

発酵研究方法の開発とその活用

～発酵菌の種類と温度・糖の種類がパンの膨らみに与える影響～

はじめに

私は小学生の頃から酵母を使ってパンを焼いてきたが、単に作るだけではなく、どのような条件で生地がよく膨らむのかを確かめようとして、置く場所の温度を変えたり、砂糖や塩の量を調整したり、発酵させる時間を比べたりするなどの試行錯誤をしてきた。ある時、蒸しパンの生地を作ってしばらく置いておいたところ、まだ加熱していないのに生地がふくらんでいるのを見て、とても驚いた。何もしていないのにふくらんだ理由が気になって調べてみると、生地の中に含まれている「酵母」という微生物が発酵して、二酸化炭素を出すことで膨らむことが分かった。さらに、別の日に賞味期限が過ぎた天然酵母を使って同じように生地を作ってみたところ、今度は全く膨らまなかった。この経験から、酵母の状態によって発酵の様子が大きく変わることを知った。

その後、酵母についてもっと詳しく調べてみると、酵母にはさまざまな種類があることを知った。たとえば、パン作りによく使われるドライイーストや天然酵母のほかにも、酒粕から作られる酒粕酵母、ワイン酵母、ビール酵母、などがあると知り、とてもおもしろいと思った。また、こんなにたくさんの種類の酵母があるのに、パンに使われるのは主にドライイーストや天然酵母で、ワイン酵母等のパンはあまり見かけないのが不思議に思った。また酒粕酵母は酒まんじゅうを食べたことがあるので、酒粕酵母がパンになるのは想像ができる。それでも、酒まんじゅうよりもドライイーストで作ったパンが多く流通しているのはどうしてだろうと思った。さらに、ワイン酵母やビール酵母でパンが出来るかどうかは想像が出来なかった。しかし同じ酵母であるから発酵させればパンになるのではないかと思った。

また、酵母について調べているうちに、ヨーグルトなどに使われている乳酸菌や味噌づくりに使われるこうじ菌も微生物であることを知り、乳酸菌やこうじ菌でも酵母のように発酵して生地がふくらむかもしれないと思うようになった。酵母とは違う菌だが、同じ微生物だからガスを出す力があるのではないかと考えた。

そこで、菌の種類や温度、糖の違いによって発酵の進み方がどのように変わるのかを調べることにした。しかし、通常の蒸しパンの実験では生地の量が多く、条件を細かく比べることが難しかったため、少量の生地でも正確に発酵の大きさを測れる方法を自分で開発する必要があると考えた。

目的

・より正確に数値化して測定できる、たくさんの条件で実験ができる独自の方法を開発し、膨らんだ生地の高さを時間ごとに記録し、発酵を正確に比較する。開発した方法が発酵の研究に適しているか考察する。

・発酵温度の違いによって蒸しパンの生地の発酵がどのように変わるかを調べ、どの温度で菌のはたらきが最も活発になるのかを明らかにする。

・菌の種類によって発酵の進み方や膨らみ方にどのような違いがあるかを調べる。

・同じ温度で砂糖の量や種類を変えた場合の発酵の違いを調べる。

・これらを通して、パンに主にドライイーストや天然酵母が使われる理由を考察するとともに、他の菌でもパンが作れる可能性を探る。

実験方法の開発

はじめに、蒸しパンのレシピを参考に蒸しパンを作ってみたところ、蒸しパンごとにふくらみ方にばらつきがあり、比較が難しいことが分かった。また、菌の種類、温度、時間、砂糖の量などを変えて実験を行うと、実験数が多くなり、材料も大量に必要なことが分かった。

そこで、普段の蒸しパンの材料の比率を守りながら、少量で生地を作って発酵のようすを調べる方法を考え、一時発酵の状態に注目して比較することにした。

また、温度を一定に保つ必要があるため、ヨーグルトメーカーで温度を変えて実験することにした。ヨーグルトメーカーは室温より低い温度に設定は出来ないため、室温と冷蔵庫の中も実験することにした。

次に、発酵中の生地の高さを計測するために、どの容器を使うかを検討した。市販のカップ、50mLのビーカー、試験管、メスシリンダーで試したところ、市販のカップはカップの底と上部で直径が異なり、内側の形が斜めになっているため、高さの変化から正確に発酵の量を測定するのに適していなかった。試験管とメスシリンダーは高さの測定に適していると思ったが、生地に粘り気があるため、奥まで詰めるのが難しかった。この中では50mLのビーカーが一番適していたが、実験には多数のビーカーが必要で、場所も取るうえ、発酵に使用するヨーグルトメーカーにはビーカーが1つしか入らないため、一度に実験を行うのが難しかった。また、小型のメスシリンダーも検討したが、こちらも生地を底まで入れることは困難だった。そのため、生地を容器の上からではなく、底から入れられないかと考え、最終的に、タピオカ用ストローを使用することにした。ストローは底から生地を詰められるだけでなく、コンパクトで多数準備しやすい点が利点だった。

ストローの底をふさぐ方法として、クッキングシートを敷く方法と、アルミホイルを巻く方法の2つを試した。ケーキ作りではクッキング



図1 ストローを用いた発酵測定方法(底を密封した様子)

シートがよく使われるため適していると考えたが、試しに実験をしてみると、発酵が進むと生地がストローの下から漏れてしまった。一方、アルミホイルをしっかりと巻いた場合は、生地が漏れることはなかったため、アルミホイルを使用することにした。一方、アルミホイルは金属で柔らかいのに加えて密着性が高く、隙間なくしっかりと巻くことができる。そのため、発酵によってガス圧が高まっても生地が下から漏れることはなく、密封性が保たれた。そこで、ストローの底はアルミホイルでふさぐ方法を採用することにした。

実験では、ストローに生地を詰めて一定時間発酵させた後、その高さを記録することにした。何度か実験を行ううちに誤差があることが分かったため、1つの条件につきストローを3本用意し、平均をとることにした。

また、比較するために同じ分量でパン生地を作ってストローに詰めたが、容器や器具に生地がくっついてしまい、ストローに入る量にばらつきが出てしまった。そこで、材料の比率はそのままにしつつ、ストローに詰める生地の高さを一定に決めることにした。

初めは、高さ 18cm 程度のタピオカストローに 6cm ほど生地を詰め、ドライイーストを使って 40℃で発酵させたところ、生地がストローの上部から飛び出してしまい、正確に測定できなかった。そこで、ストローの長さを伸ばすことにし、長さ 21cm のものに変更した。そして、生地の量を 6 cm ではなく 3cm にして実験を行った。ドライイースト(発酵力が最も強いと考えた)を使って 40℃で試した結果、生地は飛び出さなかったため、この条件で本実験を進めることにした。

さらに、冷蔵庫で実験を行うと観察の度に庫内の温度が上昇し、記録を付ける際に一気に酵母が発酵をすることが複数回見られた。できるだけ温度が上がらず、早く観察できるように、冷蔵庫だけ定規のシールを貼



図2 冷蔵庫内(5℃)での実験の様子
(サランラップ、メモリシールを使用)

り記録は写真を撮ってつけることにした。それでも、庫内の温度は冷蔵を空けるたびに変わするため、よい方法がないか調べてみると実験器具のカタログで専門的な研究用の透明冷蔵庫を見つけた。そこで、自宅で透明冷蔵庫を再現するために、冷蔵庫の庫内の一部を確保しサランラッ



プで覆うことにした。予備実験で冷蔵庫を開いたままの状態ですぐだけの時間であれば温度が変わらないか調べた所、約1分間は温度が変わらないことが分かった。その上、ストローにメモリを貼り、観察時には写真を撮ることで温度変化を最小限にした。

図3 ヨーグルトメーカーを使用して実験
(40℃・60℃)

高い温度の場合(40℃と60℃)はヨーグルトメーカーを使って温度を調整した。

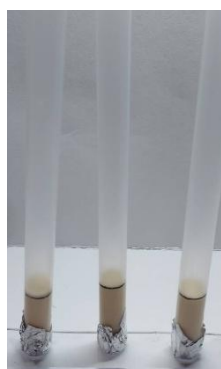


図 4 観察開始時

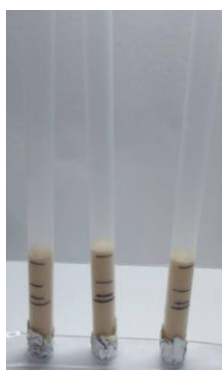


図 5 15分後の様子



図 6 30分後の様子

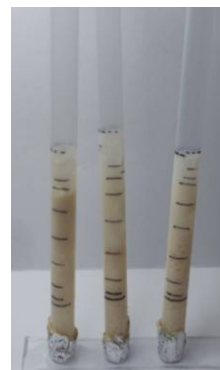


図 7 観察終了時の様子

実験 1

- ・ストローを使った独自の方法で、生地の高さを時間ごとに記録し、発酵を正確に比較する。ストローを使った独自の方法が発酵の研究に適しているか考察する。
- ・菌を変えて実験を行い比較する。(ドライイースト・天然酵母・ワイン酵母・酒粕酵母・ビール酵母・乳酸菌・こうじ菌)
- ・温度を変えて実験を行い比較する。室温 (28℃) 冷蔵庫 (5℃) 40℃、60℃

準備

次の比率を守り蒸しパンの生地を作る。

(材料)

薄力粉 (日清フラワー) : 20 g

砂糖 (上白糖 : パールエース) : 2 g

水 (浄水器を通した水 常温 26℃) : 20 g

菌 : 1 g

キャノーラ油 (J-オイルミルズ) : 2 g

材料			
ドライイースト (日清製粉ウェルナ)	天然酵母 (風と光)	ワイン酵母 (RED STAR)	酒粕酵母 (西宮食糧)
ビール酵母 (アサヒ)	乳酸菌 (フジッコ)	こうじ (伊藤ハシ)	

タピオカ用ストロー (直径 1cm 長さ 21cm のもの)、アルミホイル、ビーカー、カメラ、ストップウォッチ、温度計、ヒアオフィメン

図 8 使用した菌の種類

実験器具	
	
スケール（0.001 g）まで計れるもの	ヨーグルトメーカー

図 9 使用した実験器具

方法

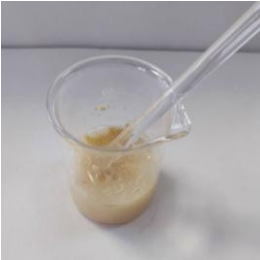
実験手順			
			
①タビオカ用ストローの下から3 cmの所に印を入れる。	②アルミホイルを3 cm×3 cmの大きさに切る。	③☒と菌以外の材料を混ぜる。	④☒ーカーに常温の水（26℃）と菌を入れて混ぜる。
			
⑤ ③に④を入れて混ぜる。	⑥できた生地をストローのメモリまで入れる。	⑦底をアルミホイルで覆う。	⑧3本用意し、膨らんだ長さと時間を記録する。

図 10 実験手順

詰めた生地を、室温（28℃）、5℃（冷蔵庫）、40℃（ヨーグルトメーカー）、60℃（ヨーグルトメーカー）の各温度条件下で発酵させ（各3本）、発酵後の高さ経過時間を記録した。記録したデータをもとにグラフを作成し、各条件を比較した。5℃の場合は、冷蔵庫の庫内の一部を確保しサランラップで覆うことで、透明冷蔵庫をできるだけ再現した。また、ストローに目盛りを貼り、観察時には写真を撮ることで温度変化を最小限に抑えた。

実験結果にばらつきが生じる場合や、発酵の開始時間が曖昧になる場合には、2～3回の実験を行い、平均値を算出した。本報告では、その中から代表的なグラフを掲載した。

結果

実験1－1 28℃

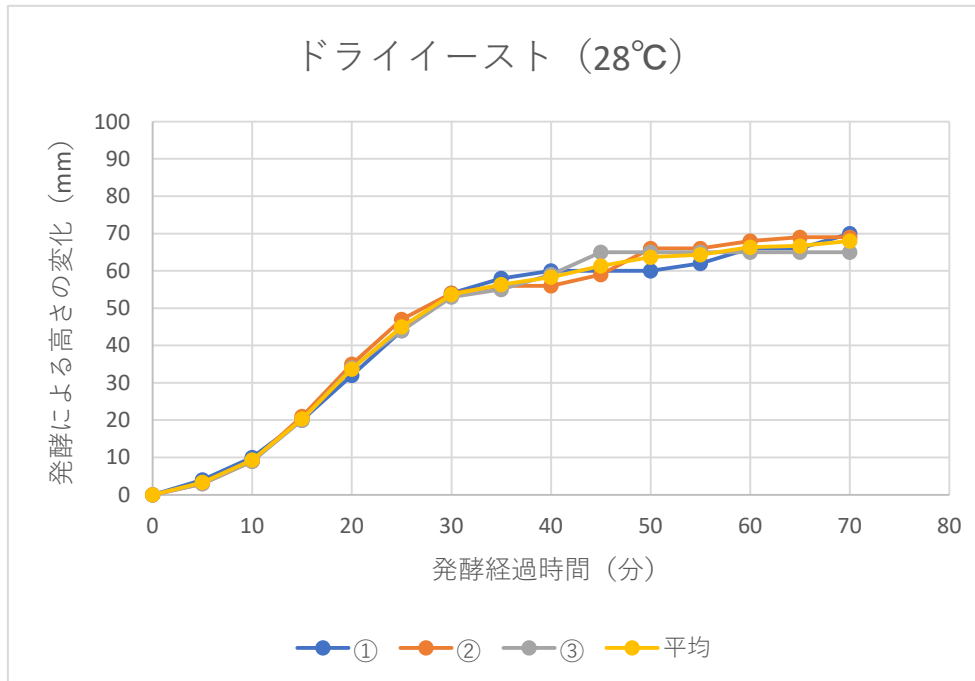


図 11 ドライイーストの発酵 (28℃)

実験を始めてから 10 分以内にふくらみ始め、45 分で 61～66mm ほどに達した。

その後は大きな変化はなく、ほぼ横ばいになった。

3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。



図 12 ドライイースト (28℃) 発酵終了時の様子

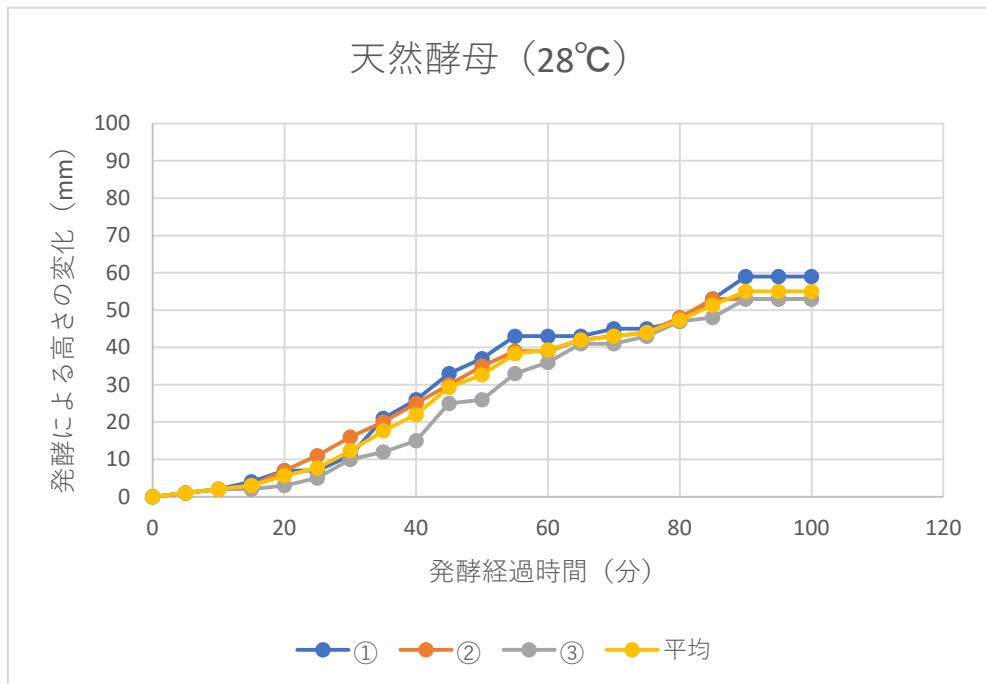


図 13 天然酵母の発酵 (28℃)

実験を始めてから 10～20 分でふくらみが始まり、90 分で 53～59mm になった。
増加はゆるやかで、ドライイーストやワイン酵母より高さが低かった。
3 本とも似た結果で、再現性が良かった。



図 14 天然酵母 (28℃) 発酵終了時の様子

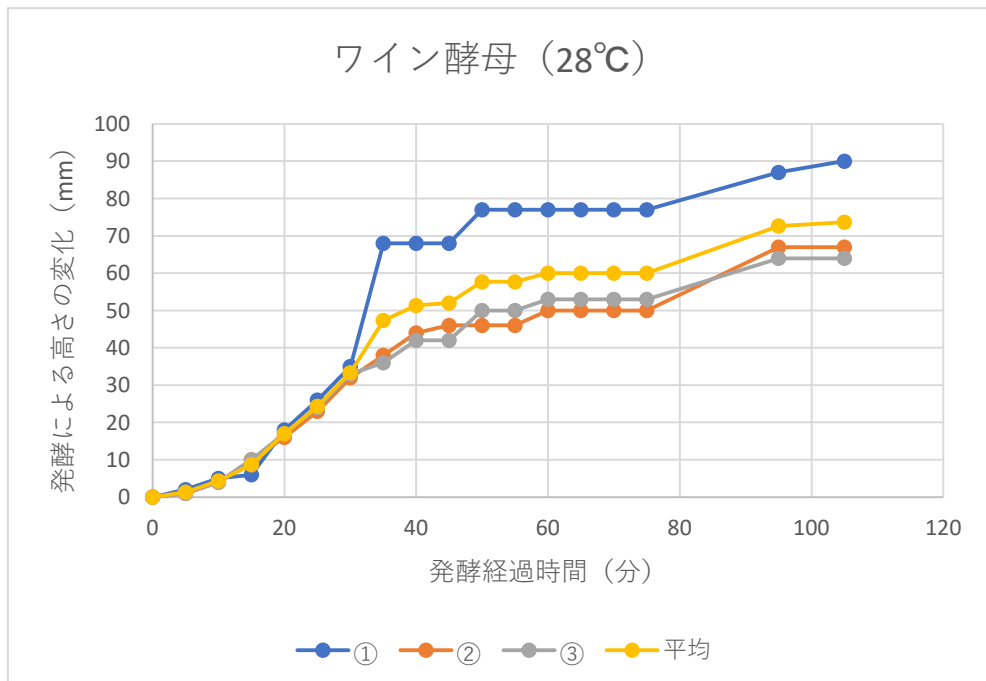


図 15 ワイン酵母の発酵 (28℃)

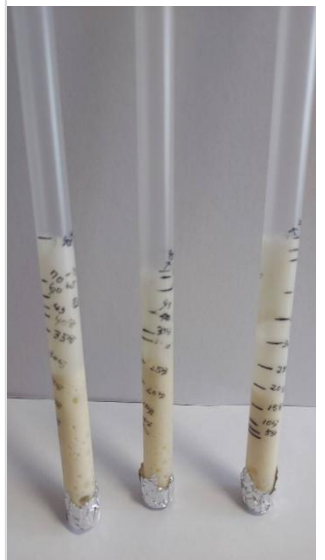


図 16 ワイン酵母 (28℃) 発酵終了時の様子

実験を始めてから 10～30 分でふくらみが見られ、50 分の時点で高さは 50～77mm ほどに達した。その後しばらく大きな変化はなかったが、75 分を過ぎてから再び膨らみ始めた。3 本のうち 1 本は特に大きく膨らんだが、他の 2 本も安定して膨らみ、実験の再現性は概ね良好であったといえる。

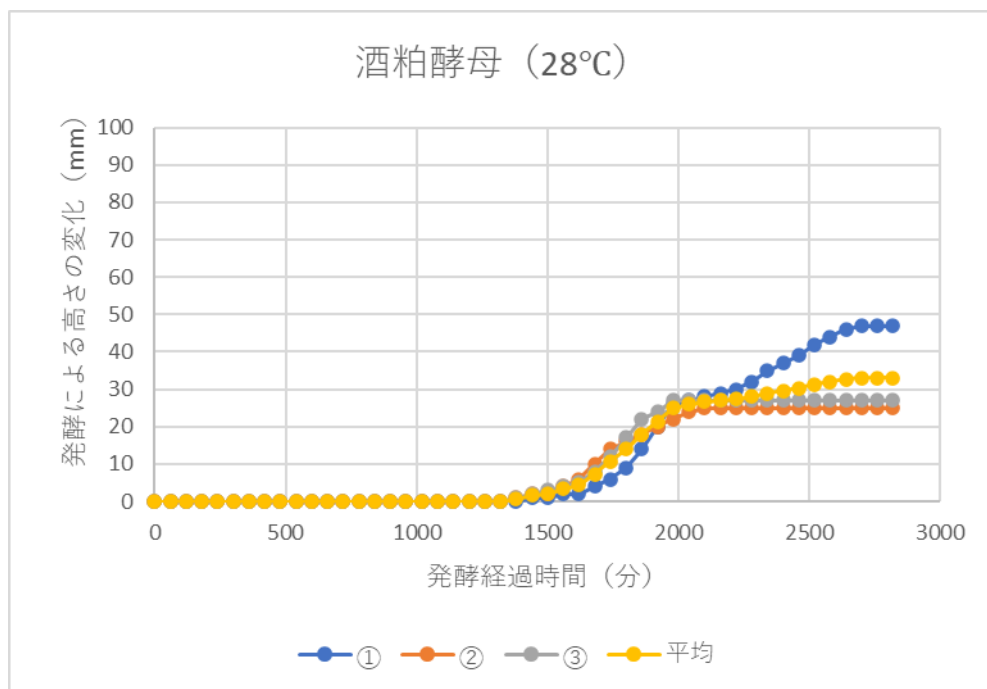


図 17 酒粕酵母の発酵 (28℃)

発酵の開始時間を把握できず、3 回実験を行った。1 回目の実験で発酵が始まるまでかなり時間がかかり、発酵の開始が夜間になってしまったため、実験開始時間を朝に変更して行った。600 分～1170 分までの間に発酵があると考え、2 回目は朝から実験を開始したが、予想の時間には発酵は始まらず、1455 分～1815 分の間に発酵が始まった。3 回目の実験では、1350 分～2015 分の間に発酵が始まった。4 回目の実験は、ストローにメモリシールを貼り、ビデオカメラで撮影を行い、1 時間ごとに観察記録をつけた。回によってふくらみ方が大きく異なり、ほとんど膨らまないものもあれば、一部だけ急に膨らむものもあった。



図 18 酒粕酵母 (28℃) 発酵終了時の様子

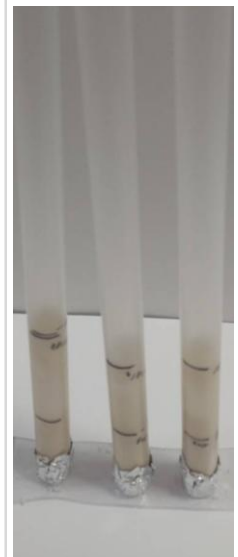
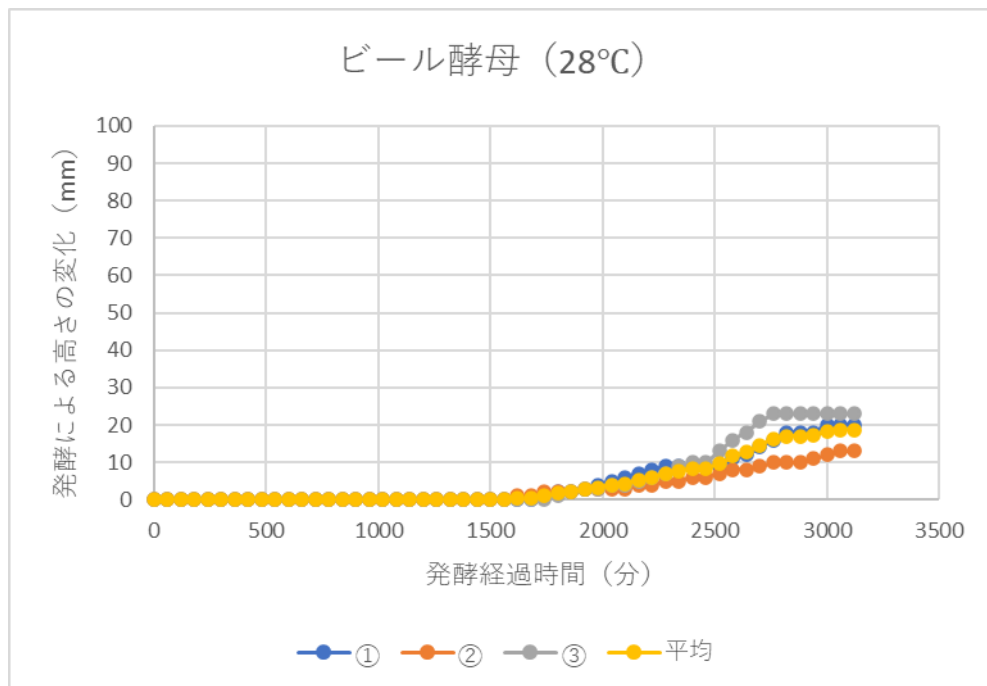


図 20 ビール酵 (28℃) 発
酵終了時の様子

図 19 ビール酵母の発酵 (28℃)

発酵開始時刻が夜間になってしまったため、3回実験を行った。3回目の実験ではストローにメモリシールを貼り、ビデオカメラで撮影を行い記録した。3回の実験とも発酵開始は 1,380 分～2010 分の間で遅く、最大でも 23～35mm 程度であった。

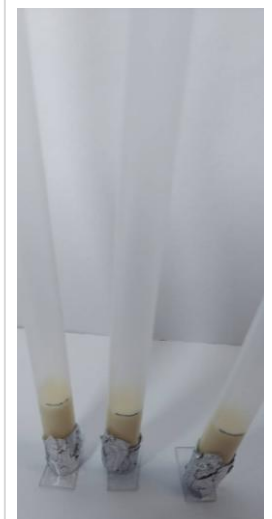
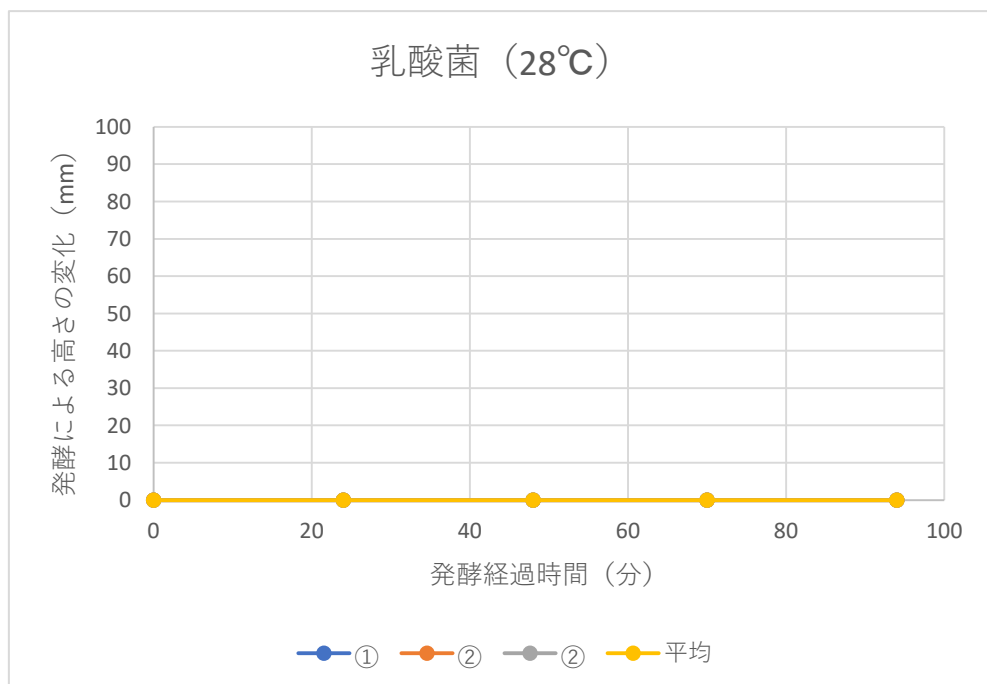


図 22 乳酸 (28℃) 発
酵終了時の様子

図 21 乳酸菌 (28℃) の発酵

発酵の様子は見られず、生地の高さは変わらなかった。

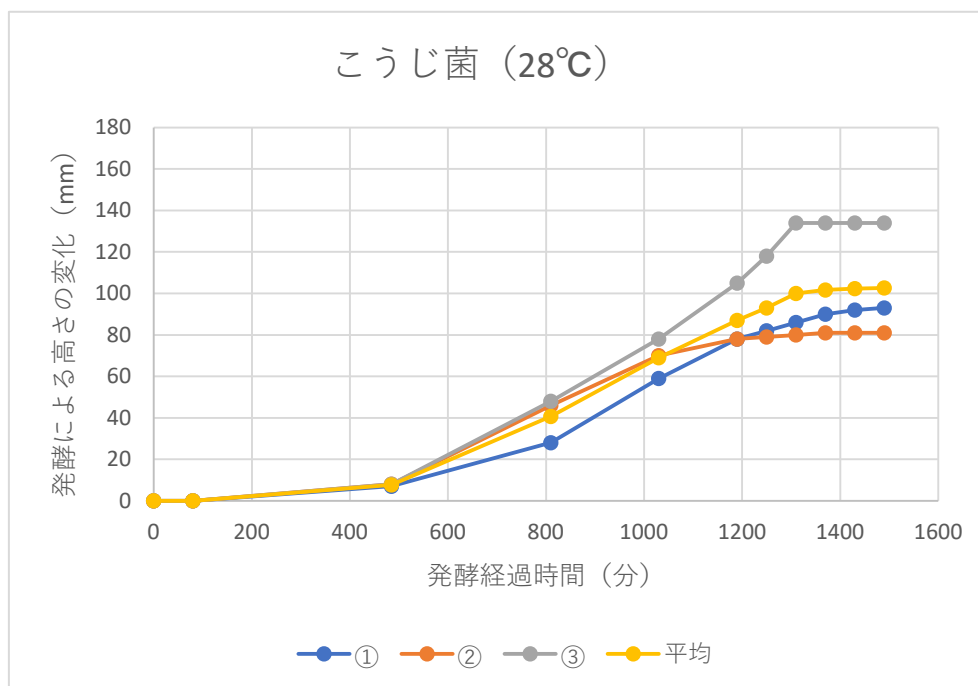


図 24 こうじ菌 (28℃) 発酵終了時の様子

図 23 こうじ菌の発酵 (28℃) (グラフからはみ出してしまったため、縦軸 180 mm で表記)

観察できない時間があったため、2 回実験を行った。実験を始めてから 500～600 分くらいまでは、ほとんど高さが変わらなかった。その後、急にふくらみ始め、800～1500 分で大きく膨らみ、最大で 172 mm に達したものもあった。3 本の実験ではどれも大きく膨らんだが、伸び始める時間や高さに差があった。

表 1 28℃での結果

種類	速さ (mm/分)	発酵開始時間 (確実) (分)	発酵終了時刻 (確実) (分)	発酵終了時の高さ (平均) (mm)	特徴
ドライイースト	2.227	5	125	72	短時間で勢いよく発酵する
天然酵母	1.031	5	100	55	ゆるやかに発酵する
ワイン酵母	1.511	5	240	75	持続的に発酵が続く
酒粕酵母	0.055	1815	2700	40.1	発酵開始が非常に遅く、膨らみも小さい。28℃では活動が弱い。
ビール酵母	0.046	2010	3060	26.7	発酵がゆっくり進み、持続はするが膨らみは小さい
乳酸菌	—	—	—	—	発酵による膨らみは見られなかった
こうじ菌	0.081	1230	3480	115.5	発酵開始が不安定だが、膨らみは大きい

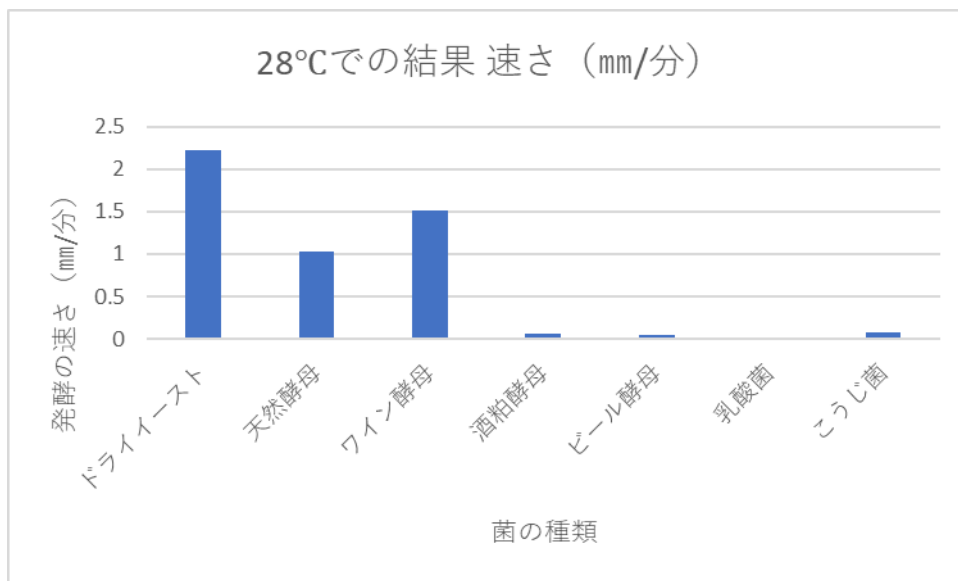


図 25 28℃での結果 速さ (mm/分)

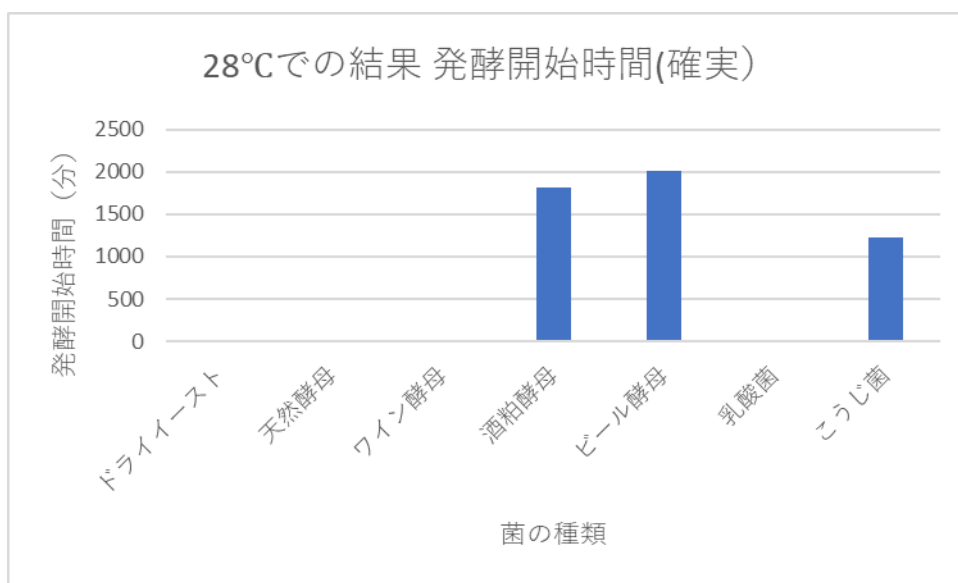


図 26 28℃での結果 発酵開始時間 (確実)

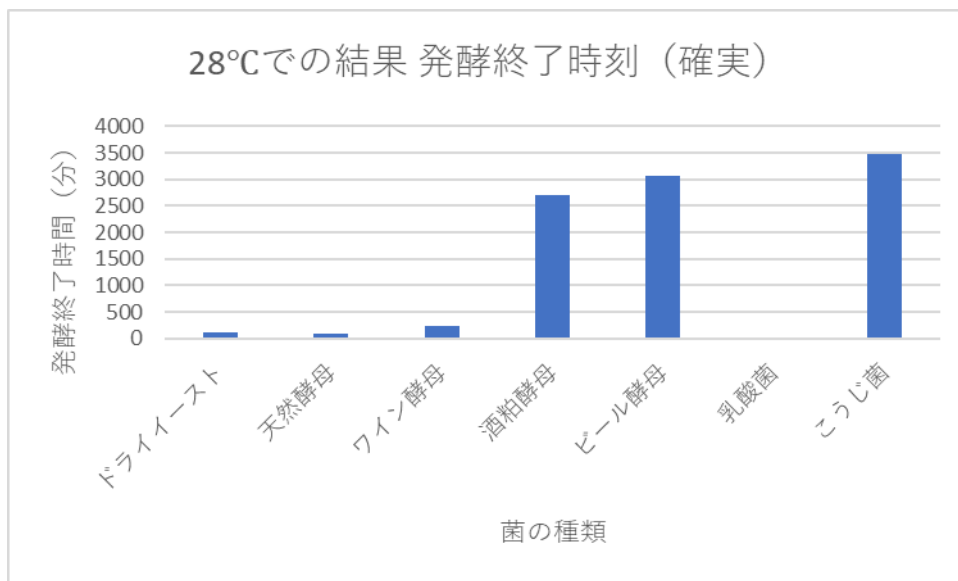


図 27 28℃での結果 発酵終了時間（確実）

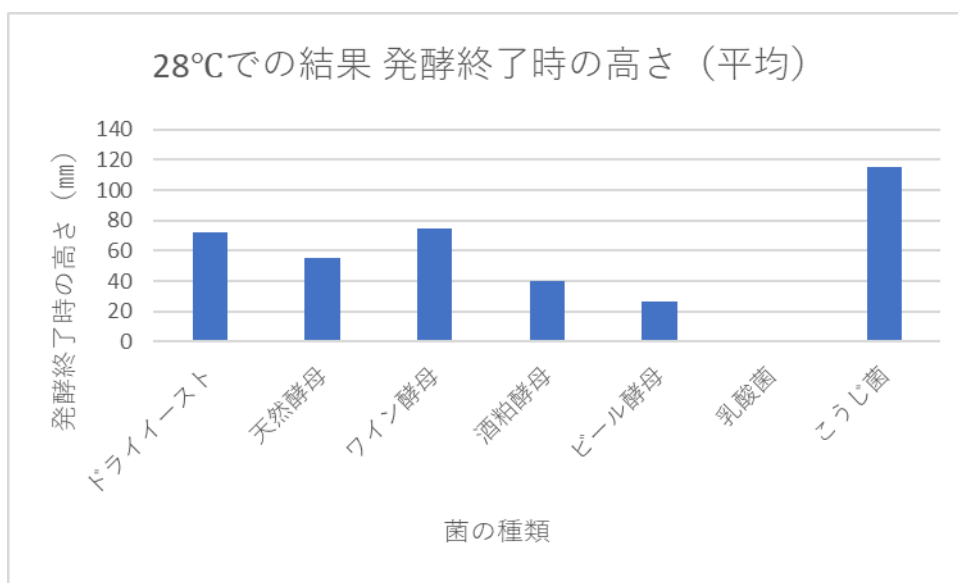


図 28 28℃での結果 発酵終了時の高さ（平均）

実験1－2 5℃

予備実験でラップを貼った状態で冷蔵庫の温度を調べると、頻繁に冷蔵庫の扉を開けていなくても、実際は冷蔵庫の温度が0℃から5℃の間でいつも一定ではなかった。

冷蔵庫は温度が0～5℃の間で変化することが分かったが、本研究では「5℃」と表記した

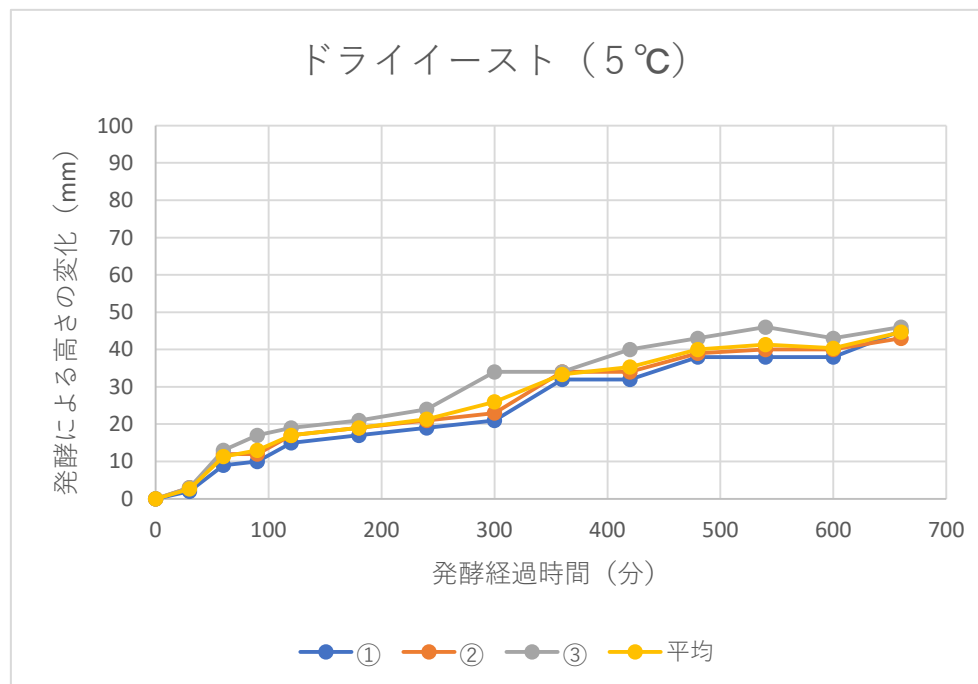


図30 ドライイースト
(5℃) 発酵終了時の様子

図 29 ドライイーストの発酵 (5℃)

実験を始めてから 240 分くらいまでは、ゆっくりとしかふくらまなかった。

300 分を過ぎたあたりから少しずつ高さが増え、540 分 (9 時間) で 40mm 前後に達した。

その後は高さがほとんど変わらなかった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

3 本の実験で高さのその後、観察が夜間になったので次の日の朝である 1,335 分後 (22 時間 15 分後) に計測したが変化なかった。

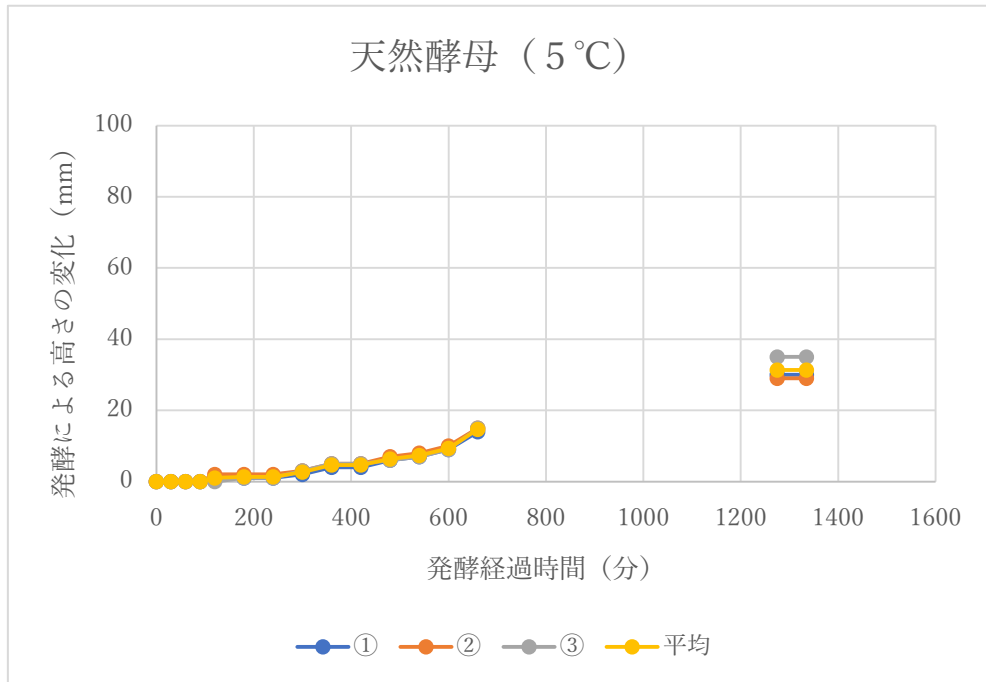


図 32 天然酵 (5℃) 発酵終了時の様子

図 31 天然酵母の発酵 (5℃)

実験を始めてから 300 分 (5 時間) くらいまでは、ほとんど高さが変わらなかった。その後、少しずつふくらみはじめ、600 分から 660 分 (10 から 11 時間) くらいで 10～15mm になった。計測が次の日の朝である 1,275 分後 (21 時間 15 分後) には 29～35mm までふくらんでいた。朝の計測から 1 時間後は変化がなかった。

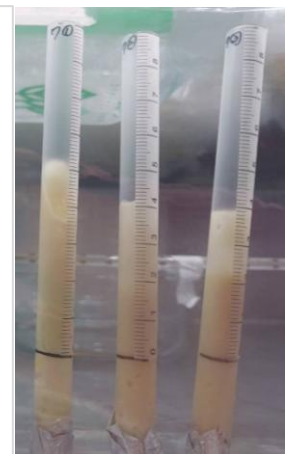
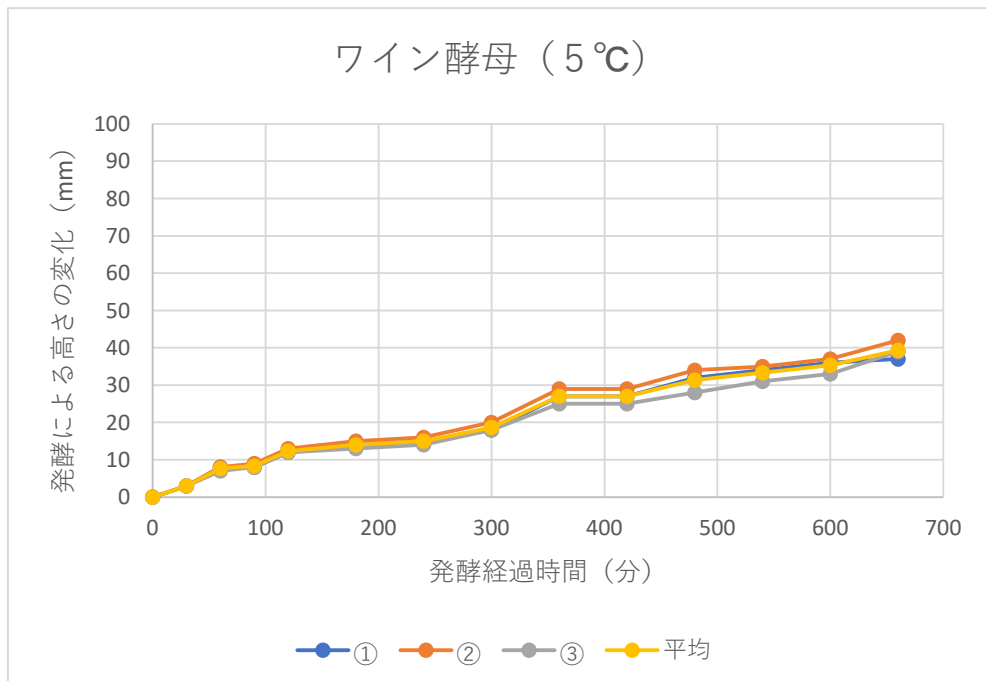


図 34 ワイン酵 (5℃) 発酵終了時の様子

図 33 ワイン酵母の発酵 (5℃)

実験を始めてから 240 分（4 時間）くらいまでは、少しずつふくらみが進んだ。360 分から 480 分（6 時間から 8 時間）あたりで高さが 30mm 前後になり、その後もゆるやかに増えた。660 分（11 時間）で 40mm 前後に達した。その後は次の日の朝である 1,275 分後（21 時間 15 分後）に観察したが、①が 6 mm 伸びていただけで、他は変化なかった。①はその後 1 時間経っても変化はなかった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。



図 35 酒粕酵母（左）ビール酵母（右）観察終了時

図 36 乳酸菌（左）こうじ菌（右）観察終了時

酒粕酵母、ビール酵母、乳酸菌、こうじ菌は発酵の様子が観察できなかった。

表 2 5℃での結果

種類	速さ (mm/分)	発酵開始時間 (確実) (分)	発酵終了時刻 (確実) (分)	発酵終了時の 高さ (平均) (mm)	特徴
ドライー スト	0.067	30	660	44.6	低温でもある程度活動し、比較的よく膨らむ
天然酵母	0.038	90	1275	31.3	発酵開始が遅く、低温では力が弱まる
ワイン酵母	0.055	30	660	41	低温でも早く発酵開始するが、持続は短い
酒粕酵母	0	0	0	0	低温では発酵しない
ビール酵母	0	0	0	0	低温では発酵しない
乳酸菌	0	0	0	0	低温では発酵しない
こうじ菌	0	0	0	0	低温では発酵しない

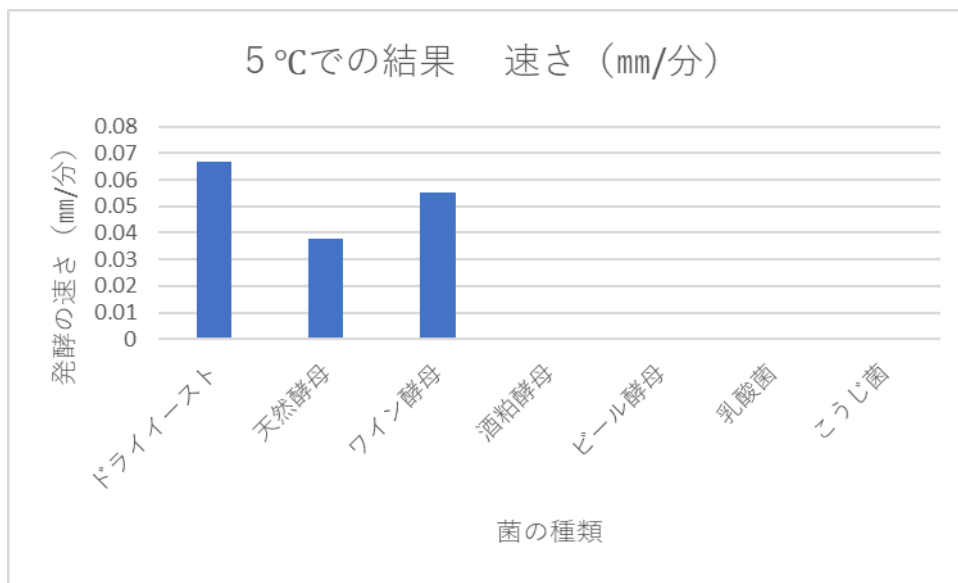


図 37 5℃での結果 速さ (mm/分)

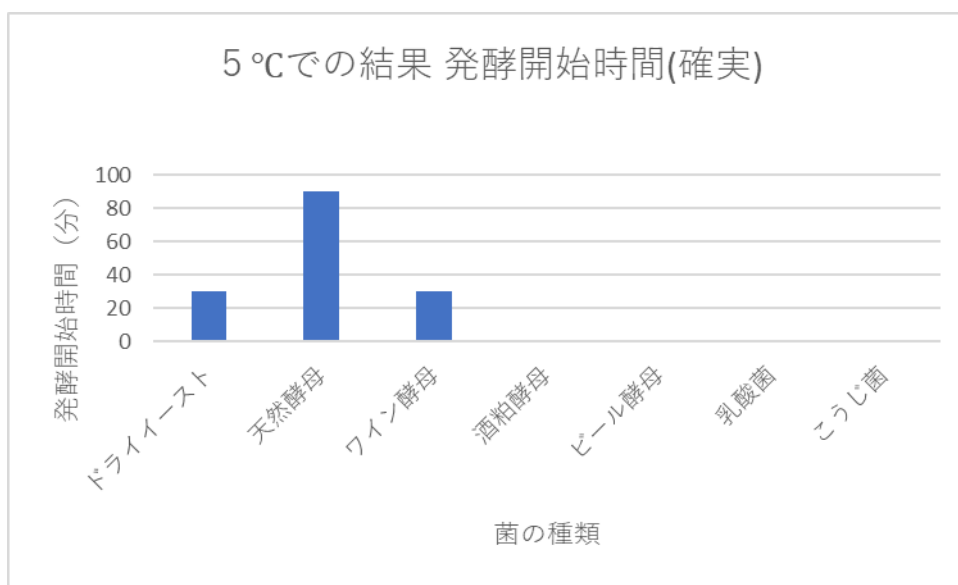


図 38 5℃での結果 発酵開始時間 (確実)

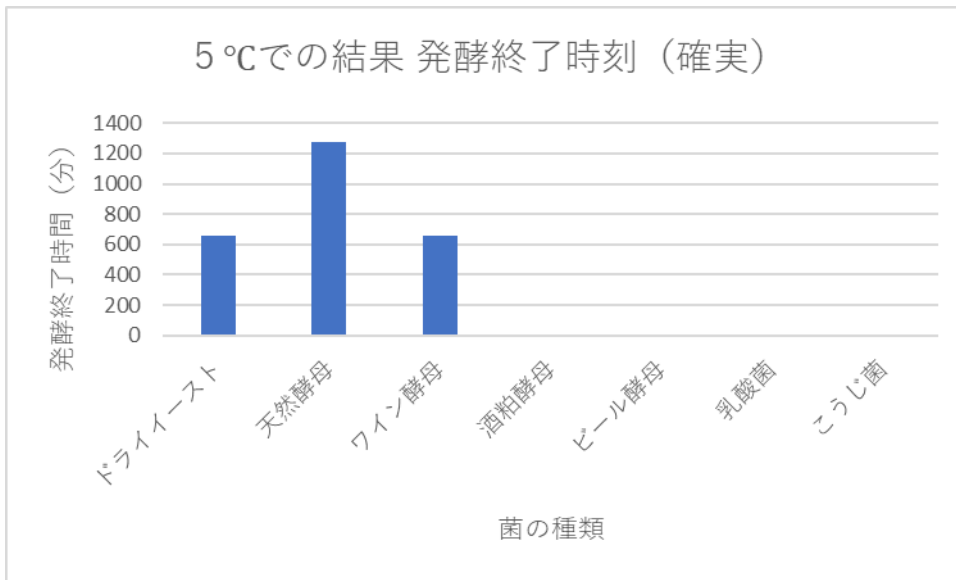


図 39 5℃での結果 発酵終了時間（確実）

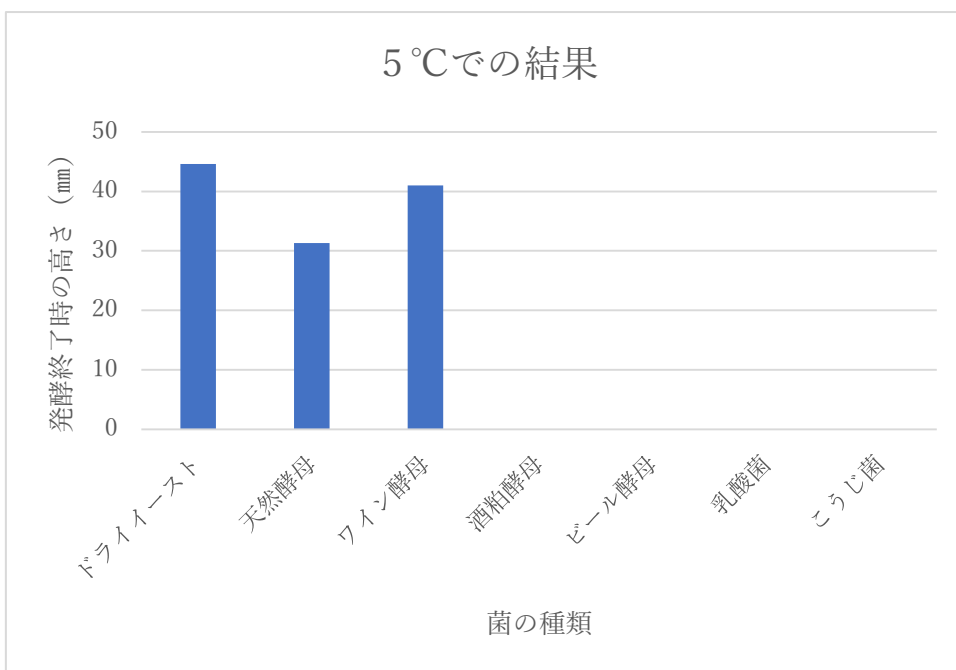


図 40 5℃での結果 発酵終了時の高さ（平均）

実験1－3 40℃

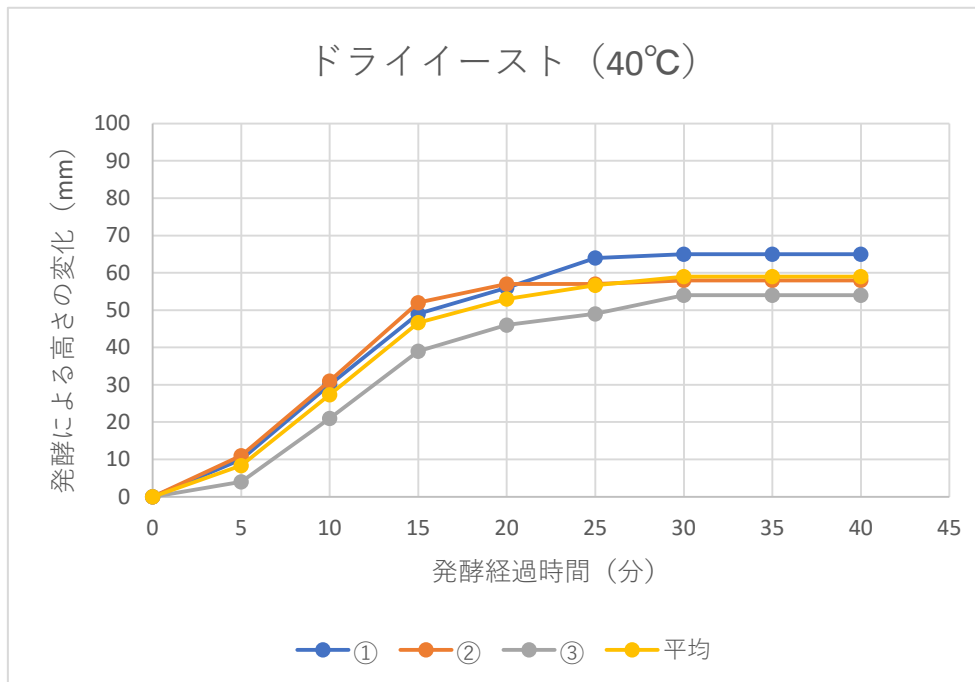


図 42 ドライイースト (40℃) 発酵終了時の様子

図 41 ドライイーストの発酵 (40℃)

実験開始からすぐにふくらみはじめ、15 分で 40～50mm 程度に達した。30 分を過ぎると高さはほぼ変わらなかった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

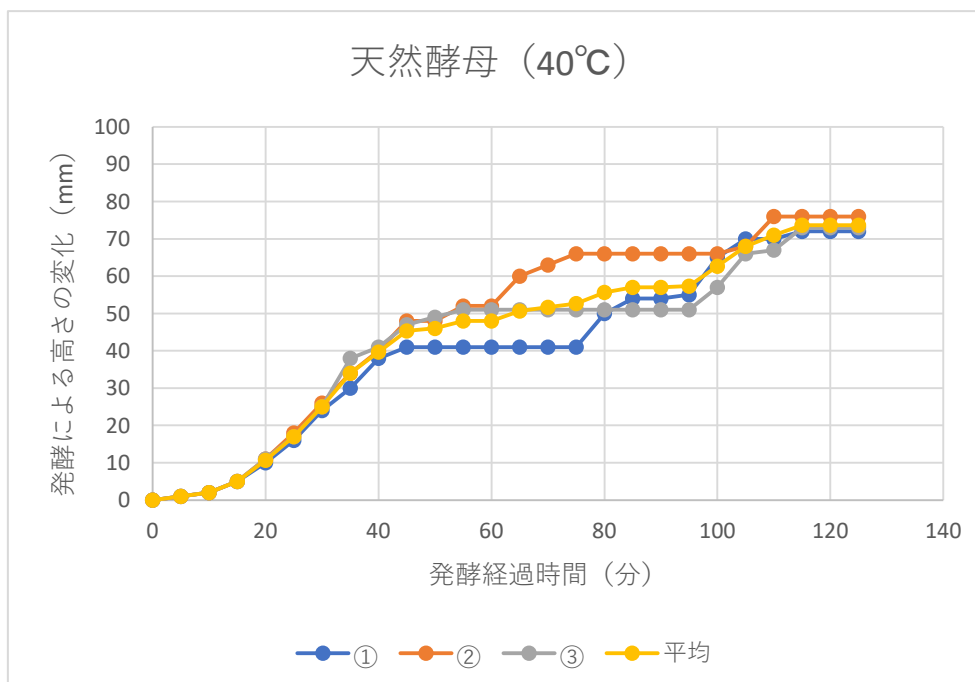


図 44 天然酵母 (40℃) 発酵終了時の様子

図 43 天然酵母の発酵 (40℃)

実験開始から 15 分くらいまではほとんど変化がなかった。その後少しずつふくらみ、40 分で 40mm 程度に達した。65 分以降はいったん増加がゆるやかになったが、100 分を過ぎると再びふくらみ、105 分から 110 分で 70mm 前後に達した。3 本ともグラフは似た形だったが、ふくらむ速さや途中の変化にやや違いがあった。

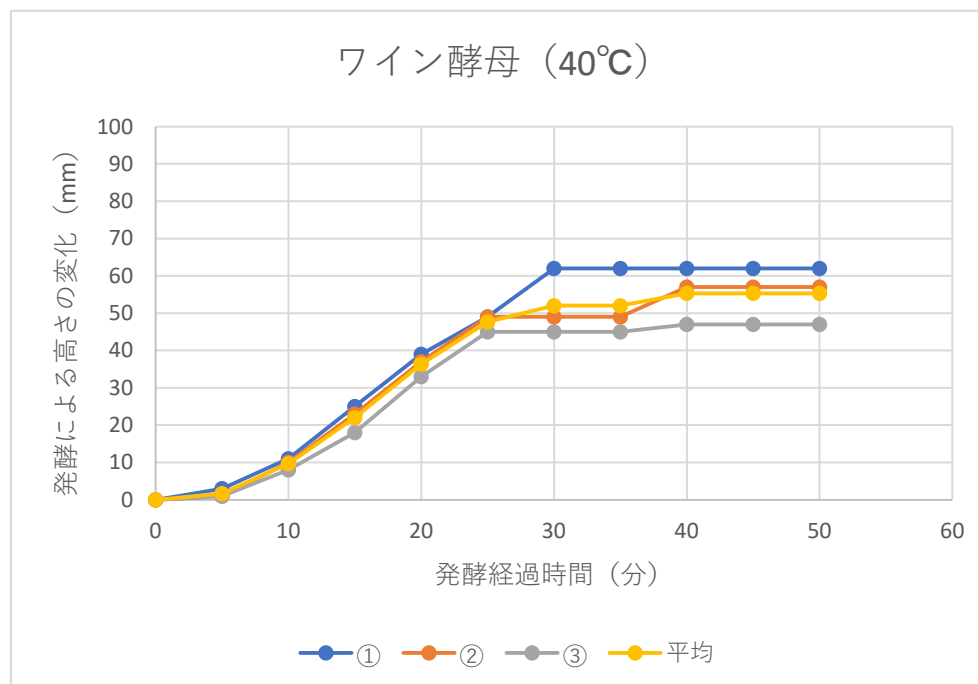
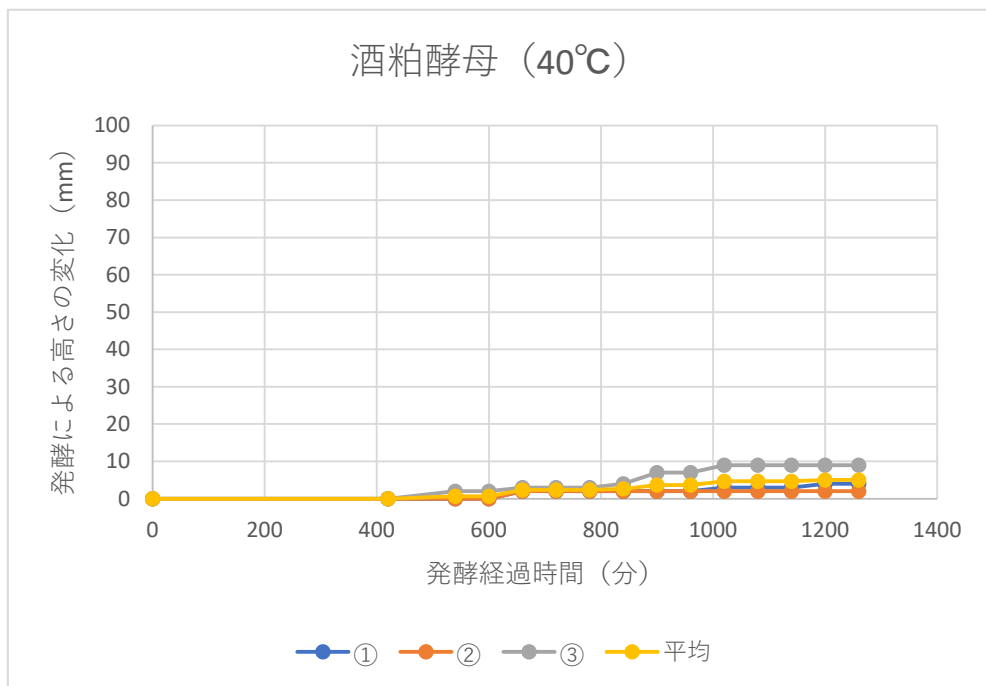


図 46 ワイン酵母 (40℃)
発酵終了時の様子

図 45 ワイン酵母の発酵 (40℃)

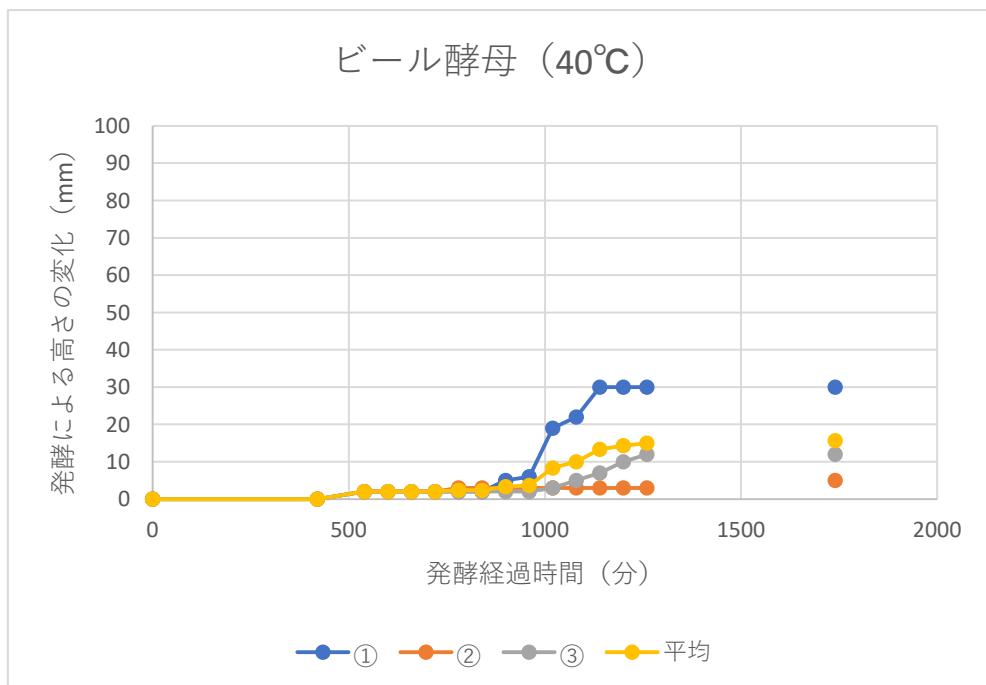
25 分ほどまでは勢いよく膨張し、30 分で 50~60mm 程度に達した。その後は大きな変化がなく、50 分時点でも同じくらいだった。3 本の実験はいずれも似たグラフとなった。



撮影忘れのため
写真なし。

図 47 天然酵母の発酵 (40℃)

実験開始から 1,260 分 (21 時間) まで観察してもほとんどふくらまなかった。わずかに高さが増えることはあったが、10mm 以下だった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

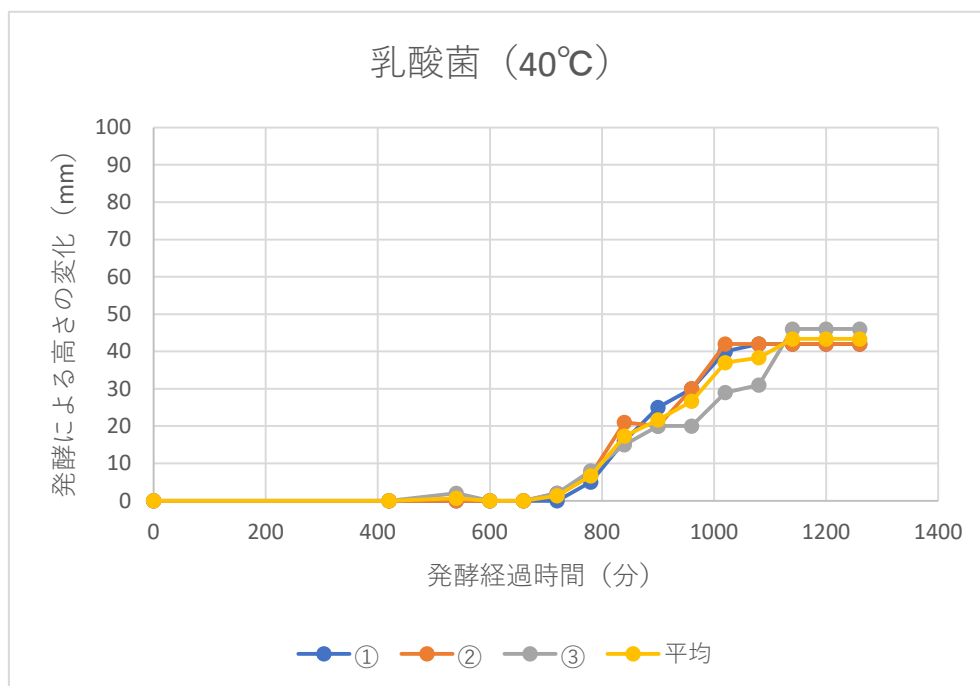


撮影忘れのため
写真なし。

図 48 ワイン酵母の発酵 (40℃)

開始から 1,020 分 (17 時間) ほどまでは変化がなかった。その後少しずつふくらみ、最大

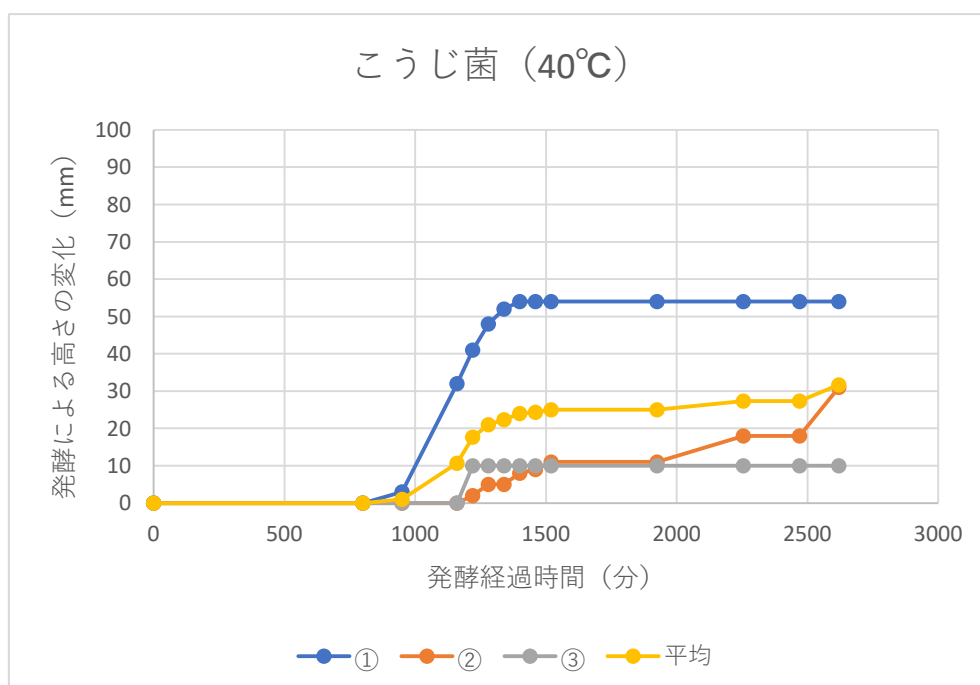
で 30mm 程度になった。3 本の実験で高さやふくらむタイミングに差があった。観察が夜間になり、1,740 分（29 時間後）に観察しても、ほとんど変わらなかった。



撮影忘れのため
写真なし。

図 49 乳酸菌の発酵 (40°C)

開始から 840 分（14 時間）ほどまではあまり変化がなかった。その後、ゆっくりとふくらみ、1,020 分（17



撮影忘れのため
写真なし。

図 50 こうじ菌の発酵 (40°C)

開始から 1,160 分（19 時間 20 分）まではほとんど変化がなかった。その後、①では急に

50mm 程度までふくらんだが、②、③は膨らみに時間がかかり、時間をかけても 10～30mm 程度のふくらみにとどまった。3 本の結果には差が大きく見られた。

表 3 40℃での結果

種類	速さ (mm/分)	発酵開始時間 (確実) (分)	発酵終了時刻 (確実) (分)	発酵終了時の高さ (平均) (mm)	特徴
ドライイースト	3.833	5	30	59	とても速い発酵。短時間で膨らむが持続性は短い
天然酵母	1.5	5	115	73.6	高温でもしっかり発酵し、膨らみが最も大きい
ワイン酵母	2.567	5	40	55.3	高温でも速い発酵だが、短時間で終わる
酒粕酵母	0.009	540	1200	5	発酵開始がかなり遅く、膨らみも小さい
ビール酵母	0.051	540	1740	15.6	発酵開始が遅く、弱い発酵が長く続く
乳酸菌	0.117	540	1140	43.3	高温で比較的良好に発酵し、膨らみも大きめ
こうじ菌	0.064	950	2620	31.6	発酵開始が非常に遅いが、長時間かけて発酵

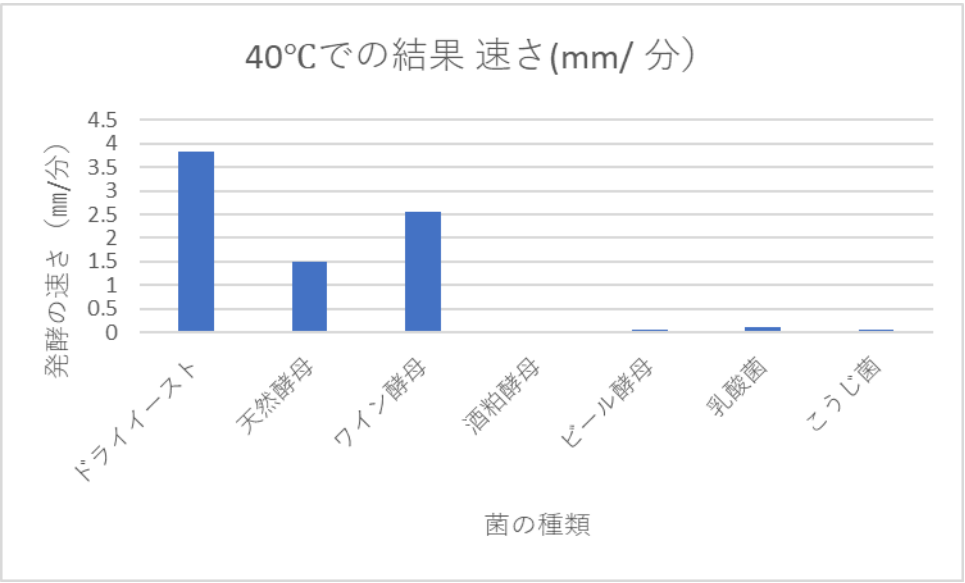


図 51 40℃での結果 速さ (mm/分)

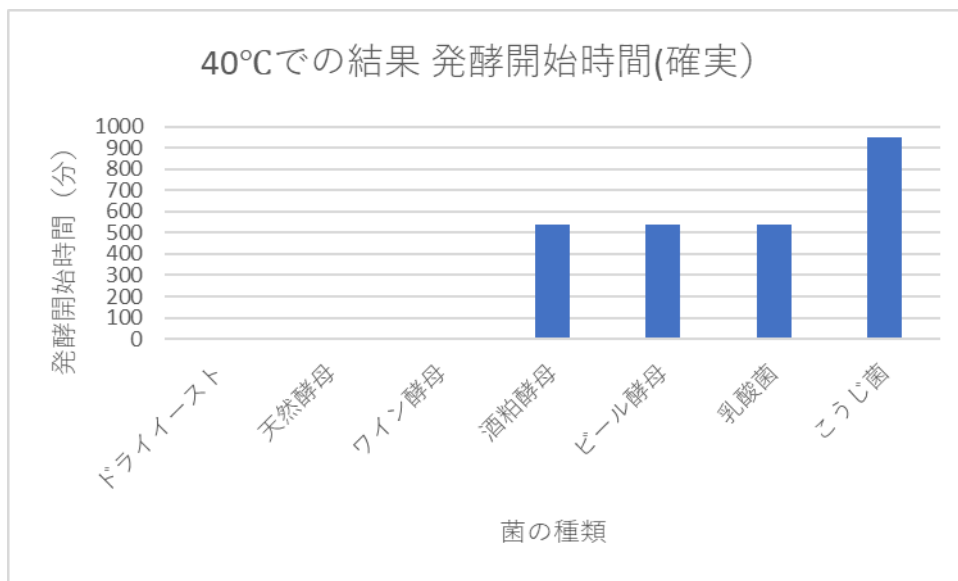


図 52 40℃での結果 発酵開始時間 (確実)

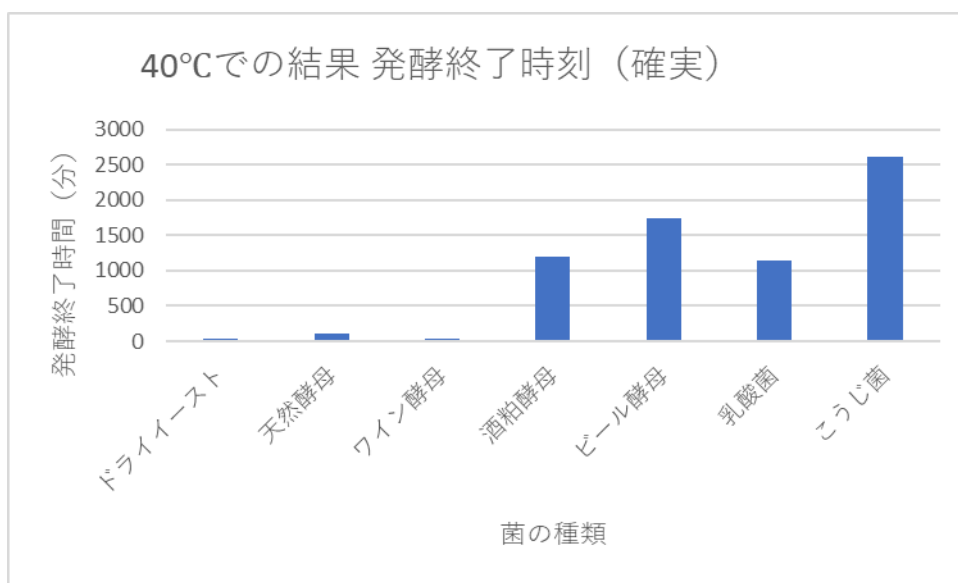


図 53 40℃での結果 発酵終了時間 (確実)

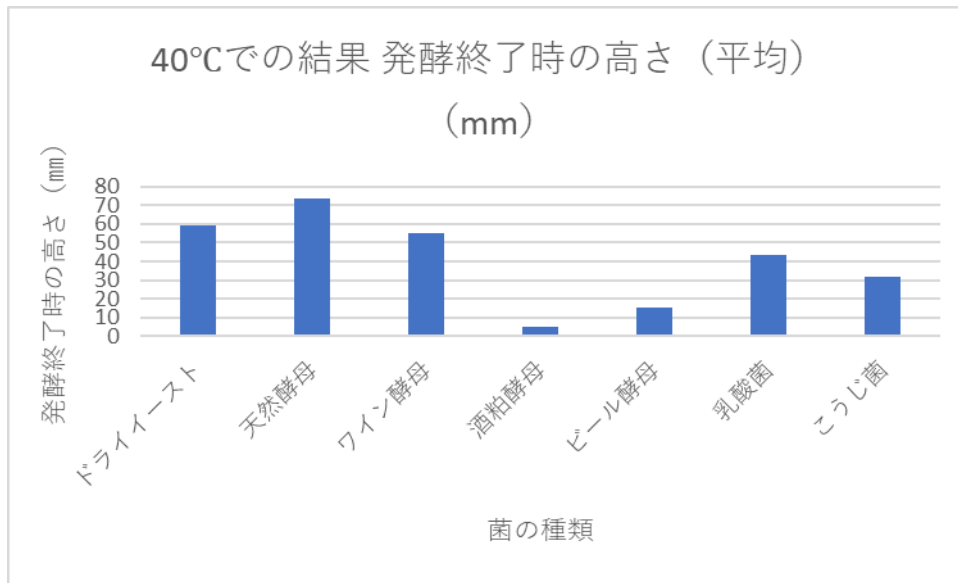


図 54 40℃での結果 発酵終了時の高さ（平均）

実験 1－4 60℃

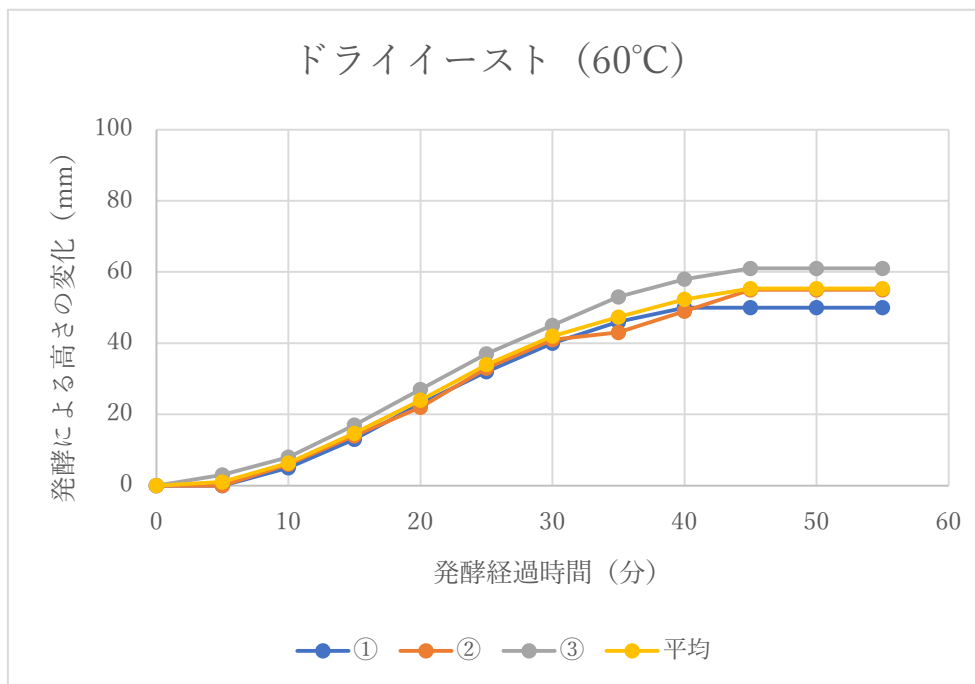


図 55 ドライイーストの発酵 (60℃)



図 56 ドライイースト (60℃) 発酵終了時の様子

実験開始からすぐにふくらみ始め、40 分で 50～60mm ほどに達した。その後は高さが変わらず、横ばいになった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

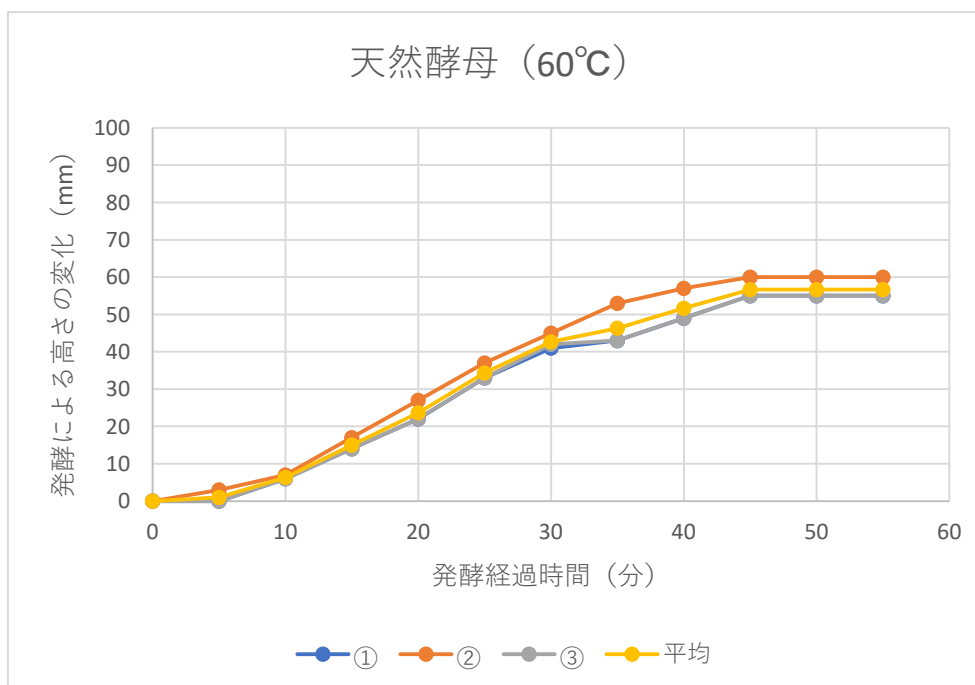


図 57 天然酵母の発酵 (60℃)



図 58 天然酵母 (60℃) 発酵終了時の様子

約 10 分で膨らみ始め、30～40 分で 50～60mm 程度に達した。その後は横ばいとなり、45

分以降はほとんど変化がなかった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

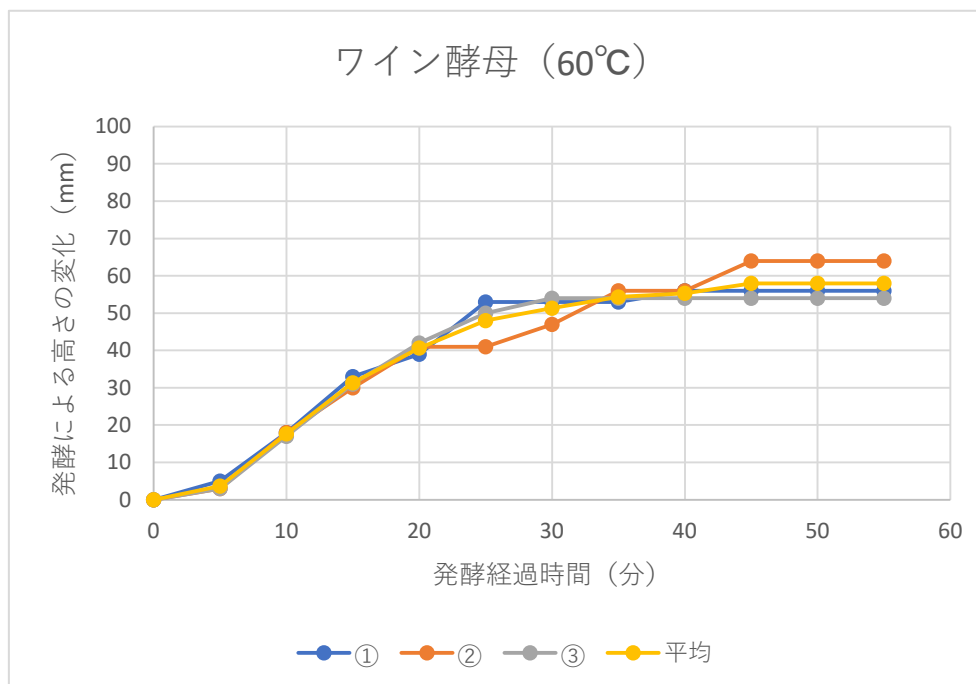


図 60 ワイン酵母 (60°C) 発酵終了時の様子

図 59 ワイン酵母の発酵 (60°C)

開始から 10 分ほどで膨らみ始め、25～30 分で 50～55mm 前後に達した。それ以降は変化が小さかった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

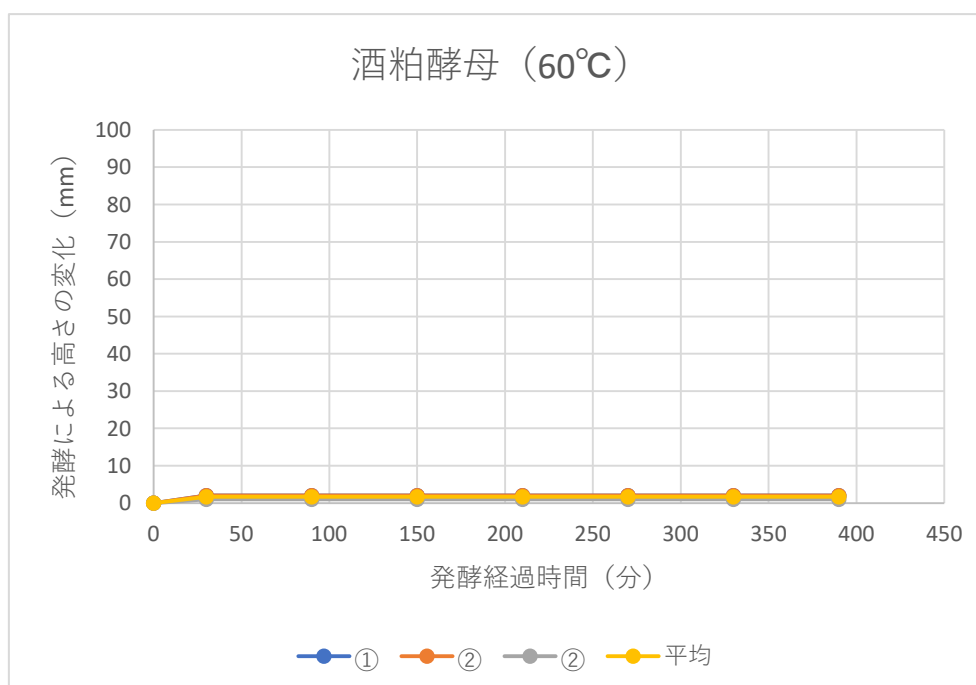


図 62 酒粕酵母 (60°C) 発酵終了時の様子

図 61 酒粕酵母の発酵 (60°C)

実験を始めてから 390 分 (6 時間半) まで観察しても、ほとんど膨らまなかった。

高さは1から2 mmにとどまった。3本とも似たような結果で、再現性が良かった。

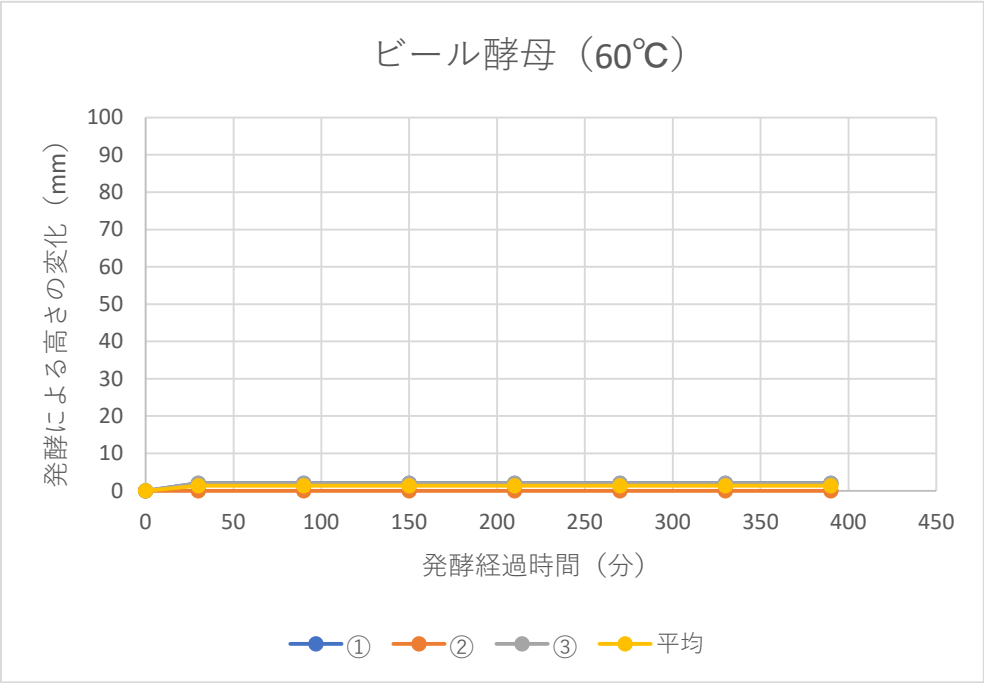


図 64 ビール酵母 (60℃) 発酵終了時の様子

図 63 ビール酵母の発酵 (60℃)

実験開始から 390 分 (6 時間半) まで観察しても、②は全く膨らまず、①と②は 2 mm だった。3 本の実験はいずれも同じような結果で再現性が良かった。

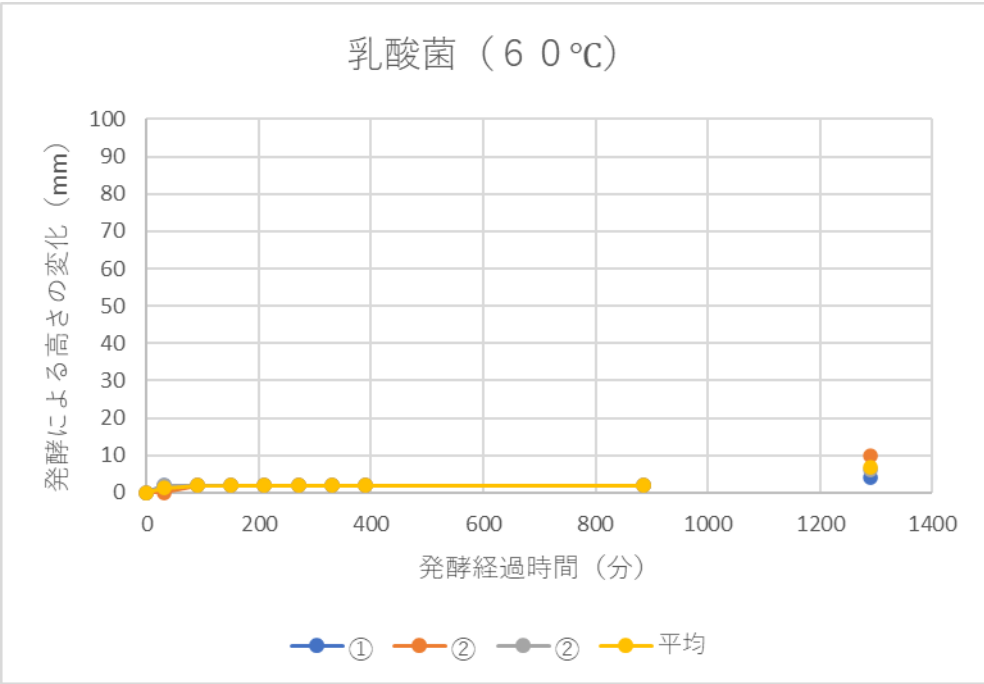


図 66 乳酸菌 (60℃) 発酵終了時の様子

図 65 乳酸菌の発酵 (60℃)

開始から 390 分（6 時間半）までほとんど変化がなかった。その後わずかにふくらみ、①と③は 2 mm 程度となった。②は全く変化しなかった。3 本とも同じような結果で再現性が良かった。

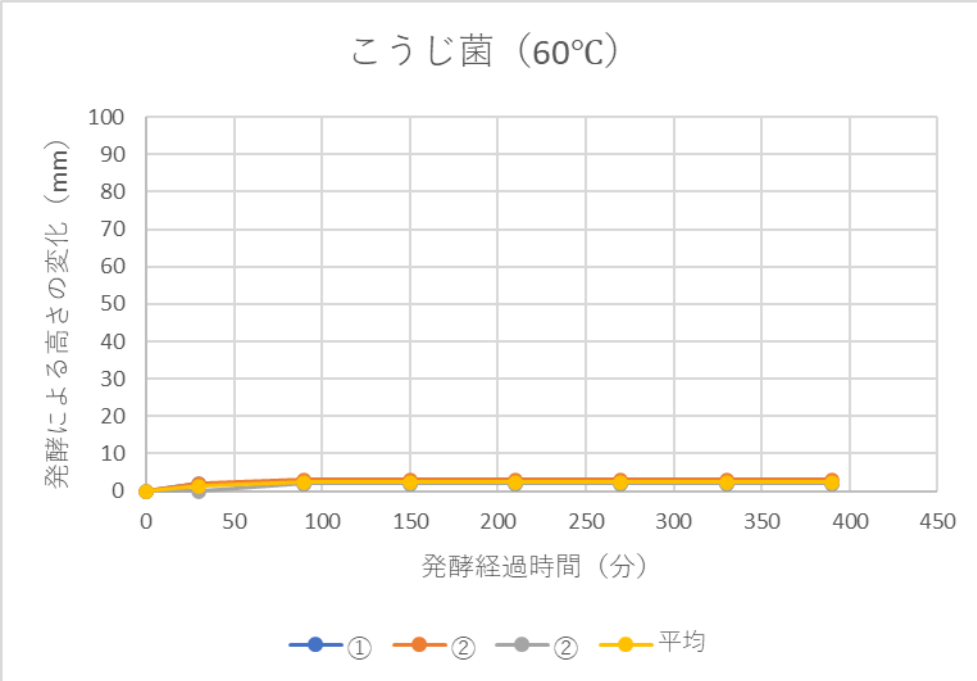


図 68 こうじ菌 (60°C) 発酵終了時の様子

図 67 こうじ菌の発酵 (60°C)

開始から 390 分（6 時間半）まで観察しても変化はなく、高さは 2 から 3 mm であった。3 本とも似たような結果で、再現性が良かった。

表 4 60°Cでの結果

種類	速さ (mm/分)	発酵開始時間 (確実) (分)	発酵終了時刻 (確実) (分)	発酵終了時の高さ (平均) (mm)	特徴
ドライイースト	1.521	5	45	55.3	高温でも短時間発酵するが、すぐ止まる
天然酵母	1.84	5	55	56.6	強い発酵を示すが持続しない
ワイン酵母	2.233	5	45	58	非常に速く膨らむが短時間で終了
酒粕酵母	0.044	30	30	1.6	活動が弱く、膨らみはほとんど見られない
ビール酵母	約0.056	30	30	1.3	活動はごく弱い
乳酸菌	0.206	30	90	6.6	わずかに発酵が続くが小さい
こうじ菌	0.024	30	90	2.3	高温ではほとんど発酵できない

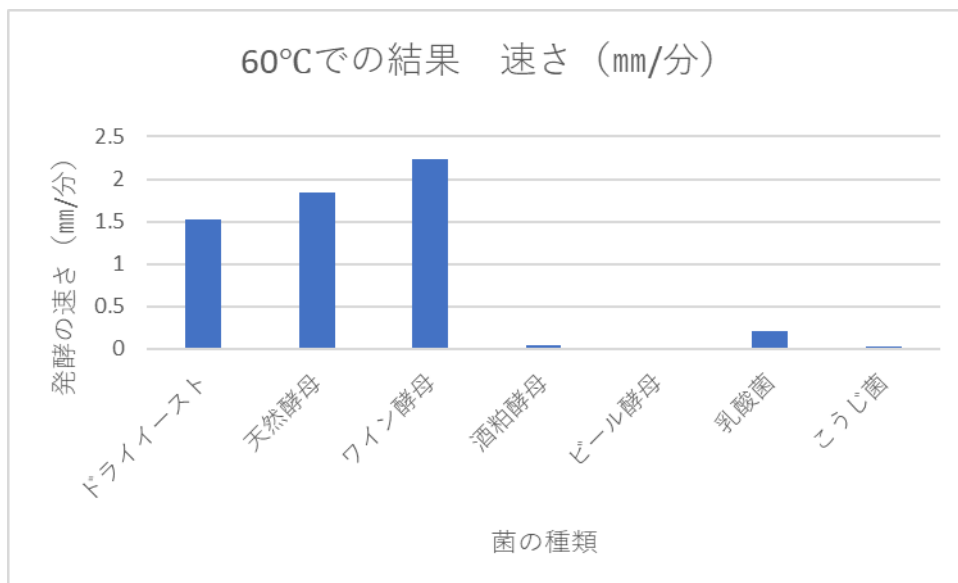


図 69 60℃での結果 速さ (mm/分)

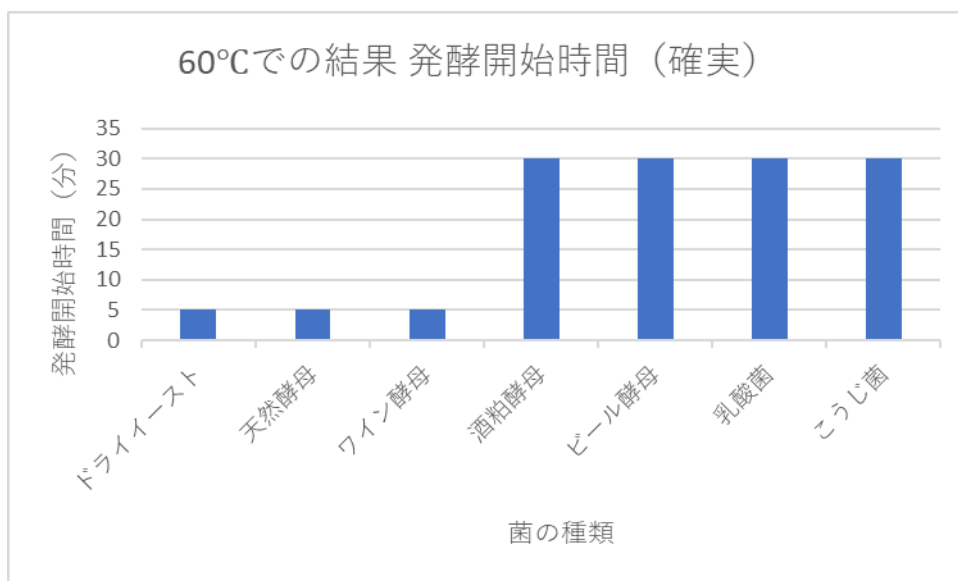


図 70 60℃での結果 発酵開始時間 (確実)

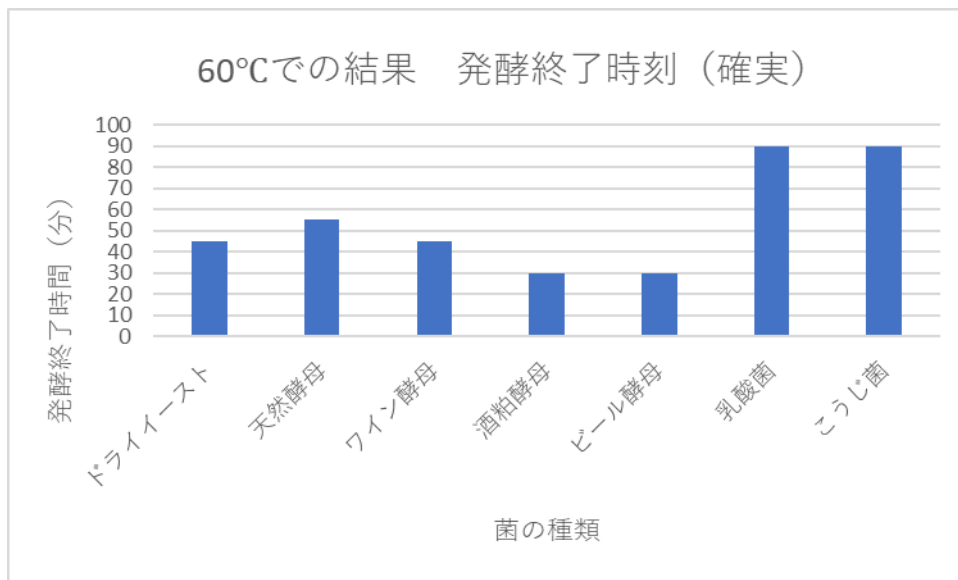


図 71 60℃での結果 発酵終了時間（確実）

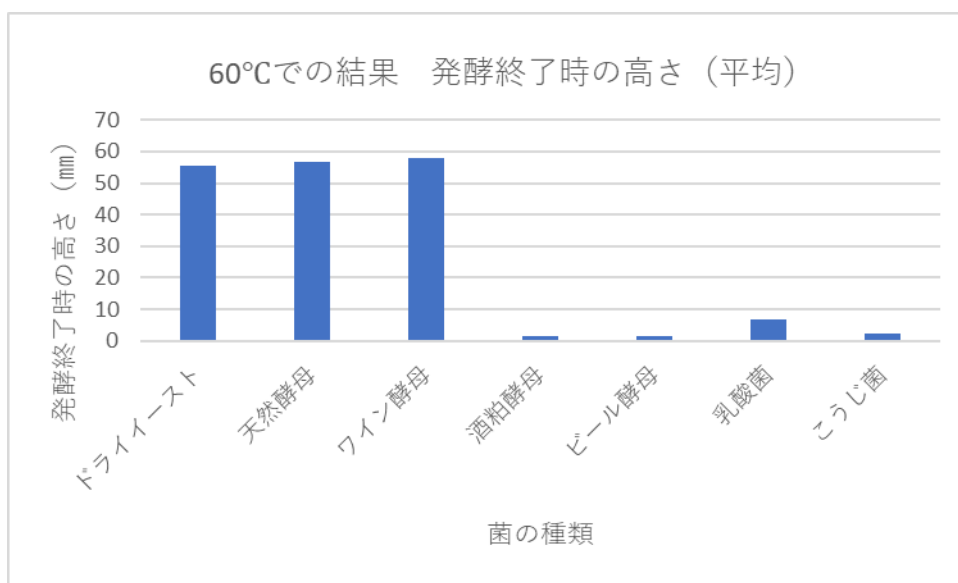


図 72 60℃での結果 発酵終了時の高さ（平均）

まとめ

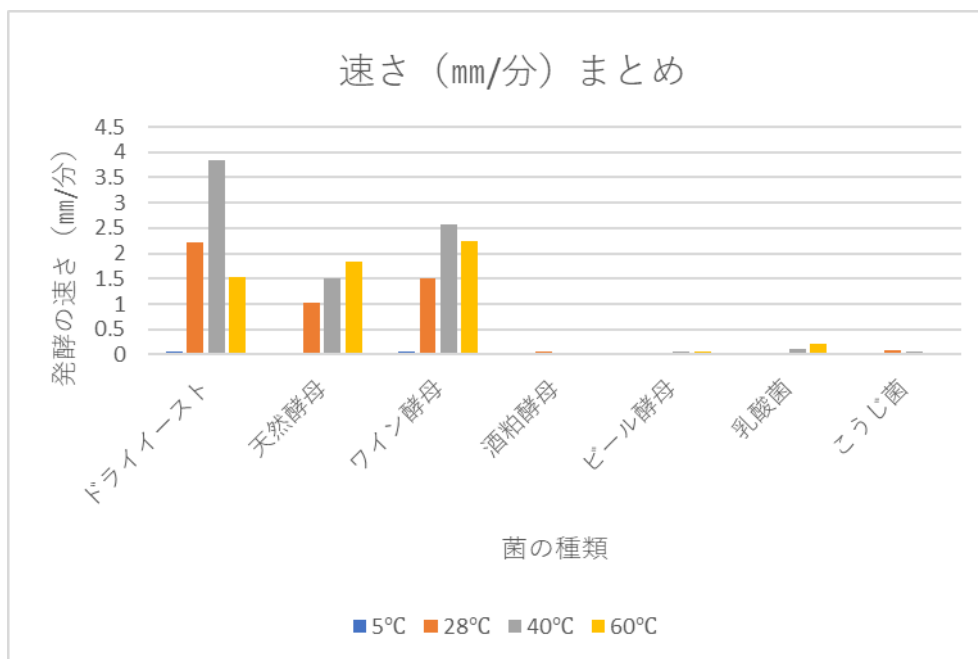


図 73 結果 速さ (mm/分) まとめ

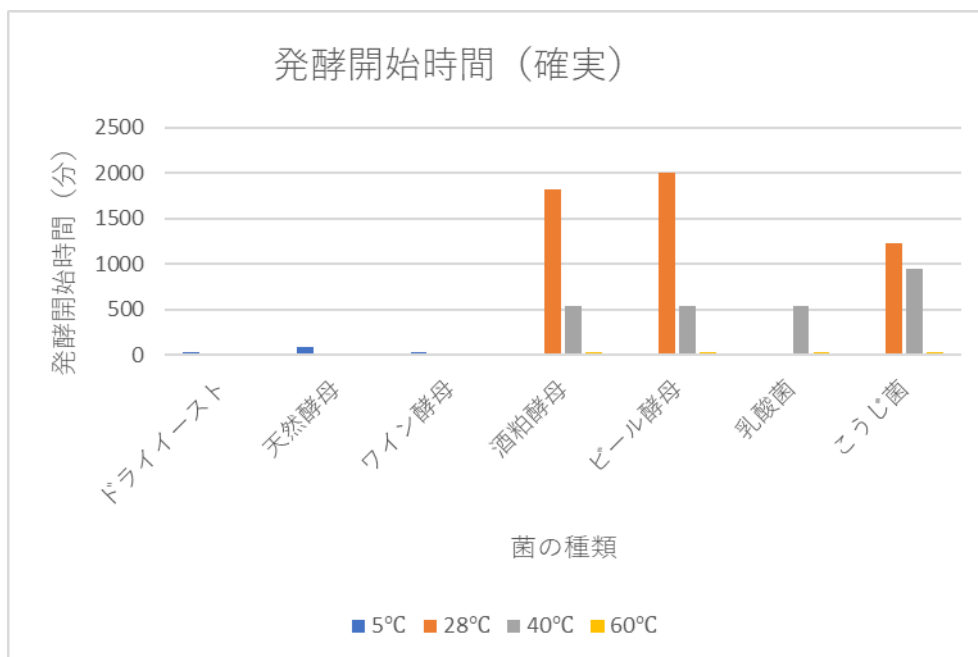


図 74 結果 発酵開始時間 (確実) まとめ

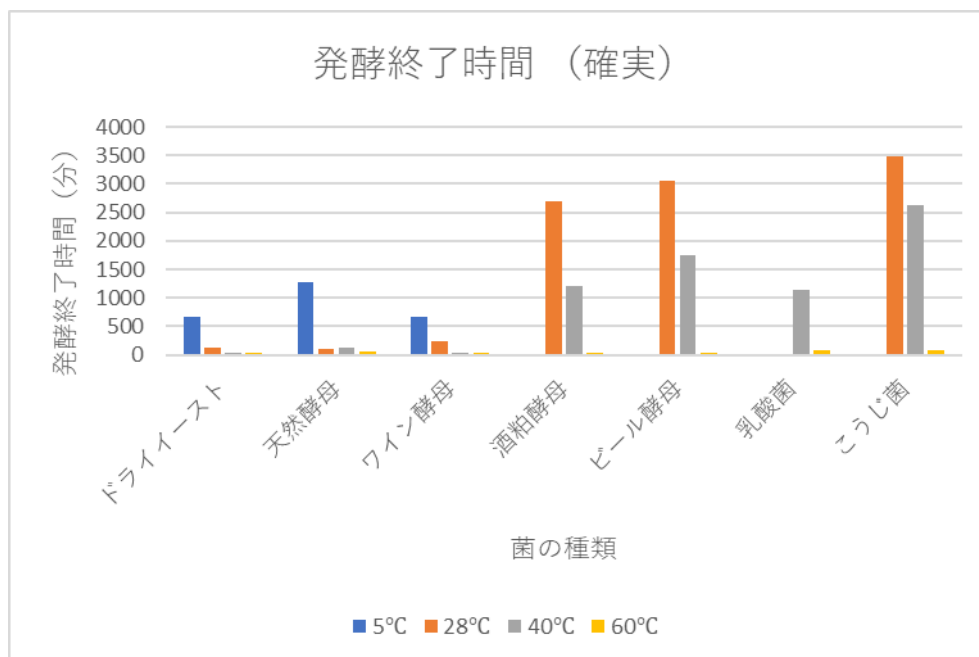


図 75 結果 発酵終了時間（確実）まとめ

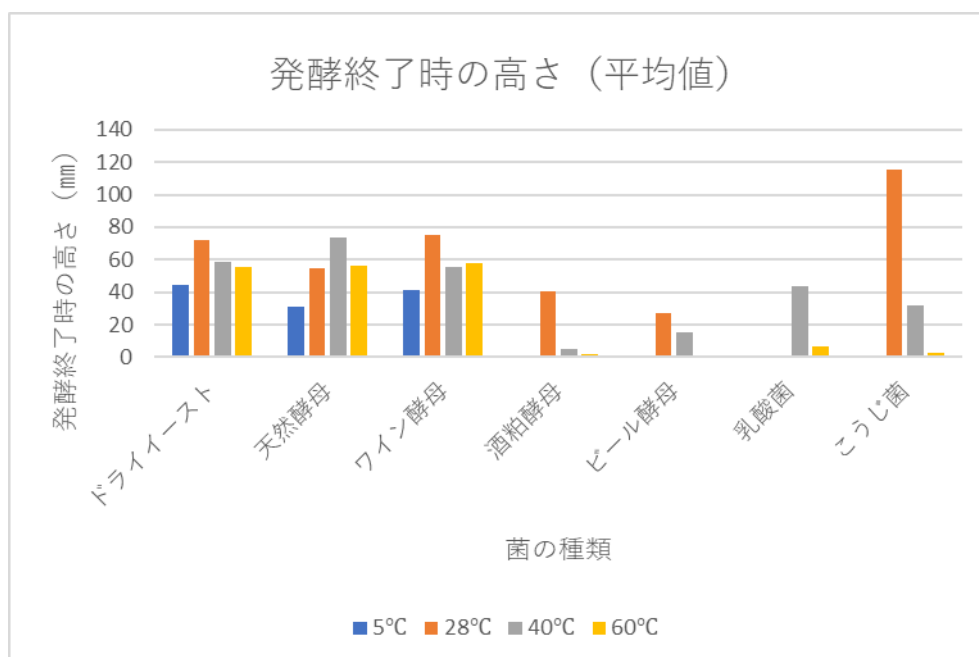


図 76 結果 発酵終了時の高さ（平均）まとめ

ドライイースト

ドライイーストは、もっとも安定して発酵する酵母であり、幅広い温度条件でも活動するのが特徴。特に中温域（常温付近）では強く膨らみ、短時間でしっかりとした発酵を示した。ただし、40℃になると発酵はさらに速くなるものの、持続性が短くなり、膨らみは一気に出る代わりに早く止まってしまう傾向がある。総合的に「短時間で大きな発酵を起こすタイプ」といえる。

天然酵母

天然酵母は、全体的に安定して発酵する力を持っており、特に高温に強いという特徴がある。発酵の始まりは比較的早く、膨らみも大きく、なかでも実験全体で大きな膨らみを示した。低温では発酵の開始が遅れるものの、一定時間が経てば膨らみを出すことができた。総じて「幅広い条件で働き、特に高温で強い発酵力を持つタイプ」といえる。

ワイン酵母

ワイン酵母は、発酵のスタートが早いという特徴を持つ。温度を問わず素早く発酵を始める一方で、高温になるほど発酵の持続性が短くなり、短時間で膨らんで止まってしまう傾向がある。膨らみの大きさは安定しており、中温域では比較的持続的に活動できる。まとめると「スタートダッシュ型で、短時間勝負の発酵をするタイプ」といえる。

酒粕酵母

酒粕酵母は、発酵の立ち上がりが非常に遅く、全体的に膨らみが小さいのが大きな特徴である。低温ではほとんど活動せず、中温から高温でも発酵はゆっくりで、膨らみはごく小さいものだった。特に開始までに長時間を要し、活動が弱い点から「発酵力の弱いタイプ」といえる。

ビール酵母

ビール酵母は、酒粕酵母と同様に発酵開始が遅く、膨らみの大きさも小さい傾向がある。温度を上げてても力強い発酵は見られず、全体的に穏やかな活動にとどまった。活動時間自体は比較的長いものの、膨らみが小さいため、結果として「弱い発酵が長く続くタイプ」だった。

乳酸菌

乳酸菌は、酵母と比べると発酵力が弱く、低温や常温では膨らみはほとんど見られなかった。ただし高温条件になるとわずかに発酵が進み、ある程度の膨らみを示した。酵母に比べてガスを出す力は小さいものの、温度が上がることで活動が見られる点から「高温でのみ働く発酵タイプ」といえる。

こうじ菌

こうじ菌は、発酵開始が不安定で遅いものの、28℃では大きな膨らみを示した。他の温度条件ではほとんど活動が見られなかったが、特定の条件下では大きく膨らむ点が特徴的である。総合的には「条件が合えば大きな発酵を起こすが、安定性に欠けるタイプ」といえる。

実験1の考察

第一に、ストロー実験を開発したことで、これまで観察することが難しかった発酵の速さや膨らみの大きさを時間ごとに記録し、条件ごとに比較することが可能になった。この方法の発見こそが、今回の研究の大きな成果である。この方法を使うことによって、容易に酵母と菌の性質を比較することができた。さらに、発酵開始時間と発酵終了時刻については、2～3回の実験の中で確実に確認できた時間を採用した。ここで、発酵開始は「生地の高さが増加し始めた最初の時点」、発酵終了は「生地の高さが一定となり、増加が見られなくなった時点」と定義した。また、発酵によって生地の高さが直線的に増加している部分のデータを用いて一次関数を求め、その傾きを「発酵の速さ」として算出した。これにより、発酵の進行を定量的に評価できるようになり、比較の信頼性が高まった。

今後の利用方法としては、酸素や二酸化炭素の有無など条件を変える実験や、気体を多く発生させる微生物（酸素・二酸化炭素・一酸化窒素など）を効率よく見つける方法への応用が考えられる。また、ストローは大量生産しやすいため、学校の教材（ストロー発酵キット）としての利用も期待できる。

そのうえで、各条件の発酵を比べてみると、温度によって膨らみ方や発酵のスピードが大きく異なり、さらに菌の種類によっても特徴がはっきり分かれた。はじめは「ドライイーストは安定して膨らみ、ワイン酵母はワイン用だから膨らまない、乳酸菌とこうじ菌は酵母ではないから膨らまない」と予想していたが、実際にはワイン酵母も強く発酵して膨らみ、乳酸菌やこうじ菌でも条件によっては膨らみが見られた。予想と違う結果が出たことで、菌の種類や温度によって発酵のしかたが大きく変わることを学ぶことができ、実験を通して新しい発見につながった。次に、菌種ごとの特徴について述べる。

ドライイーストはどの温度でも安定して発酵が進み、特に28℃や40℃で速く大きく膨らんだ。品種改良によって発酵力が強く安定しており、再現性が高いことから、実際のパン作りに広く用いられている理由が分かった。

天然酵母も幅広い温度で発酵が進み、特に28℃や40℃で大きな膨らみが見られた。今回使用した天然酵母はパン用に品種改良されているため、発酵力が強く、安定して膨らむ特徴があった。ドライイーストに比べると発酵のばらつきがやや大きいのが、十分にパン作りに利用できる発酵力を持つことが確認できた。また、天然酵母は由来する果物や環境によって風味が変わるため、パンに個性を与える点でドライイーストとは異なる魅力がある。

ワイン酵母も強い発酵力を示し、短時間で大きく膨らんだが、途中で発酵が止まったり、再び膨らんだりする変化が見られた。発酵力は高いが安定性に欠けるため、パン用よりもワインづくりに適していると考えられる。この様子は、ワインの醸造において年ごとに味や仕上がりが変わることとよく似ており、安定したパンづくりに向かないが、逆にその変化が味わいにつながるため、ワインづくりに適していると考えられる。しかし、ワイン酵母特有の甘い香りはパンの種類によってはよく合うと感じた。そのため、工夫して使えば、個性的なパン作りにも活かせる可能性があると思った。

酒粕酵母は発酵が始まるまでに時間がかかり、十分に膨らまない場合もあった。自然由来で力が弱く、安定していないため、パン作りにはあまり使われないのだと思った。ただし、独特の風味を持つため、酒まんじゅうや特別な発酵食品には利用されているのだろう。また、酒粕酵母については実験を繰り返すうちに発酵開始が遅れる傾向が見られたことから、保存や使用によって酵母が徐々に弱まった可能性がある。その一方で、回によっては急に大きく膨らむ場合もあり、ばらつきが大きかった。この現象は、発酵が進むためのきっかけとなる条件（発酵の核）が必要で、それが整うと一気に膨らみ始めることに関係しているのではないかと考えられる。さらに、酒粕酵母には複数の菌が共存しているため、ある菌の活動が他の菌を刺激して一斉に発酵が進む「協同性」が影響している可能性もある。したがって、発酵開始が遅れたり急に進んだりする結果になったのではないかと推測される。より正確に実験を行うためには、菌の管理方法に注意し、毎回新しい酒粕酵母を使用して比較する必要がある。また、酒粕酵母の中に含まれる複数の菌を分けて調べれば、どの菌が発酵に大きく関与しているかを明らかにできると考えられる。

ビール酵母も発酵が始まるまでに時間がかかり、十分に膨らまない場合もあった。今回のビール酵母は粉末の状態で入手したため、十分に発酵力を発揮できなかった可能性がある。もし生のビール酵母を使用できれば、発酵力はより強くなると考えられる。ビール酵母は自然由来で安定性は弱い、独特の風味を持つため、特別な発酵食品に利用されてきたのだろう。

乳酸菌については、どの温度でも膨らまないと予想していたが、予想と違って温度によっては膨らみが見られた。結果は、温度によって大きく異なり、5℃や28℃では膨らみは見られず、40℃ではかなり時間がかかったが膨らみが見られた。60℃では長時間かけてもわずかに膨らむ程度であった。参考文献によると、カスピ海ヨーグルトにはクレモリス菌（乳酸菌）と酢酸菌が共生していることが分かった。しかし、気体が発生したのはクレモリス菌が原因なのか、酢酸菌が原因なのか、あるいは他の酵母が含まれていた可能性によるものなのかは特定できなかった。それぞれの菌を入手できれば、特定した菌を用いた実験によって原因を明らかにできると考えられる。

こうじ菌についても膨らまないと予想していたが、温度によっては大きく膨らんだ。5℃では膨らみは見られず、60℃ではわずかに膨らむ程度であった。28℃では発酵が始まるまでに長時間かかったものの、最も大きな膨らみが観察された。ただし、その膨らみ方には

大きなばらつきがあった。このようなばらつきが生じたのは、こうじ菌が酵母のように直接糖を分解してガスを出すのではなく、まずデンプンを分解して糖を作る酵素を多く出す菌であるためだと考えられる。糖が十分にたまるまでは発酵が進まず、ある時点で条件が整うと急に二酸化炭素が発生して膨らんだのではないかと推測される。つまり、発酵開始に遅れがある点が酵母とは異なる特徴である。詳しく調べるためには、こうじ菌が作り出す糖の量やタイミングを調べたり、酵母と一緒に培養して比較実験をしたりすることで、こうじ菌単独での膨らみと混合した場合の違いを明らかにできるだろう。また、温度や栄養条件を細かく変えて実験することで、安定して膨らませる条件を見つけられる可能性がある。

以上のことから、パン作りに最も適しているのは、安定して強い発酵を示したドライイーストと天然酵母であることが確かめられた。他の菌でも発酵は起こるが、時間がかかったり膨らみが小さかったりして安定しないため、実用的ではないことが分かった。しかし、菌によってそれぞれ特有の風味があるため、工夫次第では個性的なパンを作ることができると考えられる。

なお補足として、乳酸菌とこうじ菌の発生した気体が二酸化炭素であるかを確認するため、線香を近づける実験を行った。比較のためドライイーストも用いた。その結果、ドライイーストとこうじ菌では線香の火が消え、乳酸菌では火が弱まる程度であった。このことから、乳酸菌とこうじ菌から二酸化炭素が発生すること、菌の種類によって発生する二酸化炭素の量に差があることが分かった。

ドライイースト		乳酸菌		こうじ菌	
					
ばんばんに膨らみ、線香の火は消えた。		少し膨らみ、線香の火は弱まった。		膨らまなかったが、線香の火は消えた。	

図 77 線香実験の様子

実験 2

・室温（28℃）で砂糖の量や種類を変えた場合の発酵の違いを調べる。

準備

※器材、実験手順は実験 1 と同様
（砂糖の種類）

材料		
		
砂糖（パールエース）	ブドウ糖（富澤商店）	果糖（ウェルネオシュガー）
		
オリゴ糖（富澤商店）	トレハロース（八宝商会）	

図 78 砂糖の種類

- ・ 砂糖なし
- ・ 砂糖 4 g(2 倍の量)

方法

室温（28℃）で砂糖の条件を変えて、実験 1 と同じ手順で実験を行う。

（研究のための計画づくり）

砂糖の違いによる発酵の比較実験をする際に温度を一定に保ちやすい 40℃で行おうと考え、まずは砂糖なしと砂糖 4 g の実験を行った。その際、砂糖 4 g の生地が 40 分で変化がみられなかったが、室温に置いてから発酵を再開したため、28℃の方が適しているのではないかと考えた。さらに、実験 1 でドライイーストでは 28℃が一番発酵したことから、室温の 28℃の方が安定して発酵することが分かったので、28℃の温度で砂糖を変えて比較実験することにした。

結果

実験 2－1 砂糖なし

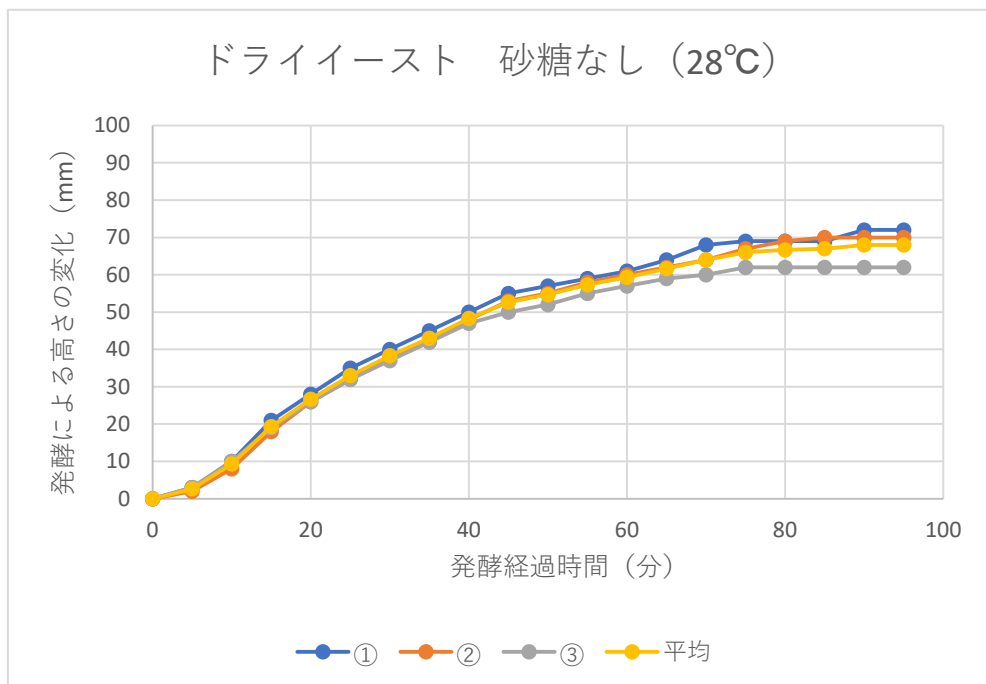


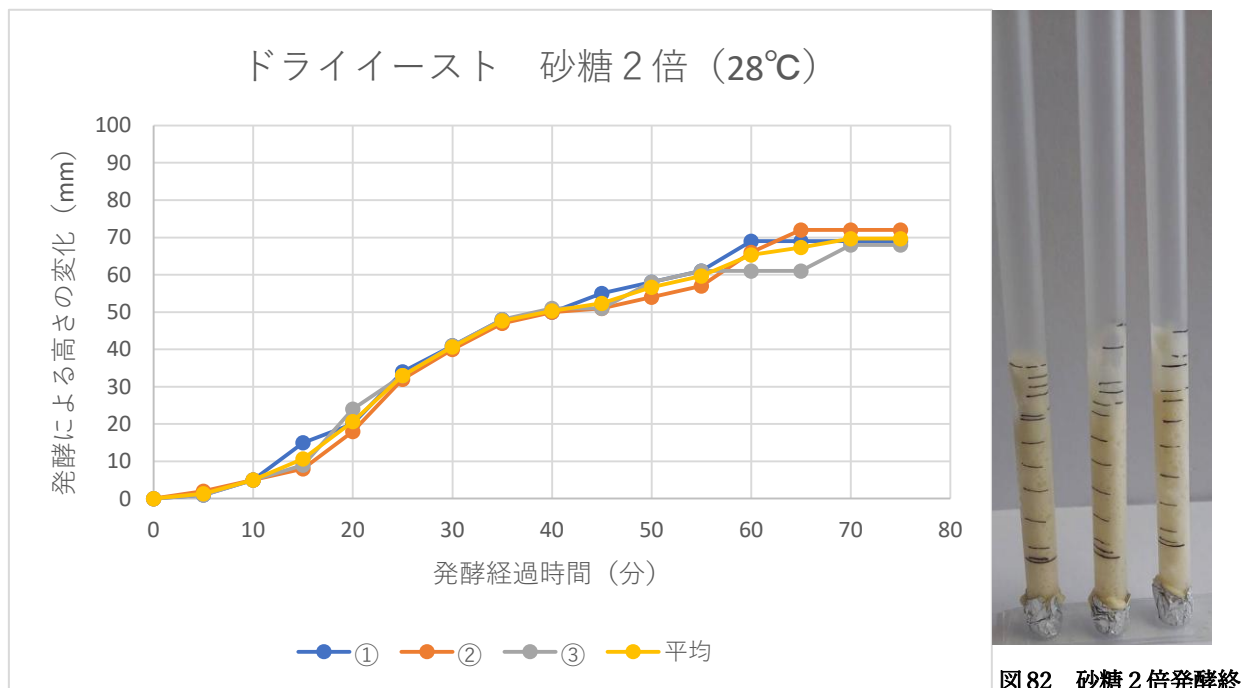
図 79 砂糖なしの発酵

図 80 ドライイースト

発酵終了時の様子

砂糖がなくても順調に高さが増え、最終的には 70mm 前後に達した。最終的な膨らみの高さは砂糖ありとほぼ同じであったが、ふくらみ始めるまでの時間と発酵のスピードは砂糖ありより遅かった。

実験 2 - 2 砂糖 2 倍



膨らみ方は元の砂糖の量よりも遅く、ピークの高さは元の砂糖の量とあまり変わらなかった。砂糖が多くても 70mm 程度で膨らみが終了した。

実験 2 - 3 ブドウ糖

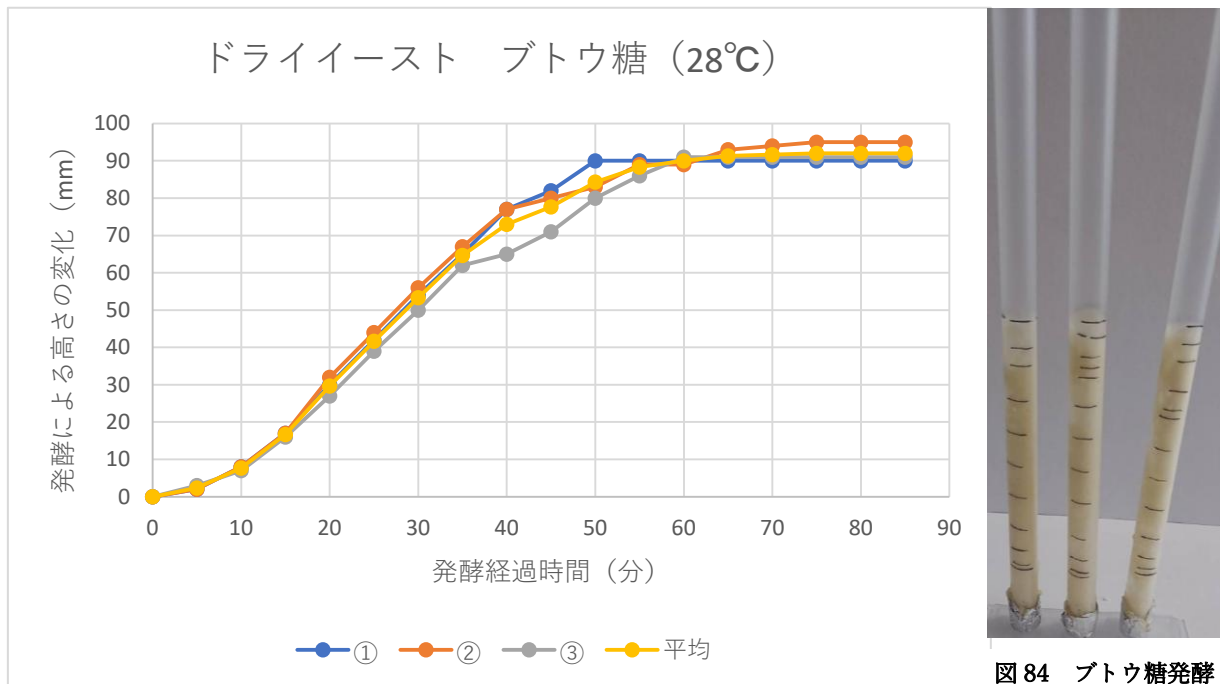


図 83 ブドウ糖の発酵

ふくらみが最も大きく、50 分で 90mm まで達したものもあり、最終的に 95mm 程度まで達した。他の糖よりも発酵が強く進んだ。

実験 2－4 果糖

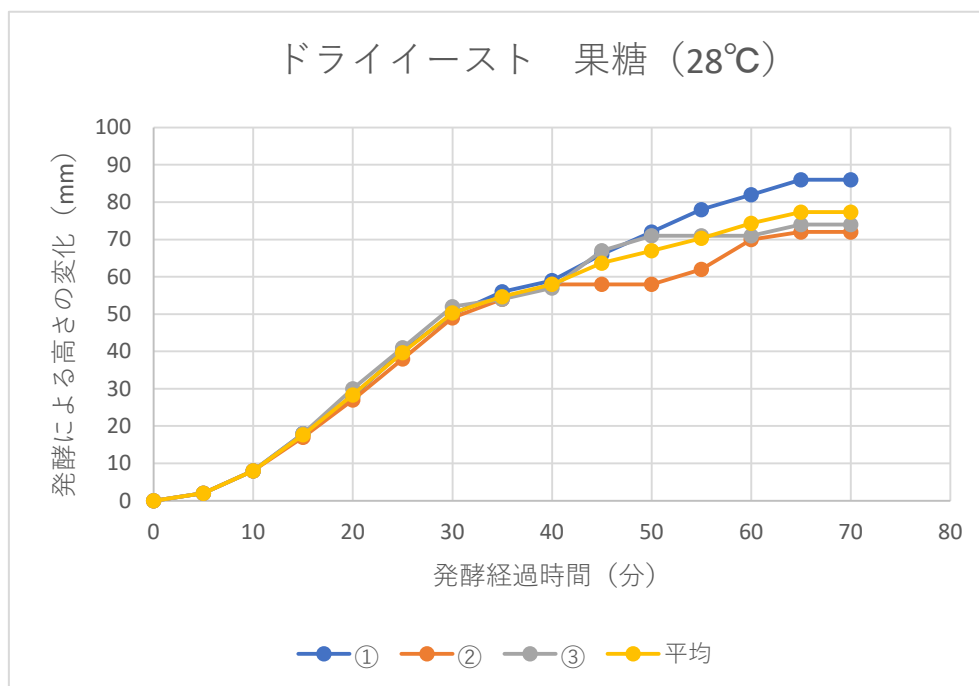


図86 果糖発酵終了時の様子

図85 果糖の発酵

60分前後で70~80mmに達し、ブドウ糖よりは小さいが砂糖より大きなふくらみを示した。

実験2-5 オリゴ糖

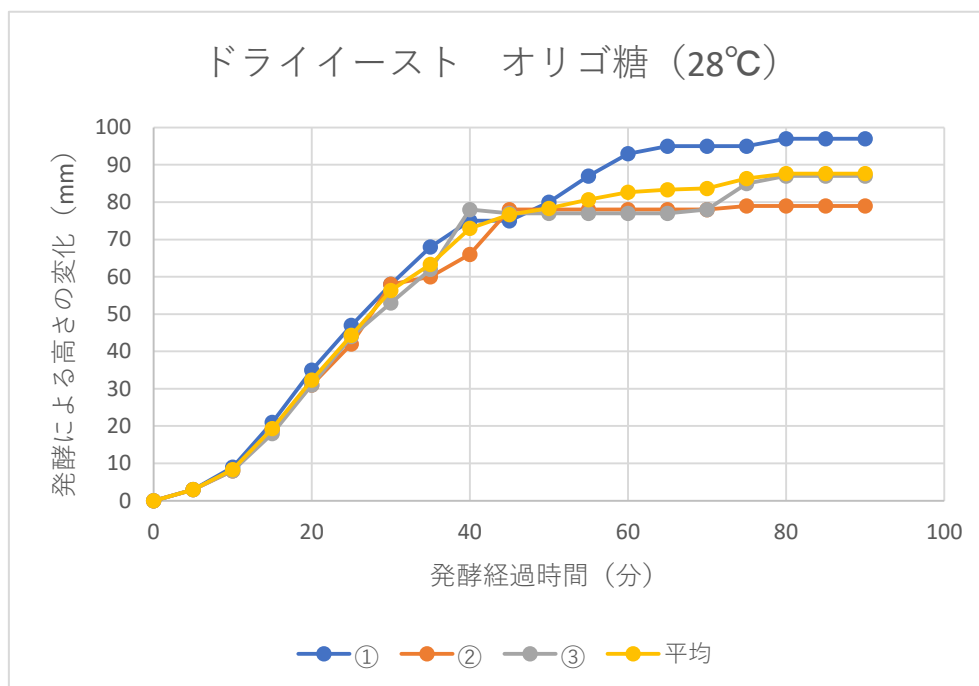


図 88 オリゴ糖発
酵終了時の様子

図 87 オリゴ糖の発酵

ブドウ糖に近い強い発酵が見られた。60 分前後で 90mm に達したものもあった。どれも強く発酵していた。

実験 2 - 6 トレハロース

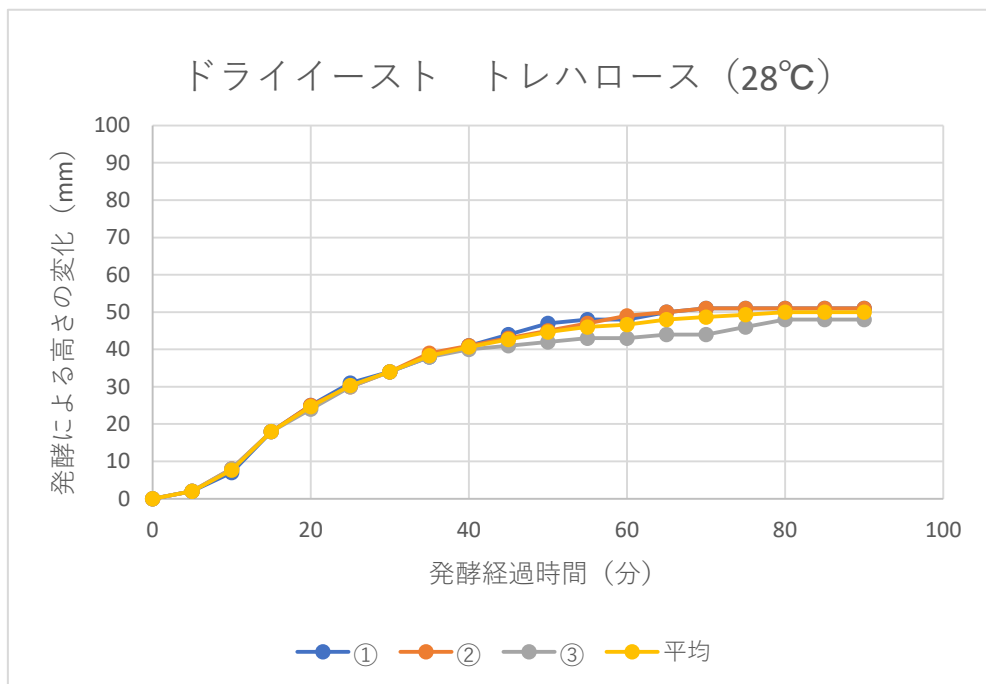


図 90 トレハロース
発酵終了時の様子

図 89 トレハロースの発酵

他の糖類に比べて発酵は弱く、ふくらみは 50mm 程度で止まった。最も発酵力が小さかった。

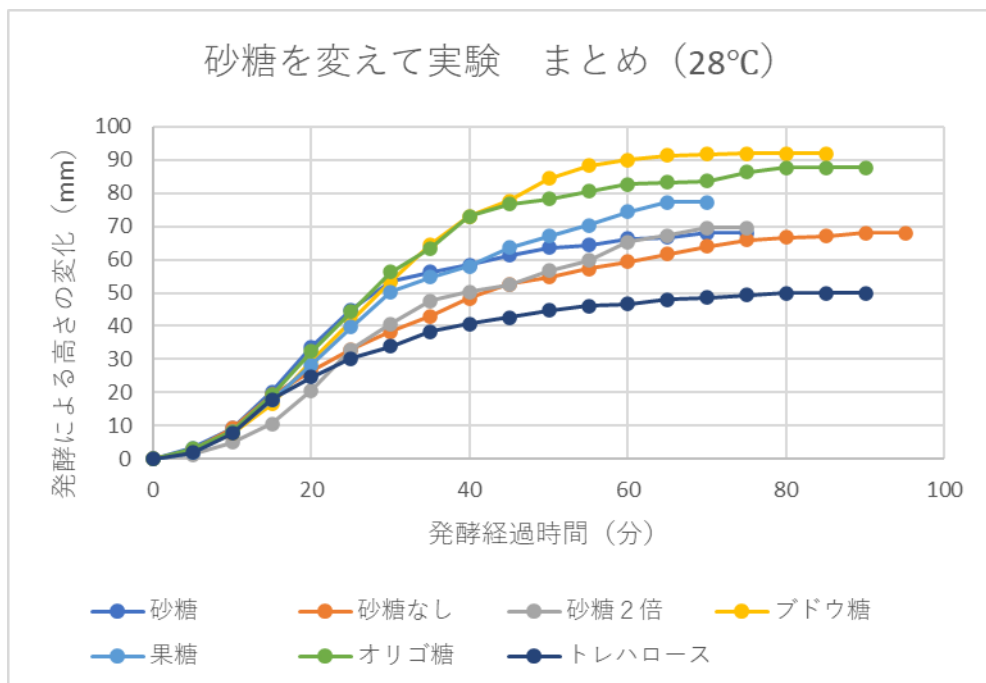


図 91 砂糖を変えて実験 まとめ

表 5 砂糖を変えて実験 まとめ

種類	速さ (mm/分)	発酵開始時間 (確実) (分)	発酵終了時刻 (確実) (分)	発酵終了時の 高さ (平均) (mm)	特徴
砂糖	2.227	5	125	72	標準的で安定した発酵
砂糖なし	0.832	5	90	68	速さは低い但最终高さは同程度でゆっくり膨らむ
砂糖 2 倍	1.88	5	70	69.666	速さはやや低下し終了も早め 高濃度で持続が短い可能性
ブドウ糖	2.193	5	75	92	速さ高さとも大きく効率よく発酵 高さ最大
果糖	2.133	5	65	77.333	立ち上がりが速く終了は最も早い 高さも十分
オリゴ糖	2.46	5	80	87.666	速さ最大で高さも大きい 短時間で力強く膨らむ
トレハロース	0.902	5	80	50	速さ高さとも低く発酵力は弱い

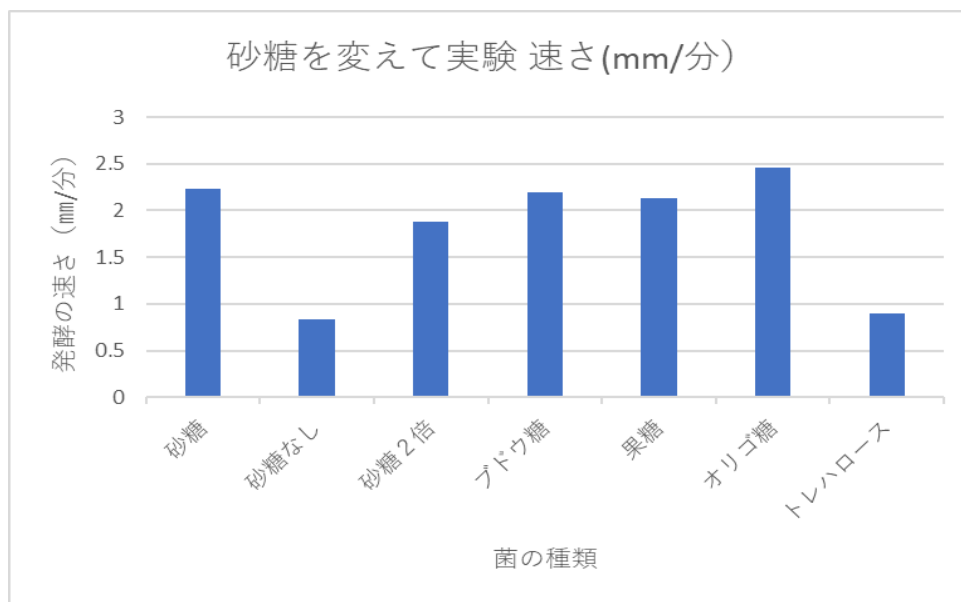


図 92 砂糖を変えて実験 速さ (mm/分)

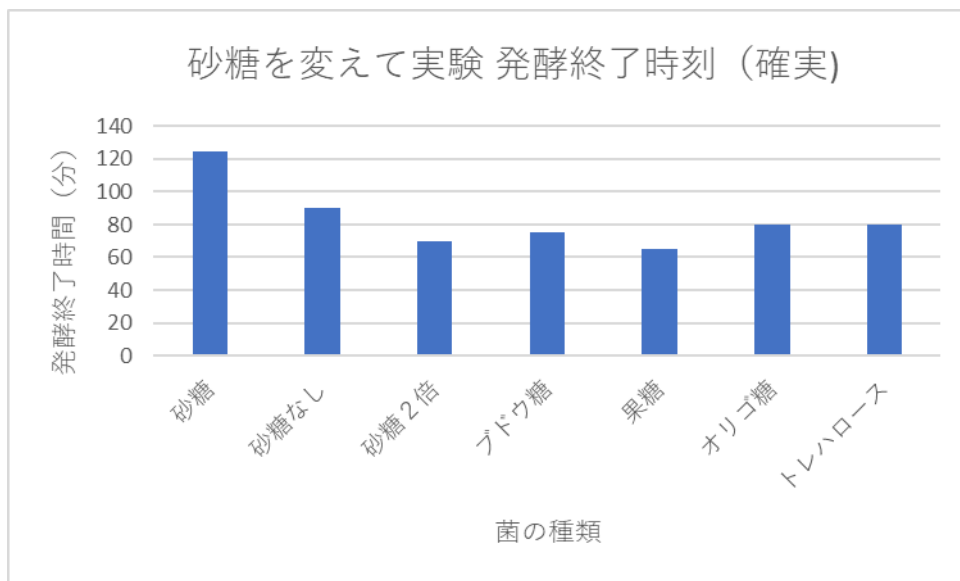


図 93 砂糖を変えて実験 発酵終了時間（確実）

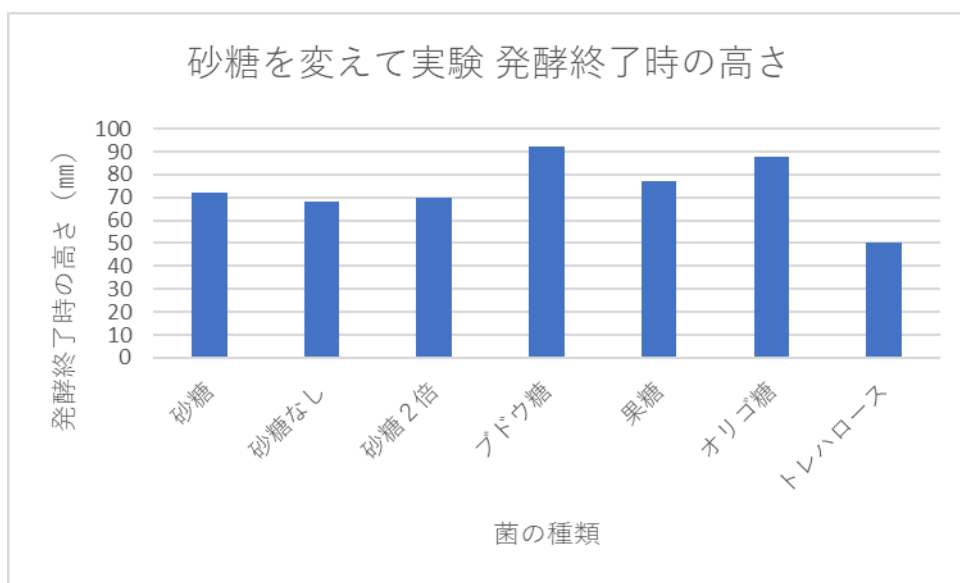


図 94 砂糖を変えて実験 発酵終了時の高さ

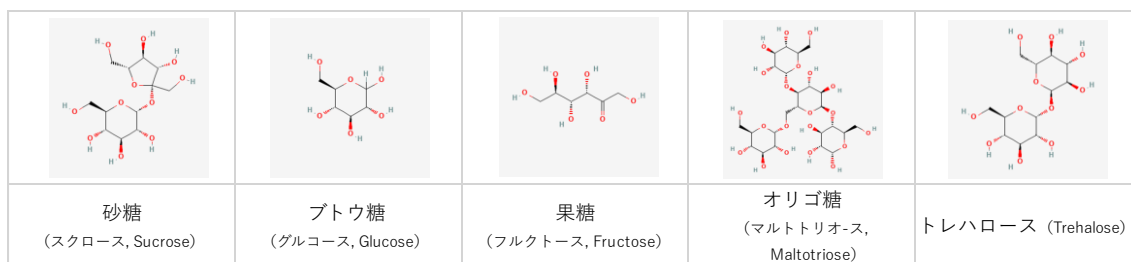


図 95 各糖の構造式

※オリゴ糖は単糖が 2～10 個つながった糖の総称である。本研究では、ブドウ糖が 3 つ

ながったマルトトリオースを例に示した。

実験2の考察

今回の実験では、砂糖の種類によって発酵の速さや膨らみ方に大きな違いが見られた。

まず、**ブドウ糖**と**果糖**は単糖であり、酵母が分解せずにそのまま利用できるため、発酵が速く始まり、大きくふくらんだ可能性がある。

一方、**砂糖**は二糖で、酵母が酵素でブドウ糖と果糖に分解してから利用する必要がある。そのため、発酵の立ち上がりは単糖より遅く、膨らみの大きさもやや小さかったと考えられる。**砂糖の量を2倍**にしても膨らみが増えなかったのは、酵母が利用できる糖の量には限界があるためだと思った。もしそうであれば、酵母の量を変えた場合や、砂糖を利用する力が強い菌を使った場合にどうなるかを検討する必要がある。これは今後の課題としたい。

また、**砂糖なし**でも発酵は進み、最終的には砂糖ありと同じくらい膨らんだ。これは、小麦粉のでんぷんが分解されて糖になり、それを酵母が利用したためと考えた。しかし、膨らみ始めるまでに時間がかかった点が特徴的であった。もしそうであれば、デンプンを分解するこうじ菌を加えた場合に発酵が速くなるのか、今後検証してみたい。

オリゴ糖は単糖が3つ以上つながった糖で、酵母は分解してから利用する。性質から考えて強く発酵しないと予想されるが、砂糖よりもつよい発酵がみられた。このことから、「単糖か二糖か、あるいはそれ以上であるか」といった違いが必ずしも発酵の強さに関係するわけではない可能性がある。もしくは、今回使ったオリゴ糖は酵母が利用しやすいように改良されているか、酵母が利用しやすい種類の糖なのかもしれないと思った。これを証明するためには、多様な種類のオリゴ糖を集めて比較実験をするとよいと思った。どん糖が入っているのか分析できたら、詳細が分かると思う。

最後に、**トレハロース**は二糖だが、発酵が弱く膨らみが小さかったことから、酵母が分解して利用するのが苦手な糖であるといえる。

以上のことから、酵母が最も利用しやすい糖はブドウ糖と果糖であることが分かった。糖の種類によって酵母の利用のしやすさに違いがあることが証明できたが、その違いを「単糖・二糖・それ以上」という区分だけで説明することは難しいと感じた。また、砂糖を2倍にしても発酵の強さは大きく変わらず、酵母が利用できる糖の量には限界があることも分かった。さらに、砂糖を加えなくても最終的には発酵が進んだが、時間がかかったことから、糖を加えることで、より効率的に発酵が進むことを確認できた。

今回は糖の種類による違いを比較したが、酵母の種類を変えた場合や、温度条件を変えた場合にどのような差が現れるかについても調べる必要がある。これらを検証することで、酵母の発酵に影響を与える要因をより多角的に明らかにできると考える。そのためにも、今回開発した「ストローを用いた発酵観察法」は、気体の発生を速さや膨らみを測定できる画期的な方法であり、今後さまざまな条件比較に応用できると考える。

全体のまとめと考察

本研究では、タピオカストローを用いた独自の発酵観察法を開発し、菌の種類・温度・糖の違いによる発酵の特徴を比較した。この方法により、生地の高さを時間ごとに記録し、発酵の速さや膨らみを数値で比べられるようにした。ストローを使った実験は少量の材料で多数の条件を同時に比較でき、研究用透明冷蔵庫の再現の工夫やメモリシールの利用とあわせて、研究的にも教育的にも有効な手法であることが分かった。

菌の比較では、ドライイーストと天然酵母が最も安定して強い発酵を示し、パン作りに適していることが確認できた。一方で、ワイン酵母やこうじ菌など予想とは違って膨らむ菌もあり、菌の種類や条件によって発酵の仕方が大きく異なることが分かった。

温度の比較では、特に 28℃や 40℃で発酵が最も活発になり、膨らみが大きくなったことが明らかになった。逆に、5℃では多くの菌が発酵せず、60℃ではごくわずかな発酵しか見られなかった。つまり、菌のはたらきは温度によって大きく左右されることが確認できた。

糖の比較では、ブドウ糖が最も強く発酵し、次いでオリゴ糖、果糖の順に膨らみが大きかった。砂糖の 2 倍の量では効果が見られず、酵母が利用できる糖の量には限界があることが明らかになった。砂糖なしでも膨らみは見られたが時間がかかり、小麦粉のデンプン分解による糖生成が影響していると考えられた。

以上から、酵母の発酵は菌種・温度・糖の種類に大きく左右されることが示され、ドライイーストや天然酵母が実用的に優れている理由を科学的に確かめることができた。同時に、他の菌や糖でも条件次第で発酵が進むことが分かり、新しい食品づくりの可能性も示された。今回開発した方法は、今後の比較実験や教育教材として応用できると考えられる。

おわりに

ストローを使った実験を開発するために、かなり時間がかかった。いろいろな器具で酵母の発酵を観察し、どの観察方法が適しているか考察した。ストロー実験を発明し、夏休みに入るまでに予備実験を終わらせて、夏休みに入ってから本実験をスタートさせた。しかし、冷蔵庫での実験は温度の調節が難しいことが後から分かり、長時間冷蔵庫での観察を行ったが失敗してしまった。実験器具のカatalogで透明冷蔵庫を見つけたので、透明冷蔵庫を家で再現できないかと考え、再度低い温度を調節するための予備実験を始め、冷蔵庫の庫内の一部をサララップで覆い、ストローにメモリをつけて、写真を撮って記録することで冷蔵庫の温度変化を最小限にするという方法を生み出した。

また、ビール酵母、酒粕酵母、乳酸菌、こうじ菌は生地が膨らむまでかなりの時間がかかり実験が終わるのがいつになるのか分からず困った。観察が夜間に入ることがあり、どうしたいのか悩んだ。これが、研究機関の実験室なら交代で夜間勤務をしながら観察ができるが、それはできないので、実験開始時間を朝早い時間に設定するなど工夫をした。

予備実験を夏休み前に終わらせていたつもりだったが、本実験に入ってからもう上手い

かないことが出てきて試行錯誤が必要だった。研究は失敗を繰り返しながら進んでいくものだ実感した。また、実験を終えることで他の疑問が生まれた。酵母は新鮮さによって元気が違うのか、乳酸菌とこうじ菌はどうして気体を発生させたのか、糖によって発酵する力が違うのは「単糖・二糖・それ以上」の違いだけでは説明ができないのはなぜかなど。研究をやってみると、終わりがなく、次々に新しいなぞが出てくるのだと感じた。

参考文献

- 浜本 牧子監修. 菌の絵本 こうば. 農山漁村文化協会, 2019.
- 佐々木 泰子監修. 菌の絵本 にゅうさん菌. 農山漁村文化協会, 2018.
- 北垣 浩志監修. 菌の絵本 こうじ菌. 農山漁村文化協会, 2018.
- 小泉 武夫監修. おどろきの栄養パワー発酵食品の大研究. PHP 研究所, 2010.
- 小倉 ヒラク. 夏休み！発酵菌ですぐできるおいしい自由研究. あかね書房, 2017.
- 日本菌学会. 日本菌類百選. 八坂書房, 2020.
- 小崎 道雄, 椿 啓介. カビと酵母 生活の中の微生物. 八坂書房, 2007.
- 田村 學造, 野白 喜久雄, 秋山 裕一, 小泉 武夫編. 酵母からのチャレンジ. 技報堂出版, 1997.
- ニコラス・マナー, 田沢 恭子訳. 酵母文明を発酵させる菌の話. 草思社, 2022.
- 熊田 薫監修. あなたの知らないカビのはなし. 大月書店, 2010.
- 農文協編. 農家が教える 続 発酵食の知恵. 農山漁村文化協会, 年不明.
- 梶 昌子. ポリ袋でかんたん！甘酒&酒粕でつくる天然酵母パン. 河出書房新社, 2013.
- 板垣 知雄著, 五島 孜郎監修. ビール酵母のはなし. 三一書房, 1995.
- やまはた のりこ. 酒粕レシピ. 講談社, 2011.
- 栗山 真由美. ゆる粕レシピ. 池田書店, 2014.
- 南 智美. 酒粕おやつ. 農山漁村文化協会, 2012.
- 一島 英治. ものと人間の文化史 138 麴. 法政大学出版局, 2007.
- 山元 正博. 麴のちから！. 風雲舎, 2012.
- おの みさ. 麴のレシピ. 池田書店, 2011.
- カスピ海ヨーグルト研究会編. スーパー健康食カスピ海ヨーグルトのすべて. 双葉社, 2002.
- 家森 幸男. カスピ海ヨーグルトの真実. 法研, 2002.
- 家森 幸男, 白井 操監. カスピ海ヨーグルト効果倍增レシピ. アスキー・コミュニケーションズ, 2002.
- 堀田 誠. ヨーグルト酵母でパンを焼く. 文化出版局, 2017.
- 黒川 裕二編. 驚異のヨーグルト健康法. 主婦と生活社, 2002.
- 横山 正監. 理科実験器具と薬品事典. ポプラ社, 2005.
- うえたに夫婦. ビーカーくんとそのなかまたちーこの形にはワケがある！ゆかいな実験器

具図鑑. 誠文堂新光社, 2016.

お酒と酸素の関係：好気性菌の秘密. お酒の知識の何でも辞典.

<https://osake.click/process/the-oxygen-connection-aerobic-bacteria-and-alcohol/>, (参照 2025-08-23)

麹菌って呼吸するの？麹づくりと麹菌の呼吸について. 麹の仲間たち.

<https://koji-is-friends.com/20230812-hakko-column/>, (参照 2025-08-23)

目指せお砂糖博士！砂糖を学ぼう！. 農林水産省.

https://www.maff.go.jp/j/kids/kodomo_kasumi/2023/content/satou.html, (参照 2025-08-23)

砂糖の成分. 砂糖の基礎知識. 精糖工業会.

<https://seitokogyokai.com/knowledge/component/>, (参照 2025-08-23)

単糖類と二糖類の種類と形. 糖化品について. でん粉と糖の基礎知識. 日食協.

<https://www.nisshoku-sp.net/basic/saccharification4.html>, (参照 2025-08-23)

インベルターゼ. 酵素剤. 三菱ケミカル フード・ヘルスケア事業部.

<https://www.mfc.co.jp/product/kouso/invertase/index.html>, (参照 2025-08-23)

医薬品や試薬類の保存管理に適した薬用保冷庫. PHC 株式会社.

https://www.phchd.com/jp/biomedical/applications/technical-documents/mpr_02, (参照 2025-08-23)

National Center for Biotechnology Information.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, (参照 2025-08-23)

PubChem. Sucrose. CID=5988. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5988>, (参照 2025-08-23)

PubChem. Glucose. CID=5793. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5793>, (参照 2025-08-23)

PubChem. Fructose. CID=5984. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5984>, (参照 2025-08-23)

PubChem. Trehalose. CID=7427. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7427>, (参照 2025-08-23)

PubChem. Maltotriose. CID=439177. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information.

<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/439177>, (参照 2025-08-23)