3 エタノール発酵実験結果

表 4-1 エタノール発酵実験結果

時間 (日)	1	2	3	4
エタノール濃度	28.6	31.9	39.8	48.0

単位 (%)

表 4-2 単蒸留、脱水後のエタノール濃度

時間 (日)	1 回目の単蒸留後	2 回目の単蒸留後	脱水処理後
エタノール濃度	62	78	93

単位 (%)

4-4 バイオエタノールの活用

実験 4-2 で得られたバイオエタノールを基材のガソリン 85% にバイオエタノール 15% を混合し、E15 ガソリンを製造し沖縄県総合教育センター産業教育班の協力を得て、所内で 1 カ月に 1 度開催される美化活動 (フラワーフライデー) において、草刈機 7 台 (2 サイクルエンジン 5 台、4 サイクルエンジン 2 台) で使用する燃料に E15 ガソリン (300mL 「ガソリン 255mL、バイオエタノール 45mL」) を使用し検証実験を行った。

4-5 実験方法

実験操作は以下手順で行い、使用した薬品・器具類は表 4-3 示す。

- (1) ガソリン約 255mL に実験 4-2 で精製させたバイオエタノール約 15mL を 500mL ビーカー内で混合し攪拌した (図 4-4)。
- (2) (1) を草刈り機に入れエンジンが始動することを確認する (図 4-5)。
- (3) 始動確認後、実際に草刈り作業を行った (図 4-6)。

表 4-3 実験で使用した薬品・器具等

器 具	草刈り機（マキタ社製）、ビーカー（500mL）、かき混ぜ棒、漏斗
薬 品	ガソリン（50：1 混合ガソリン）、バイオエタノール



図 4-4 E15 燃料の混合の様子



図 4-5 E15 燃料を草刈り機に投入（左）し、エンジン始動を確認（右）



図 4-6 E15 ガソリンの製造法の説明と美化活動の様子

4-6 実験結果及び考察

実験 4-2 で得られたバイオエタノールをガソリンと混合した E 15 燃料を利用して草刈り機を動かすことができた。草刈り作業では、通常のガソリンを使用した時と違和感がなく使用することができた。実験終了後も常時草刈り機を使用しているが、エンジンの故障やトラブルなどの報告はなく、現在も使用中である。同様に発電機も使用しており、電源が無い屋外での作業等に使用している。

本実験では、ガソリンに 15%バイオエタノールを混合するいわゆる E 15 燃料の精製に取り組んできた。E15 ガソリンの内、合計で 315mL のバイオエタノールを利用し、化学反応式から理論上、草刈機 1 台当たり 3.83L 合計で 26.81L の CO₂ を削減することができ、温室効果ガス削減に貢献できることが分かった。

第5章 まとめと今後の課題

近年、エネルギー資源の枯渇、地球温暖化など様々な問題によりエネルギー・環境教育の重要性が高まってきている。教育現場においても環境問題に対する関心は高く、エネルギー問題が取り上げられ、その中でも発酵によって得られるバイオエタノールはカーボンニュートラルの観点から実用化がすすめられている。しかし、その製造にはデンプンやサトウキビ等の食料を用いるため課題が多い。そこで本研究では、食料と競合しない石油代替燃料源としてセルロース系バイオマスに着目し、基質に含まれるセルロースを糖化、エタノール発酵までの実験を行うことにより再生可能エネルギーの開発・導入の重要性が認識できた。

本研究の課題として、安定したバイオエタノール生成に向け、さらに高濃度なエタノールを得ることが必要であり、それには糖化液の糖濃度を高めるため、基質の前処理の検討や崩壊力の高い酵素の選択などがあげられる。

さらに得られたバイオエタノールの濃度を高めるために酵母菌の選定や蒸留法の検討、膜を利用したバイオエタノール中の脱水が必要になってくる。また、基質の糖化では、糖化力の強い 2 種類の酵素を混合することで高濃度の糖を得ることができた。また、バイオリクターを利用したアルコール発酵を行うことで、高濃度のバイオエタノールを得ることができた。

今後は、本研究で得られた一連の工程を企業化し、バイオエタノールを販売することで廃棄物の有効利用や地球温暖化防止していくことができ、地域密着型の社会貢献の実現に向けて研究を続けていきたい。

参考文献

- 1) 増補四訂板サイエンスビュー化学総合資料、実教出版編集部 (2009)、216
- 2) トコトンやさしいバイオエタノールの本、坂西欣也他、日刊工業新聞社 (2008)、42 ~ 43
- 3) ibid. 44 ~ 45
- 4) 化学辞典、大木道則、大沢利昭、田中元治、千原秀昭、東京化学同人 (1994)、270
- 5) 自動車用バイオ燃料の技術開発、湯川英明、シーエムシ出版 (2008)、320
- 6) 島津高速液体クロマトグラフ食品分析応用データ集、島津製作所分析計測事業部、3
- 7) 化学、新興出版社啓林館 (2012)、齊藤烈・藤嶋昭・山本隆一他 19 名、352
- 8) 化学便覧基礎編Ⅱ、丸善 (1966)、社団法人日本化学会、1116
- 9) 化学大辞典 9、南條初五郎 (1962)、13
- 10) ガスクロマトグラフ応用データ集「食品」、島津製作所分析計測事業部、67

講 評

本研究は、地球環境問題への貢献を目指して石油代替燃料を食料と競合しないシュレッダー紙に着目し、バイオエタノールの生成に取り組んだ内容である。3カ年間の継続研究でもあり、成果と課題をきちんと踏まえて活動を実践している。今年度は、シュレッダーにより細断紙を糖化させ、バイオリクターを活用し、さらに蒸留・脱水の工程を経て93%という高濃度のバイオエタノールの生成に成功している。また、研究の遂行に際し、アルコール試験研究を税務署に申請し、きちんと承認を受けて取り組んでいることも高く評価できる。今回の研究で得られたバイオエタノールを基材のガソリンに15%添加し、E15ガソリンとして刈り払い機等に活用して実証実験にも成功していることは、品質の証明にもつながっている。

今後は、実証実験の回数を増やしつつ品質の改善に取り組み、食料に代わる石油代替燃料として製品化できるレベルにまで多方面と連携しながら研究を継続していただきたい。