

D A
172
1982 (H)

とうもろこしのサイロ貯蔵時の発熱に関する研究

筑波大学大学院
農学研究科
農林工学専攻

中 野 和 弘

目 次

第 1 章	緒 論	(1)
1・1	とうもろこしのサイロ貯蔵 について	(1)
1・2	従来の研究	(4)
1・3	研究の目的と方針	(8)
第 2 章	日本入港時のとうもろこしの穀温と 水分の統計的考察	(10)
2・1	緒 言	(10)
2・2	測定および解析方法	(11)
2・3	結果および考察	(13)
2・4	摘 要	(19)
第 3 章	穀物用サイロ内での水平面 穀温分布の変動	(21)
3・1	緒 言	(21)
3・2	サイロ内水平面穀温分布の 計算方法	(22)

3.3	数値計算モデルの検証	(35)
3.4	数値計算モデルによる解析	(40)
3.5	摘 要	(52)
第4章	サイロ頂部における飽和および結露	(55)
4.1	緒 言	(55)
4.2	実験装置および方法	(57)
4.3	実験結果および考察	(59)
4.4	サイロ頂部での結露の計算	(63)
4.5	日本各地における結露量の計算	(69)
4.6	摘 要	(76)
第5章	とうもろこし貯蔵時の発熱に およぼす微生物増殖の影響	(78)
5.1	緒 言	(78)
5.2	理 論	(79)
5.3	実験装置および方法	(87)
5.4	実験結果および考察	(94)
5.5	摘 要	(103)

第6章	発熱に関する総合的考察	(105)
6.1	緒言	(105)
6.2	水分	(105)
6.3	水分増加	(106)
6.4	穀温	(107)
6.5	貯蔵時の発熱	(109)
6.6	サイロ貯蔵時の発熱機構	(111)
6.7	発熱防止対策	(113)
6.8	現行の発熱防止対策への提言	(116)
6.9	換気量の計算	(117)
6.10	穀温監視法	(120)
6.11	摘要	(122)
第7章	結 論	(125)
付 録		(135)
主な使用記号		(153)
参考文献		(155)
謝 辞		(161)

第1章 緒 論

1.1 とうもろこしのサイロ貯蔵について

わが国の食生活は、第2次世界大戦後肉を主体とする方向へ大きく変化した。その結果畜産業は著しい発展をとげ、家畜・家禽用の飼料の消費量も急激に増加した。¹⁾²⁾

しかし飼料の主原料であるとうもろこしの自給率は極めて低く、消費量の99.9%を輸入に依存している^{3)~5)}。わが国に輸入されたとうもろこしは、各地の港湾に入港後、ただちに穀温、水分、きょう雑物等を測定され、発熱しているとうもろこしは投棄される。発熱していない場合は、調製・加工されるまでサイロに2~30日間貯蔵される。この貯蔵期間内に穀温が40~50℃に達することがある。このためとうもろこしは腐敗したり、サイロから搬出した後の調製・加工の段階で悪臭が発生するために、原料として用いられなくなる。

また入港時すでにカビ発生や黒変状態となっていることさえある(写真1.1, 1.2参照)。

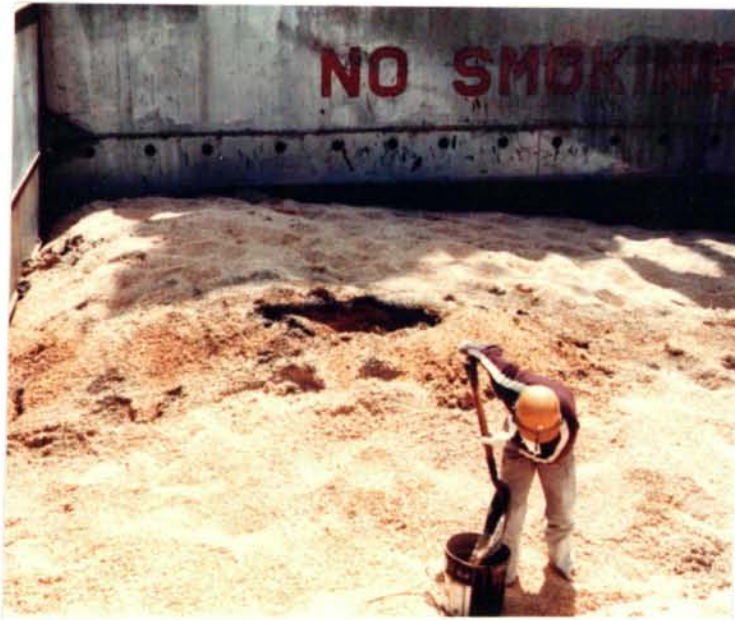


写真1 ・1

(発熱して黒変状態のとうもろこしを集めているところ)



写真1 ・2

一般に穀物貯蔵時の発熱の原因には、微生物の増殖、穀物自体の呼吸熱、昆虫の呼吸熱などが考えられるが、このうち貯蔵開始前にくん蒸している場合は、昆虫の呼吸熱による発熱はありえない。

発熱事故の特徴は、穀温上昇速度が非常に大きいこと、穀物の腐敗や悪臭の発生ならびに微生物の着生がみられることなどである。

従って貯蔵時の発熱は、穀物自体の呼吸熱および穀物に付着した微生物による基質分解熱であると推測される。この呼吸作用や基質分解反応は、高水分

の穀物が搬入されたり、貯蔵中に水分の高くなる物理的現象の発生によるものと考えられる。

しかし現在までのところ、貯蔵中のとうもろこしの発熱の機構は解明されておらず、穀物備蓄、品質管理、需給調整等の課題に対して大きな障害となっている。

現在貯蔵時の発熱に対してとられている措置は、発熱が起きた時に外気吹き込み（エアレーション）や別のサイロへの入れ替え（ローテーション）などを行ない、外気との接触による穀温低下を期待しているにすぎない。しかもエアレーションについての結果は、ほとんどその効果が見られず⁶⁾、ローテーションは搬入・搬出に時間と経費がかかりすぎるので頻繁には行なわれていないのが現状である。

そこでとうもろこしのサイロ貯蔵時の発熱機構を解明し、発熱を未然に防止する対策を検討する必要性が出てきた。

1.2 従来の研究

1.2.1 穀物貯蔵時の穀温上昇

穀物貯蔵時の穀温上昇に及ぼす穀物自体の呼吸熱、昆虫の呼吸熱の影響については、穀物充填層の中に昆虫の代謝熱により暖かい場所が生じると、ますます代謝作用が著しくなつて穀温が上昇すること、二酸化炭素を測定して穀物の呼吸熱に換算することにより水分や空気流速の影響が現われたことなどの報告が発表されてきた^{9)~10)}。貯蔵中の呼吸熱による穀温上昇は、貯蔵容器内の酸素量、初期の穀温上昇速度、穀物の熱的特性などがわかれば、ある程度までは計算することができる。前川ら(1980)¹¹⁾の報告によれば、通常の水分值の穀物を断熱密閉容器内に貯蔵した時の穀温上昇は、 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ にすぎない。

しかしサイロ貯蔵時に発生する発熱事故では、穀温上昇が激しいことが特徴である。筆者の調査では冬期の釧路(平均気温 -6.8°C)においてサイロ頂部の穀温が 50°C まで達し、とうもろこしが腐敗・黒変した例もある。

高水分の穀物を貯蔵する時は、穀物の呼吸作用が激しくなり、同時に微生物の増殖による発熱を伴う

ことが報告されている^{12)~15)}。しかしいずれの実験においても呼吸熱と微生物増殖による発熱とを分離してはいない。また得られた結果は定性的データであり、微生物増殖と発熱量の関係について定量的に研究した例はない。

宮川 (1980)¹⁶⁾ は、食品の腐敗に伴う微生物生育熱を測定し、腐敗に対する考察を行なった。この報告の中では微小熱量計を用い、さまざまな食品の腐敗状態での熱を測定し、それぞれ異なるサーモグラムを得た。

1.2.2 穀物の貯蔵性菌とそれによる発熱

穀物貯蔵中に着生する貯蔵性菌 (Storage fungi) には、とうもろこしの水分 14.5% w.b. 以下でも生育できる好稠性の *Aspergillus restricts* (最適増殖温度域 30~35°C) および *Aspergillus glaucus* (同 30~35°C), (以下 *Aspergillus* も *Asp.* と略記する), 水分 16.0% で生育する *Asp. candidus* (同 45~50°C), *Asp. versicolor* (同 20°C) および *Asp. ochraceus*, そして水分 18.0% で生育する *Asp. flavus*, *Asp. oryzae* および *Asp. niger* などがあげられる⁶⁾¹²⁾¹⁶⁾。なお *Asp. flavus* は発がん性物質アフラトキシン (aflatoxins) の生産菌として有名である。

WALKER (1967)¹⁷⁾ は、貯蔵中になんらかの原因でサイロ内に水が浸入し、穀物の水分が高くなれば *Asp. glaucus* が着生し、それが急激に増殖した場合は 35~40℃ まで上昇し、*Asp. flavus* と *Asp. candidus* が同時に増殖するならば、55℃ に達しその温度は数週間保たれることを報告している。

鶴田ら (1978)¹⁸⁾ は、カビ着生に伴うとうもろこし粒の発熱に関して実験を行ない、*Asp. flavus*, *Asp. candidus*, *Penicillium cyclopium* では初期穀温 26℃ から 33~36℃ に達することを報告している。

椿 (1978)¹⁹⁾ は好高温性と耐高温性カビの生育温度について実験を行なった。この中で *Asp. fumigatus*, 好高温性の *Thermoascus crustaceus* および *Mucor pusillus* をそれぞれ二種ずつ混合してとうもろこしに接種・培養すると 48℃ まで発熱することを認め、自然界での異着(異菌種混合着生)を想定すると好高温性・耐高温性カビが穀温上昇を助長する役割を果たすものであると報告した。

しかしこれらの報告で検討した発熱は、穀温が高℃上昇したかについて述べたものであり、穀温上昇の機構や穀物の水分の変化についての定量的研究は

見あたらない。

とうもろこしサイレージの搬出後の好気的発敗に関する研究では、微生物増殖とガス代謝量、熱発生量等との関係が報告されている^{20)~25)}。これらによると、酸素消費量と二酸化炭素生成量の経時変化は、穀温の経時変化によく対応すること、サイレージの初期発熱には酵母の生成する代謝熱が大きく寄与すること、また発熱の熱源は主として酵母の好気的代謝系にあることなどが指摘されている。

1.2.3 サイロ貯蔵時の穀温分布

穀物の品質に大きく影響するサイロの穀温変化についての研究は、カントリーエレベータやサイロの発達したアメリカやカナダにおいては報告されてはいるが、^{26)~29)}日射量などの影響を無視しているなど不備な点が多い。またその検討結果は、気象条件の異なるわが国への適用性に乏しい。またわが国においては前川ら³⁰⁾(1977)がサイロの南北線上についての穀温分布の予測を試みたり、斉藤ら³¹⁾(1982)がサイロ内壁温度を測定して5~8℃の変動があること、また田中ら

(1980)³²⁾はサイロ中心穀温の季節変動があることを報告している。しかし、これらの報告では壁体の断熱材の効果や水平断面における穀温分布やその変動範囲については検討されていない。

1.3 研究の目的と方針

本研究の目的は、とうもろこしのサイロ貯蔵時の発熱機構を解明し、発熱防止対策を確立することにある。

日本に入港して、その直後の検査で発熱していないと認められたとうもろこしであっても、その後のサイロ貯蔵中に発熱する事がある。これは、次の現象が単独または複合して発熱にいたると予想される。

(1) 水分の高いとうもろこしがサイロに搬入される

か、あるいはサイロ内で水分が高くなる物理的現象が発生する。

(2) サイロ中心部のとうもろこし充填層は断熱状態を保っており、外部からの熱は侵入しにくい状態となっている。それゆえサイロ中心部で発生した熱は穀温上昇を引き起こす。

本論文では、これらの事項を各々の実験と理論より検証し発熱機構にかかわる因子の解析を行ない、これら諸因子の相互関係を検討する。この結果にもとづき発熱にいたるまでのプロセスを整理し、発熱防止対策の確立を試みる。

第2章 日本入港時のとうもろこしの穀温と 水分の統計的考察

2.1 緒言

輸入とうもろこしは船で輸送される途中や、港湾に到着後サリ口で貯蔵される間にしばしば発熱することが知られている。わが国のとうもろこしの主要な輸入先国は、米国、アルゼンチン国、タイ国等であるが、アルゼンチン国やタイ国からのとうもろこしの発熱事故が多いと言われている。

この発熱に与える大きな要因は、高水分のとうもろこしの混入や船倉内のとうもろこしが高水分になることによるものと考えられる。船倉内のとうもろこしの水分は海水の混入がないかぎり高水分になりえないと予測されるので、輸送前に高水分とうもろこしの混入が考えられる。

またカントリーエレベータの設置が普及して乾燥技術の確立している米国に対し、天日乾燥に頼っているタイ国・アルゼンチン国では比較的高水分のとうもろこしが輸出される可能性は高い。

そこで日本各地の港湾に入港した直後のとうもろ

こしの水分と穀温のデータを収集し統計的に処理して、穀温上昇の原因の推定を試みる。

2.2 測定および解析方法

2.2.1 測定方法

日本に輸入されたとうもろこしについては、輸送船が日本に入港した直後、主に日本穀物検定協会と日本海事検定協会により穀温、水分、きょう雑物量等の測定が行なわれる。本研究の解析に用いるデータは両協会の測定結果の一部であり、穀温は棒状温度計を穀物層内にそう入し、水分はケット式赤外線水分計により、またきょう雑物量はその重量百分率を測定したものである。したがって本論文でいう「穀温」とは、穀物とその周囲の空気も含むバルク(bulk)状態の温度であると定義し、穀物と周囲空気には温度勾配がないものとする。以下の章についても同様である。

これらの測定は輸送船のひとつのハッチにつき5~6ヶ所で行なわれた。得られた穀温と水分のデータの総数は733ヶ(内訳はタイ国:415ヶ, 米国:227ヶ, アルゼ

ニチン国：21ヶ，その他：70ヶ）である。本研究では，1977～79の日本各地の港湾における測定値を前述の両協会の了解を得て提供してもらい，統計解析した。

2.2.2 解析方法

(1) 得られたデータを生産国別，入港季節別に分類して，散布図³³⁾に表し，穀温と水分の相関係数(r)を求める。

(2) 特に国別の穀温と水分についてF検定とT検定を行ない，各国間の有意差を検討する。

(3) 全データを二次元正規分布にあてはめて，穀温と水分の確率密度分布を等値線表示する。2.2.3にその計算方法を示す。

2.2.3 等値線図の作成法

いま入港時のとうもろこしの穀温と水分の関係が二次元正規分布に従うとするとき，確率密度関数は次のように表わされる³⁴⁾³⁵⁾。

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad \text{----- (2-1)}$$

$$\text{ただし } x^2 = \frac{1}{1-\rho^2} \left\{ \frac{(x-\xi)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{(x-\xi)(y-\eta)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\eta)^2}{\sigma_y^2} \right\} \quad (2-2)$$

$f(x, y)$: 2次元確率密度 (x を穀温, y を水分とする)

σ_x^2 : x の母分散

σ_y^2 : y の母分散

ρ : 相関係数

ξ : x の母平均

η : y の母平均

各項の値は別に統計処理した結果を用い、これを(2-1)式に代入したものを穀温と水分の関係を表わす確率密度関数とし、これを等値線表示するために開発された計算機プログラム³⁶⁾(付録1参照)により処理し、 X - Y プロッタで図示した。

2.3 結果および考察³⁷⁾

図2.1に、得られた全データにおける穀温と水分の関係を示した。また図2.2はタイ国産のとうもろこしについて、図2.3は米国産についての関係である。表2.1には、各データについての相関

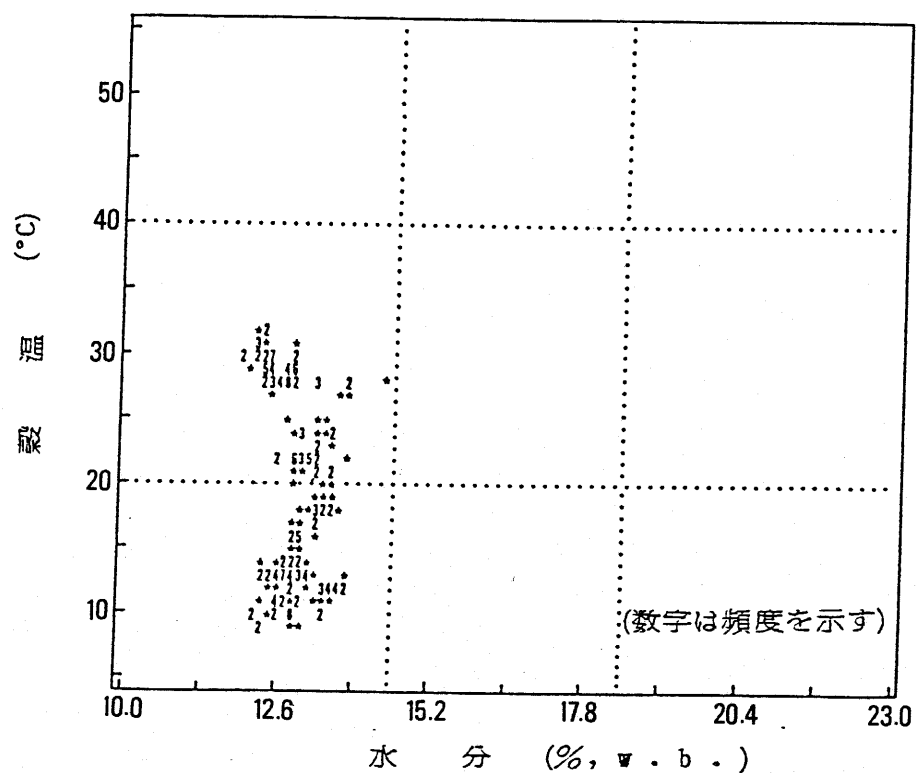


図2・3 得られたデータのうち米国産とうもろこしの水分と穀温の関係

表2・1 各データの相関係数と有意性

データ	データ数	測定値範囲	相関係数	有意性
		上: 穀温 °C 下: 水分 %, w.b.		
全データ	733	9.0 - 50.0 11.0 - 21.6	0.4735	***
米国産全データ	227	9.0 - 32.0 12.0 - 14.4	-0.2516	***
タイ国産全データ	415	10.0 - 50.0 12.4 - 21.6	0.2258	***
アルゼンチン 国産全データ	21	21.0 - 38.0 12.9 - 15.5	0.8864	***
米国産冬期到着	93	11.0 - 28.0 12.5 - 14.4	0.0822	0.217
タイ国産冬期到着	210	10.0 - 49.0 12.4 - 21.6	0.3648	***
米国産秋期到着	30	27.0 - 30.0 12.3 - 12.9	-0.1553	0.206
タイ国産秋期到着	205	23.0 - 50.0 12.6 - 19.0	0.3157	***

***, 0.1%有意水準で穀温と水分の間に相関関係がある

係数とその有意性を示した。相関係数の値は小さいが、これは直線回帰で求めた結果であることによる。したがって穀温と水分の間の相関関係は有意水準で検討すべきである。多くの場合、穀温と水分の間には0.1%の有意水準で正の相関関係があるといえる。

ただし米国産のとうもろこしについては、負の相関係数となったり、冬期入港と秋期入港のデータについては、有意水準20%以上で穀温と水分との間には相関は見いだされない。これは図2.3と表2.1に示すとおり、年間の水分範囲が12.0~14.4%w.b.と非常に安定していることによるものと推定される。

また全測定データから、穀温の上昇は高い水分によって生じることが推測される。ここで輸出国の穀物調製工程ならびに集荷システムを検討すると、米国ではとうもろこしは火力乾燥機で処理され、集荷システムも完全であるのに対し、タイ国では天日乾燥され、またはしけによる集荷中に雨水、川水および海水の積荷への浸透の可能性もあることが指摘されている。

そこで上述した穀温の上昇は高水分によるという

表2・2 タイ国と米国についてのF 検定とT 検定の結果

とうもうこし	国名	データ数	平均値	標準偏差	F 値	F 検定結果	T 値	T 検定結果
穀温 (°C)	タイ	415	34.12	7.939	1.15	o	22.34	***
	米	227	19.83	7.393				
水分 (%)	タイ	415	15.05	1.634	15.41	***	25.40	***
	米	227	12.89	0.416				

o : 20%で有意差なし

*** : 0.1%で有意差あり

表2・3 アルゼンチン国と米国のF 検定とT 検定結果

とうもうこし	国名	データ数	平均値	標準偏差	F 値	F 検定結果	T 値	T 検定結果
穀温 (°C)	アルゼンチン	21	27.48	7.026	1.11	o	4.56	***
	米	227	19.83	7.393				
水分 (%)	アルゼンチン	21	13.82	0.794	3.64	***	5.27	***
	米	227	12.89	0.416				

o : 20%で有意差なし

*** : 0.1%で有意差あり

表2・4 タイ国とアルゼンチン国のF 検定とT 検定結果

とうもうこし	国名	データ数	平均値	標準偏差	F 値	F 検定結果	T 値	T 検定結果
穀温 (°C)	タイ	415	34.12	7.939	1.28	o	3.76	***
	アルゼンチン	21	27.48	7.026				
水分 (%)	タイ	415	15.05	1.634	4.23	***	6.44	***
	アルゼンチン	21	13.82	0.794				

o : 20%で有意差なし

*** : 0.1%で有意差あり

仮定を裏付けるために、3ヶ国の国別比較を統計的に行なった。その結果を表2・2～2・4に示す。

これらの分析結果より、各国間の穀温については分散は等しいと言えるが、水分は国別の分散が等し

くなく、標準偏差値を比較するとタイ国産の水分のばらつきが最大で、次にアルゼンチン国、米国の順であることがわかる。また丁検定の結果より3国間には穀温、水分ともに有意差があることがわかったが、F検定の結果を考え合わせると穀温の有意差は水分の影響により現われたものであると考えられる。

とくにタイ国の場合は図2・2と表2・1に示すように、水分の測定値の範囲が年間を通じて12.4~21.6%と非常にばらつきが大きいことがわかる。この原因には、収穫から日本入港までの種々の工程の間で乾燥不十分、雨水の混入による影響等があると考えられる。米国からのとうもろこしはタイ国に比べて輸送期間が長く、雨水等の混入の危険性が大きいにもかかわらず、日本到着時の水分は増加していない。このことは、タイ国内でのとうもろこし集荷中に雨水等が入ったか、さらには乾燥技術水準そのものにも起因することを裏付けている。

また高水分であることは、とうもろこし自体の呼吸作用の促進や微生物の増殖を引き起こし、その結果穀温の上昇にもつながることがあるので、特にタイ国産

ゝとうもろこしについては注意を払うべきである。

なお日本に入港したとうもろこしの穀温と水分の関係は図2・1に示すとおりである。この図において水分と穀温の関係が2次元正規分布に従うとして描いた確率密度等値線を図2・4に示す。穀温と水分の平均値はそれぞれ 29.5°C ,

$14.5\% \text{ w.b.}$, 母分散はそれぞれ

7.0 , 1.8 であり, これらの数

値を (2-1) 式に代入したも

のである。図中の数値は確

率密度 $f(x,y)$ を表わしてい

る。この図より入港時の穀

温と水分の関係の概略がわ

かる。入港時の水分が高い

時は穀温も高いことが, 図2・4 およびF検定の結果より推測される。

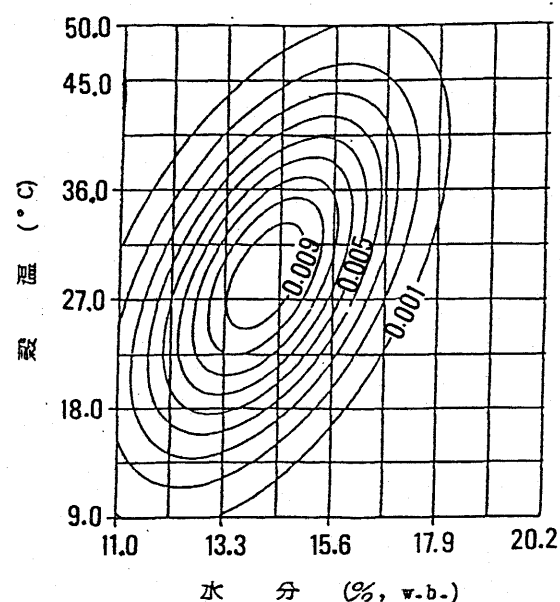


図2・4 得られた全データでの水分と穀温の確率密度等値線

2・4 摘 要

輸入とうもろこしが日本へ入港した時の穀温と水分のデータを生産国別・入港季節別に分類して, 穀

温と水分の関係を統計的に求めた。その結果は次のとおりである。

(1) 日本到着直後のとうもろこしの状態は、穀温 $9 \sim 50^{\circ}\text{C}$, 水分 $11.0 \sim 21.6\%$ (w.b.) の範囲にある。

(2) 入手した全データの穀温と水分の間には 0.1% の有意水準で正の相関関係がある。

(3) 入手した全データの穀温の平均値は 29.5°C , 水分は 14.5% (w.b.) である。

(4) 米国産のとうもろこしの水分は $12.0 \sim 14.4\%$ (w.b.) と安定しているが、タイ国産の場合は $12.4 \sim 21.6\%$ (w.b.) とばらつきが大きい。

(5) F検定の結果より、とうもろこしの発熱には水分の高いことが起因しているといえる。

第3章 穀物用サイロ内での水平面穀温分布の変動

3.1 緒言

本章では、日本各地の港湾サイロに穀物を貯蔵する時、その外気温・日射量等の気象条件、断熱材の構造、貯蔵期間等のサイロ内の穀温分布への影響範囲および変動幅を予測する数値計算モデルの整備を行なう。特に水分の穀温上昇への影響がない状態すなわち呼吸による発熱項を無視した式での予測計算を行ない、貯蔵中に前述した穀温上昇がありうるかを、サイロの水平面部に対し検討する。数値計算により、サイロ外部の気象変化による熱的影響がサイロ内部の穀温変動に与える程度とその範囲をさぐり、第5章で述べるとうもろこしの呼吸熱および付着した微生物の増殖による基質分解熱が穀温上昇への程度影響するかを確認するための資料とする。

なお実際に使用されている大きさのサイロを供試して穀温を実測することは困難であるため、小型の実験用サイロを用いて実測した温度分布と、計算機シミュレーションによる予測値を比較、検証した後

現在使用されている大きさのサイロについての計算を行なった。したがって任意の地理的位置, 気象条件, 断熱材構造での穀温分布を予測しうるシミュレーションプログラムの提供も本章の目的のひとつである。

3.2 サイロ内水平面穀温分布の計算方法

3.2.1 基礎方程式

本研究では, サイロを無限円柱とみなした時の熱伝導方程式を基礎式として, 外壁温度等の境界条件をサイロの円周全域にわたって設定し, 水平方向における二次元非定常の温度分布の変動を求めた。したがってサイロ内での高さ方向への伝熱はないものと仮定した。

以下に基礎方程式の導入と数値解法への展開を述べる。

2次元非定常熱伝導方程式は, 円筒極座標系 (r, s) では次式で表わされる³⁸⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D_g \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial s^2} \right) \quad \text{----- (3-1)}$$

$$\therefore D_g = \lambda_g / c_g \cdot \rho_g \quad \text{----- (3-2)}$$

ただし, θ : 温度 ($^{\circ}\text{C}$),

t : 時間 (hr)

r : 半径方向距離 (m)

s : 角度 (rad)

D_g : 温度伝導率 (m^2/hr)

λ_g : 穀物の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$)

C_g : 穀物の比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

ρ_g : 穀物のみかけの比重量 (kg/m^3)

上述の偏微分方程式はサイロ外の日射量・外気温を境界条件としているので, 解析的には解けない。したがって差分方程式による数値計算法を採用した。

いま r - s 極座標平面を r 方向に Δr , s 方向に Δs の間隔で等分割し, 原点から r 方向に m 分割だけ移動し, s 方向に n 分割だけ移動した格子点 $[m\Delta r, n\Delta s]$ における温度を $\theta_{(m,n)}$

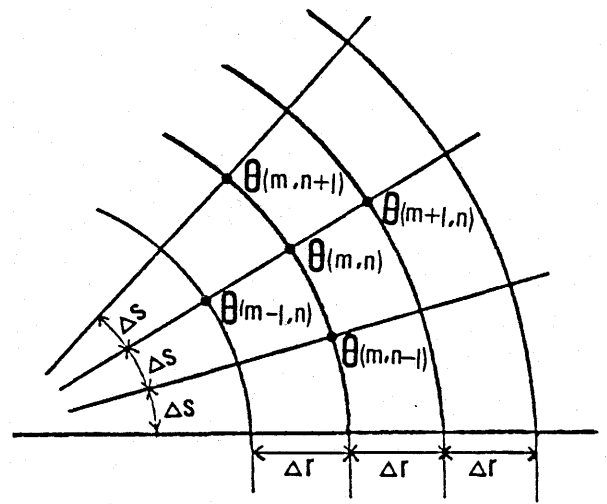


図3-1 分割格子点

で表わす (図3-1参照)。次に格子点 $[(m+1)\Delta r, n\Delta s]$ の温度 $\theta_{(m+1,n)}$ を $\theta_{(m,n)}$ のまわりでテーラー展開すると,

$$\begin{aligned} \theta_{(m+1,n)} &= \theta_{(m,n)} + \Delta r \frac{\partial \theta_{(m,n)}}{\partial r} \\ &+ \frac{(\Delta r)^2}{2} \frac{\partial^2 \theta_{(m,n)}}{\partial r^2} + \frac{(\Delta r)^3}{6} \frac{\partial^3 \theta_{(m,n)}}{\partial r^3} + \dots \end{aligned} \quad (3-3)$$

通常は上式右辺の2次項以降の値は小さいので無視

すると, ^{38) 39)}

$$\theta_{(m+1, n)} = \theta_{(m, n)} + \Delta r \frac{\partial \theta_{(m, n)}}{\partial r} \quad \text{----- (3-4)}$$

これを变形して, 次式を得る.

$$\frac{\partial \theta_{(m, n)}}{\partial r} = \frac{(\theta_{(m+1, n)} - \theta_{(m, n)})}{\Delta r} \quad \text{----- (3-5)}$$

同様に微少時間 Δt に対する温度変化 $\frac{\partial \theta_{(m, n)}}{\partial t}$ は, 次式で表わされる。

$$\frac{\partial \theta_{(m, n)}}{\partial t} = \frac{(\theta_{(m, n)}^{t=t+\Delta t} - \theta_{(m, n)}^{t=t})}{\Delta t} \quad \text{----- (3-6)}$$

ここで $t = t + \Delta t$ とは, 時刻 t より Δt 経過したことを意味している。

また (3-1) 式中の $\frac{\partial^2 \theta_{(m, n)}}{\partial r^2}$ および $\frac{\partial^2 \theta_{(m, n)}}{\partial s^2}$ も同様に考えて,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta_{(m, n)}}{\partial r^2} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \theta_{(m, n)}}{\partial r} \right) = \frac{1}{\Delta r} \left(\frac{\theta_{(m+1, n)} - \theta_{(m, n)}}{\Delta r} - \frac{\theta_{(m, n)} - \theta_{(m-1, n)}}{\Delta r} \right) \\ &= \left(\frac{1}{\Delta r} \right)^2 (\theta_{(m+1, n)} + \theta_{(m-1, n)} - 2 \cdot \theta_{(m, n)}) \end{aligned} \quad \text{----- (3-7)}$$

$$\text{また} \quad \frac{\partial^2 \theta_{(m, n)}}{\partial s^2} = \left(\frac{1}{\Delta s} \right)^2 (\theta_{(m, n+1)} + \theta_{(m, n-1)} - 2 \cdot \theta_{(m, n)}) \quad \text{----- (3-8)}$$

これらの項を (3-1) 式に代入して, 時刻 $t = t + \Delta t$ での温度を求める次式 (3-9) を得る。

$$\begin{aligned}
 t = t + \Delta t \quad t = t \\
 \theta_{(m,n)} = \theta_{(m,n)} + D_g \cdot \Delta t \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{\theta_{(m+1,n)} + \theta_{(m-1,n)} - 2\theta_{(m,n)}}{\Delta r^2} \\ & + \frac{\theta_{(m+1,n)} - \theta_{(m,n)}}{r \cdot \Delta r} \\ & + \frac{\theta_{(m+1,n)} + \theta_{(m+1,n)} - 2\theta_{(m,n)}}{(r \cdot \Delta s)^2} \end{aligned} \right]_{t=t}
 \end{aligned}
 \quad \text{----- (3-9)}$$

3.2.2 境界条件の設定

(1) 計算のフローチャート

穀温分布を求めるためのフローチャートは図3.2に示すとおりである。サイロ外の日射量と外気温の変動に係わる因子の設定と計算方法を以下に述べる。

(2) 日出・日没時刻の計算⁴⁰⁾

これは太陽位置の計算や日射量等の計算に必要であり、次のようにして求める。

まず、1月1日を $d = 1$ 、12月31日を $d = 366$ としたときの平均的な仮想年の太陽赤緯(δ°)を次式より求める。

$$\begin{aligned}
 \delta(d) = & 0.3622133 - 23.24763 \cdot \cos(w + 0.1532310) \\
 & - 0.3368908 \cdot \cos(2w + 0.2070988) \\
 & - 0.18526246 \cdot \cos(3w + 0.6201293) \quad \text{----- (3-10)}
 \end{aligned}$$

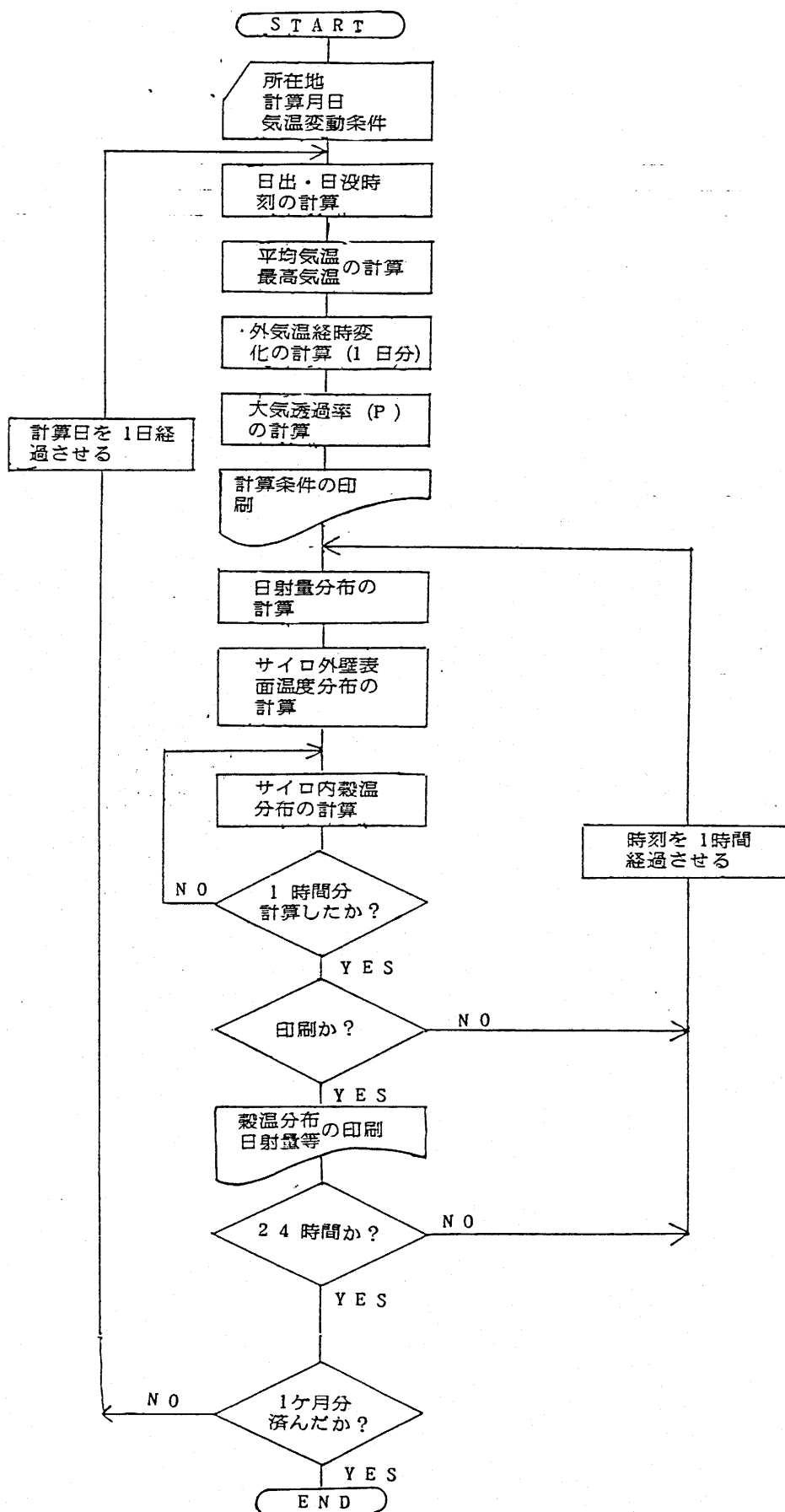


図3・2 計算のフローチャート

$$\text{ただし } \omega = 2\pi d / 366 \quad \text{----- (3-11)}$$

また測定地の緯度を φ° , その時の時角を t° とすると, 太陽高度 h との間には次式が成立する。

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \quad \text{--- (3-12)}$$

これより太陽高度 $h = 0$ のときが日出・日没時刻であるので, (3-12) 式を変形して t を求める次式を得る。

$$t = \pm \cos^{-1} (-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad \text{----- (3-13)}$$

これを $15^\circ = 1$ 時間のわりで時刻 T_0 に換算すると,

$$T_0 = \pm \{ \cos^{-1} (-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \} / 15 \quad \text{--- ----- (3-14)}$$

(3-13), (3-14) 式中の複号の正は日没, 負は日出時刻を示す。なおこの T_0 は真太陽時であるので日本での中央標準時 T は次式より求める。

$$T = T_0 - \{ (L - 135) / 15 \} - e \quad \text{----- (3-15)}$$

ここで L は測定値の経度であり, e は時差とよばれる次式で与えられる。

$$\begin{aligned} e(d) = & -0.0002786409 \\ & + 0.1227715 \cdot \cos(\omega + 1.4983111) \\ & - 0.1654575 \cdot \cos(2\omega - 1.261546) \\ & - 0.005353830 \cdot \cos(3\omega - 1.157100) \cdot \text{--- (3-16)} \end{aligned}$$

(3) 外気温の経時変化⁴¹⁾

外気温の変動は不規則のようにみえるが、ある種の規則性があり、その月の平均と標準偏差からモンテカルロ法により日平均気温と日最高気温を求め、次の仮定のもとに1日分の経時変化を計算できる。

〔仮定〕① 日最低気温は日出時刻の1時間前に記録される。

② 日最高気温は太陽南中から2時間後に記録される。

③ 気温変動の関数は余弦曲線とする。

図3.3に示すように最低気温が記録される時刻からその日の最高気温の記録される時刻までを第1区間とし、最高気温の記録された時刻から次の日の最低気温の記録される時刻までを第2区間と考える。そうすると第1区間でのT時における外気温 t_a は次式で表わされる。

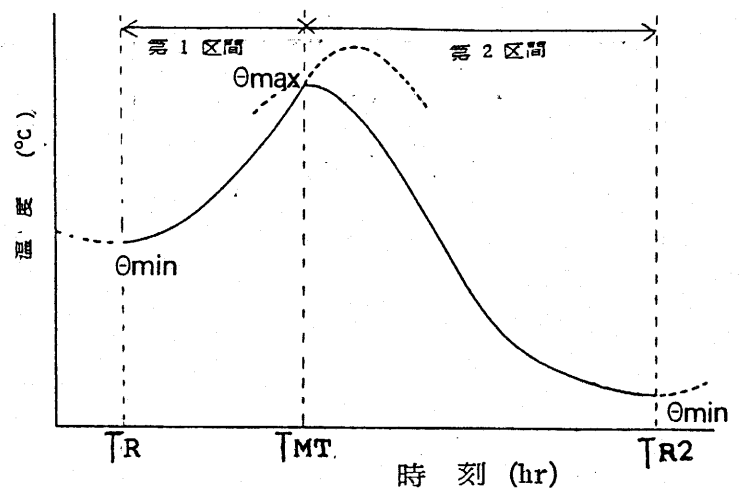


図3.3 外気温の変動

$$\theta_a = \theta_1 - \theta_A \cdot \cos \left\{ \pi (T - T_R) / (T_{MT} - T_R) \right\} \quad \text{----- (3-17)}$$

ただし θ_1 : 最高気温と最低気温の平均 θ_A : 最高気温と最低気温の差

T_R : 第1区間での最低気温の記録時刻 T_{MT} : 最高気温の記録時刻

さらに第2区間での外気温 θ_a は次式で表わされる。

$$\theta_a = \theta_2 + (\theta_{max} - \theta_2) \cdot \cos \left\{ \pi (T - T_{MT}) / (T_{R2} - T_{MT}) \right\} \quad (3-18)$$

ただし θ_{max} : 最高気温

T_{R2} : 最低気温の記録時刻(第2区間)

θ_{ave} : 平均気温

θ_{min} : 最低気温

$$A_T = \theta_{ave} \times 24 \quad \text{-----} (3-19)$$

$$A_1 = \theta_1 (T_{MT} - T_R) \quad \text{-----} (3-20)$$

$$A_2 = A_T - A_1 \quad \text{-----} (3-21)$$

$$\theta_2 = A_2 / (T_{R2} - T_{MT}) \quad \text{-----} (3-22)$$

$$\theta_{min} = 2\theta_2 - \theta_{max} \quad \text{-----} (3-23)$$

(3-17), (3-18)式は午前0時, 1時, 2時, ---- と1時間毎の変化であるので, それより小さい時間刻みの変化は補間法で求めた。

(4) 日射の大気透過率 (P) の計算 ^{40) 42) 43)}

いま地上において日射方向に垂直な日射の強さを J_m とし, 大気外における法線面日射の強さを J_{no} , 太陽高度を h , 大気の透過率を P とす

ると，これらの間にはブーガ (Bouguer) の式とよばれる次式が成立する。

$$J_m = J_{n0} \cdot P^{\cos \theta} \quad \text{----- (3-24)}$$

本研究では過去に観測された P の平均値 \bar{P} と，最大値より P の標準偏差 σ を計算し，モンテカルロ法よりその日の P を求める方法をとる。

43)

<計算> P の実測値を表 3.1 に示す。 P の平均値 \bar{P} は「(a) 平均値」の 1 年分の平均値を用いる。標準偏差 σ は，各地区の

1 ヶ月分の「(b) 最大の平均」と「(a) 平均値」の差を 2 倍した値をサンプルの範囲 R とし，1 日の測定個数 ($m=6$) から決まる係数 d_2 より標準偏差の推定値 $\hat{\sigma}$ を次式より計算する。⁴⁴⁾

$$\hat{\sigma} = R / d_2$$

----- (3-25)

表 3.1 P の実測値 ⁴³⁾ (気象要覧 1949~53 年 6 月)

(a) 平均値		月											
地名		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
福岡	0.79	0.78	0.73	0.71	0.70	0.68	0.70	0.65	0.75	0.76	0.78	0.77	
	0.77	0.75	0.71	0.69	0.67	0.67	0.66	0.66	0.74	0.72	0.75	0.75	
	0.79	0.77	0.72	0.69	0.68	0.68	0.64	0.66	0.76	0.75	0.76	0.79	
東京	0.78	0.76	0.72	0.69	0.63	0.65	0.67	0.54	0.73	0.71	0.76	0.76	
	0.74	0.72	0.69	0.64	0.65	0.66	0.63	0.55	0.64	0.66	0.74	0.73	
	0.78	0.76	0.71	0.64	0.68	0.65	0.64	0.65	0.66	0.73	0.78	0.79	
札幌	—	—	—	0.68	0.72	0.71	0.74	0.69	0.77	0.81	—	—	
	—	—	—	0.77	0.69	0.71	0.73	0.73	0.73	0.81	0.78	—	
	—	—	—	0.83	0.70	0.71	0.74	0.65	0.79	—	—	—	
(b) 最大の平均		月											
地名		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
福岡	0.82	0.79	0.77	0.77	0.74	0.70	0.76	0.73	0.78	0.80	0.80	0.77	
	0.79	0.75	0.76	0.77	0.73	0.72	0.70	0.73	0.77	0.76	0.77	0.77	
	0.81	0.80	0.77	0.76	0.75	0.72	0.68	0.73	0.80	0.79	0.79	0.81	
東京	0.83	0.80	0.78	0.76	0.70	0.67	0.70	0.56	0.78	0.80	0.82	0.83	
	0.82	0.79	0.76	0.70	0.72	0.69	0.66	0.57	0.68	0.75	0.79	0.81	
	0.82	0.80	0.76	0.69	0.70	0.65	0.69	0.71	0.70	0.76	0.82	0.82	
札幌	—	—	—	0.78	0.77	0.76	0.77	0.72	0.83	0.83	—	—	
	—	—	—	0.79	0.77	0.77	0.76	0.75	0.74	0.81	0.78	—	
	—	—	—	0.84	0.75	0.74	0.74	0.66	0.82	—	—	—	

〔備考〕 札幌は 1952~53 年の値。いずれも上段は 9 時；中段は 12 時，下段は 15 時 (中央標準時) の値

ここで \bar{R} は R の平均値である。

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{\text{測定回数}} = 0.1693 \quad \text{-----(3-26)}$$

また $n=6$ に対する $1/d_2$ の値は表3.2より 0.395 なので、

(3-25)式より $\hat{\sigma}$ は

$$\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2 = 0.0669$$

なお「(a) の平均値」より求

めた P の平均値は

$\bar{P} = 0.714$ であった。

表3.2 範囲 R に関する係数表⁴⁴⁾

n	$1/d_2$	D_1	$D_1(2)$	D_2
2	0.886	3.267	2.512	3.686
3	0.591	2.575	2.049	4.358
4	0.486	2.282	1.855	4.698
5	0.430	2.115	1.743	4.918
6	0.395	2.005	1.669	5.078

(5) サリ口壁面での日射量分布⁴³⁾

一般に鉛直面の直達日射量 J_{rd} は次式で与えられる。

$$J_{rd} = \frac{J_0}{r_d} \cdot p^{\text{cosec}(h)} \cdot \cos(h) \cdot \cos(A - \alpha) \quad \text{---(3-27)}$$

ただし

J_0 : 太陽常数 ($= 1167 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr}$)

A : 太陽の方位角

r_d : 地球の動径 ($= 0.9836$)

α : 南面からの角度

r_d は日付け α により多少変化するが、ここでは平均値 $r_d = 0.9836$ を用いた。また α の範囲は $-\pi \leq \alpha < \pi$

であるが、南から西回りを正、その逆を負とする。

なお $h \leq 0$ すなわち日没後～日出前までは、当然 $J_{rd} = 0$ である。

(6) サイロ外壁面温度の計算

放射をとともなう壁体外表面温度 θ_o の算出は、木村⁴⁵⁾ の試行錯誤法により求める。

すなわち図 3.4 に示した関係より次式で表わされる。

$$q_s + q_a + q_e = q_c + q_r + q_o \quad \text{----- (3-28)}$$

こゝで

q_s : 外表面で吸収される日射量

q_a : 外表面で吸収される大気放射熱量

q_e : 外表面で吸収される地物からの放射熱量

q_c : 外表面から外気への対流熱伝達量

q_r : 外表面から放射される放射熱量

q_o : 外表面から内部へ向かう熱量

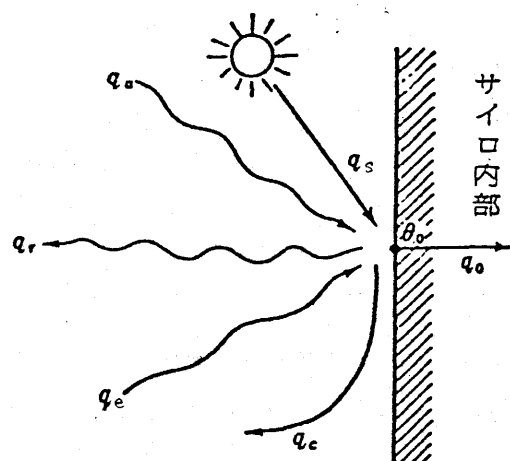


図3・4 熱平衡関係図⁴⁵⁾

であり、次式で求める。

$$q_s = \alpha_s (J_{ra} + J_{sv}) \quad \text{----- (3-29)}$$

$$q_a = \varepsilon_o \varphi_a \sigma T_a^4 (a_1 + a_2 \sqrt{F}) \quad \text{----- (3-30)}$$

$$q_e = \varepsilon_o \varepsilon_e \varphi_e \sigma T_e^4 \quad \text{----- (3-31)}$$

$$q_c = \alpha_c (\theta_o - \theta_a) \quad \text{----- (3-32)}$$

$$q_r = \varepsilon_o \sigma T_o^4 \quad \text{----- (3-33)}$$

$$q_o = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = K' (\theta_o - \theta_i) / \Delta r \quad \text{----- (3-34)}$$

ただし ϵ_o : 外壁表面の射出率

σ : ステファンボルツマン定数

φ_a : 外壁表面の天空に対する形態係数

T_a : 外気空気の絶対温度 (°K)

a_1, a_2 : 定数 ($a_1=0.51, a_2=0.0076$)

f : 外気空気の蒸気圧 (mmHg)

T_e : 地物表面の絶対温度 (°K)

J_{rad}, J_{sur} : 外壁面にあたる直達および
天空日射量 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)

α_c : 壁体対流熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)

θ_a : 外気温度 (°C)

T_o : 外壁面の絶対温度 (°K)

ϵ_e : 地物表面の射出率

α_s : 外壁表面の吸収率

また q_o における $\partial \theta, \partial r$ については, サイロ外壁面と
内壁面の間を想定して計算した。従って

$$k' = \frac{1}{\left(\sum \frac{\lambda_n}{l_n} \right)} \quad \text{----- (3-35)}$$

ただし λ : 壁層体の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$) l : 壁層体の厚さ (m)

これらの関係を用いて (3-28) 式より サイロ外壁温 θ_o
を求める次式を得るが, この右辺にも T_o があるので
試行錯誤法により解く。

$$\theta_o = \left\{ -\epsilon_o \sigma T_o^4 + \epsilon_o \varphi_a \sigma T_a^4 (a_1 + a_2 \sqrt{f}) + \epsilon_o \epsilon_e \varphi_e \sigma T_e^4 \right. \\ \left. + \alpha_s (J_{rad} + J_{sur}) + \alpha_c \theta_a + k' \theta_i \right\} / (k' + \alpha_c) \quad \text{----- (3-36)}$$

なお (3-36) 式を解くときの θ_o の初期値は次式による
相当外気温度を代用した。

$$\theta_o = \theta_a + q_s / \alpha_c \quad \text{----- (3-37)}$$

また J_{sv} は垂直面天空放射量で次式より求めた。⁴³⁾

$$J_{sv} = \frac{1}{2} J_0 \sin(\theta) \frac{1 - P^{\csc(\theta)}}{1 - 1.4 \log_e P} \times \frac{1}{2} \quad (3-38)$$

(7) サイロ 内壁面温度の計算

ここでは前田の記述⁴⁶⁾に従って異種材料との接触面の非定常熱伝導を数値計算法で解いた。

いまサイロ外壁温を θ_0 ,
内壁温を θ_i , 内壁より Δx_1
だけ内側の穀温を θ_{i-1} とし,
図3.5 のように外側の材
料 (サイロ鋼板) に 1, 内側の
材料 (とうもろこし) に 2 の添字

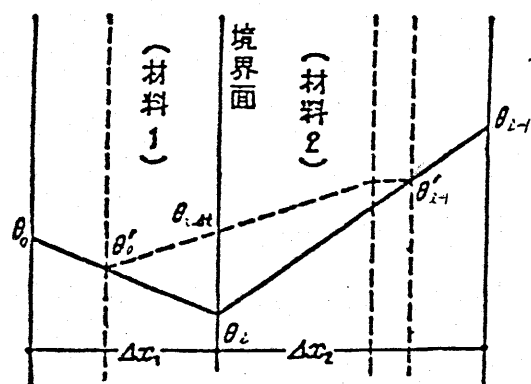


図3・5 内壁温度の計算モデル ⁴⁶⁾

をつける。

温度分布を2次曲線と考えると、互いに境界外に延長して θ_0' , θ_{i-1}' を仮想すれば,

$$\theta_i^{t=\tau+\Delta t} = p_1 \left[\theta_0 + \theta_{i-1}' + \left\{ (1/p_1) - 2 \right\} \theta_i \right]^{t=\tau} \quad \text{--- (3-39)}$$

$$\theta_i^{t=\tau+\Delta t} = p_2 \left[\theta_0' + \theta_{i-1} + \left\{ (1/p_2) - 2 \right\} \theta_i \right]^{t=\tau} \quad \text{--- (3-40)}$$

境界の熱量の強さが等しいという条件から

$$\frac{\lambda_1 (\theta_{i-1}' - \theta_0)}{2 \Delta x_1} = \frac{\lambda_2 (\theta_{i-1} - \theta_0')}{2 \Delta x_2} \quad \text{----- (3-41)}$$

(3-39) ~ (3-41) から θ_0' , θ_{i-1}' を消去して,

$$\theta_0^{t=\tau+\Delta t} = \frac{2}{K} \left[\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} \theta_0 + \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} \theta_{i-1} + \left\{ \frac{K}{2} - \left(\frac{\lambda_1}{\Delta x_1} + \frac{\lambda_2}{\Delta x_2} \right) \right\} \theta_i \right]^{t=\tau} \quad \text{----- (3-42)}$$

$$\text{ただし } K = \left\{ \lambda_1 / (p_1 \Delta x_1) \right\} + \left\{ \lambda_2 / (p_2 \Delta x_2) \right\} \quad \text{----- (3-43)}$$

$$p_1 = D_1 \Delta t / (\Delta x_1)^2 \quad \text{----- (3-44)}$$

$$p_2 = D_2 \Delta t / (\Delta x_2)^2 \quad \text{----- (3-45)}$$

D は 温度伝導率 (m^2/hr)

この (3-42) 式を用いて, サイロの全円周にわたって内壁面温度を求めた。

3.3 数値計算モデルの検証

3.3.1 実験用サイロおよび測定方法

実験装置の概要を図 3.6 に示す。穀温の測定は中心 1 点, 中心から 100 mm, 200 mm およびサイロ内・外壁面のそれぞれの同心円を 8 等分する点 (図 3.6 の ★ 部) に, 0.32 mmφ の CC (銅-コンスタンタン, 以下の章でも CC と略記する) 熱電対を埋設して, 多点温度記録計 (CHIND WORKS, PROCOS-V) で記録した。また

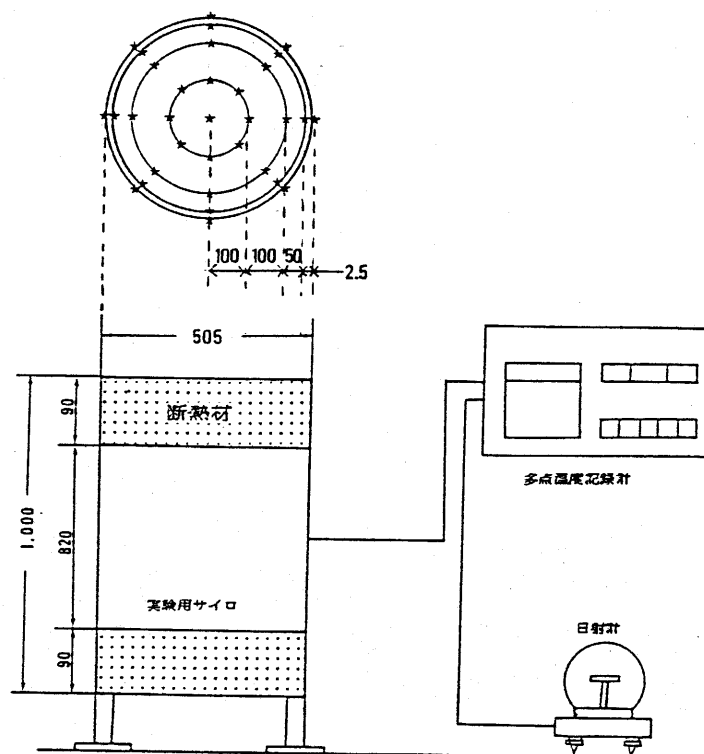


図3・6 実験装置の概要 (単位mm)

境界条件となる外気温，地温も測定した。

日射量は日射計（英弘精機 MS-42）を地上水平面上に設置して水平面直達日射量を測定した。

同サイロと供試とうもろこしの実験条件を表3・3に示す。

表3・3 実験用サイロおよびとうもろこしの条件

なお測定は昭和55年8月7日から約1ヶ月間，10分間隔に行なった。

サ イ ロ	設 置 場 所	農業土木試験場 (茨城県筑波郡，北緯36°13')
	内 径 (m)	0.5
と う も ろ こ し	厚 さ (m)	2.5×10^{-3}
	材 質	鋼 板
と う も ろ こ し	熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)	43.0 ⁴⁷⁾
	水分 (%) (w.b.)	13.3 (実測値)
と う も ろ こ し	熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)	0.1368
	比 熱 (kcal/kg·°C)	0.484
と う も ろ こ し	み かけ 密度 (kg/m ³)	748.06

3.3.2 数値計算モデルの検証

(1) 境界条件の設定

初期穀温はサウロ内の穀温分布がほぼ均一になった8月10日22時の24.5℃を用いた。日射量はその日の実測値より求めた水平面直達日射量の毎時平均値を用いた。外気温も日最高気温と日平均値の実測値を用いた。表3.4に主な境界条件と計算条件を示す。

表3・4 境界条件と計算条件

境界条件 (実測値)	初期設定穀温	8月10日22時で24.5℃				
	日射量の経時変化 (左から順に0時 ~24時の値) (kcal/m ² ・hr)	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4
		139.3	295.0	444.8	568.2	611.7
		676.1	706.0	636.5	509.6	398.0
		185.3	96.2	8.9	0.0	0.0
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	日平均値	22.75				
	外気温 (°C) 日最高値	29.40				
計算条件	サイロ条件	表3・1に同じ				
	とうもろこし条件	表3・1に同じ				
	外壁面对流熱伝達率 (kcal/m ² ・hr・°C)	19.5 ⁴⁹⁾				
	短波吸収率	0.66 ³⁰⁾				
	外壁面 長波射出率	0.23				
	半径方向 分割数	12				
	円周方向 分割数	24				
	計算の時間きざみ (hr)	0.005				

(2) 数値計算の結果と実測値の比較・検証

数値計算の結果を検証するためには実測値との比較を行なえばよいが、本研究ではその対象として、サイロ外壁面の温度変化、14時の穀温分布、サイロ中心温度の経時変化を挙げて検討した。

図3.7 に8月11日におけるサイロ外壁面の東西南北の4方向について、外壁面温度の経時変化の実測値と計算値を示す。

西方向の最高温度がやや一致しないのは日射量の値を1時間平均と粗くしたた

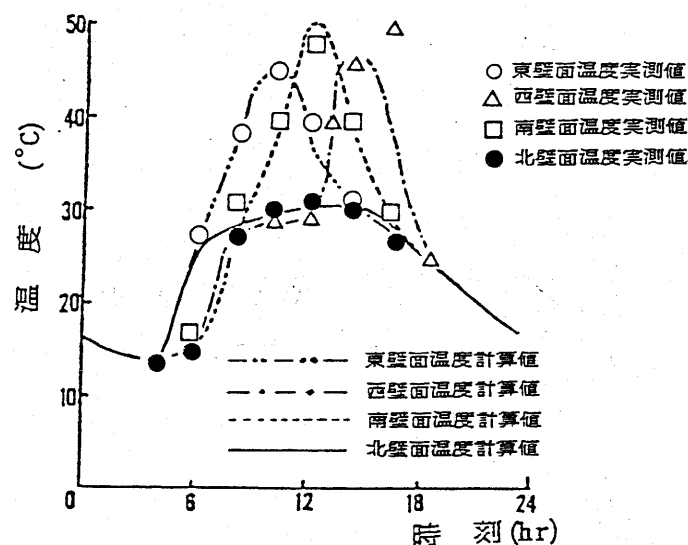


図3・7 サイロ外壁面温度の経時変化の比較

めに生じたものであり、

時間刻みを小さくした日射量を用いればさらに精度が上がると思われる。この図では、日射量等による外壁面温度の計算(3.2.2(b))は適正であることがわかる。

図3.8 には同日14時の温度分布の比較を示した。

比較には外壁温と内壁より5cm内側の点における計

以上述べたように、実測値とその時と同じ境界条件での計算値はよく一致しており、本研究で用いる数値計算プログラム(付録2参照)によりサイロ内外の壁面温度およびとうもろこしの穀温分布の変動も適確に把握できることが検証された。

3.4 数値計算モデルによる解析

3.4.1 境界条件の設定

本研究では、那覇と釧路でのサイロ貯蔵について計算したが、それぞれの計算条件を表3.5に、気象条件⁵⁰⁾を表3.6～3.7に示した。

表3・5 数値計算モデルの計算条件

条 件			那 覇		釧 路	
サイロ内径 (m)			6.75		6.75	
外壁面対流熱伝達率 (kcal/m・hr・°C)			19.5		19.5	
断 熱 材 構 造	断熱材	構 造	厚さ (m)	熱伝導率 (kcal/m・hr・°C)	厚さ (m)	熱伝導率 (kcal/m・hr・°C)
	有	外壁鋼板	0.4×10^{-3}	43.0	0.4×10^{-3}	43.0
		断熱材	50×10^{-3}	0.04※	50×10^{-3}	0.0269※※
		内壁鋼板	5×10^{-3}	43.0	6×10^{-3}	43.0
	無	内壁鋼板	5×10^{-3}	43.0	6×10^{-3}	43.0
分割 数	半径方向		60		72	
	円周方向		72		24	
初期穀温 (°c)			26.9		27.4	
貯蔵期間			8月1日～8月31日		1月1日～1月31日	

※ グラスウール50mm , ※※ 空気20mmとグラスウール30mm

表3・6 那覇の気象条件⁵⁰⁾

月	日平均気温 (°C)	標準偏差	日最高気温 (°C)	標準偏差
1	16.1	1.0	19.2	1.1
2	16.2	1.0	19.2	1.2
3	17.8	1.1	21.0	1.2
4	20.7	0.9	23.9	1.1
5	23.2	0.9	26.4	1.0
6	26.1	1.0	29.1	1.3
7	27.9	0.6	31.2	0.9
8	27.6	0.5	30.8	0.9
9	26.6	0.5	29.9	0.8
10	23.9	0.6	27.2	0.9
11	20.9	0.9	24.2	0.9
12	17.8	0.8	20.8	0.9

(北緯 26° 14' , 東経 127° 40')

表3・7 釧路の気象条件⁵⁰⁾

月	日平均気温 (°C)	標準偏差	日最高気温 (°C)	標準偏差
1	-6.8	1.9	-1.4	1.5
2	-6.4	1.6	-1.2	1.2
3	-2.3	1.1	1.9	0.8
4	3.0	0.8	7.2	1.0
5	7.1	1.1	11.3	1.2
6	10.9	1.1	14.6	1.2
7	15.3	1.4	18.8	1.4
8	17.9	1.4	21.5	1.5
9	15.2	1.1	19.3	1.1
10	9.7	0.8	14.7	0.8
11	3.4	1.1	8.3	1.1
12	-2.9	1.6	1.4	2.0

(北緯 42° 59' , 東経 144° 24')

3・4・2 結果および考察

(1) 気象条件の影響を受けない範囲

いまサイロ貯蔵時のある点での穀温変動が初期穀温に対して±5%以下である時，この点では外気温および日射量等の気象条件の影響を受けていないものとする。表3・8は1ヶ月間貯蔵中に気象条件の影響を受けない位置も無次元半径化して表わしたものである。

ここで

$$\text{無次元半径} = \left(\frac{\text{気象条件の影響を受けない点のサイロ中心からの距離}}{\text{サイロ半径}} \right) \quad \text{--- (3-46)}$$

表3・8 気象条件の影響を受けない無次元半径

位置	断熱材	方位			
		東	西	南	北
那覇	無	0.883	0.883	0.950	0.967
	有	1.000	1.000	1.000	1.000
釧路	無	0.514	0.514	0.514	0.514
	有	0.569	0.569	0.569	0.569

那覇では断熱材を施したサイロでは気象条件の影響を受けず，断熱材のないサイロでは東面と西面が

南面よりさらに気象条件の影響を受けることがわかる。これは日射が東面または西面に当たる時刻での太陽高度が低い事によるものである。

また釧路では方位による特徴は見られず、同心円状に穀温が低下していくこと、断熱材の効果が若干見られることがわかる。

実際のサロでの穀温の監視は、サイロ中心部について行なわれている。従ってここで穀温上昇がある場合は、気象条件によるものではなく、とうもろこしの呼吸熱およびとうもろこしに付着した微生物の増殖に伴う基質分解熱によることがわかる。

(2) 穀温監視法の検討

サイロ中心部での貯蔵時の気象条件の影響による温度上昇速度を S_1 , 呼吸熱による温度上昇速度を S_2 , 微生物増殖時の温度上昇速度を N とすると、それぞれ次式で表わされる。

$$S_1 = \Delta T_1 / \Delta t \quad \text{----- (3-47)}$$

$$S_2 = \Delta T_2 / \Delta t \quad \text{----- (3-48)}$$

$$N = \Delta T_N / \Delta t \quad \text{----- (3-49)}$$

ただし, $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_N$ は Δt 時間内での上昇温度である。

また N に対する S_1 または S_2 の比をそれぞれ R_1, R_2 とすると, 次式で表わされる。

$$R_1 = N / S_1 \quad \text{----- (3-50)}$$

$$R_2 = N / S_2 \quad \text{----- (3-51)}$$

(1) の結果より, サイロ中心部では気象条件の影響による穀温上昇はないので, $S_1 = 0$ であり, $R_1 = \infty$ となる。したがって R_2 を監視することにより, サイロ貯蔵中の発熱現象を未然に防ぐことができると思われる。この R_2 での監視法については, 第 6 章で述べる。

(3) 那覇における穀温変動

図 3.10 ~ 3.13 に断熱材を施していないサイロでの穀温の経日変化を示す。図中のプロットはその日の 0 時の穀温である。

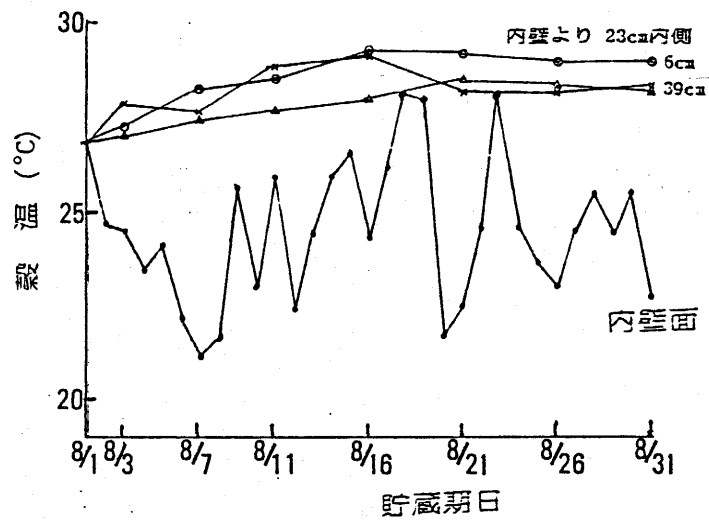


図3・10 東面での穀温変化 (断熱材なし)

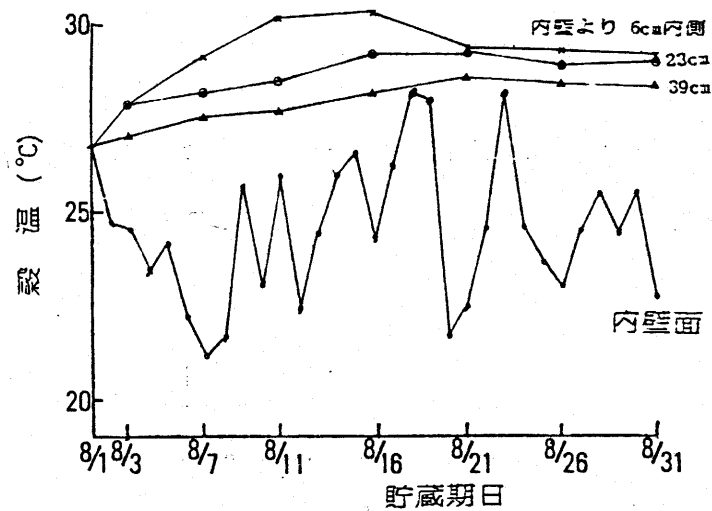


図3・11 西面での穀温変化 (断熱材なし)

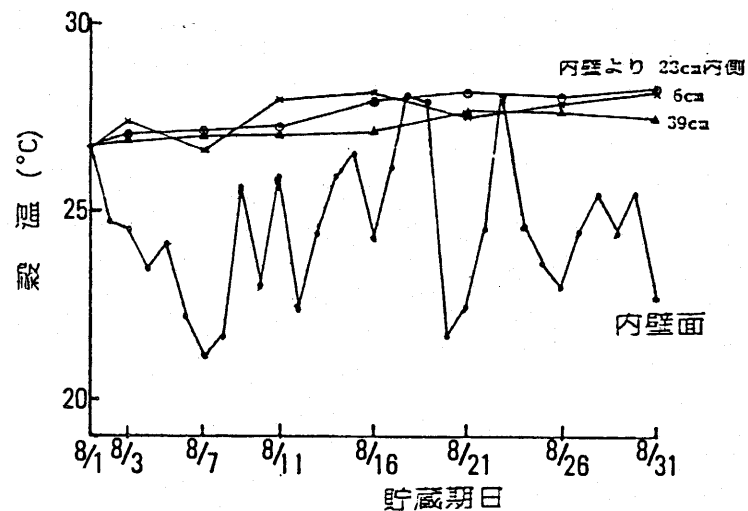


図3・12 南面での穀温変化 (断熱材なし)

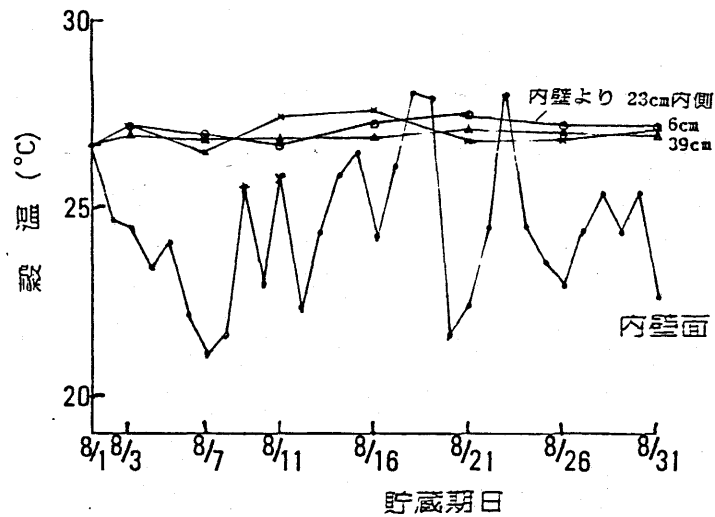


図3・13 北面での穀温変化 (断熱材なし)

サリ口内部での穀温は，内壁面からの距離が遠いほど毎日の変動は少ないが，日射のない北面を除いて，貯蔵期間中穀温が上昇する傾向を示すが，その程度は $1\sim3^{\circ}\text{C}$ である。特に西面においては穀温の変動が激しく，8月11日～16日には内壁より6cm内側の点で 30°C 以上となる。これは，いわゆる西日の日射量が強いことを示している。

また図3・14には，西面での8月30日～31日の穀温分布の経時変化を示した。内壁面温度は外気温と日射の影響を受けて $21\sim47^{\circ}\text{C}$ と激しく変動するが，

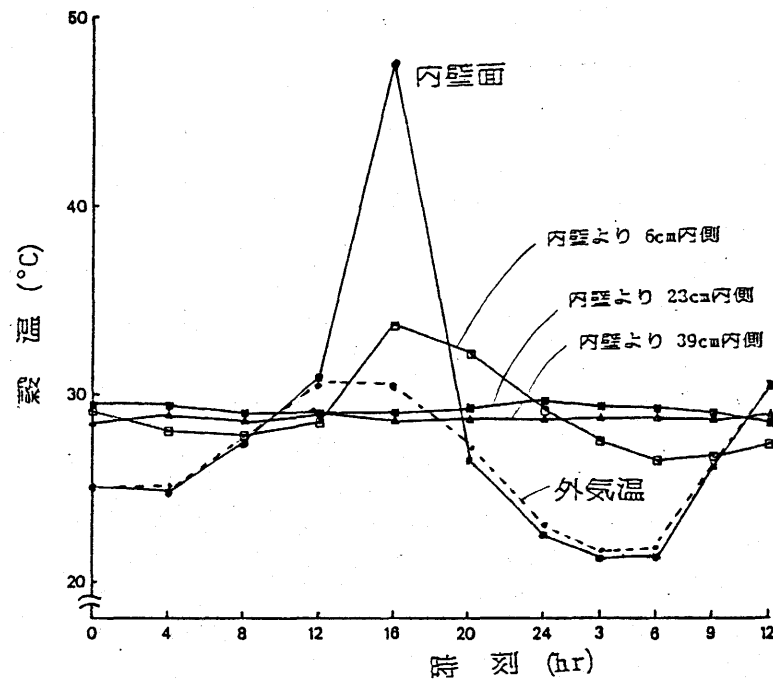


図3・14 西面での経時変化 (断熱材なし)

内壁面から23cm内側ではほとんど経時変化がないことがわかる。また内壁面は日没～日出時刻までは外気温変化とほとんど同様の変動を示すが、これは、他の面についても同じであった。

図3・15には断熱材のある場合で、西面での穀温変動を示した。断熱材のない場合と比較して穀温変動はほとんどなく、内壁温度も26～27℃の範囲内であり、断熱材の効果がはっきり示される。

また図3・16と3・17には、断熱材の有無のちがいに

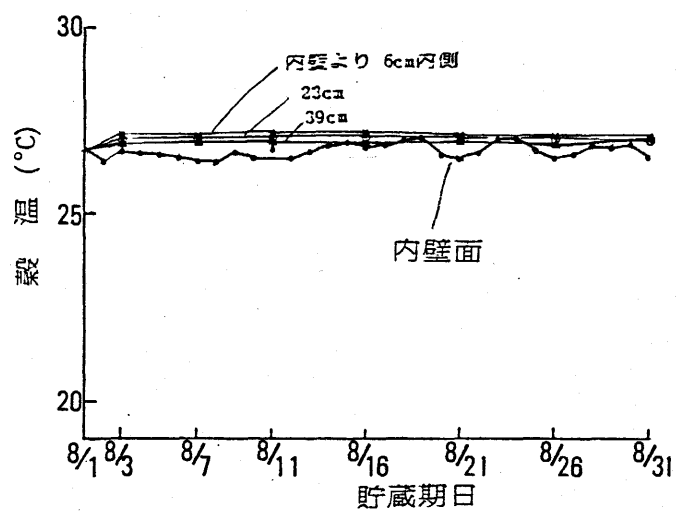


図3・15 西面での穀温変動 (断熱材あり)

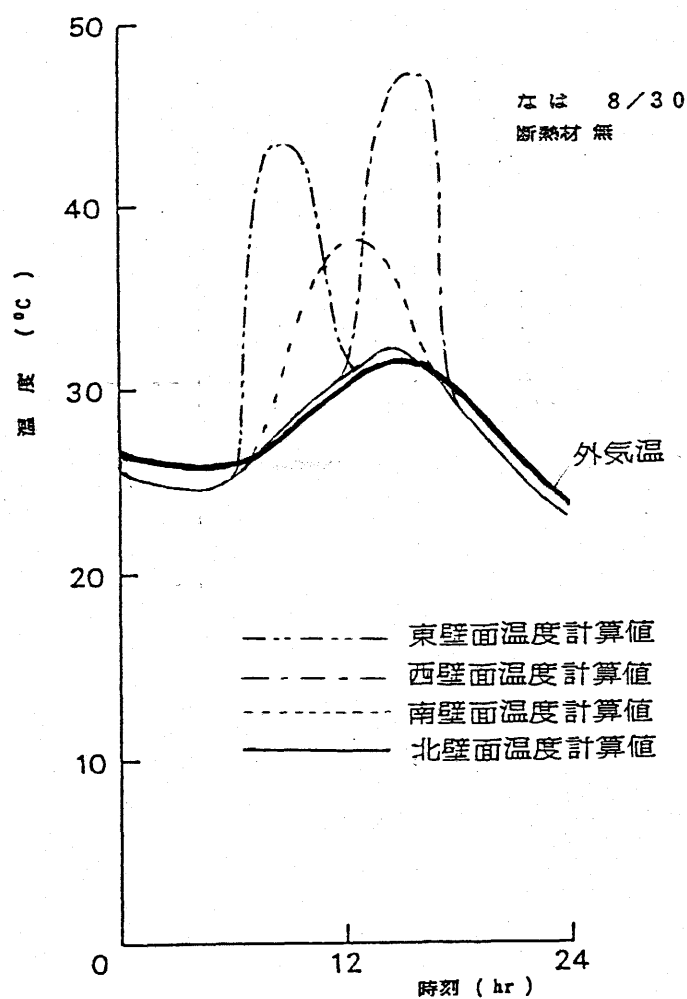


図3・16 内壁面温度と外気温の経時変化

よる各方位の内壁面温度の経時変化を示した。

断熱材を施していないサウロでは西面での変動が最も激しく、最高 48°C まで上昇するが、北面は外気温の経時変化とほとんど同じ変動である。断熱材を施した場合は、日射や外気温の影響もほとんど受けないことがわかる。

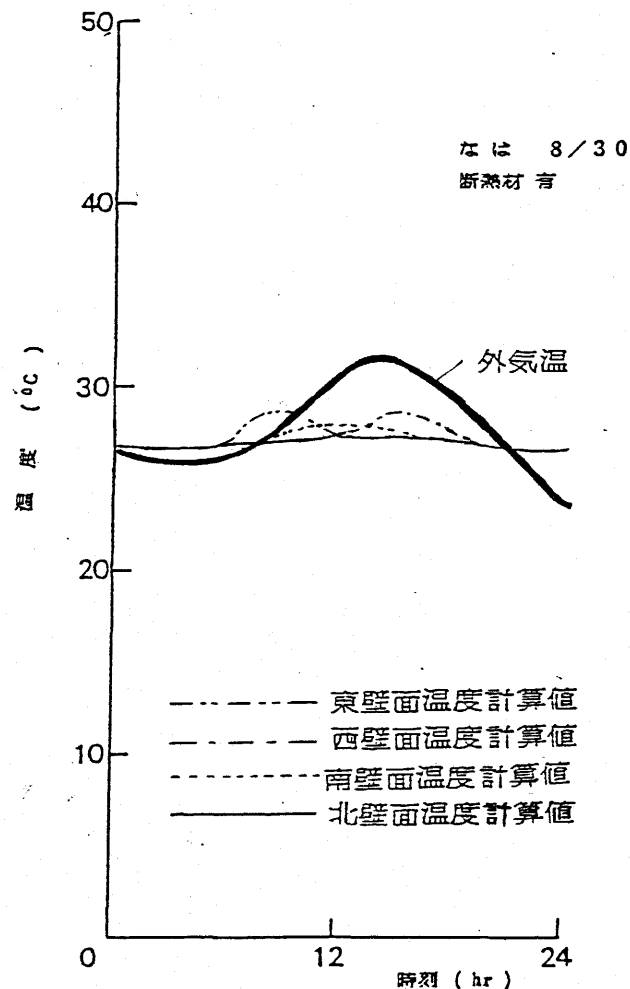


図3・17 内壁面温度と外気温の経時変化

(4) 釧路における穀温変動

図3・18と図3・19には1ヶ月間貯蔵後の1月31日における断熱材の有無のちがいによる内壁面温度の経時変化を示した。東面や西面での変動がはげしい那覇の場合と異なり、釧路では南面が他の方位よ

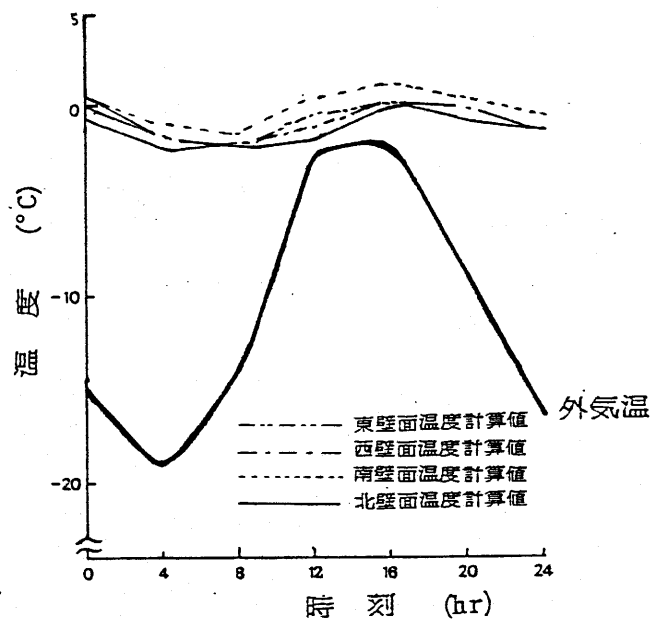


図3・18 内壁面温度と外気温の経時変化
(断熱材あり)

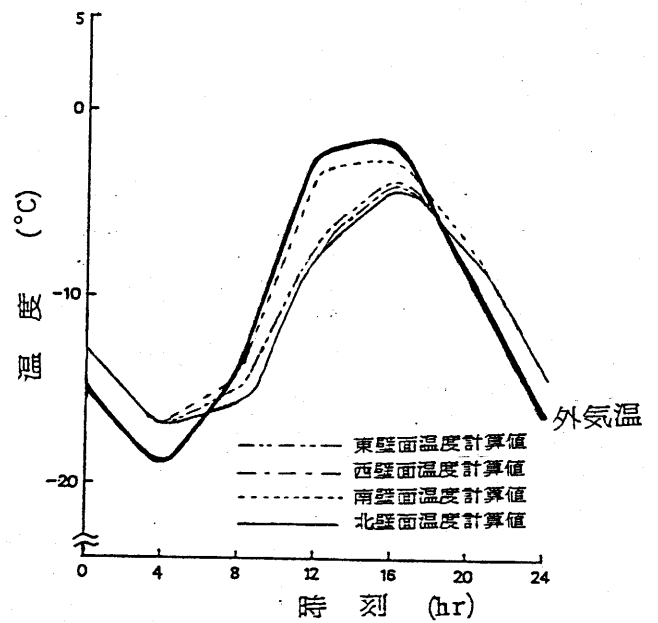


図3・19 内壁面温度と外気温の経時変化
(断熱材なし)

りやや高い傾向を示すが、全般的にはほとんど同様の温度変化を示し、特に図3・18では断熱材の効果が見られて1日の経時変化は小さいことがわかる。

図3・20と3・21には断熱材のある場合のそれぞれ南・北面における内部穀温変化を示した。また図3・22と3・23は、断熱材のないサイロの場合について示した。断熱材のないサイロでは内壁温度は外壁温度とほぼ同じ温度で変動し、内壁より14cm内側の点では北面で貯蔵後10日目、南面では17日目で 0°C に達するのに対し、断熱材を施したサイロでは、内壁温度は貯蔵期間中 0°C 以下にはならない。

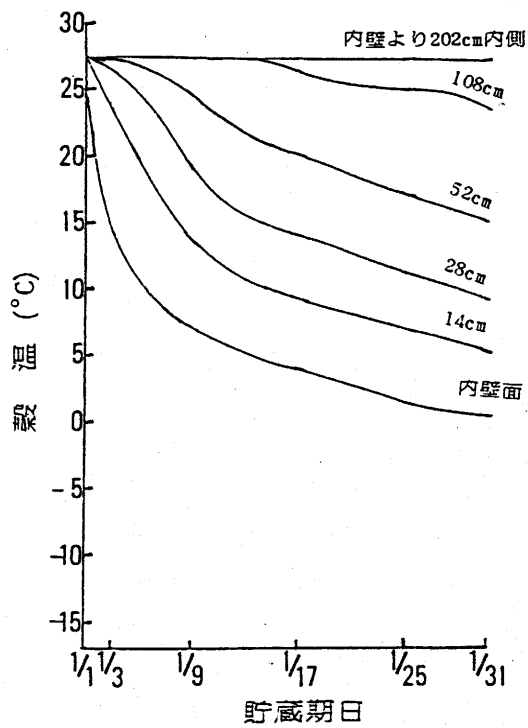


図3・20 南面での穀温変化 (断熱材あり)

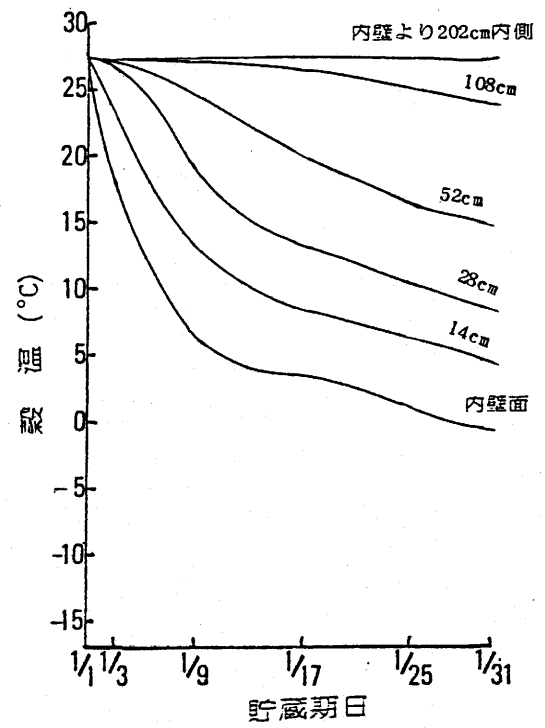


図3・21 北面での穀温変化 (断熱材あり)

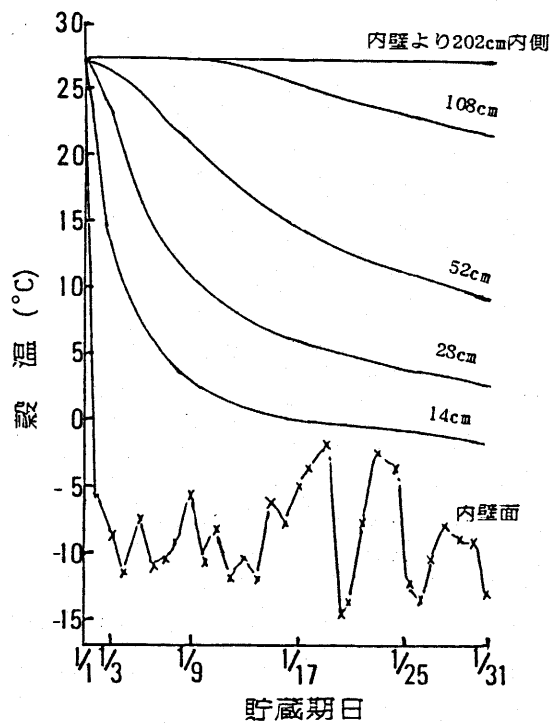


図3・22 南面での穀温変化 (断熱材なし)

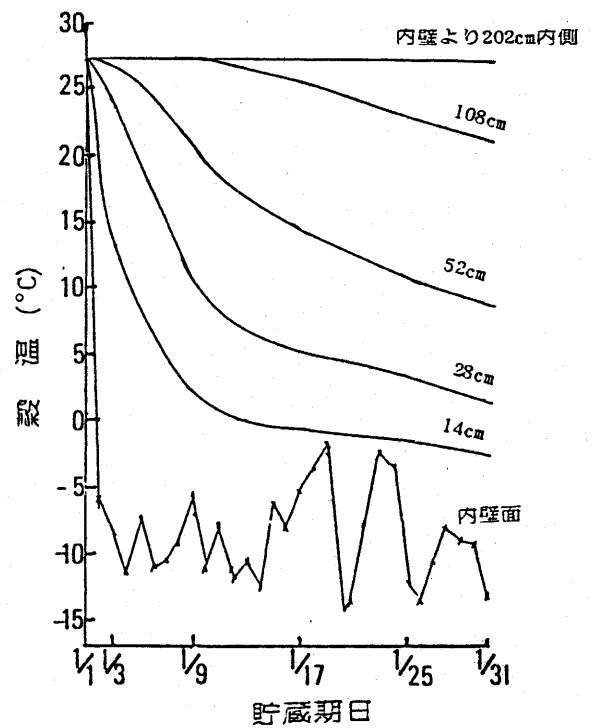


図3・23 北面での穀温変化 (断熱材なし)

断熱材の有無にかかわらず、貯蔵期間の経過とともに穀温は同心円状に低下していくが、内壁より 202cm 内側では 1ヶ月間貯蔵後でもその穀温は一定であることがわかる。

図 3・24 に、断熱材のないサイロでの 1ヶ月間貯蔵後の南面における穀温の経時変化を示した。

内壁温度は外気温と日射の影響を受けて、約 $-18 \sim -2$ の範囲で変化するが、内壁より 14cm 内側になると経時変化はほとんど見られないことがわかる。

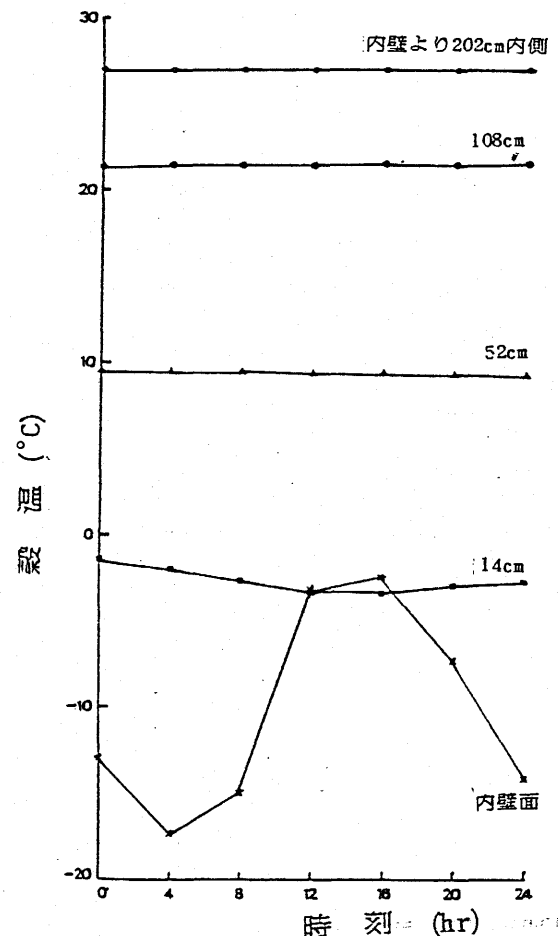


図3・24 南面での穀温の経時変化 (断熱材なし)

3.5 摘要

サイロ貯蔵中のとうもろこしの穀温変動を知るため、数値計算モデルを作成して那覇と釧路の場合について検討した結果、次のような知見を得た。

(1) 那覇において日平均気温 27.6°C , 日最高気温 30.8°C の値を用いてモンテカルロ法により各日別に外気温変動を割振って1ヶ月間貯蔵の計算を行なった結果, 断熱材のないスチールサイロ (熱伝導率 $43.0 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$, 厚さ 5 mm) の内壁面温度は, 外気温と日射の影響を受けて, 西面で $21 \sim 47^{\circ}\text{C}$ の変動があるが, 断熱材を施した場合の内壁面温度はほとんど変化しない。

(2) 釧路においては日平均気温 -6.8°C , 日最高気温 -1.4°C の値を用いて (1) と同様に1ヶ月間貯蔵の計算を行なった結果, 断熱材の施していないスチールサイロ (熱伝導率 $43.0 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$, 厚さ 6 mm) の内壁面温度の日変化は外気温とほぼ同様の変動を示すが, 方位による気象条件の影響は見られない。また貯蔵期間中穀温は同心円状に低下していくが, 1ヶ月間貯蔵後でも内壁から約 2 m 内側での穀温は一定である。

(3) 断熱材を施していないスチールサイロにおいて, 1ヶ月間貯蔵後に気象条件の影響を受けない無次元半径 ($= r/R$, r = 影響を受けない半径, R = サイロ半径) は, 那覇では $0.883 \sim 0.967$, 釧路では 0.514 である。

(4)貯蔵中のとうもろこしの呼吸作用のみの穀温上昇速度と微生物の増殖に伴う穀温上昇速度を比較することにより、貯蔵中の急激な穀温上昇を監視しうる。

(5)サイロ貯蔵中の異常な程度の発熱の要因である穀温上昇は、外気温、日射量などの気象条件によるものではなく、その原因はサイロ内のとうもろこしの呼吸熱およびとうもろこしに付着した微生物の増殖による発熱がほとんどである。

第4章 サイロ頂部における飽和および結露

4.1 緒言

穀温上昇の一因として、とうもろこしの水分が高いことを第2章で示した。第1章で筆者は次の推論をした。すなわち、サイロ内でのとうもろこしの「発熱」は穀物検査規格内に納まっている水分にあっても、この水分上昇を引き起こす物理的現象が生じ、これが引きがねとなって、とうもろこしの呼吸作用や微生物の増殖を促進させる現象である。さらに第3章における数値計算モデルによる計算で考察したとおり、サイロ内壁の温度変動は断熱材を施さないサイロでは非常に大きく、外気温、日射の影響を受けることを知った。また寒冷地においても貯蔵とうもろこしの外気温、日射の影響を受けない範囲は、サイロ中心からの無次元半径にして $0.5/4 \sim 1.0$ であり、大部分が穀温変動しないことを知った。

第2章で述べたとおり、輸入とうもろこしの平均水分は $14.5\% \text{ w.b.}$ 、穀温 29.5°C であった。この状態でのサイロ内空気湿度は HENDERSON ら⁵¹⁾ の次式によれば、

72.7% となる。

$$1 - rh = e^{-c \cdot T \cdot Me^m} \quad \text{----- (4-1)}$$

ただし rh : 平衡相対湿度 (小数表示)

T : 絶対温度 ($^{\circ}K$)

Me : 乾量基準平衡含水率 (% d.b.)

c : 定数 (とうもろこしの場合, $c = 1.98 \times 10^{-5}$)

m : 定数 (とうもろこしの場合, $m = 1.90$)

このような 72.7% という高い相対湿度の状態においては, サイロ内壁面での温度低下があれば, 内壁面ないしはそれに接している穀粒の雰囲気が結露する可能性がある。上述の状態での露点は約 $23.7^{\circ}C$ であり, 数値計算で境界条件を設定した (第3章) 釧路では十分結露する可能性がある。

さらに穀粒そのものからの水分の水蒸気拡散による水分移動量も相当大きいと考えられ, これによる相対湿度の上昇や凝縮すなわち結露が考えられる。

本章ではこの現象が著しく発生しやすいと考えられるサイロ頂部 (ヘッドスペース部) について実験を行ない, 結露量を測定するとともに上記仮説の検

証と，結露量の定量的把握を試みた。

4.2 実験装置および方法

温暖地においてはヘッドスペース部での水蒸気の凝縮が毎日夜間発生し，寒冷地ではとうもろこし表層部からヘッドスペース部への水蒸気移動がおこると考えた。本章では特に寒冷地における水蒸気拡散についての実験を行ない理論式との比較を行なった。

4.2.1 実験装置

図4.1に示すような硬質塩ビ製のモデルサイロ内に，あらかじめ水分を調製したとうもろこしを充填し，これを恒温槽（東和科学，GL-62）で低温度下においた時の，サイロ内での結露，氷結現象を観察し，写真撮影した。また実験中のサイロ

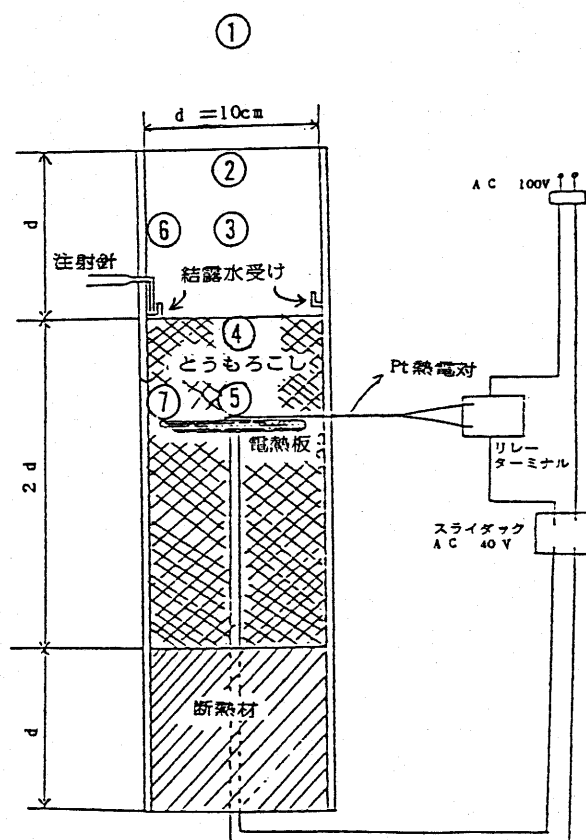


図 4.1 モデルサイロの穀温制御装置の概要と温度測定点（○は測温部）

の内壁面温(②,⑥,⑦), 空気温(⑩), 穀温(④,⑤)をCC熱電対で測定した。なお貯蔵中の穀温を一定に保つために電熱板を用い, スライドックで電圧調整した。

4.2.2 実験条件

主な実験条件を下記に示す。

(1)水分 水分14% w.b. を用いた予備実験では結露量が少なすぎたため, 本実験では精度を高くするため水分33% w.b. のとうもろこしを用いた。

(2)外気温 釧路における冬期平均気温 -6.8°C に設定した。

(3)初期穀温 日本到着時に測定された穀温(米国産)の最高値(32.0°C)に設定した。

実験では貯蔵開始後22時間上記の条件を維持した時と, その後外気温を 30°C に急昇温させた時のモデルサウロ内壁の状態変化を観察した。

4.2.3 結露量の測定

予備実験の結果より, 0°C 以下の外気温では実験開始後内壁面に結露水が氷結し続け, 実験終了後外

気温を 30°C に昇温させた時、氷が融解することになった。従って結露量の測定は外気温を 30°C に急昇温させた時に行なうことにした。またサイロ天井壁に氷結した結露をとうもろこし表層部に滴下させないためにモデルサイロを斜めに置き、傾斜面を伝わって側壁面へ流れるようにし、図4・1に示す側壁面の結露水受けに集め、写真4・4に示すように注射器で吸水しその量を測定した。

4・3 実験結果 および考察

図4・2は実験中のサイロ各部の温度変化を示したものである。

実験期間中、とうもろこし表層部④と表層部より5cm下の発熱部⑤はほぼ一定の温度を示し、それぞれ $13.0 \sim 14.1^{\circ}\text{C}$ 、 $26.7 \sim 28.6^{\circ}\text{C}$ の範囲で変動したが、他の温度は実験開始後約30分で 0°C 以下に達した。

写真4・1と4・2は、実験開始約22時間後のモデルサイロの天井壁および側壁での結露による氷結の状態を示したものである。サイロ天井壁では氷結がっらら状に発達し、側壁ではほぼ膜状凝縮の状態で氷

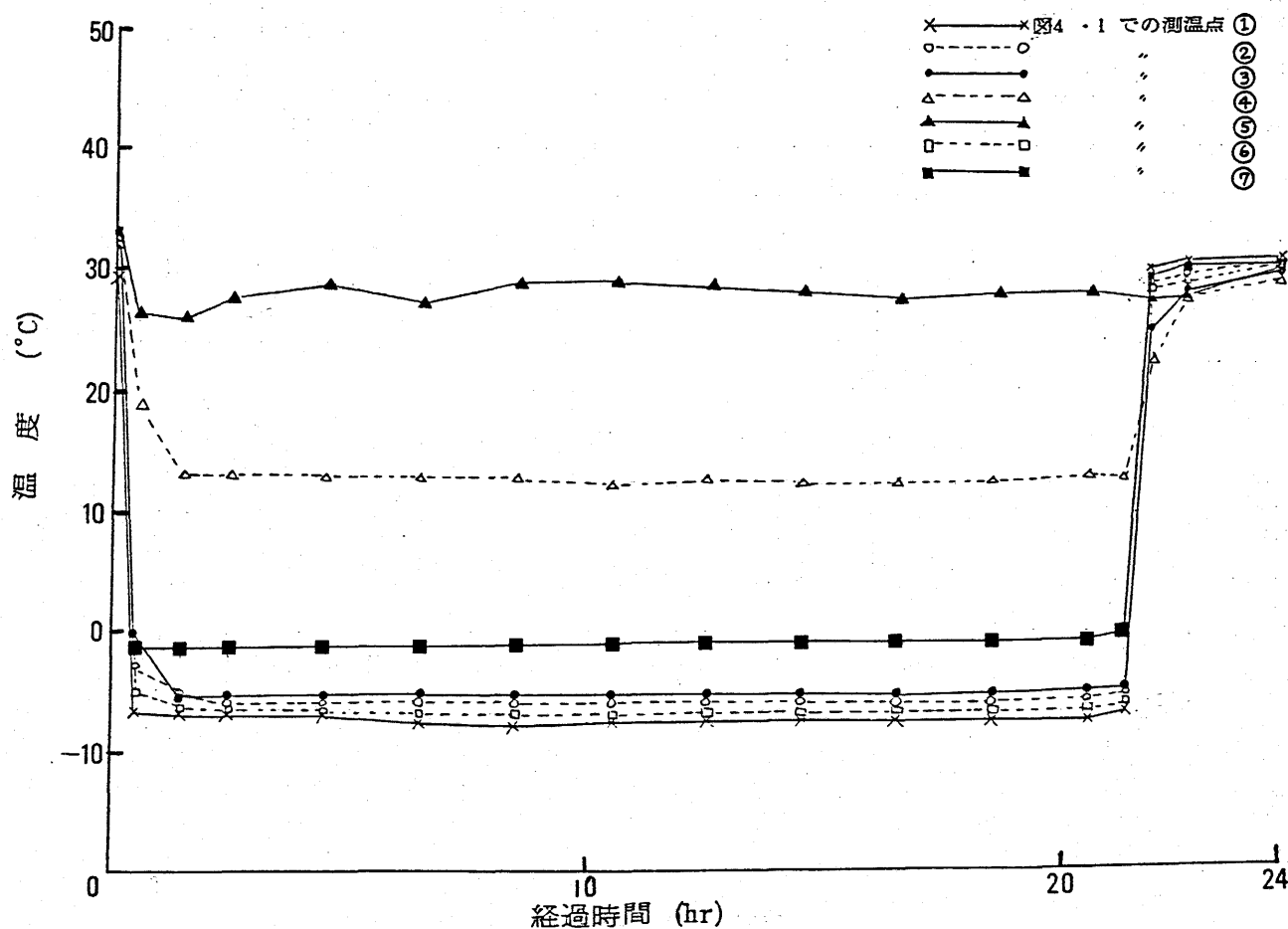


図4・2 モデルサイロ各部の温度変化

結している。写真4・3と4・4は、その後外気温を30℃に急昇温させた時の天井壁と側壁の状態である。

モデルサイロを斜めにあることによりサイロ天井壁での融解水の穀物表層部への滴下量は、ごくわずかであり、他は側壁面へ流れて側壁面で融解した水とともに壁面を伝わって落下して集められた。

以上のことより、貯蔵中に夜間の外気温低下などにより内壁面温度が露点以下に低下すれば、穀物を

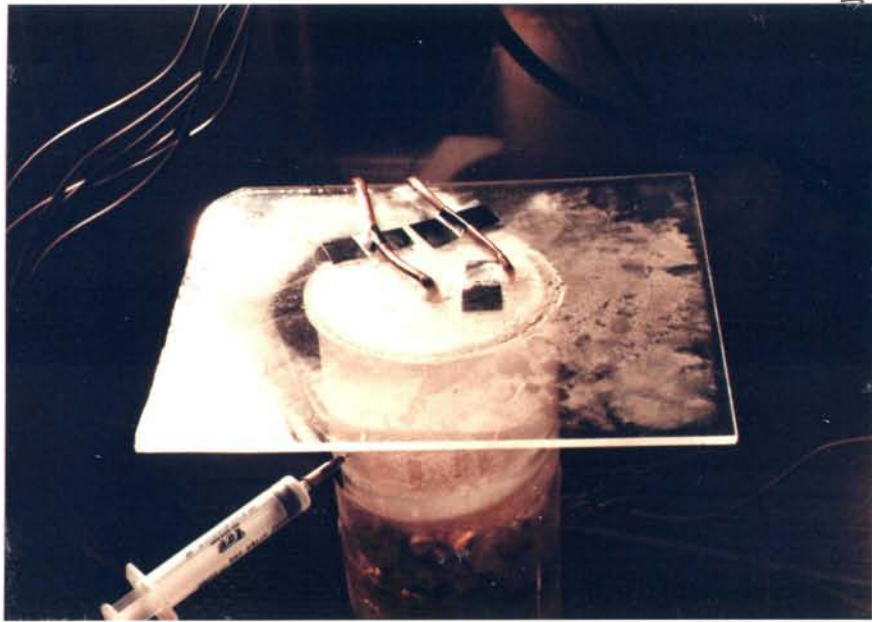


写真4 ・1 モデルサイロのヘッドスペース部での氷結の状態



写真4 ・2 モデルサイロのヘッドスペース部での氷結の状態

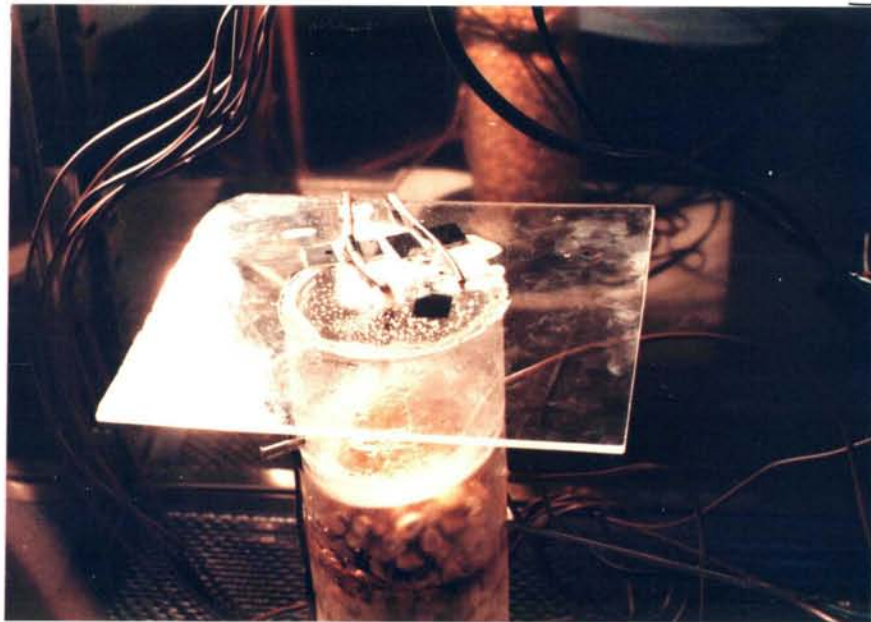


写真4 ・ 3 モデルサイロのヘッドスペース部の氷が融解した状態



写真4 ・ 4 モデルサイロのヘッドスペース部の結露量の測定

搬入した時に閉じ込められた空気は、容易に結露することかわかる。また内壁面温度が上昇すれば、逆に壁面に付着した氷が融解し穀物表層部への滴下により表層部の水分を増加させる可能性がある。さらには表層部での微生物増殖を引きおこし、結果的には腐敗による品質劣化、穀温上昇という事態をまねくと考えられる。

実際の例として、北海道地区で冬期に腐敗や穀温上昇といった事故が発現しているが、これはサイロ内壁温度やヘッドスペース部内空気温度が露点以下に低下して、結露するためであると推測される。

また本実験で生じた結露を注射器で計量した結果、結露量は $1.5(g/22\text{hr})$ であった。モデルサイロのヘッドスペース部容積に対して結露量が非常に大きいのは、単に空気冷却による結露量ではなく、とうもろこしからの水蒸気拡散によるものが含まれているからである。この水蒸気拡散による結露量の計算については、次節で検討する。

4.4 サイロ頂部での結露の計算

本章では実験で得られた結露量に対して次の2つの計算法を検討した。

4.4.1 水蒸気の凝縮による結露量の計算

一般に空気がその露点温度以下に冷却された時、水蒸気の凝縮を生じ水滴を見る。これが結露でありその量は冷却前後の絶対湿度の差を用いて次式で表わされる。⁵²⁾

$$m_1 = V (x_1 - x_2) \quad \text{----- (4-2)}$$

ただし m_1 : 結露量 (kg) V : 空気量 (kg)

x_1 : 冷却前の空気の絶対湿度 (kg/kg')

x_2 : 冷却後の空気の絶対湿度 (kg/kg')

しかし (4-2) 式を用いて表 4.1 に示した本実験条件での結露量を計算すると $m_1 = 0.0277 \times 10^{-3} \text{ (kg)}$ となり、測定値 $1.5 \times 10^{-3} \text{ (kg)}$ よりかなり小さい値であることがわかる。これは容器内の空気が 1 回の冷却によって生じた結露量であるからである。実際の現象には、とうもろこし表層面から水蒸気がヘッドスペース部 (図 4.1 の ③) へ拡散し水蒸気が移動していると考え必要がある。

次に水蒸気拡散による結露量の計算について述べる。

表 4.1 実験条件

V (kg)	x_1 (kg/kg')	x_2 (kg/kg')
9.24×10^{-4}	0.0325	0.0025

4.4.2 水蒸気拡散による結露量の計算

圧力 P (kg/m^2) のサイロ内では、ドルトンの分圧の法則より次式が成り立っている。

$$P = P_a + P_v \quad \text{----- (4-3)}$$

ただし P_a : 空気の分圧 (kg/m^2)

P_v : 水蒸気分圧 (kg/m^2)

サイロ内壁面の水蒸気圧を P_{vs} (kg/m^2)、ヘッドスペース部の穀物表層部の水蒸気圧を P_{vg} (kg/m^2) とし、今密閉容器での P_{vs} は常に飽和している状態を考える。この密閉容器内の水蒸気移動過程を常法にしたがって等温過程とすると、圧力勾配は次式のとおりの蒸気拡散流速 v (m/hr) に比例するという STEFAN の考⁵³⁾え方が援用できる。

$$-\frac{dP_v}{dl} = C \cdot \gamma_a \cdot v \quad \text{----- (4-4)}$$

ただし l : ヘッドスペース部の高さ (m)

C : 定数 (hr/m)

γ_a : 空気密度 (kg/m^3)

また連続の式より水蒸気の移動量 Q_w (kg/hr) は,

$$Q_w = A \cdot \gamma_v \cdot v \quad \text{----- (4-5)}$$

ただし A : 拡散する表面積 (m^2)

γ_v : 水蒸気密度 (kg/m^3)

(4-4) 式を (4-5) 式に代入して,

$$Q_w = - \frac{A \cdot \gamma_v}{c \cdot \gamma_a} \frac{dP_v}{dl} \quad \text{----- (4-6)}$$

気体の状態式より,

$$P_a = \frac{\gamma_a}{M_a} R T \quad \text{----- (4-7)}$$

ただし M_a : 空気分子量 (kg/kmol)

R : 気体定数 ($(\text{kg}/\text{m}^2) \text{m}^3/\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}$)

T : 表層部絶対温度 ($^\circ\text{K}$)

これを (4-6) 式に代入して変形する (付録4参照) と,

$$Q_w = - \frac{A \cdot M_a \cdot P}{R \cdot T} \frac{1}{P - P_v} \cdot D \frac{dP_v}{dl} \quad \text{----- (4-8)}$$

ここで D (m^2/hr) は水蒸気拡散係数であり, 次式で表わされる。

$$D = \frac{\gamma_v (R \cdot T)^2}{M_a^2 \cdot c \cdot P} \quad \text{----- (4-9)}$$

(4-8) 式を境界条件 ($l=0$ で $P_v = P_{vg}$, $l=l$ で $P_v = P_{vs}$) を用いて解くと,

$$Q_w = \frac{A \cdot Ma}{R \cdot T} D \frac{P}{l} \ln \left(\frac{P - P_{vs}}{P - P_{vg}} \right) \text{----- (4-10)}$$

また, この状態が Δt (hr) 続いた時の結露量 m_2 (kg) は,

$$m_2 = Q_w \cdot \Delta t \text{----- (4-11)}$$

これらの式はサイロ壁面が露点に達し P_{vs} の水蒸気圧をとるものと考えているが, 壁面での水の状態は相変化を生じ蒸気から水ないし氷の固・液系への変化をする。したがって露点に達した水の状態が液状であれば P_{vg} の変化のない限り結露は定常状態となる。

固体すなわち氷結の場合には P_{vg} および (4-4) 式の定数 C の変化が予想されるが, ヘッドスペース部の容積に対してサイロ内穀物容積が極端に大きいので, 貯蔵期間とサイロ内穀物水分量を勘案するとほぼ一定と見なしてよいと考えられる。

寒冷地においては, ヘッドスペース部の内壁面および天井部の温度は 0°C 以下となり, とうもろこし表層部はそれより高いので, $P_{vg} > P_{vs}$ である。こ

めときの水蒸気の移動状態は，表層部からヘッドスペース部へ方向である。

逆に温暖地などでとうもろこし表層部の温度よりヘッドスペース部の空気温度が高くて $P_{vg} < P_{vs}$ となった場合は，ヘッドスペース部から表層部へ水蒸気が移動し，結果的にとうもろこしの吸湿を招くことになる。

(4-10) 式に表4.2に示す実験条件を代入し，水蒸気移動量 Q_w を計算すると， $Q_w = 4.181 \times 10^{-5} \text{ (kg/hr)}$ となる。

表4.2 モデルサイロの実験条件

A (m^2)	Ma (kg/kmol)	R ($\text{kg}\cdot\text{m/kmol}\cdot^\circ\text{K}$)	T ($^\circ\text{K}$)	D ⁵⁴⁾ (m^2/hr)	P (kg/m^2)	l (m)	Pvs (kg/m^2)	Pvg (kg/m^2)
7.859×10^{-3}	28.79	847.9	286	0.0396	1.033×10^4	10×10^{-2}	40.788	152.280

実験期間中この移動量が維持されていたと考えられるので，この Q_w の値に実験時間 ($\Delta t = 22 \text{ hr}$) を乗じて総拡散量すなわち結露量 m_2 を計算すれば，前述した空気の凝縮による (4-2) 式での結露量 ($0.027 \times 10^3 \text{ kg}$) と比較して，測定

値 $1.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ とより近似している。したがって、寒冷地においてヘッドスペース部のサイロ内壁温が極端に低い場合は、とうもろこし表層部から拡散した水蒸気が結露していることが理論的に裏付けされた。

4.5 日本各地における結露量の計算

図4.3 に計算のためのサイロの寸法を、表4.3 には各地の気象条件を示した。

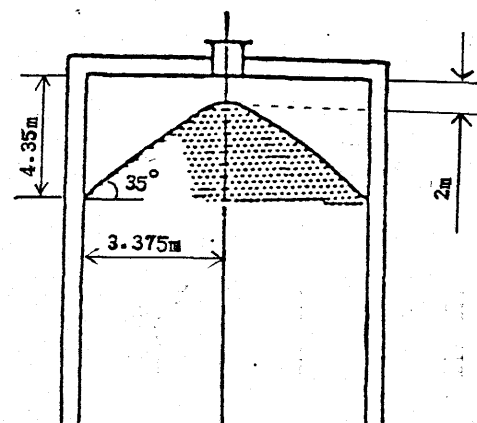


図4.3 サイロ寸法

表4.3 各地の気象条件

位 置	ヘッドスペース部の空気量 (kg)	日平均気温 (°C)	日最高気温 (°C)	日最低気温 (°C)	月平均湿度 ⁵⁰⁾ (%)
釧路 ⁵⁰⁾ (1月)	153.6	-6.8	-1.4	-12.9	73
岡山 ⁵⁰⁾ (7月)	153.6	25.8	30.2	22.3	81
那覇 ⁵⁰⁾ (7月)	153.6	27.9	31.2	25.3	82

4.5.1 寒冷地での結露

寒冷地においてはヘッドスペース部の内壁温度が低く，内壁面での水蒸気圧 P_{ws} は極端に小さい。しかしサイロ内のとうもろこし穀温は高く，表層部での水蒸気圧 P_{wg} は大きい。したがって $P_{wg} > P_{ws}$ となり，(4-10)式に示す水蒸気拡散がおこっていると考ええる。

ここで特に考えねばならないのは，サイロ内のとうもろこし表層部はヘッドスペース部の冷気と接触することによる穀温低下があることである。その温度 (θ_2) は，ヘッドスペース部の空気温度 (θ_1) と，一定とみなされるとうもろこしの代表温度 (θ_3) とに関係し，次式で表わされる⁴⁷⁾。

$$\theta_2 = 2 p_g \left\{ \theta_3 + u \cdot \theta_1 + \left(\frac{1}{2 p_g} - u + 1 \right) \theta_2 \right\} \quad \text{----- (4-12)}$$

$$\text{ここで } p_g = D_g \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad \text{----- (4-13)}$$

$$u = \frac{\alpha}{\lambda_g} \Delta x \quad \text{----- (4-14)}$$

ただし D_g : とうもろこしの温度伝導率 (m^2/hr)

Δt : 時間刻み (hr)

Δx : 表層部から θ_3 までの距離 (m)

α : 表層部での自然対流熱伝達率 ($kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$)

λ_g : とうもろこしの熱伝導率 ($kcal/m \cdot hr \cdot ^\circ C$)

なお $\theta_1 \sim \theta_3$ の $t = t + \Delta t$ および $t = t$ については, 前述 (3.2.1) と同様である。

いま θ_1 を釧路の 1 月の平均気温 $-6.8^\circ C$, θ_3 を入港時の平均穀温 $26.9^\circ C$, $D_g = 3.778 \times 10^{-4}$ (m^2/hr)⁴⁸⁾, $\Delta t = 0.1$ (hr), $\Delta x = 1$ (m), $\alpha = 4$ ($kcal/m^2 \cdot hr \cdot ^\circ C$)⁴⁹⁾ とし θ_2 の経時変化を求めると図 4.4 のようになる。

従って (4-10) 式より結露量を求めるとき, 表層部の穀温が変化することによって表層部水蒸気圧 P_{vg} も変化することになる。ここでは貯蔵開始後 10 時間毎の θ_2 の平均を求め, その時の P_{vg} を用いて結露

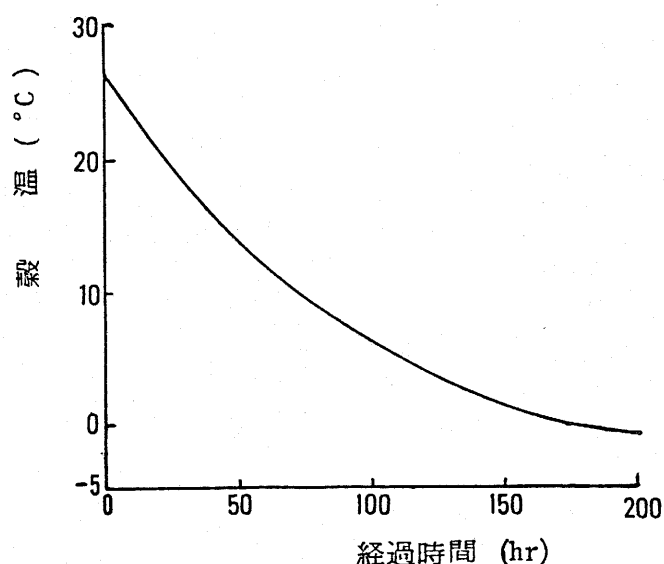


図 4.4 釧路でのとうもろこし表層部温度 θ_2 の経時変化

量の変化を求めた。表4・4にその結果を示す。結露量は貯蔵後200時間で1.542 kg に達する。

表4・4 水蒸気拡散による結露量の計算結果

経過時間 (hr)	表層温度 (°C)	表層部での 水蒸気圧Pvg (kg/m ²)	結露量 (kg/10hr)	累積結露量 (kg)
1~ 10	25.7	301.8	0.217	0.217
11~ 20	22.2	274.6	0.197	0.414
21~ 30	19.5	228.4	0.161	0.576
31~ 40	17.1	201.2	0.139	0.714
41~ 50	14.9	176.7	0.119	0.833
51~ 60	13.0	152.3	0.100	0.933
61~ 70	11.2	136.0	0.086	1.019
71~ 80	9.6	121.0	0.074	1.093
81~ 90	8.2	114.2	0.069	1.162
91~100	6.9	106.0	0.062	1.224
101~110	5.7	91.1	0.049	1.273
111~120	4.6	78.9	0.039	1.312
121~130	3.7	76.1	0.036	1.348
131~140	2.8	74.8	0.035	1.383
141~150	2.1	72.1	0.033	1.416
151~160	1.4	58.0	0.031	1.447
161~170	0.7	65.3	0.027	1.474
171~180	0.1	62.5	0.025	1.499
181~190	-0.4	59.8	0.023	1.522
191~200	-0.8	57.1	0.020	1.542

4・5・2 夏期の岡山での結露

気象条件およびとうもろこし表層部については、次のように考える。

①サイロ内の空気状態は、4・1で述べたように入港時のとうもろこし水分14.5% w.b. 穀温 29.5°C のとき、(4-1)式によると相対湿度72.7%である。

②とうもろこしの穀温は7月の日平均気温とほぼ同じであるので、第3章の結果より貯蔵期間中の表層部の温度は変動しない。

③曇天では壁面温が上昇せず結露しやすい状態となり、晴天で日射により壁面温が上昇する場合でも、その範囲はサイロ全周に比べて非常に小さいので、ヘッドスペース部の内壁面温度の日変化は、外気温の日変化と同じである。

ヘッドスペース部内壁面の温度変化にともなう空気状態の変化範囲は、図4・5に示すとおりである。図4・5に示すとおり夏の岡山にお

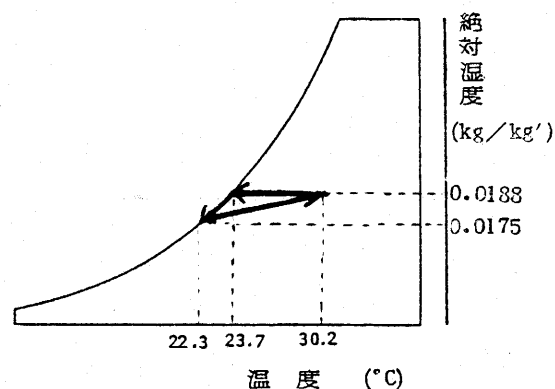


図 4・5 岡山のサイロ内ヘッドスペース部の空気状態変化範囲

いても露点 23.7°C 以下の 22.3°C まで低下し、結露を生じることがわかる。

この状態での一日あたりの結露量は、(4-2)式によると 0.2 kg となる。

4.5.3 那覇での結露

考え方は図4の場合と同様である。

那覇の気象条件(表4.3)では、最低気温が内壁面での露点以下に低下しないので、図4.6に示すとおり結露は生じない。

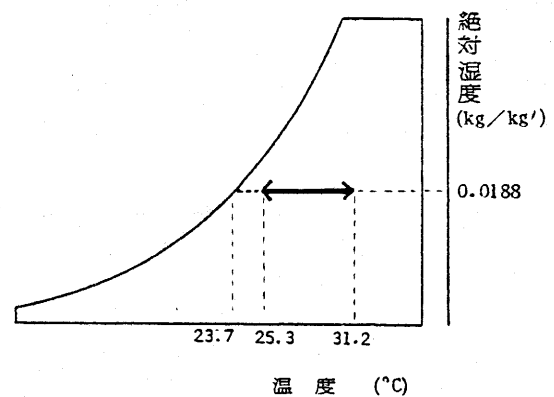


図4・6 那覇のサイロ内ヘッドスペース部の空気状態変化範囲

4.5.4 貯蔵中の水分増加

(1) P_{rs} が一定で結露状態が持続する場合

寒冷地では、(4-10)式においてとうもろこしの表層部の初期穀温 θ_2 が高いほど Q_w は小さくなるが、 θ_2

が高くなることにより $(P - P_{wg})$ の値は小さくなり、結果的には結露量 Q_w は大きくなる。サイロ内壁面の結露による氷結が内壁面温度の上昇により融解した場合は、とうもろこし表層部へ落下し物理的に水分が増加することになる。結露しなくても、ヘッドスペース部内で相対湿度の高い状態が続くことにより、とうもろこしが吸湿し、その水分が増加することが考えられる。寒冷地では貯蔵中の表層部温度は図4・3に示すとおり低下する。簡単のため穀温を初期穀温の半分 (13.5°C)、空気相対湿度を 90% とする状態が維持されているとする。この状態では (4-1) 式 によると、とうもろこしの水分は $19.1\% \text{ w.b.}$ となる。1・2・2 で述べたように、貯蔵開始時の水分 $14.5\% \text{ w.b.}$ から $19.1\% \text{ w.b.}$ ままで増加すると、微生物の増殖が盛んになり、これがひきかねとなって寒冷地でも微生物増殖による腐敗事故が発生することが考えられる。

(2) サイロ内壁面の水蒸気圧に日変化のある場合

温暖地ではサイロ内壁面が露点以下まで低下しない気象条件では、結露は生じない。しかし夜間は内壁温度の低下により相対湿度の高い状態となる。

こしが貯蔵期間中くり返されると、とうもろこしが吸湿し水分増加を引き起こす。

今那覇で図4・5の空気状態変化において、日最低気温25.9℃の時は相対湿度88%であり、この状態が貯蔵期間中持続されているとする。この場合の水分は(4-1)式より18.1% w.b.であり、微生物の増殖しやすい状態であることがわかる。

結露防止の対策としては、全般的にはヘッドスペース部の水蒸気が飽和しないように常に換気することが考えられるが、その換気法については第6章で検討する。

4・6 摘 要

微生物増殖の要因である水分増加を引き起こすサイロ内のヘッドスペース部での結露現象を、塩ビ製の透明モデルサイロ(内径10cm)を用いて実験的に把握した。モデルサイロ内にとうもろこしを充填し、表層部温度を13.0~14.1℃、外気温を-6.8℃としたときの内壁面での結露状態を観察した結果、サイロ天井壁では結露による氷結がっらら状に発達し、側壁

ではほぼ膜状凝縮の状態が氷結することがわかった。その後外気温を 30°C まで急昇温させて結露量の測定を行ない、とうもろこし表層部から水蒸気拡散による水分供給の あることが確かめられた。

これをもとにして定量的な計算を試み、条件を寒冷地と温暖地に分けてそれぞれの結露量を検討した。その結果は次のとおりである。

(1) 寒冷地においては、貯蔵開始後とうもろこし表層部の穀温が低下し続け、それにともない結露量も経時的に減少するが、その量は表層部からヘッドスペース部への水蒸気拡散式を用いて計算できる。

(2) 温暖地においては、日最低気温が露点以下に低下する気象条件の時に結露が生じる。結露が生じない場合でも、相対湿度のかなり高い状態が持続する。

(3) 結露状態が持続すると水分は物理的に増加し、相対湿度の高い状態が持続すると吸湿により平衡水分が増加する。このことは微生物増殖の要因となる。

第 5 章 とうもろこし貯蔵時の発熱におよぼす 微生物増殖の影響

5.1 緒 言

とうもろこしのサイロ貯蔵時にしばしば起こる発熱の原因には、第 1 に微生物増殖による発熱、第 2 に穀物自体の呼吸熱、第 3 に昆虫の呼吸熱、第 4 に日射等による外壁面からの熱伝播などが挙げられる。

第 4 章で検討したとおり、サイロのヘッドスペース部では結露現象が起こり、穀物表層部に落下して吸湿し、みかけの水分を上昇させる可能性が十分ある。さらにヘッドスペース部の空気の相対湿度が高くなることにより平衡水分が増加し、結果的に微生物増殖を促進させる環境を生成することを知った。

これらとうもろこしの水分増加や微生物増殖は、とうもろこしの呼吸作用や微生物の基質分解作用を促進させ、その結果とうもろこしを発熱させる。穀温が上昇すればさらに微生物の増殖を促進させることになるので、発熱は加速度的に進むことが考えられる。発熱したとうもろこしは、発芽、微生物による

腐敗および黒変の状態になる。

本章ではサイロ内の物理的現象より水分増加させたとうもろこしの発熱現象や反応定数を実験的および理論的に解析し，さらに微生物のコロニー増殖率との関係を検討することを試みた。

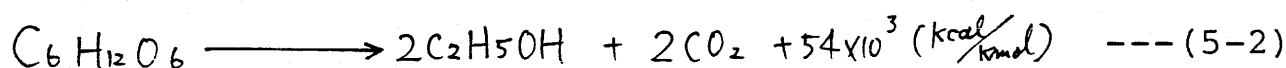
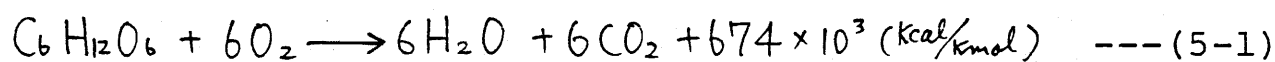
なお供試とうもろこしを表面殺菌し(p89参照)，表面着生微生物の影響を除外した実験を行ない，呼吸熱による発熱と無処理とうもろこしにおける微生物増殖による発熱の定量的な比較を試みた。ここで言う表面殺菌とはとうもろこし表面に付着している微生物を処理することであり，穀物内部に存在する微生物は影響しないものとする。さらに菌数の測定は，特定の菌に限定せず標準寒天培地に生育したコロニー数を総菌数とする生菌計数法^{56)~58)}によった。

5.2 理 論

一般に農産物の呼吸源として用いられるのは，炭水化物，特にグルコース($C_6H_{12}O_6$)によるものが主体である⁷⁾¹⁰⁾⁵⁹⁾。糖が呼吸作用によって CO_2 と H_2O に分解される過程は50以上¹⁰⁾のものばる多数の反応段階からなるもので，そのほとんどすべてが酵素によ

って触媒される。

この過程は炭水化物のおもな代謝過程であり，酸素の有無により好氣的過程（有気呼吸，酸化反応ともいう）と嫌氣的過程（無気呼吸，分解反応ともいう）に分けられ，グルコースの場合はそれぞれ次式で⁷⁾¹⁰⁾表わされる。



ここでは，サイロ内で発熱したとうもろこしが微生物に汚染されていることや，発熱速度が異常に大きいことなどにより，(5-1)式の好氣的過程による発熱であるという考え方を立てて検討した。

厳密には微生物増殖時の基質分解熱と，穀物自身の呼吸熱が複合していると考えられるが，いずれの場合でもその反応は(5-1)式にもとづいているので，本章では(5-1)式における反応について検討した。

5.2.1 仮定の導入

本研究では断熱密閉容器内におけるとうもろこし

の発熱現象を合理的にとらえるために、以下の仮定を導入した。⁶⁰⁾

① 断熱密閉容器内のとうもろこしの温度上昇が生じる所では、空気や水蒸気の流入、流出はなく、かつ断熱された状態である。

② 容器内に充填されたとうもろこしの空げきや穀物表層部上に残された空気により、穀物内に含まれる糖が酸化反応を引起こして発熱する

③ 糖の酸化反応は化学反応速度論に基づき、二次反応によるものとする。

④ 穀温の上昇過程において、穀物とその周囲の空気温上昇には相対的時間遅れがないものとする。

⑤ 穀物自体の呼吸熱と微生物増殖による基質分解熱は、ともに糖の酸化反応として考え、こゝらを区別しない。

5.2.2 好気性反応式 (糖の酸化反応式)

いま断熱密閉容器内に、グルコース ($C_6H_{12}O_6$) と酸素がそれぞれ a , b ($kmol/m^3$) だけ存在しているとす。仮定③よりグルコースの酸化反応は二次反応

と考えるので, (5-1) 式においてグルコースが X (kmol/m^3) だけ反応した時の CO_2 の増加速度は次式 (5-3) で表わされる。(以下本章でいう「糖」とはグルコースをさす)

$$\frac{dX}{dt} = k_2 (a - X) (b - bX) \quad \text{----- (5-3)}$$

ここで t は時間 (hr), k_2 は 2 次反応定数 (hr^{-1}) と呼ばれるもので, 穀温を一定にして測定した場合, 穀物の絶対温度 (T_s) の逆数に比例することが知られている。すなわち, 糖の酸化反応が仮定②のとおりに進むとすれば, 2 次反応定数 k_2 は次式に示すアレニウス (ARRHENIUS) 式で示される。

$$k_2 = \gamma \cdot \exp(-K/T_s) \quad \text{----- (5-4)}$$

ここに γ, K : 実験定数

また貯蔵中の糖の消費量 X は, 穀物の単位体積当りの見かけの熱容量 ($\text{kcal}/^\circ\text{K} \cdot \text{m}^3$) を β , 糖の発熱量 (グルコースでは $674 \times 10^3 \text{ kcal}/\text{kmol}$) を q , 穀物初期温度を T_{si} ($^\circ\text{K}$), X だけ反応した時の穀物を T_{sx} ($^\circ\text{K}$) とすると次式で与えられる。

$$X = \frac{\beta}{q} (T_{sx} - T_{si}) \quad \text{----- (5-5)}$$

また穀物の発熱熱量 Q (kcal) は, 断熱密閉容器の容積を V (m^3) とすると, 次式で与えられる。

$$Q = q \cdot V \cdot X \quad \text{----- (5-6)}$$

(5-6) 式を糖の反応量 X で微分すると,

$$\frac{dQ}{dX} = q \cdot V \quad \text{----- (5-7)}$$

(5-7) 式に微小時間を入れて変形すると,

$$\frac{dQ}{dt} = q \cdot V \frac{dX}{dt} \quad \text{----- (5-8)}$$

一方断熱密閉容器内の生体温度上昇は, 仮定①, ④にもとづいて,

$$\frac{dQ}{dt} = \{ \alpha_s \cdot \rho_b \cdot V + \alpha_a \cdot V (\rho_s - \rho_b) \cdot \rho_a / \rho_s \} \frac{dT_s}{dt} \quad (5-9)$$

ただし, α_a : 空気の比熱 ($kcal/kg \cdot ^\circ K$)

α_s : 穀物の比熱 ($kcal/kg \cdot ^\circ K$)

ρ_a : 空気の比重量 (kg/m^3)

ρ_b : 穀物の見かけの比重量 (kg/m^3)

ρ_s : 穀物の真比重量 (kg/m^3)

(5-8), (5-9) 式より, dQ/dt を消去して次式を得る。

$$\frac{dT_s}{dt} = (q/\beta) \frac{dX}{dt} \quad \text{----- (5-10)}$$

ここで β は穀物の見かけの熱容量 ($\text{kcal}/^\circ\text{K} \cdot \text{m}^3$) で, 次式で与えられる。

$$\beta = \alpha_s \cdot \beta_s + \alpha_a (\rho_s - \rho_h) \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad \text{--- (5-11)}$$

(5-10) 式に (5-3) 式を代入して整理すると, 穀温の経時変化を求める次式を得る。

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q}{\beta} k_2 (a-X)(b-bX) \quad \text{----- (5-12)}$$

これはまた (5-4) 式より次式となる。

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q}{\beta} \gamma \exp(-K/T_s) (a-X)(b-bX) \quad (5-13)$$

本研究では γ , K , a は未知で, b のみが既知の場合の温度予測を試みているので, 断熱密閉容器内の穀温の経時変化より, γ , K , a を求めることにした。次にその方法について述べる。

5.2.3 実験定数 γ , K の算出方法¹⁾

いま初期穀温を2つの異なった温度 T_{s11} , T_{s12} に設定し, 前者を高温区, 後者を低温区 (従って $T_{s11} > T_{s12}$) と称して区別する。

また試料を充填した一対の断熱容器内の糖のモル数 (a) および酸素のモル数 (b) が各々等しく, 糖の反応量 (X) を初期時間 $t=0$ のとき $X=0$ とすれば, 高温区および低温区の温度上昇速度は, (5-13) 式により次のように表わされる。

$$\frac{dT_{s11}}{dt} = \frac{q}{\beta} \cdot \gamma \cdot \exp(-K/T_{s11}) \cdot a \cdot b \quad (5-14)$$

$$\frac{dT_{s12}}{dt} = \frac{q}{\beta} \cdot \gamma \cdot \exp(-K/T_{s12}) \cdot a \cdot b \quad (5-15)$$

ここで $y_{11} = dT_{s11}/dt$, $y_{12} = dT_{s12}/dt$ とおいて, (5-14), (5-15) 式より K について整理すると, 次式を得る。

$$K = \frac{\ln(y_{12}/y_{11})}{(1/T_{s11} - 1/T_{s12})} \quad \text{-----} (5-16)$$

また貯蔵中に反応する糖のモル数 (a) は, (5-1)

式より反応する酸素のモル数 (b) の $\frac{1}{6}$ であるので、初期の糖のモル数は次式で与えられる。

$$a = \frac{1}{6} b \quad \text{----- (5-17)}$$

次に γ の求め方について述べる。

(5-17) 式を (5-12), (5-13) 式に代入して整理すると、

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{g}{6\beta} k_2 (b - bX)^2 \quad \text{----- (5-18)}$$

あるいは

$$\frac{dT_s}{dt} = \alpha \cdot \exp(-K/T_s) (b - bX)^2 \quad \text{--- (5-19)}$$

$$\text{ここで} \quad \alpha = \frac{g \cdot \gamma}{6\beta} \quad (= \text{const}) \quad \text{----- (5-20)}$$

いま実験開始 t_x 時間後の穀温が T_{sx} であるとするれば、 t_x は (5-19) 式を積分して次式より求められる。

$$t_x = \frac{1}{\alpha} \int_{T_{si}}^{T_{sx}} \left[\frac{1}{\exp(-K/T_s) \left\{ b - (T_s - T_{si}) \frac{\beta}{g} \right\}^2} \right] dT_s \quad (5-21)$$

これより、

$$\alpha \cdot t_x = \int_{T_{si}}^{T_{sx}} \left[\frac{1}{\exp(-K/T_s) \left\{ b - (T_s - T_{si}) \frac{\beta}{g} \right\}^2} \right] dT_s \quad (5-22)$$

(5-22)式の右辺を求めた結果も y とすると, y は次式で表わされ, 此れより γ を求める(5-24)式を得る。

$$y = \alpha \cdot t_x = \frac{g \cdot \gamma}{6\beta} t_x \quad \text{----- (5-23)}$$

$$\therefore \gamma = \frac{6\beta}{g \cdot t_x} y \quad \text{----- (5-24)}$$

5.3 実験装置 および方法

5.3.1 断熱密閉容器

実験装置の概要を図5.1に示す。容器は2個で対とし, 一方を高温区(室温), 他方を低温(冷蔵庫に設置)とした。容器は円筒形で上部と下部には厚さ7.5cmの断熱材(発泡スチロール)を設置し, 側面には外側からグラスウールを巻きつけて外気温度の影響をなくした。この容器の奥容積は, 0.025 m^3 で塩化ビニール製である。容器の中心部と内壁面にはCC熱電対($0.32 \text{ mm}\phi$)を設置し, 両者の温度が一致するようにリレー装置をオン・オフ作動させて, 容器外壁面に貼りつけた帯状発熱体(エレクトロラップ)に電流を流すことにより, 外部から断熱状態を保った。

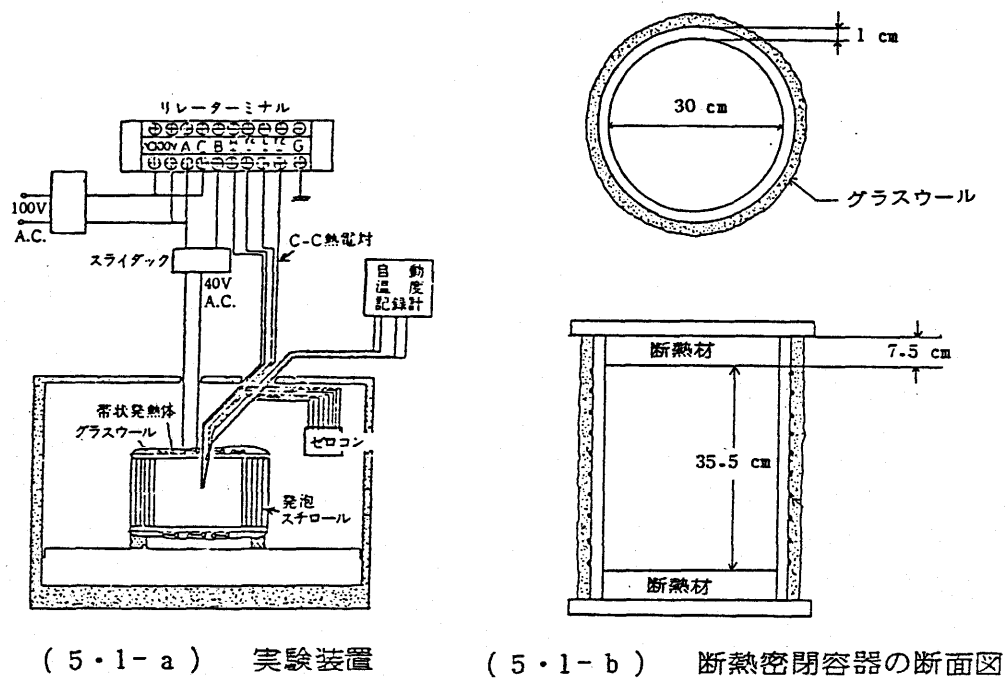


図5・1 実験装置の概要

これらの温度変化は供試材料の穀温と同様に温度記録計（CHINO, PROCOS-V）で記録した。なお穀温は容器の中心部を代表点として，断熱状態が良好に保たれているかを確認するために，内壁面，底部にもCC熱電対を設置して測定した。

5・3・2 供試材料

実験には中華人民共和国産のとうもろこしを用いた。実験開始時の水分は，13～33% w.b. の範囲で調

製した。初期穀温については、高温区は外気に放置し、低温区は冷蔵庫内に放置して穀温が一定になったものを用いた。

5.3.3 表面殺菌処理

本研究では微生物の増殖の影響を知ることがひとつの目的であるので、次亜塩素酸ナトリウム(NaClO)を用いて試料を表面殺菌した実験区(以下殺菌区と略記する)と、表面殺菌しない微生物増殖区の二通りを設定した。以下に表面殺菌処理法について説明する。

- ① 洗剤 (CLEAN 99L, 寺内ケミカル) で試料をよく洗う。
- ② 水洗する。
- ③ エチルアルコール 70% 溶液に 15 分間浸す。
- ④ 次亜塩素酸ナトリウム 10% 溶液に 5~6 分浸す。
- ⑤ 滅菌水で水洗する。
- ⑥ 所定の水分まで乾燥させる。

なお微生物増殖区については、洗浄後室内に 4~10 日放置したものを用いた。

5.3.4 実験方法

図 5.2 に実験の手順を示す。麻袋から取出したとうもろこしは、粉じんやきょう雑物が混在しているので低水分での実験でも洗浄したものを供試し、これを所定の水分に調製した。サンプリングは貯蔵開始直前に行ない、水分の測定および供試材料の菌数（コロニー数）を測定した後、実験に供した。貯蔵中は穀温の測定を行ない、穀温が上昇しなくなった後3時間経過しても一定である時を貯蔵終了とし、実験後の水分、コロニー数の測定を行なった。

5.3.5 菌数測定法

とうもろこしに付着している菌数の測定は、標準寒天培地を用いて平板培養法で行なった。手順は以下のとおりである。滅菌水はオートクレーブで120℃、20分間滅菌した蒸留水を用いた。

① 試料10g を採取し、乾熱滅菌（約160℃、3時間処理）後、自然冷却させた100ml 三角フラスコに入れ滅菌水を加えて100ml とする。

② バイブレータ等でよく攪拌して表面に付着した

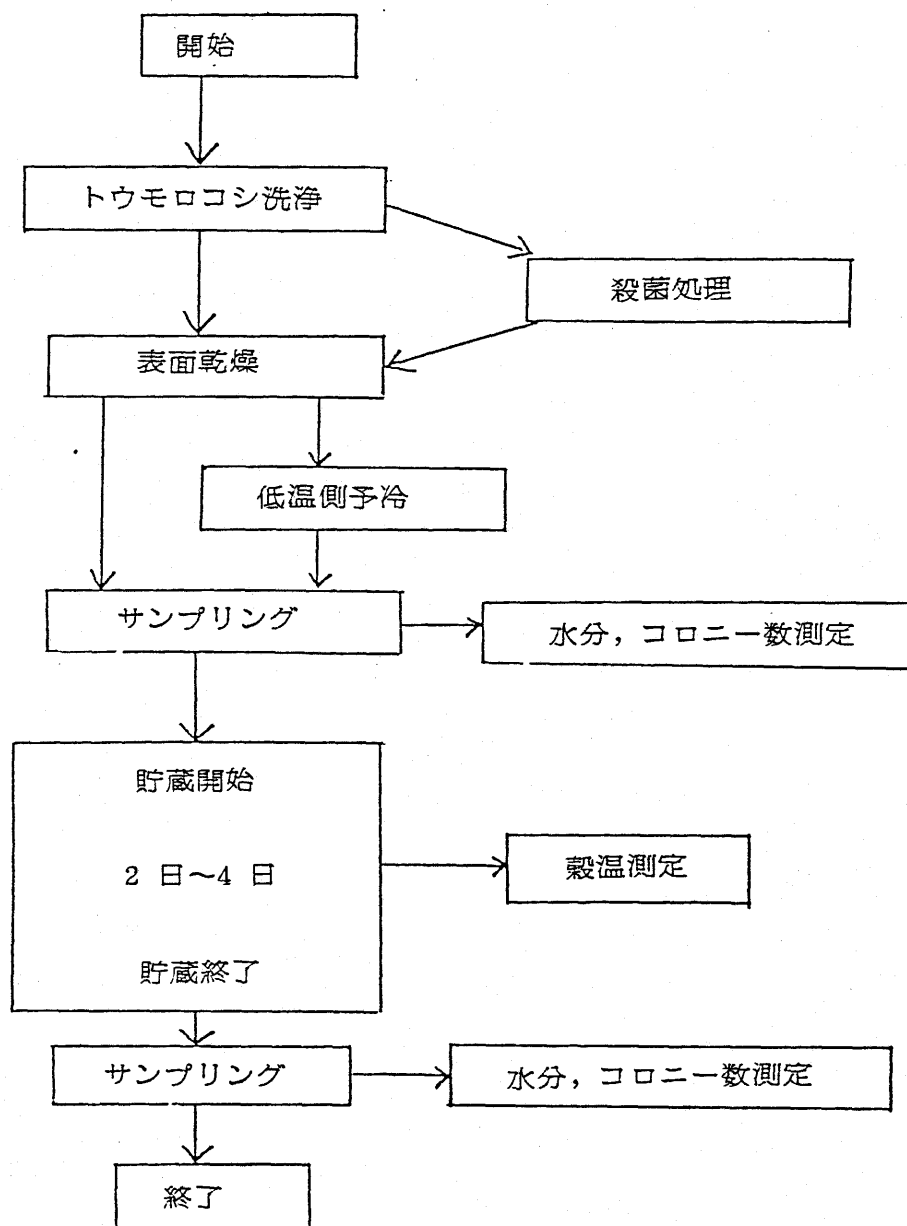


図5・2 一連の実験手順

菌を試料から脱離し、この液を原液とする。

③滅菌水 9ml の入った試験管に ②の原液 1ml を加え攪拌する。この試験管内の液は 10 倍希釈水となる。さらに、こゝから 1ml だけ取出し、滅菌水 9ml と攪拌する動作を繰返すことにより、 $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, $\frac{1}{10000}$, …… と希釈された液を調製する。

④直径 90mm のシャーレに各希釈率の液 1ml をピペットで採取して注入する。

⑤オートクレーブで滅菌した約 40℃ の標準寒天培地（栄研，1000ml 中の成分，ブドウ糖 1g，ペプトン 5g，酵母エキス 2.5g，寒天 15g）をシャーレ 1 枚につき 20~25ml 入れ、希釈水とよく混合するように平板上で攪拌する。一つの実験区について 3~4 段階の希釈率を用意し、同希釈率のものを最低 2 枚作る。

⑥寒天が凝固した後、凝固水の落下と雑菌浸入による汚染を防止するためにシャーレをさかさにして恒温槽内で 40 ± 3 ℃，48 時間培養する。

⑦ 1 枚のシャーレ内に 30~300 個のコロニーが現われているシャーレを用いてコロニー数を数え、乾

燥試料 1g あたりの数に換算する。

なお実験に用いたシャーレ, フラスコ, ピペット等は事前に乾熱滅菌したものである。

5.3.6 実験条件

各実験区の初期条件を表 5.1 に示す。なお供試材料の見かけの熱容量 β は $230.0 \text{ (kcal/}^\circ\text{C, m}^3\text{)}$, 容器内の初期酸素量 α は $0.4326 \times 10^{-2} \text{ (kmol/m}^3\text{)}$ で, 全実験区について同じ値を用いた。

表5.1 各実験区の初期条件

処理	実験番号	水分 (%, w.b.)		初期温度 ($^\circ\text{C}$)	初期温度上昇 速度($^\circ\text{C/hr}$)	初期コロニー数 (乾物試料1g当り)
殺菌区	1	13.3	H*	13.7	0.25	3.3×10^3
			L**	9.0	0.1	1.7×10^3
	2	14.9	H	14.7	0.45	2.9×10^3
			L	10.3	0.2	2.9×10^3
	3	20.0	H	13.0	0.3	1.6×10^3
			L	10.8	0.2	2.5×10^3
	4	29.1	H	29.0	0.4	3.7×10^7
			L	13.2	0.25	3.5×10^7
微生物増殖区	5	25.9	H	9.4	0.3	1.3×10^4
			L	8.5	0.25	3.9×10^3
	6	26.6	H	16.7	0.4	3.7×10^7
			L	12.7	0.2	3.5×10^6
	7	29.5	H	16.7	2.2	9.2×10^6
			L	9.9	0.6	6.1×10^7
	8	31.5	H	18.0	0.7	3.6×10^7
			L	11.3	0.2	6.7×10^5
	9	33.0	H	9.5	0.6	1.6×10^5
			L	5.2	0.25	1.6×10^5
区	10	33.0	H	14.6	0.8	8.5×10^8
			L	10.3	0.3	3.1×10^8

* H : 高温区, ** L : 低温区

5.4 実験結果および考察

5.4.1 実測値より求めた k_2

得られた実験結果および K , γ , k_2 についての計算結果を表 5.2 に示す。ここで貯蔵期間とは貯蔵中に穀温が上昇しなくなるまでの時間, 上昇温度とは貯蔵開始から貯蔵終了まで何℃の穀温上昇があったかを表わす。コロニー増殖率 r (無次元) は次式で定義

表5・2 実験および計算結果

処理	実験 番号		上昇 温度 (°C)	貯蔵 時間 (hr)	終了時 コロニー数 (乾物試料1g当り)	平均コロニー 増殖率 (-)	計 算 結 果		
							K	γ	20°C での k_2
殺菌区	1	H*	2.8	81	1.2×10^3	4.05×10^1	15779.9	4.352×10^{24}	18.3
		L*	2.3	69	1.1×10^3				
	2	H	3.5	66	2.2×10^3	1.08	15037.9	3.102×10^{23}	16.4
		L	2.5	67	4.1×10^3				
	3	H	4.2	67	1.8×10^3	1.60	14974.8	3.348×10^{23}	21.9
		L	2.6	59	5.3×10^3				
	4	H	3.0	40	3.7×10^7	1.14	2573.9	2.345×10^5	36.1
		L	1.5	18	4.5×10^7				
微生物増殖区	5	H	7.2	68	3.5×10^7	2.65×10^3	15419.4	9.102×10^{24}	130.8
		L	6.2	64	1.0×10^7				
	6	H	2.1	23	1.5×10^8	4.25	14353.4	7.967×10^{22}	42.7
		L	3.2	33	1.5×10^7				
	7	H	6.6	31	2.8×10^8	2.40×10	15676.8	1.181×10^{25}	70.5
		L	2.7	22	1.1×10^9				
	8	H	2.5	25	3.6×10^7	6.95×10^{-1}	15485.8	2.981×10^{24}	34.1
		L	3.0	29	2.6×10^5				
	9	H	9.3	80	8.3×10^8	3.55×10^3	16019.1	7.390×10^{25}	137.3
		L	7.0	87	3.0×10^8				
	10	H	2.7	39	8.5×10^8	1.2	18605.5	1.191×10^{29}	32.6
		L	3.5	33	4.3×10^8				

* H : 高温区, * L : 低温区

し、実験中の微生物の増殖の程度を表わす。

$$\eta = (\text{実験終了時コロニー数}) / (\text{初期コロニー数}) \text{ -- (5-25)}$$

本研究では高温区および低温区におけるコロニー増殖率はほぼ同じであったので、各実験区での平均値を用いた。表5・2中の k_2 については、(5・4)式に示すとおり供試材料の温度により変動するので、20℃における値を示した。

図5・3に一例として実験番号5における実測値と計算値を示す。この計算値は実測値から5・2・3の方法で γ 、 K を求め、これを(5-19)式に代入して計算したものである。

貯蔵中の穀温の計算結果は実測値とよく一致している。他の実験区でもそれぞれの実測値と計算値はよく一致した。

貯蔵中の穀温上昇は、

2次反応定数 k_2 を用いた(5-18)式でよく表わされる

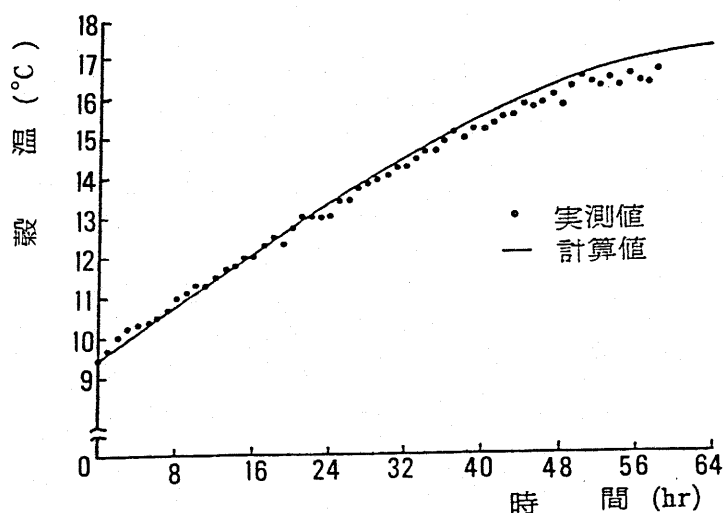


図5・3 穀温変化の実測値と計算値の比較
(実験番号5, 高温区)

ことがわかる。したがってこの k_2 は、穀温上昇曲線の特性を表わす定数であると考えられる。以下ではこの k_2 と水分、コロニー増殖率との関係について述べる。

5.4.2 水分 w と k_2 の関係

図 5.4 に各実験区の水分子 w と k_2 (20°C における計算値, 以下 $k_2^{(20)}$ と略記する) の関係を示した。図中の番号は実験番号を表わす。

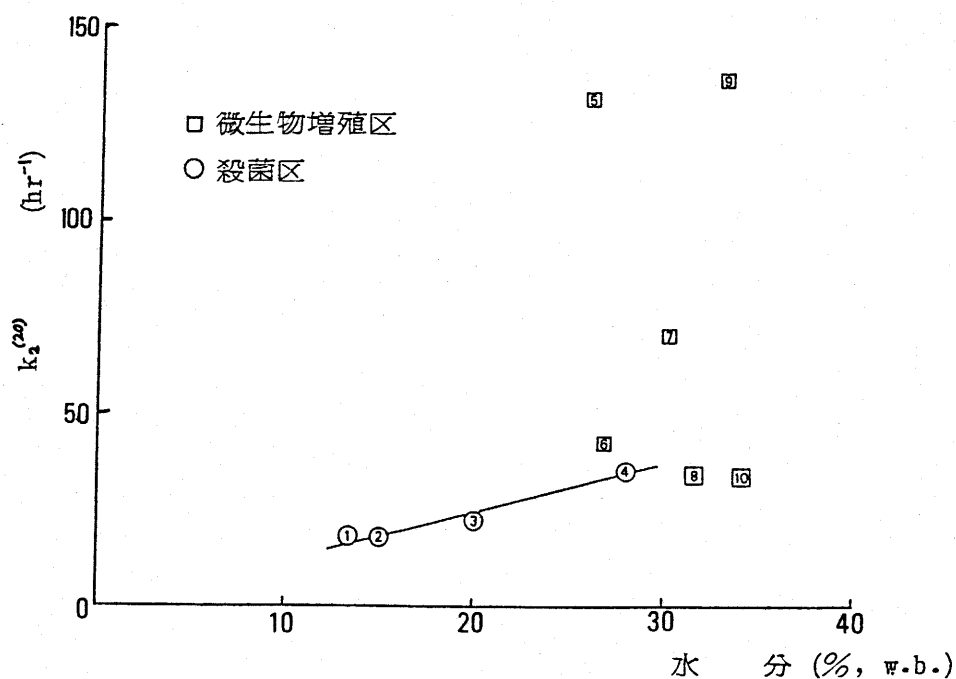


図5・4 水分 w と $k_2^{(20)}$ の関係

殺菌区における温度上昇は、とうもろこしの呼吸

熱によるものであると考えられるが、試料が高水分である程 $k_2^{(20)}$ が大きい。水分 w と $k_2^{(20)}$ の関係はほぼ一次関数で表わせられ、次式となる。

$$k_2^{(20)} = 1.39 w - 4.27 \quad (T=T_c \text{ し } 13.3 \leq w(\% \text{ w.b.}) \leq 29.1) \\ \text{----- (5-26)}$$

微生物増殖区における $k_2^{(20)}$ は、殺菌区のものよりかなり大きく、 $k_2^{(20)} = 34.1 \sim 137.3$ であった。コロニー増殖率の大きい実験区（実験番号 8 と 10）の $k_2^{(20)}$ が特に小さいのは、微生物が増殖しすぎて貯蔵中に阻害物質が蓄積されたか、あるいは増殖するための空間が不足して増殖作用が停止したことによるものである⁶⁾ と思われる。したがって初期コロニー数が大きくても貯蔵中にその増殖が抑えられれば、温度は穀物自体の呼吸作用だけによって上昇すると考えられる。また実験番号 8 ～ 10 のように、水分が同程度でも実験番号 9 の $k_2^{(20)}$ の値がかなり大きいことや、同程度の水分値でもコロニー増殖率がかなり大きい区では $k_2^{(20)}$ 値も大きいことより、微生物の増殖が発熱現象に大きく影響していると考えられる。

5.4.3 コロニー増殖率 η と $k_2^{(20)}$ の関係

図5.5 に微生物増殖区におけるコロニー増殖率 η と2次反応定数 $k_2^{(20)}$ の関係を示した。図に示すように η と $k_2^{(20)}$ の関係は指数関数で表わされ、次式のようになる。

$$k_2^{(20)} = 34.33 \eta^{0.171} \quad (\text{ただし } 0.695 \leq \eta \leq 3550) \quad (5-27)$$

図中の実験区の水分的範囲は $25.9 \leq w \leq 33.0$ であり、通常の貯蔵とうもろこしにはこのような高水分のものはない。しかし集荷中の雨水の混入や、サイロ内での結露等によりかなりの高水分となる可能性があること、低水分でも増殖する微生物も数多く挙げられていること^{5) 2) 62)}などから、通常の貯蔵でも微生物が増

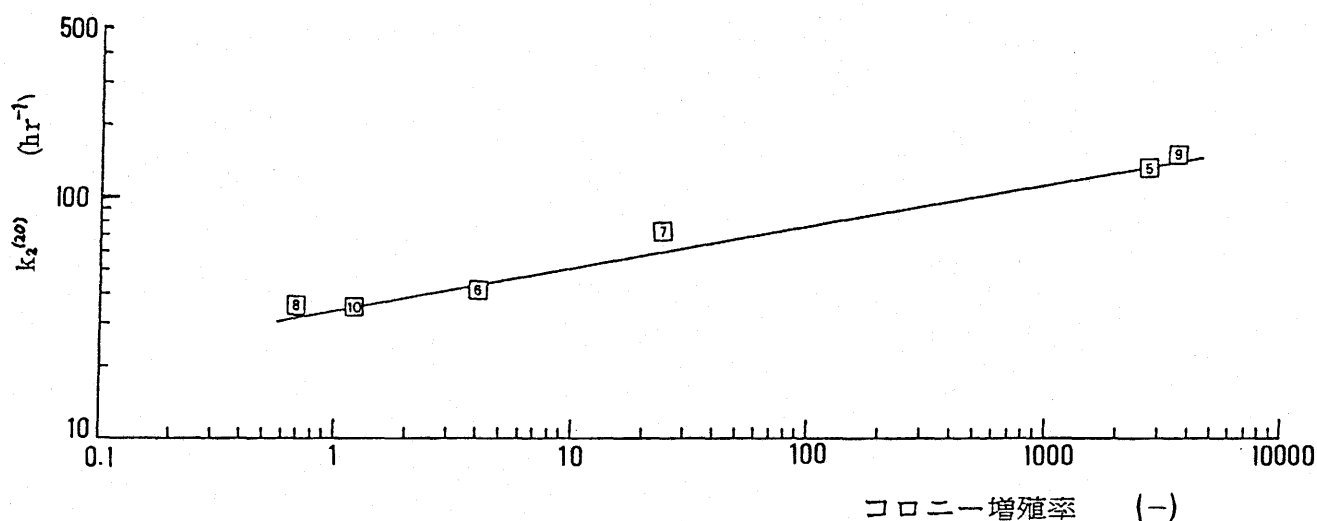


図5・5 コロニー増殖率 η と $k_2^{(20)}$ の関係

殖する可能性は十分にあると考えられる。

そこで低水分のとうもろこしでも微生物が増殖すれば、 $k_2^{(20)}$ は水分の高低にはほとんど影響されず、微生物の増殖率が大きく関与すると考えれば、(5-27)式は低水分域でも適用できると思われる。

5.4.4 酸素濃度の影響

(5-18)式を b と k_2 について整理すると、

$$\frac{dT_s}{dt} = C \cdot k_2 (b - bX)^2 \quad \text{----- (5-28)}$$

$$\text{ただし } C = \frac{g}{6\beta} \quad (= \text{const})$$

となり、貯蔵中の穀温上昇は容器内の酸素濃度 b にも影響される。今、図5.6に示すように断熱密閉容器内の全容積を $V(\text{m}^3)$ 、残存空間の容積（いわゆるヘッドスペース部）を $V_a(\text{m}^3)$ 、貯蔵物の空げき率を φ 、空気温度を $T_a(^{\circ}\text{K})$ とすると、容器内の酸素量 $V_3(\text{kmol})$ は次式で与えられる。

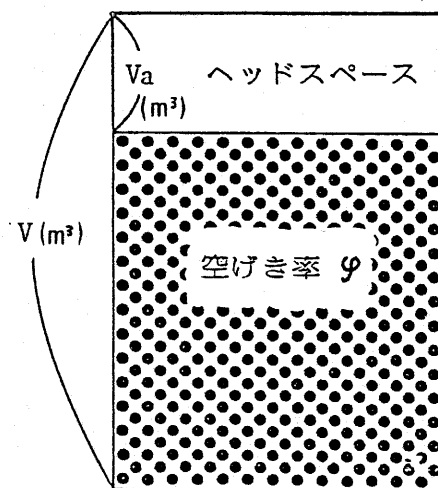


図5・6 容器内の空間の状態

$$V_3 = \left\{ (V - V_a) \varphi + V_a \right\} \times \frac{0.21}{22.4 \left(\frac{T_a}{273} \right)} \quad \text{----- (5-29)}$$

また酸素濃度 b は

$$b = V_3 / V \quad \text{----- (5-30)}$$

したがって

$$b = \left\{ (1 - v) \varphi + v \right\} \times \frac{0.21}{22.4 \left(\frac{T_a}{273} \right)} \quad \text{----- (5-31)}$$

ただし v は容器容積に対するヘッドスペース部の空間率で、次式で定義する。

$$v = V_a / V \quad \text{----- (5-32)}$$

v のとり範囲は $0 \leq v < 1$ で、 v の値が小さいほどヘッドスペースが小さいことを表わしている。

いま $\varphi = 0.41$, $T_a = 293$ (°K) のときは、 b は次式で与えられる。

$$b = (4.908 \times 10^{-3}) v + 3.411 \times 10^{-3} \quad \text{----- (5-33)}$$

図 5・7, 5・8 にはそれぞれ実験番号 1 と 5 の K , γ を用いて、 v のちがいによる穀温上昇を示した。低水分で微生物が増殖しない場合 (図 5・7) は、

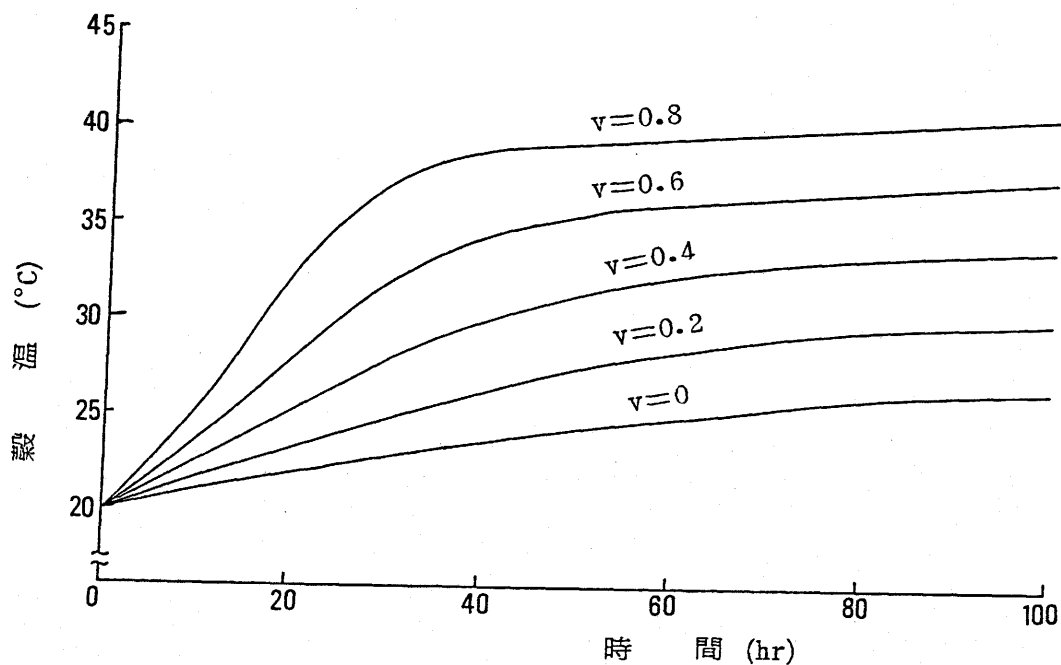


図5・7 空間率 v と穀温変化の関係 (実験番号-1)

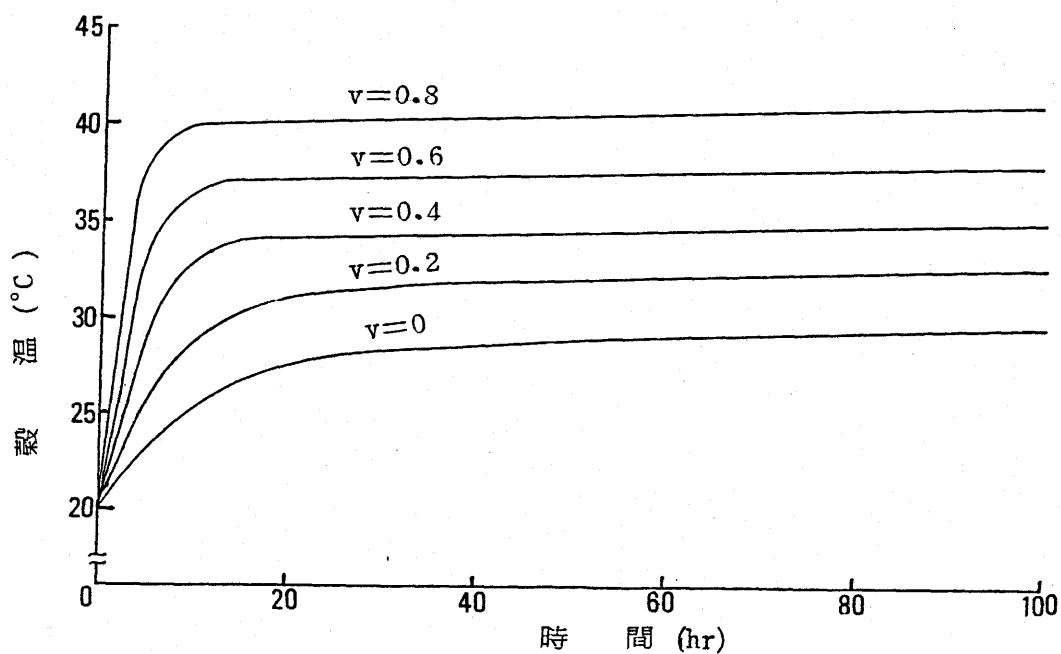


図5・8 空間率 v と穀温変化の関係 (実験番号-5)

$v=0$ で4日間に 6°C しか上昇しないが、 v が大きくなると、穀温上昇が速くなることがわかる。また

微生物の増殖が著しい場合 (図 5・8) は, $\psi = 0$ でも 4 日間で 10°C 上昇し, ψ が大きくなると穀温の上昇速度がさらに大きくなり, $\psi = 0.8$ では最初の 10 時間で 40°C に達する。このことは例えばサイロ頂部で相対湿度の高い状態や結露により水分が増加することや, 14.5% w.b. の低い水分でも増殖する微生物が存在することより, 急激な穀温上昇となる可能性があるということを示している。その一例として図 5・9 に本研究に用いた断熱密閉容器の上ぶたを少し開放して常に空気を供給したときの穀温上昇を示した。穀温は貯蔵開始直後から上昇し続け, 約 4 日で 15°C 上昇して 30°C に達した。

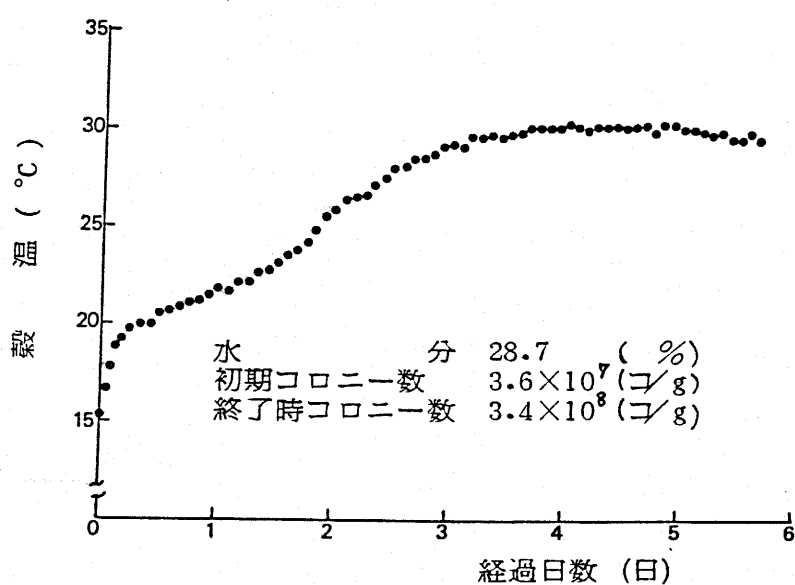


図5・9 空気の供給がある時の穀温上昇

貯蔵時に発熱した場合、穀温も低下させる目的でエアレーションを行なうことがある。しかし一般にはエアレーションによる冷却効果は見られないばかりでなく、逆に酸素を供給することにより図5・9に示すとおり急激な温度上昇を引き起こす可能性が出てくる。したがって発熱を抑える対策としてのエアレーションは中止すべきである。

5.5 摘 要

断熱密閉容器の中にとうもろこしを貯蔵した時の穀温上昇を測定し、2次反応定数 k_2 と水分・コロニー増殖率との関係を検討した。その結果は次のとおりである。

(1) 貯蔵中の穀温上昇は、2次反応定数 k_2 を用いた酸化反応式で表わすことができる。

(2) 殺菌区におけるとうもろこしの呼吸作用では、 20°C での2次反応定数 $k_2^{(20)}$ と水分 w ($13.3 \leq w(\% \text{ w.b.}) \leq 29.1$) の関係は、次の一次関数で表わされる。

$$k_2^{(20)} = 1.39w - 4.27$$

(3) 微生物増殖区においては呼吸熱による発熱より

さらに穀温上昇が激しく，コロニー増殖率 η と $k_2^{(20)}$ の関係は，次の指数関数で表わされる。(ただし $0.695 \leq \eta \leq 3550$) $k_2^{(20)} = 34.33 \eta^{0.171}$

(4)貯蔵中に微生物の増殖が著しく，容器内に酸素が供給され続ける時は，さらに急激な穀温上昇となる。

第6章 発熱に関する総合的考察

6.1 緒言

第5章までで、輸入とうもろこしが日本の港湾に到着し、穀物検査後サイロ貯蔵されている間に発熱する現象の発生機構の各因子について、実験的および理論的に検討してきた。

本章では、発熱機構に係る諸因子ならびに発熱にいたるまでのプロセスについて総合的に考察した後、基本的な発熱防止対策について述べる。

6.2 水分

輸入とうもろこしが日本の港湾に入港した時、その水分の平均値は $14.5\% \text{ w.b.}$ である。しかし表 2.1 に示すとおり、入手したデータの最高値は $21.6\% \text{ w.b.}$ であり、高水分のとうもろこしがサイロへ搬入される可能性の高いことも知った。米国産のとうもろこしは水分の範囲が $12.0 \sim 14.4\% \text{ w.b.}$ と安定しているのに対し、タイ国産の場合は、 $12.4 \sim 21.6\% \text{ w.b.}$ とばらつきが大きい。

このことは生産国別の収穫から乾燥調製にいたるまでの技術に較差があることを示している。入手した全データでの水分と穀温の間には正の相関関係があった。さらにF検定の結果と図2・4より、日本入港時のとうもろこしの発熱は、水分の高いことが起因していることを知った。

6・3 水分増加

サイロ搬入前のとうもろこしは、穀物検査が行われ水分検査規格（通常 15% w.b.）以下のものが搬入される。それにもかかわらずサイロ内でとうもろこしは発熱する現象が発生する。これは第2章で知ったとおり、とうもろこしが高水分になることによるものと推定される。この水分増加を引き起こす物理的現象として結露ないし相対湿度の高い状態が考えられることを第4章で検討した。

サイロ貯蔵時の結露については、斉藤ら(1982)³¹⁾は3月の帯広市における西面サイロで結露の痕跡があったことを報告している。この原因として日射で高温となっているヘッドスペース部へ冷却空気が入り込んだ

ことも挙げている。筆者はとうもろこし表層部からハッドスペース部への水蒸気拡散について検討し、実験と理論より寒冷地でも水蒸気拡散により結露現象が持続することを明らかにし、有藤ら(1982)³¹⁾の報告を裏付ける結果を得た。なおこの結露および水蒸気飽和時間の長いのは、搬入とうもろこしの穀温が高いことにも起因していることを図4.4で示した。

6.4 穀 温

日本に入港した輸入とうもろこしの穀温の範囲は9～50℃であり、平均値は29.5℃で高い穀温のものが搬入されていることを知った。

この高い穀温のとうもろこしがサイロ内で貯蔵されているときに、サイロ外の気象条件の影響を受ける範囲とその減衰の程度を、サイロ内の穀温の変化を予測する数値計算モデルで求めた。その結果、気象条件の影響を受けない無次元半径は、断熱材を施していないサイロでは0.514～0.967であった(表3.8)。サイロ中心部よりみて温度変化のない面積は水平面の26～93%に達している。この部分は熱的に

は断熱状態となっているものである。この部分での穀物の呼吸熱や微生物増殖に伴う基質分解熱は、穀温上昇として現われる。

現在サイロの穀温は中心軸で測定されていることと、数値計算の結果より1ヶ月間貯蔵でもサイロ中心部での穀温変動が全くないことより、貯蔵中のとうもろこしの発熱は、とうもろこし自体の呼吸熱および微生物の増殖に伴う熱によることは明らかである。

気象条件の影響を受ける部分、即ちサイロ壁体部分は、那覇では東西面が南北面よりも大きいことから、MUIR (1969)²⁷⁾、前川ら(1977)³⁰⁾らが南北面上の穀温分布をサイロの代表温度として計算した予測と異なった。これは、本論文では数値計算モデルを極座標により解いた結果による知見である。穀温変動の激しくなる方位が東西面であることは、太陽高度の影響によるものである。また釧路においては方位による気象条件の影響はみられず、サイロ中心に向かって同心円状に冷却されている。那覇における穀温変動は釧路の穀温変動よりも小さく、これは貯蔵開始穀温が那覇での外気温の平均値に近いこと

による。

以上のとおり，サイロの設置位置および気象条件が，サイロ内穀温の分布およびその変動幅に影響する度合は小さい。

6・5 貯蔵時の発熱

サイロに搬入される以前にとうもろこしが高水分であったり，6・3で述べたとおり水分増加が貯蔵中の結露ないしは水蒸気飽和による場合に，呼吸熱および付着した微生物の増殖により発熱するかを検討する必要がある。さらに呼吸熱と微生物増殖に伴う基質分解熱の分離も必要である。

第5章では断熱密閉容器を用いてとうもろこしの穀温上昇を測定し，二次元反応定数 k_2 を用いた酸化反応式により貯蔵中の穀温上昇を表わすことを試みた。

従来の研究^{(12)~(15)}では貯蔵中の発熱現象を定性的にとらえているので，呼吸熱のみによる発熱と微生物増殖に伴う発熱を供試穀物を殺菌処理する方法で定量的に分離可能であるかを検討した。その結果，殺菌したとうもろこしの呼吸熱のみによる

発熱現象では、とうもろこしの水分 w (% w.b.) と二次反応定数 $k_2^{(20)}$ との関係は、図5・4に示したとおり一次関数で表わされる。一方、貯蔵中に微生物が増殖して穀温上昇を引きおこさせた実験におけるコロニー増殖率 r と二次反応定数 $k_2^{(20)}$ の関係は図5・5で示したとおり指数関数で表わされる。このことは貯蔵時の微生物増殖を伴う発熱による穀温上昇が呼吸熱のみの場合より激しいことを実験的に裏付けている。従来の貯蔵中の穀温上昇に関する実験では^{(12), (17)~(19)}、穀物の水分、微生物の増殖の程度、穀温の経時変化等を各々検討していなかった。筆者は水分、微生物のコロニー増殖率、穀温の経時変化の関係を検討した結果、貯蔵中の発熱を水分増加による影響と微生物増殖時の影響に分離して、定量的データを得ることができ、穀温上昇を微分して(3-48)式、(3-49)式、穀温上昇速度として比較することによって発熱を予測する方法を確立する可能性が出てきた。

さらに貯蔵中に微生物の増殖が著しく、しかも容器内に酸素が供給される場合には、断熱状況が保たれているサイロでは急激な穀温上昇となることが、

(5-28) 式および (5-33) 式より計算され、微生物の増殖を引き起こしたサイロの穀物に酸素を供給するエアレーション、ローテーション等の現行の操作は、逆効果となることが認められた。

6.6 サイロ貯蔵時の発熱機構

穀温上昇は、とうもろこしの水分の高いことに起因していることも第2章で示した。

サイロ貯蔵時の発熱機構は、6.5で述べたとおりとうもろこしの水分を増加させる物理的現象がサイロ内で発生し、サイロ中心部は断熱状態で保たれ、損失熱流は微小とみなされ、水分増加によって生じた呼吸熱、基質分解熱が顕熱上昇するから、穀温上昇となって現われたものと考えた。

即ち穀粒内水分、または結露や水蒸気飽和による自由水が、呼吸熱および微生物増殖時の基質分解熱を発生する引きがねとなっていると解釈できる。

従ってサイロ貯蔵時に発熱するまでのプロセスは、図6.1に示すとおりであり、大別すると、そのプロセスには次の3つが挙げられる。

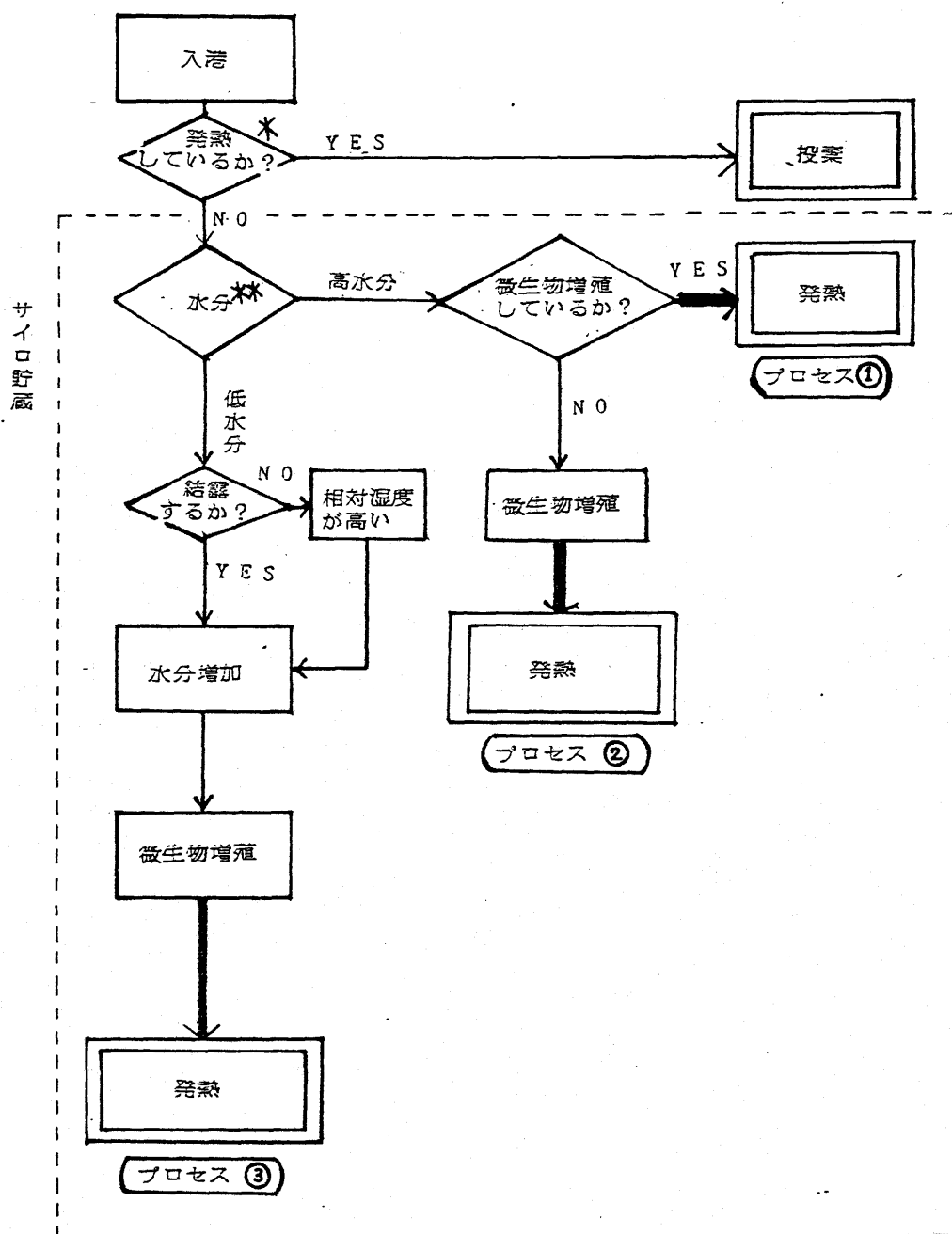


図6・1 サイロ貯蔵時の微生物増殖により発熱するまでのプロセス

プロセス①：高水分ですでに微生物の増殖している
 とうもろこしが入港し、これがサイロ搬入時に混入した場合、貯蔵開始直後に発熱する。

プロセス②：高水分のとうもろこしがサイロに混入し、貯蔵中に呼吸熱および微生物の基質分解熱により発熱する。

プロセス③：低水分とうもろこしの貯蔵中に、雰囲気相対湿度が高くなるか結露現象により水分増加をきたし、呼吸熱および微生物の基質分解熱により発熱する。

したがって発熱を防止するための対策も、それぞれのプロセスに対して講じるべきである。

6.7 発熱防止対策

6.7.1 プロセス①（高水分で貯蔵開始直後に発熱）とプロセス②（高水分で貯蔵中に発熱）の場合

これらの場合、現場での微生物増殖の判定が困難であるので、高水分のとうもろこしを貯蔵する場合としてまとめて検討することにする。

このようなとうもろこしは、呼吸作用や微生物増殖をおさえるために、サイロ搬入前に乾燥処理して低水分にしておくべきである。やむをえず高水分で貯蔵する

場合は、高水分専用のサイロに入れて穀温を注意深く監視しながら、できるだけ短期間で搬出し、流通させてしまふべきである。

6.7.2 フロセス③ (低水分が水分増加して発熱) の場合.

(1) サイロ断熱材構造の対策

外部との熱の出入りをなくするために、断熱材を厚くする事が考えられるが、第3章で述べたように50mm厚の断熱材でも内壁付近の温度変動を防ぐことはできなかった。これ以上の厚さにすることは実用的にも限界があるので、サイロ管理運営面での対策に任せねばならない。

(2) サイロ搬入時の堆積法

密閉サイロで貯蔵する場合、第5章で検討したとおり酸素をできるだけ供給しないことが必要である。従ってサイロのヘッドスペース部の空間を小さくするように頂部まで穀物を搬入する必要がある。しかし搬入時の穀物の量によっては、ヘッドスペース部

が大きくなることもあるので、完全な方法ではない。

(3) 管理運営面での対策

- ① とうもろこしの雰囲気結露ないしは相対湿度の高くなることを防止するため、ヘッドスペース部も換気する。換気回数と換気時間は6・9で検討する。
- ② 温暖地において必要な換気量が得にくい場合は、外気温が低下しはじめた時にヘッドスペース部の内壁面に温風を吹付けて、水蒸気凝縮を防止するか、除湿器を用いて水分を外へ出す。
- ③ 寒冷地でも同様であるが、温風を吹付ける方法は外気温が低いので、エネルギーコストの面から考えると換気法によるべきである。
- ④ サイロ内での微生物の増殖はモニタリングできないので、湿度センサを設置してとうもろこし周囲の空気の相対湿度を常に監視する。相対湿度が高くなってきたら微生物が増殖しやすくなることを意味するので、速やかに搬出すべきである。
- ⑤ 特にヘッドスペース部では結露により微生物が

増殖しやすいので、温度センサーおよび湿度センサーを多数設置する。またとうもろこし表層部での穀粒の色や微生物の着生した状態をテレビカメラ等で監視できるシステムを開発することも有用である。

6.8 現行の発熱防止対策への提言

現行の発熱対策としては、貯蔵中に発熱した場合エアレーションやローテーションを行なうことにより、穀温低下をはかっている。しかしエアレーションにより穀温が低下した成功例はほとんどなく⁶⁾、その効果は期待できない。またローテーションは搬入・搬出に時間と経費がかかりすぎ、とうもろこしに付着した微生物をばらまくことにもなる。ヘッドスペース部の飽和や結露を防止するための換気は、貯蔵中に微生物が増殖しはじめた場合には、酸素を供給し微生物増殖を助長することになるので逆効果となる。

したがって貯蔵中の穀温上昇速度が通常の呼吸作用より激しくて、明らかに微生物増殖によるもので

あると判定された時は，上述したエアレーション等は中止すべきである。このことは寒冷地においても初期穀温が高いときにはサイロ口中心部の穀温がさがりにくく，微生物が増殖しやすいので同様の取扱いが必要である。

ここで合理的かつ実用的でしかも発熱を未然に防止する方法として，換気装置の設置と穀温監視が挙げられる。以下にその方法を詳細に述べる。

6.9 換気量の計算

6.9.1 湿度変動式⁶³⁾

いまヘッドスペース部内で W (g/hr) の水蒸気が発生するとき，ヘッドスペース部内の水蒸気収支は，次式で表わされる。

$$W dt = Q_a (\sigma_i - \sigma_o) dt + V d\sigma_i \quad \text{----- (6-1)}$$

ただし t : 時間 (hr)

Q_a : 換気量 (m^3/hr)

σ_i : 室内容積絶対湿度 (g/m^3) V : ヘッドスペース部容積 (m^3)

σ_o : 外気容積絶対湿度 (g/m^3)

$t=0$ のとき $\sigma_i = \sigma_0$ として解くと,

$$\sigma_i = \sigma_0 + \frac{W}{Q_a} \left\{ 1 - e^{-(Q_a/v)t} \right\} \quad \text{----- (6-2)}$$

ここで水蒸気が飽和した後の換気による湿度減衰を求めると, 時間 $t=0$ で $W=0$ とおくことにより,

$$\sigma_i = \sigma_0 + \frac{W}{Q_a} \cdot e^{-(Q_a/v)t} \quad \text{----- (6-3)}$$

この式からヘッダスペース部内の容積絶対湿度の経時変化を求めることができる。

6.9.2 換気量と容積絶対湿度の関係

ここでは (6-3) 式 中の W (g/hr) には温暖地では第4章で求めた1日の結露量 (4.5.2) を, また寒冷地では表4.4の結露量を用いる。

いす簡単のため, 温暖地では1日の結露量が平均外気温度の時刻9時から最高気温時刻の14時までの5時間で発生したとすると, W は次のようになる。

$$W = m_1 \times 10^3 / 5 \quad \text{----- (6-4)}$$

釧路での W は表4.4の最初の10時間に発生した量を用いる。

また σ_0 の値は, 月平均気温, 月平均相対湿度より求め(表 4.3 参照), ヘッドスペース部容積 $V(\text{m}^3)$ は図 4.3 より求める。表 6.1 にそれらの結果を示す。

表 6.1 ヘッドスペース部内の状態

地 名	$V (\text{m}^3)$	$\sigma_0 (\text{g}/\text{m}^3)$	$W (\text{g}/\text{hr})$
岡 山	132.1	20.0	39.9
釧 路	132.1	2.63	21.7

いま (6-3) 式中で $n = Qa/V$ なる換気回数 ($1/\text{hr}$) を用いて, 各地の σ_i の経時変化を求めると図 6.2, 6.3 のようになる。岡山では σ_0 の値に近づくのに

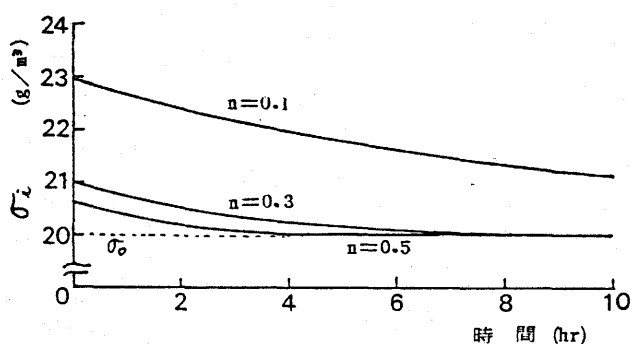


図 6.2 n と σ_i の関係 (岡山)

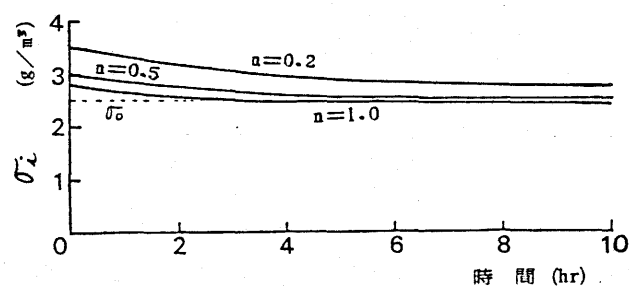


図 6.3 n と σ_i の関係 (釧路)

$n=0.5$ で約 4 時間, 釧路では $n=1$ で約 3 時間をする ことがわかる。それ以下の換気回数では, ヘッ

ドスペース部内での結露を防止できないことがわかる。

6.10 穀温監視法

第3章における数値計算では、貯蔵期間中に気象条件の影響による穀温変動がないことを知った。したがって貯蔵中に温度センサによるモニタリングで異常に高い穀温を感知した時には、とうもろこしの呼吸作用および微生物増殖による発熱がかなり進行してしまっている事になる。これは発熱した結果を監視していることになり、完全な発熱防止対策とはいえない。以下に筆者の提案する穀温監視法を述べる。

貯蔵中の穀温上昇は、通常の呼吸作用の時と微生物増殖時ではその速度は大きく異なり、たとえば図5.7と図5.8に示すとおりである。この速度は穀物の充填状態により異なるが、今容器容積に対するヘッドスペース部容積の空間率 $\psi=0$ 、すなわち充填層内での場合について考えることにする。

第5章で検討したとおり、呼吸作用のみによる発

熱と微生物が増殖した時の呼吸作用および基質分解熱による発熱現象の分離は可能である。

また 3.4.2 で述べたように呼吸作用のみの穀温上昇速度 S_2 は次式で表わされる。

$$S_2 = \Delta T_2 / \Delta t \quad (^\circ\text{C}/\text{hr}) \quad \text{----- (6-5)}$$

微生物増殖時の穀温上昇速度 N は、

$$N = \Delta T_N / \Delta t \quad (^\circ\text{C}/\text{hr}) \quad \text{----- (6-6)}$$

次に N に対する S_2 の比 R_2 は次式で表わされる。

$$R_2 = N / S_2 \quad \text{----- (6-7)}$$

したがって貯蔵期間中の穀温上昇速度を常時モニタリングしていき、この上昇速度が貯蔵開始時の R_2 倍に達した時は微生物増殖による穀温上昇であると判定できる。たとえば図 5.7 と図 5.8 の $v=0$ すなわち穀物充填層内における穀温上昇速度は、それぞれ $S_2 = 0.1$, $N = 0.7$ であり $R_2 = 7$ となる。

貯蔵中の穀温上昇速度が 7 倍以上になつた場合は、微生物増殖による急激な穀温上昇いわゆる「熱発」となる危険性が生じたことになる。この場合は、酸素の供給を断つためにエアレーションおよびローテーション、換気を中止し、速やかに搬出して流通させて

しまふべきである。

今後、このように貯蔵中の穀温上昇速度も常時モニタリングして、危険な穀温上昇速度に達していないかどうかを判定できる計測システムを開発することにより、貯蔵中の発熱を未然に防止できるものと考えらる。

6.11 摘 要

本論文の第2章から第5章において検討した結果をとりまとめて、サイロ貯蔵時の微生物増殖により発熱するまでのプロセスを解明した。またその発熱を防止する対策を検討した。

総合的な考察は次のとおりである。

(1) サイロ貯蔵時の発熱機構は、とうもろこしの水分を増加させる物理的現象がサイロ内で発生し、サイロ中心部は断熱状態が保たれ、損失熱流は微小であるとみなされ、水分増加によって生じた呼吸熱や微生物増殖に伴う基質分解熱が穀温上昇として現われたものである。

(2) 発熱までのプロセスには、(i) 高水分ですでに微

生物の増殖しているとうもろこしが入港し、これがサイロ搬入時に混入して貯蔵開始直後に発熱する場合、(ii)高水分のとうもろこしがサイロに混入し、貯蔵中に呼吸熱および微生物の基質分解熱により発熱する場合、(iii)低水分のとうもろこしの貯蔵中に結露等により水分が増加し、その後微生物が増殖して発熱する場合の3つが挙げられる。

本研究で得られた基本的な発熱防止対策は次のとおりである。

(1) 日本に到着した時のとうもろこしの水分が高い場合は、呼吸作用や微生物増殖を抑えるために、サイロ搬入前に乾燥処理して低水分にしておくべきである。

(2) サイロ内での結露防止の対策には、ヘッドスペース部を換気することが有効である。換気により外気の絶対湿度に近づくのに必要な時間は、岡山では換気回数 $n(1/\text{hr})=0.5$ の時約4時間であり、釧路では $n=1$ の時約3時間である。換気回数 n がそれより小さいときには、長時間の換気でも効果の表われない

ことがあるので注意すべきである。

(3)微生物が増殖した時の穀温上昇速度を N ($^{\circ}\text{C}/\text{hr}$), 呼吸熱のみの穀温上昇速度を S_2 ($^{\circ}\text{C}/\text{hr}$) とするとき, $R_2 (= N/S_2)$ を用いた穀温上昇速度の比較法を導入することにより, 貯蔵中の急激な穀温上昇を未然に防止することができるといえる。

(4)微生物増殖時の発熱防止対策としては, やむをえず高水分のとうもろこしを搬入した場合, あるいは貯蔵中の穀温が急激に上昇しはじめた場合は, 酸素の供給を断つためにエアレーションおよびローテーション, 換気などは中止して, 速やかに搬出して流通にまわすべきである。

第7章 結 論

とうもろこしのサイロ貯蔵時におこる発熱により、穀温が40~50℃にも達する。このためサイロ内でとうもろこしが腐敗したり、搬出後に調整・加工の段階で発生する悪臭のため、飼料や製粉の原料として用いられなくなる。この貯蔵時の発熱は、とうもろこし自体の呼吸熱およびとうもろこしに付着した微生物の増殖に伴う基質分解熱によるものであると推測されている。この呼吸作用や基質分解反応は、とうもろこしの水分が高い時は著しく促進されることより、サイロへの高水分のとうもろこしの搬入や、サイロ貯蔵時に水分を増加させる何らかの物理的現象の発生などがその主な原因と考えられる。

しかし現在までサイロ貯蔵時の発熱機構は解明されておらず、穀物備蓄、品質管理、需給調整等の課題に対して大きな障害となっている。したがってとうもろこしのサイロ貯蔵時の発熱機構を解明し、発熱を未然に防止する対策を検討する必要性が出てきた。

本論文は、サイロ貯蔵されているとうもろこしについて、

(1) 微生物増殖の原因となる高水分と穀温の関係を、日本入港時のデータにより統計的に明らかにすること。

(2) 外気温、太陽日射などサイロ外部の気象条件により、サイロ内の穀温がどの程度上昇するかを検討すること。

(3) サイロのヘッドスペース部での結露量の定量的計算法と、相対湿度の高い状態や結露による水分増加の可能性を検討すること。

(4) 高水分のとうもろこしを貯蔵した時、呼吸作用ならびに微生物増殖による発熱を実験により定量的に検討すること。

(5) 以上の各研究で得られた結果より、とうもろこしのサイロ貯蔵時の発熱機構を総合的に解明し、発熱防止対策を検討すること。

を目的として行った研究の成果をまとめたものである。

本論文は7章から成り、第1章と第7章はそれぞれ

小緒論と結論であり，研究の主要部分は第2章から第6章までの五つの章である。

以下に第2章から順に概要を述べる。

本論文の第2章では，輸入とうもろこしが日本へ到着した時の穀温と水分のデータを生産国別に分類して，穀温と水分の関係を統計的に求め，以下の結果を得た。(i) 日本到着時のとうもろこしの穀温は $9.0 \sim 50.0^{\circ}\text{C}$ ，水分は $11.0 \sim 21.6\% \text{ w.b.}$ の範囲にあり，高水分のとうもろこしがサイロへ搬入される可能性がある。(ii) 入手したデータ 733 例における穀温と水分の間には 0.1% の有意水準で正の相関関係 ($r=0.4735$) がある。(iii) 米国からのとうもろこしの水分は $12.0 \sim 14.4\% \text{ w.b.}$ と安定しているが，タイ国産の場合は $12.4 \sim 21.6\% \text{ w.b.}$ とばらつきが大きい。(iv) F検定の結果より，日本到着時の穀温が高いことは高水分によるものであるといえる。

第3章では，穀物用大型サイロ内での穀温分布の変動を検討した。実際に使用されている大きさのサイロを対象に研究することは困難であるので，本章では二次元非定常熱伝導方程式を円柱極座標系で表

わした数値計算モデルを用いて、穀温分布の変動を求めた。ここでいう二次元とは水平方向であり、外気温や日射などの気象条件による外壁温度の変動をサイロの四周にわたって設定した。この気象条件が内部の穀温変動にどのように影響するかを検討し、以下の結果を得た。(i) 那覇において日平均気温 27.6°C 、日最高気温 30.8°C の値を用いて、モンテカルロ法により各日別に外気温変動を割振って1ヶ月間貯蔵の計算を行なった結果、断熱材のないスチールサイロ (熱伝導率 $43.0 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、厚さ 5 mm) の内壁面温度は、外気温と日射の影響を受けて、西面で $21 \sim 47^{\circ}\text{C}$ の変動があるが、断熱材を施した場合の内壁面温度はほとんど変化しない。(ii) 釧路においては日平均気温 -6.8°C 、日最高気温 -1.4°C の値を用いて(i)と同様に1ヶ月間貯蔵の計算を行なった結果、断熱材の施していないスチールサイロ (熱伝導率 $43.0 \text{ kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、厚さ 6 mm) の内壁面温度の日変化は外気温とほぼ同様の変動を示すが、方位による気象条件の影響は見られない。また貯蔵期間中穀温は同心円状に低下していくが、1ヶ月間貯蔵後でも内壁から

約 2 m 内側での穀温は一定である。(iii) 断熱材を施していないスチールサイロにおいて、1ヶ月間貯蔵後に気象条件の影響を受けない無次元半径 ($=r/R$, r =影響を受けない半径, R =サイロ半径) は、那覇では 0.883 ~ 0.967, 釧路では 0.514 である。(iv) 貯蔵中のとうもろこしの呼吸作用のみの穀温上昇速度と微生物の増殖に伴う穀温上昇速度を比較することにより、貯蔵中の急激な穀温上昇を監視しうる。(v) サイロ貯蔵中の異常な程度の発熱の要因である穀温上昇は、外気温、日射量などの気象条件によるものではなく、その原因はサイロ内のとうもろこしの呼吸熱およびとうもろこしに付着した微生物の増殖による発熱がほとんどである。

第4章では、微生物増殖の要因である水分増加を引き起こす結露現象について、条件を寒冷地と温暖地に分けて検討した。寒冷地の場合はサイロ内のとうもろこし表層部からヘッドスペース部への水蒸気拡散による結露量、温暖地の場合はヘッドスペース部内の水蒸気の凝縮による結露量を定量的に計算し、以下の結果を得た。(i) 寒冷地においては、貯蔵開

始後とうもろこし表層部の穀温が低下し続け、それにもない結露量も経時的に減少するが、その量は表層部からヘッドスペース部への水蒸気拡散式を用いて計算できる。(ii) 温暖地においては、日最低気温がヘッドスペース部内の空気の露点以下に低下する気象条件の時に結露が生じる。結露が生じない場合でも、ヘッドスペース部内では相対湿度のかなり高い状態が持続する。(iii) 結露状態が持続すると物理的に水分が増加し、相対湿度の高い状態が持続すると吸湿により平衡水分が増加する。このことは微生物増殖の要因となる。

第5章では、第3章においてサイロ貯蔵中の穀温分布は外気温、日射などの影響をほとんど受けない、サイロ内での穀温上昇は見られないこと、また第4章で結露等により水分増加の可能性があるという結果を受けて、とうもろこし貯蔵時の発熱現象によぼす微生物増殖の影響を検討した。実験には断熱密閉容器を用い、この中へとうもろこしを貯蔵して穀温上昇を測定した。貯蔵条件はとうもろこしを表面殺菌した場合と微生物が増殖した場合の2種類である。

測定結果よりとうもろこし内の糖の酸化反応を表わす式における2次反応定数 k_2 を各実験ごとに求め、20℃基準に換算した k_2 の値と水分またはコロニー増殖率との関係を検討した。その結果は次のとおりである。(i) 貯蔵中の穀温上昇は、次の糖の酸化反応式で表わすことができる。

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q}{\beta} k_2 (a-x)(b-cx) \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 T_s : 穀温、 t : 時間、 q : グルコースの反応熱量、 β : 穀物の熱容量、 a : 糖の反応量、 b : 容器内酸素濃度、 x : 任意の時間での糖の反応量。

(ii) 初期コロニー数が大きくても貯蔵中にその増殖が抑えられれば、穀温上昇はとうもろこし自体の呼吸熱のみにより引き起こされ、20℃での2次反応定数 k_2 と水分 w ($13.3 \leq w (\%, w.b.) \leq 29.1$) の関係は、次の一次関数で表わされる。

$$k_2 = 1.39 w - 4.27 \quad \text{--- (2)}$$

(iii) コロニー増殖率 η (= 実験終了時コロニー数) / (初期コロニー数) が大きいときの2次反応定数 k_2 は、呼吸作用による k_2 の値よりかなり大きい値を示し、 k_2 と η ($0.695 \leq \eta \leq 3550$) の関係は次の指数関数で

表わされる。

$$k_2 = 34.33 \eta^{0.171} \quad \text{--- (3)}$$

(iv) 容器内の初期酸素濃度 η は、容器容積に対するヘッドスペースの空間率 η で表わされ、この空間率 η が大きいときは穀温の上昇速度が非常に大きくなる。(v) 貯蔵中の微生物増殖が著しくて、空間率 η が大きいときには、さらに急激な穀温上昇となりうる。

さらに第6章においては、以上の研究結果より、発熱機構に係る諸因子ならびに発熱にいたるまでのプロセスについて総合的に考察した。また基本的な発熱防止対策についても言及した。

総合的な考察は次のとおりである。

(1) サイロ貯蔵時の発熱機構は、高水分のとうもろこしが搬入されるか、あるいは水分を増加させる物理的現象がサイロ内で発生し、サイロ中心部は断熱状態が保たれ損失熱流は微小であるとみなされ、水分増加によって生じた呼吸熱および微生物増殖による基質分解熱が穀温上昇として現われたものである。

(2) 発熱までのプロセスには、(i) 入港時のとうもろ

こしが高水分ですでに微生物が増殖しており，サイロ貯蔵開始直後に発熱する場合，(ii) 高水分のとうもろこしの貯蔵中に微生物が増殖して発熱する場合，(iii) 低水分のとうもろこしの貯蔵中に相対湿度の高い状態の持続ないしは結露により水分が増加し，その後微生物が増殖して発熱する場合の3つが挙げられる。

基本的な発熱防止対策は次のとおりである。

(1) 日本に到着した時のとうもろこしの水分が高い場合は，呼吸作用や微生物増殖を抑えるために，サイロ搬入前に乾燥処理して低水分にしておくべきである。

(2) サイロ内での結露防止の対策には，ヘッドスペース部を換気することが有効である。換気により外気の絶対湿度に近づくのに必要な時間は，岡山では換気回数 $n(1/\text{hr}) = 0.5$ の時約4時間であり，釧路では $n = 1$ の時約3時間である。 n がそれより小さいときには，長時間の換気でも効果の表われないことがあるので注意すべきである。

(3) 微生物が増殖した時の穀温上昇速度を $N(^{\circ}\text{C}/\text{hr})$,

呼吸熱のみの穀温上昇速度を S_2 ($^{\circ}\text{C}/\text{hr}$) とするとき、 $R_2 (= N/S_2)$ を用いた穀温上昇速度の比較法を導入することにより、貯蔵中の急激な穀温上昇を未然に防止することができる。

(5) やむをえず高水分のとうもろこしを搬入した場合や貯蔵中の穀温が急激に上昇しはじめた場合の微生物増殖による発熱防止対策としては、サイロ内への酸素の供給を断つことが挙げられる。従ってエアレーションおよびローテーション、換気は中止すべきである。上述のような状態となったとうもろこしは速やかにサイロから搬出して流通にまわすべきである。

付録 1

<等値線表示図のためのプログラム>

```

C
C      **** CONTOUR LINES ****
EXTERNAL SAMPL1
CALL PLOTS(0.0,0.0,0.0,0.9)
CALL PLOT(0.0,0.0,0.0,-3)
CALL INIT
CALL AXMESH
ROU=0.896566292
CALL ALTCAL(SAMPL1,ROU)
CALL CONTLN
CALL PLOT(0.0,0.0,0.0,-3)
CALL INIT
CALL AXMESH
ROU=-0.877303145
CALL ALTCAL(SAMPL1,ROU)
CALL CONTLN
CALL PLOT(0.0,0.0,0.0,0.999)
STOP
END

      FUNCTION SAMPL1(X,Y,ROU)
C
C      TWO DIMENSION NORMAL DISTRIBUTION
C
      DX=0.1
      DY=0.5
      SIGX=1.82
      SIGY=7.0
      X1=-(X-14.5)**2/(2.0*SIGX**2*(1.0-ROU**2))+ROU*(X-14.5)
      R      *(Y-29.5)/(SIGX*SIGY*(1.0-ROU**2))-(Y-29.5)**2
      R      /(2.0*SIGY**2*(1.0-ROU**2))
      IF(X1.LT,-80.0) X1=-80.0
      SAMPL1=0.01263/SQRT(1.0-ROU**2)*EXP(X1)
      RETURN
      END

C
      SUBROUTINE INIT
      COMMON/COMDI1/X0,Y0,HX,HY,NX,NY,MX,MY,XW,YW
      COMMON/COMHIT/KH,HEIT(21)
      COMMON/COMKXM/KXM
C
      ****
      X0=11.0
      Y0=9.0
      HX=0.1
      HY=0.5
      NX=107
      NY=84
      MX=10
      MY=10
      XW=200.0
      YW=200.0
C
      ****
      KH=10
      DO 10 I=1,KH

```

```

10 HEIT(I)=0.003*FLOAT(I-1)
WRITE(6,660)(I,HEIT(I),I=1,KH)
660 FORMAT(1H," ** HEIT",I3,"**",15X,F10.5)
C
****
KXM=1
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE AXMESH
COMMON/COMDT1/X0,Y0,HX,HY,NX,NY,MX,MY,XW,YW
COMMON/COMCET/XFCTR,YFCTR,HXFC,HYFC
C
---
XFCTR=XW/(HX*FLOAT(NX-1))
YFCTR=YW/(HY*FLOAT(NY-1))
HXFC=HX*XFCTR
HYFC=HY*YFCTR
C
---
HCX=HX*FLOAT(NX-1)/FLOAT(MX-1)
HCY=HY*FLOAT(NY-1)/FLOAT(MY-1)
HDX=HCX*XFCTR
HDY=HCY*YFCTR
C
---
DX=0.0
DY=0.0
DO 10 J=1,MY
CALL PLOT(DX,DY,3)
DX=XW
IF(MOD(J,2).EQ.0) DX=0.0
CALL PLOT(DX,DY,2)
DY=DY+HDY
10 CONTINUE
C
---
DX=0.0
DY=0.0
DO 20 I=1,MX
CALL PLOT(DX,DY,3)
DY=YW
IF(MOD(I,2).EQ.0) DY=0.0
CALL PLOT(DX,DY,2)
DX=DX+HDX
20 CONTINUE
CALL PLOT(0.0,0.0,3)
C
---
RETURN
END

```

```

C
*CONTLN
C
SUBROUTINE CONILN
C
** TO FIND STARTING POINT **
COMMON/COMALT/ALT(121,121)
COMMON/COMKSW/KSW(121,121)
COMMON/COMKXM/KXM
COMMON/COMDT1/X0,Y0,HX,HY,NX,NY,MX,MY,XW,YW
COMMON/COMCET/XFCTR,YFCTR,HXFC,HYFC
COMMON/COMSRH/IA,JA,IT,IT,KS,UA1,UA2,KV,IREF
COMMON/COMHIT/KH,HEIT(21)
COMMON/COMZHV/HV
C
---
HXFC=XW/FLOAT(NX-1)
HYFC=YW/FLOAT(NY-1)

```

```

      DO 50 I=1,NX
      DO 50 J=1,NY
50  KSW(I,J)=0
C  ---
      DO 10 K=1,KH
      KERR=0
      KV=K
      HV=HEIT(KV)
C  ---
      DO 20 KX=1,NX,KXM
      V=ALT(KX,1)-HV
      IF(V) 2,3,1
1    KG=1
      GO TO 4
C  * * *
2    KG=2
      GO TO 4
C  * * *
3    KG=3
4    CONTINUE
      IF(KSW(KX,1).NE.KV) GO TO 5
      IF(ALT(KX,2)-HV.LE.0.0) KG=2
5    CONTINUE
C  ---
      DO 30 KY=2,NY
      V=ALT(KX,KY)-HV
      IF(KSW(KX,KY).EQ.KV) GO TO 15
C  ---
      GO TO (6,8,21),KG
C  ** ALT(KX,1).GT.HV **
6    IF(V) 7,7,30
7    CONTINUE
      IREP=0
      DO 60 M=1,2
      IA=KX
      JA=KY-1
      GO TO (31,32),M
C  * * *
31   IF(KX.EQ.NX) GO TO 60
      IT=1
      KS=-1
      GO TO 33

32   IF(KX.EQ.1) GO TO 60
      IF(IREP.GE.2) GO TO 60
      IT=-1
      KS=1
      KSW(IA,JA)=0

33   JT=0
      UA1=ALT(IA,JA)
      UA2=ALT(IA,JA+1)
      ALX=HXFC*FLOAT(IA-1)
      RT=(UA2-HV)/(UA1-UA2)
      ALY=HYFC*(FLOAT(JA)+RT)
      KERR=1
      CALL PLOT(ALX,ALY,3)
      CALL PLOT(ALX,ALY,2)
      CALL SEARCH
60   CONTINUE
      KG=2
      GO TO 30
C  ** ALT(KX,1).LT.HV **
8    IF(V) 30,30,9
9    CONTINUE
      IREP=0
      DO 70 M=1,2
      IA=KX
      JA=KY
      GO TO (34,35),M

```

```

C * * *
34      IF(KX.EQ.NX) GO TO 70
        IT=1
        KS=1
        GO TO 36
C * * *
35      IF(KX.EQ.1) GO TO 70
        IF(IREP.GE.2) GO TO 70
        IT=-1
        KS=-1
        KSW(IA,JA)=0
36      JT=0
        UA1=ALT(IA,JA)
        UA2=ALT(IA,JA-1)
        ALX=HXFC*FLOAT(IA-1)
        RT=(UA1-HV)/(UA1-UA2)
        ALY=HYFC*(FLOAT(JA-1)-RT)
        KERR=1
        CALL_PLOT(ALX,ALY,3)
        CALL_PLOT(ALX,ALY,2)
        CALL_SEARCH
70      CONTINUE
        KG=1
        GO TO 30
C --- --- --- --- ---
15      GO TO (16,17,30),KG
C * * *
16      KG=2
        IF(KY.EQ.NY) GO TO 30
        IF(ALT(KY,KY+1)-HV.GT.0.0) KG=1
        GO TO 30

17      KG=1
        IF(V.LT.0.0) KG=2
        GO TO 30
C --- --- --- --- ---
21      IF(V) 23,24,22
22      KG=1
        GO TO 25
C * * *
23      KG=2
        GO TO 25
C * * *
24      KG=3
25      CONTINUE
C --- --- --- --- ---
30      CONTINUE
C --- --- --- --- ---
20      CONTINUE
C --- --- --- --- ---
        IF(KERR.EQ.0) WRITE(6,2001) HV
2001    FORMAT(16H (CONTLN) HEIT (,1PE9.2,15H) IS NOT FOUND.)
C --- --- --- --- ---
10      CONTINUE
        RETURN
        END

```

```

C      *SEARCH
C
C      SUBROUTINE_SEARCH
C      ** TO DRAW CONTOUR LINE **
C      COMMON/COMALT/ALT(121,121)

```

```

COMMON/COMKSW/KSW(121,121)
COMMON/COMDT1/XO,YO,HX,HY,NX,NY,MX,MY,XW,YW
COMMON/COMCFT/XFCTR,YFCTR,HXFC,HYFC
COMMON/COMSRH/IA,JA,IT,IT,KS,UA1,UA2,KV,IREF
COMMON/COMZHV/HV

C --- --- --- --- ---
LN=800
IREF=0
C --- --- --- --- ---
DO 10 L=2, LN
  IF(KSW(IA,JA).EQ.KV) GO TO 99
  IAV=IA+IT
  IF(IAV.LE.0) GO TO 98
  IF(IAV.GT.NX) GO TO 98
  JAV=JA+JT
  IF(JAV.LE.0) GO TO 98
  IF(JAV.GT.NY) GO TO 98
  VA1=ALT(IAV,JAV)
  IF(VA1-HV) 1,1,2
C --- --- --- --- ---
1      IREF=IREF+1
      RI=(UA1-HV)/(UA1-VA1)
      ALX=HXFC*(FLOAT(IA-1)+RT*FLOAT(IT))
      ALY=HYFC*(FLOAT(JA-1)+RT*FLOAT(JT))
      CALL PLOT(ALX,ALY,2)
      ITV=IT
      IT=-KS+JT
      JT=KS+ITV
      UA2=VA1
      IF(IREF.GE.4) GO TO 98
      GO TO 10
C --- --- --- --- ---
2      IREF=0
      ITV=KS+JT
      JTV=-KS+IT
      IAV=IAV+ITV
      JAV=JAV+JTV
      VA2=ALT(IAV,JAV)
      IF(VA2-HV) 3,3,4
C --- --- --- --- ---
3      RT=(VA1-HV)/(VA1-VA2)
      ALX=HXFC*(FLOAT(IA+IT-1)+RT*FLOAT(ITV))
      ALY=HYFC*(FLOAT(JA+JT-1)+RT*FLOAT(JTV))
      CALL PLOT(ALX,ALY,2)
      KSW(IA,JA)=KV
      IA=IA+IT
      JA=JA+JT
      UA1=VA1
      UA2=VA2
      GO TO 10
C --- --- --- --- ---
      ITV=KS+IT

      RT=(UA2-HV)/(UA2-VA2)
      ALX=HXFC*(FLOAT(IA+ITV-1)+RT*FLOAT(IT))
      ALY=HYFC*(FLOAT(JA+JTV-1)+RT*FLOAT(JT))
      CALL PLOT(ALX,ALY,2)
      KSW(IA,JA)=KV
      IA=IA+IT+ITV
      JA=JA+JT+JTV
      IT=ITV
      JT=JTV
      UA1=VA2
C --- --- --- --- ---
10 CONTINUE
C --- --- --- --- ---
GO TO 99
C * * *

```

```

98   KSW(IA,JA)=KV
99   CONTINUE
    CALL PLOT(ALX,ALY,3)
    RETURN
    END

```

C

```

SUBROUTINE ALTAL(FUNC,ROU)
COMMON/COMDT1/X0,Y0,HX,HY,NX,NY,MX,MY,XW,YW
COMMON/COMALT/ALT(121,121)
DO 10 I=1,NX
  X=X0+HX*FLOAT(I-1)
  DO 10 J=1,NY
    Y=Y0+HY*FLOAT(J-1)
10  ALT(I,J)=FUNC(X,Y,ROU)
    RETURN
    END

```


付録 2.

＜サイロ内の水平面穀温分布を求めるプログラム＞

```

C **** FILE NAME = SILO ****
  REAL K1,KA1,KA2,KA3,JVA,NANTYU,JSV,KEID01,KEID02,KEID0
  COMMON /EL1/TI(100,100),TAOUT(100),TAIR(100),JVA(100)
  COMMON EB,AIRT
  COMMON IY,IM,ID
  DIMENSION G(50),YUADT(12),SIGADT(12),YUBDT(12),SIGBDT(12)
  DIMENSION LIMIT(12),TEMP(366,25),EAA(4),EBB(4),PAINT(4)
  DATA LIMIT /31,28,31,30,31,20,31,31,30,31,20,31/
  DATA TEMP /9150*0.0/
  DATA EAA /0.23, 0.92, 0.40, 0.85/
  DATA EBB /0.52, 0.23, 0.20, 0.65/
  DATA PAINT /6H(SS41),15H(WHITE COLORED),
& 17H(ALLMINIUM PAINT),14H(DARK COLORED)/
  CHARACTER*20 HARE,KUMORI,AME,LTENKI,LOCATN,PAINT,LCOLOR
  DATA HARE,KUMORI /8H(KAISEI),16H(HARE OR KUMORI)/
  DATA AME/15H(KUMORI OR AME)/

C *** JMAX=(24,45,72,.....,288)+1 TO SURUKUTO ***
C
  IDAY=0
  IMAx=61
  JMAX=72
  KA1=43.0
  KA2=0.04
  KA3=43.0
  HIN=5.06
  HQUT=19.5
  THIN1=0.4E-2
  THIN2=70.0E-2
  XTHIN=THIN2+THIN2*0.2
  THIN3=5.0/100.0

C
  CR01=821.0
  CR02=4.0
  CR03=CR01
  A1=KA1/CR01
  A2=KA2/CR02
  A3=KA3/CR03
  CH=HQUT
  R1=6.750
  R2=R1+2.0*(THIN1+THIN2+THIN3)
  DRA=(R2-R1)/2.0

C
  NCOLOR=1
  EA=EAA(NCOLOR)
  EB=EBB(NCOLOR)
  LCOLOR=PAINT(NCOLOR)
  DT=0.2
  TANY=13.0
  TSTART=TANY
  TMAX=24.0

  IP=0
  XK1=1.0/(THIN1/KA1+THIN2/KA2+THIN3/KA3+1.0/HIN)
  XK11=1.0/(THIN1/KA1+THIN2/KA2+THIN3/KA3)
  XK12=HIN
  I1X=7422085
  I1X=7423085
  I2X=7423085
  KSTCP=100

C
C
2000 IF(THIN2.GT.XTHIN) GO TO 24
  READ(5,2000) LOCATN
  FORMAT(A15)
  READ(5,*) PSI1,PSI2,KEID01,KEID02
  READ(5,*) IY,IM,ID
  ISTART=ID
24 ID=ISTART
  IF((IFIX(FLOAT(IY)/4.0)*4).EQ.IY) LIMIT(2)=29
  PSI=(PSI1+PSI2/60.0)*3.1415927/180.0
  PSIPSI=(PSI1+PSI2/60.0)
  KEID0=(KEID01+KEID02/60.0)

```

```

C
  IF(1M.EQ.1) NDAY=10
  IF(1M.EQ.1) GO TO 23
  NDAY=10
  DO 22 I=1,1M-1
22  NDAY=NDAY+LIMIT(1)
23  CONTINUE
    IF(NDAY.GE.255) WRITE(6,3050)
3050  FORMAT(1H1//,20X,'*** NDAY<255 DE NAIKARA KEISAN DEKINAI ***')
    IF(NDAY.GE.255) STCP
    CALL SCLAR(NDAY,0,PSI,KEIDO,SNRISE,SUNSET,EX)
    NANTYU=(SNRISE+SUNSET)/2.0
C
C
C
  IF(THIN2.GT.ATHIN) GO TO 25
  READ(5,*) PAVE,PSIG
  WRITE(6,*) PAVE,PSIG
  DO 20 I=1,12
  READ(5,*) YUADT(I),SIGADT(I),YUBDT(I),SIGBDT(I)
  WRITE(6,*)YUADT(I),SIGADT(I),YUBDT(I),SIGBDT(I)
20  CONTINUE
25  CONTINUE
    YUA=YUADT(1M)
    SIGA=SIGADT(1M)
    YUB=YUBDT(1M)
    SIGB=SIGBDT(1M)
    UMIN=(2.0*YUA-YUB)
C
    RAMCRN=0.126E
    K1=RAMCRN
    CGCORN=0.484
    RCCORN=748.06
    DCCORN=RAMCRN/(CGCORN*RCCORN)
    DSI=6.28315/FLOAT(JMAX-1)

    DR=(R1/2.0)/FLOAT(IMAX-1)
C
1  CONTINUE
    IF(ID.GT.LIMIT(1M)) GO TO 11
    TIMEP=5.0
    IF(ID.EQ.7 .OR. ID.EQ.20 .OR. ID.EQ.30) TIMEP=1.0
    IF(ID.EQ.8) STOP
C
    I11=0
    CALL SCLAR(NDAY,0,PSI,KEIDO,SNRISE,SUNSET,EX)
    NANTYU=(SNRISE+SUNSET)/2.0
3  CONTINUE
    I11=I11+1
7  CONTINUE
    CALL NORRNS(YUA,SIGA,I1X,UAVE)
    CALL NORRNS(YUB,SIGB,I2X,UMAX)
    IF((UMAX-UAVE).LE.0.0) GO TO 7
    IF(IDAY.EQ.0) UAVE=YUA
    IF(IDAY.EQ.0) UMAX=YUB
C
    CALL GAIKI(PSI,KEIDO,UAVE,UMAX,G,UMIN,SNRISE,SUNSET,NDAY,I11,TEMP)
    IF(I11.EQ.1) GO TO 3
    AIRT=TEMP(NDAY,(IFIX(TANY)+1))
    IF((IFIX(TANY)+1).GE.25) AIRT=TEMP((NDAY+1),1)
C
C
C
    CALL TENKI(I1X,ITENKI,P,PAVE,PSIG)
    IF(ITENKI.EQ.1) LTENKI=HARE
    IF(ITENKI.EQ.2) LTENKI=KUMORI
    IF(ITENKI.EQ.3) LTENKI=AME
C
    IF(IDAY.NE.0) GO TO 2
    IF(1M.EQ.2) TCORN=27.4
    IF(1M.EQ.5) TCORN=26.9
C
    DO 333 IA=1,IMAX+1
    DO 333 JA=1,JMAX+1
    TI(IA,JA)=TCORN
    TAOUT(JA)=TCORN
333 CONTINUE
    TC=TI(1,1)
    DO 5 J=2,JMAX
    TI(1,J)=TC
5  CONTINUE
C

```

```

C
  2 CONTINUE
    WRITE(6,3000)
    WRITE(6,3005) LOCATN,PSIPSI,KEID0,D
    WRITE(6,3040) IY,IM,ID,SNRISE,SUNSET,NANTYU,LTENKI,P
    WRITE(6,3010) R1,R2,DRA,K1,KA1,HOUT,XKT
    WRITE(6,3020) IMAX,JMAX,TIMEP,TMAX,DT,DR,DSI
    WRITE(6,3030) RAMCRN,CGCORN,ROCORN,DCORN
  3000 FORMAT(1H1////10X,'TWO DIMENSIONAL SIMULATION OF ',
    & 'TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SILO '////)
  3005 FORMAT(1H0,20X,'LOCATION= ',A15,5X,'PSI= ',F6.2,' (DEG)',5X,
    & 'KEID0= ',F7.2,' (DEG)',5X, 'DELTA (D)= ',F8.5,' (RAD)')
  3010 FORMAT(1H0,20X,'R1= ',F10.5,' (M)',5X,'R2= ',F10.5,' (M)',
    & 5X,'DRA= ',F10.5,' (M)'//1H,20X,'K1= ',F10.5,' (KCAL/(M.HR.C))',
    & 5X,'KA1= ',F10.5,' (KCAL/(M.HR.C))',5X,'HOUT= ',F10.5,
    & ' (KCAL/(M**2.HR.C))'//21X,'XKT= ',F10.5,' (KCAL/(M**2.HR.C))')
  3020 FORMAT(1H0,20X,'IMAX= ',I3,' (-)',5X,'JMAX= ',I3,' (-)',
    & 5X,'TIMEP= ',F10.5,' (H)',5X,'TMAX= ',F10.5,' (HR)'//
    & 1H,20X,'DT= ',F10.7,' (HR)',5X,'DR= ',F10.5,' (M)',
    & 5X,'DSI= ',F10.5,' (RAD)')
  3030 FORMAT(1H0,20X,'RAMCRN= ',F10.5,' (KCAL/(M.HR.C))',
    & 5X,'CGCORN= ',F10.5,' (KCAL/(KG.C))',5X,'ROCORN= ',F10.5,
    & ' (KG/M**3)'//21X,'DCORN= ',F10.7,' (M**2/HR)')
  3040 FORMAT(1H0,20X,14,'.',12,'.',12,'.',3X,'SNRISE= ',F6.2,' (HR)',
    & 3X,'SUNSET= ',F6.2,' (HR)',3X,'NANTYU= ',F6.2,' (HR)',3X,'TENKI= ',
    & A16,' P= ',F7.4)
    TI(1,J)=TC
    K=0
    TIME1=0.0
    TIME2=0.0
C
  CALL PRINT(TANY,IMAX,JMAX,TC,IP,THIN2,EA,PAINT)
  IP=IP
C
  10 CONTINUE
    DO 6 J=2,JMAX
      6 TI(1,J)=TC
      TIME1=TIME1+DT
      TIME2=TIME2+DT
C
C
    TANY=TANY+TIME1
    TIME1=0.0
C
C
    DO 500 J=2,JMAX
      JJJ=J
      JJJMAX=JMAX
C
    CALL SUN(JJJ,JJJMAX,KEID0,EX,SNRISE,SUNSET,NANTYU,TANY,JSV,
    & D,PSI,P,KSTOP)
    IF(KSTOP.EQ.0) STOP
C
    IMAXXX=IMAX-1
    JMAXXX=JMAX-1
C
    LT=IFIX(TANY)+1
    IF(LT.GE.25) GO TO 1111
    IF(LT.EQ.24) TEMP(NDAY,LT+1)=TEMP(NDAY+1,1)
    IF(TEMP(NDAY,LT).GE.TEMP(NDAY,LT+1)) AIRT=TEMP(NDAY,LT+1)
    & +(1.0-TANY+FLOAT(IFIX(TANY)))*(TEMP(NDAY,LT)-TEMP(NDAY,LT+1))
    IF(TEMP(NDAY,LT).LT.TEMP(NDAY,LT+1)) AIRT=TEMP(NDAY,LT)+(TANY-FLOAT
    & (IFIX(TANY)))*(TEMP(NDAY,LT+1)-TEMP(NDAY,LT))
    GO TO 1112
  1111 AIRT=TEMP(NDAY+1,1)
  1112 CONTINUE
C
    DO 620 IJK=2,JMAX
      620 TAIR(IJK)=AIRT
      RT=JVA(J)+JSV
      UA=AIRT
      JSV=JSV
      IO=TAOUT(J)
C
    IF(THIN2.LT.0.01E-3) GO TO 1114
    IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) GO TO 1113
C

```

```

C
  XM1=KA2/THIN2
  XM2=RAMCRN/DR
  P1=A2*DT/THIN2**2
  P2=DCDRN*DT/DR**2
  XK=XM1/P1+XM2/P2
  TI(IMAX,J)=2.0/XK*(XM1*TAOUT(J)+XM2*TI(IMAX-1,J)
&      +(XK/2.0-(XM1+XM2))*TI(IMAX,J))
  UM=TI(IMAX,J)
  XKTXT=KA2/THIN2
  KKKKKK=0
1113 IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) XKTXT=XKT1
  IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) UM=TCORN
  IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) KKKKKK=99999
  IF(KKKKKK.EQ.0) GO TO 1115
  TI(IMAX,J)=TCORN
  GO TO 1115

C
1114 CONTINUE
  UM=TI(IMAX-1,J)
  XKTXT=RAMCRN/DR
  KKKKKK=0
  IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) XKTXT=XKT1
  IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) UM=TCORN
  IF(IDAY.EQ.0 .AND. (TANY-DT-DT/2.0).LE.TSTART) KKKKKK=99999
  IF(KKKKKK.EQ.0) GO TO 1115
  TI(IMAX,J)=TCORN

C
C
1115 IF(UM.GT.T0) XKTXT=XKTXT*(-1.0)
  CALL HYOMEN(UA,RT,UM,T0,XKTXT,CH,AIRT,JSV ,KZ,EA,EB)
  IF(KZ.GT.50) STOP

C
  TAOUT(J)=T0
  IF(THIN2.LT.C.C1E-3) TI(IMAX,J)=T0
500 CONTINUE

C
630 CONTINUE
  DTDCRN=DT*DCDRN
  II=IMAX-1
  DO 1000 I1111=2,II
  I=IMAX-I1111+1
  JMAXXY=JMAX+1
  TI(I,JMAXXY)=TI(I,2)
  TI(I,1)=TI(I,JMAX)
  DO 1001 J=2,JMAX
  IXY=I+1
  IXX=I-1
  JXY=J+1
  JXX=J-1
  TI(I,J)=TI(I,J)+ DTDCRN*((TI(IXX,J)-2.0*TI(I,J)+TI(IXY,J))/DR**2+
& (TI(IXY,J)-TI(I,J))/FLOAT(I-1)/DR**2+(TI(I,JXY)-2.0*TI(I,J)+
& TI(I,JXX))/(DSI*DR*FLOAT(I-1))**2)
  IF(TI(I,J).GT.100.0 .OR. TI(I,J).LT.-40.0) WRITE(6,*) TI(I,J),
& I,J,IXY,IM,IO,TANY,UM,TU
1001 CONTINUE
1000 CONTINUE

C
  JP=(JMAX-1)/4
  JC=JP+2
  TC=TI(1,2)
  TC1=TC+ DTDCRN*((TI(2,2)+TI(2,JP*1)+TI(2,JP*2)
& +TI(2,JP*3)-4.0*TC))/DR**2.0
  TC2=TC+ DTDCRN*((TI(2,JQ)+TI(2,JQ+JP)+TI(2,JQ+JP*2)
& +TI(2,JQ+JP*2)-4.0*TC))/DR**2.0
  TC=(TC1+TC2)/2.0
  IF((TIME2+DT/100.0).GE.TIMEP) GO TO 1335
  IP=IP
  IF((TANY+DT/100.0).GE.TMAX) GO TO 30
  GO TO 10
1335 CONTINUE
  CALL PRINT(TANY,IMAX,JMAX,TC,IP,THIN2,EA,PAINT)
  TIME2=C.0
  IF((TANY+DT/100.0).GE.TMAX) GO TO 31
  GO TO 10
30 CALL PRINT(TANY,IMAX,JMAX,TC,IP,THIN2,EA,PAINT)
31 CONTINUE
  IDAY=IDAY+1

```

```

      ID=ID+1
      NDAY=NDAY+1
      TANY=C.0
      GO TO 1
11  STOP
      END
C
C
C
      SUBROUTINE SUN(J,JMAX,KEIDD,EX,SNRISE,SUNSET,NANTYU,TIME,JSV,
      A      D,PSI,P,KSTCP)
C  JVA(J)  EVALUATION OF JVA(J)
C
C      JVA  ENCHOKUMEN NO CHOKUTASTU NISSHYA(KCAL/M**2.HR)
C      JD   HOKUSAI NISSHYARYO (KCAL/M**2.HR)
C      P    TAIKI NO TOUKARISTU ; R
C      PSI  IDG ; D      SEKII , T
C      MUKI NO KAKUDO , H TAYCOKUDO , A
C      TANY KEISAN SURU JIKOKU (MIN)
      REAL JD ,JVA ,NANTYU,JSV,KEIDD
      DIMENSION ALPHA(100)
      COMMON /BL1/II(100,100),TAOUT(100),TAIR(100),JVA(100)
      COMMON EB,AIRT
      COMMON IY,IM,ID
      PI=3.141592650+0
      JD=1167.0
      R=0.9836
      TANY=TIME+((KEIDD-135.0)/15.0)-EX
      TANY : KEISAN SOKU TAIYO JIKOKU (HOUR)
      ALPHA(J)=FLOAT(J-2)*2.0*PI/FLOAT(JMAX-1)
      IF(TANY.LT.SNRISE) GO TO 443
      IF(TANY.GT.SUNSET) GO TO 443
      GO TO 1275
443  JVA(J)=0.0
      JSV=0.0
      RETURN
1275 CONTINUE
      T=TANY*15.0*PI/180.0-PI
      ALPHA2=TANY*18.0
      SINH=SIN(PSI)*SIN(D)+COS(PSI)*COS(D)*COS(T)
      IF(SINH.LE.C.0) GO TO 443
      H=ASIN(SINH)
      COSA=(SIN(H)*SIN(PSI)-SIN(D))/(COS(H)*COS(PSI))
      A=ACOS(COSA)
      IF(TANY.LT.NANTYU) A=-A
C
      JVA(J)=(JD*P**((1.0/SINH)+COS(H)*COS(A-ALPHA(J)))/R**2.0
      JSV=0.5*JD*SINH*(1.0-P**((1.0/SINH)))/(1.0-1.4*ALOG(P))*0.5
      IF(JVA(J).GT.100.0) WRITE(6,*) JVA(J),J,TANY,T,PSI,D,SINH,H
      IF(JVA(J).GT.1000.0) KSTOP=0
      IF(JVA(J).GT.1000.0) RETURN
      IF(TANY .GE.0.0.AND. TANY.LE.6.0) GO TO 111
122  IF(TANY .GT.6.0.AND. TANY .LE.12.0) GO TO 112
123  IF(TANY .GT.12.0 .AND. TANY .LE.18.0) GO TO 113
124  IF(TANY .GT.18.0 .AND. TANY .LE.24.0) GO TO 114
125  IF(JVA(J).LT.0.0) JVA(J)=0.0
      RETURN
111  ALPHA1=ALPHA(J)-PI/2.0
      ALPHA2=ALPHA(J)+PI/2.0
      IF(ALPHA(J) .GE.0.0 .AND. ALPHA(J).LE.ALPHA1) JVA(J)=0.0
      IF(ALPHA(J) .GE.ALPHA2 .AND. ALPHA(J).LE.2.0*PI) JVA(J)=0.0
      GO TO 122
112  ALPHA1=ALPHA(J)-PI/2.0
      ALPHA2=ALPHA(J)-3.0*PI/2.0
      IF(ALPHA(J).GE.ALPHA2.AND.ALPHA(J).LE.ALPHA1) JVA(J)=0.0
      GO TO 123
113  ALPHA1=ALPHA(J)+3.0*PI/2.0
      ALPHA2=ALPHA(J)+PI/2.0
      IF(ALPHA(J) .GE.ALPHA2.AND.ALPHA(J).LE.ALPHA1) JVA(J)=0.0
      GO TO 124
114  ALPHA1=ALPHA(J)-PI/2.0
      ALPHA2=ALPHA(J)+PI/2.0
      IF(ALPHA(J).GE.0.0.AND.ALPHA(J).LE.ALPHA1) JVA(J)=0.0
      IF(ALPHA(J).GE.ALPHA2.AND.ALPHA(J).LE.2.0*PI) JVA(J)=0.0
      GO TO 125
      END

```

```

C
C
C HYOMEN UNDO NO KEISAN
SUBROUTINE HYOMEN(UA,KT,UM,TO,XKT,CH,AIRT,SSV,K,EA,EB)
  REAL JSV
  JSV=SSV
  EE=0.92
  FIE=0.5
  FIA=0.5
  A1=0.51
  B1=0.0076
  D=4.48E-8
  F1=16.0
  TAA=AIRT+273.16
  K=0
  TC=UA+(KT-JSV)*EE/CH
5  TOG=TC+273.16
  TO=(-EA*D*(TOG**4)+EA*FIA*D*(TAA**4)*(A1+B1*SQRT(F1))
  &+EA*EE*FIE*D*(TAA**4)+EB*RT+XKT*UM+CH*UA)/(XKT+CH)
  XT=ABS(TC-TO)
  IF(XT-0.2) 3,3,4
4  TC=TO
  K=K+1
  IF(K.GT.50) GO TO 10
  GO TO 5
3  TO=TC
  RETURN
10 WRITE(6,100) K
100 FORMAT('/// TRIAL AND ERROR GA YOKUNAI !! K=',I4)
  RETURN
END

```

```

C
C
C OUT PUT NO PRINT
SUBROUTINE PRINT(TANY,IMAX,JMAX,TC,IP,THIN2,EA,PAINT)
  DIMENSION IX(100)
  COMMON /BL1/TI(100,100),TACUT(100),TAIR(100),JVA(100)
  COMMON EB,AIRT
  COMMON IY,IM,IO
  CHARACTER*20 PAINT
  REAL JVA
  WRITE(6,2260)
2260 FORMAT(1H1,10X)
  IP=IP+1
  DO 2265 I=2,IMAX
2265 IX(I)=1
  LL=2
1110 LLL=LL+4*11
  IF(LLL.GE.50) LLL=IMAX
  TANY=TANY
  TC=TC
  WRITE(6,2665) IY,IM,IO,TANY,TC,THIN2,EA,EB,PAINT
3665 FORMAT(1H //10X,I4,'.',I2,'.',I2,'.',
  & /10X,' JIKOKU ',F5.2,' (HOUR)',
  &5X,'CENTER TEMPERATURE= ',F7.2,' (°C)',7X,'THIN2= ',F6.3,' (M)',
  &2X,'EA= ',F5.2,2X,'EB= ',F5.2,2X,A17)
  IF(LLL.GE.IMAX) GO TO 1130
  WRITE(6,2330) (IX(I),I=LL,LLL,4)
2330 FORMAT(/14X,12(' I=',I2,' '))
  DO 1120 J=2,JMAX,2
  WRITE(6,3667) J,(TI(I,J),I=LL,LLL,4)
3667 FORMAT(1X,'TI(I,',I3,')',3X,12F8.2)
1120 CONTINUE
  LL=LLL+4
  GO TO 1110
1130 WRITE(6,2340) (IX(I),I=LL,IMAX)
2340 FORMAT(/14X,12(' I=',I2,' '))
  &' TACUT AIRT JVA')
  DO 1150 J=2,JMAX,2
  WRITE(6,2668) J,(TI(I,J),I=LL,IMAX),TACUT(J),AIRT,JVA(J)
3668 FORMAT(1X,'TI(I,',I3,')',3X,15F8.2)
1150 CONTINUE
  RETURN
END

```

```

C
C
      ELCK DATA
      REAL JVA
      COMMON /BL1/TI(100,100),TAOUT(100),TAIR(100),JVA(100)
      DATA TI/10000*20.0/,TAOUT/100*20.0/,TAIR/100*20.0/,JVA/100*0.0/
      END

C
C
      SUBROUTINE RAN(IIX,V)
      IIX=IIX*48829125
      V=FLOAT(IIX)/2147483648.0
      RETURN
      END

C
C
      SUBROUTINE SOLAR(NDAY,D,PSI,KEIDO,SNRISE,SUNSET,EX)
      REAL KEIDO
      PI=3.14159267
      OMEGA=2.0*PI*FLOAT(NDAY)/366.0

C
      DX=0.2622122-23.24762*COS(OMEGA+0.1532310)
      & -0.2368905*COS(2.0*OMEGA+0.2070988)
      & -0.1852646*COS(3.0*OMEGA+0.6201293)
      D=DX*PI/180.0
      EX=-0.0002786409+C.1227715*COS(OMEGA+1.4983111)
      & -0.1654575*COS(2.0*OMEGA-1.261546)
      & -0.005252830*COS(3.0*OMEGA-1.157100)

C
      TIME1=ACOS(-1.0*TAN(D)*TAN(PSI))
      TIME2=-1.0*TIME1

C
      SNRISE=(180.0*(TIME2+PI))/(15.0*PI)
      SUNSET=(180.0*(TIME1+PI))/(15.0*PI)

C
      SNRISE=SNRISE-(KEIDO-135.0)/15.0-EX
      SUNSET=SUNSET-(KEIDO-135.0)/15.0-EX

C
      RETURN
      END

C
C
      SUBROUTINE GAIKI(PSI,KEIDO,UAVE,UMAX,G,UMIN,SNRISE,SUNSET,NDAY,
      & I11,TEMP)
      DIMENSION G(50),TEMP(366,25)
      REAL NANTYU
      INTEGER T,DT
      DT=1
      NANTYU=(SNRISE+SUNSET)/2.0
      TR=FLOAT(IFIX(SNRISE+C.5-1.0))
      K1=IFIX(TR)
      N=1
      TMT=FLOAT(IFIX(NANTYU+0.5+2.0))
      K2=IFIX(TMT)
      T=FLOAT(N)*DT
      6 CONTINUE
      U1=(UMAX+UMIN)/2.0
      UAA=(UMAX-UMIN)/2.0
      3 G(T)=U1-UAA*COS(3.1415927*(T-TR)/(TMT-TR))
      N=N+1
      T=FLOAT(N)*DT
      IF(T.LE.TMT) GO TO 3
      KDAY=NDAY+1

C
      CALL SOLAR(KDAY,D,PSI,KEIDG,SNRISE,SUNSET,EX)

C
      TR2=FLOAT(IFIX(SNRISE+C.5-1.0))
      NANTYU=(SNRISE+SUNSET)/2.0
      TR2=TR2+24.0
      AT=UAVE*24.0
      A1=U1*(TMT-TR)
      A2=AT-A1
      U2=A2/(TR2-TMT)
      UMIN=2.0*U2-UMAX

```

```

C
4  G(I)=U2+(UMAX-U2)*COS(3.1415927*(T-TMT)/(TR2-TMT))
   N=N+1
   I=FLOAT(N)*DT
   IF(T.LE.TR2) GO TO 4
   K3=IFIX(TR2)
   IF(111.EQ.1) GO TO 100
   DO 11 K=K2,K3
     I=K
     IF(K.GT.24) GO TO 110
     TEMP(NDAY,I)=G(K)
     IF(K.LE.24) GO TO 11
110  I=K-24
     TEMP(NDAY+1,I)=G(K)
11  CONTINUE
   DO 20 I=1,24
20  G(I)=TEMP(NDAY,I)
     RETURN
100  CONTINUE
     DO 10 K=K1,K2
       I=K
10  TEMP(NDAY,I)=G(K)
     RETURN
   END

```

```

C
C
SUBROUTINE TENKI(IIX,I,P,PAVE,PSIG)
10  CALL NORRNS(PAVE,PSIG,IIX,P)
   IF(P.GT.0.819 .OR. P.LT.0.100) GO TO 10
   IF(P.GE.0.7760 .AND. P.LE.0.6190) I=1
   IF(P.GE.0.4032 .AND. P.LT.0.7760) I=2
   IF(P.GE.0.1000 .AND. P.LT.0.4032) I=3

```

```

C
P=P

```

```

C
RETURN
END

```

```

/*
//LKED.SYSLIB DD DSN=SYS1.FORTLIB,DISP=SHR
//          DD DSN=SYS1.SSL,DISP=SHR
//GO.FTC5FC01 DD *
KUSHIRO
42.0 59.0 144.0 24.0
1931 2 1
0.714 0.0669
-6.8 1.9 -1.4 1.5
-6.4 1.6 -1.2 1.2
-2.3 1.1 1.9 0.8
3.0 0.8 7.2 1.0
7.1 1.1 11.2 1.2
10.9 1.1 14.6 1.2
15.2 1.4 18.8 1.4
17.9 1.4 21.5 1.5
15.2 1.1 19.3 1.1
9.7 0.8 14.7 0.8
3.4 1.1 8.2 1.1
-2.9 1.6 1.4 2.0
/*
//

```


付録3、

< 2次反応定数 k_2 を求める プログラム >

```

C ***** FILE NAME=XOUKI.CNTL.FORT77 *****
  DIMENSION TEMP(50)
  COMMON ALPHA,BETA,B,K,Q,TSI
  DCUELE PRECISION GAMMA,ALPHA,SAMPLE,FCT
  REAL MCH,MCL
  REAL X,K2
  EXTERNAL FCT
C
  READ(5,101) SAMPLE
101 FORMAT(A8)
  WRITE(6,201)SAMPLE
201 FORMAT(1H //' ' ,A8, '//')
  READ(5,*)MCH
  READ(5,*)MCL
  WRITE(6,202)MCH,MCL
202 FORMAT(1H //' MCH=',F7.3,' MCL=',F7.3)
  READ(5,*) TSIH
  READ(5,*) TSIL
  READ(5,*) BETA
  READ(5,*) Q
  READ(5,*) B
  READ(5,*) YH
  READ(5,*) YL
  WRITE(6,210)TSIH,TSIL,YH,YL
210 FORMAT(1H //' TSIH=',F7.3,' TSIL=',F7.3,' YH=',F7.3,' YL=',
+ F7.3)
  WRITE(6,220)BETA,Q,B
220 FORMAT(1H //' BETA=',E12.5,' Q=',E12.5,' B=',E12.5)
  TSIH=TSIH+273.16
  TSIL=TSIL+273.16
C
  KK=C
C
  1 KK=KK+1
  DO 12 I=1,50
12 TEMP(I)=-1.0
  N=0
  DO 10 I=1,50
  READ(5,*) TEMP(I)
  IF(TEMP(I) .LE. 0.0) GO TO 51
  TEMP(I)=TEMP(I)+273.16
  N=N+1
10 CONTINUE
C
  51 IF(KK.EQ.2) GO TO 1006
  READ(5,*) ATIME
  READ(5,*) ATEMP
  A=E/6.0
  ATEMP=ATEMP+273.16
  XL=TEMP(1)
  TSI=TEMP(1)
  XU=ATEMP
  EPS=0.0
  X=ALOG(YL/YH)/(1.0/TSIH-1.0/TSIL)
C
  ALPHA=1.0
C
  CALL AQCE(XL,XU,FCT,0.01,0.01,15,511,YYY,EPS,NUMB,ICON)
  WRITE(6,1004)
  WRITE(6,2000) ICON,YYY,EPS
2000 FORMAT(1H //' ICON=',I5,' (YYY=',E12.5,' EPS=',E12.5,' )')
  IF(ICON .EQ. 30000) STOP
  GAMMA=YYY/(Q/(6.0*BETA))/ATIME
  K2=GAMMA*EXP(-1.0*K/XU)
  ALPHA=Q*GAMMA/(6.*BETA)
  PRINT *, ' ALPHA=', ALPHA
1004 FORMAT(1H // '//,5X,' *** PREDICTION START *** ')
  WRITE(6,1002) SAMPLE,K,GAMMA,B,A,K2,ALPHA
1002 FORMAT(1H //' K=',F10.3,' GAMMA=',E12.5,' B=',E12.5,
+ ' A=',E12.5/4X,' K2=',E10.3,' ALPHA=',E12.5)
C
1006 CONTINUE
C

```

```

WRITE(6,1002)
DO 20 I=1,N
  TSI=TEMP(1)
  XL=TSI
  XU=TEMP(I)
C
  EPS=C.C
C
  CALL AQCE(XL,XU,FCT,0.01,0.01,15,511,Y,EPS,NUMB,ICON)
  K2=GAMMA*EXP(-1.*K/XU)
  XU=XU-273.16
1003 FORMAT(1H /,'  ICON',5X,'TIME(HOUR)',6X,'  XU (''C)'',',      EPS',
  & 7X,'K2',8X,'GAMMA',4X,'ALPHA')
  WRITE(6,1001)  ICON,Y,XU,EPS,K2,GAMMA,ALPHA
1001  FORMAT(1H ,15,2F15.5,3X,E12.5,F7.1,E10.3,E10.3)
  IF(ICON .EQ. 30000) WRITE(6,1005)
1005  FORMAT(1H ///,10X,'*** STOPPED BECAUSE ICON=30000 ***')
  IF(ICON .EQ. 30000) STOP
  IF(Y.GE.100.C) GO TO 13
  IF(Y.LT.0.) GO TO 13
20  CONTINUE
C
13  IF(KK.EQ.1) GO TO 1
C
  STOP
  END
C
C
C
  FUNCTION FCT(X)
  COMMON ALPHA,BETA,B,K,Q,TSI
  DOUBLE PRECISION ALPHA,FCT
  REAL K
  FCT=1./((ALPHA*EXP(-1.*K/X))*(E-(X-TSI)*BETA/Q)**2)
  RETURN
  END

```

付録4.

＜水蒸気拡散による結露量の計算式の誘導＞

第4章 (4.4.2) の STEFAN の考え方と連続の式より,

$$Q_w = - \frac{A \cdot \gamma_v}{c \cdot \gamma_a} \frac{dP_v}{dl} \quad (4-6)$$

気体の状態式より

$$P_a = \frac{\gamma_a}{M_a} R \cdot T \quad (4-7)$$

これを (4-6) 式に代入すると,

$$Q_w = - \frac{A \cdot \gamma_v \cdot R \cdot T}{c \cdot P_a \cdot M_a} \frac{dP_v}{dl}$$

これを变形すると

$$Q_w = - \frac{A \cdot M_a \cdot \gamma_a (R \cdot T)^2}{R \cdot T \cdot c \cdot P_a \cdot M_a^2} \frac{dP_v}{dl}$$

(4-3) 式より $P_a = P - P_v$

$$\begin{aligned} \therefore Q_w &= - \frac{A \cdot M_a}{R \cdot T} \frac{\gamma_v (R \cdot T)^2}{c \cdot M_a^2 (P - P_v)} \frac{dP_v}{dl} \\ &= - \frac{A \cdot M_a}{R \cdot T} \frac{\gamma_v (R \cdot T)^2}{c \cdot M_a^2 \cdot P} \frac{P}{P - P_v} \frac{dP_v}{dl} \end{aligned}$$

ここで 水蒸気拡散係数 $D \text{ (m}^2/\text{hr)} = \frac{\gamma_v (R \cdot T)^2}{c \cdot M_a^2 \cdot P}$ とすると,

$$Q_w = - \frac{A \cdot Ma \cdot P}{R \cdot T} D \frac{1}{P - P_v} \frac{dP_v}{dl} \quad (4-8)$$

(4-8) 式を境界条件 ($l=0$ で $P_v = P_{vg}$, $l=l$ で $P_v = P_{vs}$) を用いて解くと,

$$\int Q_w dl = \int_{P_{vg}}^{P_{vs}} - \frac{A \cdot Ma \cdot P}{R \cdot T} D \frac{1}{P - P_v} dP_v$$

$$Q_w \cdot l = \frac{A \cdot Ma \cdot P}{R \cdot T} D \left[\ln(P - P_v) \right]_{P_{vg}}^{P_{vs}}$$

$$= \frac{A \cdot Ma \cdot P}{R \cdot T} D \ln \left(\frac{P - P_{vs}}{P - P_{vg}} \right)$$

$$\therefore Q_w = \frac{A \cdot Ma}{R \cdot T} D \frac{P}{l} \ln \left(\frac{P - P_{vs}}{P - P_{vg}} \right) \quad (4-10)$$

主な使用記号

A	表面積	m^2
a	糖の反応量	$kmol/m^3$
b	容器内酸素濃度	$kmol/m^3$
C_g	穀物の比熱	$kcal/kg \cdot ^\circ C$
D	拡散係数	m^2/hr
D_g	穀物の温度伝導率	m^2/hr
J_0	太陽常数 (=1167)	$kcal/m^2 \cdot hr$
k_2	2次反応定数	$1/hr$
l	ヘッドスペースの高さ	m
m	結露量	kg
N	微生物増殖時の穀温上昇速度	$^\circ C/hr$
n	換気回数	$1/hr$
Q	発生熱量	$kcal$
Q_a	換気量	m^3/hr
q	グルコースの反応熱量	$kcal/kmol$
R	ガス常数	$(kg/m^3) \cdot m^3 / kg \cdot ^\circ K$
R_1, R_2	N に対する S_1 および S_2 の比	(-)
r	分割格子点での半径方向の分割距離	m
S_1, S_2	気象条件および呼吸熱による穀温上昇速度	$^\circ C/hr$

s	分割格子点での円周方向の分割角度	rad
T	絶対温度	$^{\circ}\text{K}$
t	時間	hr
V	容積	m^3
v	容器容積に対するヘッドスペース部の空間率	(-)
W	水蒸気発生量	g/hr
w	水分	% - w.b.
X	任意の時間での糖の反応量	kmol/m^3
α_c	対流熱伝達率	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$
β	穀物の熱容量	$\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{K}$
η	コロニー増殖率	(-)
θ	温度	$^{\circ}\text{C}$
λ_g	穀物の熱伝導率	$\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$
ρ	相関係数	(-)
ρ_g	穀物のみかけの比重量	kg/m^3
σ_i	ヘッドスペース部内容積絶対湿度	g/m^3
σ_o	外気容積絶対湿度	g/m^3
ϕ	空げき率	(-)

参 考 文 献

- (1) 亀高正夫 (1970) : 飼料の実際知識, 東洋経済新報社, 102- 197
- (2) 大成清 (1975) : ブロイラー用飼料の配合設計と飼養標準 (1) 畜産の研究, 29 (1), 55- 59
- (3) 農林省大臣官房企画室編 (1974) : 世界食糧需給予測, 農林統計協会, 74- 75
- (4) 前田道雄 (1979) : 家畜飼料の需給, 熱帯農業, 23 (1) , 28- 34
- (5) 森崎守夫 (1976) : メイズ・マイロの備蓄構想とそのシステム, 食品工業, 1(下) 50- 55
- (6) 全農開発・資材部 (1973) : カントリーエレベータの手引き, 全農開発・資材部, 212-240 , 275-287
- (7) SUTER.D.A. and B.L.CLARY.(1973): Heat of Respiration of High Moisture Spanish Peanuts. Transactions of the ASAE, 16(3), 516-519
- (8) HOWE.R.W.(1962): A Study of the Heating of Stored Grain Caused by Insects. Ann.Appl.Biol, 50, 137-158
- (9) EIGHME.L.E.(1966): Relationships of Insects to Hot Spots in Stored Wheat. J.Econ.Entomol, 59(3), 564-569
- (10) 緒方邦安 (1977) : 青果保蔵汎論, 建帛社, 34- 56
- (11) 前川孝昭・中野和弘・山沢新吾・田中英則 (1980) : 断熱密閉容器における農産物の温度上昇の予測, 農業施設, 11 (1), 31-35
- (12) CHRISTENSEN.C.M.(1974): Storage of Cereal Grains and their Products. American Association of Cereal Chemists, Inc. St.Paul, Minnesota, 158-192

- (13) MILNER.M., C.M.CHRISTENSEN. and W.F.GEDDES.(1947): Wheat Respiration in Relation to Moisture Content, Mold Growth, Chemical Deterioration, and Heating. Cereal Chemistry, 24, 182-199
- (14) MILNER.M., C.M.CHRISTENSEN and W.F.GEDDES.(1947): Influence of Certain Mold Inhibitors on Respiration of Moist Wheat. Cereal Chemistry, 24, 507-517
- (15) CHRISTENSEN.C.M., J.H.OLAFSON and W.F.GEDDES(1949): RELATIONS of Molds in Moist Stored Cotton Seed to Increased Production of Carbon Dioxide, Fatty Acids, and Heat. Cereal Chemistry, 26, 109-128
- (16) 宮川金二郎 (1980) : 食品腐敗の熱測定, 日本食品工業学会誌, 27 (1), 569-572
- (17) WALKER.I.K.(1967): The Role of Water in Spontaneous Combustions of Solids. Fire Res. Abstr .Rev.9 .5-22
- (18) 鶴田理 他 (1978) : カビ着生に伴うトウモロコシ穀粒の発熱, 飼料用穀類等の備蓄に関する研究, 農林水産技術会議事務局, 23- 25
- (19) 椿啓介 (1978) : 好高温性と耐高温性カビの生育温度, 飼料用穀類等の備蓄に関する研究, 農林水産技術会議事務局, 18- 22
- (20) OHYAMA.Y.and S.MASAKI.(1969): Studies on Various Factors Affecting Silage Fermentation IV. Effect of Protein Addition at Ensiling on the Quality of Silage. Jap.J.Zootech.Sci, 40(3), 109-115

- (21) OHYAMA.Y., S.MASAKI. and S.HARA.(1975): Factors Influencing Aerobic Deterioration of Silages and Changes in Chemical Composition after Opening Silos. J.Sci.Fd Agric, 26, 1137-1147
- (22) 大山嘉信 (1976) : サイレージの二次発酵とその対策, 畜産の研究, 30 (6), 772- 776
- (23) 大山嘉信・杵木茂彦 (1971) : サイロ開封後のサイレージの変敗, 日草誌, 17 (3), 176- 183
- (24) 原慎一郎・大山嘉信 (1979) : どうもろこしサイレージの好気的変敗と微生物相—プロピオン酸の変敗防止効果との関連, 日畜会報, 50 (5), 288- 295
- (25) 原慎一郎・大山嘉信 (1979) : どうもろこしサイレージの好気的変敗に関与する酵母および糸状菌—カプロン酸および塩酸添加による変敗防止効果との関連, 日畜会報, 50 (6), 375- 385
- (26) 鋼材倶楽部鉄鋼製品普及委員会編 (1976) : 鋼製サイロ, 鋼材倶楽部, 6- 9
- (27) MUIR.M.E.(1969):Temperature in Grain Bins, Annual Meeting CSAE
- (28) CONVERSE.H.H.(1968): Transient Heat Transfer within Wheat Stored in a Cylindrical Bin. Transactions of The ASAE,paper NO.69-855
- (29) YACIUK.G.(1975): A Simulation Model of Temperatures in Stored Grain. J.Agric.Engng Res. 20(3),245-258
- (30) 前川孝昭・山口智治・中野丹 (1977) : 穀類貯蔵容器内の穀温変動の解析, 農業施設, 8 (1) , 38- 47
- (31) 斎藤 亘・藤田昭三・高橋圭二 (1982) : 小麦のばら流通施設に関する研究, 農業施設学会講演要旨集, 17- 18
- (32) 田中宏茂・西川理・吉田邦夫 (1980) : 大型穀物サイロ内の熱移動, 化学工学第15回シンポジウム, 223- 224
- (33) 司馬正次 (1977) : データ解析入門—spssへの招待, 東洋経済新報社, 109- 119

- (34) GIBRA.I.N.(1973): Probability and Statistical Inference for Scientists and Engineers. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. N. J., 133-158
- (35) 石川馨・藤森利美・久米均 (1974) : 統計的方法, 東京化学同人, 205- 224
- (36) 一松信・伊理正夫・竹内啓 編 (1978) : 曲線と曲面, 教育出版, 70- 77
- (37) NAKANO.K, T.MAEKAWA and S.YAMAZAWA (1982) : Statistical Relationship between Temperature and Moisture Content of Maize Imported to Japan. J. of the Society of Agric. Structures, 13(1) (印刷中)
- (38) SMITH.G.D. (1971) : 電算機による偏微分方程式の解法 (瀬川洋一郎訳) , サイエンス社, 42- 100
- (39) 高見義郎・桑原邦郎 (1976) : 偏微分方程式を差分法で解く I , 日本物理学会誌, 31 (11), 899- 904
- (40) 渡辺要 (1978) : 建築計画原論 I , 丸善, 119- 135
- (41) 早川一也・清水浩明 (1976) : モンテカルロ法による熱負荷計算のための気象データの研究, 空調衛生工論文集, 0 , 1- 12
- (42) 鈴木憲三・荒谷発 (1979) : 日射量計算式の開発, 日本建築学会論文報告集, 279, 97- 105
- (43) 渡辺要 (1978) : 建築計画原論 I , 丸善, 171- 190
- (44) 石川馨・藤森利美・久米均 (1974) : 統計的方法, 東京化学同人, 21- 24
- (45) 木村健一 (1973) : 建築設備基礎理論演習, 学献社, 285- 289
- (46) 渡辺要 (1978) : 建築計画原論 II, 丸善, 149- 151

- (47) 化学工学協会編 (1968) : 化学工学便覧, 丸善, 1320-1321
- (48) KAZARIAN.E.A. and C.W.HALL (1965) : Thermal Properties of Grain, Transactions of the ASAE, 8 (1), 33- 37, 48
- (49) 渡辺要 (1978) : 建築計画原論II, 丸善, 58 - 65
- (50) 気象庁 (1963) : 気象庁観測技術資料, 第33号, 23,45,66,89
- (51) HENDERSON.S.M. and R.L.PERRY (1972) : 農業プロセス工学 (高倉 他訳) , 東京大学出版会, 250- 267
- (52) 井上宇市 (1967) : 空気調和ハンドブック, 丸善, 14- 44
- (53) 太田勇夫 他 (1964) : 真空乾燥, 日刊工業新聞社, 2- 5
- (54) STEWART.T.A.(1975) : Moisture Migration During Storage of Preserved, High Moisture Grains, Transactions of the ASAE, Paper No.73-3512, 387-393,400
- (55) 東京天文台編 (1980) : 理科年表, 丸善, 気8 - 気1 7
- (56) 相田浩 (1975) : 応用微生物学, 東京同文書院, 44- 51
- (57) 微生物研究法懇談会編 (1976) : 微生物学実験法, 講談社サイエンティフィック, 203- 207
- (58) 原慎一郎・伊藤稔・大山嘉信 (1979) : サイレージの好気的変敗の際の品温, ガス代謝量および熱発生量と微生物相の相互関係, 日本畜産学会報, 50 (8), 549 - 556
- (59) HAILE.D.G. and J.W.SORENSEN,Jr.(1968): Effect of Respiration Heat of Sorghum Grain on Design of Conditioned-Air Storage Systems. Transactions of the ASAE, 11(3) , 335-338

- (60) 山沢新吾・吉崎繁・前川孝昭 (1977) : 断熱密閉容器内の植物体の温度上昇, 生物環境調節, 15 (4), 107- 111
- (61) 合葉修一・永井史朗 (1978) : 生物化学工学, 科学技術社, 162- 163
- (62) 宇田川俊一・鶴田理 (1978) : かびと食物, 医歯薬出版, 161- 247
- (63) 板本守正 他 (1980) : 環境工学, 朝倉書店, 65 - 67

謝 辞

本研究の遂行にあたり御指導と御助言をいただいた筑波大学農林工学系 山沢新吾教授，前川孝昭講師に深く感謝いたします。また数値計算モデルによる解法と検証実験に御指導と御協力をいただいた農林水産省農業土木試験場 奈良誠氏に深甚の謝意を表します。

さらに貴重な解析資料を提供して下さった日本穀物検定協会，日本海事検定協会 および日本鋼管(株) 中田正毅，木内貞毅の緒氏に心から御礼申し上げます。また実験と計算機プログラムの開発に専心助力された増田雅己，高野公雄，中野隆之，川崎久の諸氏に謝意を表します。

本論文のデータ整理ならびに数値計算モデルによる理論解析は，筑波大学学術情報処理センターの ACOS-6 および FACOM M-200 の各電子計算機によったことを記して，関係各位に謝意を表します。