

穀物の熱特性に関する基礎的研究

Fundamental Studies on the Thermal Properties of Grain

三重大学農学部農業機械学科

収穫加工機械学講座

大下 誠一

目次

第 1 章 序論

1. 1.	本研究の位置付け	1	(1-1)
1. 2.	穀物の熱物性値把握の意義と現状	2	(1-2)
1. 3.	熱伝導率、温度伝導率の測定法	3	(1-3)
1. 3. 1.	定常法 (Steady-state Method)	3	(1-3)
1. 3. 2.	非定常法 (Unsteady-state or Transient Method)	4	(1-4)
1. 4.	穀物の熱物性値測定上の問題点	7	(1-7)
1. 5.	研究の目的と概要	8	(1-8)

第 2 章 温度分布推定法の理論と
シミュレーション

2. 1.	緒言	9	(2-1)
2. 2.	温度分布推定法の概念	9	(2-1)
2. 3.	理論	11	(2-3)
2. 3. 1.	任意の初期条件および境界条件下での 材料内温度分布	11	(2-3)
2. 3. 2.	温度分布の推定	15	(2-7)
2. 3. 3.	温度分布の推定式の誤差	24	(2-16)
2. 4.	実用的な体系	29	(2-21)
2. 4. 1.	任意の初期条件および境界条件下での 材料内温度分布	29	(2-21)

2. 4. 2.	温度分布の推定	3 2	(2-24)
2. 4. 3.	温度分布の推定式の誤差	3 6	(2-28)
2. 5.	シミュレーションによる検証	3 9	(2-31)
2. 5. 1.	材料内温度のシミュレーション	3 9	(2-31)
2. 5. 2.	温度分布 (Z) の推定	4 2	(2-34)
2. 6.	摘要	4 6	(2-38)

第 3 章 温度伝導率測定法の提案

3. 1.	緒言	4 8	(3-1)
3. 2.	温度伝導率測定法の提案	4 9	(3-2)
3. 2. 1.	測定原理	4 9	(3-2)
3. 2. 2.	適用条件	5 0	(3-3)
3. 2. 3.	加熱条件	5 2	(3-5)
3. 2. 4.	温度伝導率の決定	5 2	(3-5)
3. 3.	実験装置	5 2	(3-5)
3. 3. 1.	実験装置の概要	5 3	(3-6)
3. 3. 2.	計測部の詳細	5 4	(3-7)
3. 4.	基礎実験	5 7	(3-10)
3. 4. 1.	試料と温度測定点	5 7	(3-10)
3. 4. 2.	実験条件の設定	5 8	(3-11)
3. 4. 3.	データ処理	5 9	(3-12)
3. 4. 4.	実験結果	6 0	(3-13)
3. 4. 5.	考察	6 2	(3-15)
3. 5.	摘要	6 4	(3-17)

第4章 粉および玄米の

温度伝導率・熱伝導率

4.1.	緒言	65	(4-1)
4.2.	温度伝導率・熱伝導率データの整理	67	(4-3)
4.3.	温度伝導率・熱伝導率の測定	78	(4-14)
4.3.1.	測定の準備	78	(4-14)
4.3.2.	測定法を適用する体系および実験装置	83	(4-19)
4.3.3.	予備実験	85	(4-21)
4.3.4.	本実験の結果と整理	107	(4-43)
4.4.	考察	141	(4-77)
4.4.1.	粉の熱伝導率およびこれに寄与する 要因と品種間の相違	141	(4-77)
4.4.2.	玄米の熱伝導率およびこれに寄与する 要因と品種間の相違	144	(4-80)
4.4.3.	粉と玄米の熱特性の相違について	146	(4-82)
4.4.4.	高水分の粉および玄米の熱伝導率について	147	(4-83)
4.4.5.	測定中の水分移動について	148	(4-84)
4.4.6.	α の測定に関する実験的考察	148	(4-84)
4.4.7.	α の水分依存性について	151	(4-87)
4.4.8.	α の測定における再現性に関する 実験的考察	152	(4-88)
4.5.	摘要	155	(4-91)

第5章 粃および玄米の比熱

5.1.	緒言	157	(5-1)
5.2.	試料および簡易測定 of 考え方	157	(5-1)
5.2.1.	試料	157	(5-1)
5.2.2.	簡易測定 of 考え方	158	(5-2)
5.3.	実験装置および方法	158	(5-2)
5.3.1.	実験装置	158	(5-2)
5.3.2.	データ処理	161	(5-5)
5.4.	実験結果および考察	162	(5-6)
5.4.1.	比熱既知の金属による測定精度の検定	162	(5-6)
5.4.2.	穀粒の比熱	163	(5-7)
5.5.	摘要	167	(5-11)

第6章 結論

6.1.	本研究の成果	169	(6-1)
6.2.	今後に残された問題点	171	(6-3)
6.2.1.	取得データに関わる問題	171	(6-3)
6.2.2.	新たな問題	171	(6-3)

記号	172
引用文献	173
謝辞	188

第1章 序論

1. 1. 本研究の位置付け

穀物は、世界の人々の主要な食糧である。すなわち、全世界の耕地約14.5億ヘクタールのうち半分の7.4億ヘクタールの耕地で、約17億トンの穀物が生産され、46億人の人口を養っている。世界全体としては、穀物生産量は十分であるが、それが人口に対して偏在しているために、開発途上国を中心として4億5千万人が食糧不足に苦しんでいる。FAOは、2000年までの途上国食糧生産の伸びを年3%前後、アメリカ政府は、2.8-3%と予測しているが、これは、同じく2000年に至る年3%前後の需要の伸びをまかなうには、十分とは言えない数字であると報告されている。^{(45), (50)}

一方、我が国の穀物自給率は年々低下を示し、昭和57年度の概算では、33%弱にすぎない⁽⁵⁰⁾。このような情勢の認識から、食糧備蓄に関する研究も行なわれており⁽²⁵⁾、食料の安全保証という考え方も流布するようになっている。

以上に概観したように、国際的にも、また、我が国に限ってみても、食糧の需給には逼迫した関係がある。これを、バランスのとれた状態に移行させるために役立つ1つの技術として、圃場における穀物とその消費者との間をとりもつ加工技術を挙げることができよう。

圃場において成熟した状態から、消費されるまでの間の穀物の損失は、穀物の種類、品種、地域および気候等によって異なるが、生産量の5-50%に達する⁽⁷³⁾。これは、成熟してから収穫されるまでに生じる圃場での損失や収穫時の損失などを含めた数字であるが、穀物貯蔵時に限ってみても、損傷や呼吸によって平均4.5%の損失を生じ、更に、虫による損失が1-3%見込まれる。

このような損失を未然に防ぎ、原料の時間的かつ空間的移動の間で本来の状態をできるだけ保持し、食糧としての価値を低下させないためには、穀物の乾燥および貯蔵技術を更に適切なレベルに移行させ、その確立を図ることが重要である。穀物の乾燥あるいは貯蔵の過程で立ち現われる問題の多くは、熱移動および物質（おもに水）移動の原理に基づいて解析される。後者の物質移動は、大きな濃度勾配がある場合を除いては、基本的に熱移動によって誘発されるものである。したがって、穀物の熱的性質を正確に把握しておくことが不可欠の要件となる。このことは古くより認識されて

おり、これまでも多くの研究者が、穀物の熱物性値を求める研究を行なってきた。しかし、後節で述べるように、現状では、穀物の熱物性値の把握に関して解決すべき問題が数多く残されている。

上述したように、乾燥や貯蔵という応用技術を穀物に適用する際には、穀物（堆積層）内で生じる物理的現象を正確に把握した上で、それを数学的に予測できることが必要である。本研究は、このために必要な情報となる諸物性値の中で、最も基本的な熱物性値に焦点を絞って行なったものである。

1. 2. 穀物の熱物性値把握の意義と現状

穀物の乾燥および貯蔵に関わる熱的加工装置の開発や改良、あるいは、品質上の事故を防ぐための品質監視法の開発等に際しては、穀物の温度一時間の関係を解析的に求め得ることが前提となる。このためには、先ず、次の3つの事柄を知る必要がある。すなわち、(1) 穀物の熱物性値、(2) 穀物の形状、(3) 熱的条件 である。穀物の温度一時間の関係は、実際には、これら3つの組み合わせで決定される。その組み合わせは多様であるので、あらゆる組み合わせの条件下で、温度一時間の関係を求めることは困難である。しかし、境界条件および穀物の形状が数学的に取り扱え、かつ、穀物の熱物性値がわかっている場合には、これを、計算によって求めることができる。たとえば、穀物の平均の温度上昇速度は、その密度、比熱および穀物に流入する熱量によって決定される。また、穀物の境界面における熱流は、穀物の熱伝導率とその面における熱力学的媒体（例えば空気）の特性によって定まる。更に、内部の温度分布の様子は、穀物の温度伝導率によって定められる⁽⁸¹⁾。

このように見てくると、様々な要求を満足する穀物品質を得るためには穀物を対象とした熱的解析が不可欠であり、これを可能とするために、穀物の熱物性値に関する知識が重要であることが明瞭となる。

これまでに述べたような、穀物内の熱移動およびそれに伴う物質移動を対象とした数学的アプローチに対する最大の障害は、熱物性値データが不足していることである。このことは、熱物性値（熱伝導率、温度伝導率、比熱）の中でも、特に、熱伝導率と温度伝導率に関して、顕著にみられる。ここで言う“不足”には、2つの意味がある。その1つは、必要とする穀物の熱物性値データそのものが、十分に公表されていないことである。もう1つは、公表された熱物性値データの中に、完全な情報（測定時の

水分とその範囲、温度とその範囲、密度、圧力、熱流の方向、試料の形状および大きさ等) が欠如しているものが屢々みられるため、信頼できるデータとして活用できないことである。さらに、同じ種類の穀物に関して公表された熱物性値データの中に、機器による誤差のみでなく、測定法の選択ミスが原因と考えられる明らかな差異を呈するものがあるが、これも、データの信頼性を損う一因である。

いずれにしても、熱物性値、特に、熱伝導率や温度伝導率に関するデータは、対象とする穀物が多種、多品種にわたっていること、したがって、その性状が一様でないこと、更には、測定法がまちまちであることなどが原因で不十分である。このような情報の欠如が応用技術の確立にストップをかけている現状は、早急に打開されなければならない。

1. 3. 熱伝導率、温度伝導率の測定法

穀物の熱伝導率や温度伝導率を正しく測定するためには、穀物の性状に適した測定法を選択することが求められる。本節では、穀物を中心として、主に農産物を対象に過去に用いられた熱伝導率または温度伝導率の測定法を概観し、測定法の選択あるいは開発のための資料に供するとともに、第4章でとりまとめた文献値がどの測定法を用いて得られたものであるかを理解するための一助とする。以下に、測定法を定常法と非定常法とに大別し、各々について、主な測定法の特徴を記した。

1. 3. 1. 定常法 (Steady-state Method)

この方法は、フーリエの熱伝導の法則

$$q = -k A \frac{d u}{d x} \quad (1-1)$$

(115)

に基づいている。この解は簡単に求まり、境界条件に依存して決定される。本方法に関しては、温度差および水分濃度差が原因で生じる高温部から低温部へ向かう水分移動の問題がある。この水分移動は、温度差に起因する“driving force”が、水分濃度差に起因する“driving force”と平衡に達するまでの間続くので、定常法は、高水分の材料には不適とされている。したがって、定常法は乾燥材料に用いるべきであり、實際上、試料は液体もしくは脱水された材料に限定される。脱水された材料の水分含量の目安は、10%(w.b.)である。(117)

(a) 平行平板法 (Parallel plate Method)

この方法は、ASTM⁽⁶⁶⁾ によって標準化されている。これは、乾燥材料に対して推奨されているものであるが、方法が簡単であることから、多方面で応用されている。GHP法 (Guarded Hot Plate Method) は、その代表的存在である。

関連する文献を、次に示す。(63), (84), (125)

(b) 同心円筒法 (Concentric cylinder Method)

2つの同心円筒の中間に試料を配して測定する方法である。Hot Wire Method はこの方法の一種であり、これは固体材料よりも液体材料に適するとされている⁽¹¹⁷⁾,⁽¹³³⁾。熱損失による誤差の問題は、平行平板法に比べて軽減されるが、偏心による誤差には、注意を要する。

関連する文献を、次に示す。(34), (77), (83), (87), (88), (97), (109)

(c) 同心球法 (Concentric spheres Method)

理論的には熱損失が実質的に無視できるので、定常法のなかでは最も高い精度が期待される方法である。しかし、測定には実際上の困難さ(例えば、粒状材料を中空球内に一様なかさ密度で充填することが難しいこと)がつきまとうので、一般的な方法とはなっていない。⁽¹¹⁷⁾

関連する文献を、次に示す。(112)

(d) 比較法 (Comparative Method)

熱伝導率が既知の標準材料と未知試料を重ねた系で測定することにより、熱流量の測定を省いた方法で、測定値の精度は、標準試料の熱伝導率値の精度に左右される。一般には、平行平板法の系に適用されるが、同心円筒法や同心球法にも適用できる。

関連する文献を、次に示す。(27), (28), (55), (61)

1. 3. 2. 非定常法 (Unsteady-state or Transient Method)

この方法は、次の熱伝導方程式

$$\rho c \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla (k \nabla u) + u' \quad (1-2)$$

の解を基礎にしたもので、様々な形状、初期条件、境界条件のもとでの方程式の解は、Carslaw and Jaegerの著作⁽⁷⁴⁾ に詳述されている。

本方法は、温度伝導率 α を測定し、熱伝導率 k は $k = \alpha c \rho$ なる関係式により間接的に算出するのを基本とするが、熱伝導率を直接測定する方法も開発されている。

(後述する (f), (g) など) これの最大の特徴は、測定が短時間で行なえる点にあるが、所要の初期条件を実現するために測定開始以前に材料に応じた時間の経過を要すること、および、測定に際して仮定した境界条件の実現が難しく、熟練を要するという問題も持ち合わせている。

(e) 加熱または冷却曲線による方法 (Heating or Cooling Method)

この方法は、種々の簡単な形状 (平板、円筒、球など) の材料を、仮定した境界条件の下で加熱または冷却したときの熱伝導方程式の解を用いて、温度伝導率を決定するものである。Dickerson⁽⁸⁰⁾,⁽⁸¹⁾, Kazarian⁽⁹⁸⁾, Ford⁽⁹⁰⁾ らの方法が、ここに分類される。

関連する文献を、次に示す。 (41), (42), (62), (80), (81) (85), (86), (89), (100), (98), (104), (117), (124) (131)

(f) 細線加熱法またはプローブ法 (Line heat source or Probe Method)⁽⁴⁷⁾

本方法は、多孔質材料、発泡材、粉体、粒状物質などに主に適用される⁽¹¹⁹⁾。細線加熱法による熱伝導率の測定は、1888年にSchleiermacher⁽¹²⁶⁾によって提案されたが、その後、時を経て1948年にVan der Held⁽⁷⁸⁾,⁽⁹³⁾が原理を確立し、液体の熱伝導率の測定に応用したとされている⁽⁹³⁾。その後、Hooper⁽⁹³⁾は、プローブを開発してその詳細を論じ、測定結果は0.5%以内の再現性を有することを確認した。同時に、プローブ法は湿った材料、特に、土に対して有用であると述べている。また1953年には、プローブ法を用いて熱伝導率を求めるための線図を公表している⁽⁹⁴⁾。それ以後も、この方法に関して多数の研究がなされているが、中でも、Vos⁽¹²⁸⁾はプローブに関する詳細な解析を行ない、また、Blackwell⁽⁷²⁾は軸方向の熱損失による誤差について論じるなど、測定法に関する精密な検討がなされている。

関連する文献を、次に示す。 (2), (3), (4), (16), (22) (30), (32), (33), (40), (43), (44), (54), (71) (72), (75), (76), (78), (79), (93), (94), (96) (98), (103), (106), (107), (116), (120), (121), (122)

(123), (128), (129), (133)

(g) **フィッチの方法 (Fitch Method)**

(89)
この方法は、1935年にFitch (89) によって開発されたもので、本方法およびこれを修正した “Cenco-Fitch Apparatus”については、Bennettら (69) の文献に詳述されている。本方法は装置が簡単で短時間での測定が可能であるが、測定精度に問題があるとされている (117)。

関連する文献を、次に示す。(69)、(70)、(89)

(h) **周期加熱による方法 (Periodic heating Method or Angstrom Method)**

(64)
この方法による温度伝導率の測定は、Angstrom (64) によるのが初めとされている。棚沢 (35) は、湿った砂の温度伝導率の測定に応用し、更に、他の材料への適用および誤差の検討等を行なった。最近に至り、三浦ら (59) は、測定した温度データにデジタル フィルタを適用することにより、昇温条件下での測定が可能であることを示した。

本方法は、基本的には準定常状態の成立を仮定しているため、測定に要する時間が長いという欠点がある。しかし、断熱材のような不均質物質の場合には、材料の巨視的性質、すなわち、みかけの値 (有効値) を正確に把握できるという利点を有している。

関連する文献を、次に示す。(6)、(26)、(35)、(36)、(37)(38)、(39)、(57)、(59)

(i) **数値解析による方法 (Numerical Method)**

電子計算機の発達により、熱伝導率、温度伝導率、熱容量等の温度変化を考慮した非線形問題の数値解法が容易になり、また、非線形性の考慮を必要とする熱伝導問題も増加しているため、近年急速に発展しつつある手法である。

基本となる熱伝導の数値解法については、片山ら (9)、(10)、(11) の研究に詳しく論じられている。更に、これを熱物性値の測定に応用して、様々な手法、体系を提案している。(8)、(12)、(13)、(14)、(15) ここに分類される測定法の中では、飯田ら (1) が開発したラプラス変換法が、境界条件の任意性を認めている点で、特筆に値する。

本手法は、主に工業材料の熱物性値の測定を中心として発展したものであるため、農産物を対象とした例は少ないが (104)、農産物の熱物性値の測定においても、今

後、最も可能性を有すると考えられる手法である。

関連する文献を、次に示す。(1), (8), (9), (10), (11)
(12), (13), (14), (15), (104)

(j) クリッシャー法 (Krischer Method)

農産物を対象とした測定例は見当たらないが、工業材料や土を主な測定対象として用いられている測定法の中では、農産物への適用の可能性が最も高いと考えられる測定法である。Krischer⁽¹⁰¹⁾ によって提唱されたこの方法は、含水物質にも適用できるといえる利点があるが、同一試料が8枚必要であり⁽⁴⁷⁾、この点に試料構成上の煩わしさがある。測定例としては、坂爪⁽²⁴⁾ の氷および雪の熱特性に関する報告が挙げられる。

1. 4. 穀物の熱物性値測定上の問題点

穀物の熱物性値の中でも、その取り扱いが難しくデータも不足していると考えられる熱伝導率や温度伝導率について、その不足の実態を明らかにし、また、測定法について前節で概観したことにより、これらの現状を、より具体的に知ることができた。

熱伝導率や温度伝導率に関するデータは、粉に限ってみても報告者によって大きな違いを呈するものがあり、定量的な見方をすれば、概略値の域にとどまっている。一方、定性的には、穀物の熱伝導率は水分の1次関数になるとした報告が多く、水分の範囲は異なるが、信頼に足る見方であると思われる。しかし、温度伝導率に関しては、Wratten⁽¹³³⁾ やMorita⁽¹⁰⁶⁾ が、「粉の温度伝導率は水分の1次関数で表わされる」としたのに対し、Kazarian⁽⁹⁸⁾ は、「小麦の温度伝導率は水分の1次関数にはならない」という相反する結果を得ている。これについては、穀物の種類の違いによるものであるか否かを含めて議論の待たれるところである。

このような状況を打破するためには、今後、良質なデータの蓄積に努めなければならない。これに対する大きな阻害要因はとして、穀物試料に適した測定法が確立していないことが挙げられる。1. 3. 節でみたように、各種測定法にはそれぞれの利点があるが、穀物の有する特徴（不均質で等方性を持たないことや移動しやすい水分を多量に含むこと）に見合った測定法を選択する段になると、いずれも、適切でない面を合わせ持っている。具体的な問題としては、熱源と穀物試料との接触面積が小さいこと、熱流の方向が一定であること（水分移動の問題）、初期条件の実現に長時間を

要すること、境界条件の実現に注意を要すること などがある。

このような測定上の問題を解決し、良質なデータを蓄積するためには、適切な測定法の開発が必要であると考える。

1. 5. 研究の目的と概要

本研究の目的は、穀物の熱物性値の測定に適した測定法を開発し、これを用いて、実用解析に必要な範囲の水分および温度条件下で、穀物の熱物性値を把握することにあった。このために、従来の測定法の欠点を補う新しい測定法を提案し、その基礎理論を、シミュレーションおよび基礎実験を行なって検証した。次に、この測定法を用いて米粉および玄米の温度伝導率を、様々な水分および温度条件下で求めた。また、別途、米粉および玄米の比熱と水分の関係を、測定により求めた。更に、これらの値を用いて熱伝導率を算出し、米粉および玄米の熱伝導率の水分依存性ならびに温度依存性を表現する実験式を提示し、検討を加えた。以下に、章を追って本研究の概要を説明する。

第1章では、穀物の加工技術と関連させて本研究の位置付けを行ない、穀物の熱物性値を把握する意義を示した。更に、熱物性値把握の現状ならびに測定上の問題点を浮き彫りにすることにより、本研究の目的を明確にした。

第2章では、本研究で提案した温度伝導率測定法の基礎を成す、材料内温度分布推定法を開発し、その理論解を導いて温度分布の推定条件と推定値に含まれる誤差を明らかにするとともに、シミュレーションによる検証を行なった。

第3章では、初期条件ならびに境界条件の任意性を許した温度伝導率測定法を提案し、測定法を適用する2つの体系について基礎実験を行なって、この測定法が妥当であることを確認した。

第4章では、米粉および玄米の温度伝導率を測定するとともに熱伝導率を算出し、熱伝導率を水分および温度を変数とする1つの実験式で表現した。また、これらの熱物性値の品種間の差異について検討した。

第5章では、熱伝導率の算出に用いる米粉および玄米の比熱を測定し、その水分依存性を示す実験式を得た。

第6章では、本研究で得られた成果を要約するとともに、今後に残された問題を指摘した。

第2章 温度分布推定法の理論とシミュレーション

2. 1. 緒言

熱伝導率や温度伝導率の測定法は、いずれも、材料内の温度解析が可能であることを前提として、測定原理が構築されている。これらは、温度解析を容易にするために熱流の方向を一次元に仮定し、かつ、初期条件や境界条件は、その実現が容易な範囲内に限定されて与えられるのが一般的である。これらの測定法は、定常法と非定常法に大別されるが、最近、測定が短時間で済むという利点を求めて非定常法が多用されるに伴い、これまでは見過ごされてきた問題の解決が要望されるようになってきた。その問題は、境界条件および初期条件と不可分であるので、測定法の原理に言及しなければ解決されない性質のものである。

その1つの境界条件に関しては、測定原理に適合するよう仮定した境界条件の実現の度合いが測定精度に大きく関与するため、測定装置が必然的に複雑になると同時に測定に熟練を要するという不都合が、より強く認識されてきたことである。この問題を解消するため、境界条件を一意的に仮定するという制限を撤廃する努力が続けられており、電子計算機の活用により、任意の境界条件下での測定が可能な測定法も提案されるようになった。⁽¹⁾

一方、初期条件に関しては、第1章でみたように、一様な温度分布を仮定した測定法がほとんどである。これを実現するには、小さく成形できない材料や熱の伝わりの悪い材料では、長時間を必要とする。したがって、加熱（あるいは冷却）開始から終了までの時間が短い非定常法も、初期条件の実現に要する時間まで含めて考えれば、測定に長時間を必要とすることになる。このことは、熱伝導率や温度伝導率の温度依存性を求める測定において、特に大きな障害となっている。

これらの問題を解決する試みとして、任意の初期条件および境界条件下にある材料の境界面温度のみを利用して、材料内温度分布を推定する方法を考案した。これは、次章で提案する温度伝導率測定法の基礎を成す考え方である。本章では、この温度分布推定法の理論について述べる。

2. 2. 温度分布推定法の方法

Fig. 2-1に示した無限平板内の一次元熱伝導について考える。熱流の方向は、

X軸に平行であると仮定する。任意の初期条件下で、材料の両表面、すなわち、 $x=0$ 面および $x=(1+P_1+P_2)a$ 面、($P_1 \geq 0, P_2 \geq 0$)の温度変化が任意であるとき、材料内の $x=P_1a$ 面および $x=(1+P_1)a$ 面の温度が観測されたものとする。これらの観測値により、次のような考えで $P_1a \leq x \leq (1+P_1)a$ における温度分布の推定を行なう。なお、温度観測面を、以後境界面と呼ぶ。

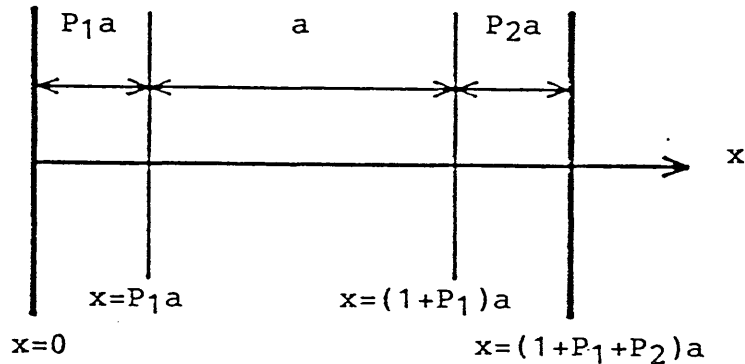


Fig.2-1 Infinite flat plate

Fig. 2-2は、時刻 t_0 における温度分布を求めるための境界条件を表わした模式図である。Aは $x=P_1a$ 面の、Bは $x=(1+P_1)a$ 面の温度の観測値である。図に示すように、A、Bと時刻 t_0 の軸に対称な波形 A' 、 B' を与える。こうして得られる温度波形 $A-A'$ 、 $B-B'$ が時刻 $2t_0$ 。以降も繰り返されると考えると、これは、 $2t_0$ を周期とする周期的熱伝導の準定常状態における境界面の温度変化を示すことになる。この場合、温度解析は、両境界面の温度のみを用いて行なうことができる。言い換えれば、初期条件は時間の経過とともに消滅するという条件を与えることにより、初期温度分布に関する具体的な情報は不用になる。

この解析により得られる材料内温度は、Fig. 2-2の境界面温度に依存して決定される。このとき、実際の境界面温度AおよびBの観測時間 t_0 が適当な長さであれば、上述の解析によって求まる時刻 t_0 の温度分布が、Fig. 2-1に示した系の実際の材料内温度分布($t_0, P_1a \leq x \leq (1+P_1)a$)の推定値となる。次節以降において、ここに述べた概念に添った問題を設定し、その理論解を導くことに

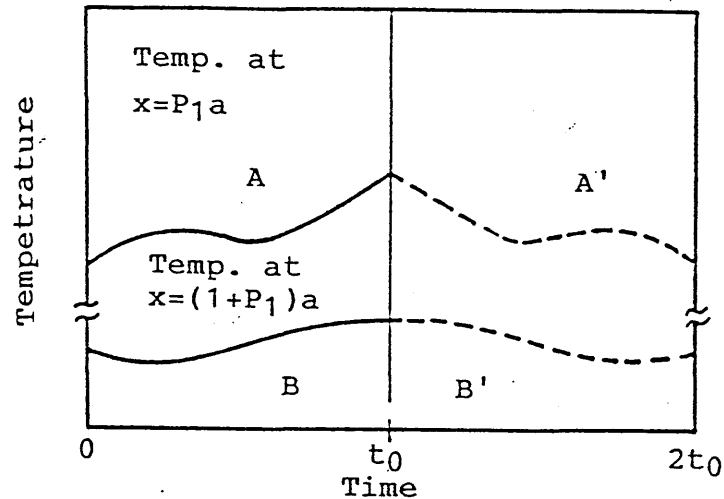


Fig.2-2 Schematic illustration showing the boundary values given for estimating the temperature distribution at $t=t_0$

より、正しく温度分布の推定が出来ることを示す。

2. 3. 理論

温度分布推定法の考え方を理論的に検討するために、まず、任意の初期条件および境界条件下で定まる材料内温度の理論解を導き、時刻 t における材料内温度分布を求めた。次に、推定する材料部分の境界値のみを用いて、時刻 t における温度分布の推定式を導いた。

2. 3. 1. 任意の初期条件および境界条件下での材料内温度分布

Fig. 2-1 に示した無限平板内の一次元熱伝導を考える。任意の初期条件および境界条件下での材料内温度分布は、次の方程式の解で表わされる。すなわち、基礎方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq (1+P_1+P_2)a, \quad P_1 \geq 0, \quad P_2 \geq 0 \quad (2-1)$$

初期条件

$$u = f(x), \quad t = 0 \quad (2-2)$$

境界条件

$$u = \varphi_1(t) \quad , \quad x = 0 \quad (2-3)$$

$$u = \varphi_2(t) \quad , \quad x = (1+P_1+P_2)a \quad (2-4)$$

この解は、以下に示すように、(a) 任意の初期条件のみを考慮した解 v と、(b) 任意の境界条件のみを考慮した解 w の和として得られる。
(74) (58)

(a) 任意の初期条件のみを考慮した解

基礎方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad , \quad 0 \leq x \leq (1+P_1+P_2)a \quad , \quad P_1 \geq 0, P_2 \geq 0 \quad (2-5)$$

初期条件

$$v = f(x) \quad , \quad t = 0 \quad (2-6)$$

境界条件

$$v = 0 \quad , \quad x = 0 \quad (2-7)$$

$$v = 0 \quad , \quad x = (1+P_1+P_2)a \quad (2-8)$$

(2-5) 式の解 は、

$$v(x, t) = F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t} \cdot \sin \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\} x \quad (2-9)$$

となる。(58) ただし、 $F(a)$ は、

$$F(a) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{(1+P_1+P_2)a} f(\tau) \cdot \sin \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\} \tau \, d\tau \quad (2-9-1)$$

という積分を表わしており、これは、 x 、 t に関して独立に確定であるので、煩雑さを避ける意味でもちいた。

時刻 t_0 における温度分布は、(2-9) 式で $t = t_0$ とおいて、

$$v(x, t_0) = F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t_0} \cdot \sin \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\} x \quad (2-10)$$

となる。これが、任意の初期条件下での推定対象の温度分布である。

(b) 任意の境界条件のみを考慮した解

基礎方程式

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq (1+P_1+P_2)a, \quad P_1 \geq 0, P_2 \geq 0 \quad (2-11)$$

初期条件

$$w = 0, \quad t = 0 \quad (2-12)$$

境界条件

$$w = \varphi_1(t), \quad x = 0 \quad (2-13)$$

$$w = \varphi_2(t), \quad x = (1+P_1+P_2)a \quad (2-14)$$

この解は、

$$w(x, t) = \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t} \cdot \sin \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\} x \\ \times \int_0^t e^{\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \tau} \left\{ \varphi_1(\tau) - (-1)^n \varphi_2(\tau) \right\} d\tau \quad (2-15)$$

となる。(58) ここで、後の便宜のために、(2-15) 式右辺の $\varphi_1(t)$ 、 $\varphi_2(t)$ をフーリエ級数で表わす。 $\varphi_1(-t) = \varphi_1(t)$ および $\varphi_2(-t) = \varphi_2(t)$ と考えて、区間 $-t_0 \leq t \leq t_0$ で展開すると、

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(t) &= \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right) t \\ \text{ただし、} \quad a_k &= \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \varphi_1(t) \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right) t \, dt \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2(t) &= \frac{1}{2} b_0 + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right) t \\ \text{ただし、} \quad b_k &= \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \varphi_2(t) \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right) t \, dt \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

と表わされる。これらを (2-15) 式に適用すると、

$$w(x,t) = \frac{2\alpha\pi}{\{(1+p_1+p_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \sin\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\} x$$

$$\times \left\{ \frac{a_0 - (-1)^n b_0}{2\alpha \left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2} \left[1 - e^{-\alpha \left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 t} \right] \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k - (-1)^n b_k}{\alpha^2 \left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^4 + \left(\frac{k\pi}{t_0}\right)^2} \left\{ \alpha \left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right) t + \frac{k\pi}{t_0} \sin\left(\frac{k\pi}{t_0}\right) t \right. \\ \left. - \alpha \left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 e^{-\alpha \left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 t} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

となる。

時刻 t_0 における温度分布は、(2-18) 式で $t = t_0$ とおいて、

$$\begin{aligned}
 w(x, t_0) = & \frac{2\alpha\pi}{\{(1+p_1+p_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}x\right\} \left[\frac{a_0 - (-1)^n b_0}{2\alpha\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2} \left\{1 - e^{-\alpha\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 t_0}\right\} \right. \\
 & \left. + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k - (-1)^n b_k}{\alpha^2\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^4 + \left(\frac{k\pi}{t_0}\right)^2} \cdot \alpha\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 \left\{(-1)^k - e^{-\alpha\left\{\frac{n\pi}{(1+p_1+p_2)a}\right\}^2 t_0}\right\} \right] \quad (2-19)
 \end{aligned}$$

となる。これが、任意の境界条件下での推定対象の温度分布である。

以上により、任意の初期条件および境界条件下での材料内温度 $u(x, t)$ 、すなわち、(2-1)式の解は、(2-9)式および(2-18)式を用いて、

$$u(x, t) = v(x, t) + w(x, t) \quad (2-20)$$

として求められる。

また、時刻 t_0 における温度分布は、(2-10)式および(2-19)式を用いて、

$$u(x, t_0) = v(x, t_0) + w(x, t_0) \quad (2-21)$$

となる。

2.3.2. 温度分布の推定

本節では、(2-21)式で表わされた、任意の初期条件および境界条件下での時刻 t_0 における温度分布 $u(x, t_0)$ の推定を行なう。 $u(x, t_0)$ の推定式は、(a) 任意の初期条件下での温度分布 $v(x, t_0)$ の推定、および、(b) 任意の境界条件下での温度分布 $w(x, t_0)$ の推定を、それぞれ独立におこない、得られた推定式の和によって表わすことができる。

本推定法では、境界面温度のみを用いて、温度分布を推定するが、2つの境界面温度のうち少なくとも一方は、(2-2)式—(2-4)式に示した初期条件および境界条件の影響を受けて変化する温度を用いる必要がある。このために、境界面温度の

観測位置を、材料の内部に定める。すなわち、Fig. 2-1の $x = P_1$ a面および $x = (1 + P_1)$ a面の温度が t 。時間観測されたものと考えて、温度分布を推定する。以下に、推定式を導出する過程を示す。

(a) 任意の初期条件下での温度分布 $v(x, t_0)$ の推定

まず、推定の基礎となる境界面の温度を示す。 $x = P_1$ a面では、(2-9)式で $x = P_1$ aとにおいて、

$$v(P_1 a, t) = F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{P_1 n \pi}{1+P_1+P_2}\right) \cdot v_n(t) \quad (2-22)$$

$x = (1 + P_1)$ a面では、 $x = (1 + P_1)$ aとにおいて、

$$v\{(1+P_1)a, t\} = F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left\{\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right\} \cdot v_n(t) \quad (2-23)$$

となる。ただし、

$$v_n(t) = e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t}, \quad 0 \leq t \leq t_0 \quad (2-24)$$

である。

以上を用いて、推定のための解析は、次の問題を解くことに置き換えられる。

基礎方程式

$$\frac{\partial v'}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 v'}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-25)$$

初期条件

$$v'_{t=0} \rightarrow \text{消滅}, \quad t \rightarrow \infty \quad (2-26)$$

境界条件

$$v' = F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{P_1 n \pi}{1+P_1+P_2}\right) g_n(t), \quad x=0 \quad (2-27)$$

$$v' = F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left\{\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right\} g_n(t), \quad x=a \quad (2-28)$$

ただし、 $g_n(t)$ は、(2-24) 式の $v_n(t)$ を用いて、

$$\left. \begin{aligned} & \text{(i) } 2mt_0 \leq t \leq (2m+1)t_0, \quad m=0,1,2,\dots \text{で} \\ & \quad g_n(t) = v_n(t-2mt_0) \\ & \text{(ii) } (2m+1)t_0 \leq t \leq (2m+2)t_0, \quad m=0,1,2,\dots \text{で} \\ & \quad g_n(t) = v_n\{(2m+2)t_0 - t\} \end{aligned} \right\} \text{(2-29)}$$

と表わされる。なお、境界条件 (2-27) 式、(2-28) 式の与え方を理解するために、境界面温度 (2-22) 式を $v_A(t)$ 、推定の解析で与えた境界条件 (2-27) 式を $v'_A(t)$ とし、 $v_A(t)$ と $v'_A(t)$ の関係を示す概念図を Fig. 2-3 に示した。(2-23) 式と (2-28) 式の関係も、これと同様である。

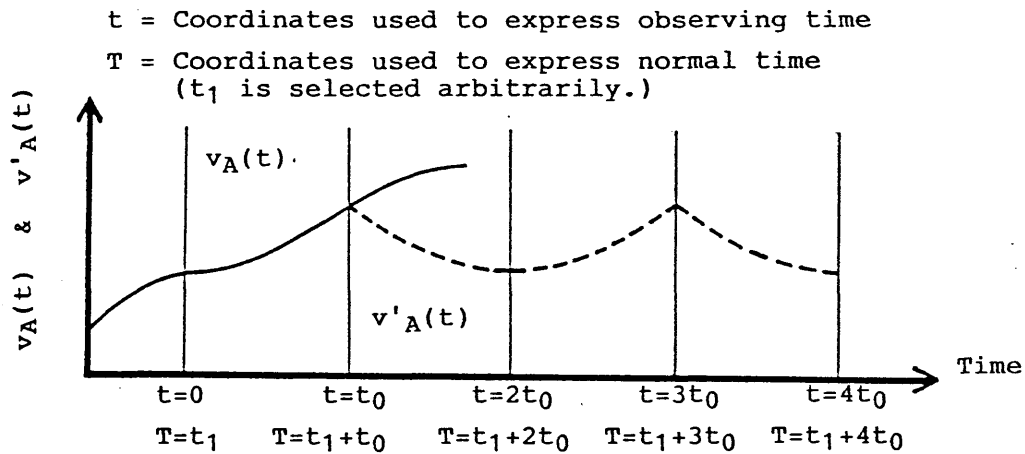


Fig.2-3 Relationship between temperatures $v_A(t)$ observed and $v'_A(t)$ given for estimation

以上により (2-25) 式の解をもとめ、 $t = (2m+3)t_0$ とおいて $m \rightarrow \infty$ とすると、これが、(2-10) 式の区間 P_1 $a < x < (1+P_1)a$ の温度分布に対する推定式となる。

解を求める過程を次に示す。材料両面の境界値が与えられているので、 x について

$$\left\{ \sin\left(\frac{\ell\pi}{a}\right) x \right\}, \quad \ell=1, 2, 3, \dots$$

による Fourier sine 変換⁽⁵⁾を施す。

$$v'_l(t) = \int_0^a \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right) x \cdot v'(x, t) dx, \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (2-30)$$

これより、

$$\frac{dv'_l(t)}{dt} = \int_0^a \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right) x \cdot \frac{\partial v'(x, t)}{\partial t} dx \quad (2-31)$$

および、

$$\begin{aligned} & \int_0^a \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right) x \frac{\partial^2 v'(x, t)}{\partial x^2} dx \\ &= (-1)^{l+1} \frac{l\pi}{a} v'(a, t) + \frac{l\pi}{a} v'(0, t) - \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 v'_l(t) \end{aligned} \quad (2-32)$$

が得られる。

(2-31) 式および (2-32) 式を適用すると (2-25) 式は変換されて、

$$\begin{aligned} \frac{dv'_l(t)}{dt} + \alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 v'_l(t) &= (-1)^{l+1} \alpha \frac{l\pi}{a} F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left\{\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right\} g_n(t) \\ &+ \alpha \frac{l\pi}{a} F(a) \frac{2}{(1+P_1+P_2)a} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{P_1 n\pi}{1+P_1+P_2}\right) g_n(t) \end{aligned} \quad (2-33)$$

となる。これは、一階線形微分方程式であるので、この解は、

$$\begin{aligned} v'_l(t) &= k_l e^{-\alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 t} \\ &+ F(a) (-1)^{l+1} \frac{2\alpha l\pi}{(1+P_1+P_2)a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left\{\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right\} e^{-\alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 t} \int_0^t e^{\alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 \tau} g_n(\tau) d\tau \\ &+ F(a) \frac{2\alpha l\pi}{(1+P_1+P_2)a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{P_1 n\pi}{1+P_1+P_2}\right) e^{-\alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 t} \int_0^t e^{\alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 \tau} g_n(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2-34)$$

と表わされる。ただし、 k_l は任意定数である。

(2-34) 式を計算して

$$\lim_{m \rightarrow \infty} v'_l \{ (2m+3)t_0 \}$$

を求め、このとき得られる温度分布を $v'(x, t_0)$ と書くと、(2-25) 式の解として

$$v'(x, t_0) = \frac{2}{a} \sum_{l=1}^{\infty} \left[\lim_{m \rightarrow \infty} v'_l \{ (2m+3)t_0 \} \right] \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right)x \quad (2-35)$$

が定まる。これを、具体的に整理して書き直すと次のようになる。

$$v'(x, t_0) = F(a) \frac{2}{a} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2\alpha l\pi}{(1+P_1+P_2)a^2} \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right)x \\ \times \left[(-1)^{l+1} \sin\left\{ \frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2} \right\} + \sin\left\{ \frac{P_1 n\pi}{1+P_1+P_2} \right\} \right] (v'_s + v'_e) \quad (2-36)$$

ただし、

$$v'_s = \frac{e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t_0}}{\alpha \left[\left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} \quad (2-36-1)$$

$$v'_e = e^{-\alpha \left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 t_0} \times \left[\frac{-1}{\alpha \left[\left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} + \frac{1}{\alpha \left[\left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 + \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} \right] \quad (2-36-2)$$

(2-36) 式が、求める温度分布 $v(x, t_0)$ に対する推定式である。なお、後述する温度分布推定式の適用可能条件下では、

$$E = e^{-\alpha \left[\left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 + \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right] t_0}, \quad l=1, 2, 3, \dots \text{ かつ } n=1, 2, 3, \dots \quad (2-36-3)$$

は十分小さい値となるので、煩雑さを避けて (2-36-2) 式では E または E より小さいものを含む項を省略して示した。

(b) 任意の境界条件下での温度分布 $w(x, t_0)$ の推定

推定の基礎となる境界面温度は、 $x = P_1$ a 面では、(2-18) 式で $x = P_1$ a において、

$$w(P_1, a, t) = \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{P_1 n\pi}{1+P_1+P_2}\right) \cdot w_n(t) \quad (2-37)$$

$x = (1+P_1) a$ 面では、 $x = (1+P_1) a$ において、

$$w\{(1+P_1)a, t\} = \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \sin\left\{\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right\} \cdot w_n(t) \quad (2-38)$$

ただし、 $w_n(t)$ は、

$$w_n(t) = \frac{a_0 - (-1)^n b_0}{2\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2} \left\{ 1 - e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k - (-1)^n b_k}{\alpha^2 \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^4 + \left(\frac{k\pi}{t_0} \right)^2} \left[\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right)t + \frac{k\pi}{t_0} \sin\left(\frac{k\pi}{t_0}\right)t \right. \right. \\ \left. \left. - \alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 e^{-\alpha \left\{ \frac{n\pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t} \right] \right\} \quad (2-39)$$

である。

以上により、次の問題を解いて推定式を求める。

基礎方程式

$$\frac{\partial w'}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 w'}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-40)$$

初期条件

$$w'_{t=0} \rightarrow \text{消滅}, \quad t \rightarrow \infty \quad (2-41)$$

境界条件

$$w' = \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left(\frac{P_1 n \pi}{1+P_1+P_2}\right) \cdot g_n(t), \quad x=0 \quad (2-42)$$

$$w' = \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \sin\left\{\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right\} g_n(t), \quad x=a \quad (2-43)$$

ただし、 $g_n(t)$ は、(2-39) 式の $w_n(t)$ を用いて、

$$\left. \begin{aligned} \text{(i)} \quad & 2mt_0 \leq t \leq (2m+1)t_0, \quad m=1, 2, 3, \dots \text{で} \\ & g_n(t) = w_n(t - 2mt_0) \\ \text{(ii)} \quad & (2m+1)t_0 \leq t \leq (2m+2)t_0, \quad m=1, 2, 3, \dots \text{で} \\ & g_n(t) = w_n\{(2m+2)t_0 - t\} \end{aligned} \right\} (2-44)$$

と表わされるものである。境界面温度 (2-37) 式および (2-38) 式と推定の解析で与えた境界条件 (2-42) 式および (2-43) 式との関係は、Fig. 2-3 に示した概念図と同様である。

以上により、(2-40) 式の解を求め、 $t = (2m+3)t_0$ とおいて $m \rightarrow \infty$ とすると、これが、(2-19) 式の区間 $P_1 a < x < (1+P_1)a$ の温度分布に対する推定式となる。

解を導出する手順は、(a) の場合と同じである。すなわち、 x について、

$$\left\{ \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right)x \right\}, \quad l=1, 2, 3, \dots$$

による Fourier sine 変換

$$w'_l(t) = \int_0^a \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right)x \cdot w'(x, t) dx, \quad l=1, 2, 3, \dots \quad (2-45)$$

を施すと、(2-40)式は、

$$\begin{aligned} \frac{d\omega'_\ell(t)}{dt} + \alpha \left(\frac{\ell\pi}{a}\right)^2 \omega'_\ell(t) &= \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \frac{\ell d\pi}{a} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \sin\left(\frac{P_1 n\pi}{1+P_1+P_2}\right) \cdot g_n(t) \\ &+ (-1)^{\ell+1} \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \frac{\ell d\pi}{a} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \sin\left(\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right) \cdot g_n(t) \end{aligned} \quad (2-46)$$

に変換される。この解は、

$$\begin{aligned} \omega'_\ell(t) &= k_\ell e^{-\alpha \left(\frac{\ell\pi}{a}\right)^2 t} \\ &+ \frac{\ell d\pi}{a} \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \sin\left(\frac{P_1 n\pi}{1+P_1+P_2}\right) e^{-\alpha \left(\frac{\ell\pi}{a}\right)^2 t} \int_0^t e^{\alpha \left(\frac{\ell\pi}{a}\right)^2 \tau} \cdot g_n(\tau) d\tau \\ &+ (-1)^{\ell+1} \frac{\ell d\pi}{a} \frac{2\alpha\pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot \sin\left(\frac{(1+P_1)n\pi}{1+P_1+P_2}\right) e^{-\alpha \left(\frac{\ell\pi}{a}\right)^2 t} \int_0^t e^{\alpha \left(\frac{\ell\pi}{a}\right)^2 \tau} \cdot g_n(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2-47)$$

となる。ただし、 k_ℓ は任意定数である。

(2-47)式を計算して

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \omega'_\ell \{(2m+3)t_0\}$$

を求め、これより得られる温度分布を $\omega'(x, t_0)$ と書くと、(2-40)式の解として、

$$\omega'(x, t_0) = \frac{2}{a} \sum_{\ell=1}^{\infty} \left[\lim_{m \rightarrow \infty} \omega'_\ell \{(2m+3)t_0\} \right] \cdot \sin\left(\frac{\ell\pi}{a}\right) x \quad (2-48)$$

が定まる。これを具体的に書き直すと、次のようになる。

$$\begin{aligned}
 w'(x, t_0) = & \frac{2}{a} \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{\ell \alpha \pi}{a} \frac{2 \alpha \pi}{\{(1+P_1+P_2)a\}^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \left[\sin\left(\frac{P_1 n \pi}{1+P_1+P_2}\right) + (-1)^{\ell+1} \sin\left(\frac{(1+P_1)n \pi}{1+P_1+P_2}\right) \right] \sin\left(\frac{\ell \pi}{a}\right) x \\
 & \times \left[\frac{a_0 - (-1)^n b_0}{2 \alpha \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2} (w'_{s1} + w'_{e1}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k - (-1)^n b_k}{\alpha^2 \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^4 + \left(\frac{k \pi}{t_0} \right)^2} (w'_{s2} + w'_{e2}) \right] \quad (2-49)
 \end{aligned}$$

ただし、

$$w'_{s1} = \frac{1}{\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2} - \frac{e^{-\alpha \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t_0}}{\alpha \left[\left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} \quad (2-49-1)$$

$$w'_{e1} = e^{-\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 t_0} \times \left[\frac{1}{\alpha \left[\left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} - \frac{1}{\alpha \left[\left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 + \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} \right] \quad (2-49-2)$$

$$w'_{s2} = (-1)^k \frac{\alpha^2 \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 - \left(\frac{k \pi}{t_0} \right)^2}{\alpha^2 \left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^4 + \left(\frac{k \pi}{t_0} \right)^2} - \frac{\alpha \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 e^{-\alpha \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 t_0}}{\alpha \left[\left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} \quad (2-49-3)$$

$$w'_{e2} = e^{-\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 t_0} \times \left[\frac{2 \left(\frac{k \pi}{t_0} \right)^2}{\alpha^2 \left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^4 + \left(\frac{k \pi}{t_0} \right)^2} + \frac{\alpha \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2}{\alpha \left[\left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 - \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} - \frac{\alpha \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2}{\alpha \left[\left(\frac{\ell \pi}{a} \right)^2 + \left\{ \frac{n \pi}{(1+P_1+P_2)a} \right\}^2 \right]} \right] \quad (2-49-4)$$

である。

(2-49) 式が、求める温度分布 $w(x, t_0)$ に対する推定式である。なお、(2-49-2) 式および (2-49-4) 式では、(a) の場合と同様に、(2-36-3) 式に示した E または E より小さいものを含む項を省略して示した。

以上の結果をまとめると、次のようになる。(2-21) 式で示された、任意の初期条件および境界条件下での時刻 t_0 における温度分布 $u(x, t_0)$ 、 $P_1 a < x < (1 + P_1) a$ に対する推定式を $u'(x, t_0)$ と書くと、これは、(2-36) 式および (2-49) 式を用いて、

$$u'(x, t_0) = v'(x, t_0) + w'(x, t_0) \quad , \quad 0 < x < a \quad (2-50)$$

と表わすことができる。

2. 3. 3. 温度分布の推定式の誤差

前節で求めた温度分布の推定式の誤差を検討するにあたって、次の前提を定める。前節では、Fig. 2-1 の $x = P_1 a$ および $x = (1 + P_1) a$ の温度を境界条件に与えて、推定式を導出した。しかし、実際の材料への適用を考えると、材料によっては、内部に温度検出端を設置することが面倒なものも考えられる。一方、本推定法で必要とする 2ヶ所の境界面温度は、2. 3. 2. 節において述べたように、少なくとも一方が本来の初期条件および境界条件の影響を受けたものであればよい。そこで、Fig. 2-1 で $P_2 = 0$ かつ $P_1 > 0$ として推定に用いる境界面温度の一方のみを材料内にとり、他方は材料の表面温度をとるという、より実際的な条件下で温度分布推定式の誤差を検討する。なお、この検討も前節と同様に、以下に示す (a)、(b) の場合に分けて行なう。

(a) 任意の初期条件下での推定式の誤差

(2-10) 式に示した温度分布 $v(x, t_0)$ とこれの推定式である (2-36) 式の $v'(x, t_0)$ について検討する。まず、(2-36) 式で $v'_e = 0$ として v'_s のみを含む項を計算すると、これは、(2-10) 式と一致する。具体例を挙げると、次のようになる。Fig. 2-1 において、 $a = 5.0 \times 10^{-3}$ (m)、 $P_1 = 0.25$ 、 $P_2 = 0$ とし、境界面温度の観測時間を $t_0 = 114.583$ (s)、温度伝導率を $\alpha = 1.20 \times 10^{-7}$ (m^2 / s) とする。このときのフーリエ数は、 $F_0 = \alpha t_0 / a^2 = 0.55$ となる。比較する位置は、材料の温度分布を推定する部分の中央部とし、(2-10) 式では $x = (P_1 + 0.5) a$ 、(2-36) 式で

は $x = 0.5a$ を与える。 $F(a)$ は両式に共通であるので、これの係数部の級数を計算すると、(2-10)式では9.431 ($n=14$)となる。一方、 $v's$ のみを含む(2-36)式では9.431 ($n=14, l \geq 11000$)となり、両者は一致する。なお、 n は両式とも指数部に含まれており、指数部 < -700 となる時点で計算を打ち切った。また、(2-36)式の結果は $l > 11000$ で0.001より小さい範囲で振動を示すが、この範囲内に入った時点で(2-10)式の結果と一致したものと判定した。級数の計算は、すべてパーソナル コンピュータ SEIKO 9100により、倍精度で行なった。

以上の結果により、(2-36)式中の $v'e$ を含む項が推定式の誤差を示すことは明らかである。そこで、この項の級数値を $E_{v'}$ と表記し、

$$\left| \frac{E_{v'}}{v(x, t_0)} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2-51)$$

なる式により、推定式の誤差を算出した。

Table 2-1は、材料内各位置における推定誤差を、計算の条件とともに示したものである。これにより、位置を示すパラメータ X が0.9のとき、推定誤差が最大となることがわかる。

Table 2-1 Position X vs Error

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.20	0.33	0.42	0.48	0.53	0.57	0.60	0.62	0.63

(Note)

Fourier number=0.65, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)
 Position= X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$)), $P_1=0.25$, $P_2=0$

次に、材料内の位置を、誤差が最大となる $X=0.9$ に固定して P_1 の値と推定誤差との関係を求め、計算条件とともにTable 2-2に示した。

Table 2-2 Value of P_1 vs Error

P_1	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
Error(%)	12.71	5.18	2.02	0.63	0.01	0.40	0.42	0.36	0.30	0.24	0.20

(Note)

Fourier number=0.65, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)
 Position $X=0.9$, $P_2=0$

これにより、フーリエ数を0.65に固定し $P_1 \geq 0.25$ とすれば推定誤差は1%を越えず、しかも、 $P_1 = 0.25$ のとき最大となることが読み取れる。そこで、1%以下の範囲で誤差が最大となる条件、すなわち、 $X = 0.9$ かつ $P_1 = 0.25$ を与えて、 F_0 と誤差の関係を求めた。Table 2-3は、この結果と計算条件を示したものである。

Table 2-3 Fourier number F_0 vs Error

F_0	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
Error(%)	1.07	0.89	0.75	0.63	0.53	0.44	0.37	0.31	0.26

(Note)

$$a = 5.0 \times 10^{-3} \text{ (m)}, \quad \alpha = 1.2 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

$$P_1 = 0.25, \quad P_2 = 0, \quad X = 0.9$$

これは、1%以下の誤差を期待するならば、 $F_0 \geq 0.55$ となるように観測時間 t を定めればよいことを示している。

以上の検討の結果、Fig. 2-1に示した体系では、

$$P_1 \geq 0.25 \quad \text{かつ} \quad F_0 \geq 0.55, \quad (P_2 = 0) \quad (2-52)$$

を満たせば、温度分布の推定誤差は1%以下となることが、明らかになった。なお、Table 2-1の結果では位置を示すパラメータが $0.9 < X < 1$ の場合には誤差が更に大きくなることが予想されるが、これについては、つぎのように考察することができる。ここでは初期条件のみの影響が検出されたものと考えて材料内温度分布を推定しているが、実際の温度分布は、初期条件の影響と境界条件の影響による温度分布の和として得られる。そこで、これらを個別に考えてみると、材料の表面に近い $0.9 < X < 1$ の位置では初期条件の影響の度合いは急激に減衰し、相対的に境界条件の影響はるかに大きくなる。したがって、この位置において初期条件の影響のみによる温度分布の推定式に多少の誤差が混入しても、境界条件の影響下で定まる温度分布との和を考えれば、問題はないといえる。また、実際に温度分布を推定する場合は数値解析を利用するのが現実的であるが、このとき、材料の分割を10とすればこの問題は生じない。また、 $P_2 > 0$ の場合、すなわち、右側の境界面温度の観測位置も材料内部にとる場合には、推定の精度が更に向上することは言うまでもない。

(b) 任意の境界条件下での推定式の誤差

(2-19) 式に示した温度分布 $w(x, t_0)$ と、これの推定式である (2-49) 式の $w'(x, t_0)$ について考察する。両式ともに (2-16) 式および (2-17) 式に示した境界条件の定数部の a_0, b_0 と余弦部の a_k, b_k ($1 \leq k \leq \infty$) を有するので、これらについて独立に検討する。

まず、 a_0, b_0 の係数については、(2-49) 式で $w'_{e1} = 0$ とおいて w'_{s1} のみを含む項を計算すると、これは、(2-19) 式の a_0, b_0 の係数部と一致する。したがって、(2-49) 式の w'_{e1} を含む項が推定式の誤差を示すことになる。そこで、これを Ew'_1 とおき、(2-19) 式の a_0, b_0 の係数部を w_0 として、

$$\left| \frac{Ew'_1}{w_0} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2-53)$$

により、推定式の a_0, b_0 の係数部に含まれる誤差を算出した。なお、(a) 任意の初期条件下での推定式の誤差の検討結果により、 $P_2 = 0$ として、 $P_1 = 0.25$, $F_0 = 0.55$ は固定して与えた。

この結果得られた材料内各位置における誤差を a_0 の係数部については Table 2-4 に、 b_0 の係数部については Table 2-5 に、それぞれの計算条件とともに示した。

Table 2-4 Position X vs Error (Coefficient of a_0)

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.06	0.12	0.19	0.26	0.33	0.40	0.45	0.50	0.52

(Note)

Fourier number=0.55, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)
 Position=X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$)), $P_1=0.25$, $P_2=0$

Table 2-5 Position X vs Error (Coefficient of b_0)

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.34	0.50	0.56	0.55	0.50	0.41	0.31	0.20	0.10

(Note)

Fourier number=0.55, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)
 Position=X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$)), $P_1=0.25$, $P_2=0$

この結果は、いずれの位置においても推定式の誤差は1%以下であることを示している。

次に、 a_k 、 b_k の係数部について検討する。この場合についても、(2-49)式で $\omega'e_2=0$ として $\omega's_2$ のみを含む項を計算すると(2-19)式の a_k 、 b_k の係数部に一致するので、(2-49)式の $\omega'e_2$ を含む項が推定誤差を示すことになる。そこで、これを $E\omega'_2$ 、(2-19)式の a_k 、 b_k の係数部を ω_k として、

$$\left| \frac{E\omega'_2}{\omega_k} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2-54)$$

により a_0 、 b_0 と同条件で、 $k=1$ の場合について材料内各位置における誤差を算出した。この結果を、 a_k の係数部についてはTable 2-6に、 b_k の係数部についてはTable 2-7に計算条件とともに示した。

Table 2-6 Position X vs Error (Coefficient of a_k , $k=1$)

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.02	0.05	0.08	0.13	0.20	0.28	0.36	0.45	0.51

(Note)

Fourier number=0.55, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)
Position=X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$)), $P_1=0.25$, $P_2=0$

Table 2-7 Position X vs Error (Coefficient of b_k , $k=1$)

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.69	0.88	0.84	0.71	0.56	0.40	0.27	0.16	0.07

(Note)

Fourier number=0.55, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)
Position=X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$)), $P_1=0.25$, $P_2=0$

いずれの場合も、推定誤差は1%以下である。なお、式の形より $k \neq 1$ の場合でも

同じ結果を得ることは明らかである。

以上のように、(a)，(b) いずれの場合も推定式の誤差は1%以下であるので、(2-52)式を満たせば、本推定法を用いて、任意の初期条件および境界条件下で温度分布の推定が可能であり、このとき、推定誤差は1%以下であると結論される。

2.4. 実用的な体系

2.3.節では、一般的な体系で温度分布の推定を考えた。しかし、その場合には、前にも述べたように、少なくとも1点は材料内部の温度の観測値が必要である。もし、材料の両表面の温度のみによって温度分布の推定ができれば、実際に測定をする上では都合がよい。そこで、Fig. 2-4に示したような、1面が断熱された体系を考える。

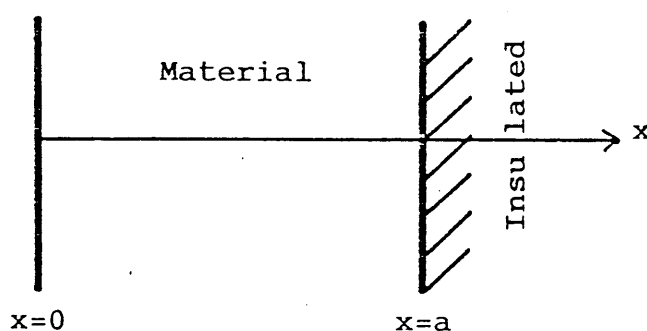


Fig.2-4 Infinite flat plate insulated at the surface at $x=a$

この場合には、断熱面の温度が与えられた初期条件および境界条件の影響を受けて変化するので、両表面の温度のみを用いて、温度分布の推定が可能である。以下に理論解を示して、このことを証明する。

2.4.1. 任意の初期条件および境界条件下での材料内温度分布

本節では、推定の対象となる温度分布の理論解を求める。Fig. 2-4において、初期条件および $x=0$ 面の境界条件を任意としたときの材料内温度は、次の方程式の解として与えられる。

基礎方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-55)$$

初期条件

$$u = f(x), \quad t = 0 \quad (2-56)$$

境界条件

$$u = \varphi(t), \quad x = 0 \quad (2-57)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad x = a \quad (2-58)$$

この解は、以下に示した (a) 初期条件のみを考慮した解 v と、(b) 境界条件のみを考慮した解 w の和として得られる。

(a) 初期条件のみを考慮した解

基礎方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-59)$$

初期条件

$$v = f(x), \quad t = 0 \quad (2-60)$$

境界条件

$$v = 0, \quad x = 0 \quad (2-61)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad x = a \quad (2-62)$$

この解を $v(x, t)$ とすると、

$$v(x, t) = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} v_n(0) \cdot e^{-\alpha C_n^2 t} \cdot \sin C_n x \quad (2-63)$$

となる。ただし、

$$C_n = \frac{\pi}{a} \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2-63-1)$$

$$v_n(0) = \int_0^a \sin C_n x \cdot f(x) dx \quad (2-63-2)$$

である。(2-63)式より時刻 t_0 における温度分布は、

$$v(x, t_0) = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} v_n(0) \cdot e^{-\alpha C_n^2 t_0} \cdot \sin C_n x \quad (2-64)$$

となる。これが、任意の初期条件下での推定対象の温度分布である。

(b) ~~境界条件のみを考慮した解~~

基礎方程式

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-65)$$

初期条件

$$w = 0, \quad t = 0 \quad (2-66)$$

境界条件

$$w = \varphi(t), \quad x = 0 \quad (2-67)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad x = a \quad (2-68)$$

この解を $w(x, t)$ とすると、

$$w(x, t) = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} w_n(t) \cdot \sin C_n x \quad (2-69)$$

となる。ただし、

$$w_n(t) = \frac{a_0}{2C_n} (1 - e^{-\alpha C_n^2 t})$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\alpha C_n}{\alpha^2 C_n^4 + \left(\frac{k\pi}{t_0}\right)^2} a_k \left[\alpha C_n^2 \left\{ \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}t\right) - e^{-\alpha C_n^2 t} \right\} + \frac{k\pi}{t_0} \sin\left(\frac{k\pi}{t_0}t\right) \right] \quad (2-69-1)$$

である。式中の a_0, a_k は、境界条件 $\varphi(t)$ を $\varphi(-t) = \varphi(t)$ と置いて、

区間 $-t_0 \leq t \leq t_0$ でフーリエ展開したときの係数であり、以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right)t \\ a_k &= \frac{2}{t_0} \int_0^{t_0} \varphi(\tau) \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{t_0}\right)\tau \cdot d\tau \end{aligned} \right\} (2-69-2)$$

(2-69) 式より、時刻 t_0 における温度分布は、

$$\begin{aligned} w(x, t_0) &= \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{a_0}{2C_n} (1 - e^{-\alpha C_n^2 t}) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \frac{\alpha^2 C_n^3}{\alpha^2 C_n^4 + \left(\frac{k\pi}{t_0}\right)^2} \left\{ (-1)^k - e^{-\alpha C_n^2 t_0} \right\} \right] \sin C_n x \end{aligned} \quad (2-70)$$

となる。これが、 $x=0$ 面の境界条件を任意とした場合の、推定対象の温度分布である。

以上により、初期条件および $x=0$ 面の境界条件が任意の場合の、時刻 t_0 における温度分布は、(2-64) 式および (2-70) 式を用いて、

$$u(x, t_0) = v(x, t_0) + w(x, t_0), \quad (2-71)$$

と表わされる。

2. 4. 2. 温度分布の推定

$x=0$ 面および $x=a$ 面の温度のみが観測されたものと考えて、時刻 t_0 における温度分布 $u(x, t_0)$ を推定する。これも、 $v(x, t_0)$ と $w(x, t_0)$ の和で表わされるので、次の (a), (b) の場合に分けて推定解析を行なう。

(a) $v(x, t_0)$ の推定

$x=0$ 面の温度は、(2-61) 式で与えられている。 $x=a$ 面の温度は、(2-63) 式で $x=a$ とおくことにより、

$$v(a, t) = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} v_n(0) \cdot (-1)^n e^{-\alpha C_n^2 t} \quad (2-72)$$

となる。

これらを知って、推定のために解くべき問題は次のように書ける。

基礎方程式

$$\frac{\partial v'}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 v'}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-73)$$

初期条件

$$v'_{t=0} \rightarrow \text{消滅}, \quad t \rightarrow \infty \quad (2-74)$$

境界条件

$$v' = 0, \quad x = 0 \quad (2-75)$$

$$v' = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} v_n(0) \cdot (-1)^n \cdot g_n(t), \quad x = a \quad (2-76)$$

ただし、 $g_n(t)$ は、

$$\left. \begin{array}{l} \text{(i) } 2m t_0 \leq t \leq (2m+1)t_0, \quad m=0, 1, 2, \dots \text{ で} \\ g_n(t) = e^{-\alpha C_n^2 (t-2m t_0)} \\ \text{(ii) } (2m+1)t_0 \leq t \leq (2m+2)t_0, \quad m=0, 1, 2, \dots \text{ で} \\ g_n(t) = e^{-\alpha C_n^2 \{(2m+2)t_0 - t\}} \end{array} \right\} \quad (2-76-1)$$

である。

この解を求めて $t = (2m+3)t_0$ とおき、 $m \rightarrow \infty$ とする。このとき得られる温度分布を $v'(x, t_0)$ と書くと、

$$v'(x, t_0) = \frac{2}{a} \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{l+1} \frac{2\alpha l \pi}{a^2} \sum_{n=0}^{\infty} v_n(0) \cdot (-1)^n \cdot \sin\left(\frac{l\pi}{a}\right) x \cdot (v'_s + v'_e) \quad (2-77)$$

ただし、

$$v'_s = \frac{e^{-\alpha C_n^2 t_0}}{\alpha \left\{ \left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 - C_n^2 \right\}} \quad (2-77-1)$$

$$v'_e = e^{-\alpha \left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 t_0} \times \left[\frac{-1}{\alpha \left\{ \left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 - C_n^2 \right\}} + \frac{1}{\alpha \left\{ \left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 + C_n^2 \right\}} \right] \quad (2-77-2)$$

が求まる。(2-77)式が、温度分布 $v(x, t_0)$ の推定式である。なお、次節に示す温度分布の推定が可能な範囲内では、

$$E = e^{-\alpha \left\{ \left(\frac{l\pi}{a} \right)^2 + C_n^2 \right\} t_0}, \quad l=1,2,3,\dots \text{ かつ } n=0,1,2,\dots \quad (2-77-3)$$

は十分小さな値となるので、(2-77-2)式は E' または E' より小さいものを含む項を省略して示した。

(b) $w(x, t_0)$ の推定

ここでは、(2-70)式の $w(x, t_0)$ を推定する。 $x=0$ 面の温度は(2-67)式に(2-69-2)式を適用して得られる。 $x=a$ 面の温度は、(2-69)式で $x=a$ とおいて求まる。

$$w(a, t) = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot w_n(t) \quad (2-78)$$

これらにより、推定のために解くべき問題は次のように書ける。

基礎方程式

$$\frac{\partial w'}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 w'}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-79)$$

初期条件

$$w'_{t=0} \longrightarrow \text{消滅}, \quad t \rightarrow \infty \quad (2-80)$$

境界条件

$$w' = \varphi(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{k\pi}{t_0} t\right), \quad x=0 \quad (2-81)$$

$$w' = \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n g_n(t) \quad , \quad x=a \quad (2-82)$$

ただし、 $g_n(t)$ は、(2-69-1) 式の $W_n(t)$ を用いて、

$$\left. \begin{aligned} (i) \quad 2mt_0 \leq t \leq (2m+1)t_0 \quad , \quad m=0, 1, 2, \dots \text{で} \\ g_n(t) = W_n(t-2mt_0) \\ (ii) \quad (2m+1)t_0 \leq t \leq (2m+2)t_0 \quad , \quad m=0, 1, 2, \dots \text{で} \\ g_n(t) = W_n\{(2m+2)t_0 - t\} \end{aligned} \right\} (2-82-1)$$

と表わされる。

この解を求めて $t = (2m+3)t_0$ とおき、 $m \rightarrow \infty$ とする。このとき得られる温度分布を $w'(x, t_0)$ と書くと、

$$w'(x, t_0) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2\alpha \ell \pi}{a^2} \sin\left(\frac{\ell \pi}{a}\right) x \left\{ \frac{a_0}{2} (w'_{s1} + w'_{e1}) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k (w'_{s2} + w'_{e2}) \right\} \quad (2-83)$$

となる。ただし、式中の w'_{s1} , w'_{e1} , w'_{s2} , w'_{e2} , は、

$$w'_{s1} = \frac{1}{\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2} + (-1)^{\ell+1} \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{C_n} \left[\frac{1}{\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2} - \frac{e^{-\alpha C_n^2 t_0}}{\alpha \left\{ \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2 - C_n^2 \right\}} \right] \quad (2-83-1)$$

$$w'_{e1} = (-1)^{\ell+1} \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{C_n} e^{-\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2 t_0} \left[\frac{1}{\alpha \left\{ \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2 - C_n^2 \right\}} - \frac{1}{\alpha \left\{ \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2 + C_n^2 \right\}} \right] \quad (2-83-2)$$

$$\begin{aligned} w'_{s2} = & (-1)^{\ell+1} \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha C_n}{\alpha^2 C_n^4 + \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2} \left[(-1)^k \frac{\alpha^2 \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2 C_n^2 - \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2}{\alpha^2 \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^4 + \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2} - \alpha C_n^2 \frac{e^{-\alpha C_n^2 t_0}}{\alpha \left\{ \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2 - C_n^2 \right\}} \right] \\ & + (-1)^k \frac{\alpha \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^2}{\alpha^2 \left(\frac{\ell \pi}{a}\right)^4 + \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2} \end{aligned} \quad (2-83-3)$$

$$\begin{aligned}
 w'_{e2} = & (-1)^{\ell+1} \frac{2}{a} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\alpha C_n}{\alpha^2 C_n^4 + \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2} e^{-\alpha \left(\frac{K\pi}{a}\right)^2 t_0} \\
 & \times \left[\frac{2 \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2}{\alpha^2 \left(\frac{K\pi}{a}\right)^4 + \left(\frac{K\pi}{t_0}\right)^2} + \alpha C_n^2 \left\{ \frac{1}{\alpha \left\{ \left(\frac{K\pi}{a}\right)^2 - C_n^2 \right\}} - \frac{1}{\alpha \left\{ \left(\frac{K\pi}{a}\right)^2 + C_n^2 \right\}} \right\} \right] \quad (2-83-4)
 \end{aligned}$$

である。

(2-83) 式が、温度分布 $w(x, t_0)$ の推定式である。なお、ここでも、(2-83-2) 式の w'_{e1} および (2-83-4) 式の w'_{e2} は、(2-77-3) 式に示した E' または E' よりも小さいものを含む項を省略して示した。

以上で求めた (a) および (b) の結果により、(2-71) 式に示された温度分布 $u(x, t_0)$ 、 $0 < x < a$ に対する推定式を $u'(x, t_0)$ と書くと、これは、(2-77) 式および (2-83) 式を用いて、

$$u'(x, t_0) = v'(x, t_0) + w'(x, t_0) \quad (2-84)$$

と表わすことができる。

2. 4. 3. 温度分布の推定式の誤差

(a) $v(x, t_0)$ に対する $v'(x, t_0)$ の誤差

(2-64) 式に示した温度分布 $v(x, t_0)$ と、この推定式である (2-77) 式の $v'(x, t_0)$ について考察する。

前節と同様に、(2-77) 式で $v'_e = 0$ として v'_s のみを含んだ項の級数を計算すると、これは、(2-64) 式の $v(x, t_0)$ と一致するので、(2-77) 式の v'_e を含む項が推定式の誤差を示すことがわかる。そこで、これを $E v'$ と表記し、

$$\left| \frac{E v'}{v(x, t_0)} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2-85)$$

により、推定式の誤差を算出した。

Table 2-8 は、フーリエ数を $F_0 = 0.70$ とした場合の材料内各位置にお

ける推定誤差を、計算条件とともに示したものである。この結果から、位置を示すパラメータ X が 0.1 のとき、誤差は最大となることがわかる。

Table 2-8 Position X vs Error

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	1.00	0.96	0.90	0.82	0.72	0.60	0.46	0.31	0.16

(Note)

Surface at $x=a$ is insulated.

Fourier number = 0.70, $a = 5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha = 1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)

Position = X ($0 < x < a$, $x = aX$ ($0 < X < 1$))

次に、誤差の部分構成する (2-77-2) 式の v'_e の指数項をみると、

$$e^{-\alpha \left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 t_0} = e^{-(l\pi)^2 F_0}, \quad F_0 = \frac{\alpha t_0}{a^2} \quad (2-86)$$

である。この式の形から、誤差の大小は主に F_0 に左右されることがわかる。そこで、位置のパラメータ X を誤差が最大となる 0.1 に固定して F_0 と誤差の関係を求め、計算条件とともに Table 2-9 に示した。

Table 2-9 Fourier number F_0 vs Error

F_0	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
Error(%)	4.42	3.04	2.10	1.45	1.00	0.69	0.48	0.33	0.23

(Note)

Surface at $x=a$ is insulated.

Position $X=0.1$, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)

以上の結果により、推定式 $v'(x, t_0)$ は、

$$F_0 \geq 0.70 \quad (2-87)$$

を満足する条件下では、1%以下の誤差で $v(x, t_0)$ を推定できることが明らかになった。

(b) $w(x, t_0)$ に対する $w'(x, t_0)$ の誤差

(2-70) 式に示した温度分布 $w(x, t_0)$ と、この推定式である (2-83)

式の $w'(x, t_0)$ について考察する。

まず、 a_0 の係数部について検討する。(2-83) 式で $w'e_1=0$ として $w's_1$ のみを含んだ項の級数を計算すると(2-70) 式の a_0 の係数部に一致するので、(2-83) 式の $w'e_1$ を含む項が誤差項である。そこで、これを Ew_1 とおいて、(2-70) 式の a_0 の係数部を w_0 として、

$$\left| \frac{Ew_1}{w_0} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2-88)$$

により、推定式の a_0 の係数部に含まれる誤差を算出した。

次に、 a_k の係数部についても同様に、(2-83) 式の $w'e_2$ を含む項が誤差項となる。そこで、これを Ew_2 、(2-70) 式の a_k の係数部を w_k として、

$$\left| \frac{Ew_2}{w_k} \right| \times 100 \quad (\%) \quad (2-89)$$

により、推定式の a_k の係数部に含まれる誤差を算出した。

いずれも、 $F_0=0.70$ として、材料内各位置における誤差を求めた。この結果を、 a_0 の係数部の誤差と計算条件については Table 2-10 に、 a_k の係数部の誤差と計算条件については Table 2-11 に示した。いずれの係数についても、材料内の位置によらず、誤差は1%以下となる。

一方、 F_0 と誤差の関係については、誤差項を構成する $w'e_1$ 、 $w'e_2$ とともに(2-86) 式に示した指数部を含んでいるので、 F_0 が増大すれば誤差が減少することは明らかである。また、 a_k の係数部の誤差に関しては、 $k \neq 1$ の場合について

Table 2-10 Position X vs Error (Coefficient of a_0)

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.08	0.08	0.07	0.05	0.03

(Note)

Surface at $x=a$ is insulated.

Fourier number=0.70, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)

Position=X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$))

も Table 2-11 と同様の結果が得られることは、式の形からみて明らかである。

Table 2-11 Position X vs Error (Coefficient of a_k , $k=1$)

X	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Error(%)	0.02	0.05	0.08	0.12	0.17	0.22	0.26	0.26	0.18

(Note)

Surface at $x=a$ is insulated.

Fourier number=0.70, $a=5.0 \times 10^{-3}$ (m), $\alpha=1.2 \times 10^{-7}$ (m^2/s)

Position= X ($0 < x < a$, $x=aX$ ($0 < X < 1$))

この結果、推定式 $w'(x, t_0)$ も (2-87) 式に示した条件を満たせば、1%以下の誤差で $w(x, t_0)$ を推定できることがわかった。

以上の (a), (b) の場合において、 $u'(x, t_0)$ を構成する $v'(x, t_0)$ および $w'(x, t_0)$ が (2-87) 式を満たす条件下で、それぞれ独立に1%以下の誤差で $v(x, t_0)$ および $w(x, t_0)$ を推定できることを示した。したがって、これらの和である推定式 $u'(x, t_0)$ が、誤差1%以下という精度を有するのは当然である。

2.5. シミュレーションによる検証

これまでの理論的な検討により、境界面温度のみを用いて材料内温度分布を推定できることを示した。理論では、初期条件から定まる温度と境界条件から定まる温度とに分けて考えたが、実際には、これらが足し合わされた温度が観測される。そこで本節では、シミュレーションの利用により実際の温度変化に対応した温度を求め、理論を検証した。まず、材料内の温度変化をシミュレートして境界面温度と時刻 t_0 の温度分布を求めた。次に、この境界面温度を実測値であると想定して時刻 t_0 の温度分布を推定し、その結果とシミュレーションで得た温度分布とを比較した。

2.5.1. 材料内温度のシミュレーション

シミュレーションは、2.4. 節で論じた実用的な体系に関して行なった。すなわち、Fig. 2-4の系に関して、

熱伝導基礎式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (2-90)$$

初期条件

任意の初期温度分布の1例として、Fig. 2-5に示したような温度分布を仮定し、材料を9等分して両表面を含む10ヶ所の位置の温度を与えた。

境界条件

$x=0$ 面: $x=0$ 面には、理論に則して任意の温度波形を与える必要がある。そこで、 t_0 時間内に加熱および冷却をした場合の例としてFig. 2-6に示したような温度波形を仮定し、 t_0 を30等分して31点の温度を与えた。

$x=a$ 面: $x=a$ 面には、

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad x = a \quad (2-91)$$

を与えた。

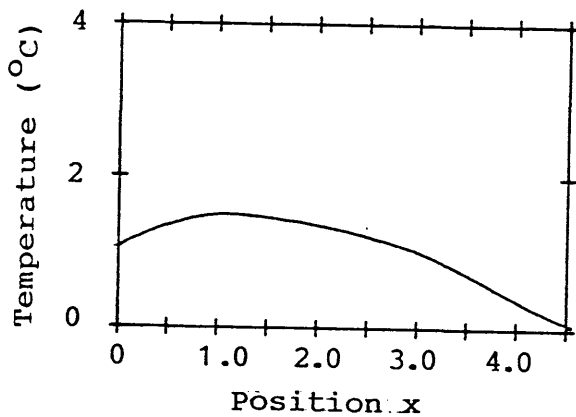


Fig. 2-5 Initial condition

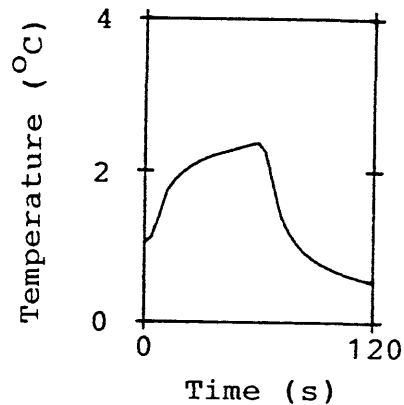


Fig. 2-6 Boundary condition at $x=0$

(2-90)式に対応する基礎となる階差式は、

$$u_{i,j+1} - u_{i,j} = R \left\{ \zeta (u_{i+1,j+1} - 2u_{i,j+1} + u_{i-1,j+1}) + (1-\zeta) (u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}) \right\} \quad (2-92)$$

ただし、

$$R = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}, \quad \zeta = \text{荷重} \quad (2-92-1)$$

である。(2-91)式に対応する断熱面の条件には、

$$\frac{U_{n+1,j} - U_{n-1,j}}{2 \cdot \Delta x} = 0, \quad \frac{U_{n+1,j+1} - U_{n-1,j+1}}{2 \cdot \Delta x} = 0 \quad (2-93)$$

を用いた。ここで、添字 i, j は、それぞれ、格子点の位置座標、時間座標を示しており、添字 n は、断熱面の位置座標を示す。

(2-92)式を用いて得られる数値解の誤差については、検討の結果、 R および荷重 ζ が

$$\zeta = 0.5178 - 0.08754/R \quad (2-94)$$

という式で与えられる関係にあるとき最少になるということを確認している。(7)

そこで、 ζ の値は(2-94)式を満足するように定めた。なお、(2-94)式で得られる ζ は、数値解の収束条件⁽²⁹⁾

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq \zeta \leq \frac{1}{2} \text{ のとき} & R \leq \frac{1}{2(1-2\zeta)} \\ \frac{1}{2} \leq \zeta \leq 1 \text{ のとき} & \text{無条件} \end{array} \right\} \quad (2-95)$$

を満足している。

Table 2-12には、シミュレーションを行なうために与えた温度伝導率、材料の厚さ、観測時間などの、諸条件を示した。

Table 2-12 Conditions given for numerical analysis

Thermal diffusivity : α	$1.20 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Thickness : a	4.5 mm
Period : t_0	120 s
Number of divisions of a	9
Number of divisions of t_0	30

(*) Fourier number = 0.71

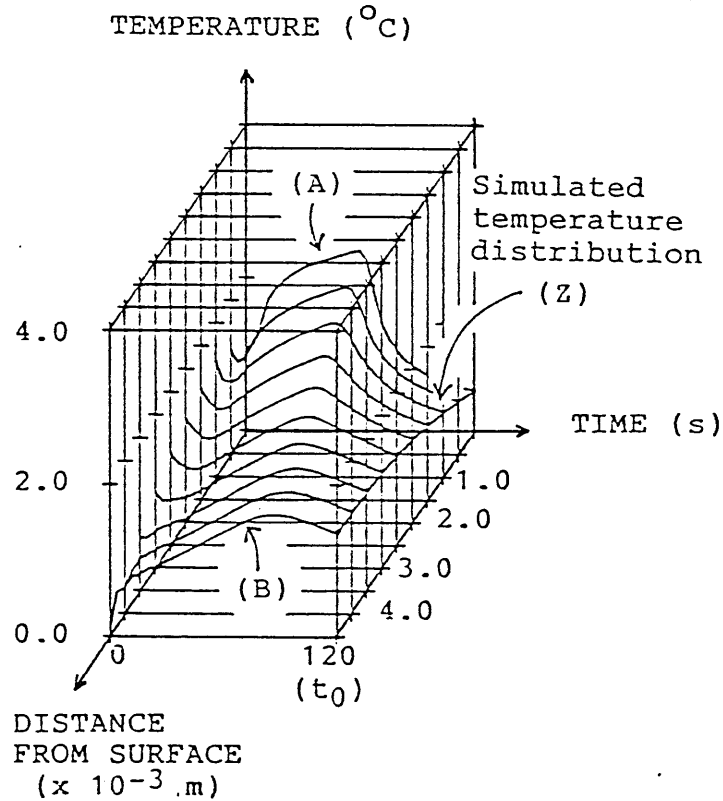


Fig.2-7 Simulated temperature distribution

以上に示した条件下で、材料内各位置の温度変化および時刻 t における材料内温度分布のシミュレーションを行なった結果を、Fig. 2-7に示した3次元のグラフで表現した。図中の (A) は、Fig. 2-6に示した境界条件を、(B) はシミュレーションの結果得られた断熱面の温度を示している。また、推定対象となる温度分布は (Z) で示した。

2.5.2. 温度分布 (Z) の推定

Fig. 2-7に示した境界面温度 (A) および (B) のみが観測されたものと考えて温度分布 (Z) を推定した。この推定の手順を、Fig. 2-8にフローチャートを用いて示した。これを簡単に説明すると、次のようになる。まず、温度伝導率を与える。次に、境界面温度の観測値 (A) および (B) を用いて時刻 t の軸に対象な温度波形 (A) - (A') および (B) - (B') を作り、これを推定解析における境界面温度とする。初期条件は、任意である。言い換えれば、初期温度としてどん

な温度（数値）を与えても、次のLoop (I) で示すように、便宜上の初期温度はLoop (I) の計算が収束するまで順次入れ替わっていくので、ここではゼロとしている。これらを設定した後、時刻0から $2t_0$ まで時間を進めて材料内温度を計算し、その結果得られる、時刻0および $2t_0$ における材料内各位置の温度を比較する。もし両者が異なる場合は、時刻 $2t_0$ における温度を時刻0に移し、再度、時刻0から $2t_0$ まで時間を進めて材料内温度を計算する。これが、Loop (I) である。上述の両者が一致した時点で計算を終了する。このとき得られる時刻 t_0 の温度分布が、求める温度分布(Z)の推定値となる。

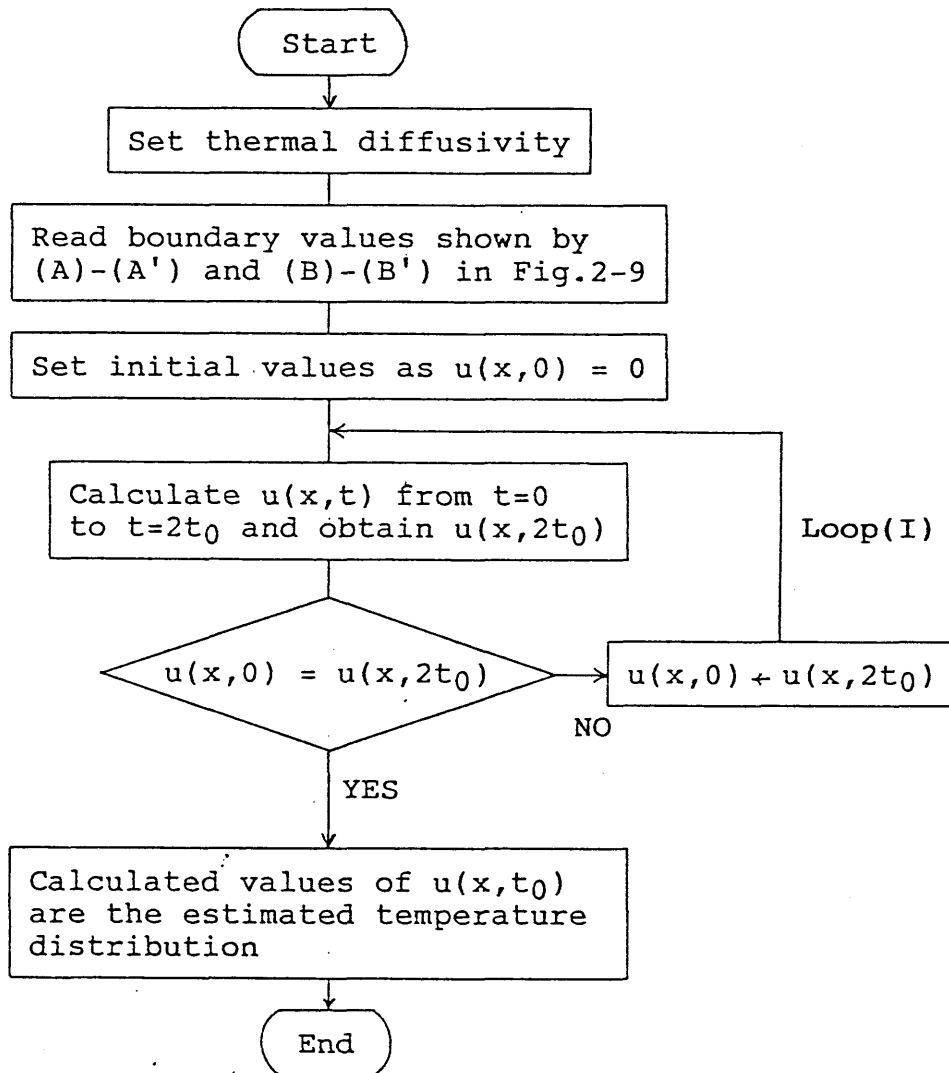


Fig.2-8 Procedure for numerical estimation of temperature distribution

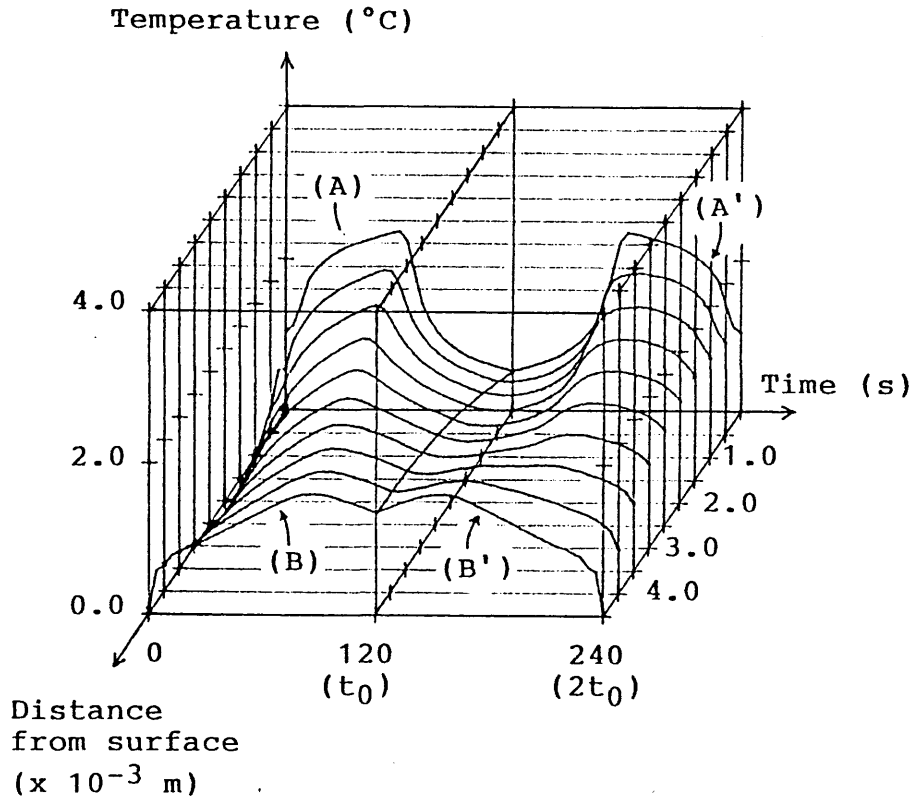


Fig. 2-9 Temperature variations obtained from estimating calculation on the first interval of period

材料内温度分布の推定計算における途中経過および結果を図示すると、次のようになる。Fig. 2-9は、フローチャート中のLoop (I)における1回目の計算結果を3次元グラフで表現したもので、この図により、材料内各位置における温度の経時変化を知ることができる。図から明らかなように、時刻0と $2t_0$ における温度分布は一致していない。そこで、時刻0の材料内各位置の温度を時刻 $2t_0$ における温度で置き換え、これを第2回目の計算における初期温度と考えて、再度、同様の計算を行なった。この結果を、Fig. 2-10に示した。この2回目の計算の結果、時刻0と $2t_0$ における温度分布が一致したので、ここで計算を打ち切った。Fig. 2-10に(Z')で示した時刻 t_0 における温度分布が、Fig. 2-7に示した温度分布(Z)の推定値である。

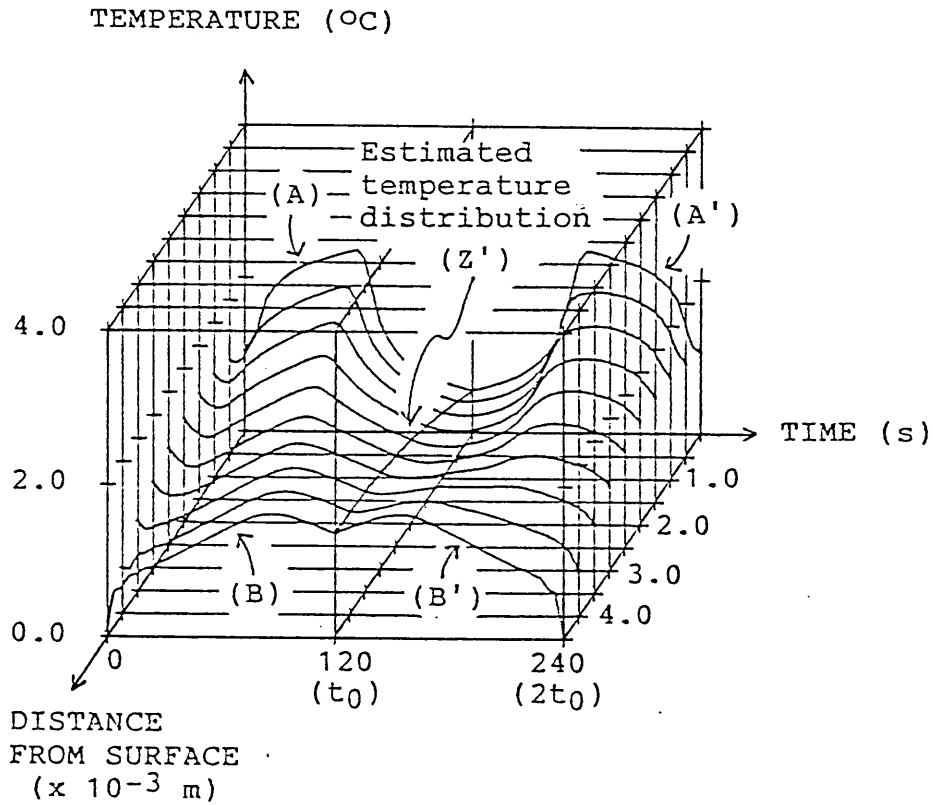


Fig.2-10 Estimated temperature distribution

(Z) と (Z') を比較するために、Fig. 2-11 にシミュレーション値 (Z) を実線で、推定値 (Z') を○印で示し、両者の一致の度合いをみた。図から容易に判断されるように、本方法によって極めて高い精度で温度分布の推定値を得ることができた。シミュレーションおよび推定計算では、有効数字4ケタで温度を表示させたが、Fig. 2-11 に○印で示した推定値の誤

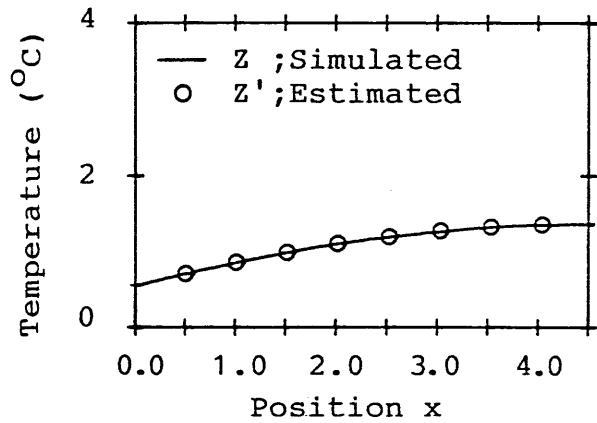


Fig.2-11 Temperature distribution Z and Z' at t=t₀

差は、最大で0.014%であった。

以上、シミュレーションを行なって温度分布推定法の理論を検証した結果、理論どおりに温度分布の推定が行なえることが確認された。

なお、本推定法を、視点を変えて次のように説明することもできる。すなわち、先の推定計算は、温度分布(Z)に至る熱的経路には、Fig. 2-7に示した時刻0における温度分布を出発点とする経路以外に、Fig. 2-10に示した時刻0における温度分布を出発点とする第2の経路が存在することを示したものであると考えることができるので、本推定法は、第2の経路を一意的に求める手法を提示したものであると言うこともできる。

2.6. 摘要

無限平板内の一次元熱流が仮定されるとき、材料の両境界面の温度を t 。時間観測し、この観測値のみを用いて時刻 t 。における材料内温度分布を推定する方法を考案した。

この温度分布推定法について理論的に検討し、以下の(1)、(2)の結論を得るとともに、シミュレーションによって理論の検証を行ない、その妥当性を確認した。

(1) Fig. 2-1に示した一般的な体系では、温度観測位置の少なくとも一方を材料内部に取る必要がある。この位置をパラメータ P_1 で代表させると、(2-52)式の条件

$$P_1 \geq 0.25 \quad \text{かつ} \quad F_0 \geq 0.55, (P_2 = 0) \quad (2-52)$$

を満足すれば、任意の初期条件および境界条件下で温度分布の推定が可能であり、推定誤差は1%以下である。なお、 $P_2 > 0$ の場合は、更に精度が向上する。

(2) 実用的な体系として、Fig. 2-4に示した1つの面が断熱された系を考え、この場合には、材料の両表面温度の観測値のみを用いて材料内温度分布の推定が可能であることを示した。このときの推定可能な条件は、(2-87)式の

$$F_0 \geq 0.70 \quad (2-87)$$

である。これを満足するとき、任意の初期条件および境界条件下で温度分布の推定が可能であり、推定誤差は1%以下である。

なお、ここに示した温度分布推定法を、本論文においては”境界値法”（仮称）と呼ぶことにする。

第3章 温度伝導率測定法の提案

3.1. 緒言

穀物は、多くの工業材料と異なり、多量の水分を含むのが一般的である。この水分は、大気中の湿度などの環境条件により影響を受けて変動する。すなわち、穀物の水分が周囲空気に対応した平衡水分でない場合、水分の移動が生じて吸湿あるいは乾燥の過程が進行するので、⁽⁵³⁾ ⁽⁷³⁾ 特別な環境制御を行わない限り、一定の水分を長時間保持することは容易ではない。更に、農産物が加熱あるいは冷却される場合には、このような水分の移動は、一層避け難いものになる。したがって、農産物の熱伝導率や温度伝導率の測定には、短時間で行なえる測定法を選択することが望まれる。このような理由から、農産物のような含水材料に対しては、定常法よりも非定常法を用いる方が有利であるとされている。

第2章でも触れたように、非定常法の利点は、試料の加熱を開始してから測定を終了するまでの時間が短いという点に尽きる。一方、欠点としては、

(1) 仮定した境界条件の実現に難しさが伴うと同時に、この実現の度合いが測定精度を左右すること。

(2) 初期条件には一様な温度分布を仮定した測定法が多いが、これの実現に要する時間が長いこと。

が指摘されよう。欠点(2)に関しては、次のような具体例を示すことができる。粉充填層内に一様な温度分布を実現するための所要時間は、充填層の厚さや目標とする温度によっても異なるが、半径10-100mmの円筒内の半径方向温度分布を例にとると、筆者の経験では2-20時間にもものぼる。

農産物の熱的プロセスにおいて、熱物性値が温度によって変化するという非線形性の考慮を必要とする問題が増加している現在、熱物性値を温度の関数として広い温度範囲にわたって測定しておくことが熱的プロセスの解明に不可欠な要件となっている。しかし、この目的に対して、具体例を示したような欠点(2)は大きな阻害要因である。工業材料の方面ではこのような指摘が既になされ、その解決策としての測定法も呈示されているが、⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾ ⁽⁵⁹⁾ 境界条件に関する制約は残されたままである。欠点(1)に対しては、境界条件の任意性を許したラプラス変換法が開発され、⁽¹⁾ 初期条件に関しても、一意的に仮定するこれまでの方法に対して、

一定の任意性（直線分布）を認めている。

このような現状の把握から、欠点（1）および（2）を補い、かつ、先にあげた利点を生かした新しい温度伝導率測定法を構築し、方法の検証を行なった。この測定法は、第2章に詳述した境界値法（任意の初期条件および境界条件下での温度分布推定法）を基礎としたもので、初期条件および境界条件が基本的に任意であるという特徴を有するものである。本章では、新測定法の測定原理および方法の妥当性を確かめるために行なった基礎実験結果について述べる。

3. 2. 温度伝導率測定法の提案

3. 2. 1. 測定原理

前章の Fig. 2-1 に示した無限平板および Fig. 2-4 に示した1端面が断熱された無限平板について考える。以後、前者の系を SYSTEM 1、後者の系を SYSTEM 2 と呼ぶ。これらの系に関して、初期条件および境界条件が任意の場合の材料の温度変化の模式図を次に示す。

SYSTEM 1 については、 $x = P_1 a$ 面の温度を A_1, A_2 、 $x = (1 + P_1) a$ 面の温度を B_1, B_2 、そして、材料内の任意の位置 x_c （ただし、 $P_1 a < x_c < (1 + P_1) a$ ）における温度を C とおいて、 $0 \leq t \leq 2t_0$ なる時間領域について、Fig. 3-1 に示した。

SYSTEM 2 については、 $x = 0$ 面の

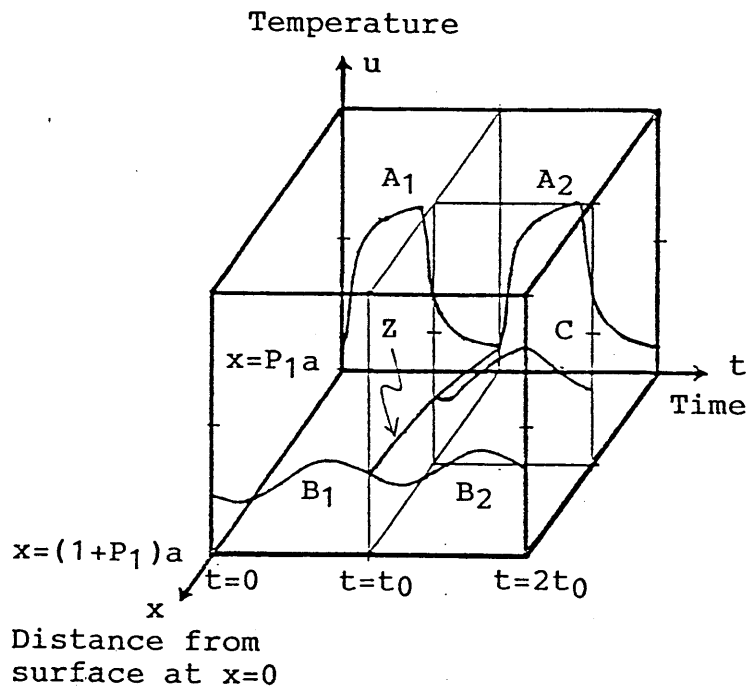


Fig.3-1 A drawing for explaining new thermal diffusivity measurement method for SYSTEM 1

温度を A_1 , A_2 , $x = a$ 面の温度を B_1 , B_2 とおいて $0 \leq t \leq 2t_0$ なる時間領域について Fig. 3-2 に示した。Z は、両図ともに時刻 t_0 における温度分布を示している。いずれの図においても、 A_1 , A_2 および B_1 , B_2 は測定して得られる温度であり Z は推定して求められる温度であることを示している。

これらの図を参考に
して本測定法により温

度伝導率を求める手順を、フローチャートの形で Fig. 3-3 に示した。

3. 2. 2 適用条件

本測定法の原理は、専ら、フローチャート中に (E) で指示した部分、すなわち、境界値法による温度分布 Z の推定の可否に、その成立を委ねている。したがって、本測定法の適用条件は、基本的に第 2 章に示した境界値法の適用条件に一致している。

これを示すと、温度分布の推定値に 1% 以下の誤差を認める場合、

適用条件 (1)

SYSTEM 1 に関して、

$$F_0 \geq 0.55, \quad P_1 \geq 0.25, \quad P_2 \geq 0 \quad (3-1)$$

SYSTEM 2 に関して、

$$F_0 \geq 0.70 \quad (3-2)$$

となる。

更に、Fig. 3-3 のフローチャートでは、試料の温度伝導率の温度による変化

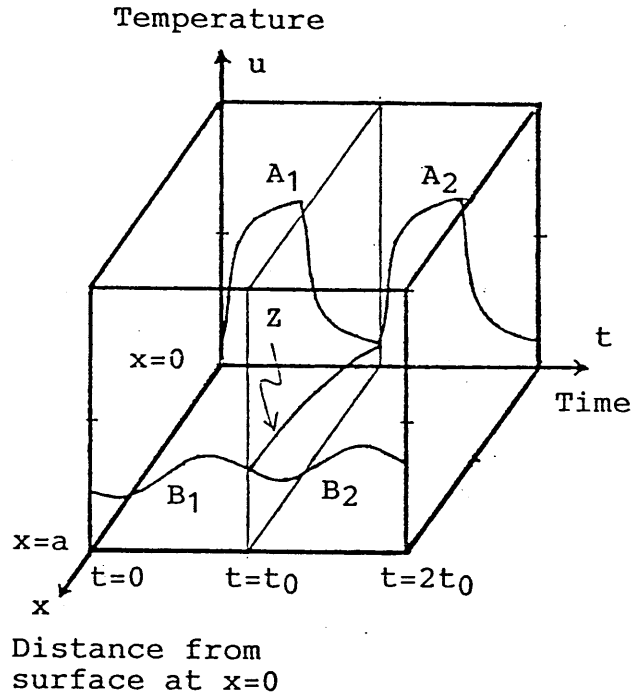


Fig.3-2 A drawing for explaining new thermal diffusivity measurement method for SYSTEM 2

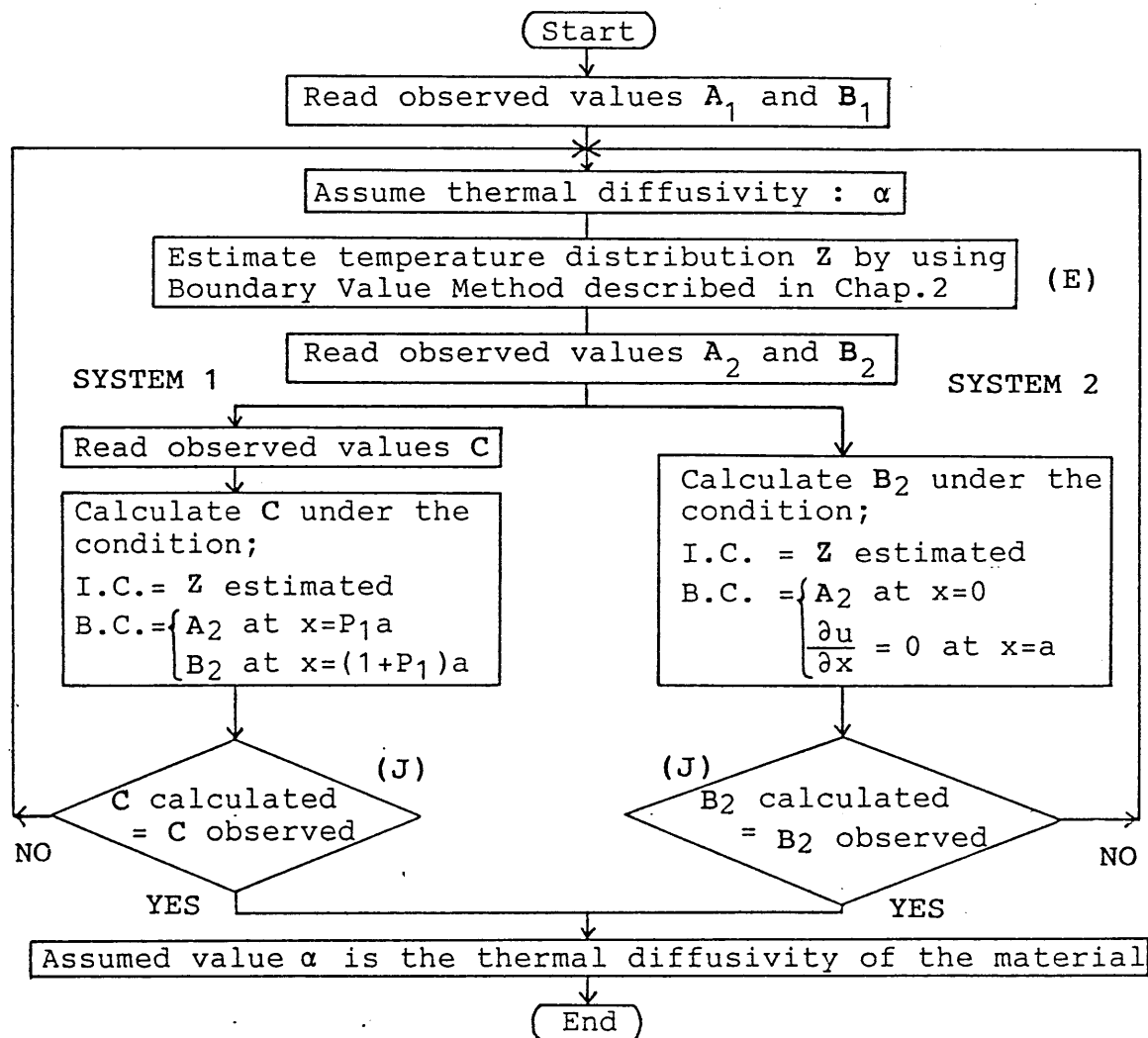


Fig. 3-3 Procedure for determining thermal diffusivity

が考慮されていないので、次に示す制限が加わる。

適用条件 (2)

SYSTEM 1 および SYSTEM 2 に関して、2 t。時間内の試料温度の変化は、温度伝導率の変化が無視できる範囲内であること。

この条件により、得られる温度伝導率は、2 t。時間の試料の平均温度に対応した値となる。なお、付け加えるならば、適用条件 (2) は、温度伝導率の温度依存性を求める上で何ら支障となるものではない。Fig. 3-1 および Fig. 3-2 に示した温度は、連続して上昇している温度データの任意の 2 周期分を表示したにすぎない。

い。したがって、これに続く2周期分のデータ処理を行なえば、Fig. 3-1およびFig. 3-2に示したよりも高い平均温度に対応した温度伝導率が求められる。このようにして、1回の連続した温度データから温度伝導率の温度依存性を求めることができる。

3. 2. 3. 加熱条件

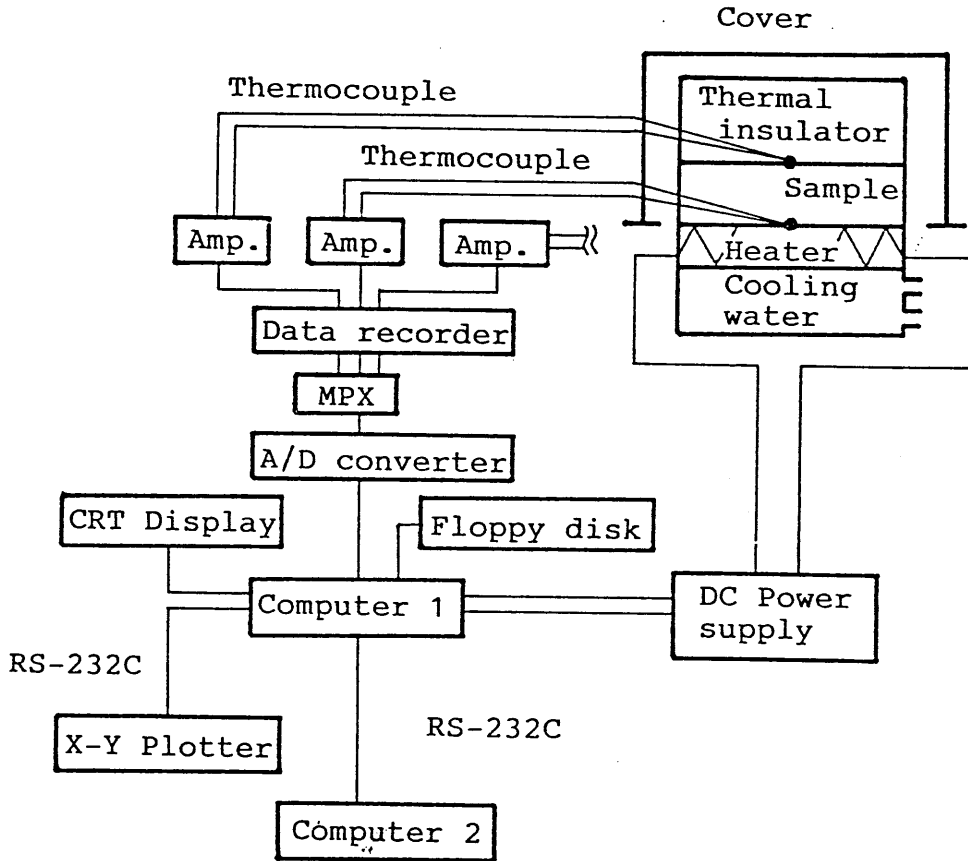
本測定法は境界条件の任意性を認めた方法であるので、加熱条件に関する制限は存在しないが、農産物に適用することを念頭において、次のような前提をおく。材料の温度伝導率を測定するためには、整形した試料を加熱（または冷却）して、試料の温度変化を検出することが必要である。試料を加熱すると試料内の水分が移動するのは、3. 1. 節でも述べたように自明の理であるが、一方に、試料内の水分は変化させずに温度伝導率を求めたいという要求がある。この要求を少しでも満たすことを目的に、SYSTEM 1およびSYSTEM 2の $x=0$ 面を一定の周期 t_0 で加熱・冷却し、Fig. 3-1およびFig. 3-2に示したような温度変化を与える。このようにすれば、材料内の温度勾配は半周期ごとに負 \rightarrow 正、正 \rightarrow 負を繰り返すことになり、水分の移動方向は半周期ごとに逆転する。したがって、マクロな見方をすれば、正または負のみの温度勾配を与える多くの方法に比べて、水分の移動量を少なくすることができると考えられる。

3. 2. 4. 温度伝導率の決定

温度伝導率の決定は、Fig. 3-3のフローチャートに指示した(J)の部分で $t_0 \leq t \leq 2t_0$ における温度の計算値と測定値を比較して行なう。基本的には、適当な位置の時刻 t_0 における温度の計算値と測定値の1点について比較すれば良いのであるが、こうすると測定誤差が混入しやすいので、 t_0 時間の温度データ全体で比較を行なうことにした。計算値の基本となる時刻 t_0 における温度分布 Z の推定値も、 $0 \leq t \leq t_0$ における全温度データによる評価で定まるものであるので、先にも述べたように、本方法で求められる温度伝導率は、その時間内の試料の全平均温度に対応した値であるといえる。

3. 3. 実験装置

前節で提案した測定法は、コンピュータを用いたデータ処理をぬきにしては、現実的な意味を成さないものである。そこで、データ処理も含めて、パーソナル・コンピ



(Note) Computer 1 = For temperature measurement
Computer 2 = For data processing

Fig.3-4 Schematic drawing of experimental apparatus

ユータによる測定自動化を図った。

3.3.1. 実験装置の概要

Fig. 3-4に計測部を中心にした実験装置の概要を示した。試料の下部にヒータ(約54W)を設置し、その電源を計測用コンピュータ1(沖電気製、if800 Model 10)によって半周期ごとにON-OFFする。ヒータの下部には冷却部が設けてあり、ポンプにより冷却水が常時循環するようになっている。このヒータと冷却部の組み合わせで、試料下面を加熱・冷却する。試料の平均温度および平均温度の上昇速度は、ヒータの容量と冷却水の温度および循環水量のバランスを取って調節する。試料のある温度測定部は、周囲空気の流入による温度の乱れを防ぐために、ア

クリル製のカバーで覆われている。Fig. 3-5に実験装置の全景を示した。

温度の検出には熱電対 (T; 直径0.1mm) を用い、SYSTEM 2では試料の上面および下面の2点、SYSTEM 1では試料内部にもう1点取り合計3点の温度を測定する。熱電対の起電力は、モジュール・アンプ (東京無線器材製LX4T24/CC), データ・レコーダ (TEAC製、MR-30), マルチプレクサ, A/Dコンバータ (沖電気製、IF80304) を介してコンピュータ1に取り込まれ、温度に変換されてディスプレイに表示される。この計測用コンピュータ1を、Fig. 3-6に示した。

サンプリングの総数が設定値に達するか、または、終了の割込みキーが押されるとヒータ電源がOFFになって測定は自動終了し、それまでに取り込んだデータは自動的にフロッピー・ディスクに記憶されて、次の作業待ちの状態になる。その後、温度データをX-Yプロッタ (グラフテック製、マイプロットII) に出力し、更に、データ処理用コンピュータ2 (精工舎製、SEIKO 9100) に転送してデータ処理を行ない温度伝導率を算出する。Fig. 3-7にデータ処理用コンピュータ2を、Fig. 3-8にX-Yプロッタを示した。

以上のように、ヒータ電源のON/OFFのタイミングやサンプリング間隔等の時間管理およびサンプリング総数の設定などは、すべてコンピュータ1で行なわれる自動測定システムを構成した。

3.3.2. 計測部の詳細

熱電対の起電力の増幅に用いたモジュール・アンプは、 $-200^{\circ}\text{C} \Rightarrow +200^{\circ}\text{C}$ の温度に対して $-2\text{V} \Rightarrow +2\text{V}$ の出力電圧を持つ仕様になっている。測定する温度範囲は $0-50^{\circ}\text{C}$ であるので $0-0.25\text{V}$ の出力電圧が得られるが、これでは小さすぎるので、データ・レコーダを介してアナログ量を記録すると同時に、これを10倍の増幅器として利用し、 $0-50^{\circ}\text{C}$ に対して $0-2.5\text{V}$ の電圧が得られるようにした。A/Dコンバータの分解能は12Bitで、 $\pm 5\text{V}$ の定格入力を有するので、測定温度に関する分解能は、単純に計算すると

$$50 / (4096 / 10 \times 2.5) = 0.049 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

となるが、これは、モジュール・アンプに内蔵されたりニアライザを信頼した場合の、一応の目安である。このリニアライザは、3次までの巾級数展開による近似を用いており、リニアリティがあまり良くないので、コンピュータ1でソフトウェアによるリ

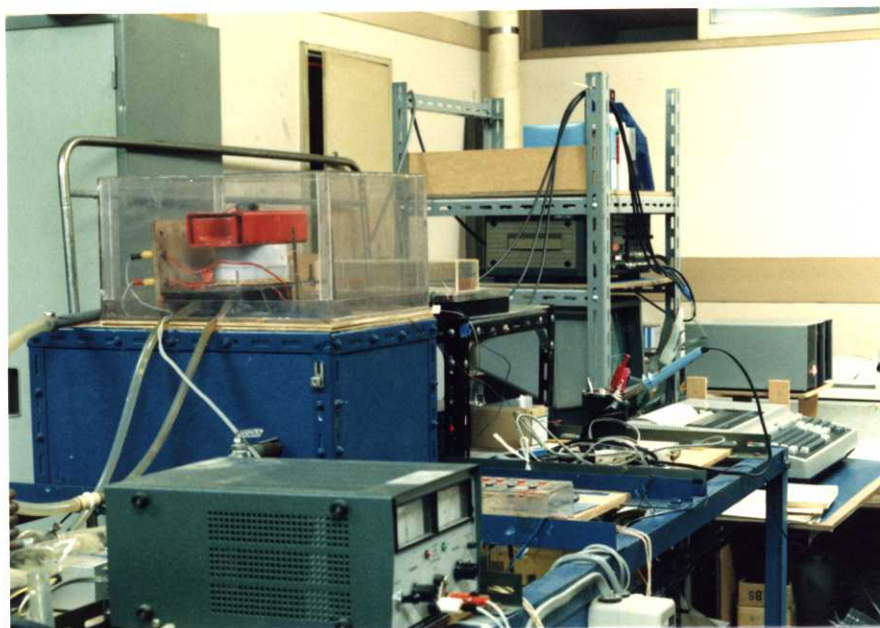


Fig.3-5 General view of experimental apparatus



Fig.3-6 Computer 1 for measurement



Fig.3-7 Computer 2 for data processing

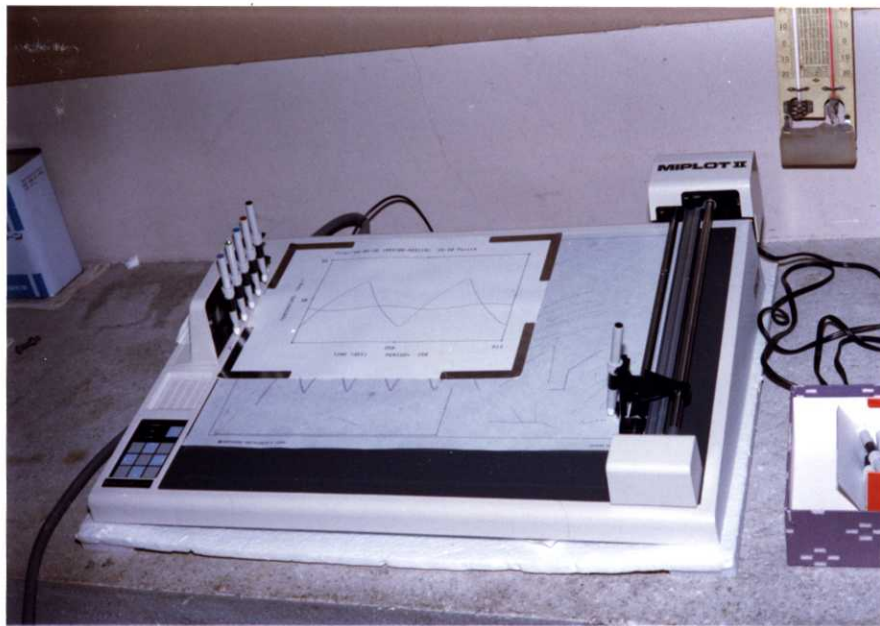


Fig.3-8 X-Y Plotter

ニアライズ演算を行なった。熱電対の検定は、二重管ガラス製の基準温度計（東亜計器製、0-50℃、0.1℃目盛り）を用いて行なった。A/DコンバータのA/D変換速度は200 μ sの定格を持つが、3チャンネルのアナログ・データを連続して取り込むプログラムをBASICで作成した場合、A/D開始から終了まで220msを要した。3点の同時測定という要求に対して220ms以下のズレが生じるが、温度の応答速度に比べてこの程度の時間のズレは無視できるので、プログラムを改良する際の便宜を図って、プログラム言語はBASICのままとした。

3.4. 基礎実験

3.4.1. 試料と温度測定点

試料には、均質で加工性がよく、かつ、信頼できる温度伝導率データが報告されているアクリル樹脂板（三菱レイヨン製、アクリライト）を選定した。試料の構成をFig. 3-9に示した。S1-S4はアクリル樹脂板で、厚さは、S1とS4は2.98mm、S2とS3は2.97mmである。広さは、側面から熱的影響を受けないように100×100mmとした。M1-M4は、熱電対の設置位置である。図の位置に浅い溝を切って熱電対を埋め込み、熱電対の一部が試料表面上で露出するようにセットして、アロンアルファで固定した。4枚の試料は、接合面に嫌気性固着材（東亜合成化学製アロンタイト）を塗布し、万力で接合面の気泡を排除して接着した。この試料層と断熱材（スタイロフォーム）を、下部の加熱板と上部の合板とで挟み、ボルト締めして固定した。なお、断熱材と合板の間には50×50mmの木片を挿入して、押し付け圧力が中央部に加わるようにした。試料は、SYSTEM 1および2に対応する構成とした。SYSTEM 1では図の試料層左側に

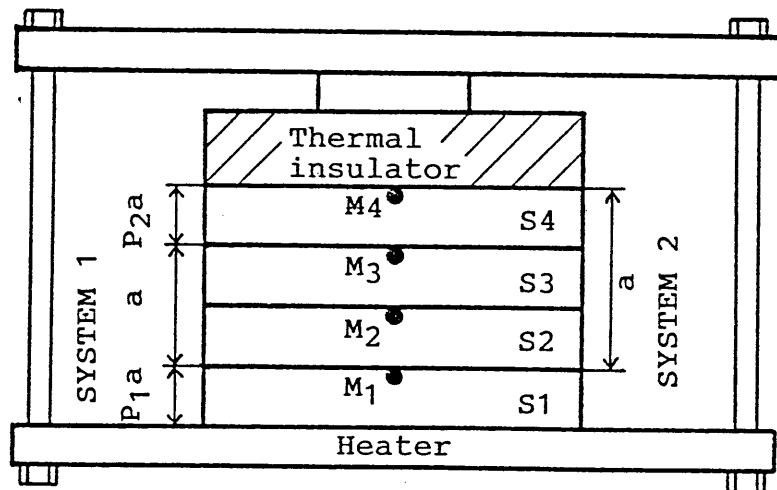


Fig.3-9 Structure of sample

SYSTEM 1および2に対応する構成とした。SYSTEM 1では図の試料層左側に

示した構成で、温度測定点はM1, M2およびM3である。この場合、 $P_1 = 0.5$, $P_2 = 0.5$ であり、(3-1)式の P_1 , P_2 に関する条件を満たしている。両表面の温度は任意であるので断熱材があっても差し支えない。SYSTEM 2では、図の試料層右側に示した構成で、温度測定点はM1および断熱面上のM4であるが、SYSTEM 1にも同時に対応できるようにM3も測定点に加えた。

3.4.2. 実験条件の設定

試料を加熱する周期は、(3-1)式および(3-2)式の適用条件を満たすものと満たさないものの2種類設定し、その他の条件とともにSYSTEM 1について

Table 3-1 Measuring conditions for SYSTEM1

Data set No.	1	2
Thickness:a (mm)	5.94	5.94
Period:t ₀ (s)	144	320
Sampling interval (s)	6	4
Fourier No.:F ₀ ^(*)	0.47	1.04
Average temperature ^(**) (°C)	20.2 28.1 35.5 43.3	22.6 27.5 32.1

(*) F₀ is only a reference value, because α was set to $1.15 \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$ as an approximate value for calculating F₀.

(**) Shown from measured values

Table 3-2 Measuring conditions for SYSTEM2

Data set No.	3	4
Thickness:a (mm)	8.92	8.92
Period:t ₀ (s)	384	512
Sampling interval (s)	4	4
Fourier No.:F ₀ ^(*)	0.56	0.74
Average temperature ^(**) (°C)	27.5 32.1	21.0 28.8 35.2 35.3

(*) and (**) are same as in Table 3-1

はTable 3-1に、SYSTEM 2についてはTable 3-2に示した。

与える周期の適否の判定にはフーリエ数 ($F_0 = \alpha t_0 / a^2$) を用いるが、この算出に必要な温度伝導率は文献 (1) より引用し、本実験の温度範囲に対応する値として $\alpha = 1.15 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$ とした。したがって、表中の F_0 は概算値である。SYSTEM 1では、データセット・ナンバー1は本測定法の適用条件から少し外れた場合で、試料の温度は4レベル、データセット・ナンバー2は適用条件に合った場合で、試料の温度は3レベルとした。SYSTEM 2では、データセット・ナンバー3は適用条件から外れた場合で、試料の温度は2レベル、データセット・ナンバー4は適用条件に合った場合で、試料の温度は4レベルとした。

3.4.3. データ処理

データ処理法を説明するために、実測したデータの1例を Fig. 3-10 に示した。これは、Table 3-1 のデータセット・ナンバー2で試料の平均温度が 32.1°C の場合の例である。図中に (1) - (6) の矢印で示した2周期間の6組データを用いてデータ処理を行ない、その区間の試料平均温度に対応

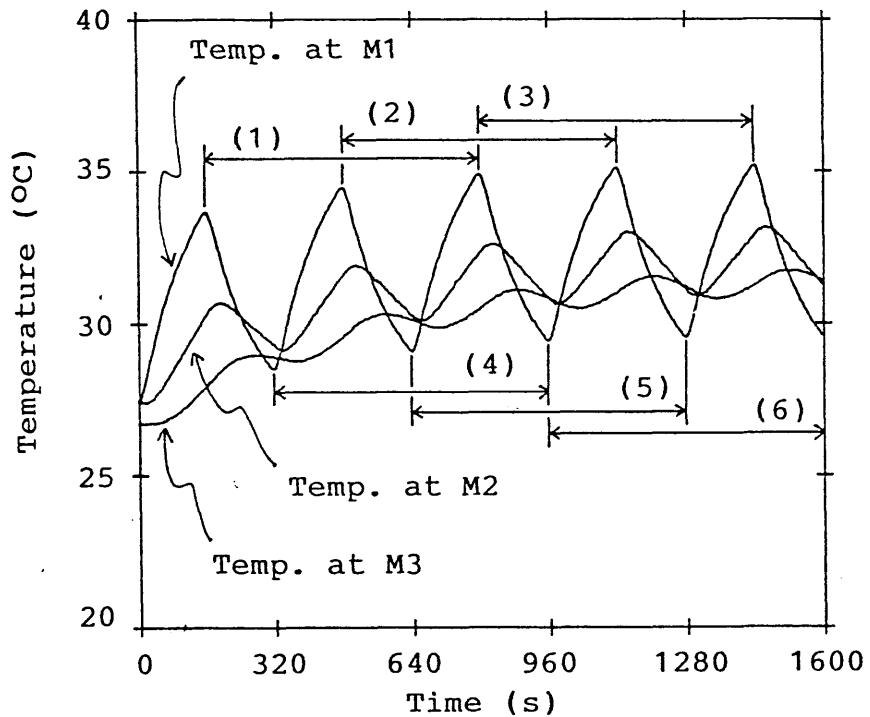


Fig.3-10 An example of measured temperatures
 する温度伝導率を求める。したがって、(1) - (6) の6種の平均温度に対応した温度伝導率が6点求まることになる。実験では、試料の温度が目標値付近に達したのち昇温速度を落として、図のように、6組の区間の試料温度に大きな差がないようなデータを求めた。このようなデータであれば、温度伝導率はその区間内でほぼ一定の

値を示すと考えられるので、(1) - (6) の区間のデータ処理によって得られる温度伝導率6点の平均値を求め、それを全区間の平均温度に対応する値とした。このようにして、測定誤差の排除あるいは平均化を図った。

3.4.4. 実験結果

SYSTEM 1の系に関して、Table 3-1の条件を与えて求めたアクリル樹脂板の温度伝導率を、Fig. 3-11に示した。各シンボルは本実験で得た値で、Table 3-1のデータセット・ナンバー1および2に対応している。実線は、飯田ら⁽¹⁾がラプラス変換法で求めたもので、本結果は非常に良く一致している。シンボルの1つのプロットは、前節で述べたように、6点の温度伝導率の平均値を示している。この6点の誤差の範囲を(平均値 \pm 平均誤差)で表わすと、⁽⁵⁾

データセット・ナンバー1では平均温度35.5℃の組が最も大きく、

$$1.16 \pm 8.86 \times 10^{-3} \quad (3-3)$$

データセット・ナンバー2では平均温度27.5℃の組が最も大きく、

$$1.15 \pm 4.77 \times 10^{-3} \quad (3-4)$$

であった。

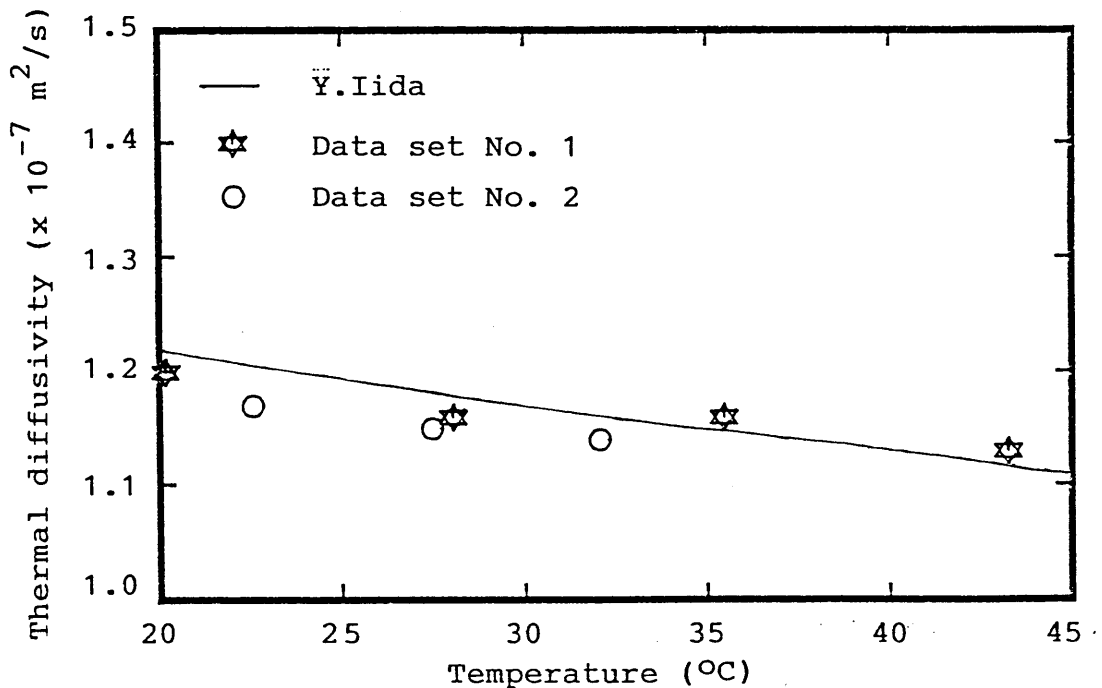


Fig.3-11 Thermal diffusivity of acrylic resin plate obtained from SYSTEM 1

Fig. 3-12は、SYSTEM 2の系に関して、Table 3-2の条件を与えて求めたアクリル樹脂板の温度伝導率を示したものである。図中のシンボルは本実験で得た値で、それぞれ、Table 3-2のデータセット・ナンバー3および4に対応している。実線は、前掲の飯田らの値である。なお、データセット・ナンバー4では、連続する12組(6組×2)のデータ処理を行ない、近接する2レベルの温度(35.2℃&35.3℃)に対して求まる温度伝導率の違いの程度を示した。

SYSTEM 1の場合と同様に、シンボルの1つのプロットは平均値を示しているが、この平均値を算出する元になる6点の温度伝導率の誤差の範囲を(平均値±平均誤差)によって表わすと、

データセット・ナンバー3では平均温度27.5℃の組が最も大きく、

$$1.14 \pm 0.0887 \quad (3-5)$$

データセット・ナンバー4では平均温度21.0℃の組が最も大きく、

$$1.15 \pm 0.0441 \quad (3-6)$$

であった。平均誤差は、SYSTEM 1の場合に比べて約10倍という大きな値になったが、この点に関しては、考察において詳しく検討する。

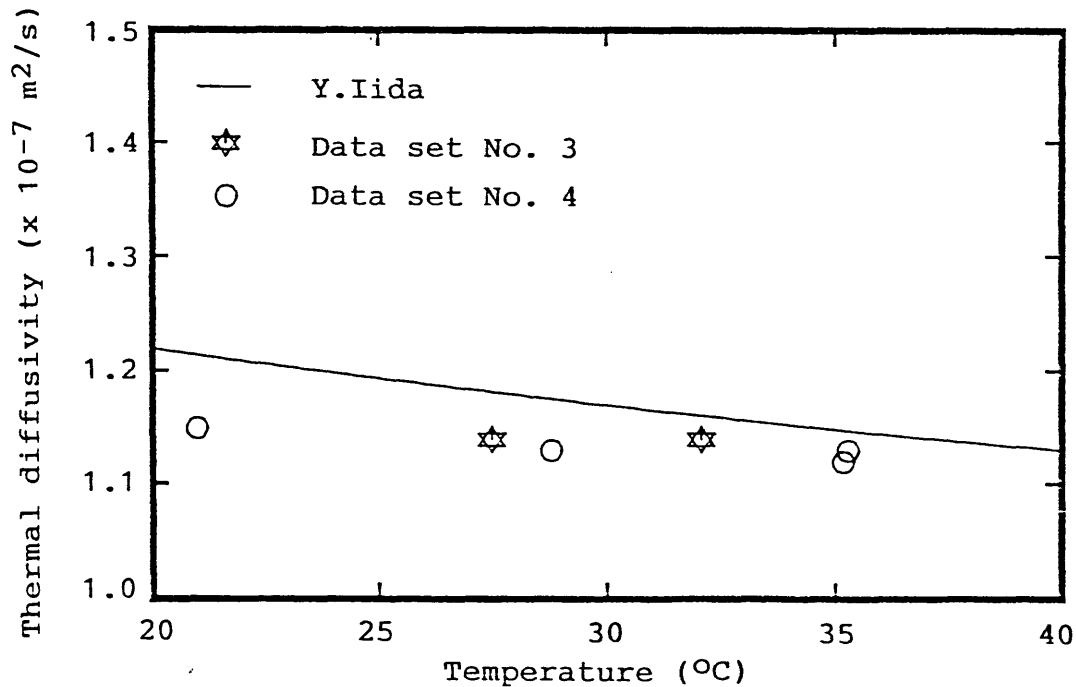


Fig.3-12 Thermal diffusivity of acryl resin plate obtained from SYSTEM 2

3. 4. 5. 考察

Fig. 3-11において、SYSTEM 1のデータセット・ナンバー1と2を比べると、ナンバー1の方が相対的にバラツキが大きくでている。また、1つのプロットの元になる6点の平均誤差も、(3-3)式は(3-4)式の2倍に近い値である。この原因は、ナンバー1では与えた温度波の加熱周期が短く、フーリエ数が(3-1)式の適用条件(1)を満たしていないことにあると考えられる。しかし、この程度の差異は、無視し得る誤差として処理しても差し支えない範囲にあり、しかも、文献値⁽¹⁾とも極めて良い一致を示している。したがって、これは、提案した測定法の妥当性を示すに十分な結果であると言えよう。

一方、SYSTEM 2に関するFig. 3-12を見ると、データセット・ナンバー3と4の違いについては判然としないが、全体としては、文献値よりも幾分低めながらほぼ一致した結果を呈している。しかし、平均値を示す個々のプロットに注目すると、その元になる6点の測定値の平均誤差は、実験結果に示したように非常に大きな値を持っている。この主たる原因は、与えた断熱条件の実現の精度が悪いことにあると思われるが、このように大きなバラツキを呈する6点の平均値に意味があるか否かについて、次のようなデータ処理を加えて検討した。

SYSTEM 2に関する実験では、3. 4. 1. 節で述べたように、Fig. 3-9に示した試料の両表面の位置M1, M4に加えてM3の位置の温度も同時に測定した。この場合、3. 2. 1. 節で説明した測定原理に基づいて、M1を $x = P_1$ a面、M4を $x = (1 + P_1)$ a面、そしてM3を材料内の任意の位置 x_c であると考えれば、これは、SYSTEM 1の系に対応する。このとき、境界条件は任意であるので、断熱条件の実現の精度が、測定値に影響することはない。そこで、前節の(3-6)式のもとになった温度データ、すなわち、データセット・ナンバー4の平均温度 21.0°C の粗の温度データに、M3の位置の温度データを加えて、SYSTEM 1として再度データ処理を行なった。Fig. 3-13は、その結果である。四角印はSYSTEM 1での処理結果を示し、丸印は断熱条件に影響されたSYSTEM 2での処理結果を示している。さらに、■印および●印はFig. 3-10の区間(1) - (3)に対応して、山から山までの温度データを用いた場合で、温度の低い方から順に(1), (2), (3)による結果を示し、□印および○印は谷から谷までの温度データを用いた場合で、温度の低い方から順に(4), (5), (6)

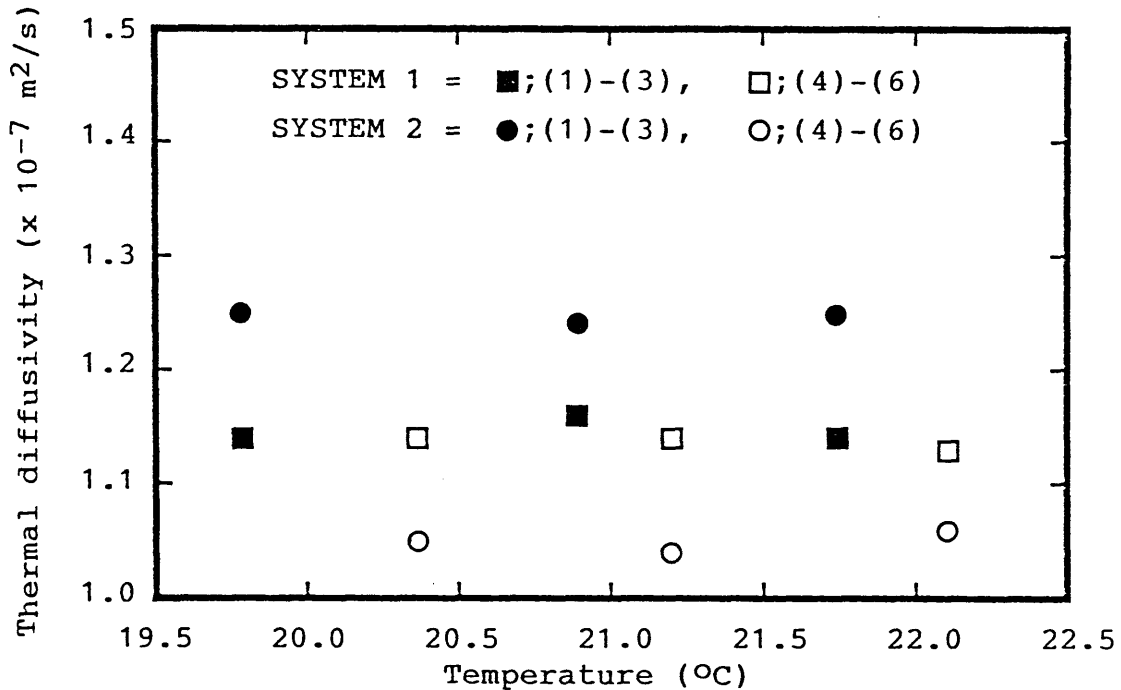


Fig.3-13 Two groups of six measurements obtained from SYSTEM 1 and SYSTEM 2

の結果であることを示している。

SYSTEM 1での処理結果は、山一山，谷一谷の温度データに拘らずバラツキが少なく、ほぼ一定の値になっている。この6点の誤差の範囲を平均誤差を用いて表わすと、

$$1.14 \pm 4.01 \times 10^{-3} \quad (3-7)$$

である。なお、(3-7)式の平均値1.14は1.142を四捨五入したもので、1.148を四捨五入した(3-6)式の平均値1.15に近い値である。この系の結果には、基本的に、境界条件の実現の精度が影響することはないので、(3-7)式は信頼できる値であると考えられる。

一方、SYSTEM 2での結果を見ると、(1) - (4)，(2) - (5)，(3) - (6)の各組み合わせの平均値は、それぞれ、SYSTEM 1での結果に非常に近い値となる。このことから、山一山，谷一谷の温度データを用いた処理結果を平均することにより、断熱境界条件の不完全さが測定値に与える影響を相殺することができるという推論を得た。これを補足する資料として、次の結果を付しておく。

ここで問題にしている温度データは、1周期につき128点取得しているので、温度波の山から谷までは両端を含めると65点となる。データ処理には連続する2周期間のデータを用いるが、そのデータの始まりの点を、山からはじめて谷まで1点ずつずらしていくと65組の処理データが得られる。その結果を求めてみると、山-山と谷-谷の処理結果の平均値を中心にして均等に分布しており、それらの全平均値はさきの平均値に一致する。

以上の検討結果により、データ処理から得た経験的な推論を基にしてはいるが、SYSTEM 2に関する3.4.3.節に述べたデータ処理を行なう限り、本測定法の妥当性は損われないという結論に達した。

3.5. 摘要

第2章で述べた境界値法による温度分布の推定を利用した温度伝導率測定法を提案し、アクリル樹脂板を試料として基礎実験を行なった結果、本方法の妥当性が確認された。以下に記す本測定法の特徴は、工業材料はもとより、含水材料である農産物を対象とした測定において、特に有効であると思われる。

(1) 第1の特徴は、任意の初期条件下で適用できることにある。このため、従来の測定法と異なり、初期条件の実現に要する時間がいっさい不要である。

(2) 第2の特徴は、任意の境界条件下で適用できることにある。したがって、加熱条件も任意であり、測定装置の簡略化を図ることができる。

(3) 温度の測定点数が少なく、基本的に3点でよい。

(4) 試料の1表面に断熱条件を仮定すれば、温度測定点は両表面の2点でよい。この場合、仮定した断熱条件の実現の精度が悪くても、3.4.3.節に述べたデータ処理を行なうことによって誤差を排除することが可能である。

第4章 粉および玄米の温度伝導率・熱伝導率

4. 1. 緒言

近年、食糧需給に関する見通し論が展開され、自給率の向上と食糧の輸入自由化という相対立する両論の中に、唯一高自給率を誇っていた米も巻き込まれていくなかで、ともすればその量のみに関心を奪われがちになるが、量の確保は、品質の保持があってこそ意味を成すものであることに注意を喚起しなければならない。

米の品質に関わる重要課題の1つとして、米の貯蔵ならびにそれに先立つ収穫後の乾燥処理を代表とする加工技術の確立があげられる。これを具体的に遂行するための基礎データとして、米の物理特性および熱特性を表わす真の物性値が不可欠であることは第1章で指摘した。このうち熱物性値、特に、熱伝導率あるいは温度伝導率は測定が難しいので、現在でもデータが十分でないものの1種である。穀物の熱物性値に関する研究は、1935年Bakke and Stiles⁽⁶⁸⁾が貯蔵されたオート麦に適用するためにオート麦の熱伝導率を測定した例が最初である。その後、小麦を中心として熱伝導率や温度伝導率の測定が行なわれてきたが、米(粉あるいは玄米)を対象にした報告は、1969年に至ってWrattenら⁽¹³³⁾が粉(Saturn)の温度伝導率および熱伝導率を測定するまでは見当たらない。しかも、その後の測定例は、論文として公表されたものの中で筆者が入手しうる範囲では、Wrattenらを含めてわずか8つの報告があるにすぎない。筆者の見落としがあったとしても、これに数例が加わる程度と思われる。対象そのものが多品種にわたり、しかも、扱いにくい性質のものであるから、各測定者間で結果に違いを生じることは容易に予想されることである。だからこそデータの蓄積が求められるわけであるが、この点において、過去の報告例は不十分であると言わざるを得ない。したがって、現時点では、測定事例を増すこと自体にも意味が生じる。

一方、これらの熱物性値には、圃場で収穫されたのち乾燥機で乾燥され、さらに、貯蔵庫に搬入されて貯蔵される全工程において、米がさらされる多様な条件下での特性をカバーできる情報であることが求められる。先にあげた8つの報告については、他の農産物をも含めて整理した結果を次節で示すが、上記の観点から情報を分析すると次のようになる。

粉の熱伝導率あるいは温度伝導率と水分との関係を求めた報告は複数例あり、その

水分の範囲は10—25% (w. b.) であるから、通常予想される範囲をカバーしていると考えられる。一方、温度との関係を求めたものは細川⁽⁵⁵⁾の報告が代表例で、他に亀岡⁽¹⁹⁾の報告があるが、更にデータの追加が望まれるところである。なお、亀岡の報告は粉の熱伝導率を温度および水分の関数として表現した唯一の例⁽⁶³⁾で、この結果を用いて粉粒子の熱伝導率を算出している。このほか、山田も同様の方法によって玄米粒子の熱伝導率を呈示している。これらの中で、Dua and Ojha⁽⁸³⁾の報告にある熱伝導率は他の報告値の6—7倍であり、測定法の選択あるいは加熱条件の設定に問題があるものと思われる。筆者も過去に周期法を用いて粉の温度伝導率および熱伝導率を報告したが、1回の測定に3時間を要し、温度が30℃以上で高水分の試料について得られた結果は、真の値よりも大きいと思われるような値であった。

このように、測定値間に大きな違いがあること、あるいは、測定例(中でも温度依存性を求めたもの)が少ないことの大きな原因の1つは、従来の測定法そのものに求められる。その具体的な理由は第3章において指摘し、農産物を対象とした測定に特に有効であると考えられる温度伝導率測定法を提案した。本章では、この測定法を粉および玄米に適用して、広い範囲の温度条件および水分条件下で温度伝導率・熱伝導率を求めることを目的とした。

なお、本論文で言う温度伝導率、熱伝導率とは、有効温度伝導率、有効熱伝導率を指すものである。これらの有効値は、厳密にはかさ密度が変わるとその値も変化を示すので、固有の値であるとは言えない性質のものである。汎用性のある表現を求めるならば、たとえば有効熱伝導率は、粒子や粒子間を埋める流体の熱伝導率ならびにそれらの境界面の条件等を用いて計算する方法を示す必要がある。このような分散系の有効熱伝導率の推算に関する研究は工学方面に数多く^{(102), (110) etc.}無機材料の粒子充填層に関して適切なモデル推算式が提案されている。しかし、穀物充填層に関しては、粒子の不規則な形状や不規則な充填状態などが原因となって、未だ実用レベルの推算式は得られていない。このような実情ではあるが、穀物のかさ密度に目を向ければ、かさ密度は品種によってほぼ一定の範囲内の値を示す。筆者が測定したところでは、例えば、粉(コシヒカリ)では600—660 [Kg/ m³]、玄米(コシヒカリ)では770—850 [Kg/ m³]程度が目安となり、充填方法が一定であれば大きく変動することはない。また、充填層の温度解析においては、充填状態の粗密の

分布を把握することは難しいので、平均的なかさ密度を用いることになる。このように、実用に供する場合の諸条件を考え合わせると、有効値は実用的なデータとしての意味を十分持ち合わせていると考えられる。以上のような認識の下に、先に述べた有効値の測定を行なった。

4. 2. 温度伝導率・熱伝導率データの整理

前節で既往のデータの概略に触れたが、これらのデータを正確に把握しておくことは熱物性研究上重要なことである。そこで、農産物の温度伝導率、熱伝導率について過去に報告されたものの中から主に穀物に関するものを抜粋し、測定対象の種類ごとに分類して、同一様式の表に整理した。これに類する資料はいくつかあるが⁽⁴⁸⁾
(115), (117), (132)

、それぞれに異なる主眼の下に整理されているため、穀物に関するデータを一覧する目的からすると適当でない面もある。また、いずれの資料も熱物性値データに関連する情報の記載内容が簡単で、試料温度については平均温度しか記されておらず、試料内の温度差について原論文に記載されているにも拘らず取り上げられていないものがあったり、あるいは、測定に要した時間に触れていないものがあるなどの理由により、報告されたデータの信頼性に関する判断が困難であるように思われる。

もとより、データの信頼性を判断することは非常に難しいことではあるが、ここでは、データのとりまとめを次の(1) - (7)方針の下で行ない、データ取得時の状況が理解しやすい資料を作成することに努めた。以下に、この方針を示す。

(1) 測定に要した時間、試料内の温度差、昇温速度などの原文献に記述された情報をできるだけ抽出し、特記事項欄にまとめた。

(2) 試料および試料容器の形状ならびに寸法を記した。

(3) 温度伝導率 α および熱伝導率 k はS I単位に換算して示し、各データ間の比較を容易にした。なお、回帰式については、元のデータを換算して回帰しなおしたのではなく、各項の係数に換算値を掛けただけのものである。

(4) 試料の水分は、(w.b.)と(d.b.)の区別を各欄ごとに示した。記載のない欄は、文献中にその区別が明示されていないものである。

(5) 試料名は、文献に用いられた名称をそのまま引用した。

(6) データの取得に用いられた測定法を併記した。その分類は、

定常法

- (a) 平行平板法----- (A)
- (b) 同心円筒法----- (B)
- (c) 同心球法----- (C)
- (d) 比較法----- (D)

非定常法

- (e) 加熱または冷却曲線による方法----- (E)
- (f) 細線加熱法またはプローブ法----- (F)
- (g) フィッチの方法----- (G)
- (h) 周期加熱による方法----- (H)

として、右側の記号（大文字）で示した。なお、この各記号は1.3.節で分類した記号に対応するものである。

(7) 熱物性値データは試料によって分類し、主に籾および玄米、主に小麦、その他の穀物、R a p e s e e d、その他の農産物の5つとした。同一文献中に多種類の試料に関するデータが記載されている場合は、この分類にとらわれずに測定者ごとにまとめた。この結果をTable 4-1からTable 4-5に示した。各表のうち、穀物に関するデータは入手し得る文献をかなりカバーできたものと考え、Table 4-5のその他の農産物に関しては手元にある文献をまとめたものにすぎない。

Table 4-1 主に籾および玄米の熱伝導率・温度伝導率 その1

試料	形状 大きさ	温度 (°C)	水分 M (%)	密度 (kg/m ³)	温度伝導率 $\alpha \times 10^{-7}$ (m ² /s)	熱伝導率 k (W/m·K)	測定法 文献	特記事項
Medium Grain Rough rice (Saturn)	バルク 円筒容器 D = 15.24 cm L = 30.48 cm		(w. b.) 9.9 - 19.3	$\rho = 499.7$ + 8.3M	1.05 - 0.857 $\alpha = 1.35 - 2.49$ $\times 10^{-7}$ M	0.0895 - 0.112 k = 0.0863484 + 0.00133 M	(F) 細線加熱法 Wratten 1969	<ul style="list-style-type: none"> αは $\alpha = k/c\rho$ により算出 測定は1回5分を要し、同一水分の試料を用いて3回行なった。 測定時の試料温度に関する記述は無い。 αおよびkと水分は一次関数である。
Kalingpong paddy Brown rice White rice Paddy husk	バルク 円筒容器 D = 15 cm L = 45 cm	53.5 - 70.1 51.50 - 68.50 52.5 - 70.0 56.70 - 75.03	12.0 - 13.8 12.0 12.0 - 14.8 11.0	493 - 555 815 - 885 785 185		0.622 - 0.837 0.820 - 0.901 0.919 - 1.023 0.709 - 0.753	(E) Dua 1969	<ul style="list-style-type: none"> 定常状態に達するまで、約10時間を要した。 Trial Test では、最高温度が95°Cのとき現は茶色になり、100°Cのときは焦げて黒茶色になった。 平均温度が75.5°C以下であれば、試料の化学的およびその他の変化は認められないとしている。
籾 (ヨネシロ) 大豆 (輸入) 小豆 (北海道産)	バルク 平板 広さ 235 × 235 mm 厚さ 30 mm	10 - 20 10 - 20 10 - 20	(w. b.) 12.16 - 15.63 11.0 14.81	678.9 - 686.4 815.9 889.3		k = 0.093 + 0.000876θ k = 0.121 + 0.000657θ k = 0.138 + 0.000642θ	(D) 細川 1971	<ul style="list-style-type: none"> 定常状態に達するまでに約8時間を要した。 基準板にガラス板を使用。
玄米 (ササニシキ)	バルク 円筒容器 D = 50.3 mm L = 185 mm 玄米粒 平均粒径 3.6 mm	35 35	10.8 10.8	1300		0.119 (流体=空気) 0.107 (炭酸ガス) 0.243 (ヘリウム) 0.291 (計算値)	(A) 山田 1972	<ul style="list-style-type: none"> 円筒形試料容器の軸方向に温度差を与えて測定。 容器内の気体の種類を変えて有効熱伝導率を測定し、玄米粒の熱伝導率を算出した。
籾 (レイメイ) マイロ (米国産) トクモコシ (米国産)	バルク 円筒容器 D = 14.8 cm L = 30.0 cm		(w. b.) 12.8 - 24.1 10.5 - 26.6 12.2 - 20.0 11.4 - 22.3	600未満 600以上 827.3 - 867 730.3 - 810.0		0.0788 - 0.0886 k = 0.0687 + 0.00087M 0.0844 - 0.0971 k = 0.0797 + 0.00066M 0.0948 - 0.105 0.0791 - 0.0826	(F) プローブ法 瀬能 1976	<ul style="list-style-type: none"> 試料は、高水分の試料を乾燥することにより、水分を調整した。 マイロ、トクモコシの水分は、加湿調整。 切取温度は室温(約20°C) 熱源の温度 1分後: 40 - 50°C 3分後: 55 - 60°C 堆積密度で籾のkは大きく異なり $k(600 \text{ kg/m}^3 \text{未満}) < k(600 \text{ kg/m}^3 \text{以上})$であった。
籾 (ササニシキ)	バルク 円筒容器 D = 2.01 cm L = 20 cm	16.25 ± 0.55 30.80 ± 0.20 45.25 ± 0.75	(w. b.) 12.9 - 24.7 12.9 - 24.7 12.9 - 24.7	598.4 598.4 598.4	1.01 - 1.24 1.21 - 1.64 1.42 - 2.05	0.103 - 0.163 0.124 - 0.215 0.144 - 0.269	(E) 大下 1978	<ul style="list-style-type: none"> kの値は $k = \alpha\rho$ により算出 測定に要した時間は、約3時間。 測定中に、0.5%の水分低下が認められた。
Short - Grain Rough rice (Calom)	バルク 円筒容器 D = 12.7 cm L = 30.5 cm		(w. b.) 11.53 - 23.68 10 - 22 10.83 - 19.45	632 - 664	1.097 - 0.900 $\alpha = 1.253 - 0.0163$ M	0.113 - 0.127 k = 0.09999 + 0.001107 M	(F) 細線 加熱法 Morita 1979	<ul style="list-style-type: none"> 試料温度に関する記述はない。 αは $\alpha = k/c\rho$ により算出。 kの回帰式中のMの係数は、文献中では0.01107であるが、測定結果と合わないので筆者の推定により0.001107に直して示した。

Table 4-1 主に粗および玄米の熱伝導率・温度伝導率 その2

試料	形状 大きさ	温度 θ [°C]	水分 M [%]	密度 ρ [kg/m ³]	温度伝導率 λ $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	熱伝導率 k (W/m.K)	測定法 文献	特記事項
日本晴	バルク 円筒 アクリル製 D = 100mm L = 300mm	20-40	10-24	空けき率 0.463 0.505		有効熱伝導率 (実測値) $k_s = 2.594 \times 10^{-11} \theta$ $+ 7.953 \times 10^{-10}$ $+ 5.978 \times 10^{-11}$ $+ 0.1042$ 粒子熱伝導率 (計算値) $k_p = 2.408 \times 10^{-11} \theta$ $- 1.723 \times 10^{-10}$ $+ 3.621 \times 10^{-11}$ $+ 0.2555$	(F) プローブ法 亀岡 1984	<ul style="list-style-type: none"> ○ 4種類の置換流体に関する実験で 30-40時間を要した。 ○ 試料を充填した容器を恒温槽内に 12-20時間放置して内部の定常状態を実現した。 ○ プローブ内温度変化は 3-4°C。 ○ 間置き流体を変えて測定した結果を用いて、粒子の熱伝導率を算出した。

Table 4-2 主に小麦の熱伝導率・温度伝導率 その1

試料	形状 大きさ	温度 θ ($^{\circ}\text{C}$)	水分 M (%)	密度 ρ (kg/m^3)	温度伝導率 a $\times 10^{-7}$ [m^2/s]	熱伝導率 k ($\text{w}/\text{m}^{\circ}\text{K}$)	測定法 文献	特記事項
Oat (Iovar variety)	バルク 平板状 厚さ 0.94cm 0.94cm 1.48cm	温度差 40 $^{\circ}\text{C}$	9.88-38.38 9.54-32.49 9.877-31.786			0.06392-0.09293 0.06405-0.1028 0.06995-0.1002	(A) Bakke (1935)	<ul style="list-style-type: none"> 水と珪を用いて試料両面に40$^{\circ}\text{C}$の温度差を与えた。 測定時間は1時間強。 熱伝導率と水分は直線関係であった。
Wheat (No.1 seed Marquis)	バルク 円筒容器 D=30.48 cm L=60.96 cm	温度差 44.3 $^{\circ}\text{C}$ 中心 26.3 $^{\circ}\text{C}$ 表面 70.6 $^{\circ}\text{C}$	(d.b.) 9.2	850	1.15	0.151	(B) Babbit (1945)	<ul style="list-style-type: none"> 測定時間は約119時間。 小麦を充填した円筒容器の半径方向に2.54cm間隔で6点。2の熱電対を設置して温度を測定。 表面付近の温度はバラツキを呈した。

Table 4-2 主に小麦の熱伝導率・温度伝導率 その2

試料	形状 大きさ	温度 θ ($^{\circ}\text{C}$)	水分 M (%)	密度 ρ (kg/m^3)	温度伝導率 a $\times 10^{-7}$ (m^2/s)	熱伝導率 k ($\text{w}/\text{m}\cdot\text{K}$)	測定法 文献	特記事項
Wheat (No. 1 Manitoba) (English) (Damp, mouldy No. 1 Manitoba) Maize (Yellow) Oat (White English)	バルク		11.7 17.8 19.5 13.2 12.7			0.151 0.163 0.155 0.176 0.130	① Oxley 1944	<ul style="list-style-type: none"> ○定常状態までに4-5日を要した。 ○内球の温度=36$^{\circ}\text{C}$ ○周囲空気温度=26.4$^{\circ}\text{C}$
Wheat (Northern Manitoba)	バルク 円筒容器 D=30.48 cm L=60.96 cm	33-59	(d. b.) 1.4-15.9	842-821	1.13-0.72 (加熱開始100hrの データによると 1.15-1.06)	0.131-0.154 (加熱開始後100hr のデータによると 0.131-0.167)	② Moote 1953	<ul style="list-style-type: none"> ○試料内温度差が平衡に達する時間は168-400時間 ○初期温度(一様): 32$^{\circ}\text{C}$ ○最終の温度 中心より1.27cmの位置 : 58.9-55.4$^{\circ}\text{C}$ 中心より13.97cmの位置 : 33.5-33.8$^{\circ}\text{C}$ ○測定中に水分移動があった。 測定前: 15.9% (d. b.) =一様 測定後: 中心付近で 8.1% (d. b.) 表面付近で 17.2% (d. b.) ○水分移動が生じると真の aよりも低い値が得られると結論している。
Soft White Wheat Yellow Dent Corn	バルク 箱形容器 奥行き4.95 cm 巾15.24 cm 高さ15.24 cm	平均13.9 (9.1-23.2) 平均13.8 (8.7-23.3)	(w. b.) 0.68-20.3 0.91-30.2	772.1-741.7 754.4-682.3	0.926-0.800 1.02-0.924		③ Kazarian 1965	<ul style="list-style-type: none"> ○試料を充填した箱形容器をice bathに没して試料中心の温度変化を測定することによりaを決定 ○初期温度(一様)は室温。 ○aと水分は一次関数でない。
Soft White Wheat Yellow Dent Corn	バルク 円筒容器 D=13.97 cm L=27.94 cm	21-44.1 20.7-52.6	(w. b.) 0.68-20.3 0.91-30.2			0.118-0.138 $k=0.117+0.00113M$ 0.141-0.172 $k=0.1409+0.00112M$	④ 細線 加熱法 Kazarian 1965	<ul style="list-style-type: none"> ○水分5%の小麦を用いた実験では、加熱開始より10分後の温度上昇は20.7$^{\circ}\text{C}$、1分後から10分後の間の温度上昇は6.4$^{\circ}\text{C}$であった。
Hard Red Spring Wheat (Manitou)	バルク 円筒容器 D=15cm L=30cm	20 5 1 -6 -17 -27	(w. b.) 4.4-22.5			$k=0.140-1.41\times 10^{-3}M$ $k=0.144+0.954\times 10^{-3}M$ $k=0.136+1.36\times 10^{-3}M$ $k=0.133+1.54\times 10^{-3}M$ $k=0.141+0.938\times 10^{-3}M$ $k=0.144+0.954\times 10^{-3}M$	⑤ 細線 加熱法 Chandra 1971	<ul style="list-style-type: none"> ○貯蔵に供するデータを取得するためカナダの気候条件(冬期-4$^{\circ}\text{C}$)を考慮して、-28-2$^{\circ}\text{C}$の温度範囲で小麦の熱伝導率を求めた。 ○1.08% (w. b.)以上の水分は、加湿後12日以上放置して一様とした。 ○全水分の平均の熱伝導率は-8$^{\circ}\text{C}$のとき、最小値を示した。

Table 4-3 その他の穀物の熱伝導率・温度伝導率

試料	形状 大きさ	温度 (°C)	水分 (%)	密度 (kg/m ³)	温度伝導率 $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	熱伝導率 (W/m·K)	測定法 文献	特記事項
Grain Sorghum (NC+RS66)	バルク 円筒容器 D=20.32 cm L=45.72 cm	23.9~48.9	(w. b.) 1~22.5			0.0967~0.133 k=0.0976+ 1.485×10 ⁻³ M	(F) 細線 加熱法 Sharma 1973	
Whole Soybean	球 (一粒) r=0.025 cm	20, 35, 50	8~40% の範囲で 6レベル		0.45		(E) Watts 1973	○一粒のSoybeanを球形 試料と考えて測定 ○粒の中心に熱電対を挿入 ($\phi=0.41$ mmのドリル孔) し、表面にはバネで押し つけて温度を測定 ○ α は、90粒のSoybean の平均値。 ○温度および水分の影響は ほとんど観察されなかつ た。
Soybean (powder) (Crushed) (Whole)	バルク 円筒容器 D=17.78 cm L=46.67cm	4.4~71.1 10~65.6 10~65.6	(w. b.) 0.8 6.9 9.4 10.1 11.2			0.0606 0.0623~0.109 0.0640~0.109 0.0831~0.126 0.0969~0.135	(F) プローブ法 Jasansky 1973	○kの値は粒子の大きさ、 水分、温度に依存する。 ○どの粒子サイズのk値も、 温度の上昇とともに増大 する。 ○ α の値は数値で示され ていないので、文献中の 図より、筆者が読取った 値である。
Peanut (Whole kernel) (Ground kernel) (Pod) (Ground hull)	バルク 円筒容器 D=20.32 cm L=46.67cm	25 4.4~37.8 4.4~37.8 4.4~37.8 4.4~37.8	(d. b.) 5~7.5 8 7 3.0 5		$\alpha=1.77-8.77 \times 10^{-3} T$ $\alpha=0.839$ $-2.90 \times 10^{-3} T$ $\alpha=1.316$ $-5.16 \times 10^{-3} T$ (注) T: 温度(°F)	k=0.1038 +0.000865M k=0.0104 +2.457×10 ⁻¹ T k=0.0324 +2.942×10 ⁻⁴ T k=0.0424 +2.60×10 ⁻⁴ T k=0.0467 +1.44×10 ⁻⁴ T (注) T: 温度(°F)	(F) プローブ法 Suter 1975	○ α は試料内にセンサーを 付加することにより、直 接測定を試みたが、感度 上の問題があったため、 $\alpha=k/c\rho$ なる計算 値を用いた。 ○kの測定誤差 (a)同一試料を容器への結 め替えを経て、再度測 定した場合の誤差は10 ~20% (b)同一試料を、容器への 詰め替えをせずそのま ま再度測定した場合の 誤差は2%以内。
Defatted Soy flour	バルク 円筒容器 D=1.9cm		(w. b.) 4.5~32.0	331~711		0.032~0.098	(F) プローブ法 Wallapapan 1982	○初期温度は20~22°C ○試料の温度上昇は3~ 5°C ○プローブ内の温度上昇 は10~15°C ○kの値はバルク密度の 増加とともに増大する。 ○水分20%までは、水 分の増加とともにkが 増大し、20%を越え るとkは減少する。

Table 4-4 Rapeseed の熱伝導率・温度伝導率

試料	形状 大きさ	温度 θ ($^{\circ}\text{C}$)	水分 M (%)	密度 ρ (kg/m^3)	温度伝導率 a $\times 10^{-7}$ (m^2/s)	熱伝導率 k ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	測定法 文献	特記事項	
Rapeseed (Whole Echo) (Ground Echo)	バルク 円筒容器 D = 5cm L = 23cm	25 ~ 90	(w. b.)	独立した 測定では 650 ~ 690 実験中の 測定では 680 ~ 720	0.97 ~ 1.08	0.105 ~ 0.147	(E) Timbers 1975	○ k の値は $k = a c \rho$ により算出。 ○ 試料水分は、24 $^{\circ}\text{C}$ で飽和蒸気液を用いて平衡水分を得る方法で調整。	
			3.83 ~ 9.70		$a = 0.8783 + 2.167 \times 10^{-2} M$				1.02 ~ 1.23
Rapeseed (Whole) (Ground)	バルク 円筒容器 D = 15.24 cm L = 76.20 cm	4.4 12.8 23.3 31.7 4.4 12.8 23.3 31.7	(w. b.)	6.1 ~ 12.8 6.3 ~ 13.2		0.108 ~ 0.137	0.108 ~ 0.137 0.109 ~ 0.141 0.115 ~ 0.147 0.118 ~ 0.155	(F) プローブ法 Bilanski 1976	○ 初期温度実現のために、試料内温度分布が一様になるために要した時間は6 ~ 8時間。 ○ 測定時間は10分。 ○ k は温度および水分に関して、一次従属の関係にある。 ○ k の精度は $\pm 5\%$
			0.062 ~ 0.077 0.064 ~ 0.078 0.066 ~ 0.081 0.074 ~ 0.088						
Rapeseed (Torch) (Midas)	バルク 円筒容器 D = 17.8cm L = 40cm	19.4 1.7 - 4.4 - 13.9 - 25.6 19.4	(w. b.)	0.75 ~ 15.5 0.75 ~ 19.64 0.75 ~ 19.64 15.5 ~ 19.64 0.75 ~ 19.64 0.87	0.996 ~ 0.960	0.0969 ~ 0.1197 0.0929 ~ 0.1129 0.0898 ~ 0.1084 0.1005 ~ 0.1072 0.0863 ~ 0.0972	(F) 細線 加熱法 Moysey 1977	○ 試料内に温度センサを1つ付加することにより、 a を同時測定。 ○ k は水分の増加とともに増大。 ○ a は水分の増加とともに減少。	
			1.014 ~ 0.942 0.952 ~ 0.919 0.870 ~ 0.927 1.035 ~ 0.978 0.986		0.0922				

Table 4-5 その他の農産物の熱伝導率・温度伝導率 その1

試料	形状 大きさ	温度 θ ($^{\circ}\text{C}$)	水分 M (%)	密度 ρ (g/m^3)	温度伝導率 α $\times 10^7$ (m^2/s)	熱伝導率 k ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	測定法 文献	特記事項
Strawberry				921	1.47	1.35	(E)	<ul style="list-style-type: none"> ○ k は $k = \alpha \rho c$ により算出 ○ 試料の温度履歴を測定し Gurney and Lurie の図式解法を用いて、α を定めた。 ○ 試料には、単一の材料を試料としたものと、缶詰内の材料を試料としたものの両方を用いた。しかし、両者の差異に関する記述はない。
Irish potato flesh				1,049	1.21	1.06	Kethley 1950	
English pea		-17.8~26.7		993	1.24	1.06		
Lima bean				—	1.24	—		
Peach flesh				1,041	1.20	1.12		
Apple flesh				—	1.50	—		
Beef	円筒に成形した Beef を、 2 CAN に入れたもの	107 124			1.73 1.89		(E) Hurwicz 1952	<ul style="list-style-type: none"> ○ 試料の縦軸は、缶の中心の軸に平行。 ○ 加熱開始より 90 分後のデータを用いて α を決定。
bean-bentonite mixture	円筒 底 $2 \frac{1}{2} \text{ CAN}$ (401×411) 底 1 tall (301×411) 1 lb. squat (401×211)	40 (0-40) 115.6 (16.9-115.6)		1,080 1,080	1.28 ~ 1.41 1.54 ~ 1.94	0.519 ~ 0.573 0.628 ~ 0.791	(E) Evans 1954	<ul style="list-style-type: none"> ○ k は $k = \alpha \rho c$ より算出 ○ 一様な試料を調整するために、乾燥した navy bean の粉に bentonite suspension (30% bentonite, 70% water) を 15% 加えて混合したものを試料とした。
bean-bentonite mixture	円筒 底 1 tall (301×411)	24.6-100.9 100.6-30.3	75		1.49 ~ 1.69 1.36 ~ 1.42		(E) Evans 1958	○ 同上
Valencia orange (Rind)	円形の半板 厚さ 0.27-0.29 cm	30.3				0.179	(E) Bennett 1964	○ 校正試験に対して、測定誤差は 2.68% であった。
(Juice vesicle)	厚さ 0.62-0.70 cm	30.3				0.435		
Marsh grapefruit (Rind)	厚さ 0.45-0.71 cm	27.8				0.237		
(Juice vesicle)	厚さ 0.65-0.74 cm	30.3				0.462		

Table 4-5 その他の農産物の熱伝導率・温度伝導率 その2

試料	形状 大きさ	温度 (°C)	水分 (%)	密度 (kg/m ³)	温度伝導率 × 10 ⁷ (m ² /s)	熱伝導率 (W/m·K)	測定法 文献	特記事項
Chicken a la king	円筒容器 D = 5.46 cm L = 22.86 cm	23-54			1.5		⑤ Dickerson 1965	<ul style="list-style-type: none"> ○ 昇温速度が一定になるのに50分を要す。 ○ 昇温速度 = 0.72°C/min ○ 試料中心と表面の温度差は15°C。 ○ 2時間以内に測定可能。 ○ Vosら(97), 1955)のTransient Hot wire methodによりkを求め、これから $a = k / c\rho$ として算出したaと実測によるaを比較し、4%以内の差で一致した。
Powder (Nonfat dry milk)	バルク 円筒容器 D = 15.24 cm L = 45.72 cm	36.4-65.6	(d. b.) 4.2-6.9			0.419 ~ 0.647	⑥ Qjha 1967	<ul style="list-style-type: none"> ○ 定常状態までに8時間を要した。 ○ Heating front における最高温度が79.4°Cのとき、試料平均温度は65.6°Cを越えず、このとき、試料の化学的およびその他の変化はないとしている。
Egg (Gifu-Jitori) (Leghona) Eggplant Onion Carrot					1.142 ± 0.011 1.356 ± 0.031 1.025 ± 0.117 0.964 ± 0.125 1.10 ± 0.164		⑤ 中馬 1968	<ul style="list-style-type: none"> ○ 実物と模型(実物と同じ形状)の比較測定により任意形状の試料のaを求める方法を提案した。
Burdock Carrot Cucumber Radish	円柱 D = 2.40cm L = 14.4cm D = 3.92cm L = 15.6cm D = 2.56cm L = 15.9cm D = 3.34cm L = 14.2cm				1.24 + 0.033 ^(*) 1.39 + 0.053 ^(*) 1.30 + 0.058 ^(*) 1.66 + 0.078 ^(*)		⑤ 中馬 1969	<ul style="list-style-type: none"> ○ 測定試料(野菜)を無限円柱と仮定してaを測定。 ○ a欄の*印は Probable Error を示す。
Alfalfa Stem	stemを 円柱と仮定 L = 5.08 cm	20 50 80	(w. b.) 46.75 58.54 57.72	302.9-321.3	2.84 × 10 ⁻⁴ 3.87 × 10 ⁻⁴ 4.14 × 10 ⁻⁴		⑤ Ford 1969	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alfalfa Stemの中心と表面に熱電対を設置、1本のStemについて測定。 ○ aは、水分および温度が増加すると増大し、Drymatter densityが増加すると、aは減少する。 ○ 水分は5-75% (w. b.)の範囲で測定。
馬鈴薯 (ダンシホク)	球 D = 3-4 cm	10 20 30 40 50 65 75	76	1.075		0.485 0.500 0.514 0.524 0.537 0.550 0.556	⑤ 山田 1970	<ul style="list-style-type: none"> ○ 試料は馬鈴薯を球に整形したものを用いた。 ○ 測定時間は90-400秒 ○ 温度差が10°Cの2つの恒温槽を用いた。

Table 4-5 その他の農産物の熱伝導率・温度伝導率 その3

試料	形状 大きさ	温度 θ ($^{\circ}\text{C}$)	水分 M (%)	密度 ρ (kg/m^3)	温度伝導率 a $\times 10^{-7}$ (m^2/s)	熱伝導率 k ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	測定法 文献	特記事項
Squash (Butternut) (Golden Delicious) (Boston Marrow) Potato (Katahdin) (Russet) Burbank (Kennebec) (Monona) (Norchip)		26.1 22.9 23.4 25.5 24.8 25.0 24.6 25.9	(w. b.) 87.7 88.5 93.6 81.4 82.9 82.4 83.6 81.2	950 900 970 1,040 1,040 1,050 1,040 1,050	1.47 1.63 1.58 1.65 1.84 1.65 1.68 1.72	0.500 0.471 0.533 0.533 0.571 0.549 0.547 0.533	(F) 細線 加熱法 Rao 1975	<ul style="list-style-type: none"> 細線加熱法によりkを、更に、試料内にもう1つのセンサを付加してaを同時測定。 kの精度は$\pm 5\%$ kの値は加熱後10~100秒の温度上昇データにより決定。 aの値は75秒までの温度上昇データにより決定
Dairy Products and Margarines	円筒容器 D = 1.9 cm	20	(w. b.) 16.0~82.2	650~1220		$K = 0.141 + 0.00412M$	(F) プローブ法 Sweat 1978	<ul style="list-style-type: none"> 28種の試料について測定 kの精度は$\pm 5\%$。 kと水分は正の相関を示した。 kと脂肪含量は負の相関を示した。 kと密度は無相関であった。
Apple	球 D = 8.3~9.3 cm	10~23.8		780~890	1.55	0.481	(F) 堀部 1979	<ul style="list-style-type: none"> リンゴを球体と仮定して測定 温度波の周期は36~110分。 準定常に達するまでに80分を要した。このときの試料表面に与えた温度差は15.4$^{\circ}\text{C}$

4. 3. 温度伝導率・熱伝導率の測定

本節では、第3章で提案した境界値法による測定法を用いて、粳および玄米の温度伝導率ならびに熱伝導率を測定した結果について述べる。測定法の性格上、温度伝導率は直接測定であり、熱伝導率は間接測定である。

4. 3. 1. 測定の準備

(a) 試料の選定

試料には、粳および玄米を用いた。過去の報告例では、熟物性値のバラツキの原因の1つに品種間の差を指摘したものがあるが、同一の測定者が同一の装置を使って異なる品種の熟物性値を求めた例はなく、推定の域を出ていない。そこで、品種間の差の有無を検討するために、2品種を対象として測定を行なった。

品種の選定の過程を次に述べる。昭和58年秋に三重大学附属農場で収穫され、種粳用に選別された4品種、コシヒカリ、秋晴、うこん錦、大空の粳および玄米の中から、我が国の産米の中で最も親しまれているものの1つとしてコシヒカリをまず選定し、もう1品種は千粒重の測定結果を参考にして選定した。これを、Table 4-6に示した。

Table 4-6. Weight of 1000 kernels

	Variety	M.C. % (w.b.)	Weight of 1000 kernels (g)	
			Measured	Reduced to 14% (w.b.)
(a) Rough Rice	AKIBARE	14.9	24.89	24.63
	UKONNISHIKI	14.5	24.19	24.05
	KOSHIHIKARI	14.9	29.50	29.19
	OZORA	12.0	22.05	22.56
(b) Hulled Rice	AKIBARE	15.1	20.22	19.96
	UKONNISHIKI	14.5	21.33	21.21
	KOSHIHIKARI	15.0	23.29	23.02
	OZORA	12.6	19.98	20.31

測定に用いた試料は水分がそれぞれことなるので、水分14% (w.b.)の千粒重を算出して各欄に付した。この結果、粳および玄米ともに最も大きい千粒重を示すコシヒカリに対して好対照をなす大空を、もう1つの品種として選定した。なお、選定した両品種の3軸寸法をTable 4-7に示した。これは、いずれも、千粒重の測定に用いた試料中から任意に10粒を取り出して測定した平均値とその平均誤差を換算して示したものである。

Table 4-7 Three axial dimensions

	Variety	Major diameter (mm)	Intermediate diameter (mm)	Minor diameter (mm)
(a) Rough Rice	KOSHIHIKARI	7.61 ±0.11	3.38 ±0.03	2.41 ±0.03
	OZORA	6.98 ±0.10	3.28 ±0.04	2.21 ±0.05
(b) Hulled Rice	KOSHIHIKARI	5.07 ±0.07	2.97 ±0.02	2.12 ±0.03
	OZORA	5.04 ±0.08	2.92 ±0.03	2.03 ±0.03

(b) 試料の水分調整と水分測定

試料の初期水分は、粳、玄米ともに約16% (w.b.)であった。これから約150gずつを量り取り、高水分の試料については必要量の水を噴霧することにより、また低水分の試料はデシケータ中に放置し、更に乾燥を要する試料は40℃に保った定温乾燥器で乾燥することにより所定の水分になるよう調整した。このようにして得た水分範囲8-25% (w.b.)の試料を80φ × 120Hのポリエチレン製広口容器内に密封した。これを冷蔵庫内約5℃の環境に約60日間静置することで、試料内の水分が一樣になったものと判断した。なお、水分が23% (w.b.)を越える試料の一部には60日後にカビの発生が認められたのでこれを破棄し、新しい試料を用いて再度水分調整したものを冷蔵庫内に7-14日間静置した後、実験に用いた。

水分測定には、未粉碎の試料による135℃-24時間の炉乾法を用いた。実験に際しては、ポリエチレン製広口容器内より約10gの試料を2組秤取し、これら2組

の水分の平均値を実験前の試料水分とした。また、実験に使った試料からも同様に試料を秤取し、この水分を実験終了時の水分とした。

(C) 試料容器の寸法と形状

第3章で提案した測定法の測定原理が無限平板に対して適用されるものであるのに対して、実験では有限の広さの平板状試料充填層を用いるので、試料層側面からの熱的影響を考慮して試料容器の寸法を決定する必要がある。この側面影響については片山ら (14) の詳しい検討結果があるので、これを利用する。

Fig. 4-1に試料寸法とその座標系を示した。この図をもとに、厚さ $2l$ 、直径 $2R$ の円板に関して、初期温度が一様で、 $X=0$ 面での温度勾配がゼロ、 $X=l$ 面の温度は時間とともに変化し側面から hu の熱損失がある場合の解を求め、円板の中心軸上で $X=l$ 面および $X=0$ 面の温度差を u_x とする。これに対して熱損失がない場合、すなわち $R \rightarrow \infty$ の場合の中心軸上の温度差を u とすると、 u_x/u は側面からの熱損失による測定誤差を示すことになる。

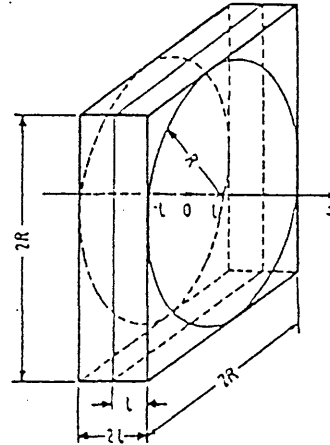


Fig.4-1 Dimensions of sample

これを、ビオ一数 $B_1 = 10, 1$ について計算した結果がFig. 4-2とFig. 4-3である。(Fig. 4-1, Fig. 4-2およびFig. 4-3は、すべて文献(14)より引用したものである。)

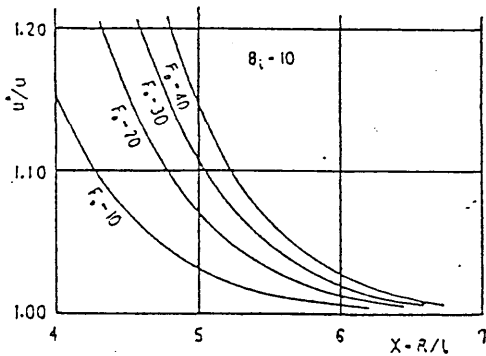


Fig.4-2 R/l and experimental errors due to heat losses through lateral faces

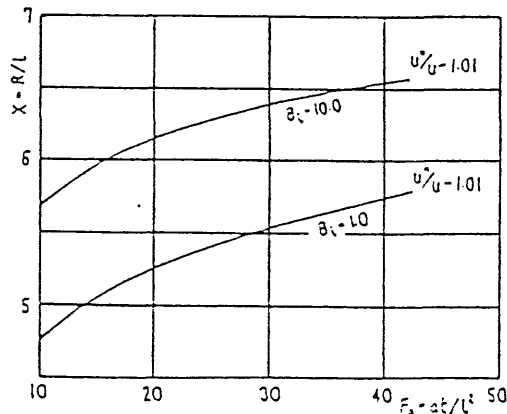


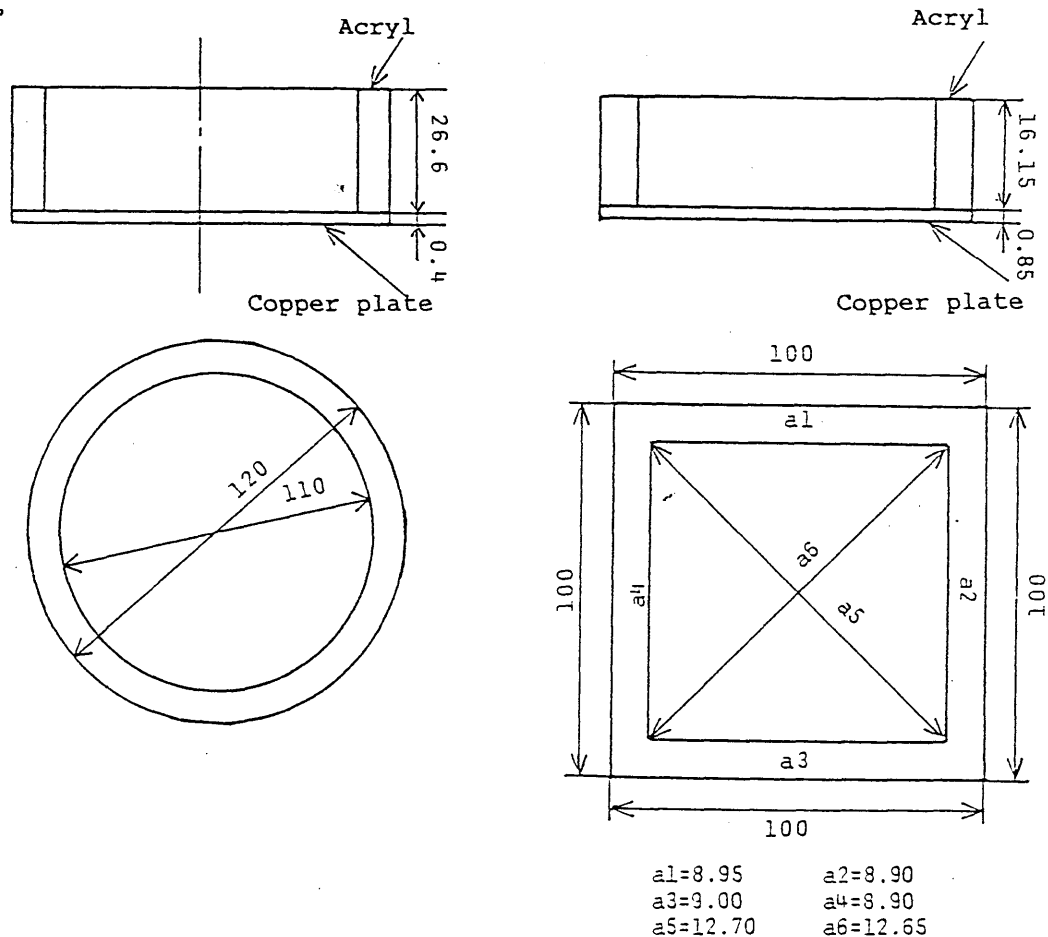
Fig.4-3 F_0 and R/l

以上の図を参考にして、粉を試料とした場合を例にとって寸法を検討する。粉の熱伝導率を k 、熱伝達係数を h とし、 $k=0.2$ (W/mK)、 $h=45$ (W/m² K) を与える。 k は前出の既往のデータを参考にし、 h は細川ら⁽⁵⁶⁾ が求めた値を参考に安全側に大きめに与えた。ここで $R=45$ mm とおくと $B_i = Rh/k = 10$ となる。フーリエ数 F は本実験の範囲内では 2.5 を越えることはないので、Fig. 4-2 および Fig. 4-3 より (特に Fig. 4-3 において $B_i = 10$ の線を $F < 10$ の領域まで延長する)、

$$R/l \geq 5.5 \quad (4-1)$$

とすれば、熱損失による誤差が 1% 以下になることがわかる。また、 $R=55$ mm とすると $B_i = 12.4$ であるが、この場合でも (4-1) 式を満足すれば十分である。

試料層の厚みの設定については 4.3.2. 節の (b) で検討するが、厚い場合でも 7 mm 程度であるので、この厚みに対して十分な寸法を決定し Fig. 4-4 に示した。



(a) Cylinder type

(b) Square type

Fig.4-4 Dimensions of sample containers

図のように試料容器は2種類作成したが、これについては再現性に関する考察の項で触れることにする。Fig. 4-5に、試料容器の実際を示した。底面は試料層に与える温度波の入力部であり、この面の温度を一様にするために厚さ0.4mmおよび0.85mmの銅板を用いた。また、側面には、穀粒の充填状態が視認されるように透明なアクリル樹脂を用いた。



(a)

(b)

Fig.4-5 Sample containers

(d) かさ密度と荷重の決定

穀粒のかさ密度は容器の形状、容積、充填方法、穀粒の水分等によって異なる値を示すが、大略的には一定の範囲を越えるものではない。この範囲を知るために、簡単な充填実験を行なった。内径220mm、深さ390mmのアクリル製円筒容器に粉（コシヒカリ、水分14.9% (w.b.)) を2通りの方法で充填し、充填された粉の重量Wとかさ密度 γ を測定した結果、

(1) タッピングをせず、できるだけ丁寧に充填した場合

$$W = 8796.7 \text{ (g)}, \quad \gamma = 593 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

(2) タッピングを数回行なって密に充填した場合

$$W = 9831.5 \text{ (g)}, \quad \gamma = 663.2 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

であった。したがって、試料のかさ密度を

$$593 \leq \gamma \leq 663 \quad (4-2)$$

を満足するように決めれば、通常の粉充填層に対応するものといえる。

一方、穀粒の熱物性値の水分依存性を調べるためには、異なる水分の試料を用いてかさ密度を一定にして測定するのが理想的である。しかし、1つの穀粒は水分に応じて膨張あるいは収縮するので、同一の容器に同じ重量の穀粒を充填しても、一定のかさ密度を得ることは難しいと考えられる。そこで、試料の充填方法を次に述べるように定め、一定の充填方法で作成した穀粒充填層の熱物性値を求めることとした。すなわち、適当量の穀粒を試料容器に入れ、上部表面が均平で各部の厚みも一定となるようにならした後、ウエイトを載せて一定の荷重を加える方法を取った。荷重は、試料層と温度検出端との接触熱抵抗を減らすために与えるものであるが、その大きさは、前述の粉試料を用いて(4-2)式のかさ密度が得られる範囲を試行錯誤法によって求め、層厚み5-7mmで約26.8(g/cm²)の荷重を与えることに決定した。なお、粉層は荷重をかけた直後やや圧縮される(特に高水分の粉)が、約30分を経過すると、それ以後層厚みは変化しないことを実測して確認した。

以上、粉(コシヒカリ)を対象として決定した充填方法を他の試料、玄米(コシヒカリ)、粉および玄米(大空)についても適用した。

4.3.2. 測定法を適用する体系および実験装置

境界値法による測定法は、3.2.節に示したように2つの体系、SYSTEM 1とSYSTEM 2に適用される。SYSTEM 1では試料両表面の境界条件が任意でよいという便利な点があるが、一方で、試料の内部に温度測定点を取る必要があり、穀粒充填層内に設置した温度検出端の位置を正確に知ることが極めて難しいので、不適當である。これに対して、SYSTEM 2は試料の一表面に断熱条件を仮定したものであるが、温度測定点は両表面に取るだけでよいので、温度検出端の位置を知ることが容易である。この理由により、SYSTEM 2の体系で測定することに決定した。断熱条件の実現の程度が測定値に及ぼす影響については、3.4.3.節に示したデータ処理を行なうことで排除されるものと考えた。

実験装置の概要ならびに計測部の詳細については、既に3.3.節で説明した。ここでは、試料部の構成と温度検出端について述べる。Fig. 4-6に試料部の構成

を示した。最下部の合板とボルト締めすることにより冷却部を圧着固定しているヒータ埋め込み銅板の上に

シリコンシート（厚さ0.3mm×8枚）を敷き、その上に試料容器を載せる。試料層上部には断熱材（スタイロフォーム、厚さ50mm）を配し、最上部にウエイトを載せて荷重を加えた。また、試料容器側面にも断熱材を配した。シリコンシートは、試料容器底面を

密着させて空気層をなくし底面の温度を一様にする。こと、および、シリコンシートの弾力性を利用して試料容器底面の下に設置した温度検出端（熱電対、直径0.1mm）を破損から守ることを目的として用いた。温度検出端は、いま述べた位置M1と試料層上部のM2に設置し、M1の温度を試料層下部表面、M2の温度を試料層上部表面の温度とした。本来ならば、M1は銅板上の試料側に設置するべきであるが、試料充填時の取り扱いの便宜により容器の外側とした。銅の熱伝導率は、粉あるいは玄米と比べて約2000倍、温度伝導率は約1000倍の値を有するので、厚さが0.4-0.8mm程度であれば、銅板の両面に生じる温度差が測定値に与える影響は無視できるものとも思われるが、次に示す方法で熱電対M2を検定することにより、銅板の影響を排除した。

Fig. 4-7に検定時の、熱電対M1, M2の構成を示した。熱電

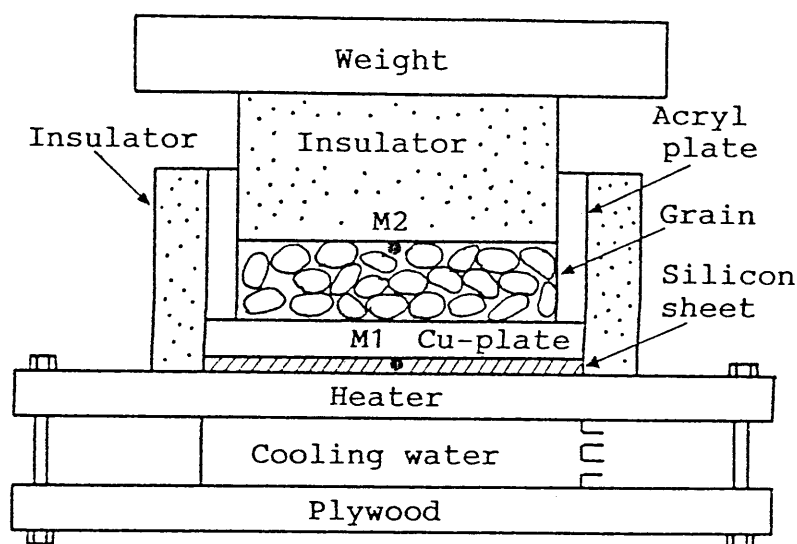


Fig.4-6 Arrangement of sample part

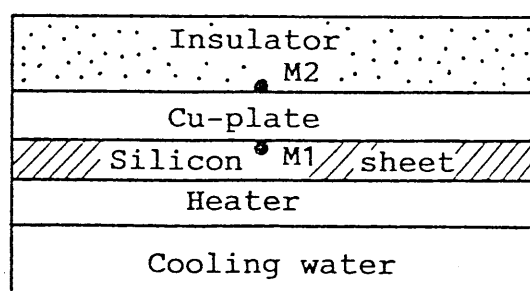


Fig.4-7 Arrangement for examination of M2

対M1は、基準温度計（3.3.2.節に既出）で検定済みのものをである。この状態でM1の側から加熱、冷却して、M1の示す温度に対応するM2の起電力を求めた。この温度と起電力の関係は、昇温中および降温中に同一温度に対してM2が示す起電力を対応させて、直線回帰式で表わした。

4.3.3. 予備実験

実験は熱物性値の温度依存性および水分依存性を知ることが1つの目的として行なうので、測定値に關与する要因は、試料の温度あるいは水分のみであることが望ましい。このような理想的な条件下で実験を行なうことは不可能に近いが、考えられる温度あるいは水分以外の諸要因を抽出して各種予備実験を行ない、これらの諸要因が測定値に及ぼす影響の有無の確認、ならびに、最適な実験条件に関する検討を行なった。以下に、項目を分けて予備実験とその結果について述べる。

(a) 温度検出端の形状

試料の温度測定では、試料層上下両表面の温度を測定することが必要である。これらの表面は穀粒と間げき流体である空気とで構成されており、いわば、“みかけの表面”と言うべきものである。この温度を測定するためには検出端の形状について検討する必要がある。

試料層下部表面の温度は、試料容器底面の銅板の温度で代表させても差し支えないので、検出端の形状は問題にならない。そこで、この面の温度測定にはエナメル被覆したワイヤータイプの熱電対（直径0.1mm）を用いた。この線径であれば、さきにも述べたように、試料容器底面の下に設置したときシリコンシートに埋没し、破損を免れると同時に空気層ができにくいからである。

一方、試料層上部表面では、異物質（例えば銅板）を介在させると温度場を乱すことになるので、検出端を直接設置しなければならない。そこで、検出部の形状が異なる2種類の熱電対、すなわち、ワイヤータイプの熱電対（直径0.1mm）とシートタイプの熱電対（感温部の面積7×7mm、厚さ0.18mm、PHILIPS社製、商品名サーモカップルシート）を用意し、“みかけの表面”温度を測定する上でいずれの検出端が適しているのかを、温度伝導率の実測値を比較することにより検討した。

実験は、粉（大空）を試料として正方形容器を用いて3回行なった。Table 4-8に、各実験の条件を示した。ワイヤータイプの熱電対は感温部が点状で小さいので、設置方法により、感温部が穀粒に接する場合とそのあいだの空間に位置する場合

Table 4-8 Three experimental conditions

Experimental number	a-1	a-2	a-3
Sample	Rough Rice	Rough Rice	Rough Rice
M.C. %(w.b.)	16.2	17.4	17.4
Weight	29.93	28.43	28.44
Thickness	6.89	6.48	6.64
Bulk density (Kg/m ³)	544	549	536
Period (s)	384	384	384
Shape of sensor	Wire type	Wire type	Sheet type

(Note) * Variety = OZORA

** Sample container = Square type

とが考えられる。実験 (a-1) と (a-2) は、この場合に、感温部の位置により測定値にどの程度の差異が生じるかを見た実験である。実験 (a-3) は、サーモカップル シートを用いて前2者との違いを見たものである。これらの実験結果を Table 4-9, Table 4-10 および Table 4-11 に示した。

Table 4-9 Results of experiment (a-1)

Temp. (°C)	16.5	20.7	26.1	33.9	37.9
$\alpha \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$	0.93	0.94	0.97	1.03	1.07

Table 4-10 Results of experiment (a-2)

Temp. (°C)	24.3	29.2	32.0	36.0
$\alpha \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$	0.82	0.85	0.88	0.91

Table 4-11 Results of experiment (a-3)

Temp. (°C)	22.9	24.3	28.6	32.9	35.8	39.8
$\alpha \times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$	0.90	0.91	0.95	1.01	1.03	1.08

更に、測定値をグラフにプロットしたものが Fig. 4-8 である。

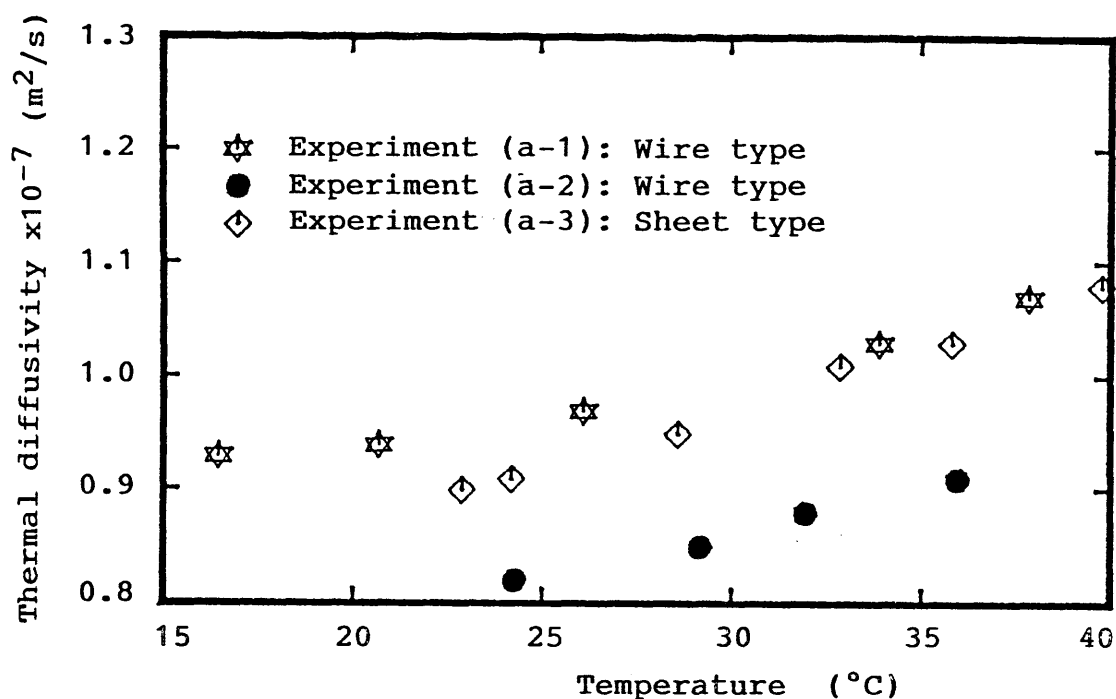


Fig.4-8 Three groups of experimental results (a-1), (a-2) and (a-3)

実験 (a-1) では、感温部が穀粒に接するように、また、実験 (a-2) では空間に位置するようにしたが、図から明らかなように両者には大きな違いが生じた。水分は同じ程度であるので、測定値の差の原因は感温部の設置位置が異なることにあると判断される。このいずれの場合も、試料層上部の”みかけの表面”温度を測定した結果であるとは言い難いものである。

これに対して実験 (a-3) では、実験 (a-1) の結果に近い値であるが (a-1) と (a-2) の中間の値が得られた。”みかけの表面”は、穀粒と間げき流体である空気とが一様に分散して成す面であるので、この面の温度は、穀粒の温度と空気の温度がある法則下で平均化されたものと考えられる。したがって、仮に”みかけの表面”温度が測定されたものとすれば、それを使った処理結果が、穀粒の温度を感知した場合の処理結果と空気温度を感知した場合の処理結果との中間の値をとるであろうことは、容易に推論される。一方、サーモカップル シートの感温部は 7×7 mm の

面積を有するので、穀粒のみあるいは空気のみには接することはなく、一部は穀粒、一部は空気の温度を感知しているものと考えられる。このような形状に基づく試料との接触状態および先の予備実験結果に関する考察から、“みかけの表面”温度の測定にはサーモカップルシートが適していると判断し、以後、試料層上部表面の温度測定にはこれを用いることに決定した。

(b) 充填層厚みの決定と厚みの測定法

本研究では、試料充填層内の空気が静止した状態で、熱物性値を求めることを目的としている。充填層には厚さ方向に熱流を与えるので、できるだけ厚みを小さくした方が、対流の発生を抑止できるものと考えられる。しかし、単粒子層によって充填層を近似することができないことは、粒子の充填状態を見れば明らかである。そこで、厚い充填層の一部を切り出した状態を近似できる最小厚みが、どの程度であるかを知ることが必要となる。この厚みについて、粳および玄米を用いた予備実験を行なって検討した。試料の品種は、コシヒカリである。測定値に影響を及ぼす要因を厚みのみ限定するため、各実験にはほぼ同じ水分の試料を用い、試料温度も同じ条件とした。なお、試料容器には、側面を断熱しやすい円筒形容器を用いた。

まず、玄米を試料とした場合の実験条件とその結果をTable 4-12に示した。実験(b-1)は、玄米の単粒子層についての測定である。厚み2.75mmは、必ずしも単粒子層を代表する値ではない。しかし、3軸を長軸,短軸,および厚みと呼ぶことにすれば、玄米粒子が短軸方向のみ、あるいは、厚み方向のみの姿勢を有するのではなく、両者が混在した姿勢を取り上げたもので、単粒子層の一般的な状態ではある。観察したところでは、長軸方向に立った姿勢を有する粒子はなかった。この例は、かさ密度が最も小さく、また、温度伝導率 α も表中で最小である。実験(b-2)、(b-3)および(b-4)は、厚さ方向に複数の玄米粒子が配置された場合の測定例である。この場合は、長軸方向に立った姿勢の粒子も散見された。実験(b-5)および(b-6)は、更に厚層の場合の測定例である。 α の値は3つのグループを呈し、実験(b-1)に対して実験(b-5)および(b-6)は極端に大きく、実験(b-2)、(b-3)および(b-4)がその中間に位置する。極端な違いを呈する2つのグループ間の差は測定誤差の範囲を越えており、実験(b-5)および(b-6)では、対流が生じたことが主な原因で α の値が大きくなったものと考えられる。温度波の周期は、適当な温度応答が得られるように試料層の厚みに応じて変化させてい

Table 4-12 Thickness of layer vs Thermal diffusivity (Hulled Rice)

Condition of layer	Experimental number	Thickness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	M.C. % (w.b.)	Period (s)	Temp. (°C)	α x10 ⁻⁷ (m ² /s)
Single	b-1	2.75	20.58	788	14.4	128	28.3	0.68
	b-2	4.16	32.65	826	14.4	240	26.9	0.74
	b-3	5.15	40.22	822	14.3	384	27.1	0.76
Plural	b-4	5.22	40.22	811	14.8	384	26.4	0.75
	b-5	6.46	50.64	825	14.4	480	26.4	0.82
	b-6	9.96	81.52	861	14.8	960	27.3	0.81

(Note) Variety = KOSHIHIKARI

るが、次の(c)で検討するように、例えば実験(b-3) , (b-4)と実験(b-5)の違い程度では、周期が α の値に関与することはない。

このような考察から、実験(b-2) , (b-3)および(b-4)の測定値が、静止空気を含んだ玄米充填層の α の代表値に近いものであると考えられる。ただし、実験(b-2)結果が少し小さい値を示しているのは、層が薄いために単粒子層の特性が残っている結果であるとも見ることができるので、これを除外する。結局、層厚みを l として、

$$5.0 \leq l \leq 6.0 \quad (4-3)$$

とすれば、(4-3)式を満足する玄米充填層を試料とすることにより、巨視的には空気が静止した状態での α を求めることができる。各々の層を形成する玄米粒子の厚さ方向の姿勢を知るために、実験(b-1) , (b-2)および(b-3)の試料を側面から見た様子をFig. 4-9, Fig. 4-10およびFig. 4-11に示した。



Fig.4-9 Posture of hulled rice



Fig.4-10 Posture of hulled rice



Fig.4-11 Posture of hulled rice

次に、粉を試料として、層厚みを検討するために行なった実験について述べる。実験の条件と結果とをTable 4-13に示した。

Table 4-13 Thickness of layer vs Thermal diffusivity of rough rice

Condition of layer	Expei-mental number	Thick-ness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	M.C. % (w.b.)	Period (s)	Temp. (°C)	$\alpha \times 10^{-7}$ (m ² /s)
Single	b-7	3.18	17.62	583	14.7	128	26.1	0.83
Plural	b-8	5.50	32.73	626	14.7	288	27.2	0.83
	b-9	6.59	39.26	627	14.9	384	24.7	0.89
	b-10	7.05	43.00	642	14.7	432	25.4	0.86
	b-11	9.96	61.31	648	14.7	864	26.2	0.87

(Note) Variety = KOSHIHIKARI

実験 (b-7) は単粒子層の場合で、他は、厚さ方向に複数の粉粒子が並んだ場合である。玄米粒子の場合に対応させてみると、粉では、実験 (b-8) に見られるように厚み 5.50 mm 程度まで、単粒子層の特性が残存していると思われる結果が得られた。実験 (b-7) および (b-8) に比べて実験 (b-9) , (b-10) および (b-11) では、測定誤差の範囲を越えて α の値が大きく出ている。これは、前二者が単粒子層の特性を示しているのに対して、充填層 (複数の層) の特性を示したものと考えられる。ここで、実験 (b-9) と (b-10) の結果には隔たりがあるように見えるが、次のように考えると、両者に際立った差はないことがわかる。 α と γ には、 $\alpha = k / (c\gamma)$ なる関係があり、 γ に応じて α は異なる値を示す。しかし、熱伝導率 k はほぼ不変であるので、 k を一定として実験 (b-9) の α を (b-10) のかさ密度 $\gamma = 641.8$ に対応する値に置き直すと、水分はほぼ同じものとして、

$$\alpha = 0.89 \times 10^{-7} \times 626.9 / 641.8 = 0.87 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$$
となり、実験 (b-10) と同じレベルの値を示す。

以上の結果は、玄米に比較して、粉では層厚みが 10 mm 程度までは測定値に対流の影響が認められることはなく、粉の方が対流を生じにくいことを示している。粉殻の形状を考えれば、これは当然の結果と言えよう。以上の考察から、粉層の厚みを l とし

た場合、

$$6.0 \leq l \leq 9.0 \quad (4-4)$$

として、(4-4)式を満足する試料を用いれば、巨視的には空気が静止した状態での α を求めることができると考えられる。

なお、米粉の厚さ方向の姿勢を見るために、実験(b-7)、(b-10)および(b-11)の各試料を試料容器側面から見た様子をFig. 4-12, Fig. 4-13およびFig. 4-14に示した。米粉には、枝梗がついたままのものが見られるが、実際の粉はこの状態であるので、あえて枝梗を取り除くことはしなかった。



Fig.4-12 Posture of rough rice



Fig.4-13 Posture of rough rice

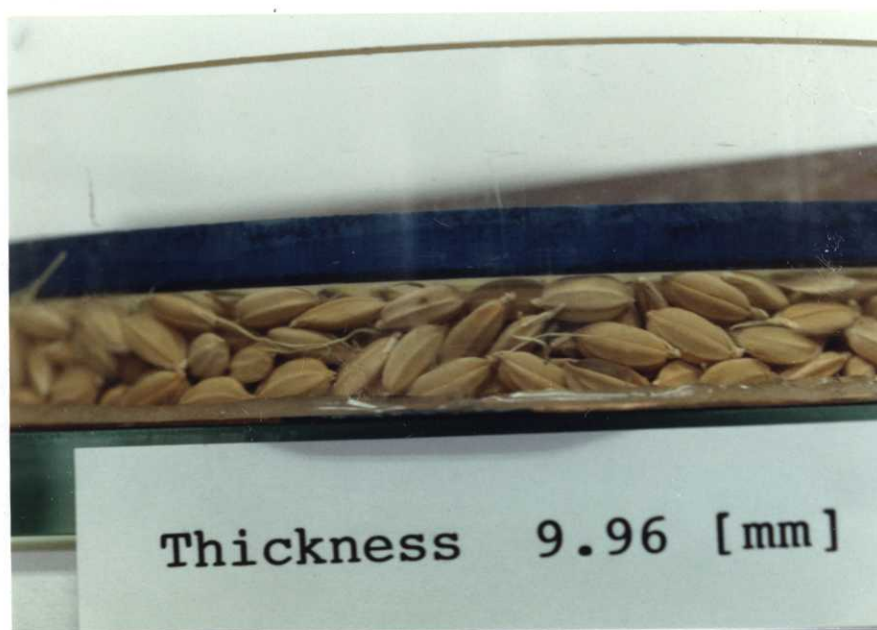


Fig.4-14 Posture of rough rice

充填層の厚みの測定法を、次に説明する。Fig. 4-14を例にとると、粉層の上部の青い部分は厚みの測定のために用いたアクリル板である。試料を充填した後、このようにアクリル平板で上表面を均平にする。その上にウエイトを載せた状態で容器底部の銅板とアクリル平板間の距離を測り、これを、充填層の厚みとした。距離の測定には、測長器（進興科学製，目盛り0.01mm）を用いた。

(c) 入力温度波の周期に関する検討

本測定法では材料の加熱方法は基本的に任意であるが、実際には、周期的に加熱する方法を取っている。多くの工業材料のように均質な固体を試料とする場合には、加熱周期の大小はあまり問題にならない。しかし、本研究で対象とする穀粒充填層は、空気および水が混在した不均質な系であるので、加熱周期について予め検討しておくことが必要である。このため、同一の充填層について2種類の加熱周期を与えて α を求め、その結果を比較した。試料容器は円筒形とし、試料には粉および玄米（コシヒカリ）を用いた。この結果を、実験条件とともにTable 4-14に示した。 α は、測定装置の制約上小数点以下2ケタまでで表示するのが適当であるが、ここでは、参考のために3ケタまで表示した。Table 4-14によれば、ここで与えた範囲の周期であれば、粉，玄米ともに加熱周期の大小が測定値に及ぼす影響はないものと判断される。

Table 4-14 Effect of the period on thermal diffusivity

Sample	Thick- ness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	M.C. % (w.b.)	Period (s)	Temp. (°C)	α $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	Experi- mental number
Hulled Rice	4.16	32.65	826	14.5	192	27.1	0.735	c-1
					240	26.9	0.738	c-2
Rough Rice	7.05	43.00	642	14.9	432	25.5	0.862	c-3
					528	25.7	0.857	c-4

(Note) Variety = KOSHIHIKARI

(d) 入力温度波の振幅に関する検討

本測定法では、周期的に加熱する $X=0$ 面の温度波（入力温度波）と反対側の断熱面の温度波（出力温度波）とを測定し、これらを用いてデータ処理を行なうことにより試料の α を求めている。このとき、出力温度波の振幅が小さすぎるとデータ処理が不能となることがある。これを避けるためには、出力温度波が十分な振幅を示すように、入力面に与える温度波の振幅を決める必要がある。一方、入力温度波に過大な振幅を与えると、試料充填層内における対流あるいは水分移動を誘発する危険性があるので、この点に関しても事前の検討を要する。仮に、入力温度波の振幅が過大であるために対流あるいは水分移動が発生したとすると、測定値 α がこの影響を受けて異なった値を呈することは必至である。したがって、異なる振幅を与えた場合の測定値を比較すれば、こうした不都合な現象の発生の有無を確認することができる。また、この場合、異なる振幅のいずれにおいても先の現象の発生があった場合、その程度は振幅の大小に対応したものであろうから、いずれにしても、測定値は異なった値を示すことになる。こうした推論の下に、粉および玄米を用いて、異なる振幅を与えて予備実験を行なった。試料の品種はコシヒカリで、水分移動の有無を確認しやすいように高水分の試料を用いた。

実験の条件と結果とを、実験番号を付して Table 4-15 に示した。 α は、ここでも3ケタまで表示した。また、入力温度波と出力温度波の振幅の程度を視認するために、測定した温度波の生データも同時に示した。Fig. 4-15 および Fig. 4-16 は、実験 (d-1) および (d-2) で測定した玄米充填層両表面温度の生データであり、Fig. 4-17 および Fig. 4-18 は、粉充填層に関する実験 (d-3) および (d-4) で得た生データである。先の Table 4-15 によれば、粉、玄米ともに、入力温度波の振幅が小さい方が α も小さくなるようにみえる。しかし、測定装置の性能に照らして2ケタまで取れば、粉ならびに玄米とも振幅に拘らず同じ α 値となる。このことから、はじめに触れた現象が仮に生じたものとしても、それは、測定値に影響を与える程のものではないと判断される。この実験は高水分の試料について行なったもので、他の試料はいずれもこれより低水分であるので、ここで得た判断は、他の試料についても保証されるものと考えられる。

以上の考察により、入力面に与える温度波の振幅は、2.5℃程度であれば問題はないと結論された。

Table 4-15 Effect of the amplitude of input temperature wave on α

Sample	Thick- ness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	M.C. % (w.b.)	Period (s)	Temp. (°C)	Amp. of input temp. wave (°C)	α $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	Experi- mental number
Hulled Rice	5.84	43.66	787	23.2	384	19.2	2.10	0.815	d-1
	5.86	43.66	784	23.4	384	19.2	3.68	0.823	d-2
Rough Rice	6.13	38.12	654	23.5	384	17.0	2.35	0.817	d-3
						17.8	3.26	0.823	d-4

(Note) Variety is KOSHIHIKARI.

Amplitude of input temperature wave is given as an average value.

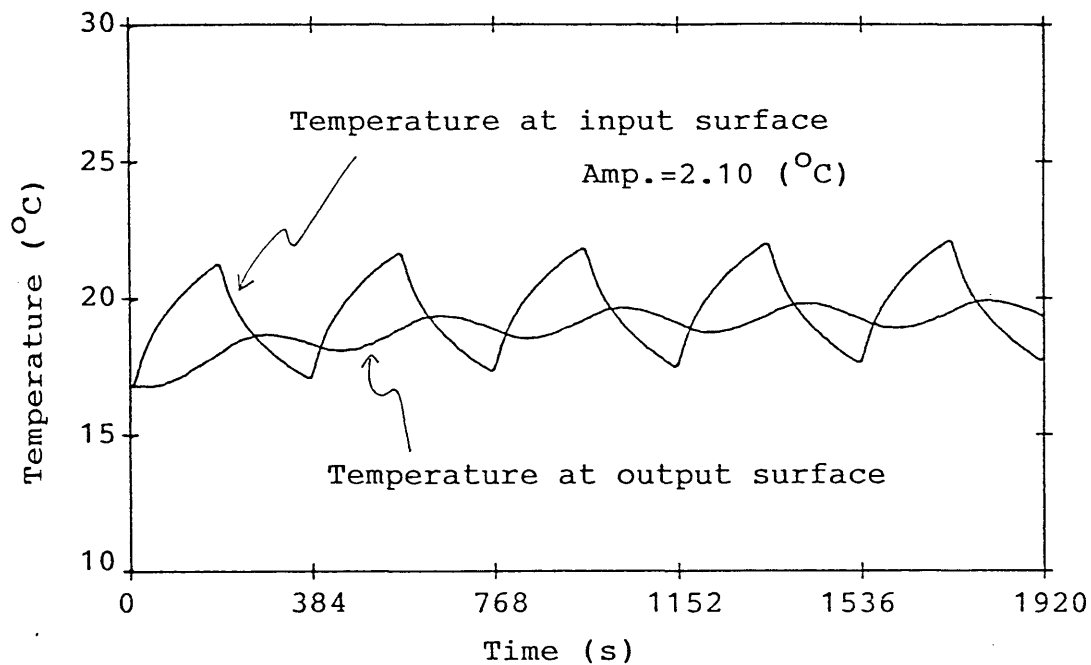


Fig.4-15 Observed temperatures at experiment (d-1)

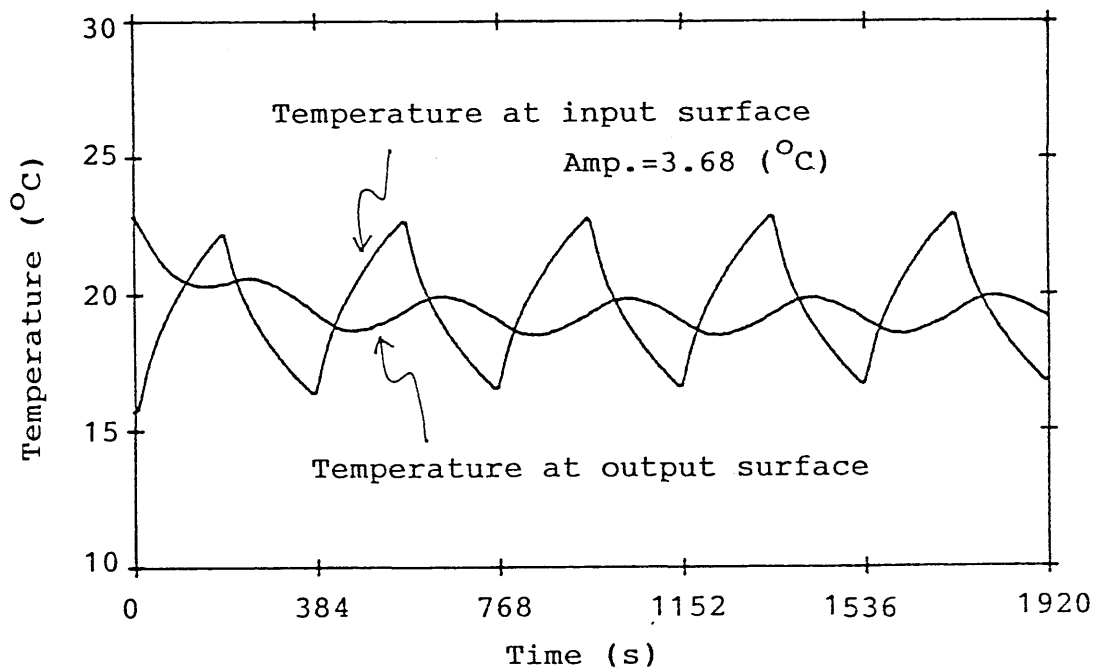


Fig.4-16 Observed temperatures at experiment (d-2)

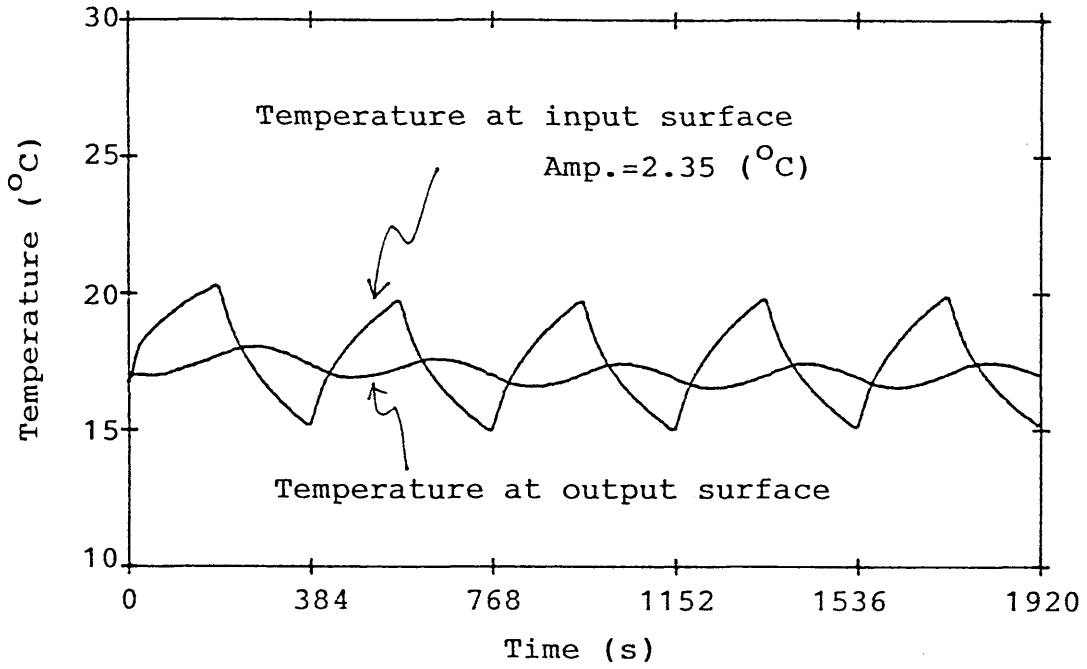


Fig.4-17 Observed temperature at experiment (d-3)

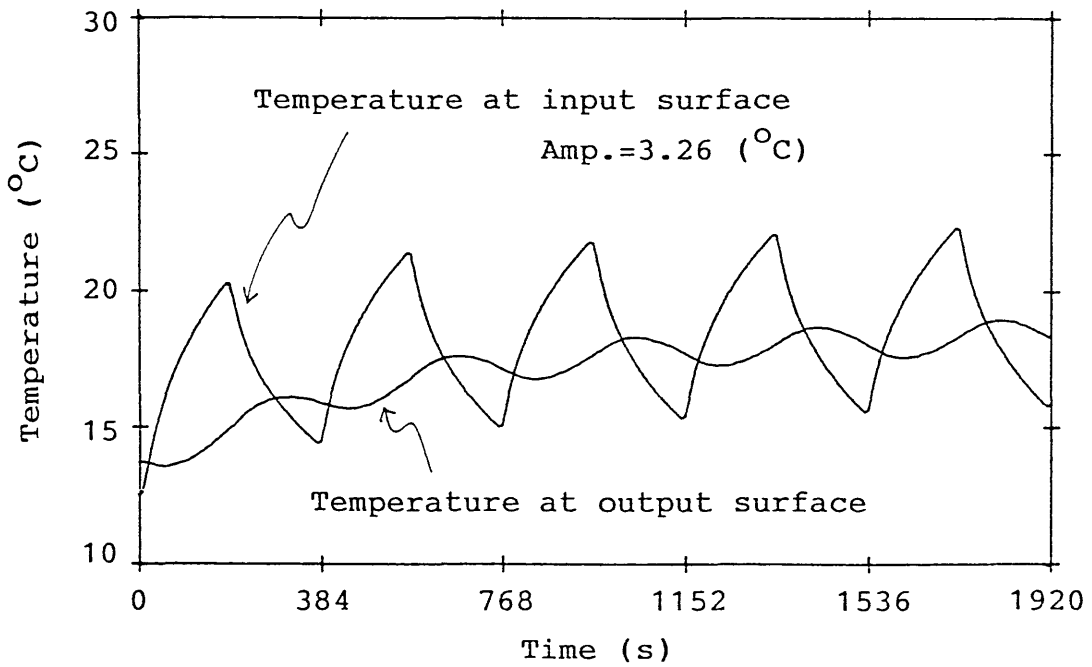


Fig.4-18 Observed temperatures at experiment (d-4)

(e) 昇温速度に関する検討

境界条件の任意性を認めていることが本測定法の大きな特徴の1つであるので、試作した測定装置も、試料の温度制御に関しては簡単なものである。このことは、各々の実験において、試料の昇温速度が一定でないことを意味する。したがって、本測定法の特徴が実験においても実現されているか否かを確かめておくことは、データの信頼性を保証する上で重要なことである。

予備実験に先立って行なった2, 3の実験では、試料の水分が高いほど α の温度依存性が高くなる傾向が認められたので、試料には高水分の粉(コシヒカリ)を選定し、異なる昇温速度を与えて、実験を行なった。試料の条件および与えた周期を、Table 4-16に、実験の結果をTable 4-17に示した。

Table 4-16 Experimental conditions

Thickness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	M.C. %(w.b.)	Period (s)
6.13	38.12	654	23.4	384

(Note) Sample = Rough Rice (KOSHIHIKARI)

Table 4-17 Results (Rate of temp. rise vs α)

Average (*) temperature (°C)	Rate of (**) temperature rise (°C/min)	α $\times 10^{-7}$ (m ² /s)	Experimental number
25.4	0.069	0.845	e-1
24.5	0.220	0.838	e-2

(*), (**) = Average value over the interval

Table 4-17に示した実験(e-1)は、昇温速度を小さく抑えて0.069 (°C/min)とした場合であり、実験(e-2)は、データ処理が可能な範囲で大きく与え0.220 (°C/min)とした場合である。いずれの場合についても、 α は3ケ

タまで表示した。観察された試料の温度を、実験 (e-1) については Fig. 4-19 に、実験 (e-2) については Fig. 4-20 に示した。

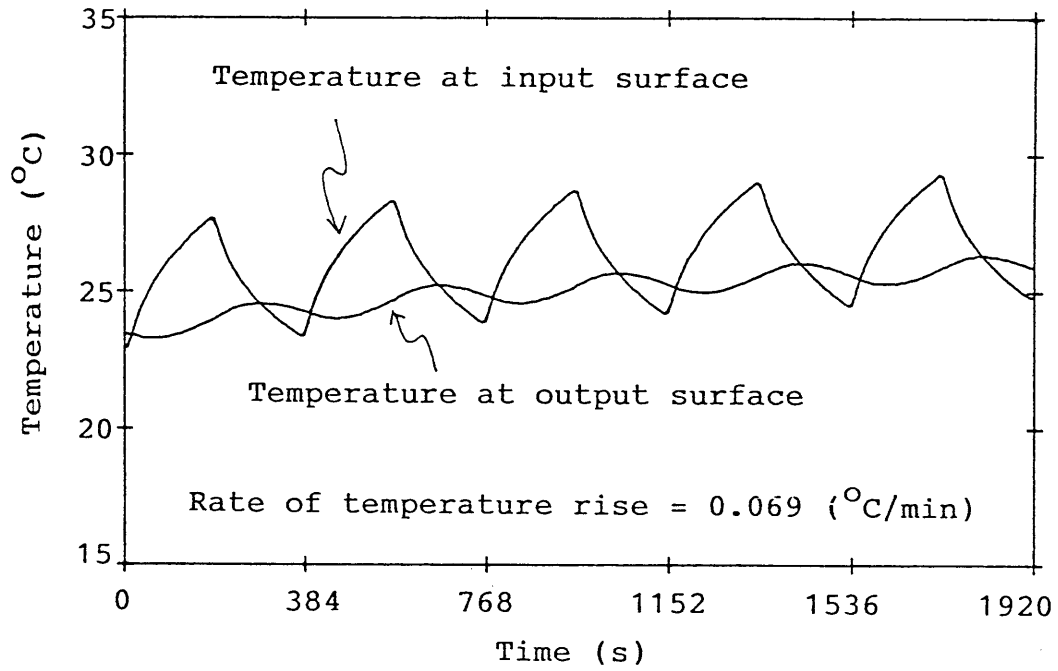


Fig.4-19 Observed temperatures at low rate of temperature rise (Experiment e-1)

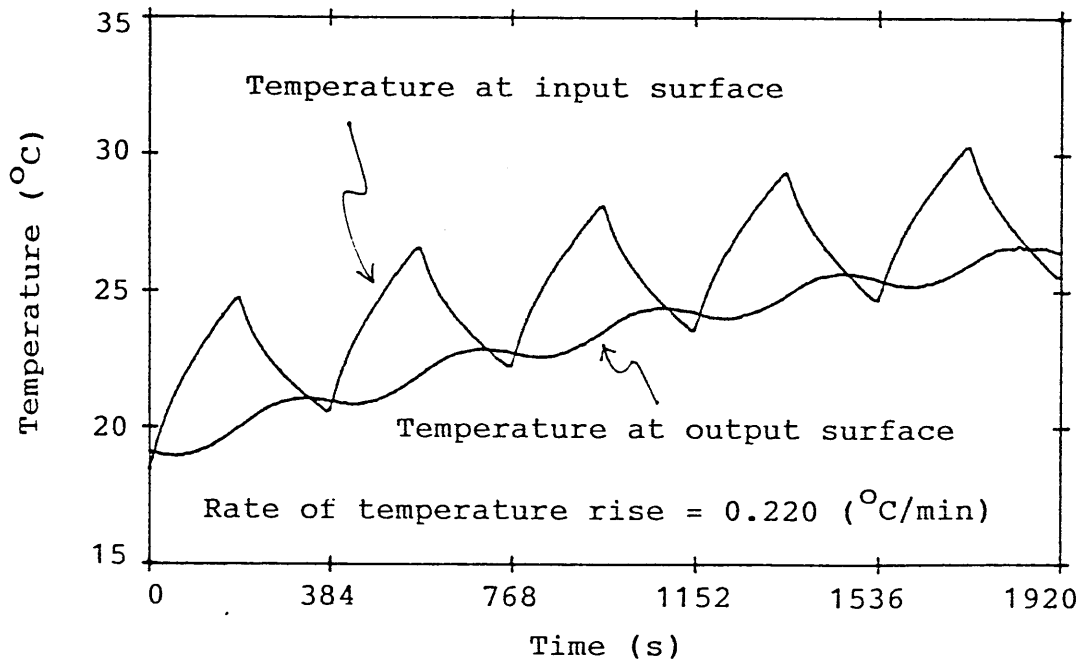


Fig.4-20 Observed temperatures at high rate of temperature rise (Experiment e-2)

Table 4-17によれば、実験(e-1)に比べて昇温速度が大きい(e-2)の方が α が小さく出ている。この原因としては、実験(e-2)の方が、試料の平均温度が約1℃低いことがあげられる。昇温速度の影響を考えると、Fig. 4-19およびFig. 4-20をみれば明らかなように、実験(e-1)では試料の平均温度が23.5℃-26.0℃の範囲で上昇しているのに対して、実験(e-2)では19.1℃-26.5℃の範囲で上昇しており、温度変化の幅が大きい。データ処理においては、3.4.3.節に示したように、この区間で α が一定であると仮定して6組の α 値を求め、それを平均する方法を取っているが、温度変化の幅が大き過ぎれば、 α の温度依存性が効いて正しい処理結果が得られない可能性がある。このような観点から両結果を比較すると、両者の差が昇温速度によるものであるとするにはあまりに小さい。むしろ、先に触れた平均温度の違い、あるいは、通常避けられない測定誤差によるものであると考えた方が説明がつく。したがって、Table 4-17に示した昇温速度の範囲内では、データ処理結果への影響はないものと考えてよい。なお、安全を期して、以後の実験における昇温速度は0.1(℃/min)程度を目安とした。

(f) 側面からの熱損失に関する検討

試料層側面からの熱損失に関しては、4.3.1.節(c)において理論的に検討し、熱損失の影響が測定値の誤差として現われないように、試料容器の寸法を決定した。寸法の決定にはパラメータ B_1 (ビオー数)を仮定しなければならないが、この B_1 の算出に必要な熱伝達係数 h は、玄米に関するデータが入手できないので粉のデータを代表値として用いたものである。したがって、その結果を玄米にも適用できるか否かについては、一抹の不安が残る。そこで、玄米を試料として、確認の実験を行った。その条件と結果をTable 4-18に示した。

Table 4-18 Effect of lateral condition

Lateral condition	Thickness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	Temp. (°C)	$\alpha \times 10^{-7}$ (m ² /s)	Experimental number
Insulated	5.15	40.22	822	27.1	0.762	f-1
Free	5.22	40.22	811	26.4	0.752	f-2

(Note) * Sample = Hulled Rice(KOSHIHIKARI)

** M.C. = 14.3 % (w.b.)

用いた試料容器は、円筒形容器である。実験（f-1）は試料容器側面を断熱した場合、実験（f-2）は断熱しない場合であり、室温は、両実験時において約21℃であった。諸条件において、両実験間に大きな隔たりはなく、得られた α についても、側面からの影響が認められるほどの違いはなかった。もとより、実験（f-1）において理想的な断熱条件が実現されているとは言い難いが、現実的には、妥当な程度の断熱は実現されているものと考えられる。したがって、ここで得られた結果は、先に決定した試料容器の寸法が玄米に対しても適用されることを、裏付けるものであるといえる。

（g）試料容器底面の温度の乱れが測定値に与える影響

本測定法の測定原理は、3.2.1.節で述べたように、材料内の一次元熱流が仮定される条件下で構築されたものである。4.3.2.節のFig. 4-6に試料部の構成を示してあるが、この一次元熱流は、試料容器底面を加熱することにより、試料層の厚さ方向に実現されるものと考えている。このことは熱流に垂直な平面上で温度が一樣であることと同義であり、実際には、このための手段を講ずることによって一次元熱流の実現を図った。その手段とは、試料容器底面を銅板で作成したことである。銅板は、試料に対して熱伝導率、温度伝導率ともに10の3乗のオーダーで大きな値を有しているため、相対的に、銅板上では一樣な温度が実現されるとの予測に基づいている。試料容器底面と加熱板を接着するなどして、両者の間の空気層を完全になくすことができれば、この予測は正しく実現されるものと考えてよい。しかし本実験装置では、試料充填層の調整の都合により容器を着脱式とし、加熱板とは試料層上部のウエイトの重さを利用して圧着する方式をとった。このため、Fig. 4-6に示したように、両者の間にはシリコンシートを介在させて空気層を排除するよう注意を払った。しかし、万一試料底面が均一に加熱されない場合に、測定値にどのような影響が現われるかを知っておくことは、取得したデータを評価する際に有益な情報となる。

そこで、Fig. 4-21 (a) およびFig. 4-21 (b) に示した2種類の試料容器を用いて予備実験を行なった。Fig. 4-21 (a) は本来の試料容器で、Fig. 4-22に示した配置で試料容器底面が均一に加熱されるようにして用いた。Fig. 4-21 (b) は、試料容器底面の銅板に4ヶ所の突出部を設けたものである。これを、Fig. 4-23に示した配置で用いることにより、突出部が周囲空気



Fig.4-21(a) Sample container



Fig.4-21(b) Sample container

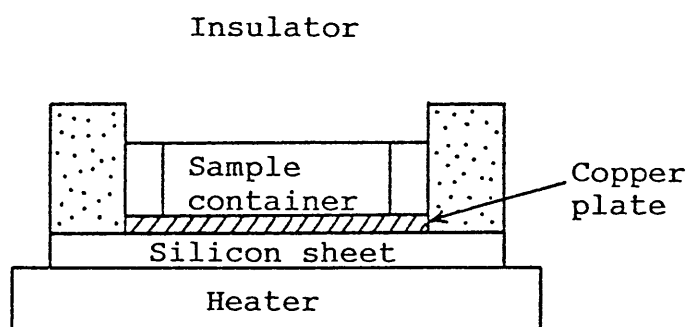


Fig.4-22 Arrangement of Experiment (g-1)

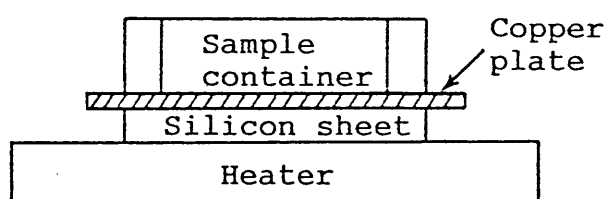


Fig.4-23 Arrangement of Experiment (g-2)

の温度をひろって、一様であるべき底面に温度ノイズが混入するようにした。これを、底面が均一に加熱されない場合の代表例と考えた。実験は、Table 4-19に示した条件下で行なった。また、その結果をFig. 4-24に示した。試料の平均温度は、いずれも、室温と同じかそれよりも高い温度であった。Fig. 4-24をみれば、実験(g-2)、すなわち、試料容器底面に温度ノイズが混入した場合には、

Table 4-19 Experimental conditions of (g-1) and (g-2)

Room temp. (°C)	Temp. of bottom surface	Thickness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	M.C. % (w.b.)	Experimental number
21.0	Uniform	5.86	43.66	784	23.4	g-1
	Nonuniform	5.97	43.17	761	23.6	g-2

(Note) * Sample = Hulled Rice (KOSHIHIKARI)

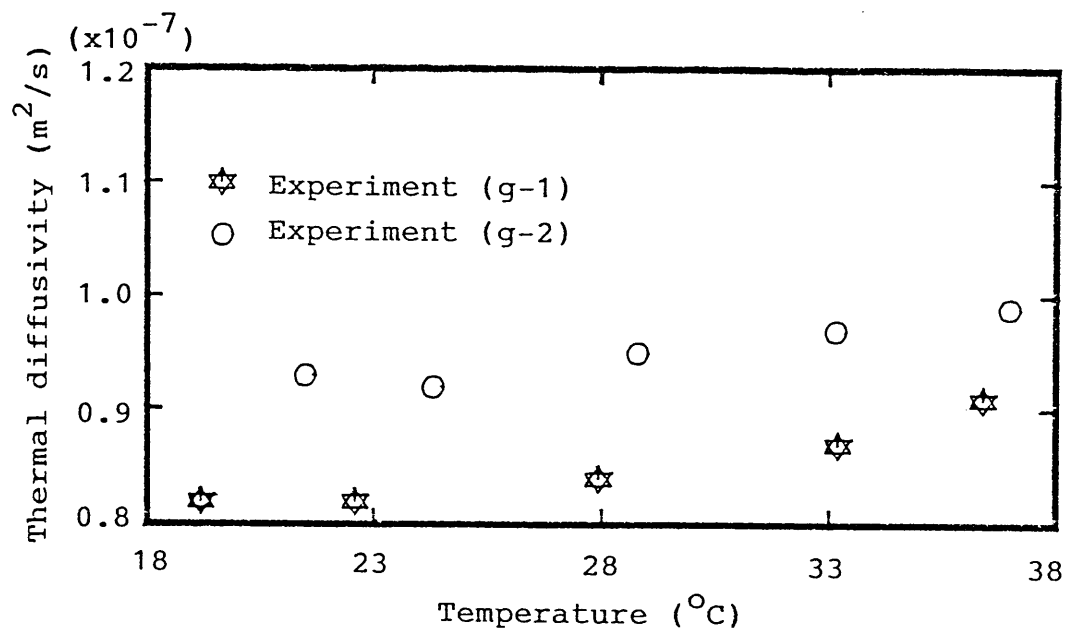


Fig.4-24 Effect of nonuniformity of bottom surface temperature on measured value α

α の測定値は本来の値よりも明らかに大きく現われている。実験 (g-2) では側面を断熱していないが、これに関しては予備実験 (f) で検討したように、測定値への影響は無視できるものと考えられる。したがって、試料容器底面の温度が不均一であると正しい測定値が得られず、試料の温度が室温と同等またはそれより高い場合には、測定値は実際よりも大きくなるという知見を得た。

4. 3. 4. 本実験の結果と整理

前節の予備実験で得られた知見をもとにして試料および実験の諸条件を定め、籾および玄米の温度伝導率 α を測定した。品種は、4. 3. 1. 節 (a) の検討結果より、コシヒカリおよび大空とした。更に、熱伝導率 k を比熱 c 、かさ密度 γ を用いて、

$$k = \alpha c \gamma \quad (4-5)$$

なる式により、算定した。比熱 c の測定については第5章で詳しく述べるが、そこで得た回帰式を用いて(4-5)式に必要な c 値を求めた。

α の測定に際しては、前章(3-2)式に示した本測定法の適用条件 $F_0 \geq 0.7$ を満足するように加熱周期 t_0 を定めた。また、試料温度のサンプリング間隔や取得する総データ数などを定め、一連の実験において、この条件を統一的に与えた。これをTable 4-20に示した。

Table 4-20 Conditions of a set of experimental run

Period t_0 (s)	Sampling interval (s)	Number of temperature values to be measured	
		per one period	per one set
384	4	96	485

(a) 籾(コシヒカリ)の温度伝導率および熱伝導率

試料の水分は、9-25%(w.b.)の範囲で7レベルに調整した。水分範囲の上限は、雨天日の翌日に収穫された籾が23%(w.b.)前後の水分を示すので、これを目安とした。また、下限については次のように決定した。我が国の気象条件では、乾いた環境下に放置した場合でも籾の水分は12%(w.b.)程度にしかならないので、これ以下の水分に関しては、現行の乾燥あるいは貯蔵技術からすると実用上の要求は少ないものとする。しかし、12%(w.b.)以上の試料について求めた、熱物性値の水分依存性あるいは水分をパラメータとしたときの温度依存性について確信を持って判断を下すためには、これを補足する資料として更に低水分の資料に関するデータが必要であると考え、下限を9%(w.b.)程度とした。

試料の平均温度は、10℃-40℃の範囲で設定した。上限の40℃は、特に高水分の試料の場合、水分を変化させないで測定するという条件に対して限界の温度と考

えられる。

試料の厚みは、(4-4)式を満足する範囲に設定した。これらの諸条件を、実験番号を付してTable 4-21に示した。

Table 4-21 Conditions of samples

Experimental number	M.C. % (w.b.)		Thickness (mm)	Bulk density (Kg/m ³)
	before used	after used		
A-1	9.0	8.9	6.41	626
A-2	11.9	—	6.19	631
A-3	14.9	14.8	6.59	627
A-4	17.1	—	6.31	604
A-5	18.7	—	6.28	626
A-6	19.6	—	6.33	629
A-7	23.5	23.3	6.13	654

実験(A-1) - (A-7)から得られた測定値 α と(4-5)式により算定した k を、Table 4-22に試料の平均温度とともに示した。 k の算定に必要な c 値は、

$$c = 1.256 + 0.04228M$$

から求めた。これは、次章で述べる回帰式で、 c は(KJ/Kg°C)、 M は%(w.b.)である。

Table 4-22の α について、水分をパラメータとしたときの温度依存性を見たのがFig. 4-25である。実線は、各測定点を直線で結んだものである。20%(w.b.)より低い水分領域では、 α は温度に関してほぼ直線関係を有することが見てとれる。しかし、水分23.4%(w.b.)での測定値は、17°C付近で最小値をとるようにみえる。そこで、この部分を除外して測定した全水分範囲に共通な特性を求めると、温度 θ が $20 \leq \theta \leq 40$ の範囲で、 α と θ には直線関係が認められる。しかし、充填層において、 α はかさ密度の違いに応じて変化する性質のもので

Table 4-22 α and k of rough rice (KOSHIHIKARI)

Experiment (A-1) M.C.=9.0	θ	11.4	14.5	19.6	24.8	30.4	34.6	
	α	0.85	0.87	0.87	0.87	0.89	0.91	
	k	0.087	0.089	0.089	0.089	0.091	0.093	
Experiment (A-2) M.C.=11.9	θ	22.3	27.0	31.2	35.2	39.8		
	α	0.82	0.85	0.87	0.89	0.92		
	k	0.091	0.094	0.097	0.099	0.102		
Experiment (A-3) M.C.=14.9	θ	11.8	14.8	17.4	21.0	23.0	24.7	27.3
	α	0.84	0.84	0.86	0.88	0.88	0.89	0.91
	k	0.099	0.099	0.102	0.104	0.104	0.105	0.108
	θ	29.0	32.0	36.0	39.9			
	α	0.91	0.93	0.96	1.00			
	k	0.108	0.110	0.114	0.118			
Experiment (A-4) M.C.=17.1	θ	23.3	26.6	31.0	35.1			
	α	0.91	0.94	0.97	1.00			
	k	0.109	0.112	0.116	0.120			
Experiment (A-5) M.C.=18.7	θ	22.3	26.5	31.0	34.9			
	α	0.80	0.84	0.87	0.89			
	k	0.102	0.108	0.111	0.114			
Experiment (A-6) M.C.=19.6	θ	23.6	27.2	32.0	36.0	39.9		
	α	0.85	0.87	0.91	0.96	0.99		
	k	0.111	0.114	0.119	0.126	0.130		
Experiment (A-7) M.C.=23.	θ	13.8	17.0	17.8	24.5	25.4	30.6	33.7
	α	0.84	0.82	0.82	0.84	0.85	0.89	0.91
	k	0.124	0.121	0.121	0.124	0.125	0.131	0.134

(Note) θ ; ($^{\circ}\text{C}$), α ; $\times 10^{-7}$ (m^2/s), k ; ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

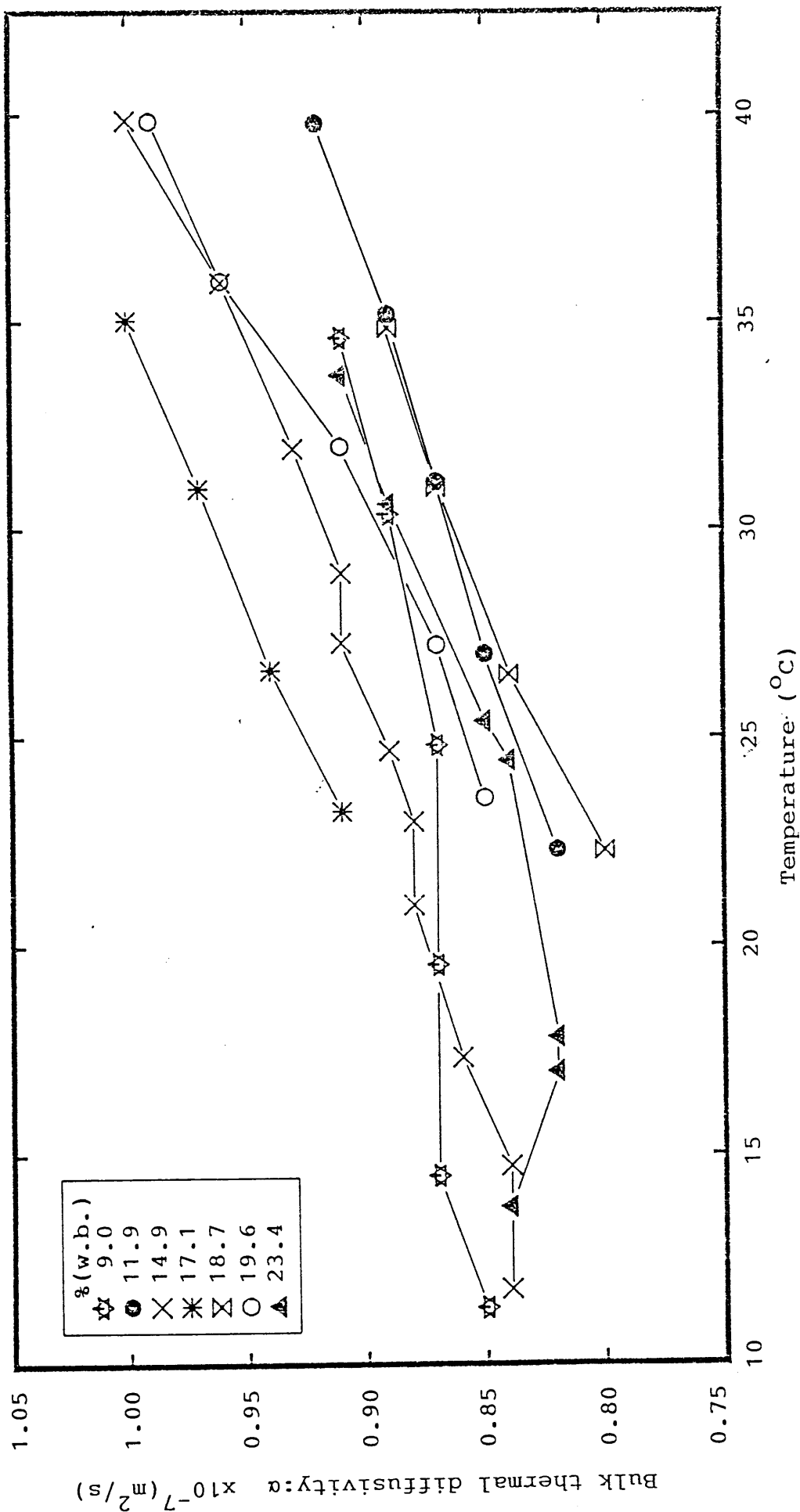


Fig.4-25 Bulk thermal diffusivity of rough rice (Variety=KOSHIIKARI)

あるから、 α と θ の回帰式を求めても意味がないと考え、上述の定性的な判断のみにとどめた。

一方、 α と水分 M との関係については、Fig. 4-25 から定性的な結論を引き出すことは困難に思われた。この原因も、 α がかさ密度によって変動することにあると考えられる。

これに対して、熱伝導率 k は材料に固有の熱物性値である。もちろん、前にも述べたように、充填層のかさ密度が極端に異なる場合には固有性の保持が難しくなるが、一定の方法で充填したときのかさ密度のバラツキの範囲内では、ほぼ固有の値と考えてよい。そこで、Table 4-22 より k を抽出し、水分をパラメータとしたときの k の温度依存性をみたグラフを Fig. 4-26 に示した。ここでも温度範囲を α の場合と同じにとれば、全水分範囲にわたって各プロットは直線上に並ぶので、 k を θ に関して直線回帰し、回帰直線を図中に示した。ただし、水分 23.4 % (w.b.) の結果については、低温度領域の 3 点を除いて回帰したものであり、その他の水分の結果については、測定値 k の全プロットを回帰の対象とした。以下に、求めた回帰式を示す。

$$M=9.0, \quad k=0.0849 + 2.103 \times 10^{-4} \theta, \quad r=0.922 \quad (4-6)$$

$$M=11.9, \quad k=0.0771 + 6.261 \times 10^{-4} \theta, \quad r=0.999 \quad (4-7)$$

$$M=14.9, \quad k=0.0897 + 6.674 \times 10^{-4} \theta, \quad r=0.985 \quad (4-8)$$

$$M=17.1, \quad k=0.0873 + 9.296 \times 10^{-4} \theta, \quad r=0.999 \quad (4-9)$$

$$M=18.7, \quad k=0.0822 + 9.258 \times 10^{-4} \theta, \quad r=0.984 \quad (4-10)$$

$$M=19.6, \quad k=0.0816 + 1.210 \times 10^{-3} \theta, \quad r=0.993 \quad (4-11)$$

$$M=23.4, \quad k=0.0973 + 1.094 \times 10^{-3} \theta, \quad r=0.999 \quad (4-12)$$

ただし、 M ; % (w.b.), k ; (W/mK), θ ; ($^{\circ}$ C), r ; 相関係数 である。

なお、この回帰式の適用範囲は、次の 3 つのグループに分けられる。15% (w.b.) 以下の水分範囲で求めた回帰式は 10 $^{\circ}$ C 以上の温度領域に適用可能である。水分が 15% (w.b.) - 20% (w.b.) の範囲の回帰式は、20 $^{\circ}$ C 以上の温度で得た測定値を使って求めたものであるが、温度の適用範囲の下限を 15 $^{\circ}$ C 程度まで広げてよいと考える。一方、20% (w.b.) を越える水分に関しては、温度の適用範囲を 20 $^{\circ}$ C 以上とする必要があり、これより低い温度領域に関する温度依存性については、別途、考察を要する。

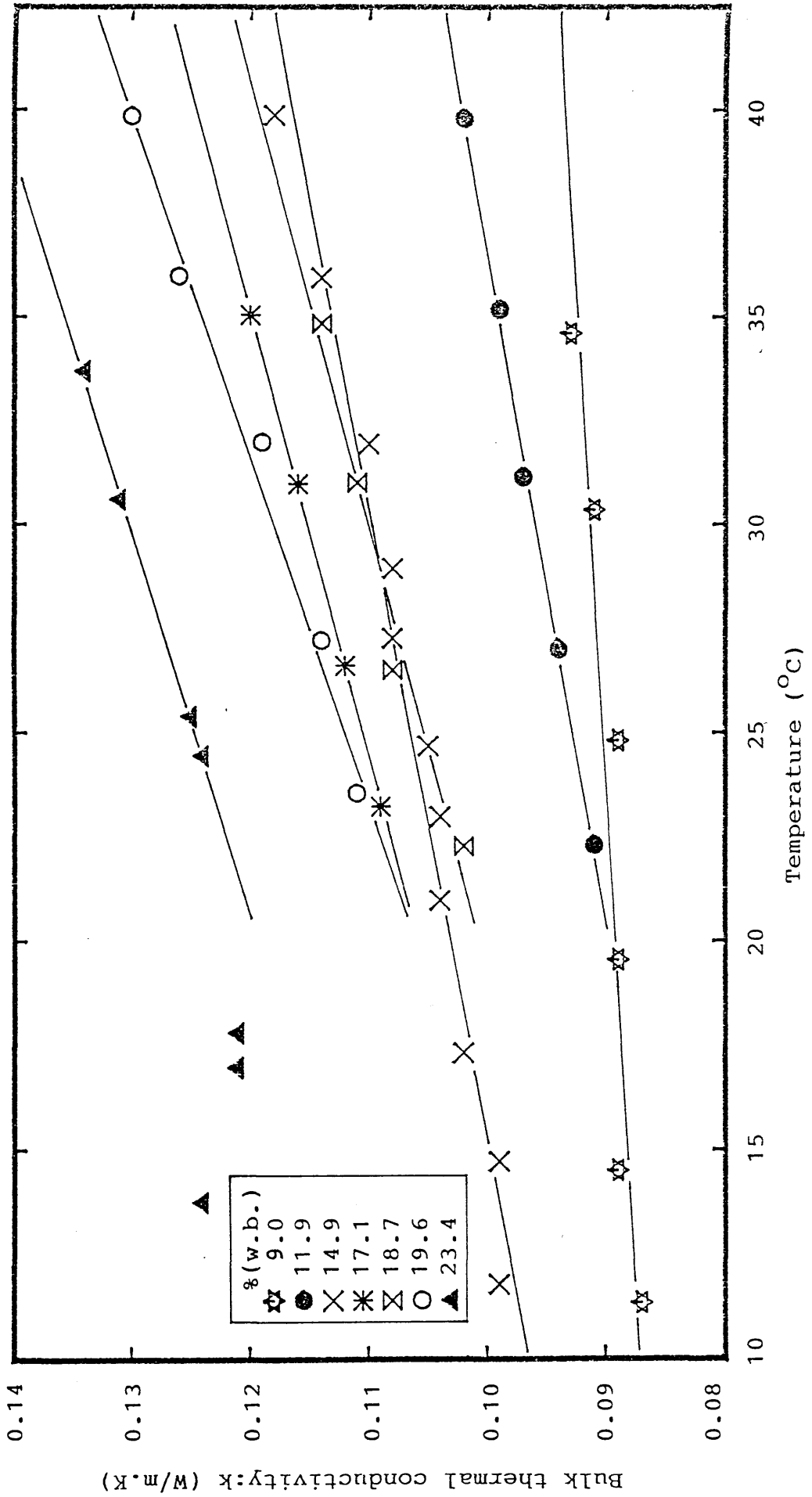


Fig.4-26 Bulk thermal conductivity of rough rice (Variety=KOSHIHIKARI)

Fig. 4-26において、 k と水分との関係を見ると、水分の増加とともに k も高い値を示す傾向が見てとれる。この傾向を同一温度条件下で調べるために、(4-6)式—(4-12)式の回帰式を用いて、温度を一定にしたときの各水分に対応する k を求め、これを、Fig. 4-27に示した。温度は、全水分にわたって前述の回帰式が適用可能な 20°C — 40°C の範囲内にとり、 5°C ごとに定めた。図中のプロット記号は、パラメータである各温度に対応して区別したものである。いずれの温度においても、 k と M は直線で回帰するのが適当であったので、回帰直線ならびに回帰式もあわせて、図中に示した。この回帰式を、以下に列挙する。

$$\theta = 20, \quad k = 0.0695 + 1.978 \times 10^{-3} M, \quad r = 0.934 \quad (4-13)$$

$$\theta = 25, \quad k = 0.0681 + 2.311 \times 10^{-3} M, \quad r = 0.951 \quad (4-14)$$

$$\theta = 30, \quad k = 0.0673 + 2.605 \times 10^{-3} M, \quad r = 0.966 \quad (4-15)$$

$$\theta = 35, \quad k = 0.0657 + 2.958 \times 10^{-3} M, \quad r = 0.975 \quad (4-16)$$

$$\theta = 40, \quad k = 0.0647 + 3.248 \times 10^{-3} M, \quad r = 0.978 \quad (4-17)$$

上記の各式は、実測値 k （間接測定）を温度に関して平滑化したデータを基にして、更に、水分に関して平滑化したものと考えられる。これを、

$$k = p(\theta) + q(\theta) M \quad (4-18)$$

なる式で代表させると、切片 p は温度に対して負の依存性を持ち、傾き q は正の依存性を持つことがわかる。そこで、 p および q を θ を横軸にとってプロットすると、いずれも、ほぼ直線上に並ぶので、これらを直線で回帰し、

p については

$$p = 0.0743 - 2.400 \times 10^{-4} \theta, \quad r = 0.996 \quad (4-19)$$

q については

$$q = 7.078 \times 10^{-4} + 6.374 \times 10^{-5} \theta, \quad r = 0.999 \quad (4-20)$$

を得た。

これにより、 k を θ および M の関数として1つの式で定量的に表現することができる。すなわち、(4-19)式および(4-20)式を(4-18)式に代入して、

$$k = 0.0743 - 2.400 \times 10^{-4} \theta + 7.078 \times 10^{-4} M + 6.374 \times 10^{-5} \theta M \quad (4-21)$$

を得た。なお、(4-21)式の適用範囲は

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 35^{\circ}\text{C}, \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-22)$$

であるが、水分を $20\%(\text{w.b.})$ 以下にすれば、

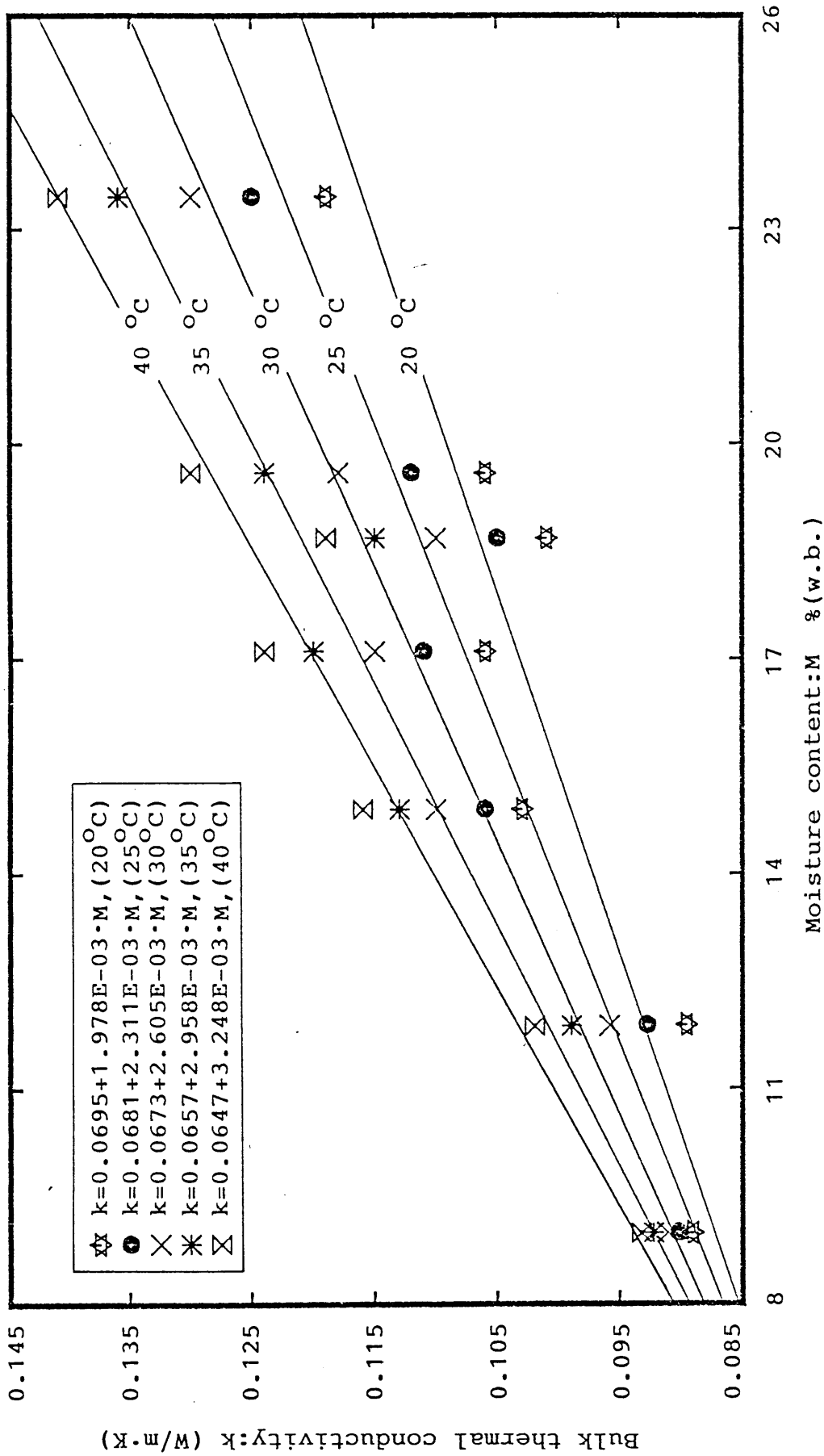


Fig.4-27 Bulk thermal conductivity of rough rice (Variety=KOSHIHIKARI)

$$15^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C}, \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 20\%(\text{w.b.}) \quad (4-23)$$

としてよいものとする。(4-23)式は、通常の穀物貯蔵時の温度範囲ならびに水分範囲をカバーするものである。

ここで得られたkの算定式、すなわち、(4-21)式が実測値をどの程度まで表現できているかを見るために、(4-21)式に実測値と同じ水分を与えたときに得られる直線を実測値とともにFig. 4-28に示した。この図によれば、水分17%(w.b.)付近でバラツキが見られるが、全体としては実測値を良く表現しているものと判断される。

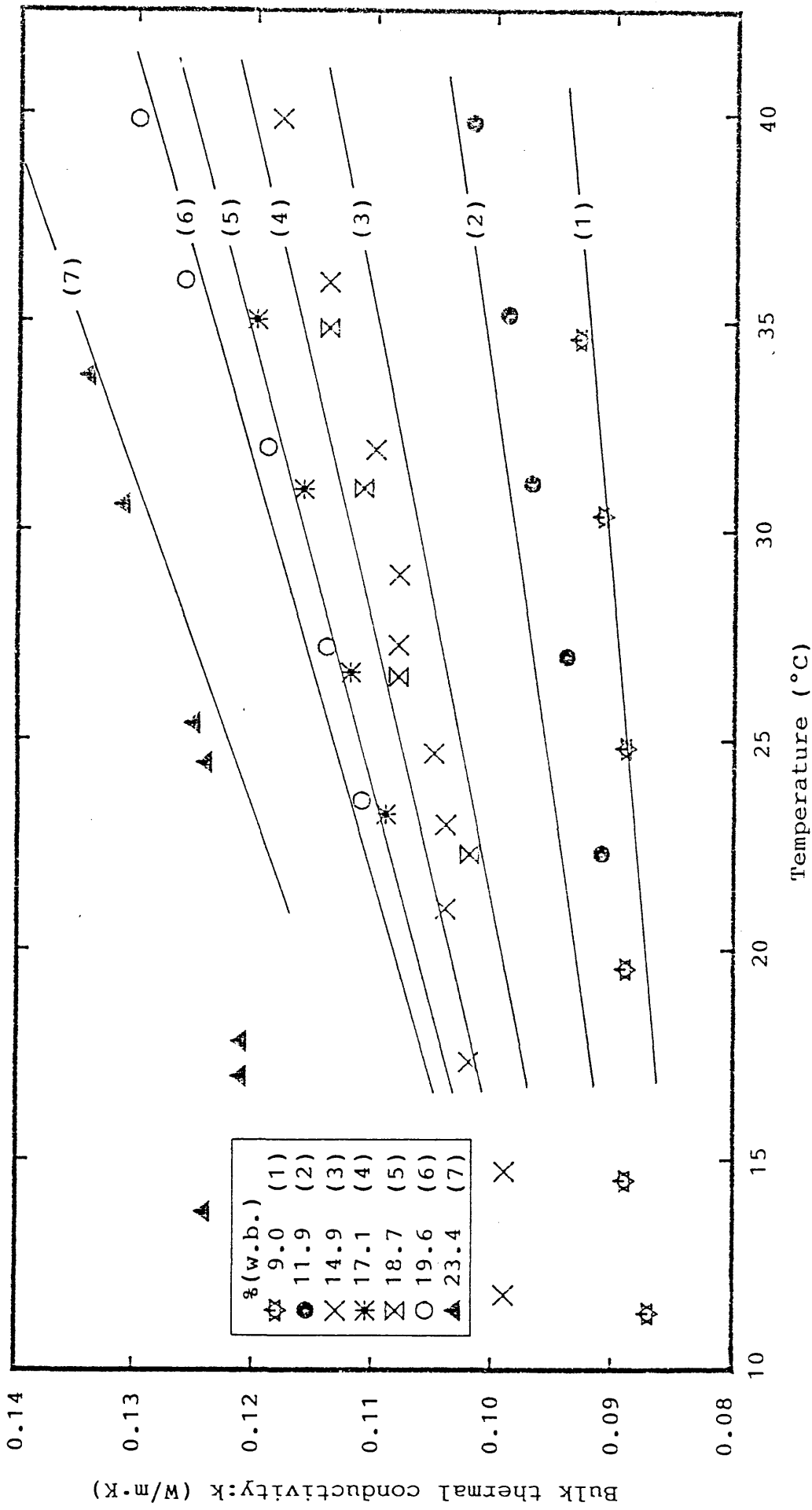


Fig.4-28 Measured values of bulk thermal conductivity and the lines expressing the eq.(4-21)
(Variety=KOSHIIKARI)

(b) 粉(大空)の温度伝導率および熱伝導率

品種間の熱特性の相違を調べるために、粉(大空)を用いて、(a)と同様の実験を行なった。試料温度のサンプリング間隔等の条件は、すべてTable 4-20に示したとうりとした。また、試料の水分および温度の範囲も(a)の場合に準じて定めた。これらの諸条件を、実験番号を付してTable 4-23に示した。

Table 4-23 Conditions of samples

Experimental number	M.C. % (w.b.)		Thickness (mm)	Bulk density (Kg/m ³)
	before used	after used		
B-1	8.3	8.6	5.67	550
B-2	13.2	12.9	6.34	—
B-3	17.3	16.7	6.64	536
B-4	18.7	18.6	6.64	552
B-5	20.0	19.1	6.98	562
B-6	23.4	22.9	6.67	609

実験(B-1)における粉層の厚みは、予備実験(b)で求めた粉層の厚みを規定する(4-4)式から多少外れているが、わずかな違いであり、品種も予備実験で用いたものとは異なるので、そのまま実験に供した。(B-1) - (B-6)の実験より得られた α とこれを用いて(4-5)式より算定した k を、試料の平均温度とともにTable 4-24に示した。 k の算定に必要な c 値は、次章で求めた回帰式

$$c = 1.175 + 0.04387M$$

を用いて与えた。

Table 4-24の α について、水分をパラメータとしたときの、 α の温度依存性を示したのがFig. 4-29である。この図をみると、各水分における α の温度依存性は、定性的にはコシヒカリと同様の傾向を呈している。すなわち、高水分($M = 23.4\%$ (w.b.))の試料をみると、20℃以上の温度領域では、 α がほぼ直

Table 4-24 α and k of rough rice (OZORA)

Experiment (B-1) M.C.=8.3	θ	17.5	22.4	26.4	31.0	35.3	38.8
	α	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87	0.88
	k	0.073	0.073	0.073	0.073	0.074	0.075
Experiment (B-2) M.C.=13.2	θ	21.2	24.8	29.9	33.3	37.4	
	α	0.85	0.87	0.89	0.90	0.94	
	k	—	—	—	—	—	
Experiment (B-3) M.C.=17.3	θ	22.9	24.3	28.6	32.9	35.8	39.8
	α	0.90	0.91	0.95	1.01	1.03	1.08
	k	0.094	0.094	0.099	0.105	0.107	0.112
Experiment (B-4) M.C.=18.7	θ	21.3	26.3	30.2	34.3	38.1	
	α	0.82	0.92	0.93	1.01	1.04	
	k	0.091	0.102	0.103	0.112	0.115	
Experiment (B-5) M.C.=20.0	θ	19.6	25.0	29.4	34.2	38.6	
	α	0.84	0.88	0.92	0.98	1.04	
	k	0.097	0.102	0.106	0.113	0.120	
Experiment (B-6) M.C.=23.4	θ	10.7	12.6	14.3	16.3	20.5	25.3
	α	0.83	0.80	0.80	0.82	0.83	0.86
	k	0.112	0.108	0.108	0.110	0.112	0.116
	θ	29.3	33.8				
	α	0.89	0.95				
	k	0.120	0.128				

(Note) $\dot{\theta}$; ($^{\circ}\text{C}$), α ; $\times 10^{-7}$ (m^2/s), k; ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

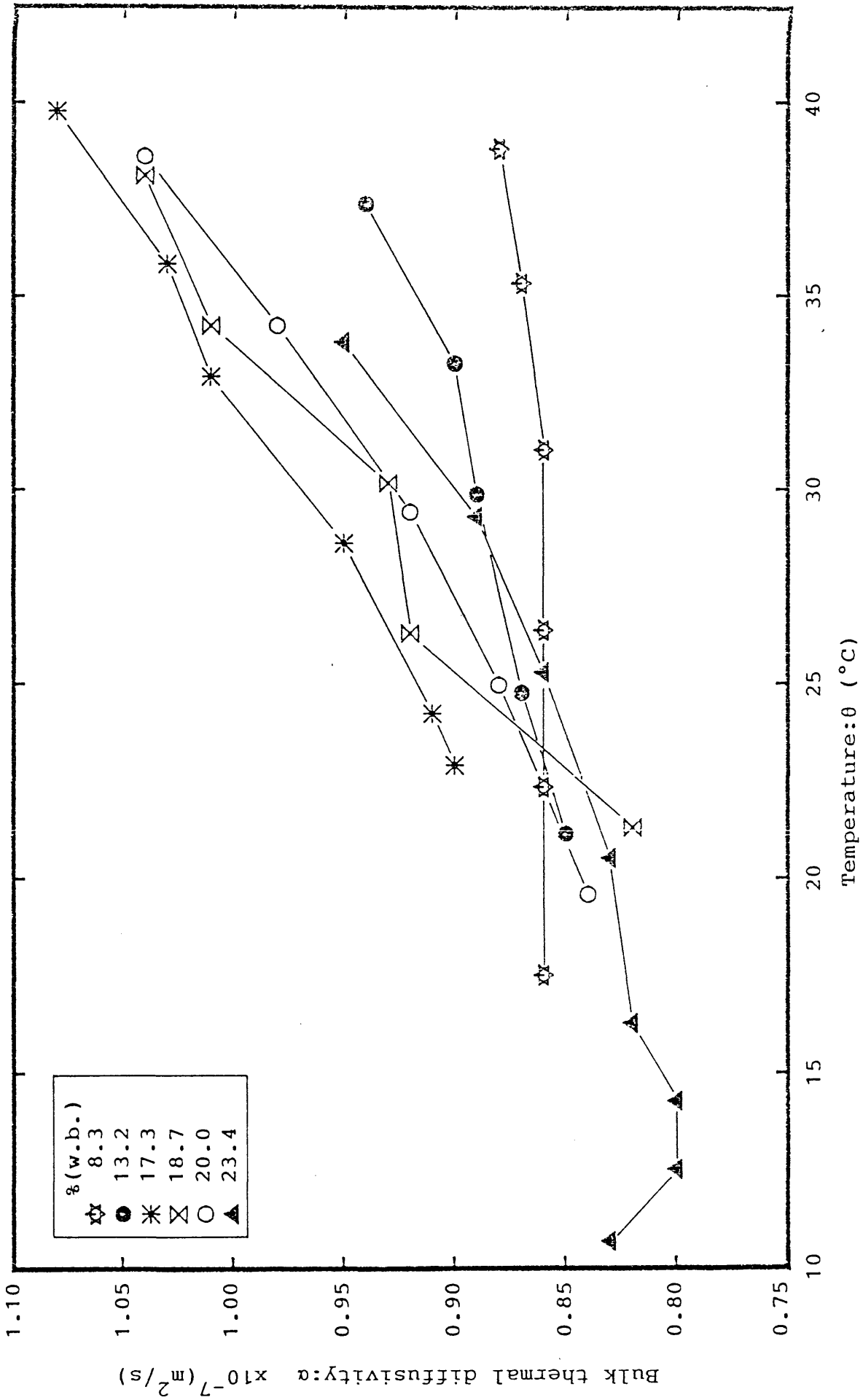


Fig.4-29 Bulk thermal diffusivity of rough rice (Variety=OZORA)

線上に並んでいるのに対して、これより低い温度では直線性がくずれ、約14℃で最小値を示している。水分が20%(w.b.)以下であると、同じ温度領域で α と θ は直線関係にあり、15℃付近まではこの関係が維持されると判断してよい。また、 α の水分依存性については、定性的な判断も難しいものと思われた。

このように、 α についてコシヒカリと類似した結果を得たので、 α を基に算定した k についてもコシヒカリと同様に処理した。まず、Table 4-24から k を抽出し、水分をパラメータとしたときの温度依存性を示すグラフをFig. 4-30に示した。そのけっか、各水分において k と θ には直線関係が認められたので回帰式を求め、回帰直線も図中に示した。ただし、 $M=23.4$ %(w.b.)の測定値については、直線関係が認められる20℃以上の温度領域にあるプロット4点を用いて回帰したものである。求めた回帰式を、以下に示す。

$$M=8.3, \quad k=0.0711 + 8.462 \times 10^{-5}\theta, \quad r=0.811 \quad (4-24)$$

$$M=17.3, \quad k=0.0679 + 1.104 \times 10^{-3}\theta, \quad r=0.966 \quad (4-25)$$

$$M=18.7, \quad k=0.0624 + 1.405 \times 10^{-3}\theta, \quad r=0.979 \quad (4-26)$$

$$M=20.0, \quad k=0.0723 + 1.201 \times 10^{-3}\theta, \quad r=0.991 \quad (4-27)$$

$$M=23.4, \quad k=0.0867 + 1.186 \times 10^{-3}\theta, \quad r=0.982 \quad (4-28)$$

各回帰式の適用範囲は、(4-24)式—(4-27)式は15℃—40℃であり、(4-28)式は20℃—35℃である。

再びFig. 4-30において、 θ を一定として k と M の関係をみると、 M の増加とともに k も増大している。そこで、(4-24)式—(4-28)式より θ を一定としたときの各実測値 M に対応する k を求め、 M を横軸にとってFig. 4-31に示した。温度は、前掲の θ に関する回帰式の適用範囲のうち全水分に共通な20℃—40℃とし、(4-28)式を用いたもののみ20℃—35℃とした。また、Fig. 4-31に示した各プロットを直線回帰し、回帰直線も図中に示した。求めた回帰式を、以下に示す。

$$\theta=20, \quad k=0.0516 + 2.293 \times 10^{-3}M, \quad r=0.967 \quad (4-29)$$

$$\theta=25, \quad k=0.0493 + 2.704 \times 10^{-3}M, \quad r=0.988 \quad (4-30)$$

$$\theta=30, \quad k=0.0469 + 3.126 \times 10^{-3}M, \quad r=0.997 \quad (4-31)$$

$$\theta=35, \quad k=0.0449 + 3.534 \times 10^{-3}M, \quad r=0.999 \quad (4-32)$$

$$\theta=40, \quad k=0.0412 + 4.041 \times 10^{-3}M, \quad r=0.997 \quad (4-33)$$

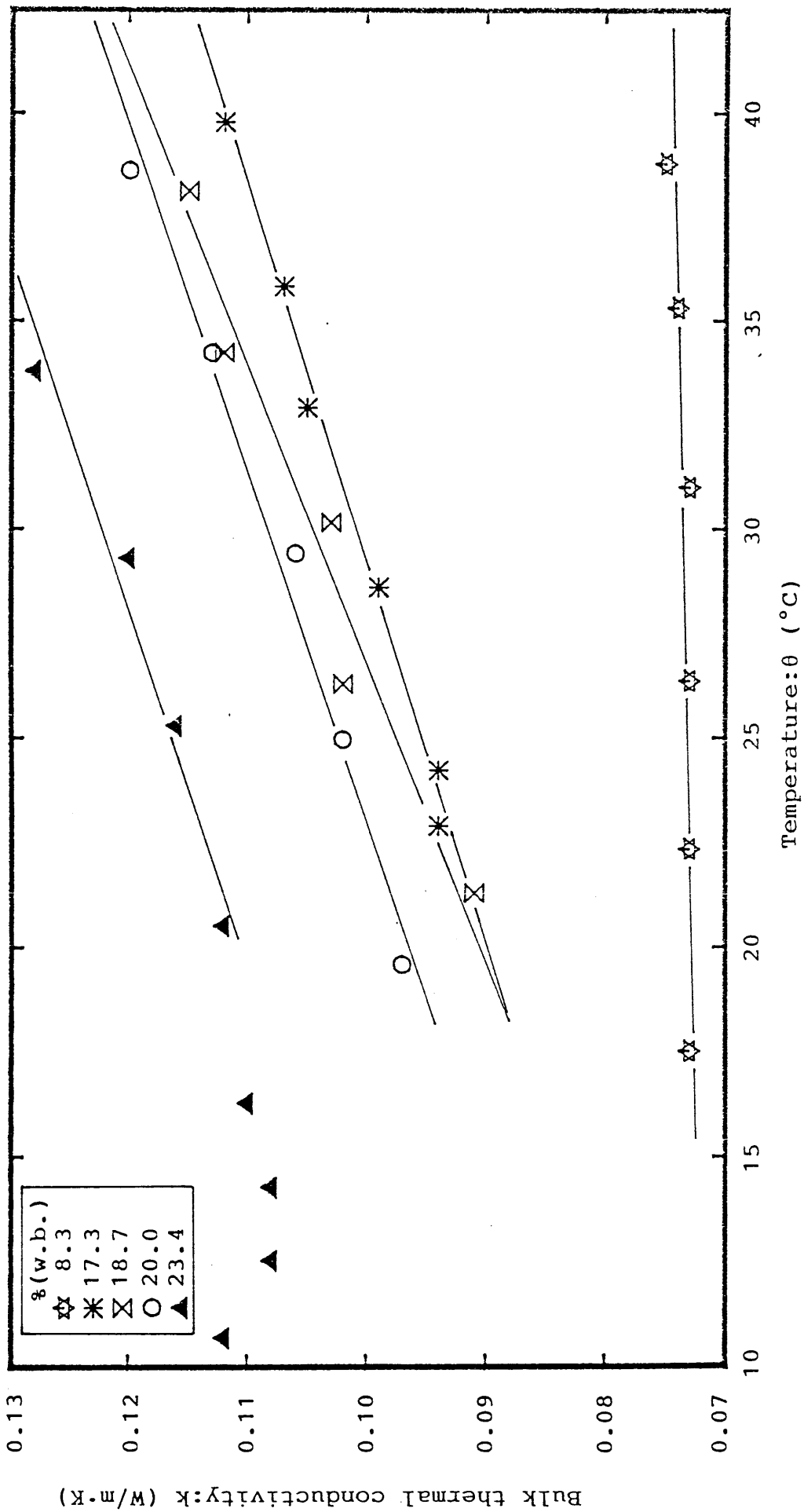


Fig.4-30 Bulk thermal conductivity of rough rice (Variety=OZORA)

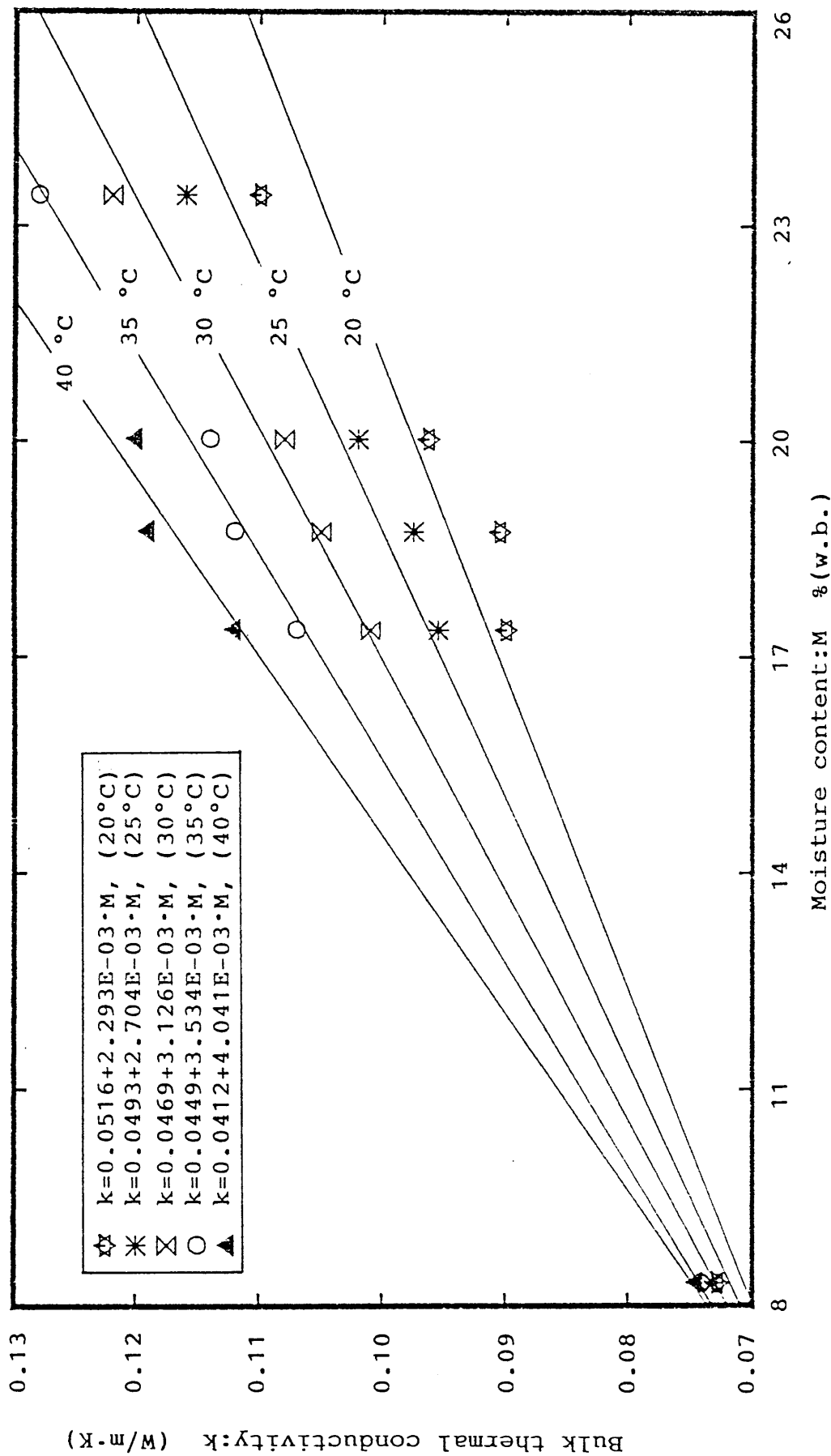


Fig.4-31 Bulk thermal conductivity of rough rice (Variety=OZORA)

以上の式を前出の(4-18)式で代表させると、切片 p は温度に対して負の依存性を示し、傾き q は正の依存性を示す。これらを回帰して、

$$p = 0.0619 - 5.031 \times 10^{-4} \theta, \quad r = 0.994 \quad (4-34)$$

$$q = 5.446 \times 10^{-4} + 8.650 \times 10^{-5} \theta, \quad r = 0.999 \quad (4-35)$$

を得た。

(4-34)式および(4-35)式を(4-18)式に代入すると、実用範囲における k の算定式として、

$$k = 0.0619 - 5.031 \times 10^{-4} \theta + 5.446 \times 10^{-4} M + 8.650 \times 10^{-5} \theta M \quad (4-36)$$

が得られる。

この式の適用範囲は、

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 35^\circ\text{C}, \quad 8\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-37)$$

あるいは、

$$15^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}, \quad 8\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 20\%(\text{w.b.}) \quad (4-38)$$

である。

(4-36)式で表わされた k の算定式と実測値とがどのように対応しているかを知るために、両者を Fig. 4-32 に示した。図中のプロット記号は各水分における実測値を示したもので、実線は各水分に対応する(4-36)式の値を示している。これをみると、コシヒカリの場合と同様に、 k の算定式は実測値を良く表現していると言える。

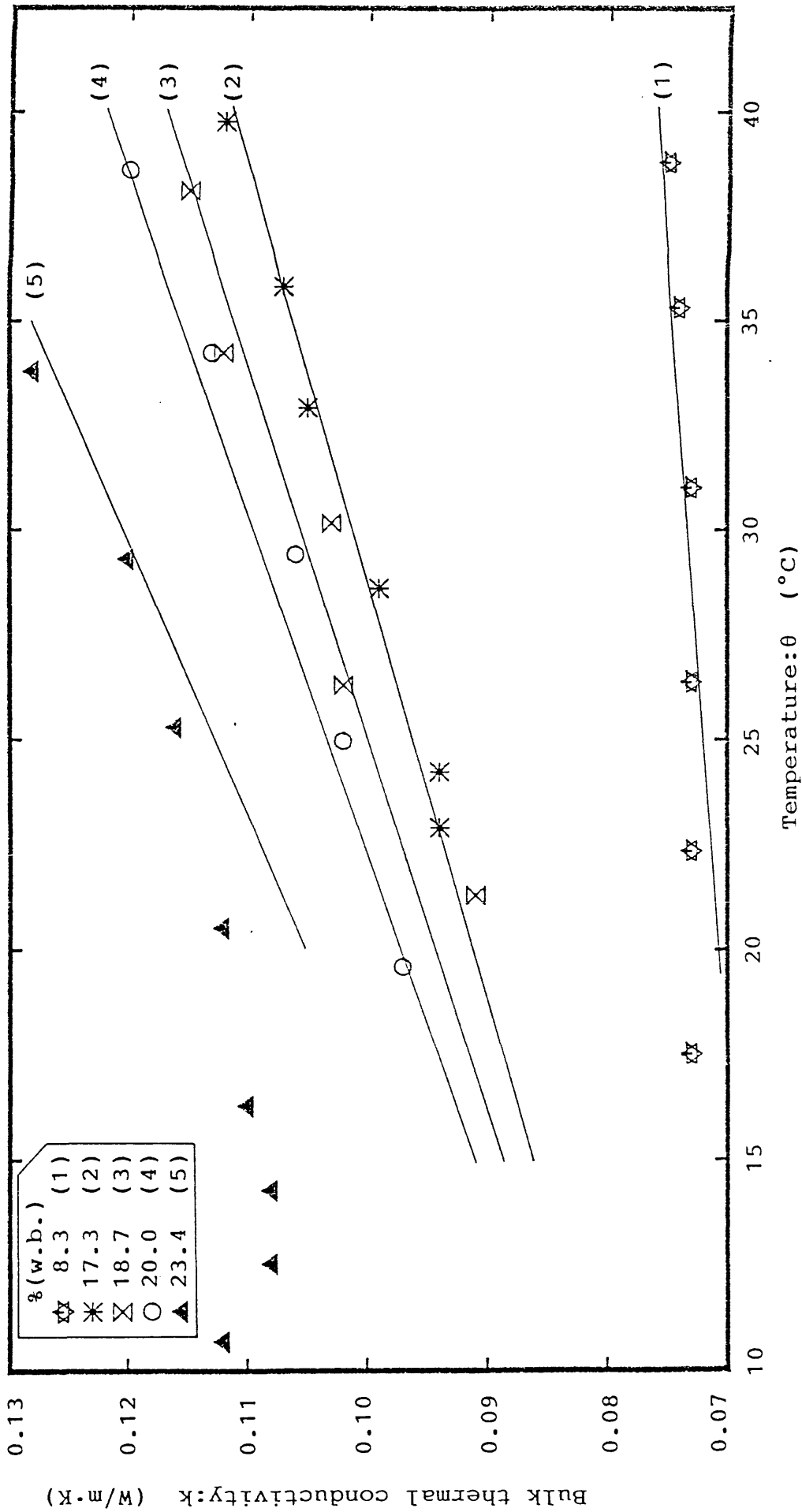


Fig.4-32 Measured values of bulk thermal conductivity and the lines expressing the eq.(4-45) (Variety=OZORA)

(c) 玄米(コシヒカリ)の温度伝導率および熱伝導率

実験を行なう上での加熱周期や温度のサンプリング間隔等の条件は、Table 4-20に示した設定値をそのまま適用した。試料の平均温度ならびに水分は、粉の実験に準じて、それぞれ、 $10^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C}$ 、 $9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 25\%(\text{w.b.})$ を目安とした。なお、現行の機械化作業体系においては、コンバインで収穫した粉を乾燥して15%(w.b.)程度の水分に落とした後に脱ぶする方式がとられているので、20%(w.b.)以上の玄米は、通常は取り扱われることはないものと思われる。しかし、機械化作業体系の更なる簡素化を目指して、高水分粉の脱ぶ処理に関する研究も進められていることを考えれば、実用的なデータとしても、潜在的な要求が存在することは明らかである。また、これに加えて、水分依存性に関する物理的な理解を深める意味でも、高水分の玄米の熱特性を知っておくことは必要であるとの認識から、上述の水分範囲を設定した。

実験に供した試料の諸条件を、実験番号を付してTable 4-25に示した。

Table 4-25 Conditions of samples

Experimental number	M.C. % (w.b.)		Thickness (mm)	Bulk density (Kg/m^3)
	before used	after used		
C-1	10.1	10.3	5.41	844
C-2	13.6	—	5.23	837
C-3	15.2	14.9	5.20	814
C-4	16.6	16.5	5.42	815
C-5	18.8	18.2	5.21	804
C-6	19.6	19.9	5.66	816
C-7	20.7	—	5.70	770
C-8	23.2	23.1	5.84	787

Table 4-25の各実験番号に対応する測定結果をTable 4-26に示した。(4-5)式による k の算定に必要な c 値は、次章で述べる回帰式

$$c = 1.323 + 0.03345M$$

を用いて与えた。

Table 4-26より α と θ の関係を抽出してプロットしたのが、Fig. 4-33である。この図において α の温度依存性をみると、20℃以上の温度領域においては、いずれの水分についても α と θ は直線関係にあると言えよう。しかし、高水分の場合、例えば $M=19.6$ % (w.b.) および $M=23.2$ % (w.b.) では、10℃-20℃における温度依存性と、ほぼ直線関係にある20℃-40℃における温度依存性とは異なる性格を示している。また、 α と水分との関係については、粉の場合と同様に、この図から定性的な判断を下すことは困難である。

次に、Table 4-26より、 k と θ の関係を抽出してFig. 4-34にプロットした。 α と同様に温度領域に制限はあるものの、いずれの水分に関しても20℃以上の温度領域においては k と θ が直線関係にあるので、この温度範囲で直線回帰式を求め、Fig. 4-34にも、これを実線で示した。ただし、図中の $M=19.6$ % (w.b.) および $M=23.2$ % (w.b.) については、10℃-20℃における測定値を省いて回帰式を求めたものである。これ以外の水分については、図に示した全測定値を用いた。以下に、その回帰式を示す。

$$M=10.1, \quad k=0.1093 - 5.178 \times 10^{-5}\theta, \quad r=0.627 \quad (4-39)$$

$$M=13.6, \quad k=0.1014 + 2.638 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.962 \quad (4-40)$$

$$M=15.2, \quad k=0.1059 + 2.588 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.926 \quad (4-41)$$

$$M=16.6, \quad k=0.1046 + 4.633 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.966 \quad (4-42)$$

$$M=18.8, \quad k=0.1068 + 3.072 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.858 \quad (4-43)$$

$$M=19.6, \quad k=0.1118 + 5.947 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.975 \quad (4-44)$$

$$M=20.7, \quad k=0.1103 + 9.445 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.987 \quad (4-45)$$

$$M=23.2, \quad k=0.1105 + 1.048 \times 10^{-3}\theta, \quad r=0.981 \quad (4-46)$$

(4-39)式では、相関係数が0.627と低い値を示したが、これは、Fig. 4-34で見ると測定値のバラツキが大きくて直線回帰に無理があることを示すものではなく、全温度範囲にわたって α が一定である(直線上にある)ため、この水分においては、 α の温度依存性が低いことを意味した数値であると理解される。その他

Table 4-26 α and k of hulled rice (KOSHIHIKARI)

Experiment (C-1) M.C.=10.1	θ	11.5	14.9	19.0	24.1	29.6	35.6	
	α	0.78	0.77	0.78	0.77	0.76	0.77	
	k	0.109	0.108	0.109	0.108	0.107	0.108	
Experiment (C-2) M.C.=13.6	θ	22.4	27.1	31.4	35.3	39.3		
	α	0.72	0.73	0.74	0.74	0.75		
	k	0.107	0.109	0.110	0.110	0.112		
Experiment (C-3) M.C.=15.2	θ	22.3	27.1	31.4	35.6	39.3		
	α	0.75	0.76	0.76	0.78	0.78		
	k	0.112	0.113	0.113	0.116	0.116		
Experiment (C-4) M.C.=16.6	θ	22.5	26.3	30.8	34.8	38.8		
	α	0.76	0.76	0.77	0.79	0.80		
	k	0.116	0.116	0.118	0.121	0.123		
Experiment (C-5) M.C.=18.8	θ	24.4	27.9	31.1	33.2	36.3		
	α	0.73	0.73	0.74	0.74	0.76		
	k	0.115	0.115	0.116	0.116	0.119		
Experiment (C-6) M.C.=19.6	θ	11.6	14.1	17.0	20.9	25.1	29.8	34.5
	α	0.77	0.77	0.77	0.77	0.78	0.80	0.82
	k	0.125	0.125	0.125	0.125	0.126	0.129	0.133
Experiment (C-7) M.C.=20.7	θ	25.3	29.3	34.1	38.0	42.0		
	α	0.87	0.89	0.91	0.94	0.97		
	k	0.135	0.138	0.141	0.146	0.151		
Experiment (C-8) M.C.=23.2	θ	11.4	12.7	15.2	17.6	19.2	22.6	28.0
	α	0.83	0.80	0.80	0.82	0.82	0.82	0.84
	k	0.137	0.132	0.132	0.135	0.135	0.135	0.139
	θ	33.2	36.4					
	α	0.87	0.91					
	k	0.144	0.150					

(Note) θ ; ($^{\circ}\text{C}$), α ; $\times 10^{-7} (\text{m}^2/\text{s})$, k; ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

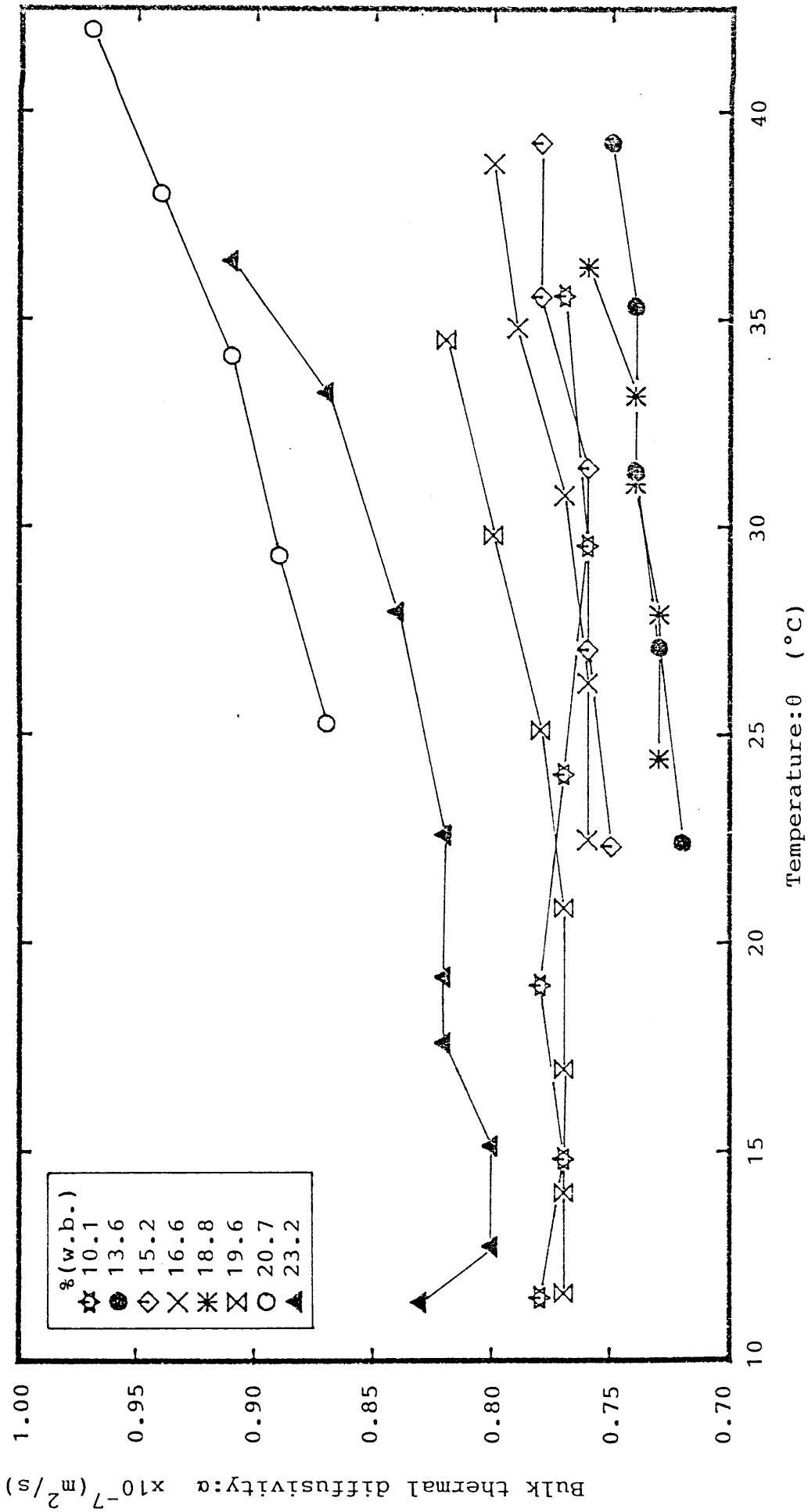


Fig.4-33 Bulk thermal diffusivity of hulled rice (Variety=KOSHIHIKARI)

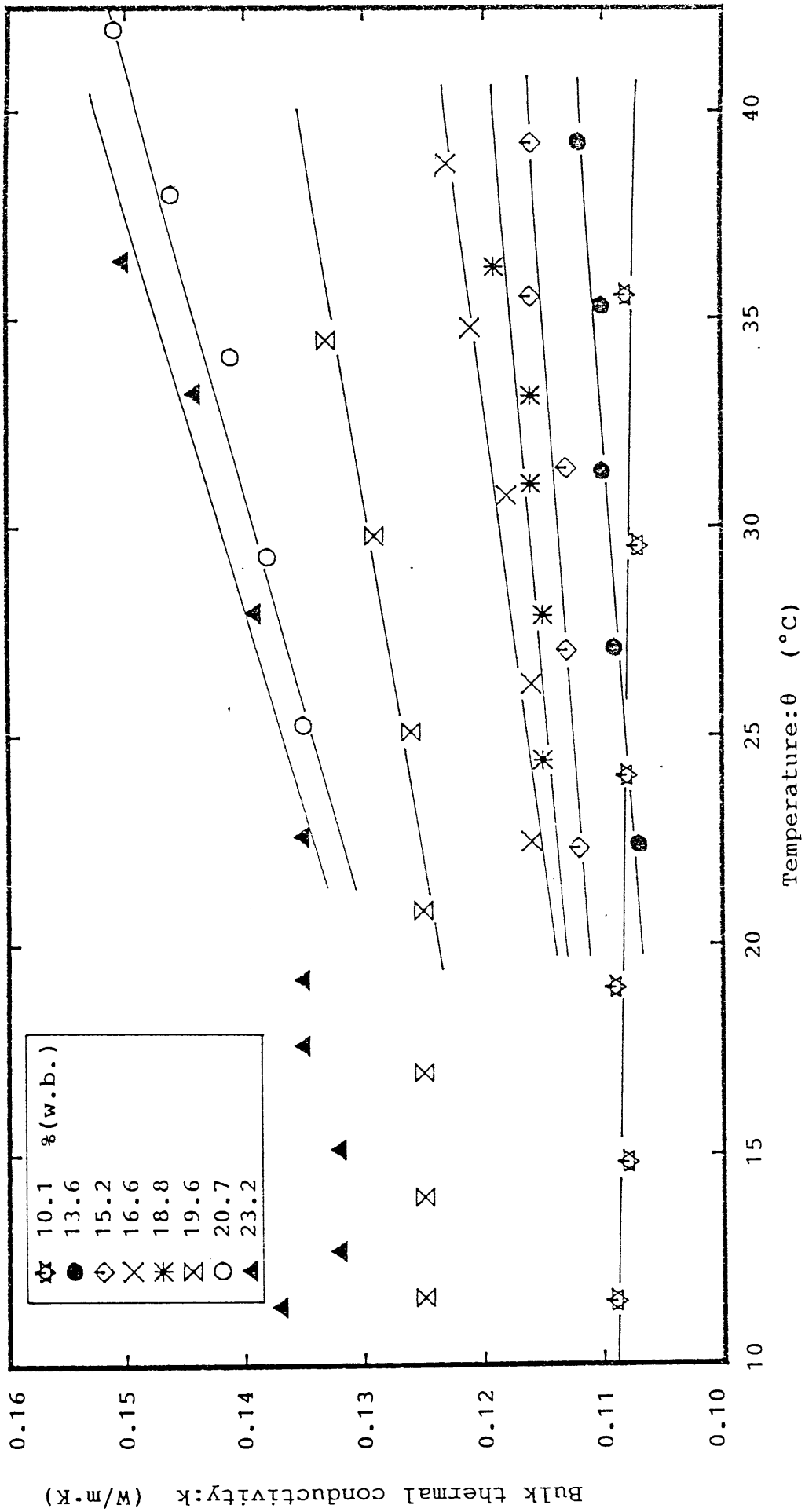


Fig.4-34 Bulk thermal conductivity of hulled rice (Variety=KOSHIHIKARI)

の回帰式は、いずれも高い相関係数を有しており、 k と θ が直線関係にあることを裏付けている。なお、各回帰式の適用範囲は、図から判断して、水分に関して2つのグループ、すなわち、10%(w.b.) - 19%(w.b.)と19%(w.b.) - 24%(w.b.)に大別される。前者の水分範囲にある(4-39)式 - (4-43)式については $15^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C}$ 、後者の水分範囲に含まれる(4-44)式 - (4-46)式については $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C}$ とした。

Fig. 4-34において、温度を固定して k と M の関係をみると、 M の増加とともに k も増大する傾向を呈している。そこで、 k の水分依存性をみるために、先の回帰式を用いてそのすべてに共通な適用範囲(温度)、すなわち、 $20^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ において 5°C 刻みに各水分に対応する k を求め、その結果をFig. 4-35に示した。 k と M の関係を定量的に表わすには、相関係数の上から M の2次式で回帰するのが最も適当であったので、これを求め、回帰曲線も同図中に示した。以下に、求めた回帰式を列挙する。

$$\theta = 20, \quad k = 0.1276 - 3.749 \times 10^{-3} M + 1.731 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.940 \quad (4-47)$$

$$\theta = 25, \quad k = 0.1272 - 3.874 \times 10^{-3} M + 1.889 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.944 \quad (4-48)$$

$$\theta = 30, \quad k = 0.1270 - 4.033 \times 10^{-3} M + 2.057 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.945 \quad (4-49)$$

$$\theta = 35, \quad k = 0.1273 - 4.243 \times 10^{-3} M + 2.242 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.946 \quad (4-50)$$

$$\theta = 40, \quad k = 0.1270 - 4.382 \times 10^{-3} M + 2.404 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.945 \quad (4-51)$$

ただし、 r は重相関係数である。

これらの回帰式を

$$k = b_0 + b_1 M + b_2 M^2 \quad (4-52)$$

なる式で代表させると、各項の係数 b_0 、 b_1 、 b_2 は、いずれも温度依存性を持っていることがわかる。そこで、これらの係数を θ の関数として求め、

$$b_0 = 0.1279 - 2.283 \times 10^{-5} \theta, \quad r = 0.724 \quad (4-53)$$

$$b_1 = -3.075 \times 10^{-3} - 3.272 \times 10^{-5} \theta, \quad r = 0.997 \quad (4-54)$$

$$b_2 = 1.045 \times 10^{-4} + 3.398 \times 10^{-6} \theta, \quad r = 0.999 \quad (4-55)$$

を得た。

b_0 の回帰式は相関係数が小さく、温度依存性があまりないことを示している。しかし、(4-47)式 - (4-51)式における第2項および第3項をみると、これは、 b_0 に対して2ケタ目で効いてくる大きさを持っており、しかも、その係数 b_1

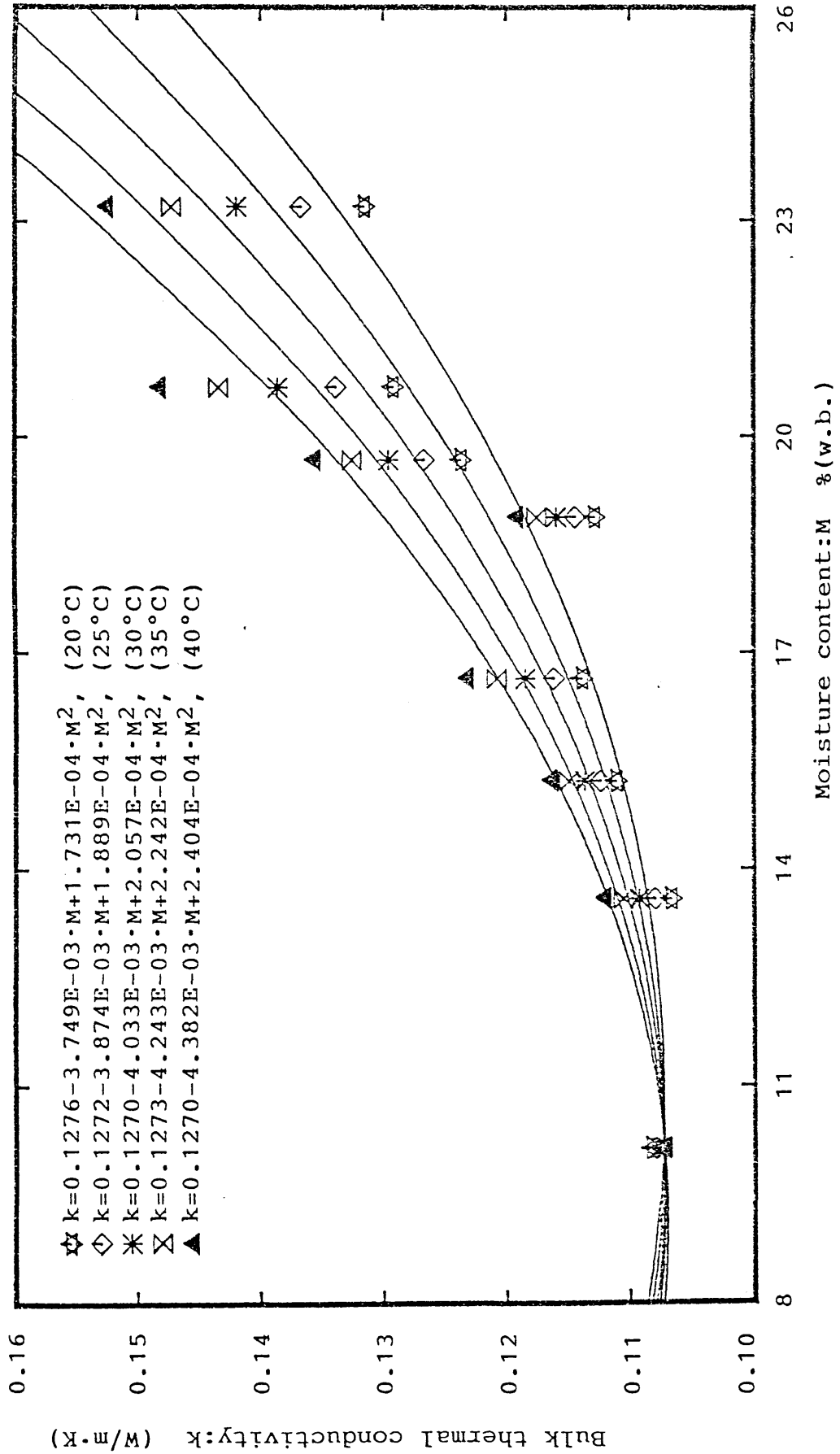


Fig.4-35 Bulk thermal conductivity of hulled rice (Variety=KOSHIHIKARI)

および b_2 は(4-54)式および(4-55)式からわかるように θ と良い相関を示しているので、全体として k は高い温度依存性を有している。

以上の(4-53)式、(4-54)式および(4-55)式を(4-52)式に代入することにより、 k の算定式

$$k=0.1279-2.283 \times 10^{-5} \theta -3.075 \times 10^{-3} M-3.272 \times 10^{-5} \theta M \\ + 1.045 \times 10^{-4} M^2 +3.398 \times 10^{-6} \theta M^2 \quad (4-56)$$

を得た。

この算定式と実測値との関係を見るために、 k の実測値をプロット記号を用いて、その水分に対応して(4-56)式から求められる直線を実線によって、それぞれ、Fig. 4-36に示した。図中、(5)-(7)で示した算定直線とこれの実測値の間には隔たりがみられるが、これを除く水分に関して両者には良い一致が認められるので、(5)-(7)の算定直線にみられる不一致は測定値のバラツキを補正した結果であると考えられる。

(4-56)式の適用範囲は、これを導く基の式、(4-47)式-(4-51)式に制限されて、

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}, \quad 10\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-57)$$

であるが、水分の範囲を下げれば、

$$15^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}, \quad 10\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 17\%(\text{w.b.}) \quad (4-58)$$

まで拡張しても良いと考える。なお、高水分の玄米の $10^\circ\text{C} \leq \theta \leq 20^\circ\text{C}$ における水分依存性については、粉と同様に別途、考察を要する。

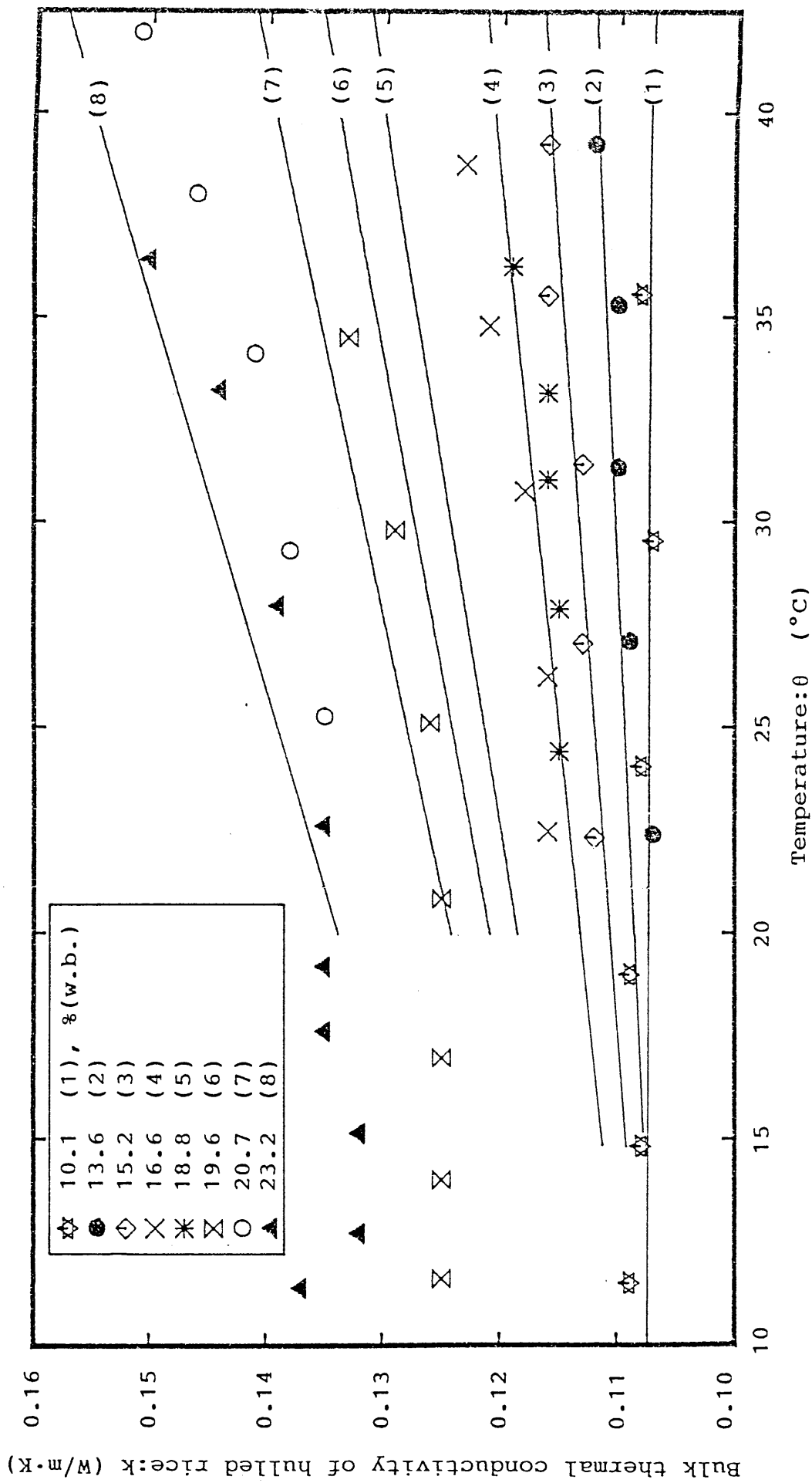


Fig. 4-36 Measured values of bulk thermal conductivity and the curves expressing the eq. (4-65) (Variety=KOSHIHIKARI)

(d) 玄米(大空)の温度伝導率および熱伝導率

玄米についても、粉と同様に品種間の熱特性の相違を調べるために、玄米(大空)を試料として、(c)と同様の実験を行なった。試料温度のサンプリング間隔等の条件は、(c)と同じくTable 4-20の設定値を準用し、試料の水分および温度の範囲も(c)に準じて定めた。これらの試料の諸条件を、実験番号を付してTable 4-27に示した。

Table 4-27 Condition of samples

EXperimental number	M.C. % (w.b.)		Thickness (mm)	Bulk density (Kg/m ³)
	before used	after used		
D-1	8.9	9.1	5.56	835
D-2	15.6	15.4	5.95	848
D-3	18.4	18.1	5.67	817
D-4	19.6	19.1	5.80	799
D-5	23.7	23.4	5.80	783

Table 4-28は、各実験番号に対応する測定結果を示したものである。表中のkは(4-5)式により求めたもので、この算出に必要なc値は、次章に示した回帰式、

$$c = 1.214 + 0.04312M$$

を用いた。

Table 4-28より α と θ を抽出して、各水分における α の温度依存性をみたのがFig. 4-37である。コシヒカリと同様に、20℃以上の温度領域において α と θ は、ほぼ直線関係にある。また、高水分の試料、すなわち、M=23.7%(w.b.)の水分を有する試料の測定値が、約14℃付近で最小値を呈していることも、コシヒカリと全く同じである。一方、 α の水分依存性についても、Fig. 4-37からは、定性的な特徴を導くことはできなかった。

Table 4-28 α and k of hulled rice (OZORA)

Experiment (D-1) M.C.=8.9	θ	20.2	24.7	29.0	33.7	37.5		
	α	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77		
	k	0.103	0.103	0.103	0.103	0.103		
Experiment (D-2) M.C.=15.6	θ	18.9	24.2	28.4	32.5	36.5		
	α	0.74	0.74	0.76	0.77	0.78		
	k	0.118	0.118	0.122	0.123	0.125		
Experiment (D-3) M.C.=18.4	θ	20.5	25.5	29.9	34.1	39.3		
	α	0.71	0.71	0.73	0.75	0.77		
	k	0.117	0.117	0.120	0.123	0.126		
Experiment (D-4) M.C.=19.6	θ	19.1	24.1	28.3	33.4	38.2		
	α	0.75	0.76	0.77	0.80	0.83		
	k	0.123	0.125	0.127	0.132	0.137		
Experiment (D-5) M.C.=23.7	θ	10.3	14.1	16.4	19.7	24.1	28.3	32.6
	α	0.80	0.79	0.80	0.81	0.84	0.86	0.87
	k	0.140	0.138	0.140	0.142	0.147	0.151	0.152

Fig. 4-38に、 k と θ の関係を示した。いずれの水分においても、20℃以上の温度領域において k と θ は非常に良い直線関係にあり、図から判断すると、この温度領域の下限を15℃としても差し支えないと考えられる。そこで、 k と θ を直線で回帰し、図中に回帰直線を実線で示した。求めた回帰式を以下に示す。

$$M=8.9, \quad k=0.1030 - 8.018 \times 10^{-9}\theta, \quad r=6.18 \times 10^{-8} \quad (4-59)$$

$$M=15.6, \quad k=0.1090 + 4.335 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.955 \quad (4-60)$$

$$M=18.4, \quad k=0.1052 + 5.164 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.966 \quad (4-61)$$

$$M=19.6, \quad k=0.1076 + 7.400 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.979 \quad (4-62)$$

$$M=23.7, \quad k=0.1271 + 7.969 \times 10^{-4}\theta, \quad r=0.966 \quad (4-63)$$

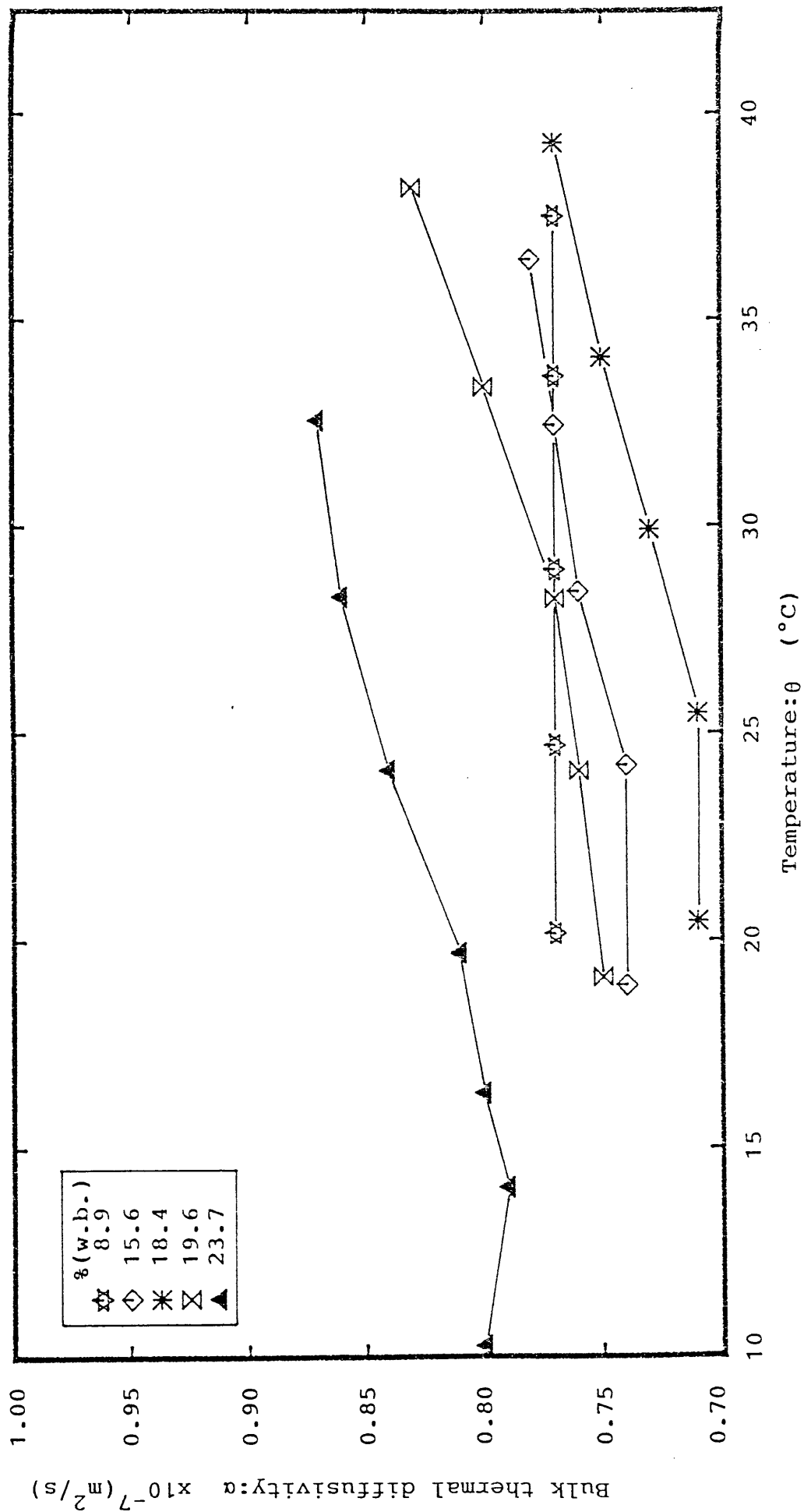


Fig.4-37 Bulk thermal diffusivity of hulled rice (Variety=OZORA)

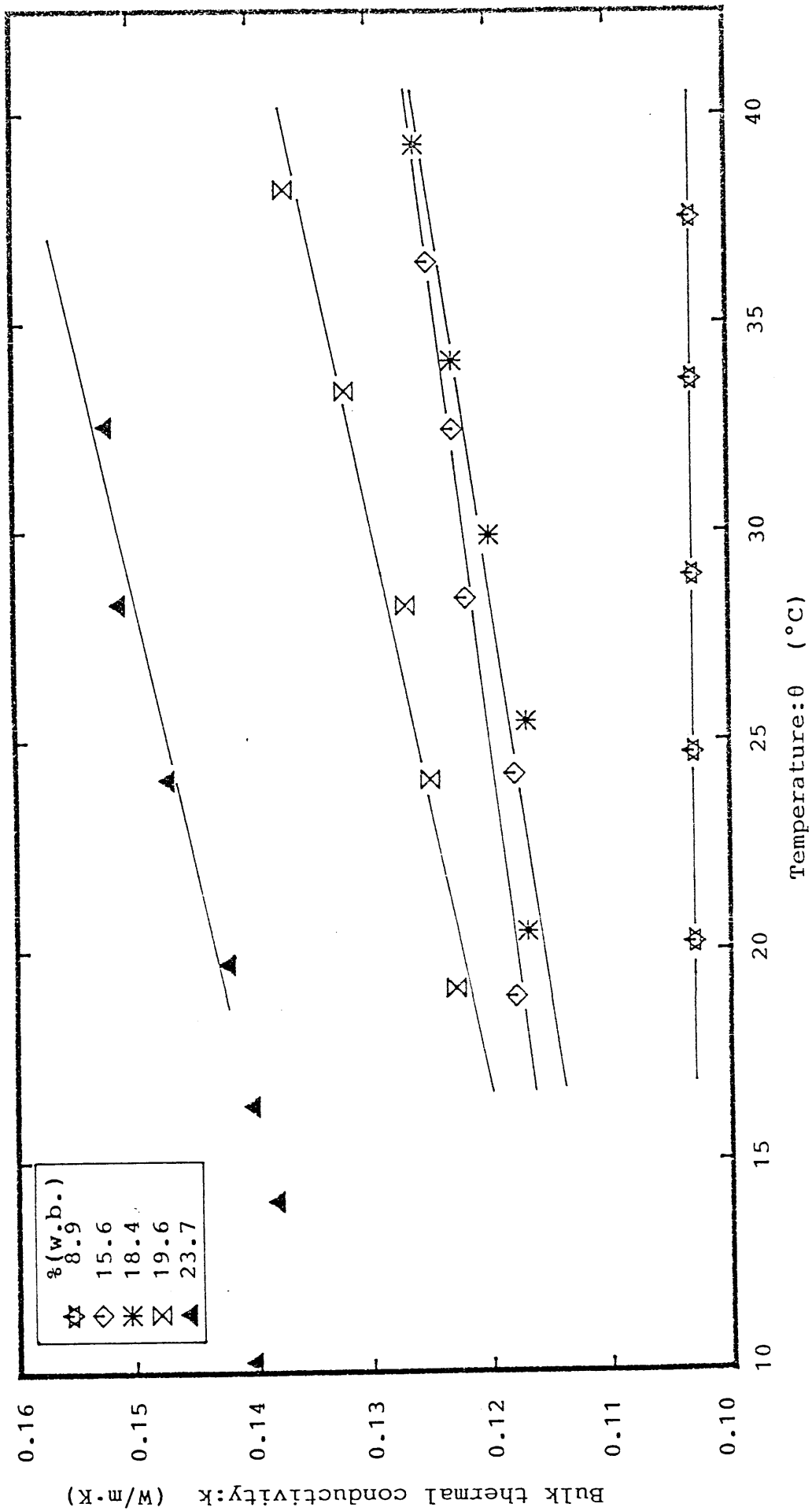


Fig.4-38 Bulk thermal conductivity of hulled rice (Variety=OZORA)

なお、(4-63)式は低温度領域の3点を除いて、実測値を回帰したものである。

(4-59)式で相関係数が小さい値であるのは、この水分においてkが温度に拘らず一定であることを表わしたもので、直線性に欠けるという意味ではない。各回帰式の適用範囲は、20℃-40℃である。

次に、kの水分依存性をみるために、(4-59)式-(4-63)式を用いて、20℃-40℃の範囲で θ を5℃刻みで与えた場合の各水分に対応するkを求め、これを、Fig. 4-39に示した。各温度におけるkとMの関係は、コシヒカリの場合と同様に、Mの2次式で表わすのが最も適当であったので、2次式で回帰し、図中には、実線で回帰曲線を示した。求めた回帰式を、以下に列挙する。

$$\theta = 20, \quad k = 0.1141 - 2.513 \times 10^{-3} M + 1.539 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.966 \quad (4-64)$$

$$\theta = 25, \quad k = 0.1110 - 2.144 \times 10^{-3} M + 1.512 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.970 \quad (4-65)$$

$$\theta = 30, \quad k = 0.1064 - 1.549 \times 10^{-3} M + 1.418 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.977 \quad (4-66)$$

$$\theta = 35, \quad k = 0.1033 - 1.180 \times 10^{-3} M + 1.391 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.977 \quad (4-67)$$

$$\theta = 40, \quad k = 0.0998 - 7.451 \times 10^{-4} M + 1.341 \times 10^{-4} M^2, \quad r = 0.981 \quad (4-68)$$

以上の回帰式を、コシヒカリと同じく(4-52)式で代表させて、各項の係数 b_0 、 b_1 および b_2 と θ との関係を求めた結果、

$$b_0 = 0.1288 - 7.277 \times 10^{-4} \theta, \quad r = 0.998 \quad (4-69)$$

$$b_1 = -4.326 \times 10^{-3} + 8.999 \times 10^{-5} \theta, \quad r = 0.983 \quad (4-70)$$

$$b_2 = 1.751 \times 10^{-4} - 1.037 \times 10^{-6} \theta, \quad r = 0.983 \quad (4-71)$$

を得た。更に、(4-69)式、(4-70)式および(4-71)式を(4-52)式に代入して、

$$k = 0.1288 - 7.277 \times 10^{-4} \theta - 4.326 \times 10^{-3} M + 8.999 \times 10^{-5} \theta M + 1.751 \times 10^{-4} M^2 - 1.037 \times 10^{-6} \theta M^2 \quad (4-72)$$

を得た。この算定式に実測値に対応する水分を与えて求めたk(θ と直線関係)を実線で、kの実測値をプロット記号でFig. 4-40に示したが、両者にはコシヒカリと同程度的一致がみられた。(4-72)式の適用範囲は、

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}, \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-73)$$

であるが、Fig. 4-40から判断して、

$$15^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}, \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-74)$$

としても差し支えないと思われる。

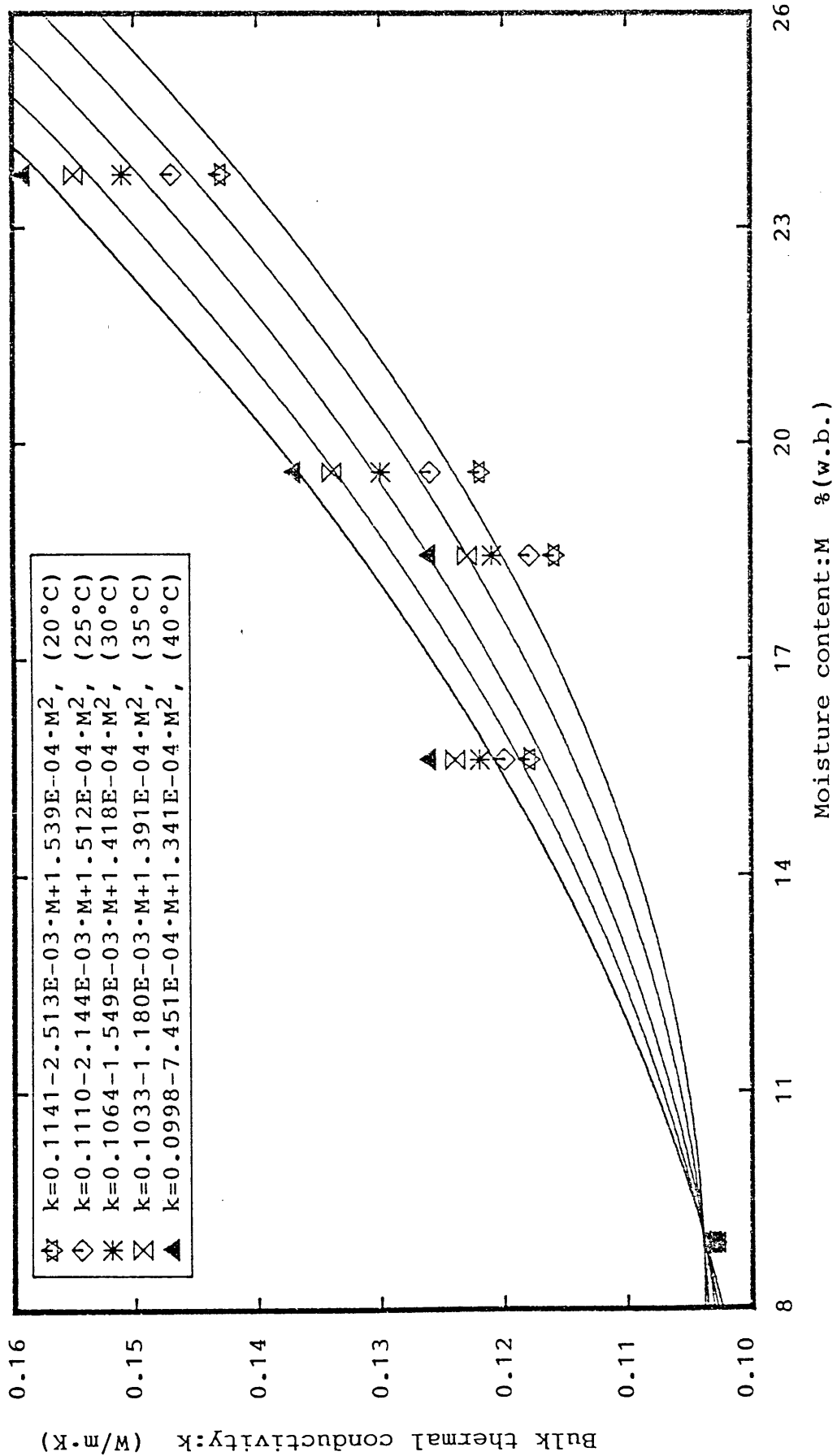


Fig.4-39 Bulk thermal conductivity of hulled rice (Variety=OZORA)

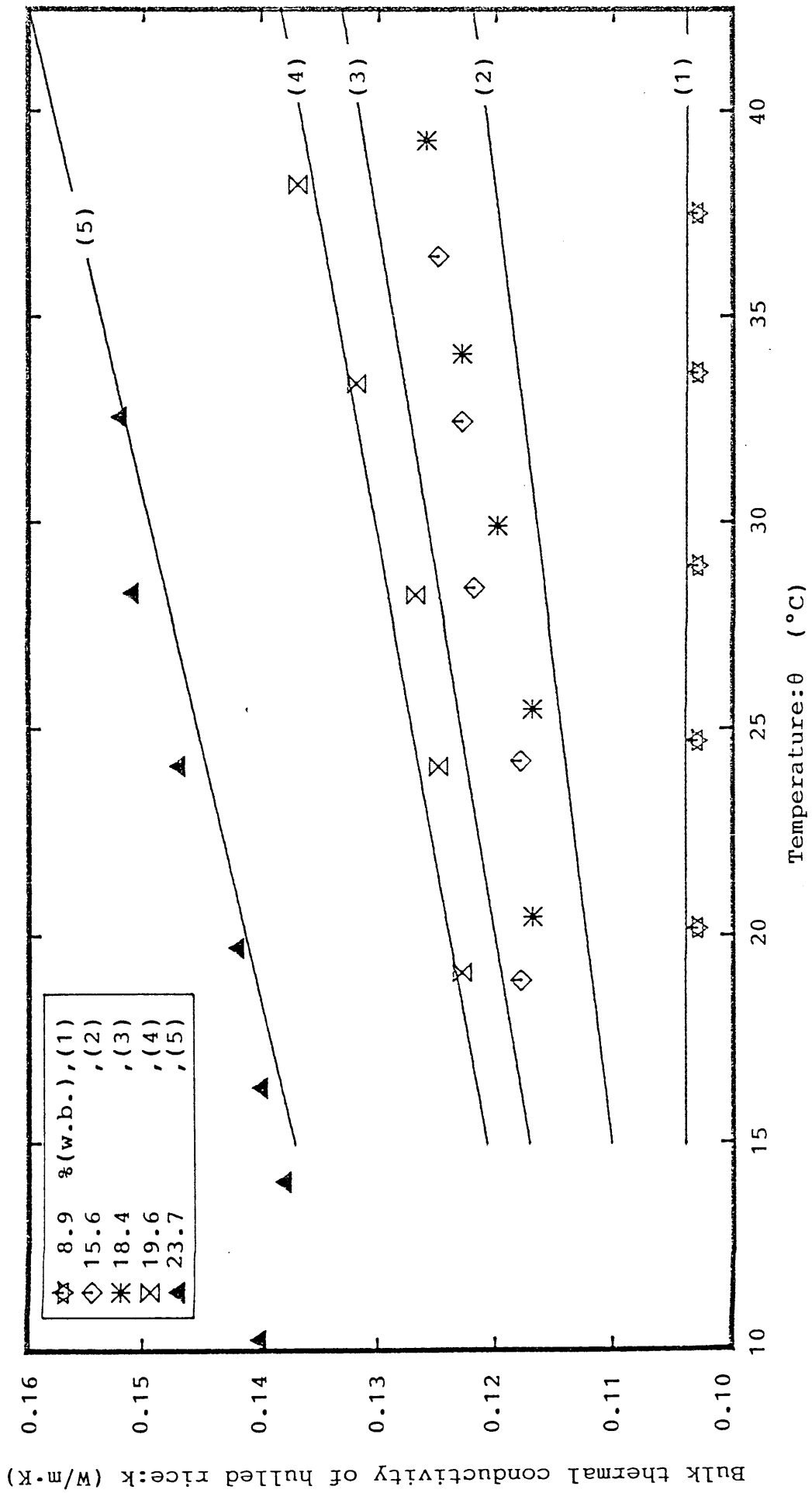


Fig.4-40 Measured values of bulk thermal conductivity and the curves expressing the eq.(4-81) (Variety=OZORA)

4. 4. 考察

4. 4. 1. 粉の熱伝導率およびこれに寄与する要因と品種間の相違

実測値から得た2品種の粉、コシヒカリおよび大空の熱伝導率の算定式を用いて、熱伝導率に寄与する要因について考察を加える。ここで、再び算定式を示す。

コシヒカリ

$$k=0.0743-2.400 \times 10^{-4} \theta + 7.078 \times 10^{-4} M + 6.374 \times 10^{-5} \theta M \quad (4-21)$$

適用範囲

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 35^{\circ}\text{C} , \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-22)$$

$$\text{または} \quad 15^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C} , \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 20\%(\text{w.b.}) \quad (4-23)$$

大空

$$k=0.0619-5.031 \times 10^{-4} \theta + 5.446 \times 10^{-4} M + 8.650 \times 10^{-5} \theta M \quad (4-36)$$

適用範囲

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 35^{\circ}\text{C} , \quad 8\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-37)$$

$$\text{または} \quad 15^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C} , \quad 8\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 20\%(\text{w.b.}) \quad (4-38)$$

(a) 熱伝導率のとりうる値の範囲

(4-21)式および(4-36)式を用いて、両式に共通な適用範囲内でkの最大値ならびに最小値を求めると、次のようになる。

コシヒカリでは、

$$0.086(\theta=15, M=9) \leq k \leq 0.136(\theta=35, M=24) \quad (4-75)$$

大空では、

$$0.071(\theta=15, M=9) \leq k \leq 0.130(\theta=35, M=24) \quad (4-76)$$

このように、粉の熱伝導率は品種によって明らかに異なる値を示すことがわかる。大空の方がコシヒカリよりも平均すると0.01(W/mK)程度小さい値となるが、その差は低水分において大きく、高水分では差が縮まる。これは、粉(乾物+水)の熱伝導率に寄与する水分の影響が大きいことを物語るものである。

品種により熱伝導率が異なる主な原因は、物理的諸元の違いに求められる。例えば、Table 4-6の(a)に示したように、14%換算の千粒重は、コシヒカリでは29.19(g)、大空では22.56(g)と大きな違いがあり、粉粒子の3軸寸法もTable 4-7に示したようにコシヒカリの方が大きい。これらの差異が大きな原因となって両品種のかさ密度の違いを生じ、同じ方法で充填したにもかかわらず

Table 4-21 および Table 4-23 に示したように、

コシヒカリでは $600 \leq \tau \leq 660$

大空では $530 \leq \tau \leq 610$

の範囲になった。したがって、同じ厚みを有する充填層であっても、それを構成する粒数や個々の粒子の接触の度合いが品種によって異なり、その結果として、熱伝導率に違いをもたらしているものと考えられる。

(b) ~~熱伝導率の温度依存性~~

両品種の k の実測値をプロットした Fig. 4-26 (コシヒカリ) および Fig. 4-30 (大空) をみると、いずれにおいても、温度依存性を示す直線のかたむきが水分の減少とともに小さくなっていることがわかる。その過程を考慮すると、この傾向は水分が 0 に近いところまで維持されると考えてもよいように思われる。この推論に沿って (4-21) 式および (4-36) 式に $M=0$ をあたえると、絶乾状態においては、両品種とも温度に関して負の依存性を示すことがわかる。

これに類似した傾向は、亀岡⁽¹⁹⁾ が求めた式からもうかがえる。亀岡の式を示すと、

粳 (日本晴) の有効熱伝導率は

$$k=0.1042+7.953 \times 10^{-5} \theta +5.978 \times 10^{-4} M +2.694 \times 10^{-5} \theta M \quad (4-77)$$

粳 (日本晴) の粒子熱伝導率は

$$k=0.2555-1.723 \times 10^{-3} \theta +3.621 \times 10^{-3} M +2.408 \times 10^{-4} \theta M \quad (4-78)$$

である。

(4-77) 式および (4-78) 式で $M=0$ とおいてかんがえると、有効熱伝導率式の温度項の係数は非常に小さく、 $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C}$ の範囲では、この項は定数項の 3 ケタ目に相当するオーダーしか持たないので、温度依存性が正であってもその関係は薄いものである。これに対して、粒子熱伝導率式の温度項の係数は負の値を有し、定数項に大きな影響を及ぼすオーダーを持っている。筆者が求めた値はこれらの中間に位置しており、定性的には、絶乾状態において粳の有効熱伝導率は温度に関して負の依存性を示すとして良いように考える。

一方、通常取り扱われる範囲の水分で温度依存性を求めたものに細川ら⁽⁵⁵⁾ の式がある。これを示すと、粳 (ヨネシロ) の熱伝導率は

$$k=0.093+8.76 \times 10^{-4} \theta, \quad (12.16 \leq M \leq 15.63) \quad (4-79)$$

である。ただし、各項の数値は筆者が単位を換算した結果を示したものである。

(4-79) 式と比較するために、筆者が求めた (4-21) 式および (4-36) 式で $M=14.0$ とすると、

$$\text{粉 (コシヒカリ)} \quad k=0.0842+6.524 \times 10^{-4} \theta$$

$$\text{粉 (大空)} \quad k=0.0695+7.079 \times 10^{-4} \theta$$

となり、亀岡の式で $M=14.0$ とすると、

$$\text{粉 (日本晴)} \quad k=0.1126+4.567 \times 10^{-4} \theta$$

となる。各式において温度依存性を示す θ の係数をみると、いずれも同じオーダーである。筆者が得た式でも品種による違いがあることは明らかであり、測定法が異なることをも考え合わせれば、上記4式の係数はほぼ同じ値に収まっていると考えられる。

(c) 熱伝導率の水分依存性

コシヒカリと大空の水分依存性の違いについて検討する。(4-21) 式より、

$$\frac{\partial k}{\partial M} = 7.078 \times 10^{-4} + 6.374 \times 10^{-5} \theta \quad (4-80)$$

(4-36) 式より、

$$\frac{\partial k}{\partial M} = 5.446 \times 10^{-4} + 8.650 \times 10^{-5} \theta \quad (4-81)$$

(4-80) 式および (4-81) 式は、コシヒカリおよび大空の水分依存性の変化率を示すものである。そこで、これらの大小を比較すると、

$$\begin{aligned} f(\theta) &= (4-81) \text{式} - (4-80) \text{式} \\ &= -1.632 \times 10^{-4} + 2.276 \times 10^{-5} \theta \end{aligned} \quad (4-82)$$

となる。(4-82) 式より、 $\theta \geq 7.2$ で常に (4-81) 式の方が大きいことがわかる。すなわち、この温度範囲では、大空の方が熱伝導率の水分依存性が強いことを示している。しかも、この傾向は温度とともに顕著となる。

水分依存性を求めた報告は、既に述べたように複数例あり、いずれも粉の熱伝導率を水分の1次関数で表わしている。これは、筆者が得た結果と同じである。ただし、そのほとんどの報告において試料の温度が明示されていないため、比較することは困難である。そこで、再び亀岡の式、(4-77) 式で、 $\theta = 15^\circ\text{C}$ および $\theta = 35^\circ\text{C}$ を与えた場合の水分項の係数を求めると、

$$\theta = 15, \quad 1.002 \times 10^{-3} \quad \text{および} \quad \theta = 35, \quad 1.541 \times 10^{-3}$$

となる。筆者の式における係数の方が大きい値であるが、オーダーは両式とも同じであった。

4. 4. 2. 玄米の熱伝導率およびこれに寄与する要因と品種間の相違

玄米の熱伝導率について求めた算定式を基に、粳の場合と同様の考察を行なう。これらの算定式を、以下に示す。

コシヒカリ

$$k=0.1279-2.283 \times 10^{-5} \theta -3.075 \times 10^{-3} M -3.272 \times 10^{-5} \theta M \\ +1.045 \times 10^{-4} M^2 +3.398 \times 10^{-6} \theta M^2 \quad (4-56)$$

適用範囲

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C} , \quad 10\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-57)$$

または $15^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C} , \quad 10\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 17\%(\text{w.b.}) \quad (4-58)$

大空

$$k=0.1288-7.277 \times 10^{-4} \theta -4.326 \times 10^{-3} M +8.999 \times 10^{-5} \theta M \\ +1.751 \times 10^{-4} M^2 -1.037 \times 10^{-6} \theta M^2 \quad (4-72)$$

適用範囲

$$15^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 40^{\circ}\text{C} , \quad 9\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.}) \quad (4-74)$$

(a) 熱伝導率のとらうる値の範囲

(4-56) 式および (4-72) 式に共通な温度および水分範囲内で、熱伝導率の最大値および最小値を求めると、

コシヒカリでは、

$$0.107(\theta=15, M=10) \leq k \leq 0.160(\theta=40, M=24) \quad (4-83)$$

大空では、

$$0.104(\theta=15, M=10) \leq k \leq 0.159(\theta=40, M=24) \quad (4-84)$$

となる。大空の方がわずかに値が小さいが、粳に比べて、品種間の違いはほとんどない。物理的諸元をみると、Table 4-6の(b)より、コシヒカリの14%換算の千粒重は23.02(g)、大空は20.31(g)である。粳ではコシヒカリが大空の約1.3倍であったのに対し、玄米では約1.1倍と、その差が小さくなっている。また、3軸寸法についても、Table 4-7から明らかのように、玄米では品種間の差が小さい。これに対応して、かさ密度も両品種間でほぼ同じ値を示している。すなわち、Table 4-25およびTable 4-27をみれば、コシヒカリ、

大空ともに

$$780 \leq r \leq 850$$

の範囲内に分布している。

このようなことを考慮すると、次のような判断が可能である。3軸寸法ならびにかさ密度が両品種間で大差ないので、充填層の構成も類似のものとなり、その結果、玄米の熱伝導率には品種間に大きな違いがみられないのである。このことは、粉の熱伝導率の品種間の相違が、主に粉粒子の物理的諸元の違いに由来するものであったことを裏付けるものである。

(b) 熱伝導率の温度依存性

(4-56)式および(4-72)式で $M=0$ として、絶乾状態での温度依存性を推察すると、いずれの品種も、温度に関して負の依存性を有することがわかる。温度項の係数には両品種間で大きな違いがあるが、定性的には、大空の方が水分依存性が強いといえる。これは、粉の場合と同じ結果である。水分が増して10%(w.b.)付近になると両品種ともほとんど温度依存性を示さず、これを越えると、正の依存性を示すようになる。この場合も、大空の方が強い依存性を呈する。

(c) 熱伝導率の水分依存性

玄米の熱伝導率は、水分 M の2次式として表わされた。粉が M の1次式で表わされたことに対して、注目すべきことである。ここで、コシヒカリと大空の k の水分依存性について検討する。(4-56)式より、

$$\frac{\partial k}{\partial M} = -3.075 \times 10^{-3} - 3.272 \times 10^{-5} \theta + 2.090 \times 10^{-4} M + 6.796 \times 10^{-6} \theta M \quad (4-85)$$

また、(4-72)式より、

$$\frac{\partial k}{\partial M} = -4.326 \times 10^{-3} + 8.999 \times 10^{-5} \theta + 3.502 \times 10^{-4} M - 2.074 \times 10^{-6} \theta M \quad (4-86)$$

が得られる。(4-85)式および(4-86)式は、コシヒカリおよび大空の水分依存性の変化率を示すものである。ここで、両式の大小を比較するために

$$\begin{aligned} f(\theta) &= (4-86)式 - (4-85)式 \\ &= -1.251 \times 10^{-3} + 1.227 \times 10^{-4} \theta \\ &\quad + 1.412 \times 10^{-4} M - 8.870 \times 10^{-6} \theta M \end{aligned} \quad (4-87)$$

とおく。(4-87)式より、

$$\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial M^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial \theta \partial M} = -8.876 \times 10^{-6} \quad (4-88)$$

であるから、

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial \theta \partial M}\right)^2 - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}\right) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial M^2}\right) > 0 \quad (4-89)$$

が常に成立し、 $f(\theta, M)$ は極値を持たない。したがって、例えば θ を固定すると M に関して単調な関数になる。そこで、

$$15^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}, \quad 10\%(\text{w.b.}) \leq M \leq 24\%(\text{w.b.})$$

の範囲で $f(\theta, M)$ の正負を調べると、次のようになる。

$$\frac{\partial f}{\partial M} = 1.412 \times 10^{-4} - 8.870 \times 10^{-6} \theta$$

より、 $\frac{\partial f}{\partial M} = 0$ とすると $\theta = 15.9189$

であるから、 $\theta = 15$ では $f(\theta, M)$ は M に関して単調増加であり、しかも、

$$f(15, 10) = 6.71 \times 10^{-4} > 0$$

であるから、

$$10 \leq M \leq 24 \quad \text{で常に} \quad f(\theta, M) > 0$$

である。 $\theta \geq 16$ では $f(\theta, M)$ は単調減少となるので、 $10 \leq M \leq 24$ において $f(\theta, M) > 0$ となる範囲を求めると、

$$10 \leq M \leq 24, \quad 15 \leq \theta \leq 23 \quad (4-90)$$

$$10 \leq M \leq 19, \quad 15 \leq \theta \leq 31 \quad (4-91)$$

$$10 \leq M \leq 17, \quad 15 \leq \theta \leq 40 \quad (4-92)$$

となる。これにより、上記3式の範囲では、大空の方が k の水分依存性が強いことがわかる。水分および温度範囲に制限はあるものの、定性的には粉の場合と同じ結果を得た。

4. 4. 3. 粉と玄米の熱特性の相違について

粉と玄米で熱特性が異なる原因が粉殻の有無にあることは、容易に想像されることである。ここでは、粉殻がどのような役割を果たしているのかについて、実測値から得た粉ならびに玄米の k の算定式、(4-21)式、(4-36)式、(4-56)式および(4-72)式を基に考察する。各算定式の適用範囲を $M=0$ まで拡張してみると、粉、玄米のいずれも、その k は温度に関して負の依存性を示すことは、既に

見た通りである。これが通常的水分範囲になると、温度依存性の正負が逆転する。そこで、その正負の転換点を求めると、粳では、コシヒカリが3.8%(w.b.)、大空が5.8%(w.b.)であるのに対して、玄米では、コシヒカリが10.3%(w.b.)、大空が9.0%(w.b.)ではじめて正負が逆転する。すなわち、粳の熱伝導率には低水分において早くから水分の影響が現われるのに対し、玄米では、10%(w.b.)付近までは絶乾状態での熱特性の方が水分に対して勝っていることになる。これは、粳殻と玄米の保水形態の違いに原因するもので、低水分域で、粳殻に含まれる水の熱特性が玄米に比べて大きく現われるためであると思われる。

一方、高水分域では、粳の水分依存性が一定であるのに対し、玄米では M^2 の項が効いてくるので、高水分になるほど強い水分依存性を示す。この場合には、粳において、粳殻が玄米の水分依存性を打ち消す作用をしていることになる。これは、両者の保水形態の違いというより、玄米と粳殻の間の空げきの存在や粳殻の物理的な構造によるものであろう。いずれにしても、粳殻は、熱伝導率に与える水分の影響を一定に保つように作用することがわかる。

ここでは、実験式から導かれる推論を述べたにすぎないが、より正確に議論するには、玄米および粳殻の組成や構造に関する知見を得た上で、それぞれの熱伝導率を別々に測定することが必要であろう。

4. 4. 4. 高水分の粳および玄米の熱伝導率について

Fig. 4-26, Fig. 4-30, Fig. 4-34およびFig. 4-38に示した粳および玄米の熱伝導率の実測値の中で、23%(w.b.)を越えるものをみると、いずれも15℃前後で熱伝導率が最小値を示す傾向がみられる。穀物に関して、このような高水分域では水分の影響が顕著であり、熱伝導率が大きな値を示すことは過去の報告でも見受けられるが、特定の温度付近で最小値を呈するという報告は見当たらない。また、いわゆる分散系有効熱伝導率に関する報告においても、このような傾向を指摘した例はないように思われる。一方、筆者の実測値をみると、測定誤差というにははっきりした傾向を示しており、しかも、4種の実験とも同様の結果となった。したがって、ここには明らかに何等かの原因があるものとしてよい。その原因としては、1) 高水分における粳および玄米の熱特性が正しく観察されたもの、2) 水分移動、対流、熱損失等の測定上起こり得るミスによるもの、3) 測定装置の特性に真の値が歪められたもの、などが考えられる。予備実験の結果からしても、2) ある

いは3)が原因である可能性は少ないとかがえるが、しかし、1)の理由によるとするには、これと類似の報告がないこともあって、慎重を要すると思われる。したがって、ここでは、高水分の粉および玄米の熱伝導率が15℃付近で最小値を取る可能性があるとして、留めておく。なお、これについては、更に実験を重ねるなどして原因を明らかにする必要がある。

4.4.5. 測定中の水分移動について

測定の前後における試料の水分については、Table 4-21, Table 4-23, Table 4-25およびTable 4-27に示したとうりである。測定後では、高水分の試料は水分が減少し、低水分では増加する例が多いが、その逆の事例もあった。したがって、特に高水分あるいは低水分の試料を除けば、測定前後における水分の違いは測定誤差ともみれる程度である。ただし、23%(w.b.)を越える試料では、試料の平均温度を40℃程度にした場合、明らかに水分移動があると認められた。すなわち、試料部の外部ケース内側に一部曇りを生じたので、高水分の試料ではこの温度での測定を避けた。これを除けば、水分移動があったとしても、測定値に影響するほどのものではないと判断された。

4.4.6. α の測定に関する実験的考察

本測定法の妥当性については、第3章でアクリル板を試料とした基礎実験を行なって確認した。これは、試料を粉あるいは玄米とした場合でも、保証されるものと考えている。ここでは、一般に、測定法が異なるとデータに違いを生じるという指摘があるので、これを検討した。本測定法が他の測定法を用いた測定値と比べて妥当なものであるか否かを確認するために、先に示した実験(B-5)(Table 4-23)と同一の試料を用いて周期法による測定を行なった。実験条件をTable 4-29に示した。

Table 4-29 Experimental conditions (Angstrom method)

Period of temperature wave (s)	M.C. % (w.b.)		Thickness (mm)		Bulk density (Kg/m ³)
	before used	after used	between measuring points	total	
256	20.0	19.7	5.42	50.0	578

試料の厚みについては、次のように検討した。試料の加熱側表面と内部の温度測定点間の距離を l 、同じ表面から背面までの距離を L とすると、 $l/L=0.5$ の場合、 $F_0 < 1$ であれば背面の影響は測定値に入っていない。⁽³⁶⁾ もし l/L が 0.5 より小さくなると、 F_0 の上限は更に大きな値をとることができる。本実験で与えた条件をこれに照らして検討すると、 $l/L=5.42/50.0=0.108$ であり、 F_0 は $\alpha = 0.95 \times 10^{-7}$ を仮定すると 0.83 となるので、先の条件を十分満足している。

Fig. 4-41 に測定した温度の生データを示した。これは、測定開始時より約 141 分経過後のデータである。図中の P1-P4 および Q1-Q4 は、各点における温度を示したものである。このように、この波形は完全な準定常状態ではなく、全体として温度は微増している。しかし、これ以降のデータにも同程度の温度の上昇あるいは下降が認められたので、Fig. 4-41 に示したデータについて、次に述べる処理を行なって α を求めた。図中、P1 と P2 および P3 と P4 の差はごく僅かで

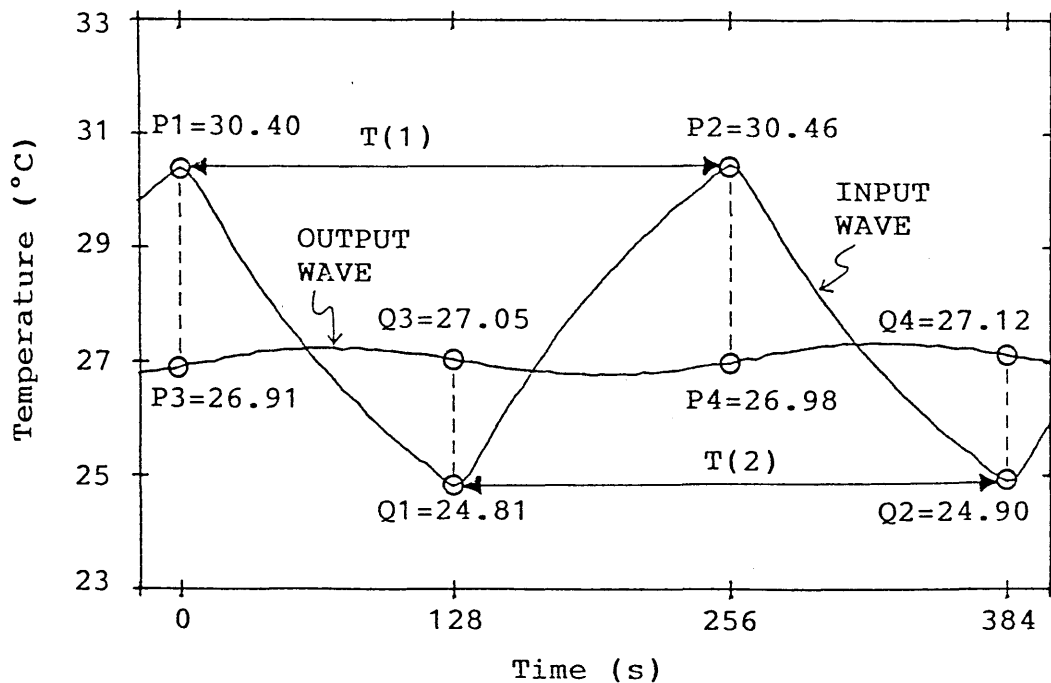


Fig.4-41 Measured temperatures by Ångström method

あるので、区間T (1) で温度が直線的に上昇していると仮定しても差し支えないと考えた。そこで入力波については、P 1とP 2を結ぶ直線の式を求め、P 1を0として、それ以降の直線の増分を生データから差し引いた。出力波についてもP 3を基準にして同様の処理を行なった。こうして得た区間T (1) の波形をフーリエ展開し、入出力波を構成する波形成分のうち1次波の位相差を求めた。これを ϕ で表わすと、 $\phi = 1.9507$ であった。これにより、

$$\alpha = (x / t_0) \times (l / \phi)^2 = 0.947 \times 10^{-7} \quad (\text{m}^2 / \text{s})$$

を得た。区間T (2) についても同様の処理を行ない、 $\alpha = 0.941 \times 10^{-7}$ を得た。そこで、これらを平均して、

$$\alpha = 0.94 \times 10^{-7} \quad (\text{m}^2 / \text{s})$$

を決定した。なお、試料の平均温度は27.3℃であった。

この結果を比較するために、実験(B-5)の結果を示したFig. 4-29 (図中○印) において $\theta = 27.3^\circ\text{C}$ に対応する値を読むと、

$$\alpha = 0.90 \times 10^{-7} \quad (\text{m}^2 / \text{s})$$

程度である。実験(B-5)でのかさ密度は562 (Kg/m³) , 周期法では578 (Kg/m³) とほぼ同じ値であるので、両実験結果も同じになってよい。得られた値としては実験(B-5)の方が小さいが、両実験結果は良く一致していると判断される。その理由を以下に述べる。

第1の理由は、周期法による測定では、試料内部に設置したサーモカップル シートの位置測定に不安が残ることである。それを具体的に示すと次のようになる。試料容器に試料を少量充填してサーモカップル シートを載せ、底面からの距離を測定した後、50 (mm) の厚みになるまで更に試料を充填した。その後試料上部にウエイトを載せたが、このときサーモカップル シートの位置がズレることが考えられる。これを容器の側面から確認することはできないが、ズレが生じた場合は、距離が縮まる方向にズレる可能性が大きい。したがって、周期法の測定結果が実際より大きく出る恐れがある。

第2の理由は、実験(B-5)では1つの値(6点の平均値)を得るのに約30分で済むのに対し、周期法では測定に2時間以上を要したことである。試料が高水分であるため、長時間の測定では水分を同一に保つことが難しく、水分の変動が測定値を大きく見せることが考えられる。ただし、実験前後の水分の違いは、周期法の方が小

さいという結果になった。

第3の理由は、測定法による測定値の違いは本来あるべきものではないが、現実的にはこれを避けることができないと仮定して両結果を比較すると、いわゆる測定誤差も考慮して、その差は許容範囲に入るものと思われることである。

以上により、本測定法による測定では、従来より用いられている周期法とほぼ同じ結果を得るとの結論に達した。

4. 4. 7. α の水分依存性について

4. 2. 節の Table 4-1 によると、⁽¹³³⁾ 粉の温度伝導率と水分の関係を Wratten らは、

$$\alpha = 1.35 - 2.49 \times 10^{-2} M \quad (4-93)$$

という M の 1 次式で表わした。また、Wratten らの方法を踏襲した Morita ら⁽¹⁰⁶⁾ も α を M の 1 次式で表わした。これに対して、Table 4-2 に示したように、⁽⁹⁸⁾ Kazarian らは小麦について、 α は M の 1 次関数では表わせないとした。このいずれの見方が正しいのか、あるいは、穀物の種類が違うので異なる見方ができたのかを確かめるために、粉（コシヒカリ）について求めた k の算定式から α を逆算してみる。比較のためには、一定温度でかつ一定のかさ密度で検討する必要がある。そこで、(4-21) 式で $\theta = 20^\circ\text{C}$ とおくと、

$$k = 0.0695 + 1.983 \times 10^{-3} M \quad (4-94)$$

となる。

かさ密度については、Table 4-21 より平均的な値として $\tau = 625$ とする。比熱は

$$c = 1.256 + 0.04228M$$

であるから、これらにより、

$$\begin{aligned} \alpha &= k / (c\tau) \\ &= \frac{0.0695 + 1.983 \times 10^{-3} M}{625 (1.256 + 0.04228M) \times 10^{-3}} \end{aligned} \quad (4-95)$$

が得られる。

(4-95) 式で表わされる曲線を $10 \leq M \leq 25$ の範囲で図に示したのが Fig. 4-42 である。これをみると、この曲線は直線で近似し得るものであり、しかも、

Mの増加とともに α は減少することを示している。したがって、Wratten らの見解は正しいものと思われる。ただし、水分の異なる試料を一定のかさ密度になるように充填することは極めて困難であり、現実的ではない。したがって、ここで検討した結果についても、定性的な可能性を認めただけのものである。

一方、筆者の実験では、充填方法を同じにした場合水分によってかさ密度は異なり、その結果得られた α はMに関して直線関係を示さなかった。この方が実際の充填状態に近いと考えられるので、Kazarianらの結果も、実際の充填層から見た場合には正しい見方であるといえる。

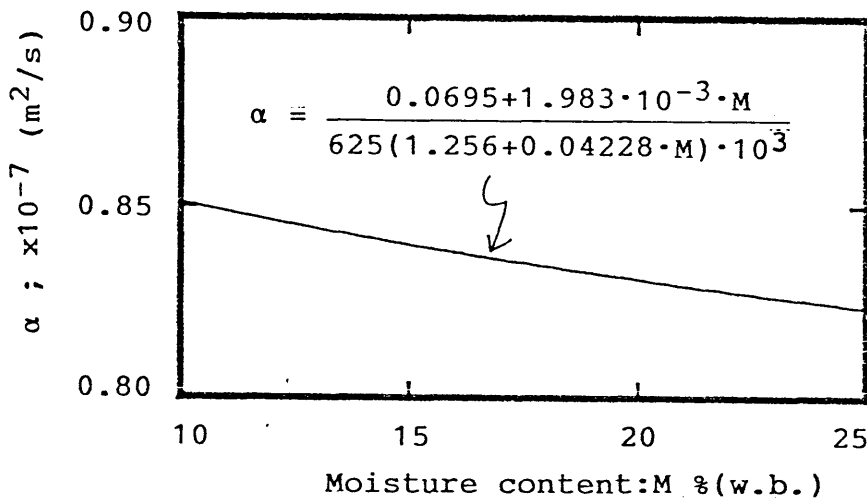


Fig.4-42 α (calculated) vs M at $\theta=20$ °C

4.4.8. α の測定における再現性に関する実験的考察

(a) 試料容器に関する再現性

本実験では、正方形と円筒形の2種類の試料容器 (Fig. 4-4) を用意した。主に円筒形試料容器を用いて実験を行なったが、容器の形状により測定値が異なるとすれば、容器の特性が測定値に影響して試料固有の熱物性値を求めたことにはならない。そこで、同一の試料について2種類の容器を用いた実験を行ない、測定値を比較した。

実験の条件と測定値 α は、Table 4-30に示したとうりである。両者のかさ密度はほぼ同じであるので、このまま比較することができる。その結果は、正方形容器で測定した方が小さい値となった。しかし、前にも述べたように、本実験装置で得

られる値の精度は小数点以下2ケタまでであるので、これに揃えると、

正方形容器では、 $\alpha = 0.75 \times 10^{-7}$ (m²/s)

円筒形容器では、 $\alpha = 0.76 \times 10^{-7}$ (m²/s)

となる。両者の平均温度の差も考慮すると、 α の違いがこの程度であれば、試料容器の形状に拘らず正しく測定ができたものと考えられる。

Table 4-30 Reproducibility about sample container

Shape of sample container	Thick-ness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	Temp. (°C)	M.C. % (w.b.)	$\alpha \times 10^{-7}$ (m ² /s)
Square	5.48	35.82	818	26.2	14.3	0.746
Cylinder	5.15	40.22	821	27.1	14.3	0.762

(Note) * Sample=Hulled Rice (KOSHIHIKARI)

**Period=384 (s)

(b) 同一試料容器による再現性

円筒形試料容器を用いて、再現性を確認するための実験を2種類行なった。その1つは、試料の経時変化を考慮しなくて良い条件下で、実験装置や試料の充填状態のみに関わる再現性をみようとしたものである。この実験条件と結果を、Table 4-31 (a) に示した。試料は玄米(コシヒカリ)で、試料の経時変化の影響を排除するために、実験(S-2)は実験(S-1)の2日後に行なった。

もう1つは、試料の経時変化が測定値に影響するか否かをも含めて、再現性をみたものである。試料には、籾および玄米(コシヒカリ)を用いた。この実験条件と結果をTable 4-31 (b) に示した。試料の経時変化をみるために、実験(S-4)および(S-6)は、それぞれ実験(S-3)および(S-5)で用いた試料を5℃に保った冷蔵庫に保存し、190日後に取り出して再度実験したものである。

Table 4-31 (a), Table 4-31 (b) から明らかのように、実験条件はいずれの組についてもほぼ同じであり、かつ、 α の測定値を2ケタにまとめれば、どの組についても同じ α を得る。すなわち、きわめて良好な再現性が得られた。また、

Table 4-31 (b) に示した結果によれば、試料の経時変化は測定値に影響しないことがわかった。ただし、これについては、試料の保存方法によって変わり得ることが考えられる。

Table 4-31(a) Reproducibility

Experimental number	Thickness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	Temp. (°C)	M.C. % (w.b.)	α x10 ⁻⁷ (m ² /s)
s-1	5.86	43.66	784	19.2	23.4	0.823
s-2	5.84	43.66	786	19.2	23.2	0.815

(Note) * Sample=Hulled Rice (KOSHIHIKARI)

** Sample container=Cylinder type

*** The same sample was used about 2 days difference in time.

Table 4-31(b) Reproducibility

Experimental number	Sample	Thickness (mm)	Weight (g)	Bulk density (Kg/m ³)	Temp. (°C)	M.C. % (w.b.)	α x10 ⁻⁷ (m ² /s)
s-3	Rough Rice	6.79	41.16	637	27.2	15.1	0.907
s-4		6.59	39.26	626	28.9	14.9	0.913
s-5	Hulled Rice	5.20	40.22	813	27.0	15.2	0.760
s-6		5.15	40.22	821	27.1	14.3	0.762

(Note) * Sample container=Cylinder type

** The same sample was used about 190 days difference in time.

4. 5. 摘要

粳および玄米の温度伝導率や熱伝導率を定量的に把握することにより、それらの温度依存性および水分依存性を明らかにすること、ならびに、品種間の相違を明らかにすることを目的として、各種の実験を行なった。用いた測定法は、第3章で提案した測定法である。その結果、粳および玄米の熱伝導率のいずれをも、水分および温度の関数として1つの式にまとめて、表わすことができた。以下に、項目を分けてその内容を要約する。

- 1) 過去の文献を整理することにより、穀物を中心として農産物の熱物性値データの一覧を作成し、現状の把握を容易にした。
- 2) 試料の選定に際して粳および玄米の千粒重ならびに3軸寸法の測定を行なった結果、これらは、品種によって異なる値を示すことがわかった。
- 3) 粳のかさ密度は品種によって大きく異なるが、玄米では品種による違いはほとんどないという結果を得た。ただし、この場合の品種はコシヒカリと大空である。
- 4) 粳あるいは玄米充填層の温度伝導率は、層の厚みによって異なることが実験的に明らかにされた。このことは、特に玄米において顕著にみられた。その原因は、対流の発生の有無にあるものと考えられる。なお、対流の影響を受けない層厚みの範囲を、玄米については(4-3)式に、粳については(4-4)式に示した。
- 5) 粳の熱伝導率は、水分あるいは温度に関して1次式で表わされる関係にあることが認められた。これら熱伝導率に寄与する2つの要因を1つの式にまとめて、コシヒカリの熱伝導率の算定式を(4-21)式に、大空の熱伝導率の算定式を(4-36)式に示した。
- 6) 玄米の熱伝導率は、高水分域で粳よりも強い水分依存性を示し、水分に関して2次式で表わされる特性を有することが明らかになった。また、温度に関しては、1次式で表わされた。これらの要因を1つの式にまとめて、コシヒカリの熱伝導率の算定式を(4-56)式に、大空の熱伝導率の算定式を(4-72)式に示した。
- 7) 粳の熱伝導率は、品種によって明らかに異なるという結果を得た。熱伝導率の取り得る値の範囲を、コシヒカリについては(4-75)式に、大空については(4-76)式に示した。これに対して玄米では、熱伝導率の品種間の差は、ほとんどなかった。玄米に関して、コシヒカリの熱伝導率の範囲を(4-83)式に、大空の範囲を(4-84)式に示した。

8) 温度伝導率は、水分を固定して見れば、粉，玄米ともに、温度に関して直線関係を有するという定性的な結果を得た。

9) 熱伝導率の算定式を用いて温度伝導率を逆算し、水分との関係を求めた結果、粉の温度伝導率は水分と直線関係を成し、水分の増加とともに減少するという定性的な特性が認められた。

10) 周期法による温度伝導率の測定値を本実験の結果と比較したところ、ほぼ同じ値を得た。このことから、測定法が異なっても、測定値に大きな違いは生じないことが確認された。

11) 再現性を調べるための実験を行なった結果、きわめて良好な再現性が得られた。また、測定値には、試料の経時変化の影響は含まれないことが確認された。

第5章 粳および玄米の比熱

5. 1. 緒言

比熱は、穀物の温度変化を伴う熱的プロセスを解明するうえで必要な、基本的熱物性値の1つである。例えば、穀物の乾燥や貯蔵工程において、加熱あるいは冷却操作を施すために要求される熱負荷の予見には、必ず利用されるデータである。また、比熱そのものとしてだけでなく、第4章で用いたように、熱伝導率の間接測定を行なう場合にもなくてはならないデータである。

穀物の比熱については、国内外での報告例も多く ((23), (48), (60), (65), (82) (91), (92), (106), (108), (114), (130), (133), (134), (135))、データの信頼性も高いと思われるが、対象を粳あるいは玄米に限定すると、入手できるデータも限られてくる。品種間での相違は比熱についても認められるので、先に述べたように、他の熱物性値を算定するデータとして用いるためには、その都度測定することが要求される。このような場合には、測定時間が短いことが望ましい。一方、比熱の測定において測定時間が長いことは、測定の精度を上げることと不可分の関係にあると思われる。しかし、ここでは、第4章での熱伝導率の測定に利用することを主眼としたので、その一方の基礎データである温度伝導率の精度にあわせて、2ケタの精度を有し3ケタ目も傾向の判定にはつかえる程度のデータが得られればよしとした。そこで、測定時間を短くした簡易測定により、粳および玄米の比熱測定を行なった。試料に用いた品種は、コシヒカリと大空である。ただし、この測定値の精度が熱伝導率の算定値の精度を左右することになるので、比熱が既知の金属球を用いて基礎実験を行ない測定の精度を確認した上で、試料に適用した。

5. 2. 試料および簡易測定の考え方

5. 2. 1. 試料

試料には三重大学附属農場産の粳および玄米を用いた。品種は、第4章で選定したコシヒカリおよび大空である。試料の水分は10%(w.b.) - 20%(w.b.)を目安として調整した。原試料の水分は、約16%(w.b.)であったので、これより高い水分については噴霧器を用いて加湿することで、また、低い水分についてはデシケータ中で乾燥し、更に、必要な場合は約40℃に保った定温乾燥器で乾燥して所定の水分の試料

を得るようにした。この試料を80φ×120Hのポリエチレン製広口容器内に密封し、約5℃に保った冷蔵庫内に静置した。これを、短いもので7日間、長いもので30日間経たのちに取り出し、実験に供した。

5. 2. 2. 簡易測定のおえ方

前述のように、測定精度を上げるためには相当な注意と時間を要するが、ここでは、短時間で実用的に使用可能な比熱を求めることを主眼として、次のように考えた。

- 1) 測定前の試料の温度調整は実験室に放置して行ない、特別な温度管理は行なわない。測定の少なくとも10時間前に、試料を入れたポリエチレン容器を冷蔵庫から取り出して室内に静置し、測定前に温度を測って試料の温度と室内の温度が平衡に達した時点で、温度調整を終了とする。
- 2) 測定中の試料水分の蒸発は無視する。このために、試料が室内空気に触れる時間は、極力短くする。
- 3) 試料の湿潤熱は無視する。湿潤熱は、試料の水分が0%(w.b.)のとき最も大きく、水分が増加するにつれて急激に減少する。よって、湿潤熱を無視することによる誤差は、0%(w.b.)付近の試料を用いることを避ければ、小さいものと期待される。したがって、実験では10%(w.b.)程度かそれ以上の水分の試料を用いる。
- 4) 0%(w.b.)付近の試料は用いないので、比熱の温度依存性は考えない。
- 5) 5. 3. 節で述べるように、測定には混合法を用いるので測定中に攪はんを行なうが、攪はん熱は試料の投入の前後で一定であると仮定する。

5. 3. 実験装置および方法

5. 3. 1. 実験装置

比熱測定には、混合法を用いた。このために市販の断熱型熱量計を改良した比熱測定装置を試作した。その概略図をFig. 5-1に示した。この装置は、外箱(木製)外水筒(銅製)、内筒(銅製)および上下動攪はん装置から成っている。外水筒は断熱材を介して外箱底面上に載っており、内筒は、これに結んだ4本の糸を外水筒上辺部に3ヶ所、底部に1ヶ所固定して外水筒の内側空間に位置させ、伝導による熱の移動を防ぐようになっている。攪はん部は、外箱の蓋に取り付けた円盤をモータにより回転させ、ピストン・クランク機構によって、内筒の内部に降ろした攪はんリングを上下動させる仕組みである。その行程は30(mm)、回転数は160(r.p.m.)で、いづ

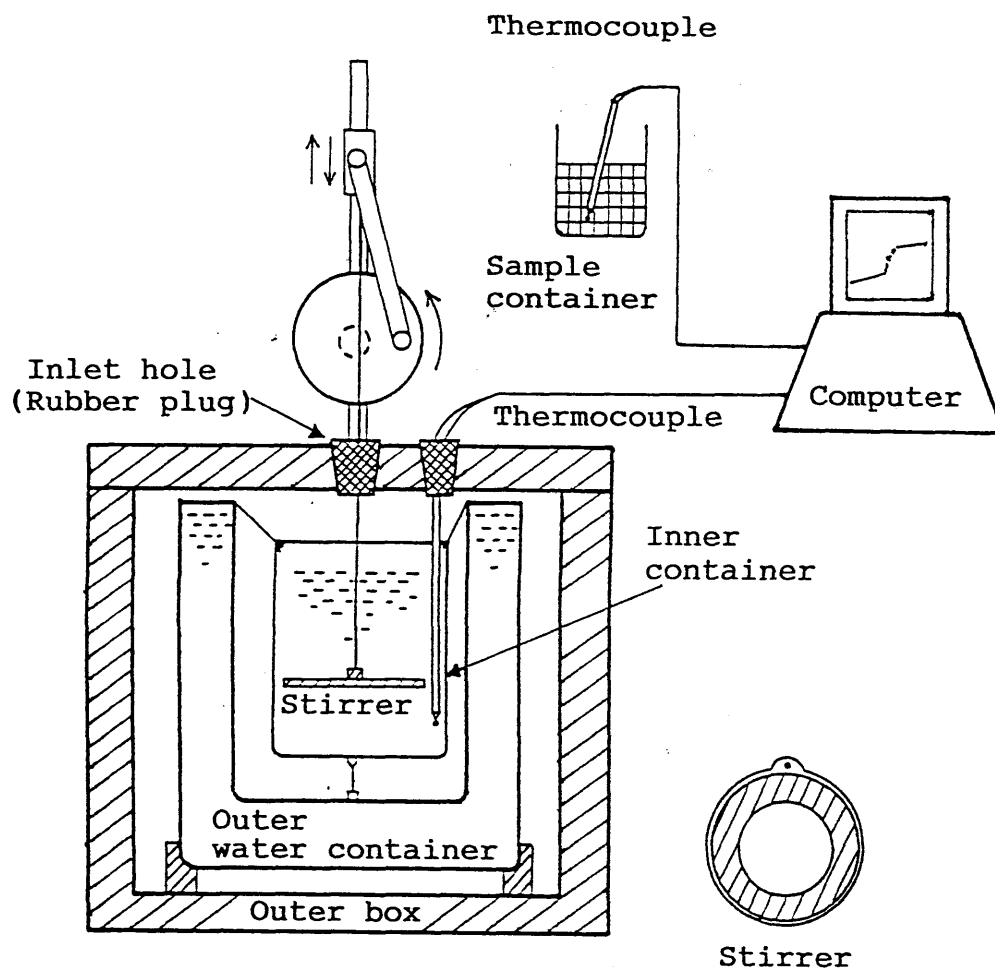


Fig.5-1 Specific heat measuring apparatus

れも、攪はん状態を観察して、試行錯誤法により決定した。

投入前の試料の温度および内筒の温度は熱電対（T，直径0.3（mm））で測定した。熱電対は、二重管ガラス製の基準温度計（東亜計器製，0.1℃目盛り）で検定したものを使用した。ここで、内筒の温度とは、内筒に内容物（蒸留水または蒸留水と試料）を入れた状態での、内容物の温度で代表させた。この温度測定に用いた熱電対は、溝を切った塩化ビニール製の細い棒に感温部のみが露出するようにして埋め込んだものである。この棒を、Fig. 5-1に示したように、外箱の蓋に固定することにより、温度検出部の位置を定めた。

試料は、試料容器に入れて蓋をし、試料温度が室内空気温度と平衡に達したことを熱電対による温度測定で確認する。これと平行して測定装置の攪はんを行ない、内筒の温度の変化率が一定になった時点で、外箱の蓋中央のゴム栓を外して試料を投入し、再びゴム栓をする。測定の終了判定もこれと同様に、試料投入後に内筒の温度の変化率が一定となった時点を目安とした。これらの測定温度は、コシヒカリ（粳および玄米）の比熱測定ではペン・レコーダ（横河電機製，Type 3066）に記録したが、その後改良して、大空（粳および玄米）の比熱測定では、図に示したようにパーソナルコンピュータに取り込んだ。

なお、内筒に注入する蒸留水は70(g)，投入する試料は約30(g)で、これも試行錯誤法により実験的に決定した。

実験装置の外観を、Fig. 5-2に示した。

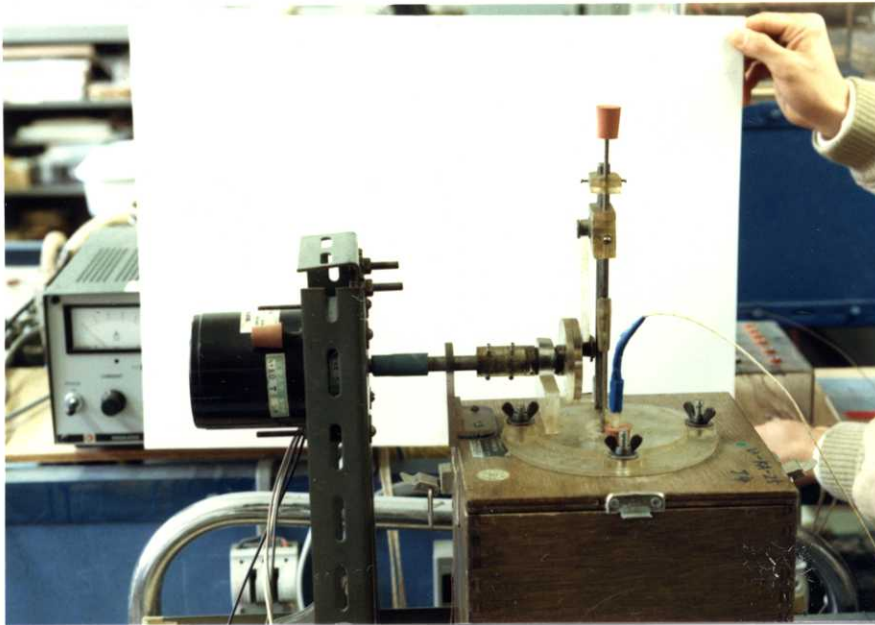


Fig.5-2 External appearance of measuring apparatus

5. 3. 2. データ処理

データ処理法を説明するために、Fig. 5-3に処理に用いる温度を示した。この図は、コンピュータに取り込んだ内筒温度の実測値を描いたもので、図中のドットは2秒ごとに測定した温度を示したものである。これにより、(1)および(2)で区別した2本の回帰直線を求め、 θ_1 、 θ_2 および θ_3 を決定する。以上を基にして、比熱を算出する式を次に示した。

$$c = \frac{W_c (\theta_3 - \theta_2)}{w (\theta_1 - \theta_3)} \quad (5-1)$$

ここで、 c : 比熱 (cal/°Cg), W_c : 内筒の熱容量 (cal/°C), w : 試料重量 (g), θ_1 : 試料温度 (投入前) (°C), θ_2 : 内筒の温度 (試料投入前) (°C), θ_3 : 内筒の温度 (試料投入後) (°C) である。

なお、内筒の熱容量は、蒸留水 (40 g, 比熱1.0) を試料とした測定により、(5-1)式から逆算して求めた。また、単位は上に示したように、従来の単位系で表わし、次節で求めた回帰式のみSI単位を併記した。

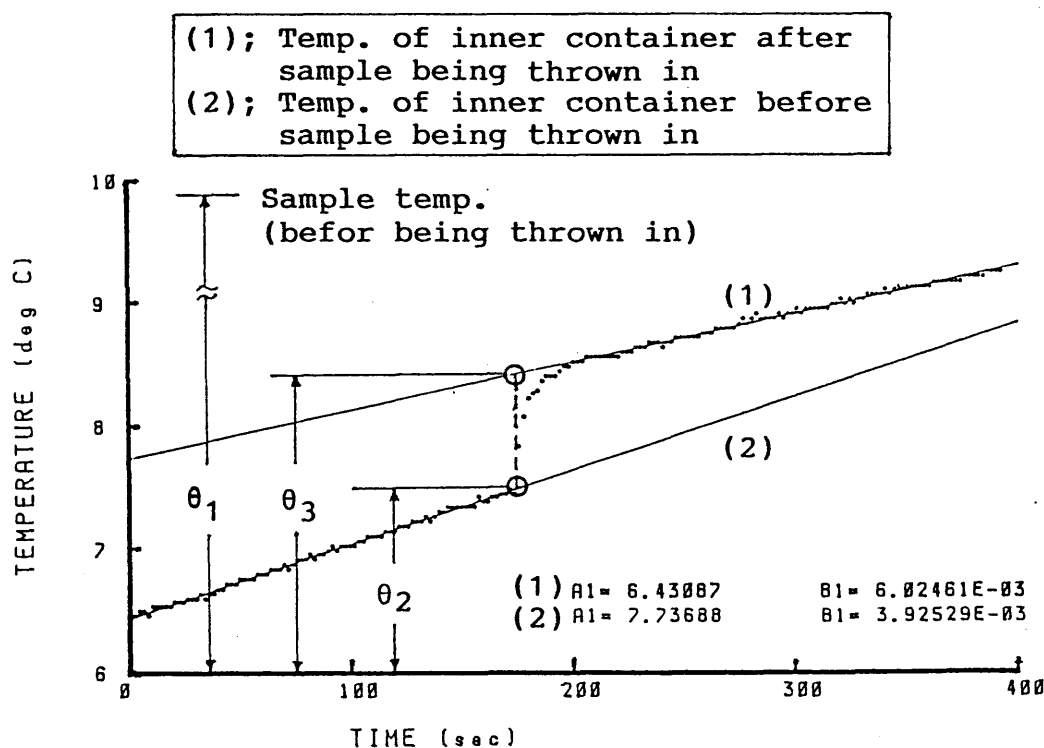


Fig.5-3 Temperatures used for data processing

5. 4. 実験結果および考察

5. 4. 1. 比熱既知の金属による測定精度の検定

試作した比熱測定装置の精度を確認するために、銅（普通商品，69.16 g），黄銅（64.14 g）およびステンレス鋼（60.95 g）を試料として、その比熱を測定した。その結果を、Table 5-1に示した。

伝熱工学資料⁽⁴⁶⁾によれば、銅（普通商品）の比熱は0.100である。本実験で得た値は、有効数字2ケタであるが、これと一致している。黄銅またはステンレス鋼の比熱は、参考値として測定したものである。組成によって比熱が異なるためか手元の文献の範囲では正確な記述が見当たらないが、類推するところでは、おおよその値が得られている。以上のことから、本比熱測定装置による測定値は、2ケタまでは信頼できるものと考えられる。ただし、黄銅の測定値にみられるように、同じ2ケタであっても小数点以下3ケタ目になるとバラツキが大きくなる。したがって、次に測定する穀粒の比熱についても、小数点以下2ケタまでは正しいが3ケタ目は信頼性が劣ると考えるべきである。なお考察すれば、用いた金属試料の熱伝導率は穀粒に比較して極めて大きく、このため、試料投入後の内筒温度の変化率は短時間で一定になった。これが効果的に作用して、実際にはこの間に生じていると考えられる、内筒と内筒以外の部分との熱の授受も少なく、その結果、良い値が得られたものと考えられる。一方、穀粒の場合には、測定誤差につながる熱の授受も金属試料の場合よりも大きいことが予想されるので、金属試料による検定結果を、穀粒の測定に100%あてはめることには無理があると思われるが、一応の目安としてこの検定結果を用いることは差し支えないであろう。

Table 5-1 Specific heat of metals

Metal		Copper	Brass	Stainless steel	
Specific heat (cal/g°C)	Data	(1)	0.099	0.091	0.12
		(2)	0.10	0.097	0.12
		(3)	0.10	0.098	0.13
	Average value	0.10	0.095	0.12	

5. 4. 2. 穀粒の比熱

(a) 粉の比熱

粉の比熱測定実験の結果を Fig. 5-4 に示した。図中の○印はコシヒカリの測定値を表わし、その1つのプロットは、同一水分の試料について3回行なった測定の平均値を示したものである。これを水分Mに関して直線で回帰し、回帰式、

$$c = 0.300 + 0.0101M, \quad r = 0.94 \quad (5-2-1)$$

を得た。ただし、

c : 比熱 (cal/g°C), M : 水分 % (w.b.), r : 相関係数である。この回帰直線を Fig. 5-4 中に、(1-a) で示した。

(5-2-1) 式をSI単位で書き直すと、

$$c' = 1.256 + 0.04228M \quad (5-2-2)$$

となる。ただし、

c' : 比熱 (KJ/Kg·K), M : 水分 % (w.b.)

である。

Fig. 5-4 で●印は大空の測定値を示したもので、コシヒカリと同様に、1つのプロットは3回の測定の平均値を表わす。これをMに関して直線で回帰した式は、

$$c = 0.281 + 0.0105M, \quad r = 0.95 \quad (5-3-1)$$

となった。これを、Fig. 5-4 中に (1-b) で示した。

(5-3-1) 式をSI単位で書き直すと、

$$c' = 1.175 + 0.04387M \quad (5-3-2)$$

となる。

以上、求めた2つの回帰式を、従来の単位系で表示した (5-2-1) 式と (5-3-1) 式を用いて比較すると、水分項の係数は、いずれもほぼ同じ大きさを持っているので、比熱に及ぼす水分の影響については、品種間の差が認められない。一方、両式の切片には明らかな差異がある。本実験の性格上、得られた回帰式の切片が、粉の絶乾状態における比熱を表わすものであるとは言い難いが、定性的には、大空の方が絶乾状態での比熱は小さいと判断される。前章で示した Table 4-6 の千粒重および Table 4-7 の3軸寸法から推察すると、両品種間の粒の充実度合いが、絶乾状態での比熱のちがいをもたらしめているものと思われる。

Fig. 5-4 には、過去の報告例も併て示した。これらを (2), (3), (4)

の番号で区別し、その内容については、Table 5-2に番号を同じくして示した。いずれも、用いられた品種が異なるため同列に論じることには難があるが、この図で見る限り、中粒種、短粒種とも比熱に大差はないといえる。

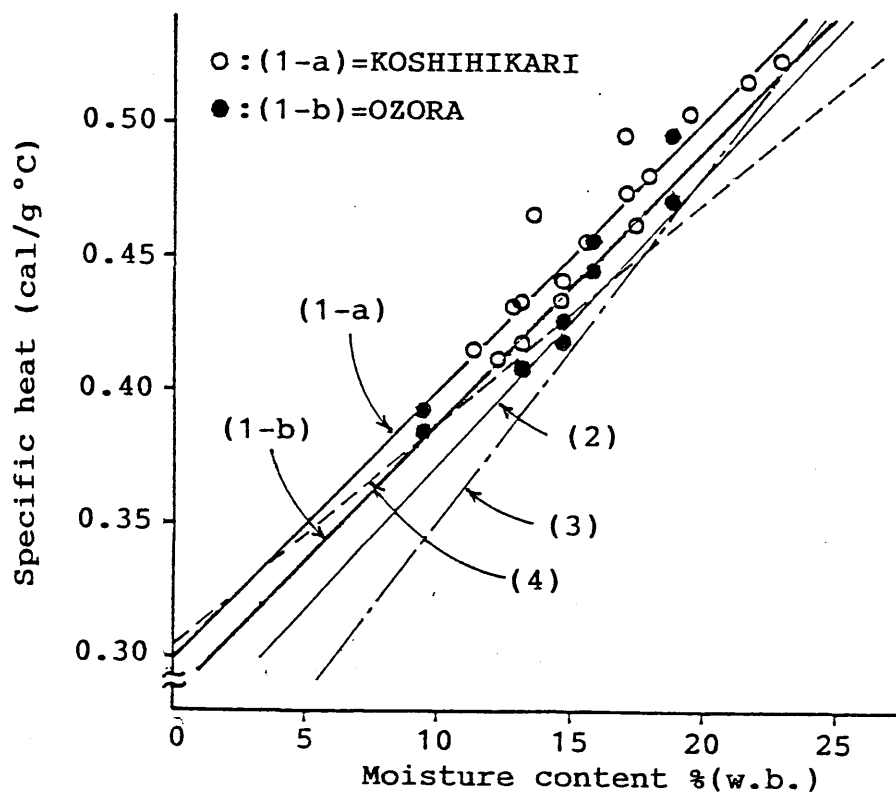


Fig.5-4 Specific heat of rough rice

Table 5-2 Specific heat of rough rice

Number indicated in Fig.5-4	Equation	Re- porter	Sample
1-a	$c=0.300+0.0101M$	Author	KOSHIHIKARI
1-b	$c=0.281+0.0105M$		OZORA
2	$c=0.265+0.0107M$	Haswell	Italian Origin
3	$c=0.22008+0.01301M$	Wratten	Saturn Medium grain
4	$c=0.3032+0.00833M$	Morita	Caloro Short grain

(Note) c: Specific heat (cal/g °C)
M: Moisture content % (w.b.)

(b) 玄米の比熱

実験結果を、Fig. 5-5に示した。図中の○印はコシヒカリ、●印は大空の測定値を表わしており、粳の場合と同様に、1つのプロットは3回の測定で得た値の平均値を示したものである。

コシヒカリの測定値を、Mに関して直線で回帰して、

$$c = 0.316 + 0.00799M, \quad r = 0.94 \quad (5-4-1)$$

を得た。この回帰直線を、Fig. 5-5中に(1-a)で示した。

(5-4-1)式をSI単位に書き直すと、

$$c' = 1.323 + 0.03345M \quad (5-4-2)$$

となる。

また、大空の測定値をMに関して直線で回帰して、

$$c = 0.290 + 0.0103M, \quad r = 0.93 \quad (5-5-1)$$

を得た。この回帰直線を、Fig. 5-5中に(1-b)で示した。

(5-5-1)式をSI単位に書き直すと、

$$c' = 1.214 + 0.04312M \quad (5-5-2)$$

となる。

(5-4-1)式および(5-5-1)式の水分項の係数をみると明らかなように、玄米の比熱では、粳と違って、水分の影響が品種によって異なるという結果を得た。このことから、比熱に与える水分の影響についても、粳殻の存在の有無が大きく関与し、熱伝導率に関して考察したのと同様に、粳殻が水分の影響をあたかも一定に保つような役割を果たしていることがわかる。

Fig. 5-5には、Haswell⁽⁹²⁾の結果をも併記し、(2)で示した。また、その内容をTable 5-3に示した。粳と玄米の比熱について、Haswellの式と比較してみると、玄米の比熱式の方が、粳に比べて切片が大きく、傾きは逆に小さくなるという傾向に関して、一致をみた。

以上の結果、粳および玄米の比熱は、他の文献値と比較しても予測される範囲に収まっており、簡易測定としては良好な結果が得られた。なお、本実験で得られた比熱式の適用範囲は、粳、玄米ともに、9%(w.b.) - 25%(w.b.)である。実測した試料の水分範囲よりも、適用範囲を高水分側で広くとったのは、高水分域で湿潤熱の影響はほとんどなく、実測値の信頼性も高水分域で高いと考えたからである。

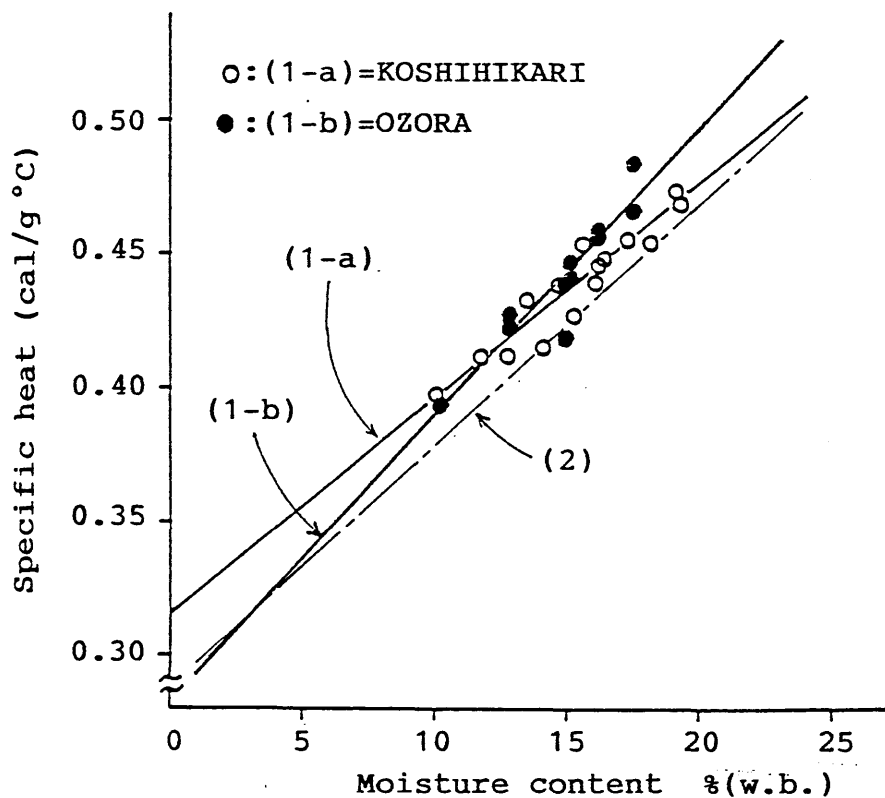


Fig.5-5 Specific heat of hulled rice

Table 5-3 Specific heat of hulled rice

Number indicated in Fig.5-5	Equation	Re- porter	Sample
1-a	$c=0.316+0.00799M$	Author	KOSHIHIKARI
1-b	$c=0.290+0.0103M$		OZORA
2	$c=0.287+0.0091M$	Haswell	Italian Origin

(Note) c: Specific heat (cal/g °C)
M: Moisture content %(w.b.)

(c) 測定装置の自動化による効果

測定した温度は、前述したように、2通りの方法で記録した。その1つはコシヒカリの比熱測定において用いた、ペンレコーダに記録する方法である。このとき、測定の終了判定は、記録紙上で温度が直線を呈することを目で確認して行なう。この判定には主観を伴う恐れが多分にあるので、安全を期して、測定時間を長くとることになる。このため、1回の測定には約30分を要した。また、この温度記録を用いて、Fig. 5-3に示したような回帰直線を求めるためには、時間軸上に数点を定めて、その時刻に対応する温度を目で読み取る必要がある。この場合に、個人誤差が混入する恐れがあり、これは1つの欠点である。

これに対して大空を用いた測定では、コンピュータに2秒のサンプリング間隔で温度を自動記録させた。この温度をディスプレイ上にグラフ化して表示させるとともに、そのデジタル値および連続する測定点間の温度差をも表示させた。測定の終了は、ディスプレイに表示された温度差が一定になった時点としたので、主観が入る余地はなく、測定を短時間で済ますことができた。Fig. 5-3は、自動測定による測定温度を示したものである。時刻軸の0点の以前に2-3分の攪はんを行なっているので、これも含めて、測定時間は約10分であった。したがって、先の方法に比べて、測定時間が約1/3に短縮されたことになる。一方、Fig. 5-3に示した回帰直線は、60点から100点の温度データを回帰した結果である。先の方法では測定者が目で読み取るため、せいぜい5、6点、多くても10点程度であるのに比べて、測定値にはるかに忠実な回帰式が得られると考えられる。

このように、測定を自動化することによって測定時間が短縮され、また、個人誤差も大幅に排除できたことは、1つの成果である。

5.5. 摘要

コシヒカリおよび大空の2品種について比熱の測定を行なった結果、粳および玄米の比熱を水分の1次関数で表わすことができた。これを要約すると、次のようになる。1) 粳の比熱式を、コシヒカリについては(5-2-1)式および(5-2-2)式で、大空については(5-3-1)式および(5-3-2)式で表わすことができた。この結果、粳の比熱に及ぼす水分の影響は、品種によらずほぼ一定であることが認められた。

2) 玄米の比熱式を、コシヒカリについては(5-4-1)式および(5-4-2)式で、大空については(5-5-1)式および(5-5-2)式で表わすことができた。この結果、玄米では、比熱に及ぼす水分の影響が品種間で異なることが判明した。ただし、比熱式から求められる比熱値には、大差なかった。

3) 本実験結果は、他の文献値と比較して、予測される範囲に収まった。

4) コンピュータを用いた自動測定装置を構成したことにより、測定時間の短縮を図ることができた。

第6章 結論

6. 1. 本研究の成果

本研究の目的の1つは、穀物の熱物性値の測定に適した測定法を開発することにあった。`穀物に適した`という言葉を換言すれば、短時間で測定可能ということである。これは、次に言う意味での「短時間」ではない。説明すれば、一般に非定常法は測定が「短時間」で行なえるといわれるが、それは、試料を仮定した条件下で加熱あるいは冷却はじめてから測定終了までの時間を指した表現である。しかし、ほとんどの非定常法が初期条件として一様な温度分布を仮定しているため、実際には、これを実現するために測定開始以前に長い時間を費やすことになり、試料の状態が変化しやすい高水分の穀物には好ましくない時間が課されることになる。この時間まで含めれば、非定常法をもってしても、穀物のように熱伝導率の小さい試料では長時間を必要とすることになる。これが、測定値のバラツキの大きな原因であると考えられるし、また、第4章で一覧した既往のデータに温度依存性を示したものが2例しかないのも、これが原因である。

そこで、初期条件に関する具体的な情報を用いずに材料内の温度分布を解析的に知る方法（境界値法）を開発し（第2章）、これを用いて、温度伝導率測定法を提案した（第3章）。境界条件にも任意性が認められたが、この方法の最大の特徴は、初期条件が任意であるという点にある。この長所を生かして、試料をセットした直後に測定を開始できるようになったことにより、穀物に不都合な時間の消費を避けることができ、従来法に比べて、水分移動に関する懸念を少なくすることができた。

更に、この特徴は、温度伝導率の温度依存性を求める測定において、極めて有効であることが実証された。従来、穀物に適用されてきた測定法では、温度伝導率が温度とともに変化する条件下での測定に対応できなかったのに対し、本測定法では、試料温度が連続して上昇している途中の任意の区間の温度データ（ただし、この区間内で温度伝導率の温度依存性が無視できること）を用いて温度伝導率を決定できるので、1回の連続した測定データから温度依存性を求めることができた。

この方法を適用して、本研究の第2の目的である籾および玄米の温度伝導率を測定し、熱伝導率を算出（間接測定）した（第4章）。ここで目指した熱物性値は、穀粒充填層内の空気が静止した条件下での値であった。この条件を満たすための一連の予

備実験を行なった結果、穀粒層の温度伝導率は、層厚みが大きくなると対流の影響を受けて変化することが捉えられ、対流が発生しない（あるいは対流の影響が無視する）層厚みの指標を実験的に示した。

更に、本実験を行なうことにより、粉の熱伝導率は水分あるいは温度に関して1次式で表わされる関係にあることが認められ、これらを変数とした、熱伝導率の算定式を求めることができた。玄米の熱伝導率についても同様の定式化を行なったが、玄米では、水分の2次の項を含む形が得られた。このことから、粉穀の存在が、粉の熱伝導率に寄与する水分の効果を一定に保つ（高水分域で抑える）役割を果たしていることが、推察された。

これらは、いずれも、2品種の穀物について得られた知見であるが、品種間の差に目を移すと、粉の熱伝導率が品種によって異なるのに対して、玄米では、大きな違いを示さないという結果を得た。

以上の熱伝導率の算定式から、かさ密度が試料水分によらず一定であるとの仮定の下に温度伝導率を逆算して水分依存性を調べた結果、水分に関して、傾きが負の直線関係にあることが認められた。しかし、実際の充填層においては、水分とは独立にかさ密度が一定であるというのは現実的でないことを指摘して、定性的な推察にとどめた。

最後に、熱伝導率の間接測定に用いるための比熱測定を行なった（第5章）が、簡易測定においても良好な結果を得ることができ、2品種の粉および玄米の比熱を水分の1次式で表わし得た。また、データの取得方法を自動化することにより、測定時間の短縮が可能になった。

以上に述べた結果を以て、本研究の当初の目的は、ほぼ達成されたと考える。しかし、測定結果に対して、十分な理解を示し得ない部分が1部残った。また、この結果を得る過程で新たな問題が姿を現わし、本研究で得た結果が、熱物性値の中でも実に基本的な限定された条件下で得られた値に過ぎないこと、したがって、ここで得たデータをもとにして更に研究を進展させる必要があることを痛感させられた。

以下、節を変えてこの問題を整理し、今後の研究の指標としたい。

6. 2. 今後に残された問題点

6. 2. 1. 取得データに関わる問題

本研究で提案した測定法が、温度依存性を求める上で有効であることを利用して、熱伝導率と温度の関係を示すデータを数多く取得することができた。その結果、高水分の粉ならびに玄米の熱伝導率が、15℃付近で最小値を示すデータを得た。これが、正しく熱特性を示したデータであるか否かの確たる判断を提示しえなかったが、その原因は、本研究が穀粒内の熱移動に関する物理的考察に欠けていたことにある。

ここで得た熱物性値を利用する例として、貯蔵庫内の温度解析条件を想定してみると、通常貯蔵される穀物水分の範囲は、求めた算定式でカバーされている。しかし、実際には、貯蔵庫内で水分が集中するスポットが生じることは周知の通りであるので、高水分域での熱特性を知っておくことは、貯蔵庫内での品質上の事故を防ぐ意味でも重要である。このような実用上の問題に対応するために、高水分域での熱特性を今後とも調べるとともに、取得データに物理的理解を添えて提供することが必要であろう。また、これと並んで、取得データを基にして、実用に耐える熱物性値が簡単に計算されるモデルの構築が必要と考える。

6. 2. 2. 新たな問題

本研究では、穀粒充填層内の空気が静止した状態で熱物性値を求めた。しかし、乾燥機内、あるいは、貯蔵庫内では、空気が流動しているのが常態である。実験の結果では、層厚みが増すと温度伝導率、したがって熱伝導率が大きくなるという事実が明らかになったが、こうしてみると、今回得たデータは、実際の現象のほんの一部を垣間見たに過ぎないことが認識される。実際の装置内の現象に対応できる情報を得るためには、今後、穀粒充填層内の空気が移動している状態の下で熱特性を把握することが大きな課題として挙げられる。更に、空気のみでなく、水分移動が生じたとき熱物性値がどのような値として我々の目に捉えられるのかを示すまとまったデータはなく、推論の域を出ていない。これを、理論ならびに実験的に説明することが、本研究によって指し示された新たな目標である。

記号

- q : 熱流の方向に垂直な単位断面積を単位時間に通過する熱流量, J/s
 A : 熱流の方向に垂直な断面積, m^2
 x : 材料内の位置を示す座標, m
 t : 時間, s
 t_0 : 時刻または周期, s
 a, l : 材料の厚さ, m
 u, v, w : 温度, $^{\circ}C$
 θ : 温度, $^{\circ}C$
 c : 比熱, cal/g $^{\circ}C$
 c' : 比熱, KJ/Kg K
 α : 温度伝導率, m^2/s
 k : 熱伝導率, W/mK
 ρ : 密度, Kg/ m^3
 γ : かさ密度, Kg/ m^3
 ζ : 荷重
 F_0 : フーリエ数
 M : 水分, %(w.b.)
 B_i : ビオー数

引用文献

- 1) 飯田喜宏, 重田治彦, 任意加熱による熱物性値の測定法に関する研究 (第1報, 平板状試料における温度伝導率の測定), 日本機械学会論文集 (B編), 47 (415), 470-477 (1981)
- 2) 石田智之, 三野徹, 丸山利輔, 低含水領域における土壌の熱伝導, 農土論集 (103), 28-34 (1983)
- 3) 石田智之, 三野徹, 丸山利輔, 高含水領域における土壌の熱伝導, 農土論集 (110), 67-74 (1984)
- 4) 石田智之, 三野徹, 星 仰, 丸山利輔, 粘土、有機物複合体の熱伝導, 農土論集 (111), 63-72 (1984)
- 5) 今村 勤, 物理とフーリエ変換, 岩波全書, (1981)
- 6) 大下誠一, 細川 明, 中川健治, 初の熱特性, 三重大学農学部学術報告 (57), 115-125 (1978)
- 7) 大下誠一, 中川健治, 堀部和雄, 農産物の熱特性及びその計測に関する基礎的研究 (第1報) - 周期的熱伝導の数値解析と基礎実験 -, 農機誌, 44 (3), 469-476 (1982)
- 8) 岡田昌志, 片山功蔵, 堀口 博, 日本機械学会誌, 79 (688), 247-255 (1976)
- 9) 片山功蔵, 齊藤彬夫, 非定常熱伝導の数値解法 (第1報, アナログ計算機による解法), 日本機械学会論文集 (第2部), 34 (263), 1224-1231 (1968)

- 10) 片山功蔵, 斉藤彬夫, 非定常熱伝導の数値解法 (第2報, デジタル計算機による解法), 日本機械学会論文集 (第2部), 34 (268), 2165-2171 (1968)
- 11) 片山功蔵, 斉藤彬夫, 非定常熱伝導の数値解法 (第3報, 一次元円柱座標系問題), 日本機械学会論文集 (第2部), 38 (306), 388-396 (1972)
- 12) 片山功蔵, 大内一紘, 小竹進一郎, 非定常熱伝導による熱的物性値測定法 (平面熱源による方法), 日本機械学会論文集 (第2部), 34 (267), 2012-2018 (1968)
- 13) 片山功蔵, 岡田昌志, 熱的物性値の非定常比較測定法, 日本機械学会論文集 (第2部), 35 (272), 832-839 (1969)
- 14) 片山功蔵, 岡田昌志, 吉田和道, 日本機械学会論文集 (第2部), 37 (298), 1195-1203 (1971)
- 15) 片山功蔵, 岡田昌志, 吉田利夫, 日本機械学会論文集 (第2部), 37 (299), 1353-1360 (1971)
- 16) 加藤豊文, 鎌田佳伸, 新谷一人, 大島信徳, 繊維状物質の有効熱伝導率、冷凍
54 (626), 963-971 (1979)
- 17) 神本正行, 金成克彦, 高橋洋一, 初心者のための熱物性測定 (2) 熱伝導率、熱拡散率 (そのI), 熱測定, 8 (3), 115-122 (1981)
- 18) 神本正行, 金成克彦, 高橋洋一, 初心者のための熱物性測定 (2) 熱伝導率、熱拡散率 (そのII), 熱測定, 8 (4), 150-156 (1981)
- 19) 亀岡孝治, 粉の乾燥に関する基礎的研究, 博士論文 (東京大学) (1984)

- 20) 小林清志, 熱定数の迅速測定法—ステップ加熱非定常法を中心に—, 機械の研究, 30 (7), 837-842 (1978)
- 21) 小林清志, 小林辰志, 方形波パルス加熱による熱定数測定法の研究, 日本機械学会論文集 (B編), 46 (407), 1318-1326 (1980)
- 22) 小針正夫, 清水幸夫, 遠藤美保子, 稻積彦二, 植物繊維抄造成形材の厚さ方向有効熱伝導度, 化学工学論文集, 7 (6), 575-580 (1981)
- 23) 坂井直樹, 細川 明, 食品の凍結、融解過程におけるエンタルピー変化 (第3版) 農機誌, 40 (3), 369-374 (1978)
- 24) 坂爪伸二, 関 信弘, 低温度域における氷および雪の熱特性, 日本機械学会論文集 (第2部), 44 (382), 2059-2069 (1978)
- 25) 社団法人食品需給研究センター編, 食糧備蓄と穀物貯蔵技術の研究, 第1章, (1981)
- 26) 新庄 彬; 白井清恒, 土壤の熱伝導係数の測定, 三重大学農学部学術報告, (51), 41-49 (1976)
- 27) Akira Sugawara, On thermal Conductivity of Porous Materials, 応用物理, 30 (1), 17-23 (1961)
- 28) 菅原 章, 砂岩などの多孔性物質の熱伝導率におよぼす湿分の影響, 応用物理 30 (12), 899-905 (1961)
- 29) G. D. スミス著, 藤川洋一郎訳, 電算機による偏微分方程式の解法, サイエンス社, (1979)

- 30) 瀬能誠之, 山口智治, 相原良安, 小原俊一, 鋼製サイロによる穀物貯蔵に関する基礎的研究 (I I) - 穀物の基礎的物理性について -, 農業施設 6 (1), 10-18 (1976)
- 31) 高橋洋一, 神本正行, 初心者のためのカロリメトリー, I I I. 非等温過程のカロリメトリー, 熱測定 10 (3), 115-123 (1983)
- 32) 竹内正頭, 鈴木 学, 非定常細線加熱法の検討 (固体の熱伝導率を計る場合に生ずるすきまの影響), 日本機械学会論文集 (B編) 50 (451), 874-880 (1984)
- 33) 竹越栄俊, 井村定久, 平沢良男, 竹中利一, 非定常細線加熱比較法による固体の熱伝導率測定法, 日本機械学会論文集 (B編) 47 (419), 1307-1316 (1981)
- 34) 竹越栄俊, 平沢良男, 井村定久, 低温断熱を対象とした粉体の伝熱特性 (第1報, 大気圧および減圧下の有効熱伝導率, 日本機械学会論文集 (B編), 50 (451), 809-817 (1984)
- 35) 棚沢 泰, 湿れる物質 (特に土砂) の熱常数測定法 (第1報), 機械学会誌, 第35巻, 第181号, 390-399, (1932)
- 36) 棚沢 泰, 伝熱率測定器の寸法に依る誤差に就て, 機械学会誌, 第35巻, 第180号, 325-332 (1932)
- 37) 棚沢 泰, 週期的熱伝導問題に於る熱波と温度波の二三の性質に就て, 機械学会誌, 第37巻, 第212号, 872-873 (1934)
- 38) 棚沢 泰, -研究速報-, 鉍物質粒体の熱常数に及ぼす水分の影響, 機械学会誌, 第38巻, 第216号, 297-208 (1935)

39) 棚沢 泰, 鉍物質粒体の熱常数に及ぼす水分の影響, 機械学会論文集, 第2巻, 第8号, 352-358 (1936)

40) 谷下一夫, 長坂雄次, 長島 昭, 山口隆美, 菅原基晃, 非定常細線加熱法による血液の熱伝導率の測定, 日本機械学会論文集 (B編), 47 (421), 1784-1791 (1981)

41) 中馬 豊, 村田 敏, 内田 進, パラフィン模型による任意形状農産物の有効温度伝導率の測定について, 農業機械学会誌, 30 (2), 100-105 (1968)

42) 中馬 豊, 村田 敏, 円柱状野菜の有効温度伝導率の測定について, 農業機械学会誌, 30 (4), 237-240 (1969)

43) 長坂雄次, 長島 昭, 液体の熱伝導率の高精度測定に関する研究 (第2報, 非定常細線法による電気伝導性液体の熱伝導率の絶対測定), 日本機械学会論文集 (B編), 47 (419), 1323-1331 (1981)

長坂雄次, 岡田 広, 鈴木順一, 長島 昭, 液体の熱伝導率の高精度測定に関する研究 (第3報, 高圧力下におけるNaCl水溶液の測定), 日本機械学会論文集 (B編), 50 (451), 690-697 (1984)

45) 西川 潤 著, 食糧-21世紀の地球, 岩波ブックレットNo27, 2-10, 岩波書店 (1983)

46) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 明善印刷 (株), 255 (1966)

47) 日本熱物性研究会編, 熱物性資料集, 断熱材編, 養賢堂 (東京), (1983)

- 48) 農産物性研究グループ(京都大学農学部農産加工機械学研究室), 農産物性研究(第1集) 農産物の物性および測定法に関する総合的研究, 140-153 (1979)
- 49) 編集(財)農政研究センター, 昭和51年度版食糧経済白書, 食糧技術の進歩と課題, 御茶の水書房(1976)
- 50) 農林水産大臣官房調査課監修, 財団法人農林統計協会編, 80, 財団法人 農林統計協会(1984)
- 51) 兵藤申一, 物理工学実験1 物理実験者のための13章, 東京大学出版会(1976)
- 52) 藤巻正生, 井上五郎, 田中武彦責任編集, 日本人の主要食品を科学する, 米, 大豆と魚, 第4章, 光生館(1984)
- 53) ヘンダーソン/ペリー著, 高倉直, 他3名訳, 農業プロセス工学, 255-256, 東京大学出版会
- 54) 星雅也, 長島昭, 液体金属プローブによる高温融体の熱伝導率の非定常測定, 日本機械学会論文集(B編), 47(415), 478-483(1981)
- 55) 細川明, 増本浩士, 穀粒の熱伝導率, 農機誌, 32(4), 302-305(1971)
- 56) 細川明, 本橋園司, 1粒のもみの恒率乾燥速度, 農機誌, 37(3), 326-330(1975)

- 57) 堀部和雄, 周期的温度変化をうける農産物の熱的な特性について (第1報) 球形農産物の熱拡散率の算出法, 三重大学農学部学術報告, 59, 123-135 (1979)
- 58) 松本敏三, 総合偏微分方程式, 第2版, 706-707, 現代工学社
- 59) 三浦隆利, 深井 潤, 大谷茂盛, 連続昇温過程における熱拡散率の測定一周期加熱による方法一, 化学工学論文集, 9 (2), 129-134 (1984)
- 60) 山口信吉 他, 玄米の比熱と湿潤熱, 農機学会第33回講演要旨, 138 (1974)
- 61) 山田悦郎, 高橋カネ子, 太田照和, 分散系混合物の有効熱伝導率に関する実験, 冷凍54 (626), 973-982 (1979)
- 62) 山田豊一, 馬鈴薯の伝熱特性について, 農化, 44 (12), 587-590 (1970)
- 63) 山田豊一, 玄米の熱伝導度, 農化, 46 (12), 665-668 (1972)
- 64) Angstrom, A.J.: Phil. Mag., 25, 130 (1863)
- 65) Anwar Alam, G.C. Shove, Hygroscopicity and thermal properties of soybeans, Transactions of the ASAE, 707-709 (1973)
- 66) ASTM, Standard method of test for thermal conductivity of materials by means of the guarded hot plate, ASTM Standards, part 3, 1084, Am. Soc. for Testing Materials (1955)

- 6 7) Babbit, J.D. ,The thermal properties of wheat in bulk ,Can. J. of Research, vol23, section F; 388-401 (1945)
- 6 8) Bakke,A.L. and Stiles,H., Thermal conductivity of stored oats with different moisture content , Plant Physiology,10,521 (1935)
- 6 9) Bennett,A.H., Chace,W.G., and Cubbedge,R.H., Eestimating thermal conductivity of fruit and vegetable components-the Fitch method, ASHRAE Journal 4:(9),80-85 (1962)
- 7 0) Bennett,A.H., Chace,W.G. and Cubbedge, R.H.,Thermal conductivity of Valencia orange and Marsh grapefruit rind and juice vesicles, ASHRAE Trans., 70:256 (1964)
- 7 1) Bilanski, W.K. and Fisher, D.R.,Thermal conductivity of rapeseed , Trans. ASAE, 19,788-791 (1976)
- 7 2) Blackwell, The axial-flow error in the thermal conductivity probe, Can. J. of Physics 34: 412-417 (1956)
- 7 3) Brooker, D.B., Bakker-Arkema and Hall, C.W., Drying cereal grains, Chap.1 and Chap.4,THE AVI PUBLISHING COMPANY.INC. (1974)
- 7 4) Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., Conduction of Heat in Solid , Oxford Univ.,Press (1947)
- 7 5) Chandra,S and Muir,W.E., Thermal conductivity of spring wheat at low temperature, Trans. of ASAE, 14(4): 644-646 (1971)

- 7 6) DE Groot, J.J., Kestin, J. and Sookiazian, H., Instrument to measure the thermal conductivity of gases, *Physica* 75, 454-482 (1974)
- 7 7) Deissler, R.G. and Beogli, J.S., An investigation of effective thermal conductivities of powders in various cases, *ASAE Trans.*, 1417-1425 (1958)
- 7 8) D'Eustachio, D. and Schreiner, R.E., A study of a transient method for measuring thermal conductivity, *ASHVE Trans.*, 58:332-39 (1952)
- 7 9) De Vries, D.A., A non-stationary method for measuring thermal conductivity of soils in site, *Soil Science* 73:83-89 (1952)
- 8 0) Dickerson, R.W., An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods, *Food Technol.*, 19:880-886 (1965)
- 8 1) Dickerson, R.W., Jr. and Read R.B., Jr., Calculation and measurement of heat transfer in foods, *Food Technol.*, 22:1533-38 (1968)
- 8 2) Disney, D.A., The specific heat of some cereal grains, *Cereal Chemistry*, 31:229-334, (1954)
- 8 3) Dua, K.K. and Ojha, T.P., Measurement of thermal conductivity of paddy grains and its by-products, *J. agric. Engng. Res.*, 14(1) 11-17 (1969)
- 8 4) Duncan, G.A., Bunn, J.M. and Henson, W.H., Jr., Thermal conductivity of burley tobacco during the cure, *Trans. of the ASAE* 9(1):36-38 (1 966)
- 8 5) Eevans, H.L. and Bboard, P.W., Studies in canning processes I. Effects of headspace on heat penetration in products heating by conduction ,

Food Technol., 8, 258 (1954)

8 6) Evans, H.L., Studies in canning processes II. The effects of the variation with temperature of the thermal properties of foods, Food Technol., 12:276 (1958)

8 7) Farrall, A.W., Chen, P.Y., Wang, P.Y., JDhanak, A.H., Hendrick, T. and Heldman, D.R., Thermal conductivity of dry milk in a packed bed, Trans. of the ASAE, 13(3):391-394 (1970)

8 8) FERNANDEZ|MARTIN, F. and MONTES, F., Thermal conductivity of creams, J. of Dairy Res. 44 :103-109 (1977)

8 9) Fitch, A.L., A new thermal conductivity apparatus, Am. Phys. Teacher 3:135-136 (1935)

9 0) Ford, R.J., Thermal diffusivity of alfalfa stems, Trans. of the ASAE 12(2):249-251 (1969)

9 1) Fraser, B.M., Verma, S.S. and Muir, W.E., Some physical properties of fababeans, J. agric. Engng. Res. 23:53-57 (1978)

9 2) Haswell, G.A., A note on the specific heat of rice, oats and their products, Cereal Chemistry 31:341-343 (1954)

9 3) Hooper, F.C. and Lepper, F.R., Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities, ASHVE Trans. 56:309-24 (1950)

9 4) Hooper, F.C. and Chang, S.C., Development of the thermal conductivity probe, ASHVE Trans 59:463 (1953)

- 9 5) Hurwicz, H. and Tischer, R.G., Heat Processing of Beef II .
Development of isothermal and isochronal distributions during heat
processing of beef, Food Res., 17(6):518-542 (1952)
- 9 6) Jasansky, A. and Bilanski, W.K., Thermal conductivity of whole and
ground soybeans ,Trans. Amer. Soc. Agric. Eng. 16:100-103 (1973)
- 9 7) Jefferson, T.B., Witzell, O.W. and Sibbitt, W.L., Thermal conductivity
of graphite-silicone oil and graphite-water suspensions, Ind. Eng. Chem.
50(10):1589-1592 (1958)
- 9 8) Kazarian, E.A. and Hall, C.W., Thermal Properties of Grain, Trans.
of the ASAE 8(I):33-48 (1965)
- 9 9) Kerrisk, J.F., Thermal diffusivity of heterogeneous materials,
J. of Applied Physics, 42(1):267-271 (1971)
- 1 0 0) Kethley, T.W., Cown, W.B. and Bellinger, F., An estimate of thermal
conductivities of fruits and vegetables, Refrig. Eng. 58:49-50 (1950)
- 1 0 1) Krischer, O., Esdorn, H., VDI-Forsch,-h., 450:28 (1955)
- 1 0 2) Kunii, D. and Smith, J.M., Heat transfer characteristics of porous
rocks, A.I.Ch.E Journal, 6(1):71-78 (1960)
- 1 0 3) Lentz, C.P., A transient heatflow method of determining thermal
conductivity, Can. J. Tech. 30:153-166 (1952)
- 1 0 4) Matthews, Jr.,F.V. and Hall, C. W., Method of finite differences
used to relate changes in thermal and physical properties of potatoes,

Trans. of the ASAE 11(4):558-562, 565 (1968)

1 0 5) Mooté, I., The effect of moisture on the thermal properties of wheat, Can. J. of Technol. 31:57-62 (1953)

1 0 6) Morita, T. and Singh, R.P., Physical and thermal properties of short-grain rough rice, Trans. of the ASAE 22(3):630-636 (1979)

1 0 7) Moysey, E.B., Shaw, J.T. and Lampman, W.P., The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed , Trans. of the ASAE, 768-771 (1977)

1 0 8) Muir, W.E. and Viravanichai, S., Specific heat of wheat, J. agric. Engng Res., 17:338-342 (1972)

1 0 9) Ojha, T.P., Farrall, A.W., Dhanak, A.M. and Stine, C.M., A method of determining heat transfer through powdered food products , Trans. of the ASAE 10(4):543-544 (1967)

1 1 0) Okazaki, M., Ito, I. and Toei, R., Effective thermal conductivities of wet granular materials, AIChE Symposium Series No.163, vol173, 164-176

1 1 1) Oshita, S., Estimation technique of temperature distribution using boundary temperatures-Theoretical verification-, Symposium on thermophysical Properties, 49-52 (1984)

1 1 2) Oxley, T.A., The properties of grain in bulk. III The thermal conductivity of wheat, maize and oats , J. Soc. Chem. Ind., London 63:53-55 (1944)

- 1 1 3) Parker, W.J., Jenkins, R.J., Butler, C.P., Abott, G.L.,
J. Appl. Phys. 32,9,1679 (1961)
- 1 1 4) Pfalzner, P.M., The specific heat of wheat, Can. J. of Technol.
29:261-264 (1951)
- 1 1 5) Qashou, M.S., Vachon, R.I. and Touloukian, Y.S., Thermal
conductivity of foods, ASHRAE Trans., 78:165-183 (1972)
- 1 1 6) Rao, M.A., Barnard, J. and Kenny, J.F., Thermal conductivity and
thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes,
Trans. of the ASAE, 1188-1192 (1975)
- 1 1 7) Reidy, G.A. and Rippen, A.L., Methods for Determining Thermal
Conductivity in Foods, Trans of the ASAE . 14(2),248-254, (1971)
- 1 1 8) Roberto Cuevas and Munir Cheryan, Thermal conductivity of
liquid foods- A Review, J. of Food Process Engineering 2:283-306 (1978)
- 1 1 9) Schleiermacher, A.L.E.F. and Wiedemann Annalen, Physik, vol 34 (18
88)
- 1 2 0) Sharma, D.K. and Thompson, T.L., Specific heat and thermal
conductivity of sorghum, Trans. of the ASAE 16(1):114-117 (1973)
- 1 2 1) Suter, D.A., Aargrawal, K.K. and Cclary, B.L., Thermal properties
of peanut pods, hulls and kernels, JTrans. of the ASAE 18(2):370-375 (1975)
- 1 2 2) Sweat, V.E. and Haugh, C.G., A thermal conductivity probe for
small food samples, Trans. of the ASAE 17,56-58 (1974)

1 2 3) Sweat, V.E. and Parmelee, C.E., Measurement of thermal conductivity of dairy products and margarines, J. of Food Proc. Engr. 2:187-197 (1978)

1 2 4) Timbers, G.E., Properties of rapeseed I. Thermal conductivity and specific heat, Can. Agri. Eng. 17:81-84 (1975)

1 2 5) Triebes, T.A. and King C.J., Factors influencing the rate of heat conduction in freeze-drying , I & EC Process Design and Ddevelopment , 5(4):430-435 (1966)

1 2 6) Van der Held, E.F.M. and Van Drunen, F.G., Aa method of measuring the thermal conductivity of liquids, Physica, 15(10):865-881 (1949)

1 2 7) Van Wijk, W.R. and Bruijn, P.J., Determination of thermal conductivity and volumetric heat capacity of soils near the surface, Soil sci. soc. Amer. Proc., 28:461-464 (1964)

1 2 8) Vos, B.H., Measurements of thermal conductivity by a non-steady-state method, Appl.Sci. Res., Section A , vol 5, The Hague, 425 (1955)

1 2 9) Wallapapan, K. and Sweat, V.E, Thermal conductivity of defatted soy flour , Trans. of the ASAE, 1440-1444 (1982)

1 3 0) Watts, K.C. and Bilanski, W.K., Calorimetric determination of the specific heat of soybeans, Can. Agr. Eng. 12(1):45-47 (1970)

1 3 1) Watts, K.C. and Bbilanski, W.K., Method for estimating the thermal diffusivity of whole soybeans, Trans. of the ASAE 16:1143-1145 (1973)

- 1 3 2) Woodams, E.E. and Nowrey, J.E., Literature values of thermal conductivity of foods, Food Technol.vol 22:494-502 (1968)
- 1 3 3) Wratten F.T., Poole,W.D., Chesness, J.L., Bal, S. and Ramarao, V., Physical and thermal properties of rough rice,Trans. of the ASAE 12(6) : 801-803 (1969)
- 1 3 4) Wright, M.E. and Porterfield,J.G.,Specific heat of spanish peanuts , Trans. of the ASAE 13(4):508
- 1 3 5) Young, J.H. and Whitaker, T.B., Specific heat of peanuts by differential scanning calorimetry , Trans. of the ASAE 16(3): 522-524(1973)

謝辞

本研究は、筆者が東京大学大学院で研究を始めるに当たって、細川 明先生（当時東京大学教授、現宇都宮大学教授）より粉の熱伝導率の測定というテーマを頂いたことに端を発する。このときは周期加熱法による測定を行なったが当時の経験がなかったならば、新しい測定法の開発も不可能であったと思われる。最も大切なテーマを頂戴した先生に感謝する次第である。その後、農産機械学講座を引き継がれた森嶋 博先生（東京大学教授）には常に励ましのお言葉を頂き、研究の骨格を見据えて、研究に不可欠な意欲を絶やさぬよう配慮して頂いた。また、瀬尾康久先生（東京大学助教授）からは近い立場から論文をまとめる上での様々な御指導を頂いた。相良泰行先生（東京大学講師）には、筆者が大学院在学中より今日まで、常に研究の核心に触れるアドバイザーとして御指導頂いた。また、亀岡孝治氏（サスカチュワン大学リサーチフェローを経て三重大学助手）には、熱物性に関するデータのやりとりを介して、様々な情報を与えて頂いた。西山喜雄先生（岩手大学助教授）には、タマボウ モデルの手解きを賜わった。

本研究の骨子は、約1年前、桐栄良三先生（当時、京都大学教授）のご配慮により、第4回国際乾燥シンポジウム（京都）において発表する機会に恵まれ、それを契機に本論文の形に急速に近づいていった。また、岡崎守男先生（京都大学教授）には、貴重な時間を費やして筆者との議論に応じて頂き、境界値法の理論を整理する考え方を授けて頂いた。

本研究は、筆者が三重大学に着任して以来7年間の集大成であるが、その間、中川健治先生（三重大学教授）は、遅々として進まぬ筆者の研究を忍耐強く見守って下さり、研究上のあらゆる便宜を図って下さった。このような御配慮を賜わることがなかったら、本論文の完成はなかったものと思われる。ここに満腔の謝意を表する次第である。また、堀部和雄先生（三重大学助教授）をはじめ、三重大学農業機械学科の諸先生方には、研究面で日常적으로世話になった。特に、佐藤邦夫先生（三重大学助手）には、コンピュータに関する基礎知識を伝授して頂き、計測システムの自動化をすすめる上で大変お世話になった。溝口 勝先生（三重大学助手）には、熱移動に関する考え方を教えて頂いた。

矢野俊正先生（東京大学教授）、木谷 収先生（東京大学教授）、坂井直樹先生

(東京大学助教授)には、本論文を閲読していただき、御批評を賜わった。以上の方々に重ねて謝意を表する次第である。

(1985年 夏：記)