

沖縄電力社長賞

第36回沖縄青少年科学作品展

台風の積乱雲が風速に及ぼす影響 —暴風のメカニズムを探れ！—

沖縄県立球陽高等学校

2年 松田 留佳 2年 小橋川 南 2年 金城 侑那

1. 研究目的

2012年の夏、沖縄本島を台風15号、16号、17号が直撃した。この3つの台風は中心気圧がそれぞれ910hPa、905hPa、930hPaと低いまま沖縄本島を通過するなど大変似た特徴を持つ台風であった。しかし、暴風について最大級の警戒を呼び掛けた最初の台風は風速が弱く、3つめに直撃した台風の方が風速が強く、被害も甚大であった。私たちは昨年、3つの台風の気圧傾度と風速の関係を分析し、同じ気圧傾度でも風速が大きく異なっていたことを確認した。そして、1時間毎のレーダー・アメダス解析雨量図から推定した積乱雲分布と風速の関係を調べた。その結果、「①観測点の風上側に強い壁雲（積乱雲の壁）があるときは、壁雲の上昇気流によって風が上空に運ばれるため壁雲の内側の風は弱まる。②観測点の風下間近に孤立した積乱雲があるときは、その積乱雲の上昇気流によって風が加速するため観測点での風は強まる。」(図1)という仮説を得ることができた。しかし、このときに使用したレーダー・アメダス解析雨量図は1時間毎のものであり解像度に欠けているという課題があった。

そこで今年度は、上昇気流が風速に与える影響を調べるモデル実験と気象レーダーによる5分毎の降水強度分布を用いた解析を行って、昨年度得られた仮説を検証することを研究目的とした。

どのような状況で風速が強まるかが分かれば、過去の降水域の動きと現在の降水の分布を基に行われている降水短時間予報や降水ナウキャストと同様に、台風中の積乱雲分布を基に「何時何分頃何mの風が吹く」という様な“風短時間予報”に応用できる可能性がある。これが実現すれば、数時間の暴風の動向を把握して、避難行動や災害対策に役立てることができよう。

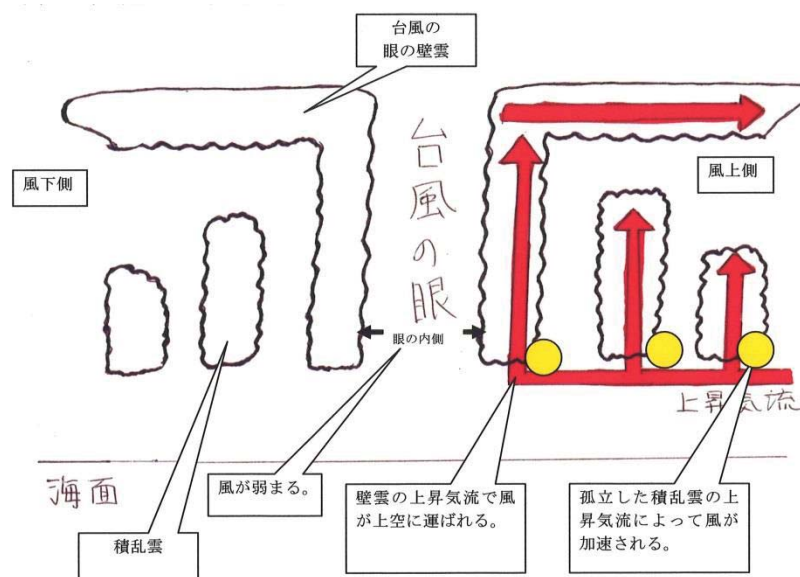


図1 昨年度の研究で得られた仮説

2. 研究方法

(1) 孤立した積乱雲のモデル実験

ア 準備

風の通路 (180cm×45cm の断熱材の長辺に 30cm のアクリル板をつけたもの)、扇風機 1 台 (仕事率 : 32W)、掃除機 1 台 (仕事率 : 610W)、風速計 1 つ (最小単位 : 0.1m/s 確度 : ± 5 %)、紐 2 本、鉄棒 4 本、円形の筒 38 個 (直径 5.5cm、長さ 28cm)、段ボール、方眼用紙 1 枚、厚紙

イ 実験の説明

①風の通路 (図 2, 図 3) : 180cm×45cm の断熱材の長辺に高さ 30cm のアクリル板をつけたもの。

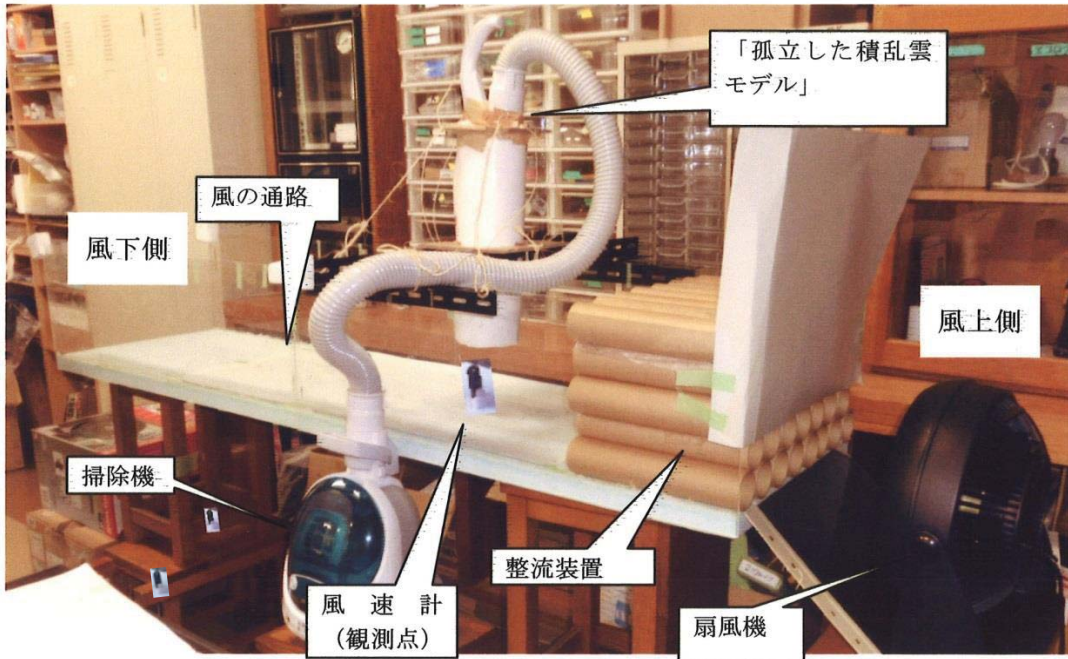


図 2 実験装置 (斜めから見た図)

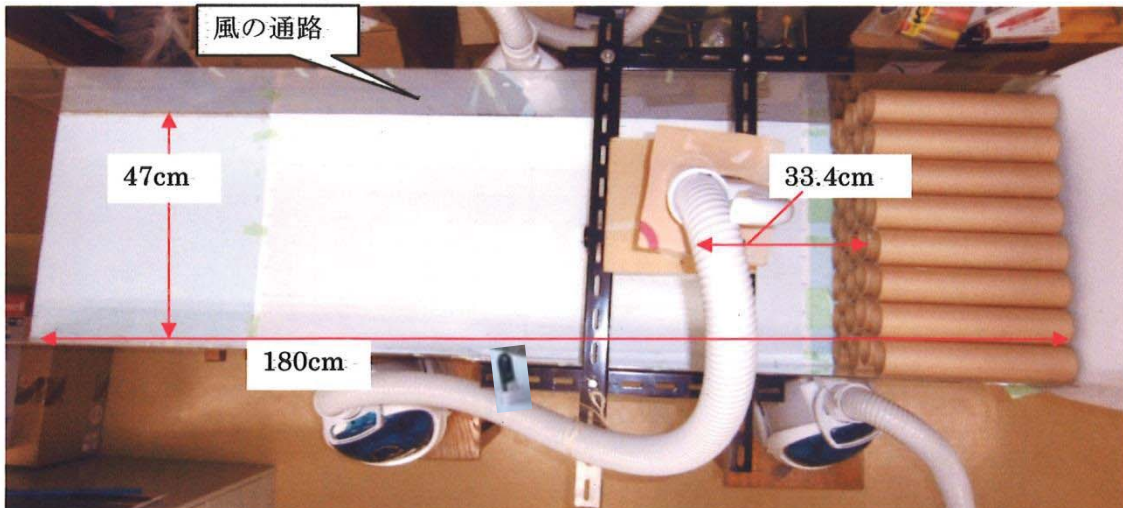


図 3 実験装置 (真上から見た図)

②「孤立した積乱雲モデル」(図4): 厚紙を用いて直径 12.8cm、長さ 37cm の円形の筒を作成し、掃除機 1 台を接続する。

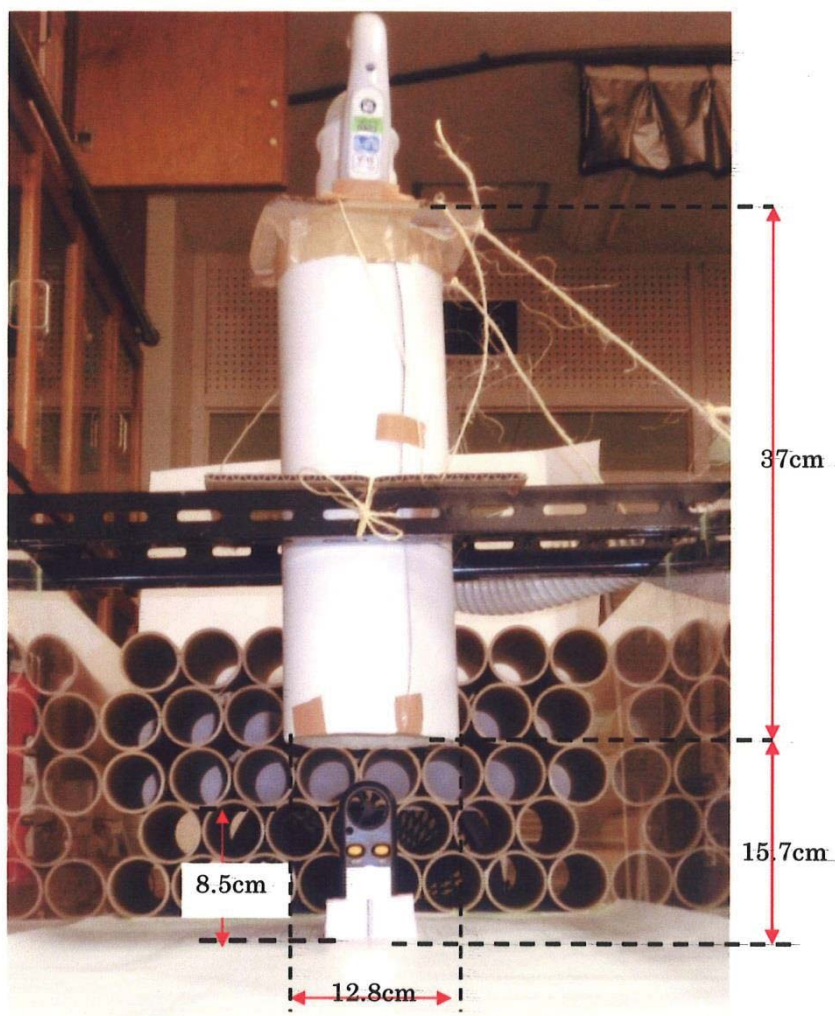


図4 「孤立した積乱雲モデル」
(下端との隙間 15.7cm、風速計はファンの中心が高さ 8.5cm のところにあるように設置)

③整流装置(図5): 乱流である扇風機の風を、整流に近づけるために円形の筒を並べて風を送る。



図5 整流装置

④測定範囲（図6）：「孤立した積乱雲モデル」の中心が円形の筒の先端（風の吹き出し口）から33.4cmになるように固定する。その風上側27cm、風下側73cmの計100cm、左右25cmを測定範囲とし、モデル真下は1cm間隔、その他は5cm間隔で風速を測定する。

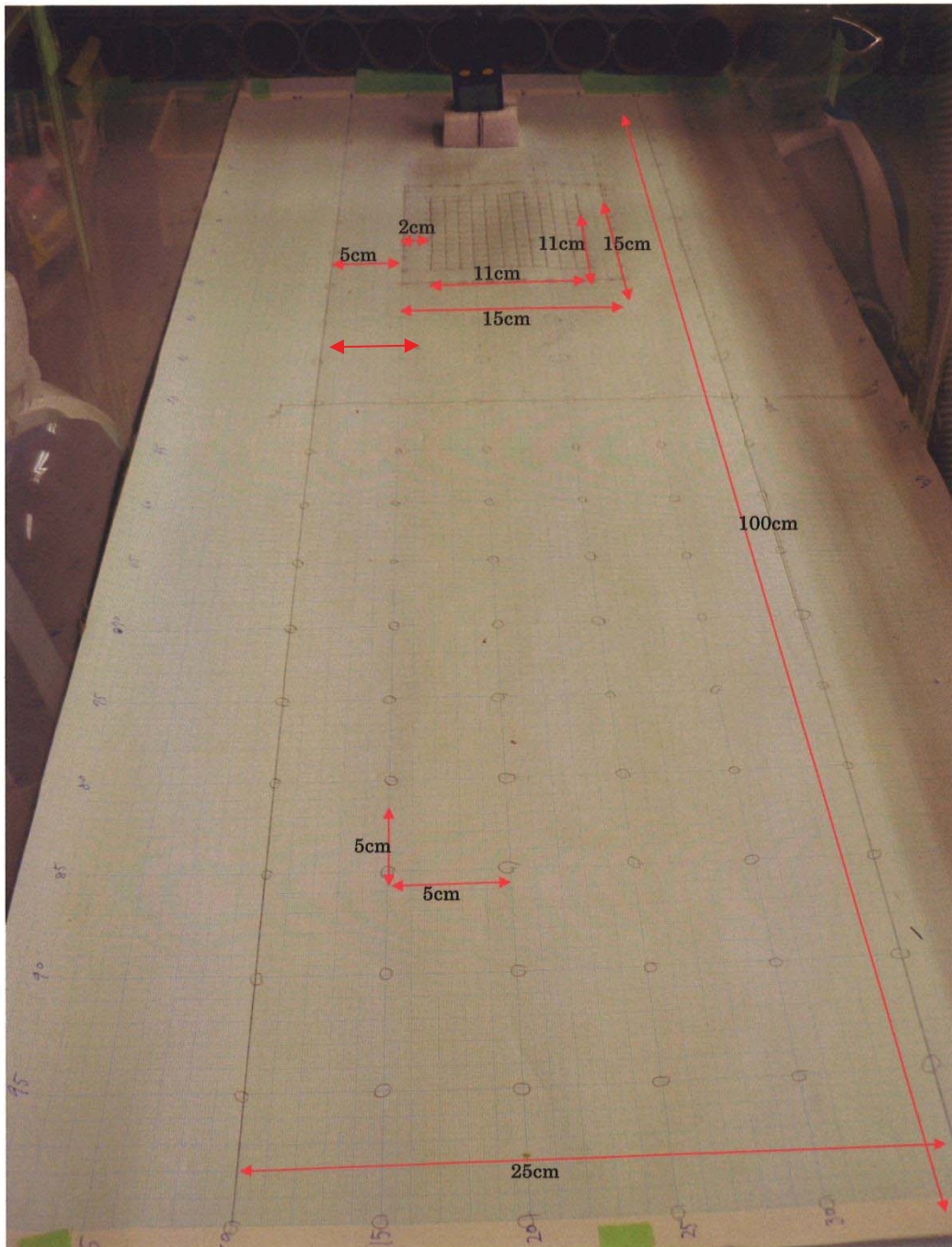


図6 「孤立した積乱雲のモデル実験」風速測定範囲

⑤扇風機の風：台風の風に見立て「孤立した積乱雲モデル」に風がぶつからないように、下12.7cmの隙間から風速計に向けて扇風機の風を送る。

⑥掃除機の吸い上げる力：積乱雲の上昇気流に見立て、掃除機1台の上昇気流を発生させたときの風速の変化率を求め、積乱雲による上昇気流が風速に与える影響を調べる。

ウ 実験順序（扇風機「強」と掃除機1台「中」で実施）

1) 上昇気流が無いときの風速を測定する。

①扇風機の電源を入れて、風を送る。

②測定範囲の風速を測定する。

2) 上昇気流があるときの風速を測定する。

- ① 扇風機の電源を入れて、風を送る。
- ② 掃除機 1 台の電源を入れて上昇気流を発生させる。
- ③ 測定範囲の風速を測定する。

(2) 台風の眼の壁雲のモデル実験

ア 準備

風の通路 (180cm×45cm の断熱材の長辺に 30cm のアクリル板をつけたもの)、扇風機 1 台 (仕事率: 32W)、掃除機 3 台 (仕事率: 610W、610W、590W)、風速計 1 つ (最小単位: 0.1m/s 確度: ±5%)、紐 4 本、鉄棒 4 本、円形の筒 38 個 (直径 5.5cm、長さ 28cm)、段ボール、方眼用紙 1 枚、出席簿の厚紙 4 枚

イ 実験の説明

① モデル実験の再現範囲: 眼の壁雲の通過する前後で、図 7 の矢印の範囲に相当する。

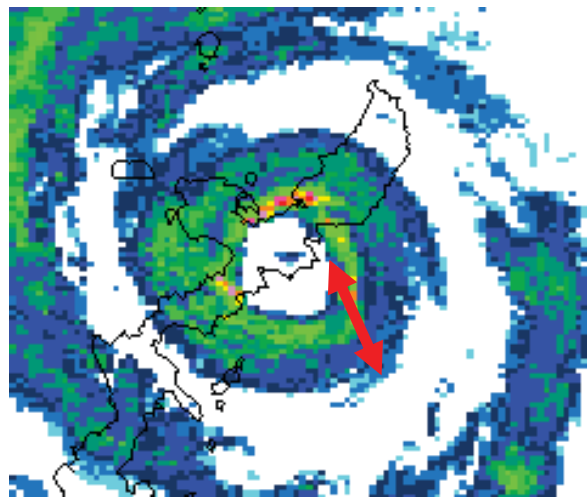


図 7 「眼の壁雲モデル」実験の再現範囲 (赤い矢印内)

② 風の通路 (図 8, 図 9)

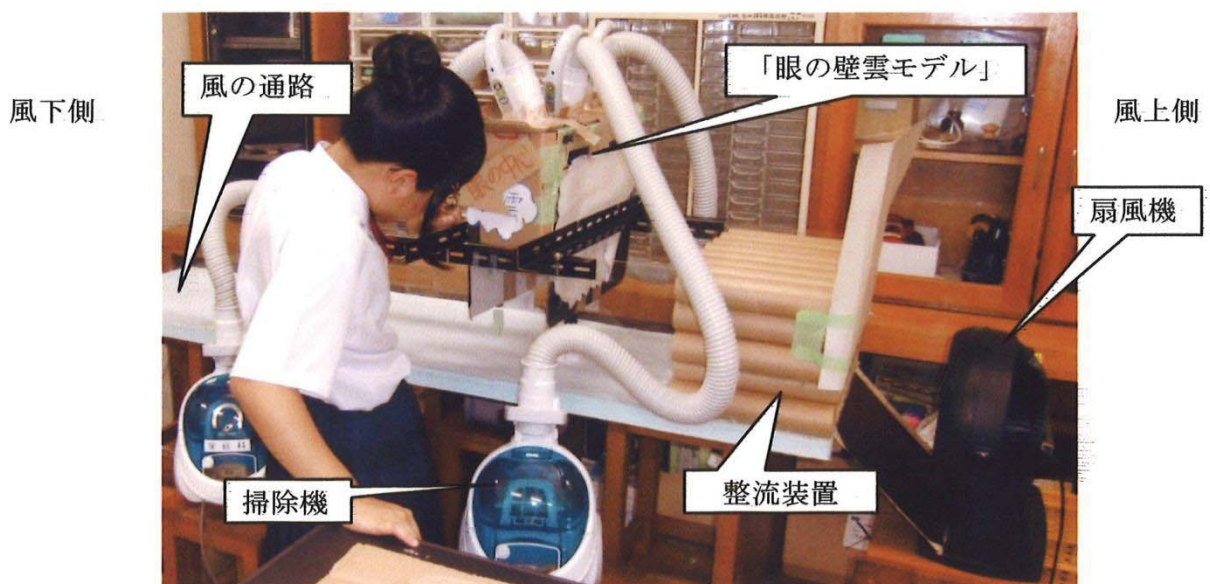


図 8 実験装置 (横から見た図)

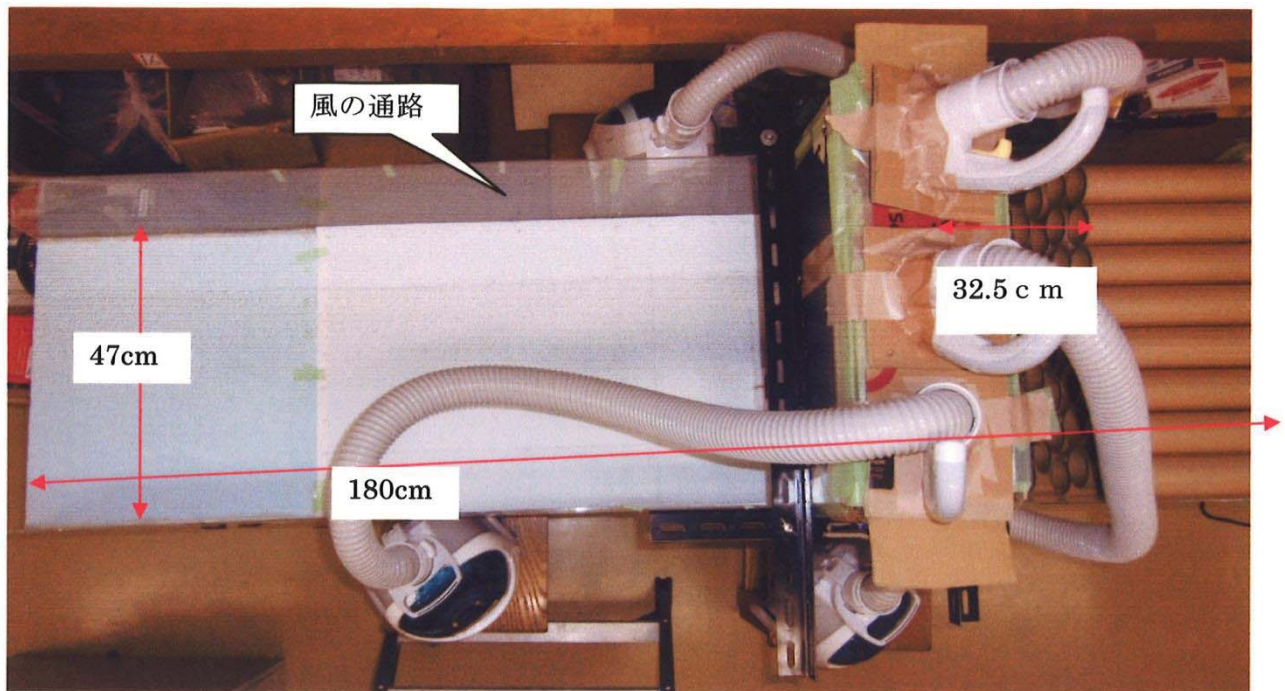


図9 実験装置（真上から見た図）

- ③「壁雲モデル」(図10)：出席簿の厚紙を用いて縦37cm、横44cm、幅14cmの大きさのものを作成し、掃除機3台を接続する。

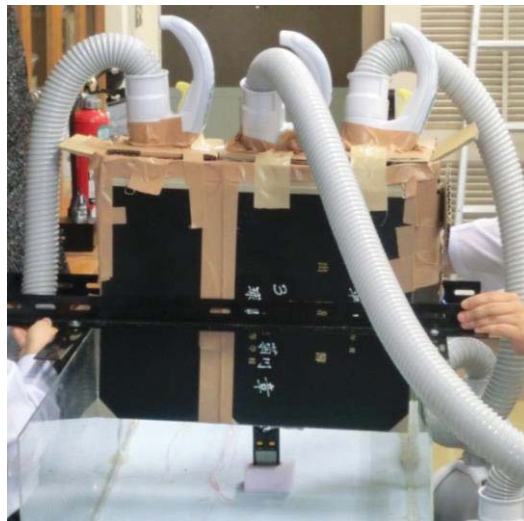


図10 「壁雲モデル」

(下端との隙間11.9cm、風速計はファンの中心が高さ8.5cmのところにあるように設置)

- ④整流装置(図5)
- ⑤測定範囲(図11)：「壁雲モデル」の中心が円形の筒の先端(風の吹き出し口)から32.5cmになるように固定する。その風上側28.5cm、風下側21.5cmの計50cm、左右25cmを測定範囲とし、モデル真下は1cm間隔、その他は5cm間隔で風速を測定する。
- ⑥扇風機の風：台風の風に見立て「壁雲モデル」に風がぶつからないように、下12.7cmの隙間から風速計に向けて扇風機の風を送る。
- ⑦掃除機の吸い上げる力：積乱雲の上昇気流に見立て、掃除機3台の上昇気流を発生させたときの風速の変化率を求め、積乱雲による上昇気流が風速に与える影響を調べる。

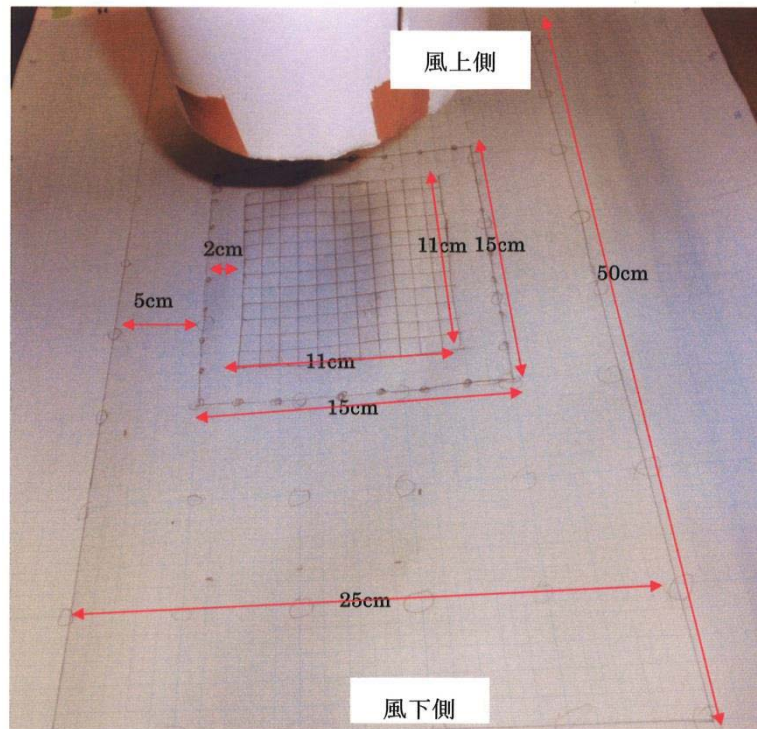


図 11 「眼の壁雲モデル実験」 風速測定範囲

ウ 実験順序 (扇風機「弱」と掃除機3台「中」で実施)

- 1) 上昇気流が無いときの風速を測定する。
 - ①扇風機の電源を入れて、風を送る。
 - ②測定範囲の風速を測定する。
- 2) 上昇気流があるときの風速を測定する。
 - ①扇風機の電源を入れて、風を送る。
 - ②掃除機3台の電源を入れて上昇気流を発生させる。
 - ③測定範囲の風速を測定する。



図 12 実験に用いた掃除機(仕事率:左から 610W, 590W, 610W)と扇風機(仕事率: 32W)

(3) 積乱雲モデル周辺の気圧測定

エコログ(気圧センサーの分解能:1.2hPa 誤差:±15hPa)を用いて気圧の変化の測定を試みたが、気圧の変化は気圧センサーの分解能を下回っていた。

3. 結果

(1) 孤立した積乱雲のモデル実験

測定範囲の風速は末尾の資料、表 1～3 参照。

「孤立した積乱雲モデル」周辺の風速が「孤立した積乱雲モデル」の上昇気流を発生させたことにより何%増減したかを求めた。風速の変化率分布図を等高線図で作成したところ図 13～図 15 のようになった。(図中の円は「孤立した積乱雲モデル」の位置を表す。)

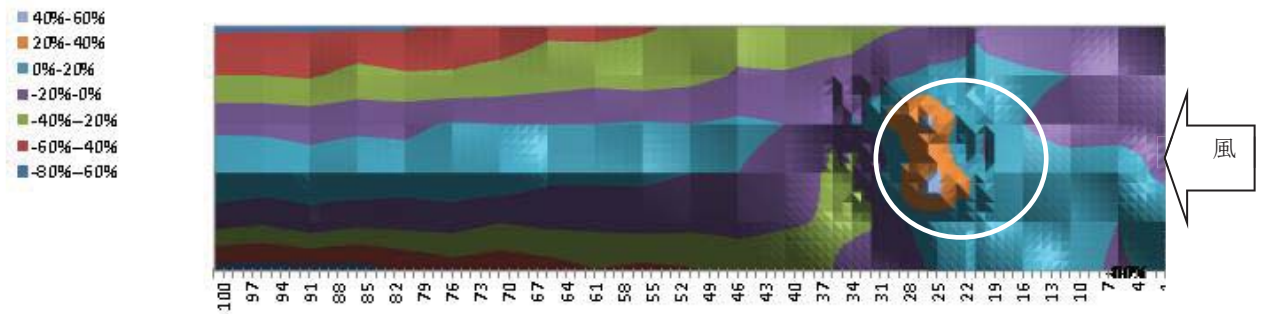


図 13 風速の変化率 (真上からみた図 図中の○は「孤立した積乱雲モデル」を表す。)

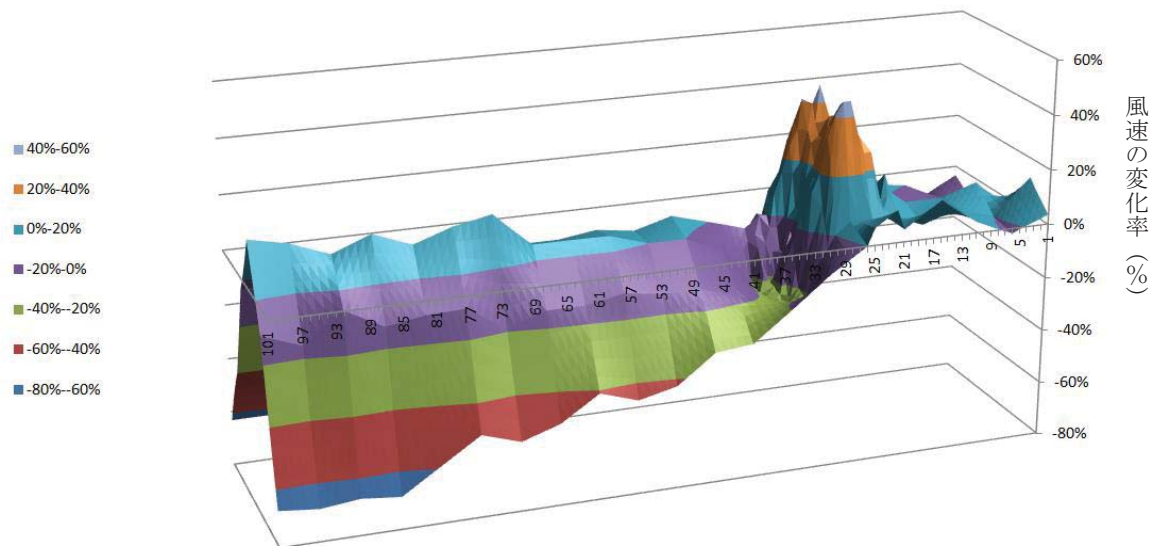


図 14 風速の変化率 (斜め上からみた図)

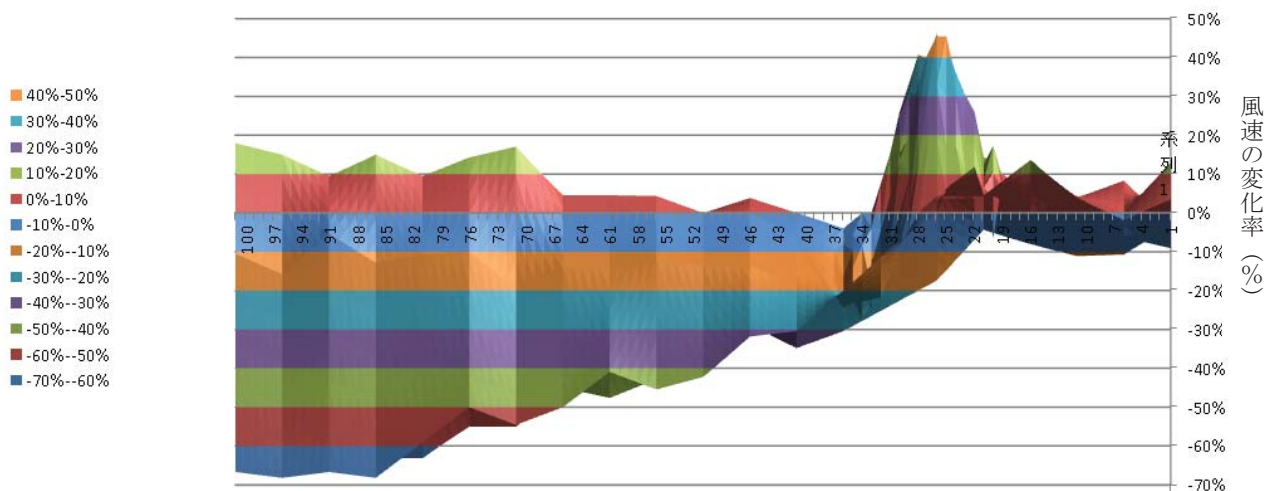


図 15 風速の変化率 (真横からみた図)

(2) 台風の眼の壁雲のモデル実験

測定範囲の風速は、末尾の資料表 4～表 6 参照。

「壁雲モデル」周辺の風速が「壁雲モデル」の上昇気流を発生させたことにより何%増減したかを求めた。風速の変化率分布図を等高線図で作成したところ図 16～図 18 のようになった。(図中の四角形は「壁雲モデル」の位置を表す。)

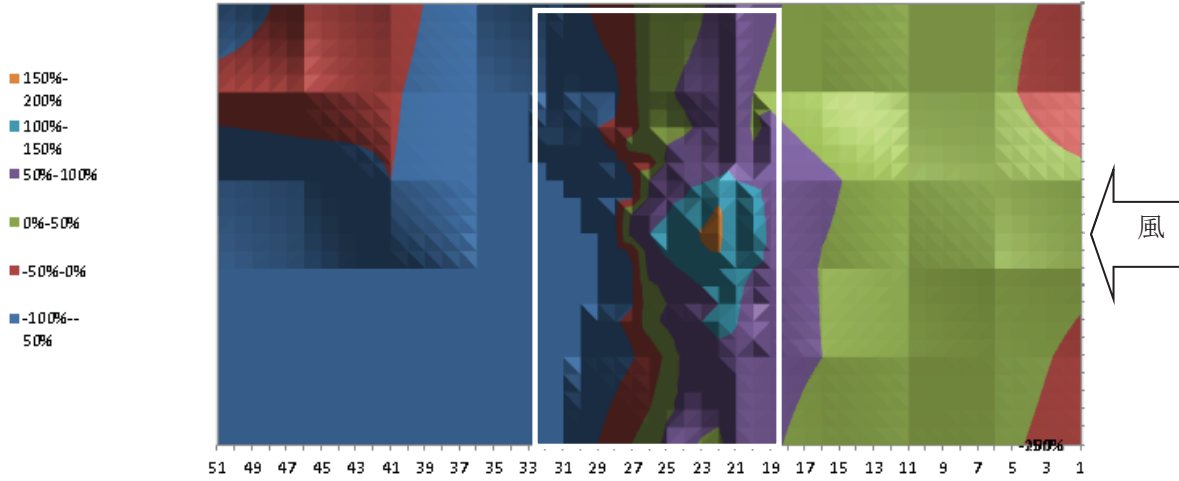


図 16 風速の変化率 (真上からみた図 図中の□は「壁雲モデル」を表す。)

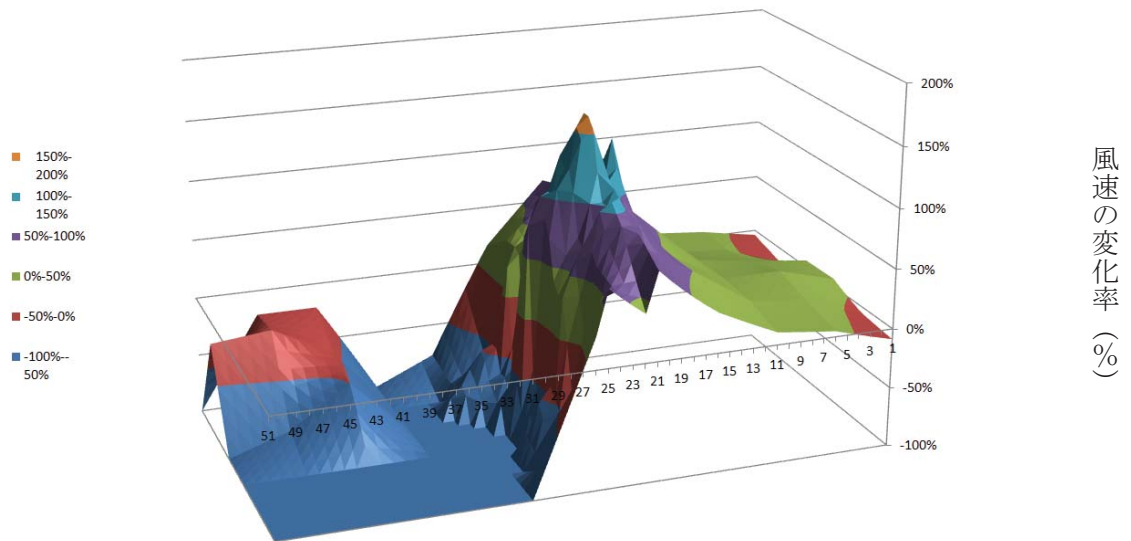


図 17 風速の変化率 (斜め上からみた図)

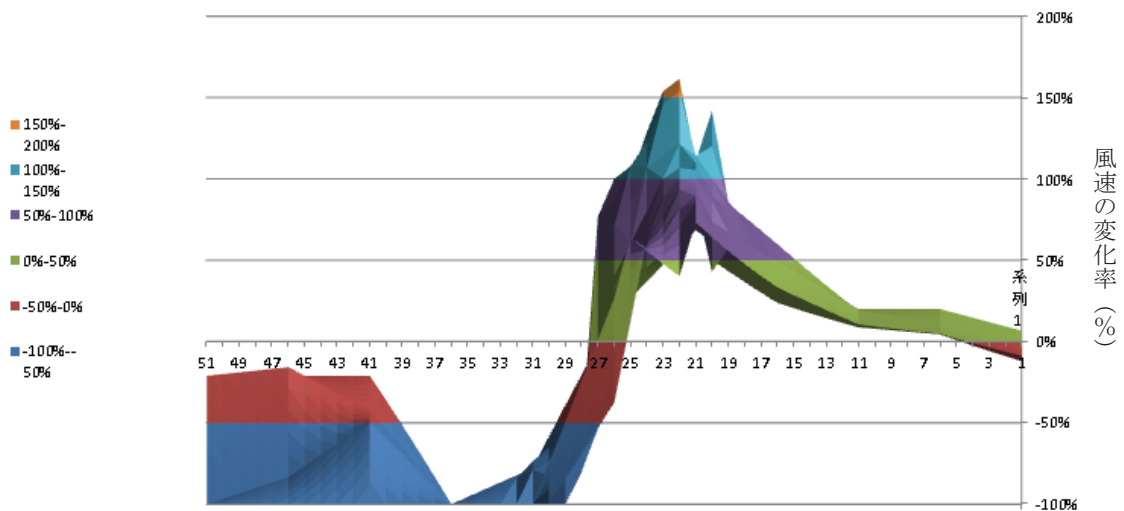


図 18 風速の変化率 (真横からみた図)

4. 考察

(1) 孤立した積乱雲のモデル実験

風速の変化率が+20%以上の範囲（グラフ橙、水色）を風が強まった範囲とする。図16～図18より積乱雲モデルの真下で風速の変化率が増加していることが分かる。この結果から、積乱雲モデルの真下ではその上昇気流によって局地的な低圧部が形成されていると推定できる（図19）。その低圧部の気圧傾度力の影響で風速が変化したと考えられる。

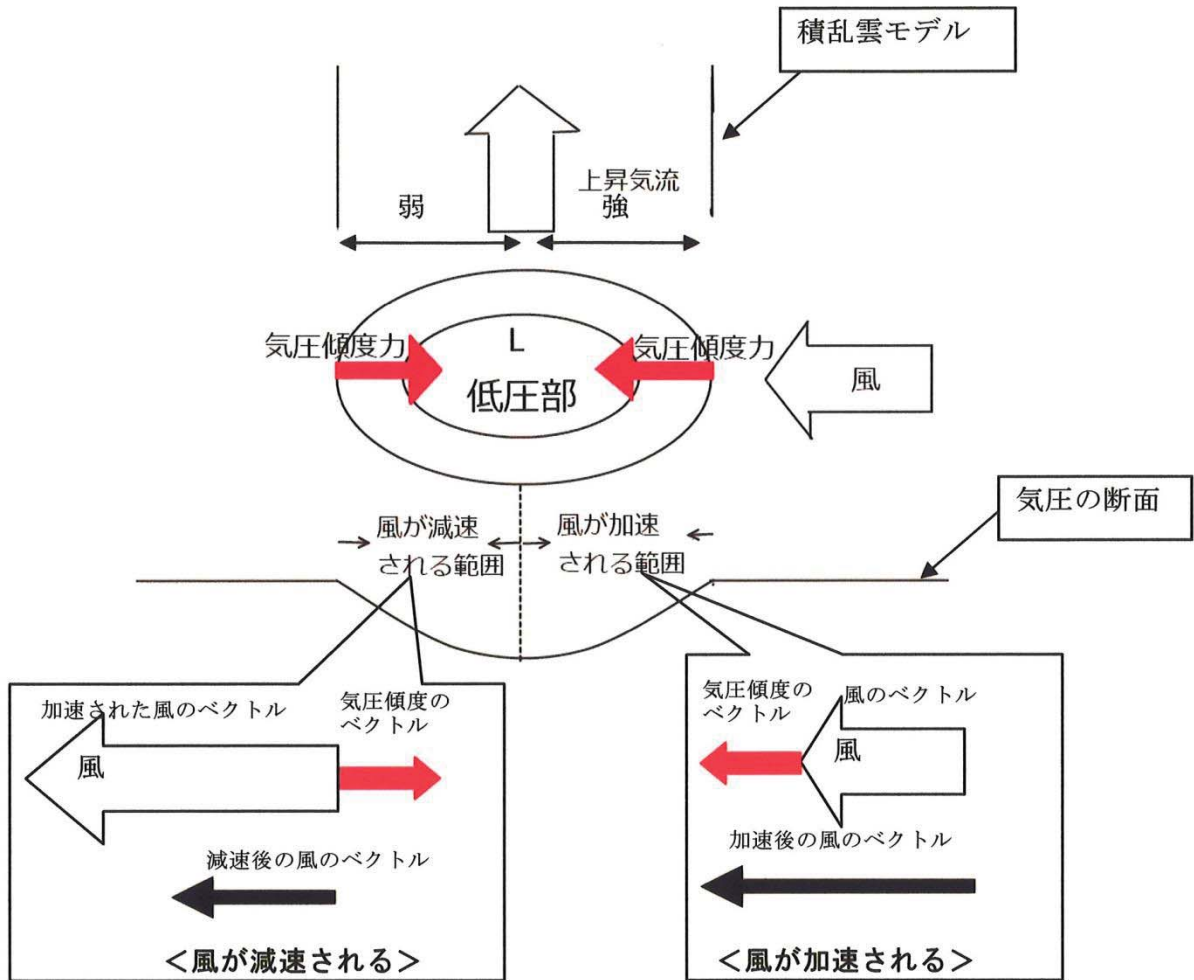


図19 積乱雲モデル真下周辺の低圧部が風速に与える影響を示す模式図

図20のように実際の積乱雲では、①積乱雲中で水蒸気が凝結する際に潜熱が放出され、暖かく軽い空気が形成され上昇し、上空で気圧差が生じる。風は高圧側から低圧側へ流れるため、②上空で空気が吹き出る（発散）。③地上付近で積乱雲の真下に空気が集まり（収束）、集まった空気は上昇する。この空気の循環によって実際の積乱雲の真下周辺には、低圧部が形成されると考えられる。モデル実験では、暖かい空気を形成することができないため、①掃除機の吸い上げる力を用いて②上昇気流を発生させる。③積乱雲モデル真下周辺の空気は積乱雲モデルに集まり（収束）、集まった空気は上昇する。この空気の循環によって積乱雲モデル真下周辺でも、局地的な低圧部が形成されると考えられる。

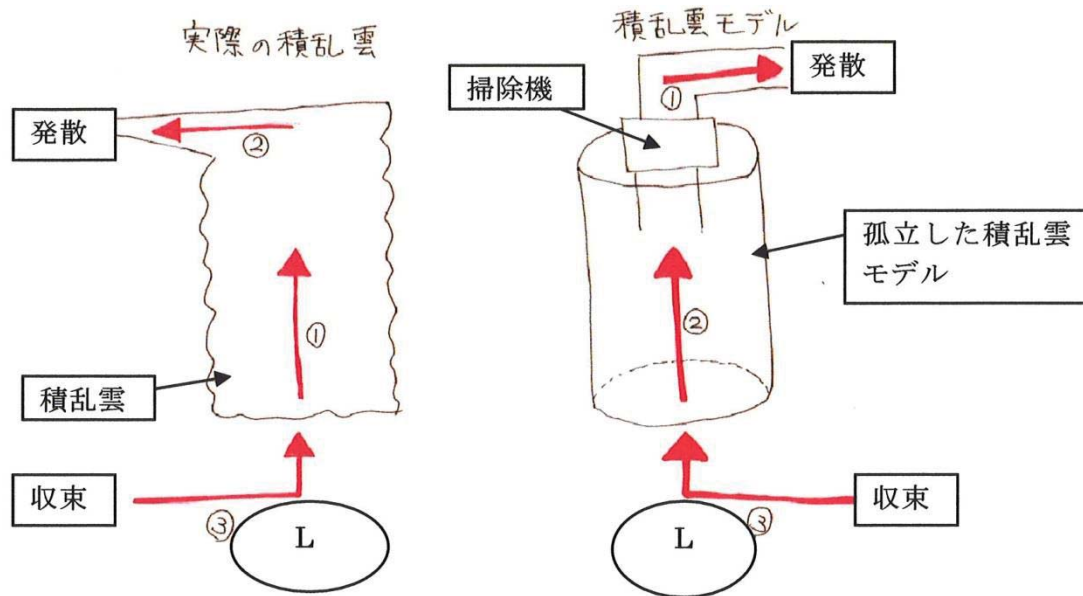


図 20 実際の積乱雲（左）と「積乱雲モデル」（右）の真下周辺に形成される低圧部を横から見た図（図中の赤い矢印は空気の流れを表す）

しかし、気圧センサーで積乱雲モデル真下の気圧変化を検出することはできなかった。その理由は、実際の積乱雲の上昇気流が吸い上げる空気の量と、モデル実験における積乱雲モデルの上昇気流が吸い上げる空気の量の違いであると考えられる。実際の積乱雲は圏界面まで達するスケールであるのに対して、積乱雲モデルはわずか約 50cm のスケールである。気圧は空気の重さによる圧力であるから、吸い上げる空気の量が多い程地上での気圧は小さくなる。したがって、モデル実験では気圧センサーで検出できるほどの気圧の変化は無かったと考えられる。

図 13～図 15 より、「孤立した積乱雲モデル」の真下を通過するとき風が強くなっていくことが分かる。これは低圧部の風上側では風の向きと気圧傾度力の向きが一致するためであると考えられる（図 19）。また、図 13～図 15 より「孤立した積乱雲モデル」通過後に、風が弱まっていくことが分かる。これも、積乱雲モデルの真下に形成された局地的な低圧部の気圧傾度力の影響であると考えられる。低圧部の風下側では風の向きと気圧傾度力の向きが逆であるためであるため、風は減速されると考えられる（図 19）。また、図 13～図 15 より「孤立した積乱雲モデル」の風下側で風速が波のように変化していることが分かる。これは、「孤立した積乱雲モデル」の真下で風速が変化したことが風下側に影響したためであると考えられる。

次に、実験結果を実際の台風と比較して検証する。2012 年 17 号の沖縄気象台（那覇市樋川）観測の平均風速の時系列変化グラフ（図 21）と気象レーダーによる 5 分毎の降水強度分布を用いて調べた。なお、使用した平均風速値は毎正時前 10 分間の風速の平均値である。したがって、解析には 1 つの時刻に対して、前 10 分間の 2 枚の気象レーダーによる 5 分毎の降水強度分布を用いた。

前後 50 分間の移動平均の風速と比較して強い風が吹いていた 6:20（図 22）（グラフ中 A）、7:50（図 23）（グラフ中 B）、9:00（図 24）（グラフ中 C）について、気象レーダーによる 5 分毎の降水強度分布を用いて沖縄気象台（那覇市樋川）周辺の積乱雲分布を調べた。気象レーダーによる 5 分毎の降水強度分布中の黄色い星は沖縄気象台、赤い矢印は風の向きを表している。

6:20 (A) 気象台周辺に赤や黄色で示された強い積乱雲は見られない。実験結果とは一致していない。

7:50 (B) 気象台の風下側間近に赤や黄色で示された強い積乱雲が見られる。実験結果と一致している。

9:00 (C) 気象台の風下側間近に赤や黄色で示された強い積乱雲が見られる。実験結果と一致している。

風速が強くなった A, B, C について積乱雲分布を調べた結果、3 回中 2 回に実験結果通り観測点の風下間近に積乱雲が見られた。この 2 回については、積乱雲の真下に形成された局地的な低圧部の気圧傾度力の影響で強い風が吹いたと考えられる。

台風17号の平均風速 (m/s)

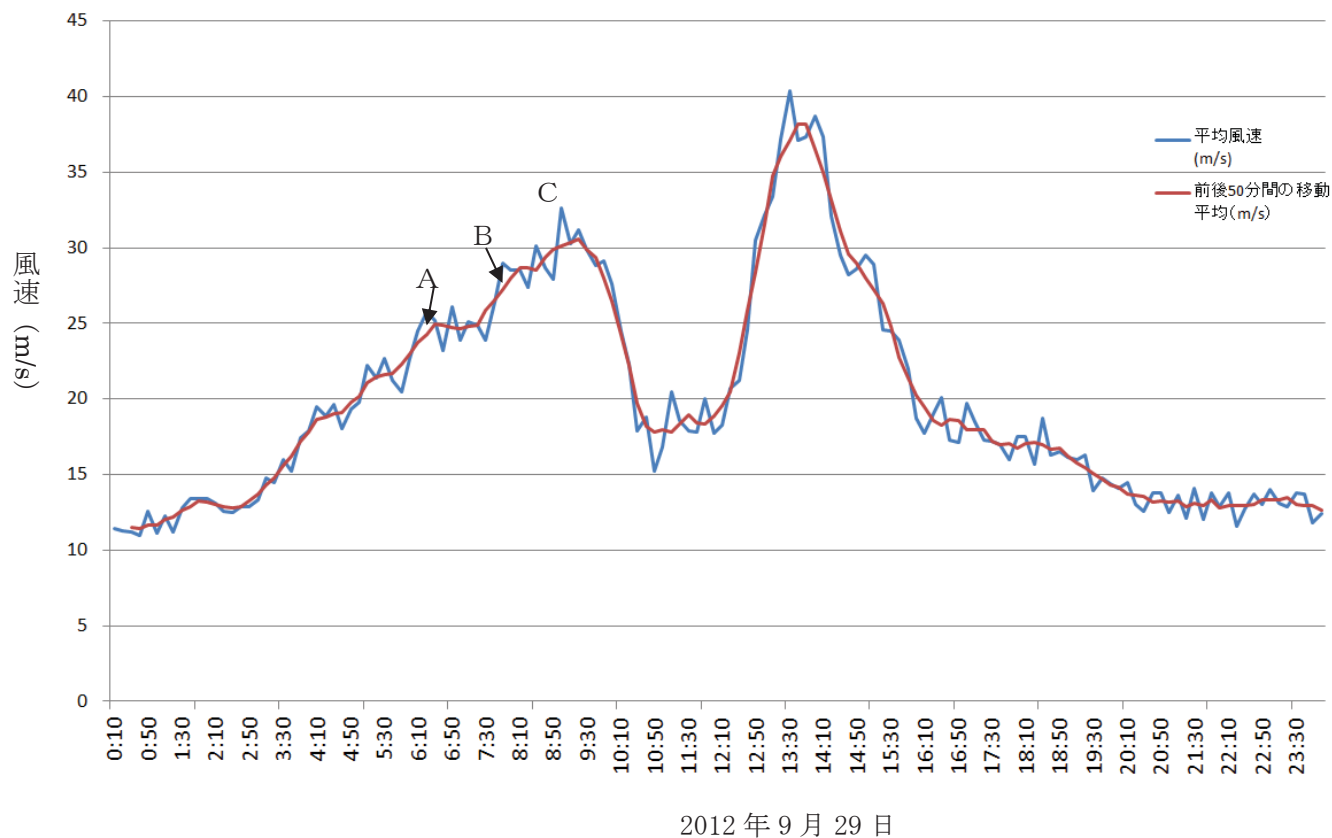


図 21 台風 17 号平均風速の時系列変化

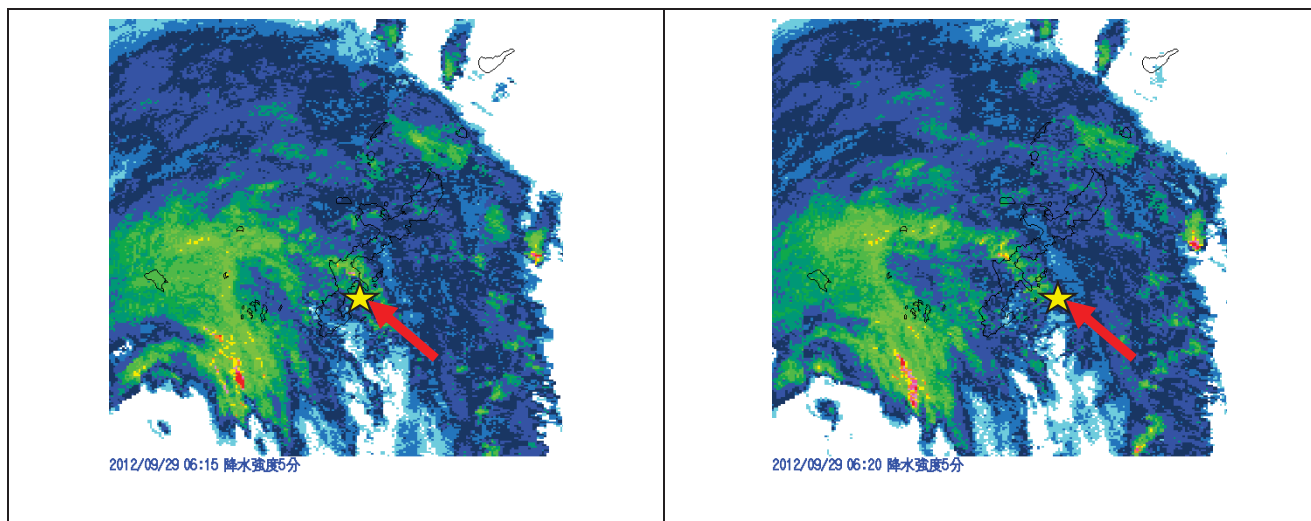


図 22 2012年9月29日気象レーダーによる5分毎の降水強度分布 (左 6:15 右 6:20)
 (画像中の黄色い星は沖縄気象台(那覇市樋川)を、赤い矢印は風の向きを表している。以下同様)

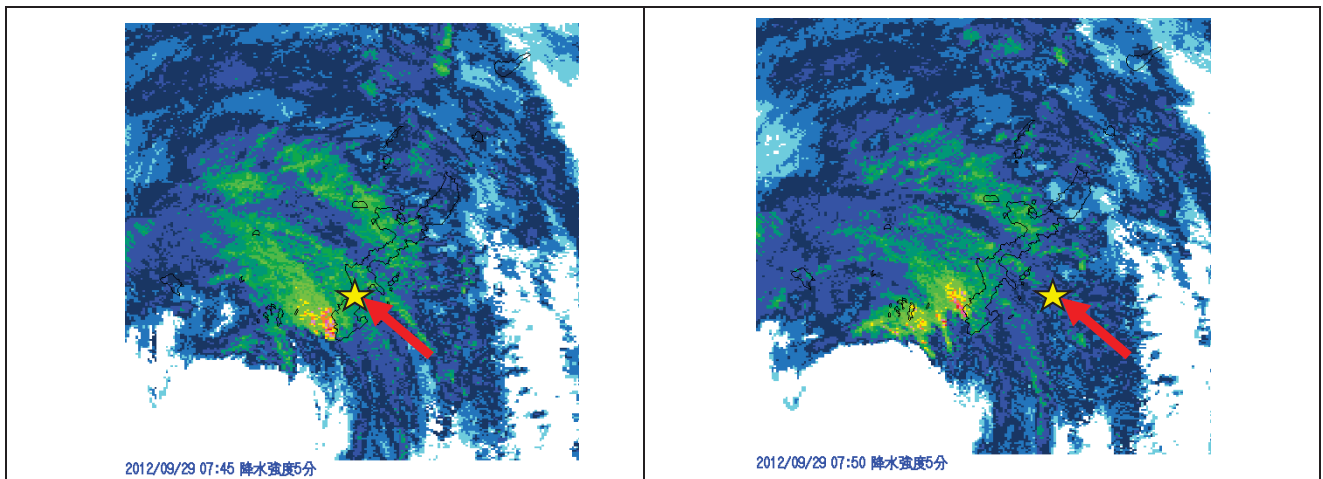


図 23 2012 年 9 月 29 日気象レーダーによる 5 分毎の降水強度分布 (左 7:45 右 7:50)

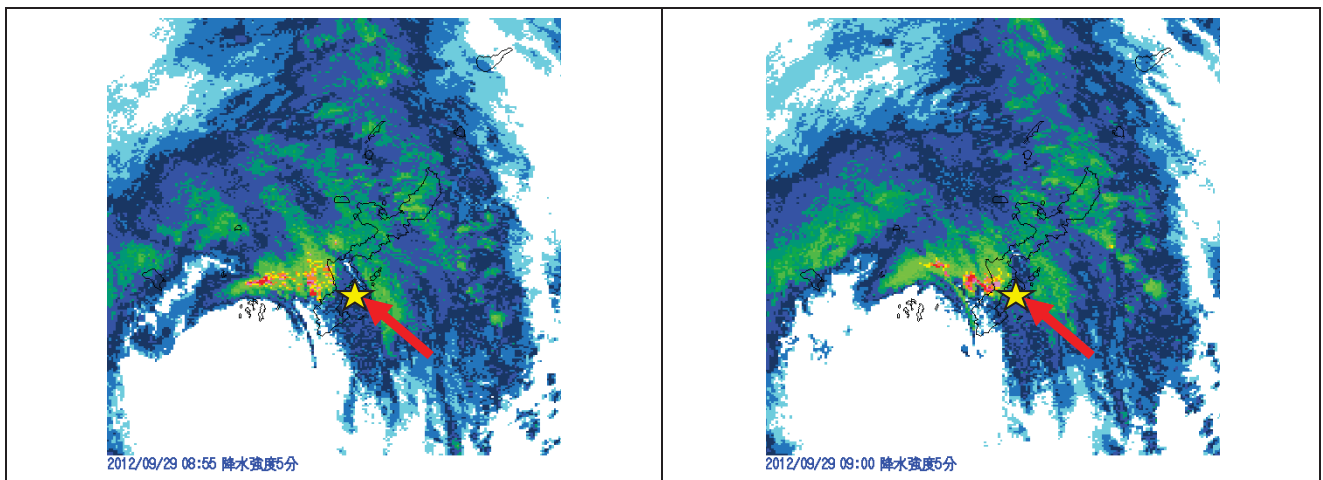


図 24 2012 年 9 月 29 日気象レーダーによる 5 分毎の降水強度分布 (左 8:55 右 9:00)

(2) 台風の眼の壁雲のモデル実験

風速の変化率が+50%以上の範囲（グラフ紫、水色、橙）を風が強まった範囲とする。「壁雲モデル」実験でも周辺の風速変化率は「(1)」と同様に、壁雲モデルの真下で増加している。この結果から、壁雲モデルの真下では、上昇気流によって局地的な低圧部が形成されていると推定できる（図 19）。

図 16～図 18 より、「壁雲モデル」の真下を通過するとき風が強くなっていくことが分かる。これは、壁雲の上昇気流によってその真下周辺に形成された低圧部（図 19）の気圧傾度力の影響であると考えられる。低圧部の風上側では風の向きと気圧傾度力の向きが一致するため風は加速される。また、図 16～図 18 より「壁雲モデル」通過後に風速の変化率が-100%（無風）になっていることが分かる。これは、送り込まれた風のほとんどが、「壁雲モデル」の上昇気流によって上に移動させられ、風下側に風が通り抜けなかったためであると考えられる。

次に、実験結果を実際の台風と比較して検証する。2012 年台風 17 号の沖縄気象台観測の平均風速の時系列変化グラフと「台風の眼の壁雲のモデル実験」の風速変化率グラフを比較したところ（図 25）、同様の風速変化が見られた。したがって、このモデル実験は実際の眼の壁雲周辺の風速変化を再現していると考えられる。

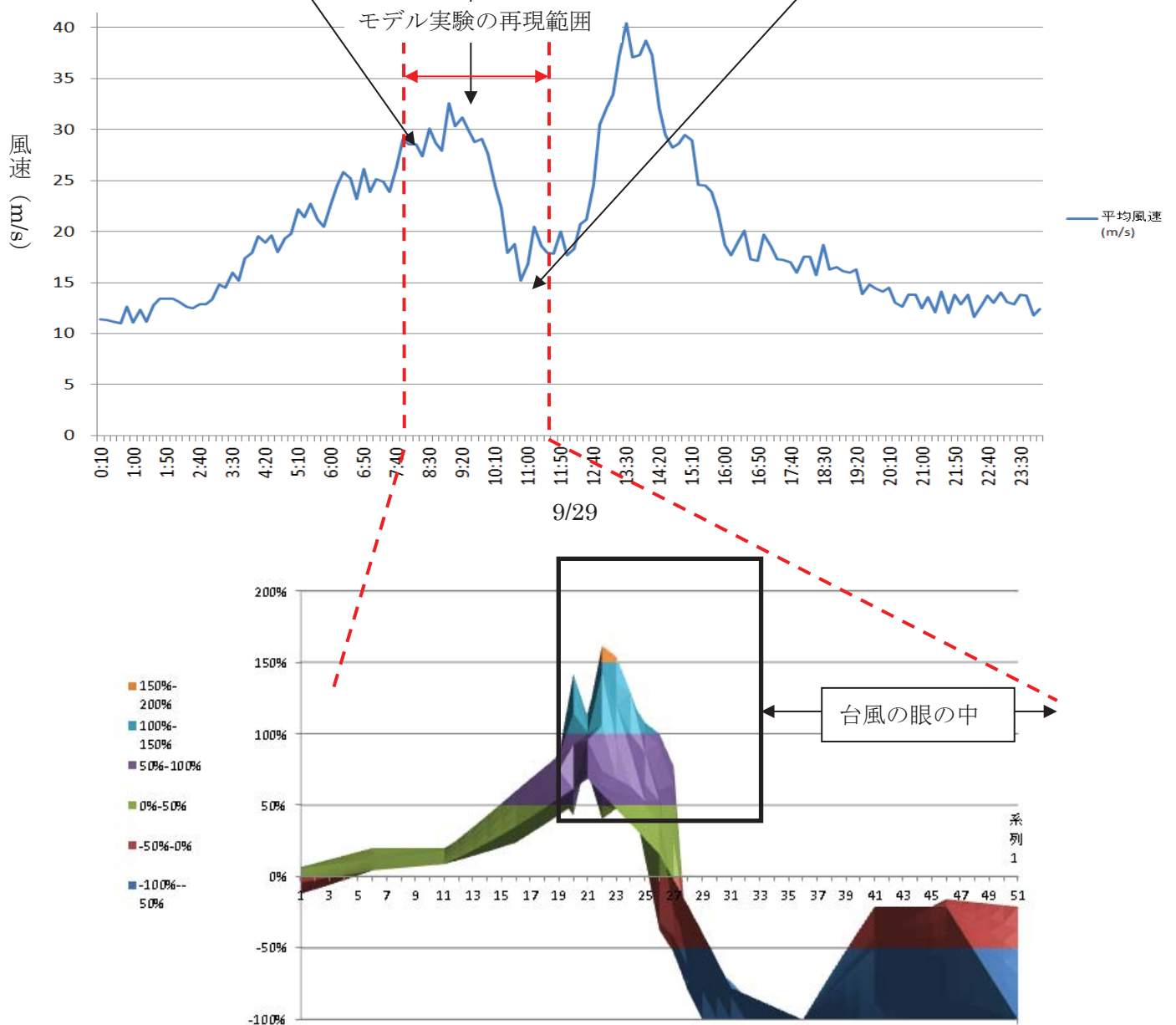
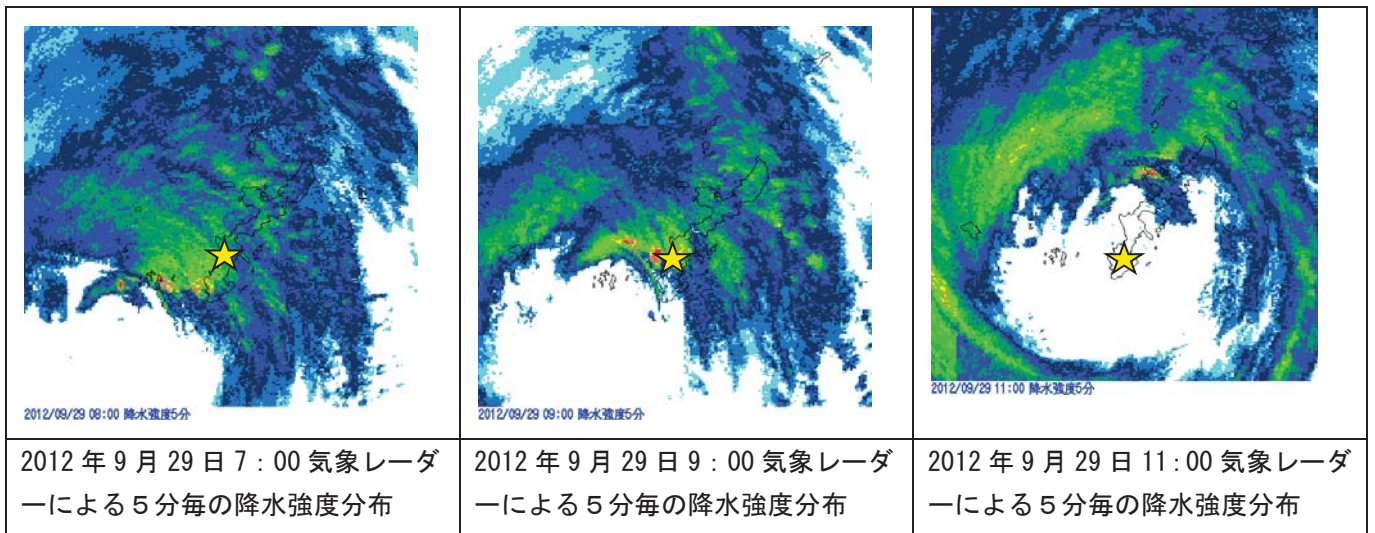


図 25 台風 17 号の風速の時系列変化グラフ (上) と「台風の眼の壁雲のモデル実験」の風速変化率グラフ (下) の比較 (図中の四角形は「壁雲モデル」の位置を表す)

実際の台風において眼の壁雲の周辺で風が強まるのは、壁雲を構成する積乱雲の上昇気流によって形成された低圧部の気圧傾度力が影響しているからだと考えられる。また、眼の内側で風が弱まるのは風のほとんどが壁雲の上昇気流によって、上空へ移動させられるからだと考えられる。

5. 結論

風速のモデル実験と気象レーダーによる5分毎の降水強度分布を用いた解析を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 孤立した積乱雲の真下周辺では、積乱雲の上昇気流によって局地的な低圧部が形成されるため、気圧傾度力の影響で風は強まる。したがって、台風で積乱雲が通過するときには風は強まる。
- (2) 眼の壁雲の真下周辺では、壁雲を構成する積乱雲の上昇気流によって局地的な低圧部が形成されるため、眼の壁雲周辺で風は最も強くなる。また、強まった風は壁雲の上昇気流によって上空に運ばれるため、眼の壁雲の内側では風は弱くなる。

6. 課題

今後の課題として以下のものが挙げられる。

- (1) 時間が足りなかったため、扇風機と掃除機の強さの組み合わせを変えた実験を行うことができなかった。
- (2) 今回使用した2012年台風17号の平均風速観測データは、インターネットから入手した10分毎のものであり、積乱雲通過時の気圧の変化が分からなかった。より時間間隔の細かいデータを入手して解析する必要がある。

7. 参考文献

- ・「沖ノ島島で観測した台風9713号の眼」(海洋技術センター 中埜岩男ほか)、海洋技術センター試験研究報告 第41号
- ・「沖縄地方における台風接近時の最大瞬間風速に関する研究 事例解析1」(沖縄気象台 大城栄勝ほか)
- ・「台風第14号グラフデータ」(宮古島気象台ホームページ)
<http://www.jma-net.go.jp/miyako/kakosiryou/ty0314/ty0314graph/ty0314graph.htm>、
アクセス日：2013.1.8
- ・「過去天気」(日本気象協会)
<http://tenki.jp/past/>、アクセス日：2013.1.8
- ・「デジタル台風」(国立情報学研究所)
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>、アクセス日：2013.1.8
- ・「Labs Channel」(weathernews)
<http://labs.weathernews.jp/>、アクセス日：2013.1.8
- ・沖縄タイムス 2012.8.25～29
- ・琉球新報 2012.9.16～18
- ・琉球新報 2012.9.22～10.2

表1 「孤立した積乱雲の再現実験」 掃除機の電源を入れていないときの風速 (m/s)

(黄色は実測したポイントを表す。その他のポイントは内挿して求めた。○は「孤立した積乱雲モデル」を表す。以下同様)

x \ y	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5
0	2.9	3.0	3.1	3.1	3.2	3.3	3.2	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
1	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2	3.3	3.1	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
2	2.9	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.1	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
3	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.2	3.1	3.0	2.8	2.7	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
4	2.8	2.9	3.0	3.1	3.1	3.2	3.1	2.9	2.8	2.7	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
5	2.8	2.9	3.0	3.0	3.1	3.2	3.1	2.9	2.8	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
6	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.2	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7
7	2.8	2.8	2.9	3.0	3.0	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7
8	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6
9	2.7	2.8	2.8	2.9	3.0	3.0	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6
10	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5
11	2.7	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4
12	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4
13	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	2.9	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
14	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
15	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
16	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
17	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
18	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
19	2.3	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2	3.0	2.8	2.6	2.7	2.9	3.0	2.7	2.5	2.4	2.3	2.4	2.5	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
20	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
21	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1	3.0	2.8	2.6	2.7	2.8	2.9	2.7	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
22	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.0	2.8	2.6	2.7	2.9	2.8	2.7	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
23	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.0	2.7	2.6	2.6	2.8	2.8	2.6	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
24	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.0	2.7	2.6	2.6	2.8	2.8	2.6	2.4	2.3	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
25	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.0	2.7	2.6	2.7	2.8	2.7	2.6	2.5	2.3	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
26	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.4	2.3	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
27	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	2.9	2.7	2.7	2.6	2.6	2.7	2.6	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
28	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	3.0	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
29	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.4	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
30	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.3	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
31	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.4	2.3	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2
32	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.6	2.3	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
33	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.8	2.6	2.6	2.6	2.4	2.5	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
34	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2
35	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.8	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
36	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
37	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
38	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3

82	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	
83	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2		
84	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2		
85	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	2.2		
86	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2		
87	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2		
88	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	
89	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	
90	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	
91	1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	
92	1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	
93	1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	
94	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	
95	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	
96	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2	
97	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	2.2
98	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	
99	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	
100	1.9	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1	

表2 「孤立した積乱雲の再現実験」 掃除機の電源を入れたときの風速 (m/s)

x \ y	x																										
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	
0	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	
1	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.8	2.9	
2	2.7	2.7	2.8	2.9	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.8	
3	2.6	2.7	2.8	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.6	2.7	2.8	
4	2.6	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.7	
5	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	
6	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	
7	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	
8	2.4	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	
9	2.4	2.5	2.7	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	
10	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6	
11	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	2.6	
12	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	
13	2.3	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.5	
14	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	
15	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	
16	2.3	2.4	2.6	2.7	2.8	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5	2.5	2.4	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	
17	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	2.9	2.9	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	
18	2.2	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	
19	2.2	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.2	3.4	3.3	3.1	2.8	2.7	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	
20	2.2	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3
21	2.1	2.3	2.4	2.6	2.7	2.9	3.2	3.4	3.3	3.2	3.0	2.9	2.9	3.0	3.0	2.8	2.9	2.9	2.7	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	
22	2.1	2.2	2.4	2.5	2.7	2.9	3.1	3.4	3.4	3.3	3.0	3.0	3.0	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.7	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	
23	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.8	3.1	3.4	3.5	3.4	3.4	3.3	3.4	3.5	3.4	3.2	3.1	3.0	3.0	2.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	
24	2.0	2.1	2.3	2.5	2.6	2.8	3.1	3.5	3.7	3.6	3.5	3.5	3.6	3.7	3.6	3.4	3.3	3.2	3.0	2.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	
25	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6	2.8	3.2	3.6	3.8	3.8	3.8	3.6	3.7	3.7	3.5	3.4	3.3	3.2	3.0	2.7	2.4	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	
26	1.9	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.2	3.6	3.8	3.8	3.7	3.6	3.5	3.5	3.4	3.2	3.1	3.1	3.0	2.7	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	
27	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.7	3.1	3.5	3.8	3.8	3.6	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0	2.8	2.6	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.1	
28	1.8	2.0	2.1	2.3	2.5	2.7	3.0	3.4	3.6	3.6	3.4	3.1	3.1	3.0	2.9	2.7	2.7	2.7	2.5	2.4	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	
29	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6	2.9	3.3	3.3	3.4	3.3	3.0	2.7	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	
30	1.8	1.9	2.1	2.3	2.4	2.6	2.8	3.0	3.1	3.1	3.0	2.6	2.6	2.5	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
31	1.7	1.9	2.0	2.2	2.3	2.5	2.7	2.9	3.0	2.8	2.8	2.5	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	2.0	
32	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.6	2.6	2.5	2.2	2.1	1.9	2.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.9	
33	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.6	2.6	2.4	2.2	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9	
34	1.6	1.8	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.4	2.2	2.1	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	
35	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3	2.1	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	
36	1.6	1.7	1.9	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	
37	1.6	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.5	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	
38	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	
39	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.6	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.7	1.6	

83	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	1.0	0.8
84	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
85	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
86	0.7	0.9	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
87	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.9	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
88	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
89	0.7	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5	1.7	1.9	2.0	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.3	1.1	0.9	0.7
90	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.1	0.9	0.7
91	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
92	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
93	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
94	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.6	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
95	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.0	1.9	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1	0.9	0.7
96	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	0.9	0.7
97	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.6	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
98	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
99	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7
100	0.7	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.1	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7

表3 「孤立した積乱雲の再現実験」 掃除機の電源を入れたときの風速の変化率 (%)

x \ y	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
0	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-1	3	6	10	13	11	9	7	5	4	
1	-5	-6	-6	-7	-8	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-2	1	3	6	8	10	9	7	5	4	3	
2	-6	-7	-7	-7	-8	-8	-7	-7	-6	-5	-5	-4	-3	-1	0	1	2	4	5	6	8	6	5	4	3	1	
3	-8	-8	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-6	-6	-5	-4	-2	0	2	3	4	4	4	5	5	4	3	2	1	0	
4	-9	-9	-8	-8	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-6	-3	-1	1	3	6	5	5	4	3	3	2	1	0	0	-1	
5	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-3	0	2	5	8	7	5	3	2	0	0	-1	-1	-2	-2	
6	-11	-10	-8	-7	-6	-5	-5	-5	-5	-5	-6	-3	0	2	5	7	6	5	4	2	1	1	0	0	0	-1	
7	-11	-9	-8	-6	-5	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-3	-1	2	4	7	6	5	4	3	2	1	1	1	1	0	
8	-11	-9	-7	-6	-4	-3	-3	-3	-4	-4	-5	-3	-1	1	4	6	5	5	4	3	3	2	2	2	2	2	
9	-11	-9	-7	-5	-3	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-3	-1	1	3	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	
10	-11	-9	-6	-4	-2	0	-1	-1	-2	-3	-4	-2	-1	1	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
11	-11	-8	-6	-4	-2	0	0	-1	-2	-2	-3	-2	0	1	3	4	4	4	4	4	3	4	4	5	5	6	
12	-10	-8	-5	-3	-1	1	0	0	-1	-2	-2	-1	0	1	3	4	4	3	3	3	3	3	4	5	6	7	8
13	-9	-7	-5	-3	-1	1	1	0	0	-1	-2	0	1	2	3	4	4	3	3	2	2	3	5	6	8	9	
14	-9	-6	-4	-2	0	1	1	1	0	0	-1	0	1	2	3	4	3	3	2	2	1	3	5	7	9	12	
15	-8	-6	-4	-2	0	2	1	1	1	0	0	1	2	2	3	4	3	2	2	1	0	3	5	8	11	14	
16	-7	-5	-3	-1	0	2	2	2	2	2	2	3	4	4	5	6	5	4	3	2	1	3	5	7	10	12	
17	-7	-4	-3	-1	1	3	3	3	4	4	5	5	6	7	7	8	7	6	5	3	2	4	5	7	8	10	
18	-6	-4	-2	0	2	3	4	4	5	6	7	8	8	9	9	10	9	7	6	5	3	4	5	6	7	8	
19	-5	-3	-1	0	2	3	5	6	8	11	9	0	-4	-7	1	10	14	17	10	4	4	5	5	6	6	6	
20	-4	-2	1	3	5	7	8	9	10	11	12	12	13	13	14	14	12	10	8	6	4	4	4	4	5	5	
21	-7	-4	-2	0	2	4	7	10	10	14	15	7	4	3	13	17	26	26	17	11	4	6	7	9	10	12	
22	-10	-7	-4	-1	1	4	7	10	13	18	15	11	5	14	17	28	30	26	17	11	4	5	7	8	9	10	
23	-12	-9	-5	-2	1	4	9	13	15	26	29	27	22	23	31	36	35	33	30	17	4	5	6	7	7	8	
24	-15	-11	-7	-3	0	4	10	15	23	33	35	35	29	32	38	42	43	45	30	17	4	5	5	6	6	6	
25	-17	-13	-8	-4	0	4	12	20	27	41	46	33	35	37	35	39	43	45	33	19	4	4	3	2	1	0	
26	-19	-14	-10	-6	-2	2	11	20	31	36	40	33	30	30	31	36	35	41	30	16	2	1	1	0	-1	-2	
27	-20	-15	-11	-7	-4	0	9	17	31	41	36	31	27	21	19	30	30	33	24	12	0	-1	-1	-2	-3	-4	
28	-21	-17	-13	-9	-5	-2	6	13	20	33	31	19	19	15	16	17	17	20	9	2	-4	-5	-5	-5	-5	-5	
29	-23	-18	-14	-11	-7	-4	3	8	14	26	25	15	4	4	4	6	14	14	0	-4	-9	-8	-8	-8	-8	-7	
30	-24	-20	-16	-13	-10	-7	-3	0	7	15	15	0	0	-4	-8	0	5	0	9	-12	-15	-14	-13	-12	-10	-9	
31	-25	-22	-19	-16	-13	-11	-7	-3	7	4	8	-4	-12	-12	-8	-9	-5	-1	-20	-21	-22	-20	-18	-16	-13	-11	
32	-27	-23	-20	-18	-15	-13	-13	-13	-4	-4	0	-4	-12	-19	-17	-13	-14	-24	-23	-22	-22	-20	-19	-17	-15	-14	
33	-28	-25	-22	-20	-17	-15	-15	-16	-7	0	0	-6	-8	-24	-22	-22	-23	-23	-27	-25	-23	-21	-20	-18	-17	-16	
34	-29	-26	-23	-20	-17	-15	-12	-10	-7	-5	-2	-6	-10	-14	-18	-23	-23	-23	-23	-22	-22	-21	-20	-20	-19	-18	
35	-30	-27	-24	-20	-18	-15	-18	-21	-15	-8	-4	-8	-16	-25	-25	-24	-24	-23	-23	-23	-22	-21	-21	-21	-20	-20	
36	-31	-28	-24	-21	-18	-16	-13	-11	-8	-6	-3	-6	-10	-13	-17	-21	-21	-21	-21	-21	-21	-21	-21	-21	-22	-22	
37	-32	-29	-25	-22	-19	-16	-14	-11	-8	-5	-2	-5	-8	-11	-14	-17	-18	-19	-19	-20	-20	-21	-22	-23	-23	-24	
38	-33	-29	-26	-23	-20	-17	-14	-11	-8	-5	-2	-4	-6	-9	-11	-14	-15	-16	-17	-18	-20	-21	-22	-24	-25	-26	
39	-34	-30	-27	-24	-21	-18	-14	-11	-8	-4	-1	-2	-4	-6	-8	-10	-12	-14	-15	-17	-19	-21	-23	-25	-27	-28	

40	-35	-31	-28	-24	-21	-19	-15	-11	-8	-4	0	-1	-2	-4	-5	-7	-9	-11	-14	-16	-18	-21	-23	-26	-28	-30
41	-34	-30	-27	-24	-21	-19	-15	-11	-7	-3	1	0	-1	-3	-4	-5	-8	-10	-12	-15	-17	-20	-23	-25	-28	-31
42	-32	-29	-26	-23	-21	-19	-15	-11	-7	-3	2	1	0	-2	-3	-4	-6	-9	-11	-14	-16	-19	-22	-25	-28	-31
43	-31	-28	-25	-23	-21	-19	-14	-10	-6	-2	2	1	0	0	-2	-3	-5	-8	-10	-13	-15	-19	-22	-25	-28	-31
44	-30	-27	-25	-22	-20	-19	-14	-10	-6	-1	3	2	1	1	0	-1	-4	-6	-9	-12	-15	-18	-21	-25	-28	-32
45	-29	-26	-24	-22	-20	-19	-14	-10	-5	-1	4	3	2	2	1	0	-3	-5	-8	-11	-14	-17	-21	-25	-28	-32
46	-30	-27	-25	-23	-22	-20	-16	-11	-6	-2	3	3	2	1	1	0	-3	-5	-8	-11	-14	-18	-22	-26	-30	-34
47	-31	-29	-27	-25	-23	-21	-17	-12	-7	-3	2	2	1	1	1	0	-3	-5	-8	-11	-14	-18	-23	-27	-32	-36
48	-32	-30	-28	-26	-24	-23	-18	-13	-8	-3	2	1	1	1	0	0	-3	-5	-8	-11	-14	-19	-24	-28	-33	-38
49	-34	-31	-29	-28	-26	-24	-19	-14	-9	-4	1	1	0	0	0	0	-3	-5	-8	-11	-14	-19	-24	-30	-35	-40
50	-35	-33	-31	-29	-27	-26	-21	-16	-10	-5	0	0	0	0	0	0	-3	-5	-8	-11	-14	-19	-25	-31	-37	-42
51	-37	-34	-32	-30	-28	-27	-21	-16	-11	-5	0	0	1	1	1	1	-2	-5	-7	-10	-13	-19	-25	-31	-37	-43
52	-38	-36	-33	-31	-29	-27	-22	-16	-11	-5	1	1	1	1	2	2	-1	-4	-7	-10	-13	-19	-25	-31	-37	-43
53	-40	-37	-34	-32	-30	-28	-22	-17	-11	-5	1	1	2	2	2	3	0	-3	-6	-9	-12	-19	-25	-32	-38	-44
54	-41	-38	-36	-33	-31	-29	-23	-17	-11	-5	2	2	2	3	3	3	1	-2	-6	-9	-12	-19	-25	-32	-38	-45
55	-43	-40	-37	-34	-32	-30	-24	-17	-11	-5	2	2	3	3	4	4	1	-2	-5	-8	-12	-19	-25	-32	-39	-45
56	-44	-40	-37	-34	-32	-29	-23	-17	-11	-5	2	2	3	3	4	4	1	-2	-5	-9	-12	-19	-25	-32	-38	-45
57	-45	-41	-37	-34	-31	-29	-23	-17	-11	-5	1	2	2	3	4	4	1	-2	-6	-9	-13	-19	-25	-31	-38	-44
58	-46	-41	-38	-34	-31	-28	-22	-17	-11	-5	1	1	2	3	4	4	1	-2	-6	-10	-13	-19	-25	-31	-37	-43
59	-47	-42	-38	-34	-31	-27	-22	-16	-11	-5	0	1	2	3	4	5	1	-3	-6	-10	-14	-20	-25	-31	-36	-42
60	-48	-43	-38	-34	-30	-27	-22	-16	-11	-5	0	1	2	3	4	5	1	-3	-7	-10	-14	-20	-25	-31	-36	-41
61	-47	-42	-38	-34	-31	-28	-22	-17	-11	-6	0	1	2	3	4	5	1	-3	-7	-10	-14	-20	-26	-32	-37	-43
62	-47	-42	-38	-35	-31	-28	-23	-17	-11	-6	0	1	2	3	4	5	1	-3	-7	-10	-14	-21	-27	-33	-39	-45
63	-46	-42	-38	-35	-32	-29	-23	-18	-12	-6	0	1	2	3	4	5	1	-3	-7	-10	-14	-21	-27	-34	-40	-46
64	-46	-42	-38	-35	-33	-30	-24	-18	-12	-6	0	1	2	3	4	5	1	-3	-7	-10	-14	-21	-28	-35	-42	-48
65	-45	-42	-38	-36	-33	-31	-25	-18	-12	-6	0	1	2	3	4	5	1	-3	-7	-10	-14	-22	-29	-36	-43	-50
66	-47	-43	-40	-37	-34	-32	-25	-19	-13	-6	0	1	2	4	5	7	3	-2	-6	-11	-15	-23	-30	-37	-44	-51
67	-49	-45	-41	-38	-35	-32	-26	-20	-13	-7	0	2	3	5	7	9	4	-1	-6	-11	-16	-24	-31	-38	-45	-52
68	-51	-47	-43	-39	-36	-33	-27	-20	-13	-7	0	2	4	7	9	12	6	0	-6	-11	-17	-25	-32	-39	-46	-53
69	-53	-48	-44	-40	-37	-34	-27	-21	-14	-7	0	2	5	8	11	14	8	1	-5	-12	-18	-25	-33	-40	-47	-54
70	-55	-50	-46	-42	-38	-35	-28	-21	-14	-7	0	3	6	9	13	17	10	2	-5	-12	-19	-26	-34	-41	-48	-55
71	-55	-50	-46	-42	-39	-35	-28	-21	-14	-7	0	3	6	9	13	17	10	3	-4	-11	-17	-25	-32	-40	-47	-54
72	-55	-50	-46	-43	-39	-36	-29	-22	-14	-7	1	3	6	9	12	16	10	3	-3	-9	-16	-23	-31	-38	-46	-53
73	-55	-51	-47	-43	-40	-37	-30	-22	-15	-7	1	4	6	9	12	15	10	4	-2	-8	-14	-22	-30	-37	-45	-52
74	-55	-51	-47	-44	-40	-38	-30	-22	-15	-7	2	4	6	9	12	15	10	4	-1	-6	-12	-20	-28	-36	-44	-51
75	-55	-51	-47	-44	-41	-38	-31	-23	-15	-6	2	4	6	9	12	14	10	5	0	-5	-10	-19	-27	-35	-43	-50
76	-57	-52	-48	-45	-41	-38	-31	-23	-15	-7	1	3	5	8	10	13	9	4	0	-5	-10	-19	-28	-36	-44	-52
77	-58	-53	-49	-45	-42	-38	-31	-24	-16	-8	0	2	4	7	9	12	8	4	-1	-5	-10	-20	-29	-37	-46	-54
78	-60	-54	-50	-46	-42	-38	-31	-24	-17	-9	-2	1	3	6	8	11	7	3	-1	-6	-10	-20	-30	-39	-47	-55
79	-61	-56	-51	-46	-42	-38	-32	-25	-17	-10	-3	0	2	5	7	10	7	3	-2	-6	-10	-21	-31	-40	-49	-57
80	-63	-57	-51	-47	-42	-38	-32	-25	-18	-11	-4	-2	1	4	6	10	6	2	-2	-6	-11	-21	-32	-41	-50	-59
81	-63	-57	-51	-46	-42	-38	-31	-25	-18	-11	-4	-1	1	4	7	11	7	2	-2	-6	-11	-22	-33	-43	-52	-61
82	-63	-56	-51	-46	-41	-37	-31	-24	-17	-11	-4	-1	2	5	8	12	7	3	-2	-7	-11	-23	-34	-44	-54	-63

83	-63	-56	-50	-45	-40	-36	-30	-24	-17	-11	-4	-1	2	5	9	13	8	3	-2	-7	-12	-24	-35	-45	-55	-65
84	-63	-56	-50	-44	-40	-35	-29	-23	-17	-10	-4	-1	2	6	10	14	9	4	-2	-7	-12	-24	-36	-46	-57	-66
85	-63	-56	-50	-44	-39	-35	-29	-23	-17	-10	-4	-1	3	6	10	15	10	4	-2	-7	-13	-25	-37	-48	-58	-68
86	-63	-56	-50	-45	-40	-36	-30	-24	-17	-11	-4	-1	2	6	10	14	9	4	-1	-6	-11	-24	-36	-47	-58	-68
87	-63	-57	-51	-46	-42	-38	-31	-25	-18	-12	-5	-2	1	5	9	13	8	4	-1	-5	-10	-22	-35	-46	-57	-68
88	-63	-57	-52	-47	-43	-39	-33	-26	-19	-12	-5	-2	1	4	8	12	8	4	0	-4	-8	-21	-33	-45	-56	-67
89	-63	-57	-52	-48	-44	-41	-34	-27	-20	-13	-6	-3	0	3	7	11	7	4	1	-3	-7	-20	-32	-44	-56	-67
90	-63	-58	-53	-49	-46	-42	-35	-28	-21	-14	-6	-3	0	3	6	10	7	4	1	-2	-5	-19	-31	-44	-55	-67
91	-63	-58	-53	-49	-45	-42	-35	-28	-21	-13	-6	-3	0	3	7	11	7	4	0	-4	-7	-20	-33	-45	-56	-67
92	-63	-58	-53	-49	-45	-41	-34	-27	-20	-13	-5	-2	1	4	8	12	8	4	-1	-5	-9	-22	-34	-46	-57	-67
93	-63	-58	-53	-48	-44	-41	-34	-27	-20	-12	-5	-2	1	5	9	13	8	3	-1	-6	-12	-24	-36	-47	-57	-68
94	-63	-58	-53	-48	-44	-40	-34	-26	-19	-12	-5	-1	2	6	10	14	9	3	-2	-8	-14	-26	-37	-48	-58	-68
95	-63	-57	-52	-48	-44	-40	-33	-26	-19	-12	-4	-1	3	6	11	15	9	3	-3	-9	-16	-28	-39	-49	-59	-68
96	-63	-57	-52	-48	-44	-40	-33	-26	-19	-12	-4	-1	3	7	11	16	10	4	-2	-8	-15	-27	-38	-48	-58	-68
97	-63	-57	-52	-48	-44	-40	-33	-26	-19	-12	-4	-1	3	7	11	16	10	5	-1	-8	-14	-26	-37	-48	-58	-68
98	-63	-57	-52	-48	-44	-40	-33	-26	-19	-12	-4	-1	3	7	12	17	11	5	-1	-7	-13	-25	-36	-47	-57	-67
99	-63	-57	-52	-48	-44	-40	-33	-26	-19	-12	-4	-1	3	8	12	17	12	6	0	-6	-12	-24	-35	-46	-57	-67
100	-63	-57	-52	-48	-44	-40	-33	-26	-19	-12	-4	0	4	8	13	18	12	7	1	-5	-11	-23	-34	-46	-56	-67

講 評

昨年度の研究では、2012年に沖縄本島を直撃した台風15号、16号、17号の気圧傾度と風速の関係について、独自のデータ分析により「観測点の風上に積乱雲の壁があるときは、壁雲の上昇流によって風が上空に運ばれるため壁雲の内側の風は弱まる。」「観測点の風下間近に孤立した積乱雲があるときは、その積乱雲の上昇流によってか風が加速するため観測点での風は強まる。」という仮説を導きました。今年度は、この仮説をモデル実験によって見事に実証できたことに大きな成果がありました。継続研究ではありますが、前回の結論を踏まえた仮説の設定、モデル実験装置の製作、モデル実験によるデータ測定、測定データ分析・解釈、考察、結論までの探究の過程が無駄なく論理的にまとめられていることが高く評価されました。

製作したモデル実験装置は、複雑な要素が関与する気象現象を身近な素材（扇風機、掃除機等）を活用してシンプルに再現し、扇風機の風を整流に近づけるための整流装置が円筒を積み重ねただけの構造など、随所に独創的なアイデアがみられます。また、測定方法を工夫して仮説を検証するのに十分なデータを測定し、データの記録や処理を適切に行うことで、大変見やすいグラフにまとめられています。

測定したモデル実験で得られた上昇気流による風速変化と実際の台風における積乱雲周辺の風速変化の検証については、気象レーダーによる5分毎の降水強度分布図を用いて、昨年度よりさらに詳細にデータ分析を行っています。実際の台風で、前後の時間帯より強風となった3回のうち、2回については積乱雲の影響で強い風が吹いたと結論付けされていますが、うまく説明できなかったケースについての考察がもう少し深まればさらによかったと思います。

今回の研究により、今後の台風についてどのような状況で強風になるかを予測する上で積乱雲の分布を1つの指標として提示できたことは、防災の視点からも大変意義のあるものだと思います。今後の研究の発展に期待します。



セルロース系バイオマス燃料の研究(その2) ～シュレッター裁断紙の酵素による糖化からバイオエタノールの製造実験～

沖縄県立沖縄工業高等学校

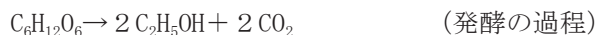
3年 新垣 里佳 3年 宮良 圭由 2年 宮里 実咲 2年 大川 健太 2年 大城 光祐
1年 新垣 賢悟 1年 我那覇 武

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くれているが、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 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ 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。

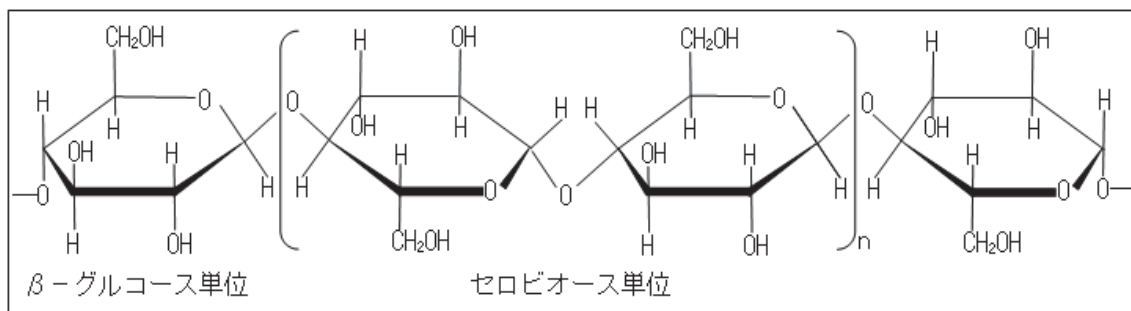


図 1-1 セルロースの構造式(参考文献 1 に基づいて作成)

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C5の糖であるキシロースが多く含まれ、C6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、C6の糖であるグルコースやマンノース等が多くC5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。

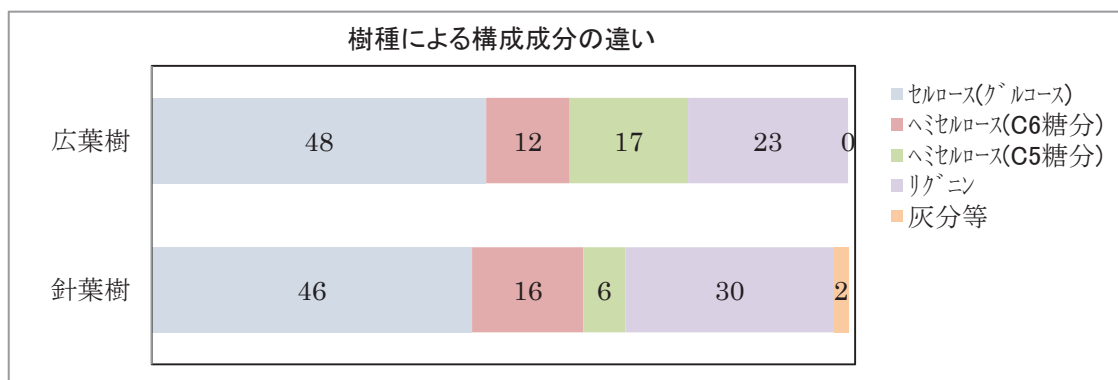


図 1-2 樹種による構成成分の違い

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 硫酸及び酵素による糖化実験

基質に含まれるセルロース、ヘミセルロースを硫酸及び酵素を用いて分解し、グルコースやフルクトース、スクロース等に糖化し、酵母を用いてエタノール発酵を行い、バイオエタノールを生成することを目的に実験を行った。

硫酸による実験では、において濃度 10、20、30%の希硫酸及び 75%の濃硫酸を用いて、基質を分解し糖化した。

酵素による実験では4種類の粉末状の酵素をそれぞれ 0.2、0.4、0.6g を加えて糖化した。

また、基質の前処理による糖化液の成分に与える影響を調査するため、粉碎法についても検討した。ワンダーブレンダー（WB-1）（大阪ケミカル）では基質が綿状になるまで、卓上型ボールミル AV 型（アサヒ理化製作所）では、約8時間かけ粉末状になるまで処理した。粉碎後は、上記記述の基質の糖化実験と同様に行い、糖化液は高速液体クロマトグラフ分析装置（HPLC）（島津製作所）を用いて成分分析を行い、糖化液に及ぼす影響について実験的に検討した。

2-1 硫酸による加水分解

2-1-1 実験概要

加水分解とは、1分子の化合物に1分子の水が反応して2分子の化合物を生成する反応で、酸を用いる加水分解は H^+ が触媒となって作用し、水の H^+ と OH^- が結合する反応である⁴⁾。

本実験ではセルロースが硫酸の H^+ が触媒となって元のグルコース単位に分解する反応である。

また、本実験では、硫酸濃度が糖化に与える影響について調査するため、濃度 10%、20%、30%、75%の硫酸を用いて、硫酸による加水分解の実験を行った。

2-1-2 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) シュレッターで裁断された基質を、さらに粉碎機（ワンダーブレンダー）で処理し、その 10g を試料とした。
- (2) 基質 10g を 3 個の三角フラスコ（300mL）に入れ、さらに 10、20、30%希硫酸 100mL をそれぞれ加えた。
- (3) (2) の試料を 6 連式マグネチックスターラー（ホットプレート付き）RSH-60R（ASONE）上で、40~45℃に加温し、300rpm で攪拌した（図 2-1）。
- (4) 20 分おきに分解した試料約 1mL を測り採り、炭酸ナトリウムを以て中和し、ポケット糖度計 PAL-J（アタゴ）を用いて糖度を測定した。

なお、濃硫酸による実験操作は、試料の前処理、糖度の測定は希硫酸時の操作と同様に行い、基質 10g をビーカー（500mL）に入れ、75%硫酸 100mL を加えた。反応の際、フルフラールを抑えるため氷上で実験を行った（図 2-2）。

表 2-1 使用した薬品・器具等

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）、ビーカー（1000mL）
薬品	希硫酸（10%、20%、30%）、濃硫酸（75%）、炭酸ナトリウム



図 2-1 希硫酸による実験



図 2-2 濃硫酸による実験

2-1-3 実験結果及び考察

図 2-3 に濃度 10%、20%、30%、75%濃度の硫酸による加水分解の実験で得られた結果を図 2-3 に示し、表 2-2 に糖濃度を示す。

60 分から 80 分後に希硫酸では 1.6～5.1%、濃硫酸では 11.6%の糖が得られた。本実験条件においては、硫酸濃度が高いほど高濃度の糖が得られることが分かった。

糖濃度の低かった希硫酸の加水分解では、難分解性であるセルロースを分解するため加温した。その結果、加水分解しやすいヘミセルロースがフルフラールを起こし、全体的に糖濃度が低下したと考えられる。また、濃硫酸の場合、酸濃度が高く加温する必要が無いためセルロース、ヘミセルロースを同時に分解することができ高濃度の糖を得ることができたと考えられる⁵⁾。

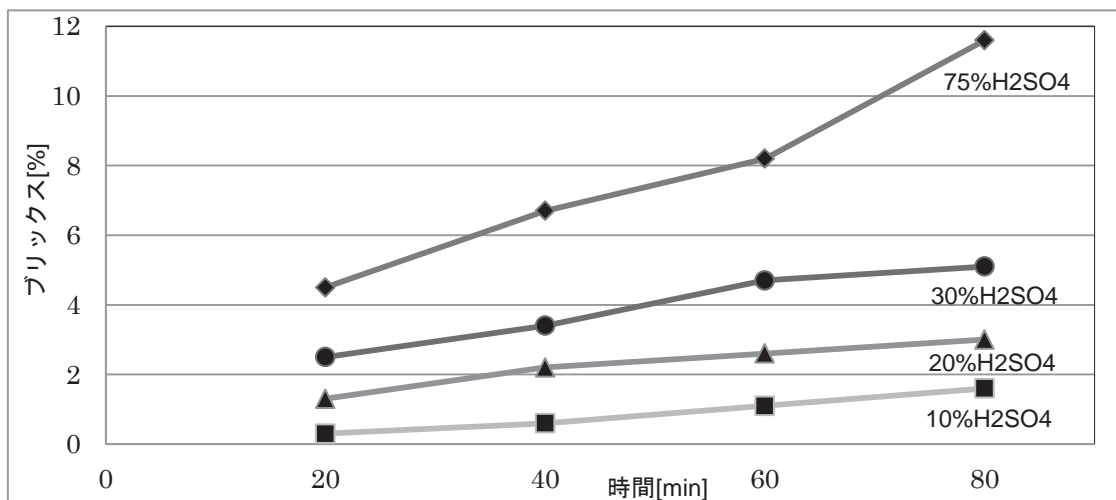


図 2-3 硫酸による加水分解の実験結果

表 2-2 硫酸による加水分解の実験結果

硫酸濃度 \ 反応時間(分)	20	40	60	80
10% H ₂ SO ₄	0.3	0.6	1.1	1.6
20% H ₂ SO ₄	1.3	2.2	2.6	3
30% H ₂ SO ₄	2.5	3.4	4.7	5.1
75% H ₂ SO ₄	4.5	6.7	8.2	11.6

Brix 濃度 (%)

2-2 酵素による糖化実験

2-2-1 実験概要

酵素によるセルロースの糖化実験では、4種類の粉末状の酵素 CELLUASE™ ONOZUKA™ RS（以下酵素 A と呼ぶ）（図 2-4）、CELLUASE™ ONOZUKA™ R-10（以下酵素 B と呼ぶ）及び CELLUASE™ ONOZUKA™ 12S（以下酵素 C と呼ぶ）、メイセラゼ（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4種類の酵素をそれぞれ 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 調整を行い、酵素の種類によって糖濃度に与える影響について実験的に検討した。

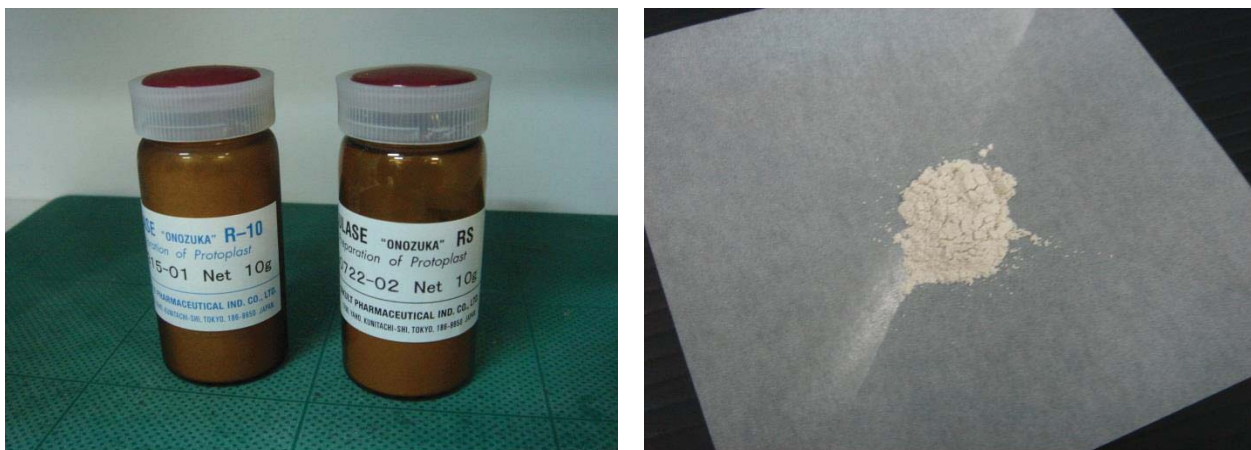


図 2-4 本研究で用いた粉末状の酵素

2-2-2 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 2-3 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 をそれぞれ 0.2、0.4、0.6g ずつ加え、残りの 6 個の三角フラスコについても酵素 B、酵素 C、酵素 D で同様に行った。
- (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、酵素 A、B、C、D 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 2-3 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、B、C、D）、乳酸

2-2-3 実験結果及び考察

基質 10g に酵素 A、B、C、D 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 2-5、図 2-6、図 2-7 及び図 2-8 に示し、表 2-4、表 2-5、表 2-6 及び表 2-7 に糖濃度を示す。

本実験条件では、それぞれ酵素 A では 6.6～9.9%、酵素 B では 5.3～6.8%、酵素 C では 3.6～5.7%、酵素 D では 4.1～6.2%のセルロースを糖に分解することができた。4種類の酵素において、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。

糖濃度を比較すると酵素 A で最も高濃度の糖が得られ、本実験条件において、基質の糖化は酵素 A が適していることが分かった。これは、酵素のろ紙崩壊力（酵素力価）によるものと考えられ、酵素

Aでは、ろ紙崩壊力が 20.000u/g と 4種類 の酵素の中で最も高く高濃度の糖が得られたと考えられる。しかし、酵素Cのろ紙崩壊は 12.000u/g で酵素Dは 10.000u/g であり、酵素Cの方が高く、高濃度の糖が得られるはずだが、本実験結果からは酵素Aの方が高濃度の糖が得られた。これは、酵素の種類や性質による作用があると考えられるが詳細については、明らかにすることができず今後の課題としたい。

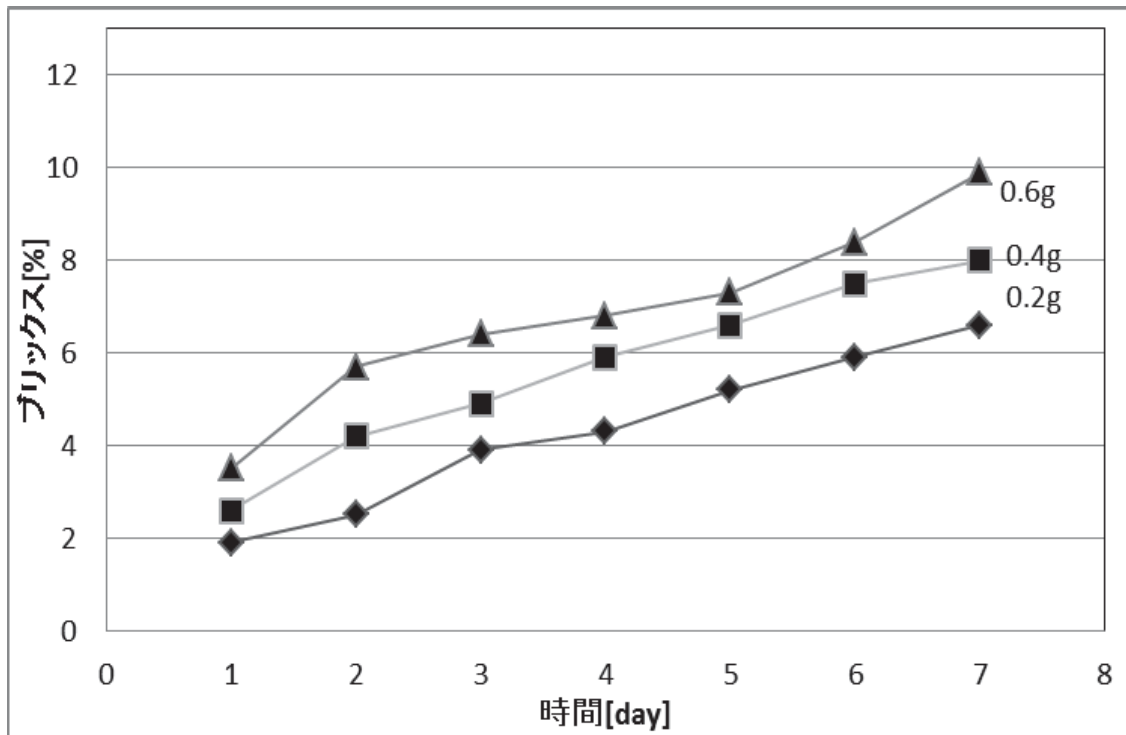


図 2-5 酵素 A による実験結果

表 2-4 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	1.9	2.5	3.9	4.3	5.2	5.9	6.6
0.4	2.6	4.2	4.9	5.9	6.6	7.5	8.0
0.6	3.5	5.7	6.4	6.8	7.3	8.4	9.9

Brix 濃度 (%)

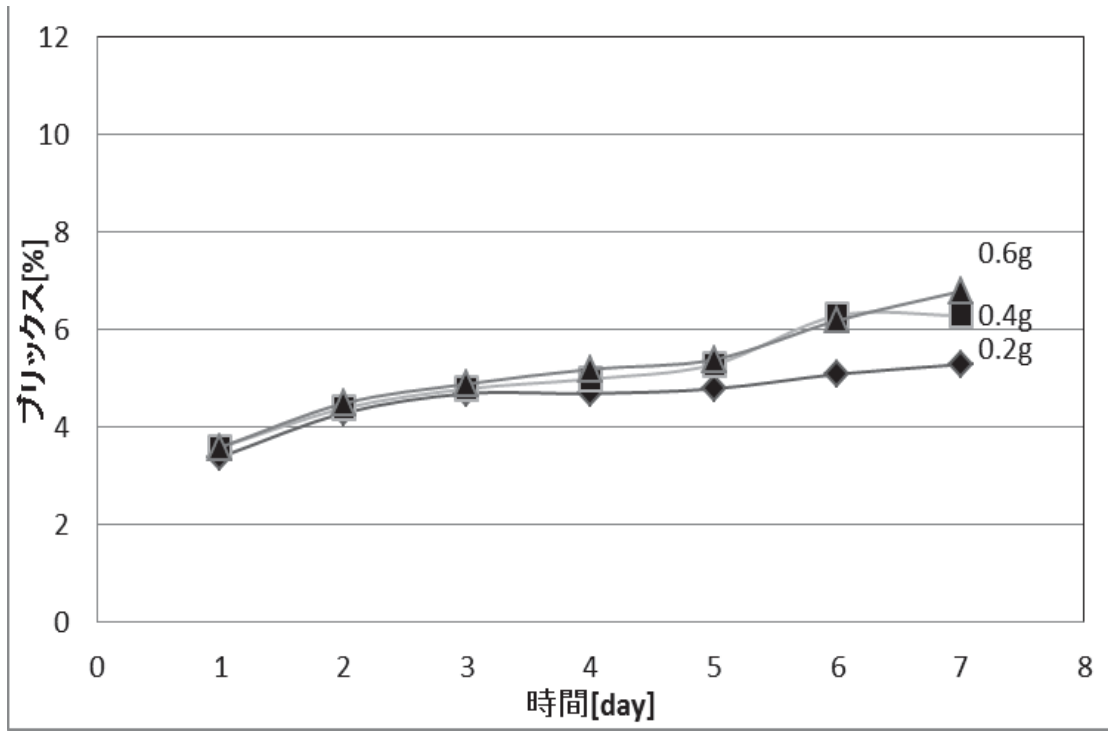


図 2-6 酵素 B による実験結果

表 2-5 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	3.4	4.3	4.7	4.7	4.8	5.1	5.3
0.4	3.6	4.4	4.8	5.0	5.3	6.3	6.3
0.6	3.6	4.5	4.9	5.2	5.4	6.2	6.8

Brix 濃度 (%)

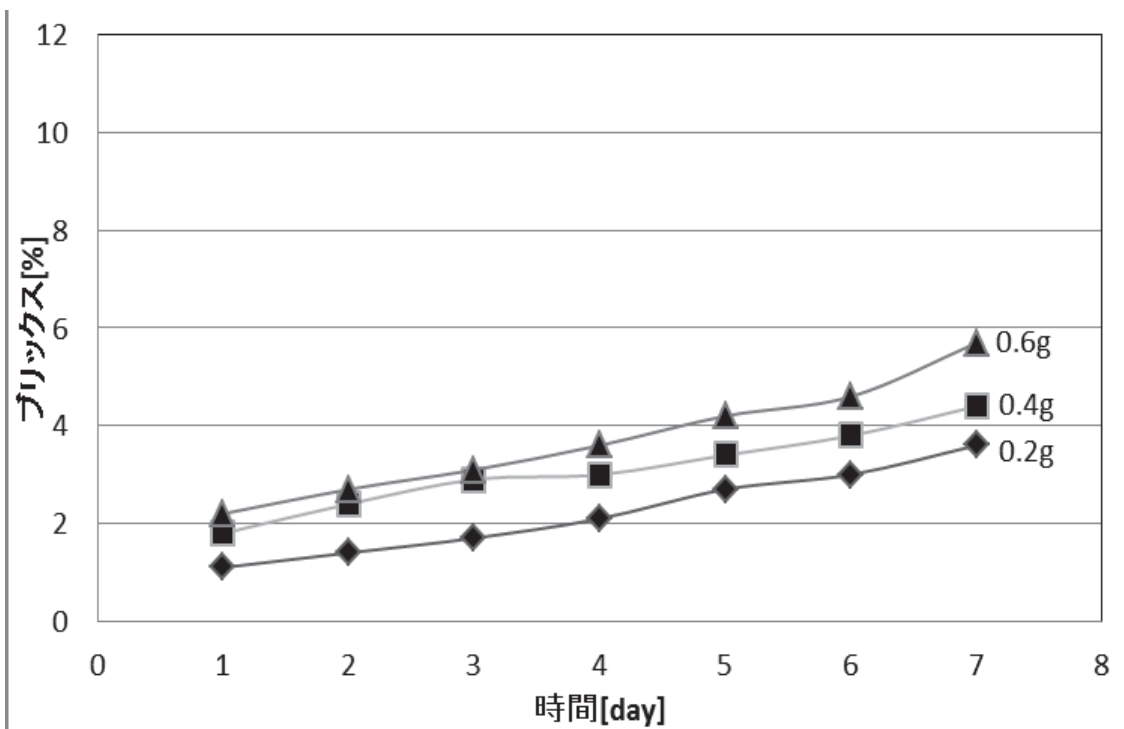


図 2-7 酵素 C による実験結果

表 2-6 酵素 C による実験結果

時間(日) \ 酵素量(g)	1	2	3	4	5	6	7
0.2	1.1	1.4	1.7	2.1	2.7	3.0	3.6
0.4	1.8	2.4	2.9	3.0	3.4	3.8	4.4
0.6	2.2	2.7	3.1	3.6	4.2	4.6	5.7

Brix 濃度 (%)

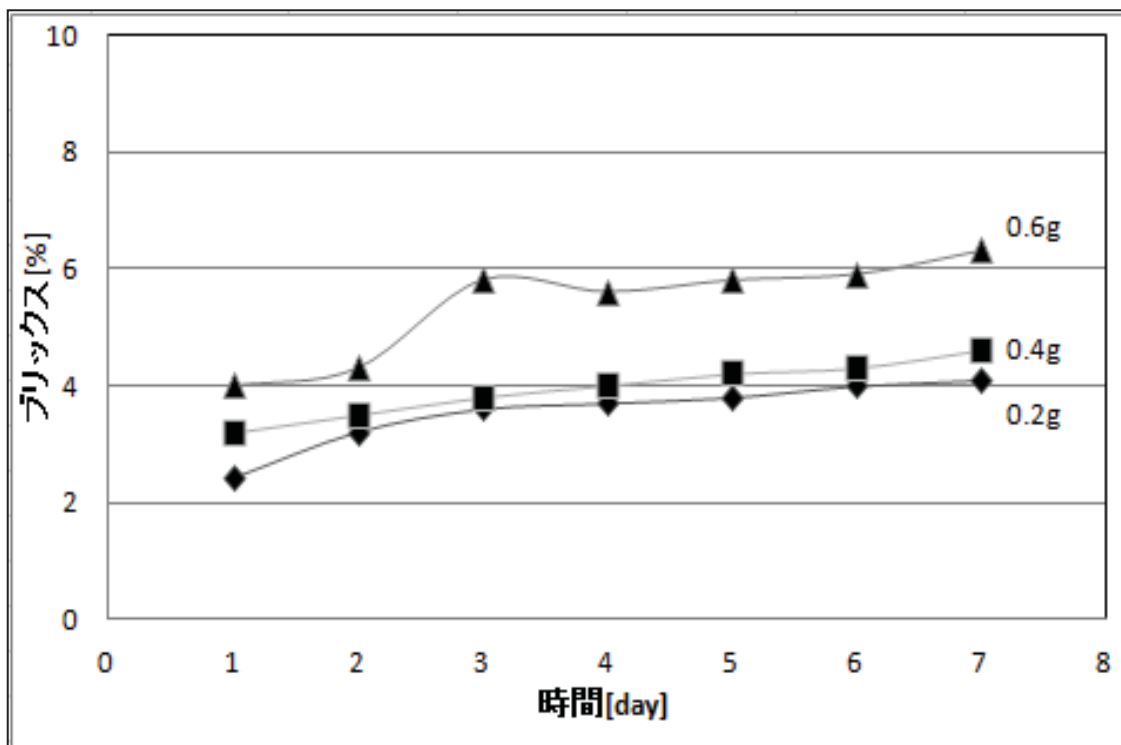


図 2-7 酵素 D による実験結果

表 2-6 酵素 D による実験結果

時間(日) \ 酵素量(g)	1	2	3	4	5	6	7
0.2	2.3	3.1	3.5	3.7	3.8	4.0	4.1
0.4	3.4	3.6	3.7	4.0	4.2	4.3	4.6
0.6	4.0	4.2	5.8	5.7	5.8	5.9	6.2

Brix 濃度 (%)

2-3 基質の硫酸及び酵素による糖化実験のまとめ

基質の糖化では、硫酸を用いた場合、1.6～11.6%、酵素による糖化では、3.6～9.9%糖化できた。硫酸を用いる加水分解では短時間で、濃度の高い糖を得ることができたが、反応の際、フルフラールを抑制するため温度管理や濃硫酸の取り扱いに細心の注意を払うこと、中和の際、多量の薬品を用いるなど課題が多い。

また、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。

2-4 糖化に及ぼす試料の粉碎方法の影響

2-4-1 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、上記実験で得られた糖化液の糖濃度をさらに高める必要がある。

そのため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。

これまでの実験では、ワンダーブレンダー（図 2-13、2-14）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 2-15、2-16）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置（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 2-13 ワンダーブレンダー（左）、処理後の基質（右）



図 2-14 ワンダーブレンダー内部



図 2-15 卓上型ボールミル（左）、処理後の基質（右）



図 2-16 卓上型ボールミル (1500mL) とその内部

2-4-2 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) 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 時間回転させ粉碎させた。
- (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 2-10 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

2-4-3 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 2-17、図 2-18、図 2-19 及び図 2-20 に示し、表 2-11、図 2-12、表 2-13 及び表 2-14 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碎した場合、基質を微粉碎することができ、積層構造を持つセルロースの結晶が細かく分断され (図 2-23~図 2-26)、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。

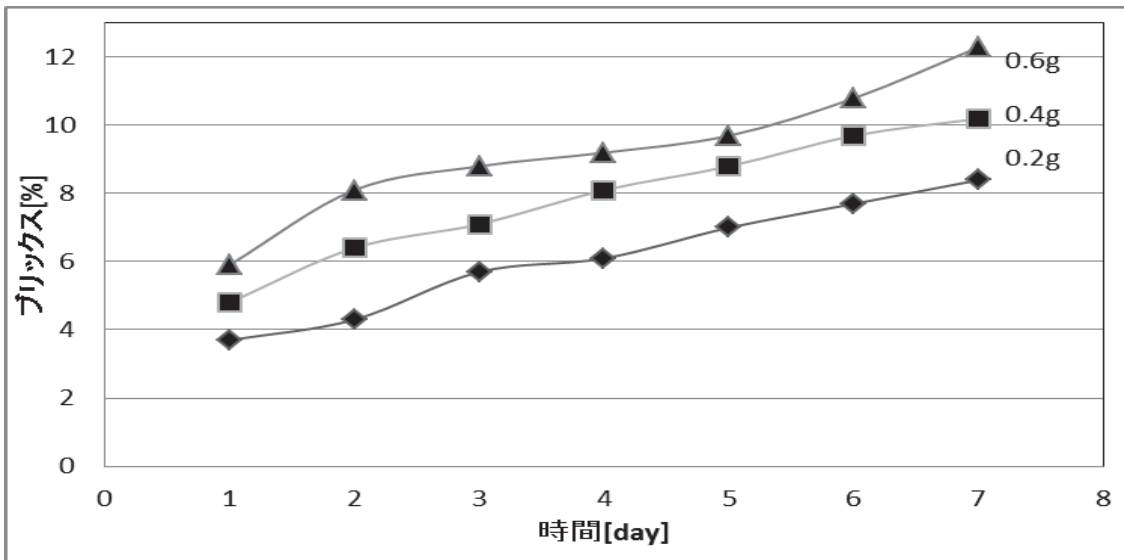


図 2-17 卓上ボールミル処理 (酵素 A) による実験結果

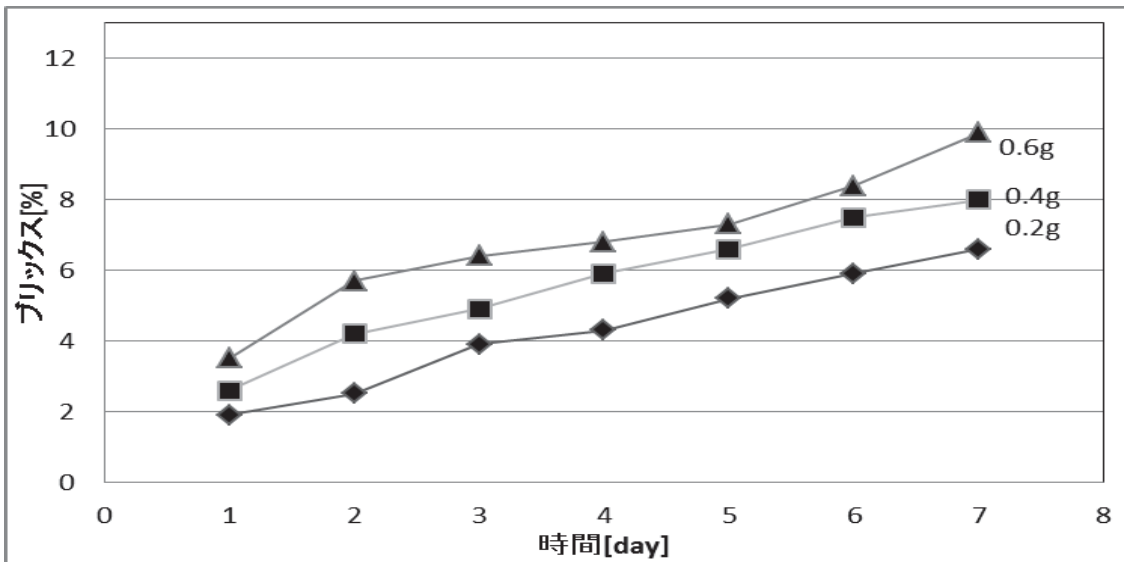


図 2-18 ワンダーブレンダー処理 (酵素 A) による実験結果

表 2-11 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 (%)

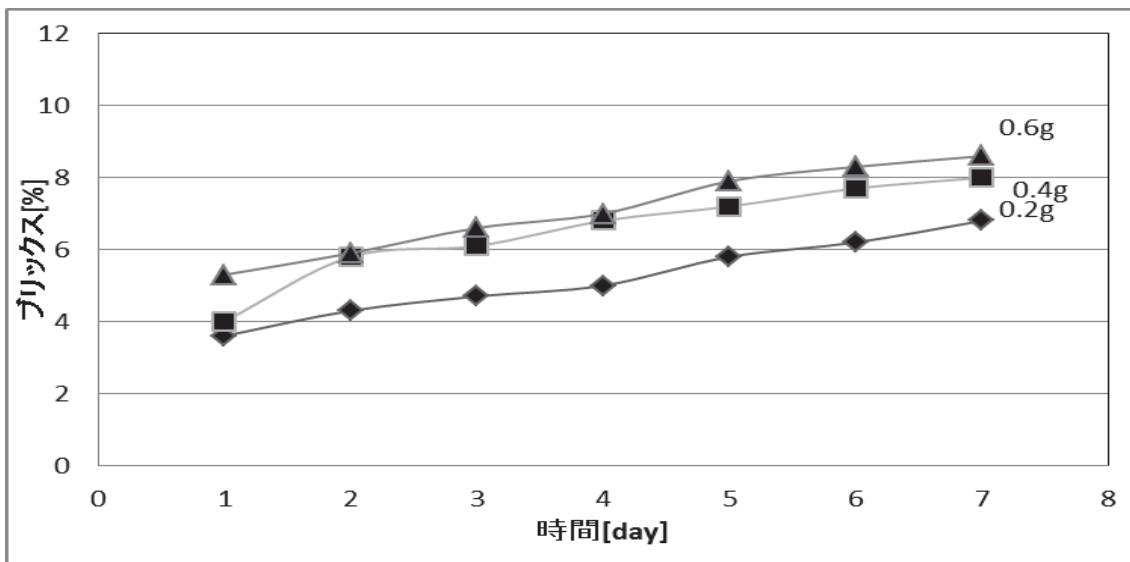


図 2-19 卓上型ボールミル処理 (酵素 B) による実験結果

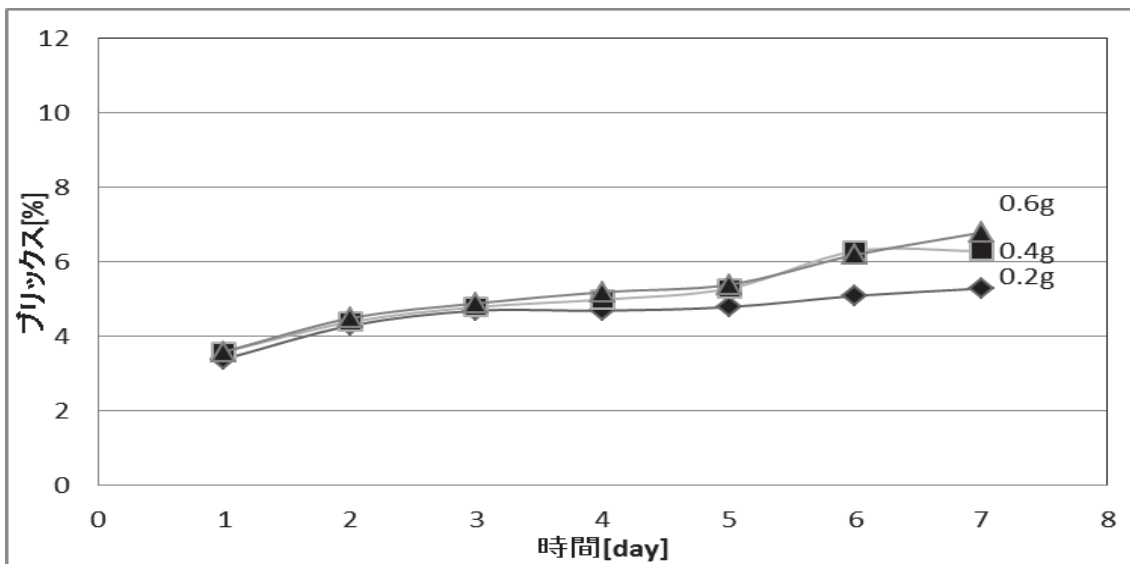


図 2-20 ワンダーブレンダー処理 (酵素 B) による実験結果

表 2-12 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 (%)

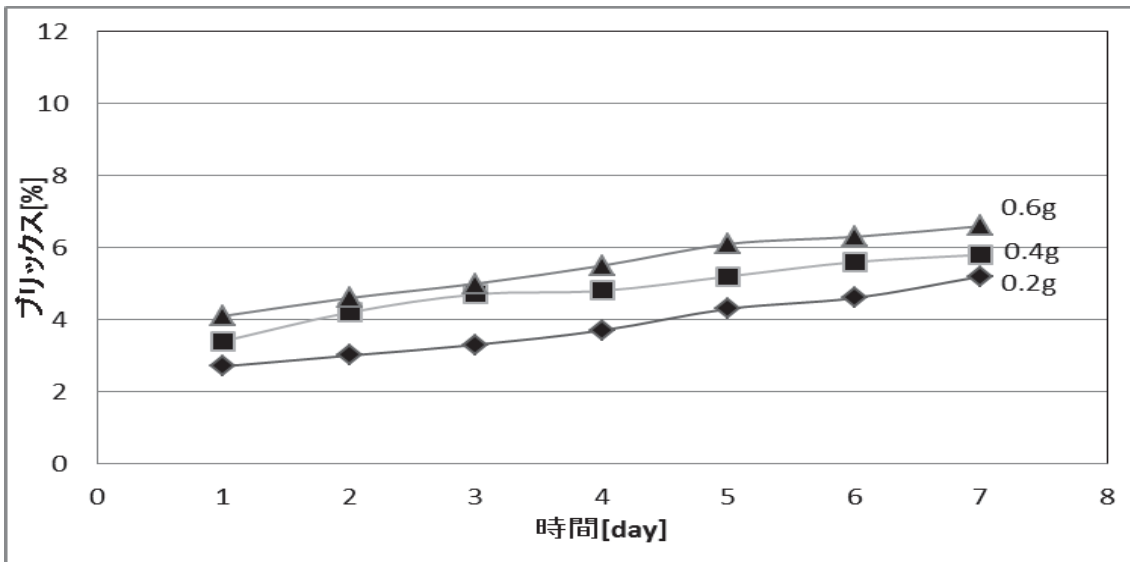


図 2-21 卓上型ボールミル処理 (酵素 C) による実験結果

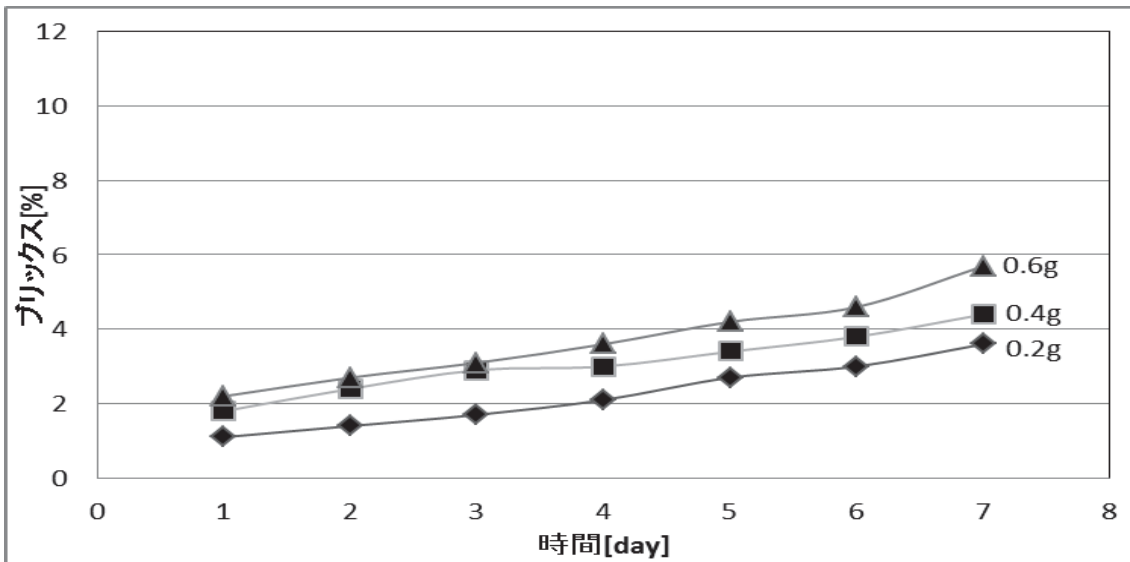


図 2-22 ワンダーブレンダー処理 (酵素 C) による実験結果

表 2-13 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 (%)

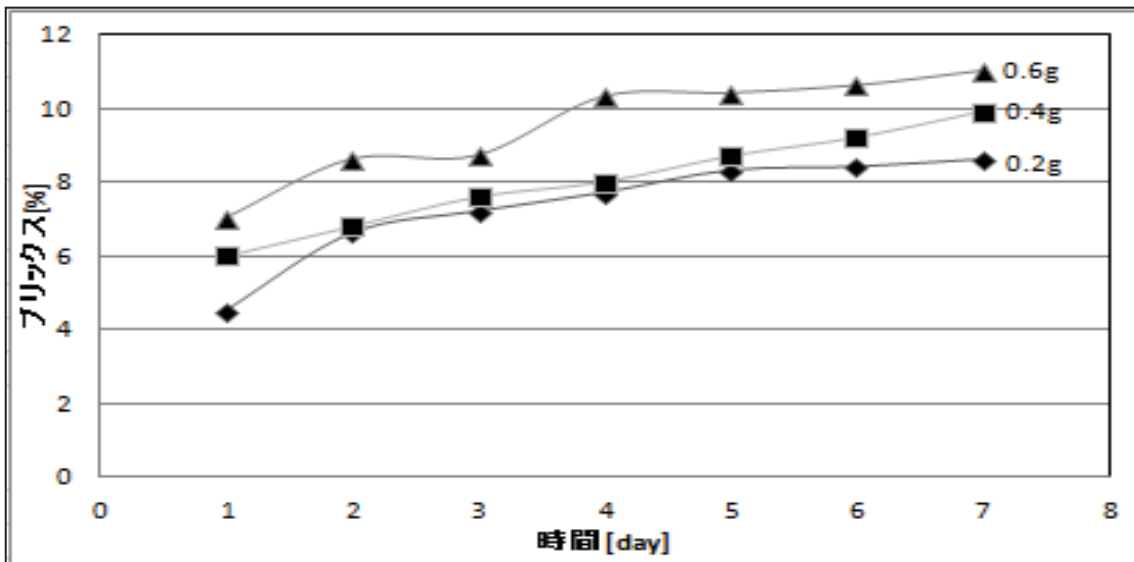


図 2-21 卓上型ボールミル処理 (酵素 D) による実験結果

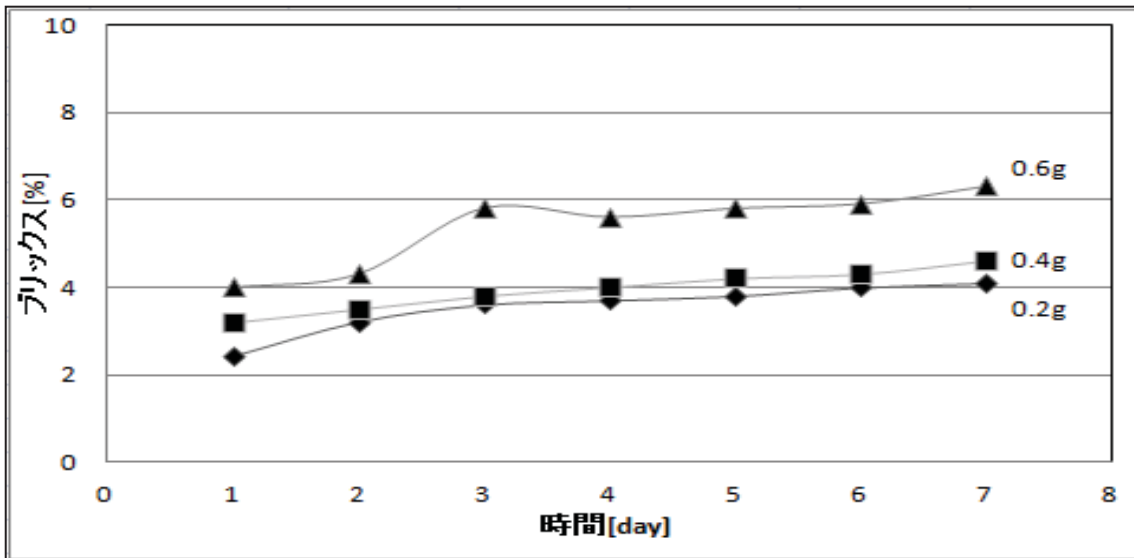


図 2-22 ワンダーブレンダー処理 (酵素 D) による実験結果

表 2-13 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 (%)

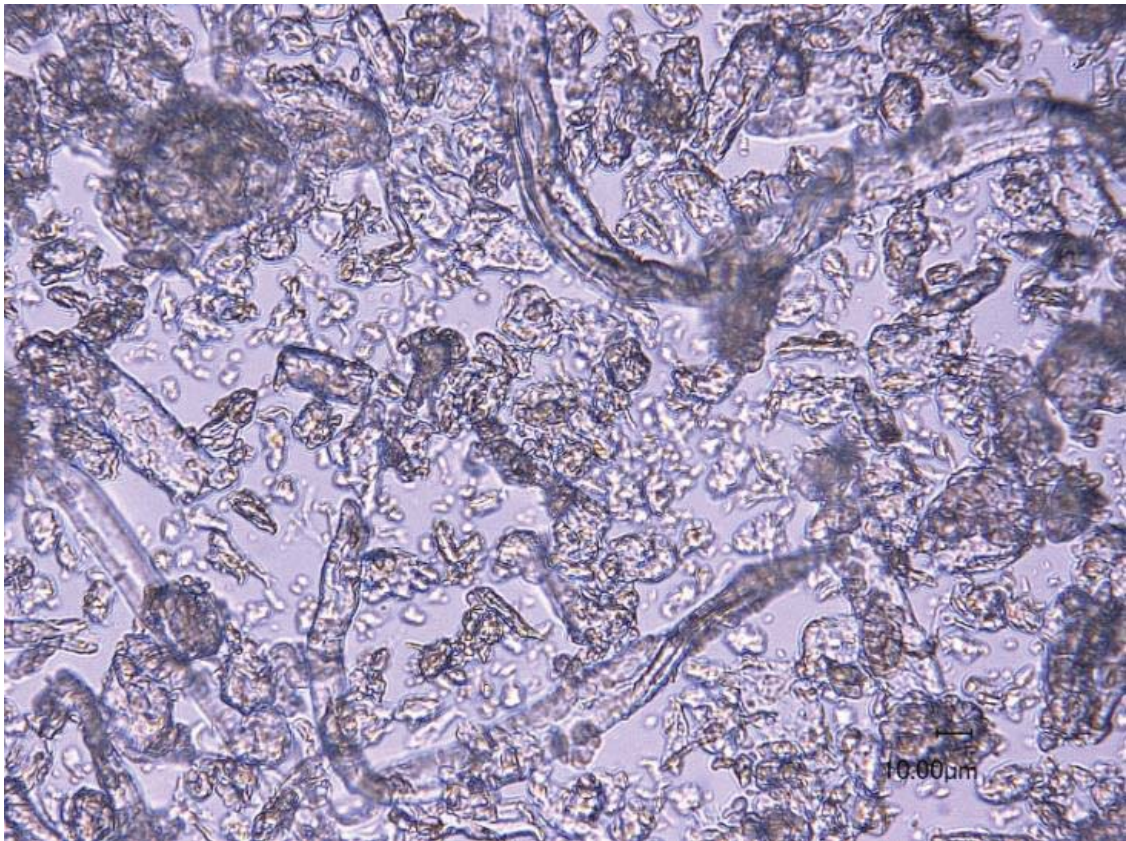


図 2-23 卓上型ボールミル処理 (×1000 倍)



図 2-24 ワンダーブレンダー処理 (×1000 倍)



図 2-25 卓上型ボールミル処理 (×1500 倍)



図 2-26 ワンダーブレンダー処理 (×1500 倍)

2-5 高速液体クロマトグラフによる糖化液の成分分析

2-5-1 実験概要

基質を4種類の酵素0.6g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⁾。

2-5-2 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2-14にを示す。

- (1) ワンダーブレンダー、卓上型ボールミルの処理により4種類の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 図り採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8種類の糖化液の分析を行った。

表 2-14 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)、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

2-5-3 実験結果及び考察

図2-27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2-15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2-28、図2-29、図2-30、図2-31、図2-32、図2-33、図2-34及び図2-35に試料のクロマトグラフを、表2-16、表2-17、表2-18、表2-19、表2-20、表2-21、表2-22、表2-23及び表2-24にピークレポートを示す。

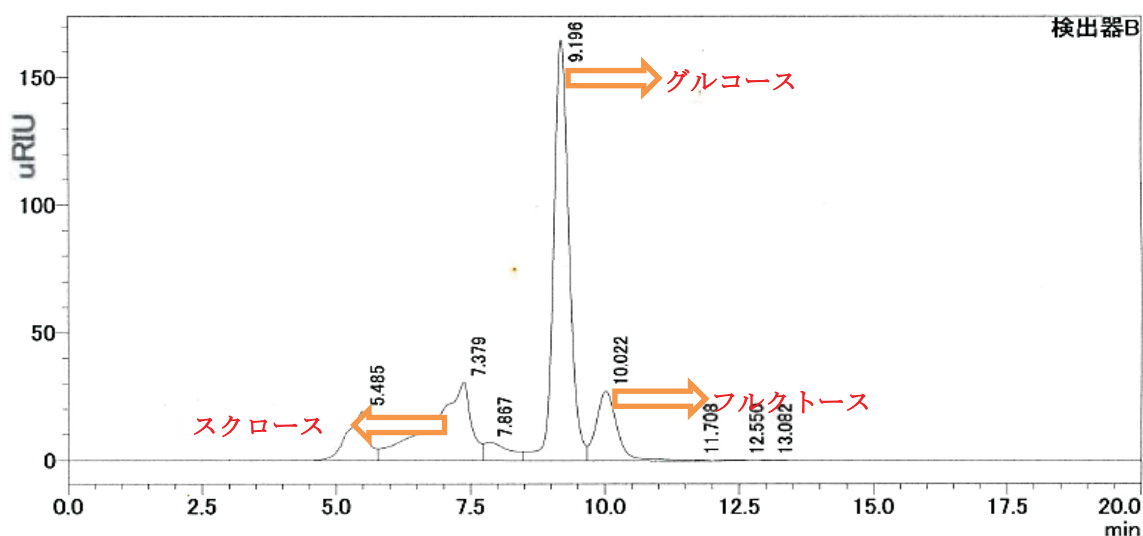


図 2-27 グルコース、フルクトース、スクロース標準溶液のクロマトグラフ

表 2-15 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

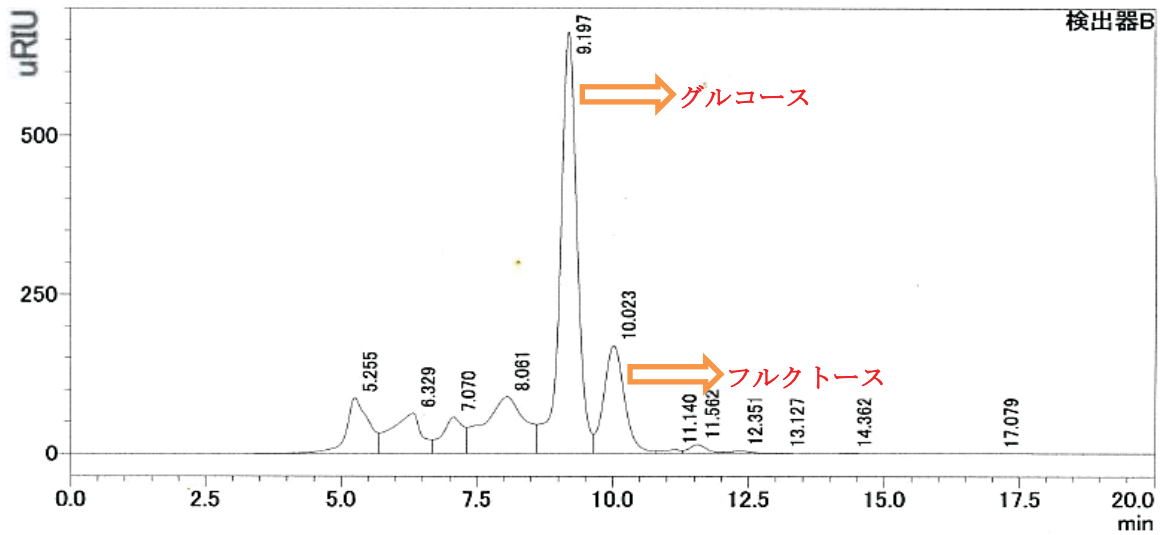


図 2-28 卓上型ボールミルで粉砕し酵素 A で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-16 卓上型ボールミルで粉砕し酵素 A で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度(%)	化合物名
1	9.197	14337223	662538	11.932	グルコース
2	10.023	4406276	168592	3.656	フルクトース

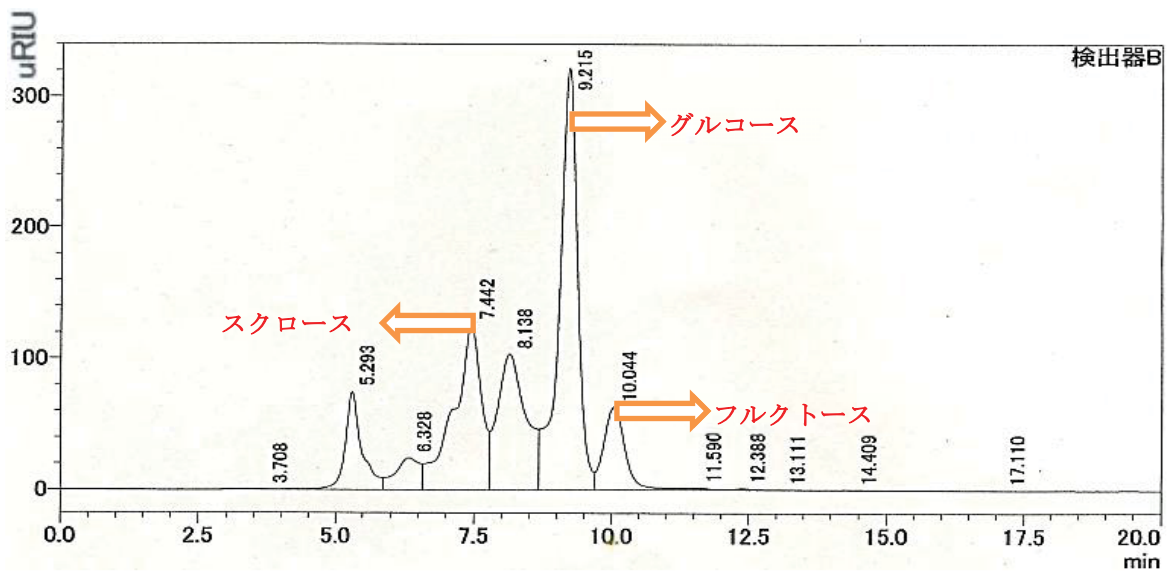


図 2-29 ワンダーブレンダーで粉砕し酵素 A で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-17 ワンダーブレンダーで粉碎し酵素 A で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	7.442	4359982	125798	4.939	スクロース
2	9.215	7562212	322104	6.294	グルコース
3	10.044	1756401	63337	1.457	フルクトース

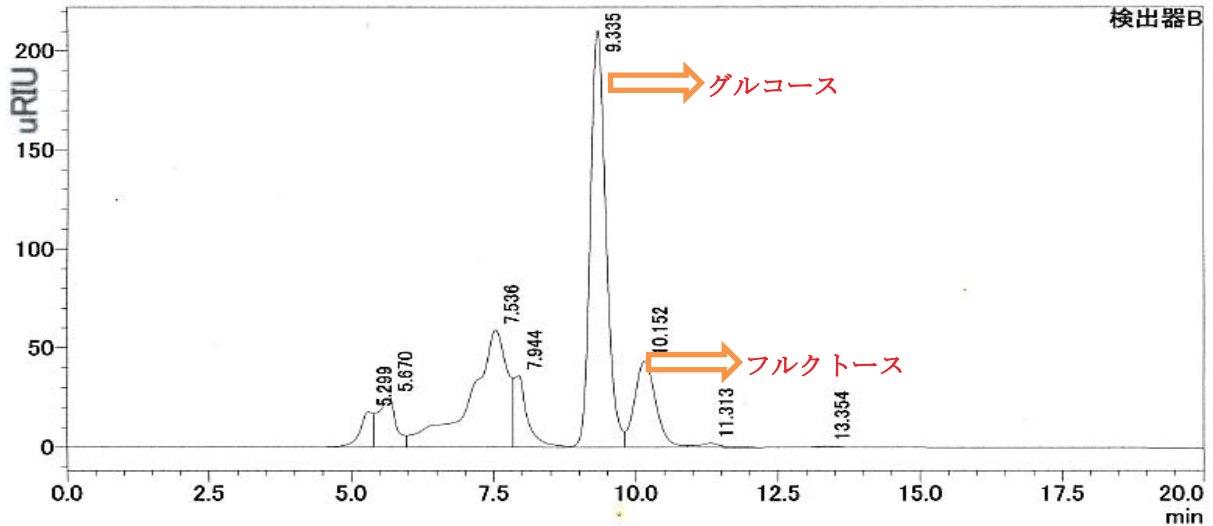


図 2-30 卓上型ボールミルで粉碎し酵素 B で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-18 卓上型ボールミルで粉碎し酵素 B で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	9.335	4062150	210624	3.348	グルコース
2	10.152	1137069	43457	0.934	フルクトース

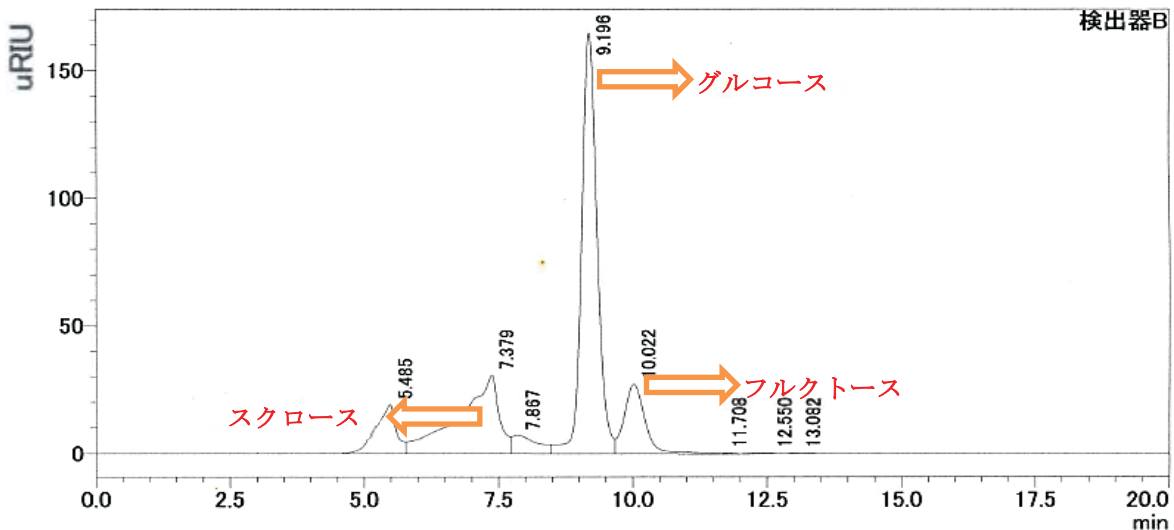


図 2-31 ワンダーブレンダーで粉碎し酵素 B で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-19 ワンダーブレンダーで粉碎し酵素 B で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	7.379	1559729	30563	1.767	スクロース
2	9.196	3326806	164883	2.769	グルコース
3	10.022	738768	27092	0.613	フルクトース

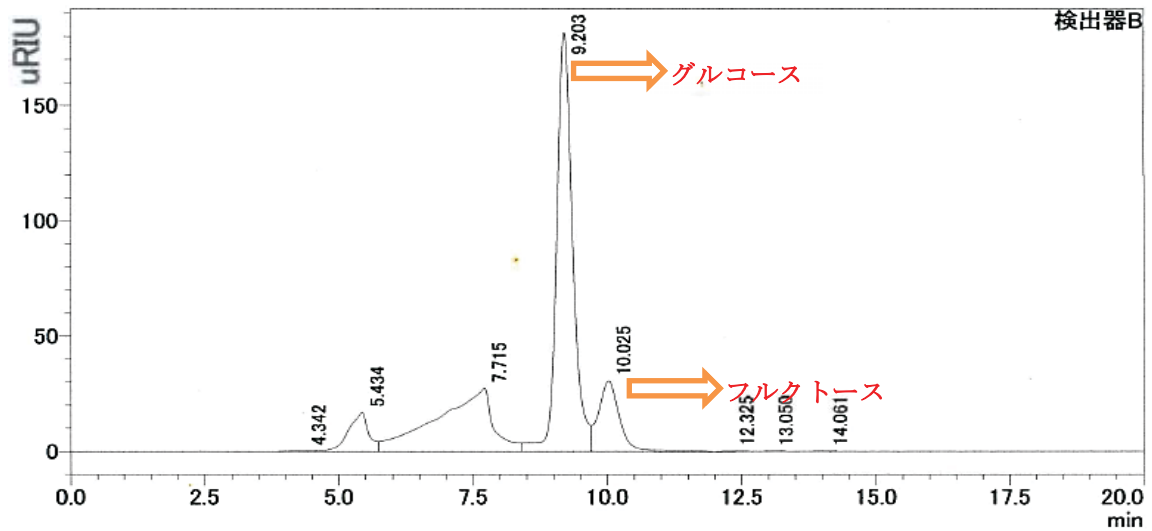


図 2-32 卓上型ボールミルで粉砕し酵素 C で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-20 卓上型ボールミルで粉砕し酵素 C で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	9.203	3794591	181683	3.158	グルコース
2	10.025	827413	30558	0.687	フルクトース

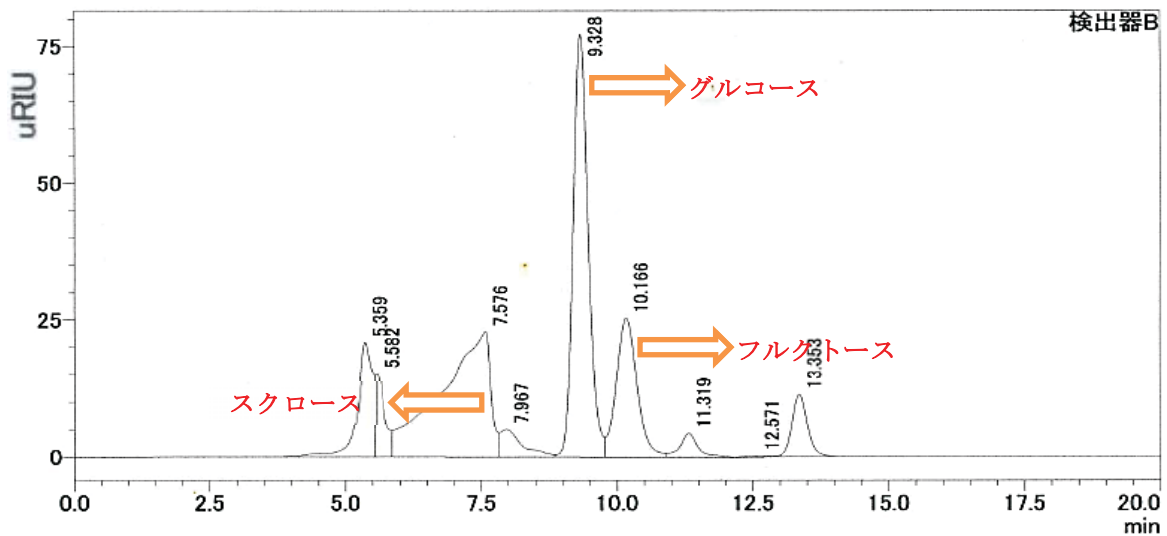


図 2-33 ワンダーブレンダーで粉砕し酵素 C で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-21 ワンダーブレンダーで粉砕し酵素 C で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	7.576	1432995	22853	1.600	スクロース
2	9.328	1502379	77291	1.238	グルコース
3	10.166	674995	25365	0.554	フルクトース

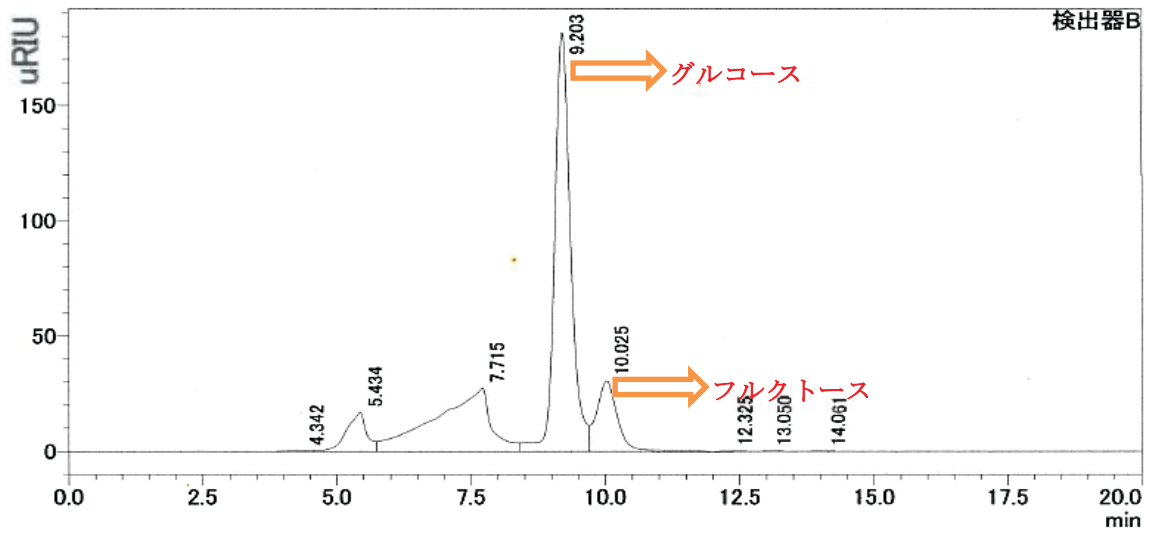


図 2-34 卓上型ボールミルで粉砕し酵素 D で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-22 卓上型ボールミルで粉砕し酵素 D で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	9.192	13226334	645328	9.292	グルコース
2	10.026	1786202	64346	1.728	フルクトース

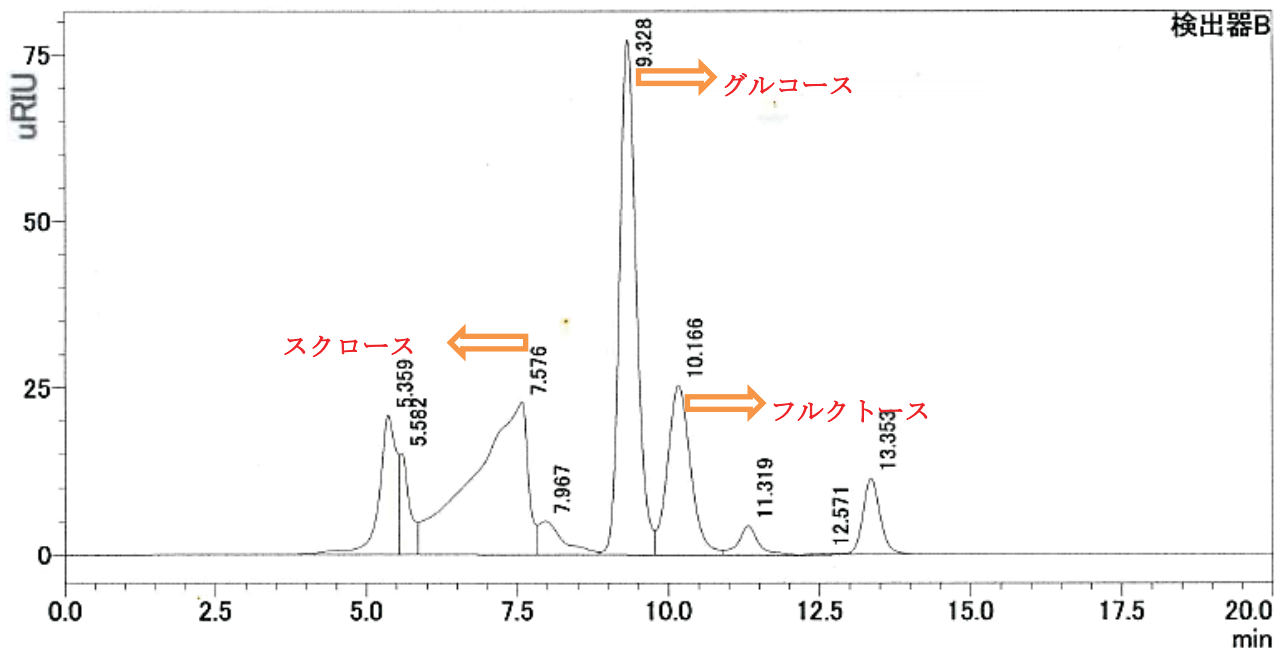


図 2-35 リンダーブレンダーで粉砕し酵素 D で糖化した試料のクロマトグラフ

表 2-23 リンダーブレンダーで粉砕し酵素 D で糖化した試料のピークレポート

ピーク	保持時間	面積	高さ	濃度 (%)	化合物名
1	7.431	4029682	11236	3.012	スクロース
2	9.128	7024123	30112	4.172	グルコース
3	10.025	1401369	75190	1.029	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が、ワンダーブレンダーによる前処理では、さらにスクロースが含まれていることが分析の結果から分かった。

前処理による糖成分の相違は、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(図 2-34)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。

一方、ワンダーブレンダー処理では、粉碎が不十分でスクロースのまま残っていると考えられる。

表 2-24 に本実験で用いたポケット糖度計と高速液体クロマトグラフ分析装置(HPLC)で測定した糖濃度の実験結果を示す。

両機器で測定した糖濃度には違いが見られる。これはポケット糖度計の値は、「屈折率」対「スクロース水溶液 100g に含まれるスクロースの g 数」に基づいて、スクロース濃度と一致するように測定が行われていることに起因する。

試料中に複数の糖が含まれている場合は、屈折計は比旋光度の大きい物質から測定が行われ表 2-25⁷⁾、糖化液中に含まれる物質の種類によっても濃度が変化するため屈折計では、正確な値が求めることができなかつたと考えられる。

また、糖化液中に含まれているスクロースの比旋光度は $+66.5^\circ$ であるが、分解して生じる2個の単糖のうちグルコースは右旋性、フルクトースは左旋性である。このため、分解生成物の比旋光度は -20° で左旋性を示し、加水分解による旋光性の逆転がおこる転化と呼ばれる現象が起こる⁸⁾。このように、セルロースが酵素により分解されていく過程で生成する糖の成分、物質特有の比旋光度、転化による比旋光度低下等によってポケット糖度計と高速液体クロマトグラフ分析装置(HPLC)で分析した結果に相違があり、複数の糖が混合している試料の測定にはポケット糖度計は簡易的な濃度測定に用いるほうが望ましいと考えられる。

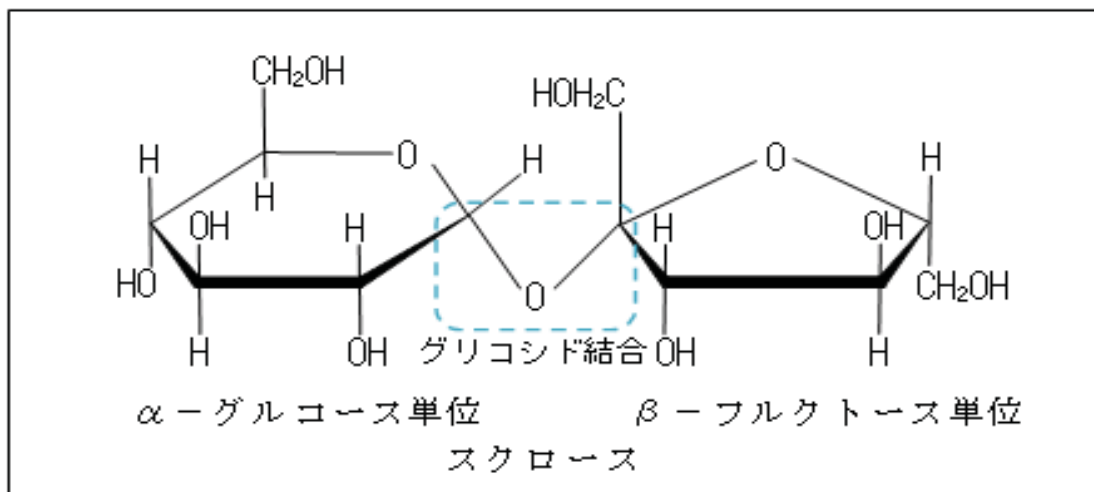


図 2-34 スクロースの分子構造(参考文献 9 に基づいて作成)

表 2-24 各酵素、2 種類の前処理で得られた糖濃度の実験結果

酵素名	測定機器		
		HPLC	ポケット糖度計
酵素 A	ボールミル処理	15.88	12.3
	ブレンダー処理	12.79	9.9
酵素 B	ボールミル処理	7.289	8.6
	ブレンダー処理	5.149	6.8
酵素 C	ボールミル処理	3.845	6.6
	ブレンダー処理	3.392	5.7
酵素 D	ボールミル処理	11.02	9.8
	ブレンダー処理	8.213	6.2

単位 (%)

表 2-25 各糖成分の比旋光度

物質名	比旋光度	備考
スクロース	+66.5°	
α-D-グルコース	+112°	37%存在
β-D-グルコース	+19°	63%存在
フルクトース	-92.25°	

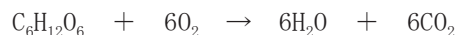
第3章 エタノール発酵に関する実験

3-1 エタノール発酵の概要

エタノール発酵とは、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、卓上型ボールミルにより前処理した Brix12.3% の糖化液を用いて、5 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 25 年 8 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) とドライイースト (日清フーズスーパーカメラヤ) 0.8g を加えた。
- (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) を使い、設定条件として、カラム充填剤 PEG、カラム長さ 2m、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

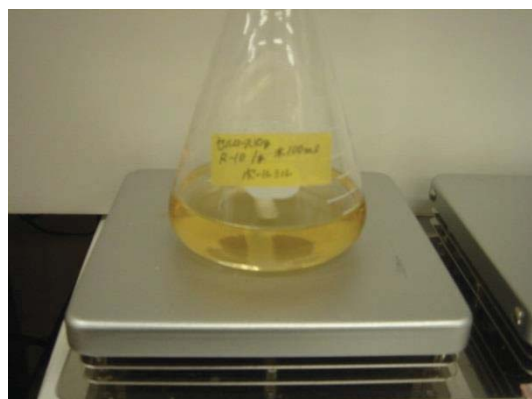


図 3-2 発酵実験の様子

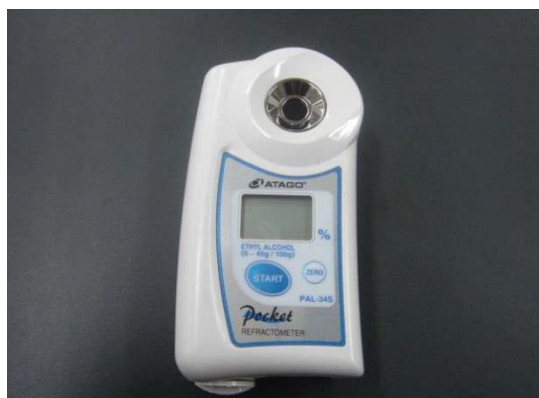


図 3-3 ポケットエチルアルコール計

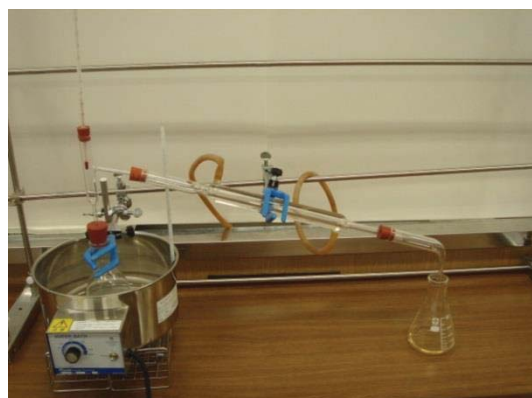


図 3-4 単蒸留実験の様子



図 3-5 単蒸留で得られたエタノール

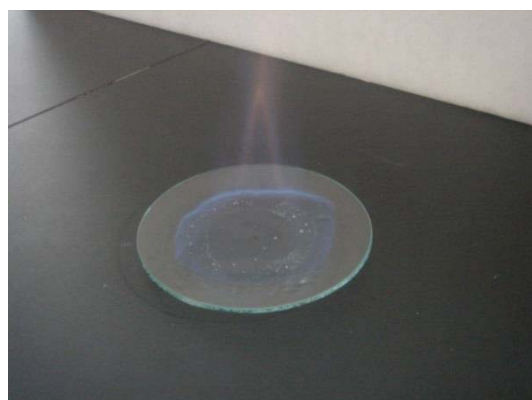


図 3-6 エタノールの燃焼実験

3-3 実験結果及び考察

実験 2-5 で得られた Brix12.3%との糖化液に酵母 0.8g を加え、エタノ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 8.3%、2 日目には 9.5%、3 日目には 11.1%、4 日目には 12.0%、5 日目には 12.5%のエタノールを得ることができ、単蒸留後にはエタノール濃度は約 60%まで高まった。

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ため、簡易的な濃度測定にのみ用いることが望ましい。

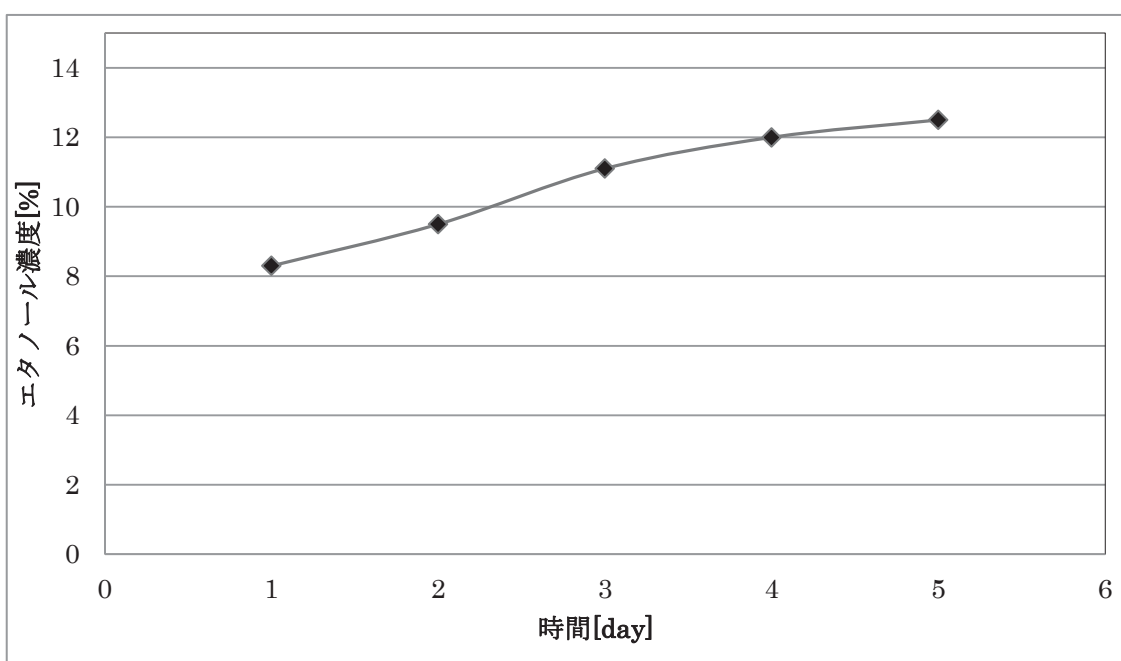


図 3-7 エタノール発酵実験結果

表 3-2 エタノール発酵実験結果

時間(日)	1	2	3	4	5
濃度 (%)	8.3	9.5	11.1	12.0	12.5
エタノール濃度	8.3	9.5	11.1	12.0	12.5

単位 (%)

表 3-3 各測定機器で測定したエタノール濃度

試料	エタノール発酵後のエタノール濃度	単蒸留後のエタノール濃度
測定機器		
ポケットアルコール計	12.5%	62%
ガスクロマトグラフ分析装置	8.8%	45%

単位 (%)

第4章 エコガソリン (E3) の製造に関する実験

4-1 エコガソリン (E3) の概要

E 3 は、植物由来の原料から作られたバイオエタノールを約 3 % 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、3 はバイオエタノールの混合率約 3 % を指している (エタノール 3 %)。

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 3 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 3 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。

エタノール発酵

- (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 回繰り返して、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ブ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)、モリキュラシーブ

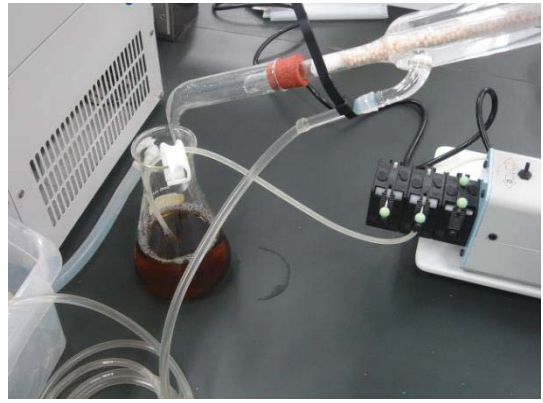
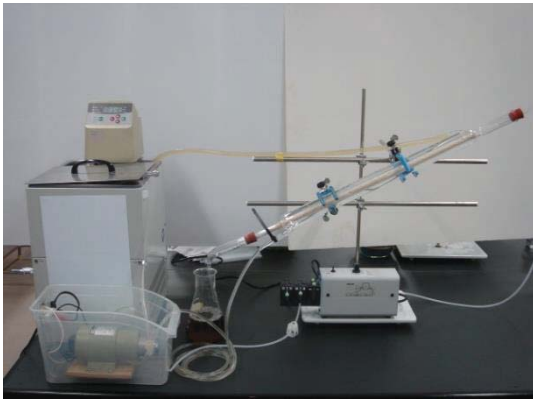


図 4-1 バイオリアクター装置 (左) 循環している糖化液 (右)



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 16%の糖化液をバイオリア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 32%、2 日目には 38%、3 日目には 40%、4 日目には 43%、5 日目には 45%のエタノールを得ることができ、1 回目の単蒸留後には 60%、2 回目の単蒸留後には 69%、脱水後には 85%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、バイオリアクターを製作し、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。

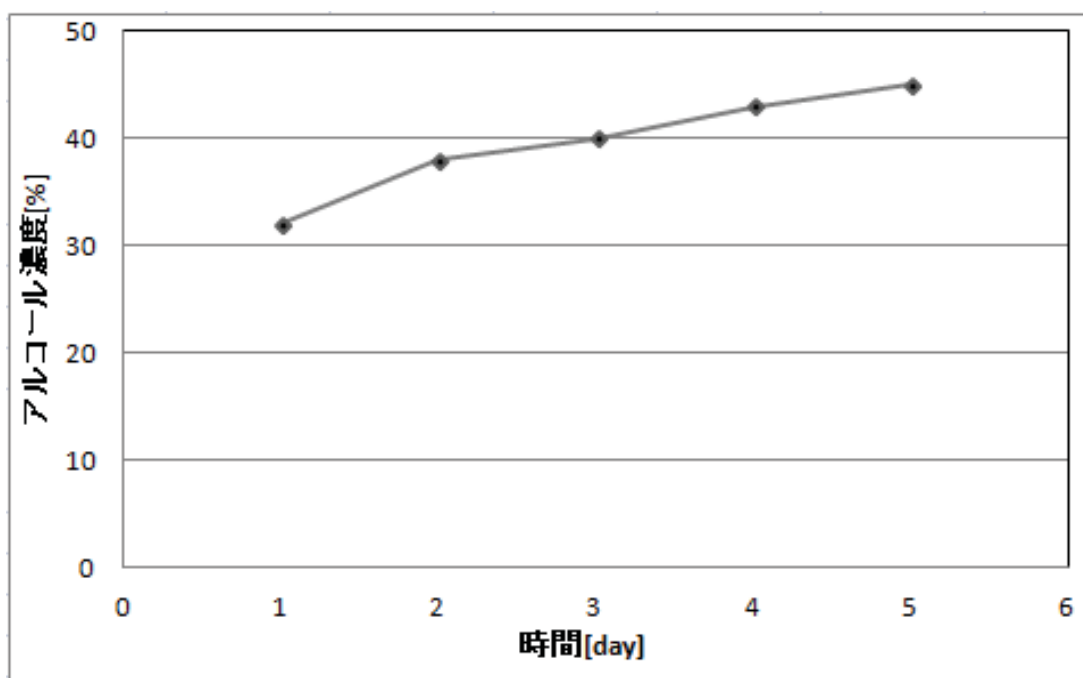


図 4-3 エタノール発酵実験結果

表 4-1 エタノール発酵実験結果

時間(日)濃度 (%)	1	2	3	4	5
エタノール濃度	32	38	40	43	45

単位 (%)

表 4-2 単蒸留、脱水後のエタノール濃度

実験操作濃度 (%)	1 回目の単蒸留後	2 回目の単蒸留後	脱水処理後後
エタノール濃度	60	69	85

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 97%にバイオエタノール 3%を混合し、E 3 として校内で使用される草刈り機、発電機に入れ作動し活用できることを実験的に検証した。

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 291mL に実験 4-2 で精製させたバイオエタノール約 9 mL 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 4-5)。

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 E 3 燃料の混合の様子



図 4-5 E 3 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 E 3 燃料を利用したの草刈り実験

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 3 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 3% バイオエタノールを混合するいわゆる E 3 燃料の精製に取り組んできたが今後は、E 5、E 10 とさらにバイオエタノール量を増やしていきたい。そのためには、バイオエタノール内の水分の除去が必要であり、蒸留法、脱水法の検討が重要になってくると思われる。

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、本研究では糖濃度の測定にはポケット糖度計と高速液体クロマトグラフ分析装置(HPLC)、エタノールの測定に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)を用いたが、ポケット糖度計とポケットエチルアルコール計による測定には屈折計の原理上の理由から、正確な値が求めることができなかつたため、比較的簡単に濃度測定できる実験方法の検討が必要である。

今後は、本研究をもとにより多くの実験・実習を通してエネルギー環境教育に対する意識を高め、地球環境問題解決の糸口となることを念頭に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) 自動車用代替燃料の技術開発、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

近年、カーボンニュートラルなエネルギー源として、バイオエタノールの需要が急速に高まっています。しかし、原料となる穀物市場における食料とエネルギーの資源争奪を生み出し、穀物価格の高騰等の問題が起きました。この研究ではバイオエタノールを従来の穀物ではなく、シュレッダーで裁断され焼却処分される裁断紙に着眼しバイオエタノールの生成を行っています。今回で2年目の継続研究であるが、昨年の課題をクリアすべく試行錯誤し課題解決を行った点を評価します。また、粉碎方法の違いから生成されるバイオエタノールの濃度の違いを科学的に分析している点や、なぜそのような違いが出たのかを考察し検証している点など研究論文としての評価も高いです。さらに、生成されたバイオエタノールをE3燃料として実際に使用し実用性の検証も行っています。今後の課題にも示されているように、ガソリンとバイオエタノールの混合比を変えた実証実験や、より高濃度の生成方法等の課題解決に向け次年度以降の研究に期待します。