HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	粉乳の熱伝導率
Author(s)	伊藤, 和彦
Citation	北海道大学農学部邦文紀要, 13(2), 109-117
Issue Date	1982-03-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/11968
Type	bulletin (article)
File Information	13(2)_p109-117.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

粉　乳　の　熱　伝　導　率

伊　藤　和　彦
(北海道大学農学部農畜産加工機械学教室)
(昭和56年9月7日受理)

Thermal Conductivity of Dry Milk

Kazuhiko ITOH
(Laboratory of Agricultural Process Engineering, Faculty, of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo, Japan)

緒　　言

近年，我国の粉乳製造技術は長足の進歩を遂げ，特に乾燥技術は世界的に高い水準にある。現在，我国では水分蒸発量が毎時 2,000～3,000 kg におよぶ噴霧乾燥機が使用されている。このような大型高性能乾燥機には 160～200°C 程度の高温乾燥空気が用いられている。したがって乾燥機から排出される粉乳の温度は 60～70°C に達している。このような比較的高温度の粉乳を長時間静止した状態で放置すると，製品のフレーバーの減退，異臭の発生，溶解度の低下など種々の品質低下現象を招くことになる。したがって，良品質な粉乳を高能率に製造するために解決しなければならない問題として，高温度の粉乳を短時間に常温付近まで冷却させる方法を確立させることを挙げることができる。粉乳は他の粉体と異なって粉乳粒子内に乾燥過程に生じた空洞 (Air Cell) を有し，粉乳を大量に取扱う場合，粉乳粒子間に比熱が小さく熱伝導率の低い空気を含むことも加わって静置状態での冷却速度は低い値を示すものと考えられる。このような粉乳を急速に，しかも多量に冷却する技術を確立させるには，まず粉乳の熱的特性値，特に熱伝導率を正確に求めることが不可欠な要素となる。一般粉体の熱伝導率の測定は化学工学の分野で実施[4),5),7)] されているが，我国における粉乳の測定例は非常に少なく，米国において CHEN[1)], DIESSLER[2)], FARRALL[3)], OJHA[6)] らによって行われているにすぎない。しかも，これらの測定は限られた実験条件下で主に脱脂粉乳について行われている。かかる現況に鑑み筆者は粉体用熱伝導率測定装置を試作し，これの測定精度を検討した後，脱脂粉乳および全脂粉乳 (生乳を乾燥したもの)，さらに加工用原料として生産量が増加すると予想される高脂肪粉乳を用いて広範囲な実験条件下で熱伝導率を測定したのでこれの結果を述べる。

実 験 方 法

1. 粉体の熱伝導率測定法

粉体をバルクとして取扱う場合，その熱伝導率測定の原理は固体の熱伝導率測定と同一であり，粉体と粉体粒子間空気とからなる系を一様な連続体とみなし，見かけの熱伝導率をもって粉体の熱伝導率とする。したがって，粉体の熱伝導率は粉体の水分，充填密度，温度によって変化し，さらに粉乳の場合は脂肪含有率，粒子内空気量の多少にも影響を受ける。

粉体の熱伝導測定法には，定常法と非定常法とがある。非定常法は粉体層内部の温度分布が時間の経過とともに変化する状態を作り，温度分布の変化から熱伝導率を求める方法である。この方法は測定所要時間が短かい長所を持つが，精度の高い比熱測定が必要となる。定常法には粉体層中の温度分布が時間的に変化しない状態の下で，粉体層を通過する熱量と温度差を測定して求める方法 (絶対法) と熱伝導率値が既知の物質と被測定物とを組み合わせ，両物質を貫いて熱が流れた場合の温度差から求める方法 (比較法) とがある。絶対法は通過する熱量を正確に測定する必要があり，実験装置の高級化は不可欠の条件となる。これに対して比較法は試料層側面からの熱の流出入を防ぐことによって比較的簡便な実験装置によって高い精度を持つ測定値を求めることが可能な方法である。本研究では定常法の比較法を採用した実験装置を試作し粉乳の熱伝導率を求めることにした。

2. 実験装置

実験装置は本体，冷却水タンク，電源部から成っている。Fig. 1 に実験装置の本体を示す。試料充塡槽は厚さ5 mmの発泡スチロール板（熱伝導率：0.029 kcal/m·h·°C）で作り，内のりは120×120×100 mmとし，本実験では試料の充塡層厚を一律に50 mmとした。

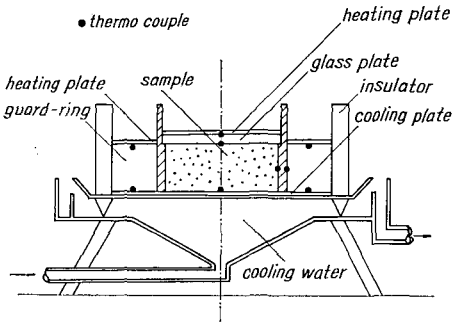

Fig. 1. Experiment apparatus.

ガードリングは試料充塡槽側面からの熱の流出入を防ぐためのもので，粉乳の熱伝導率に近い値を示し，物性が安定していることを考慮して平均粒子径100 μのソーダガラス粉を用いた。ガードリングの外周は上記発泡スチロール板（厚さ20 mm）で囲った。

試料およびガードリング加熱板は均一な温度分布になるよう厚さ5 mmのアルミニューム板の表面に高分子発熱体を塗布したものを用いた。実験に先立って両加熱板の表面温度を測定した結果，平均温度に対する最大偏差は1.2%にすぎなかった。

熱伝導率既知の物質として工作が簡単で物性が安定していることからクラウンガラス板を用いた。Table 1 にクラウンガラスの組成値を示す。ガラス板は厚さ10 mmのものを2枚重ねて用い，接触面での伝熱抵抗を低減させるために，流動パラフィンを薄く塗布した。クラウンガラス板（以下比較ガラス板と記す）の熱伝導率（以下 λ と記す）は温度0～100°Cの範囲内で温度と次に示す直線関係がある。

Table 1. Composition of crown glass

Composition	Weight %
SiO_2	72
Na_2O	14
$CaCO_3$	8
MgO	4
Al_2O_3	2

$$\lambda = 0.0015t + 0.9000$$

ここに　λ＝熱伝導率（kcal/m·h·°C）
　　t＝温度（°C）

試料およびガードリング冷却板は厚さ5 mmのアルミニューム板を用い，厚さ2 mmの鉄板を介して冷却水溜上に設置した。

冷却水タンクは装置本体の冷却水溜への冷却水を定常供給するために設置したものである。

電源部は定電圧装置および電圧調節器よりなっており，温度測定器へ一定の電圧を示す電源を供給するとともに，試料およびガードリング表面温度を設定温度になるよう調整した。

各所の温度測定は Fig. 1 の●印に示す位置において，銅―コンスタンタン熱電対を用いて行ない，測定値は打点式記録計に自記した。

3. 実験装置の較正試験法

試作実験装置を用いて求めた熱伝導率値の精度，および再現性を検討するため，供試材料としてガードリングに用いたソーダガラス粉を採用して較正試験を実施した。試料の充塡は落差10 mm以内にした散布充塡法を採用した。熱伝導率の測定に際し，比較ガラス板の上面および下面（試料上面），試料冷却面，試料充塡槽内外側面，およびガードリング温度がそれぞれ平衡状態に達したことを確認した後，各所温度を測定し後述する計算式を用いて熱伝導率値を求めた。実験条件は試料加熱温度（試料上面温度）を45°C，試料冷却温度を12.5°Cとし，充塡密度は1.450 gr/cm³に設定して9回反復して測定を行なった。

4. 粉乳の熱伝導率測定法

(1) 供試材料および実験条件

供試粉乳は脂肪含有率別に①脱脂粉乳，②全脂粉乳，③高脂肪粉乳（A），④高脂肪粉乳（B）の4種類を用いた。Table 2 に供試粉乳の初期条件を，Fig. 2 に粒

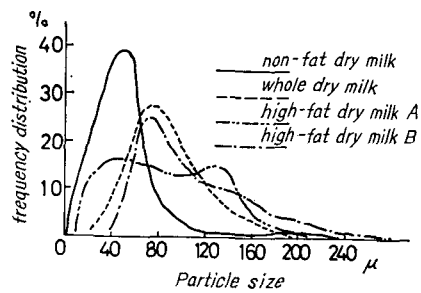

Fig. 2. Frequency distribution of particle size.

Table 2. Initial conditions of dry milk

Sample	Moisture content* (%)	Specific gravity (gr/cm³)	Particle size (mean) (μ)	Fat content (%)
Non-fat dry milk	4.07	1.324	45	<1
Whole dry milk	3.73	1.168	93	25
High-fat dry milk (A)	1.21	1.004	88	52
High-fat dry milk (B)	0.89	1.030	99	60

* 110°C 3 hr, oven method

Table 3. Regulation conditions and moisture content of dry milk

Sample	Dry bulb temperature (°C)	Wet bulb temperature (°C)	Relative humidity (%)	Moisture content (%)
Whole dry milk	55	28	11	2.36
	55	32	20	3.93
	55	40	37	5.44
	55	47	60	7.55
Non-fat dry milk	38	21	20	2.32
	38	24	31	3.94
	38	32	63	7.46
High-fat dry milk (A)	25	16	37	1.23
	25	17	42	2.10
	20	13	60	3.80
High-fat dry milk (B)	25	15	34	0.96
	25	17	42	3.10
	20	11	50	4.20

度分布を示す。なお，実験期間を通じ試料の変質を防ぐために 0±0.5°C に温度調節した保蔵庫内に試料を貯蔵して実験に供した。Table 3 に試料水分の調整条件と調整後試料水分(湿量基準)を示す。試料の水分調整は恒温恒湿槽（田葉井製作所製：PL-42）内で実施した。当初，試料水分を広範囲に調整する予定であったが，脂肪含有率の高い試料は水分を 5% 以上にすると固化 (Caking) 状態を呈したため，Table 3 に示す値にとどめた。

試料の充塡法は落差 10 mm 以内で充塡する散布充塡法と充塡過程で試料の充塡を数回に分割し，充塡と加圧とを繰返す加圧充塡法とを採用した。

試料加熱温度は実用噴霧乾燥機から取り出される粉乳の温度，および含有する脂肪の融解点を考慮して 35～65°C とした。以上の各種要因を組み合わせて Table 4, 5 に示す実験条件を設定した。

(2) 熱伝導率の算出方法

Fig. 3 に比較法による熱伝導率測定の原理を示す。今，比較ガラス板および試料充塡層側面からの熱の授受がないとすると，比較ガラス板を単位時間に貫流する熱量は試料充塡層を貫流する熱量と等しくなる。比較ガラス板を単位時間に貫流する熱量を Q_0 とすると，Q_0 は次式で求めることができる。

$$Q_0 = \frac{A_0 \Delta T_0 \lambda_0}{L_0} \qquad (1)$$

ここに A_0＝比較ガラス板の有効伝熱面積 (m²)

ΔT_0＝比較ガラス板の上下面の温度差 (°C)

λ_0＝比較ガラス板の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

L_0＝比較ガラス板の厚さ (m)

Table 4. Experiment conditions

Sample	Heating temperature (°C)	Moisture content (%)				Bulk density (gr/cm³)
Non-fat dry milk	35	2.32	3.94	7.46		0.600
	45	2.32	3.94	7.46		
	55	2.32	3.94	7.46		
	65		3.94	7.46		
Whole dry milk	35	2.36	3.93	5.44		0.530
	45	2.36	3.93	5.44		
	55	2.36	3.93	5.44	7.55	
	65		3.93	5.44	7.55	
High-fat dry milk (A)	35		2.10	3.80		0.446
	45		2.10	3.80		
	55	1.23	2.10	3.80		
	65	1.23	2.10	3.80		
High-fat dry milk (B)	35		3.10	4.20		0.441
	45		3.10	4.20		
	55	0.96	3.10	4.20		
	65	0.96	3.10	4.20		

Table 5. Experiment conditions. A

Sample	Heating temperature (°C)	Moisture content (%)	Bulk density (gr/cm³)			
Non-fat dry milk	45	3.94	0.601	0.699	0.757	
Whole dry milk		3.93	0.499	0.550	0.650	0.700
Hight-fat dry milk (A)		1.23	0.450	0.491	0.542	
High-fat dry milk (B)		0.96	0.450	0.550	0.588	

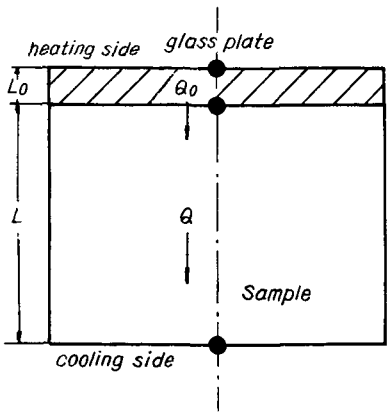

Fig. 3. Theory of measurement.

一方，試料充塡槽を単位時間に貫流する熱量 Q は次式で求めることができる。

$$Q=\frac{A\Delta T\lambda}{L} \qquad (2)$$

ここに　A＝試料充塡層の伝熱面積 (m²)

ΔT＝試料充塡層の加熱面と冷却面との温度差 (°C)

λ＝試料の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

L＝試料層の厚さ (m)

今，$A_0=A$，$Q_0=Q$ であるので，式(1)，(2)より λ は次式で求めることができる。

$$\lambda=\lambda_0\frac{\Delta T_0}{\Delta T}\cdot\frac{L}{L_0} \qquad (3)$$

実験結果および考察

1. 試作実験装置による測定値の精度

Table 6 に測定結果を一括して示す。試料加熱温度の平均値は 45.1°C, 冷却温度の平均値は 12.5°C でほぼ均一の値を示した。熱伝導率 (以下 λ と略記する) は 0.221～0.244 (kcal/m・h・°C) の範囲内に分布し，平均値は 0.231 (kcal/m・h・°C) であった。今，信頼係数を 0.95 とし平均値の信頼区間の上，下限値を求めると 0.223 および 0.237 (kcal/m・h・°C) となり，平均値に対して ±3.2% の幅であることを知った。同一実験条件下での実験で，測定値が変動する理由として試料の物性値のばらつき，充填密度の差異，温度測定誤差などが考えられる。今回の実験では前 2 者はほぼ同一の値を示し，温度測定誤差が主な原因であると考えられる。温度測定誤差は試作した熱電対のばらつき，記録計の誤差に起因するが，これらが内包されたものとして熱電対の温度—起電力の回帰直線に対する非直線偏差が生ずる。供試熱電対の最大非直線偏差は 1.50% F.S. (15～70°C) である。今，この値を用いて各測定値を再計算すると信頼係数 0.95 における平均値の信頼区間は，0.211～0.250 (kcal/m・h・°C) となり，平均値に対し ±8.4% の幅を示した。したがって，ソーダガラス粉を用いた実験結果は試作した実験装置の精度の許容範囲内にあることを知った。なお，本実験装置の測定精度を高めるためには打点式記録計をマイクロボルトメータに交換して温度の測定精度を高める必要がある。

Table 6. Thermal conductivity of glass powder

No.	Heating temperature (°C)	Cooling temperature (°C)	Thermal conductivity (kcal/m・h・°C)
1	45.6	12.3	0.221
2	45.1	12.6	0.239
3	44.8	12.5	0.227
4	45.1	12 4	0.235
5	45.2	12.3	0.244
6	44.8	12.8	0.239
7	44.9	12.7	0.227
8	45.0	12.6	0.221
9	45.0	12.5	0.223
mean	45.1	12.5	0.231
s.d	0.2	0.2	0.009

2. 粉乳の熱伝導率

(1) 散布充填

1) 脱脂粉乳

Table 7 に脱脂粉乳の実験結果を一括して示す。試料加熱温度は平衡時の測定値であり，設定値に対する偏差値は最大 1.89°C, 平均で 0.78°C であった。平均充填密度は 0.6064 (gr/cm³) (最大 0.6157, 最小 0.5938, 標準偏差 0.0094) であり，ほぼ均一な充填がなされていた。

Table 7. Thermal conductivity of non-fat dry milk

No.	Moisture content (%)	Heating temperature (°C)	Bulk density (gr/cm³)	Thermal conductivity (kcal/m・h・°C)
1	2.32	36.31	0.5956	0.207
2		46.89	0.6068	0.228
3		55.15	0.6100	0.230
4	3.94	36.31	0.6008	0.215
5		45.61	0.6125	0.250
6		54.22	0.6048	0.270
7		65.26	0.6256	0.277
8	7.46	35.96	0.5938	0.229
9		45.38	0.6157	0.262
10		54.33	0.5983	0.281
11		65.26	0.6070	0.289

Fig. 4 に試料加熱温度と λ との関係を試料水分別に示す。λ は試料加熱温度の上昇および試料水分の増加に伴って増加することを知った。これは試料および試料粒子間空気の λ が温度上昇に伴って増加することに起因するとともに，試料水分の増加による λ の増加は水の λ が

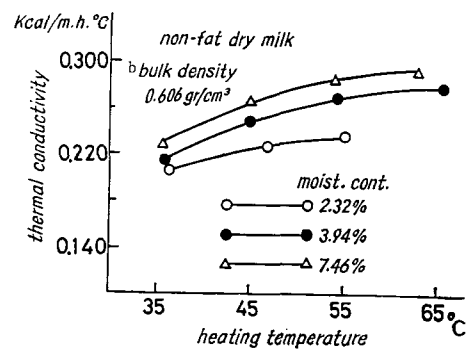

Fig. 4. Relation between thermal conductivity and heating temperature.

0.5～0.6 (kcal/m・h・°C) と空気および脂肪の λ に比較して大きい値を示すことによるものである。一方，試料水分が増加すると試料粒子の接触面積が増加し，接触面において試料中の水が熱の通路を形成することも λ の増加に寄与していると考えられる。

2) 全脂粉乳

Table 8 に全脂粉乳の実験結果を一括して示し，Fig. 5 に試料加熱温度と λ の関係を試料水分別に示す。充填密度は脱脂粉乳に比較してほぼ 11.7% 低い値を示した。これは試料の粒子径の違いによるものである。試料加熱温度の上昇と試料水分の増加に伴って λ が増加する傾向は既述した脱脂粉乳の場合と同様である。試料加熱温度および試料水分と λ との関係はほぼ直線関係にあるが，試料加熱温度が 55°C 以上になると温度上昇に対する λ の増加量が多少減少する傾向を示している。

Table 8. Thermal conductivity of whole dry milk

No.	Moisture content (%)	Heating temperature (°C)	Bulk density (gr/cm³)	Thermal conductivity (kcal/m・h・°C)
1	2.36	36.08	0.5311	0.245
2		45.85	0.5269	0.263
3		54.33	0.5407	0.286
4	3.93	36.08	0.5300	0.264
5		45.61	0.5362	0.278
6		54.45	0.5323	0.298
7		65.84	0.5245	0.307
8	5.44	36.35	0.5300	0.277
9		45.85	0.5344	0.300
10		54.33	0.5304	0.318
11		64.91	0.5300	0.322
12	7.55	54.22	0.5354	0.341
13		64.68	0.5300	0.348

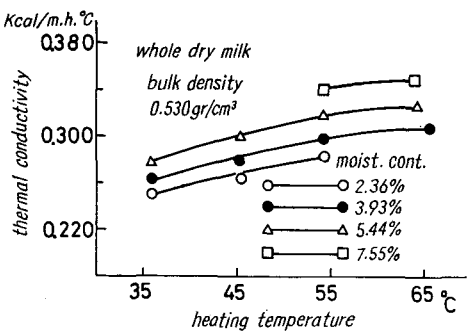

Fig. 5. Relation between thermal conductivity and heating temperature.

3) 高脂肪粉乳

Fig. 6, Fig. 7 に高脂肪粉乳 (A) および高脂肪粉乳 (B) それぞれの試料加熱温度と λ との関係を試料水分別に示す。平均充填密度はそれぞれ 0.446, 0.441 (gr/cm³) であった。試料の脂肪含有率の増加に伴って散布充填した時の充填密度が低下するのは粒子径の増加に加えて粒子相互の粘着力が増大するためであると考えられる。試料加熱温度および試料水分と λ との関係は脱脂粉乳および全脂粉乳の場合と同様であるが，試料加熱温度の上昇による λ の増加量は大幅に低下することを知った。今，試料加熱温度が 1°C 上昇した時の λ の増加値を比較すると高脂肪粉乳（脂肪含有率；52～60%）の値は脱脂粉乳のほぼ 60% に相当することを知った。

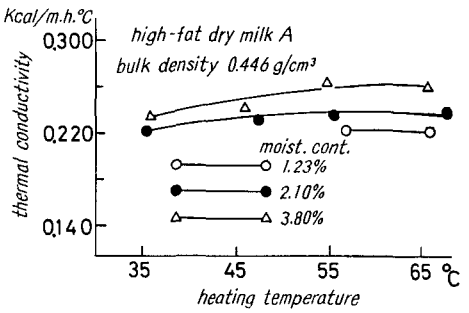

Fig. 6. Relation between thermal conductivity and heating temperature.

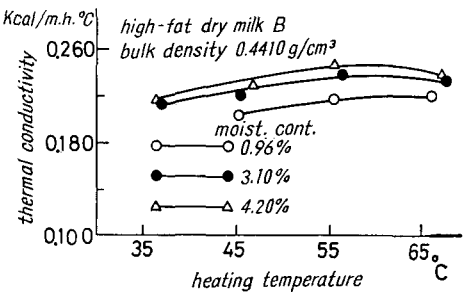

Fig. 7. Relation between thermal conductivity and heating temperature.

試料層内部に温度差が存在する時，試料層の高温側から低温側へ水分移行が生ずる。Fig. 8 に試料層表面（高温面）から 5 mm の深さまでの試料の熱伝導率測定後における水分減少量を示す。いずれの試料についても，試料初期水分が高く，試料加熱温度が高いほど水分減少量

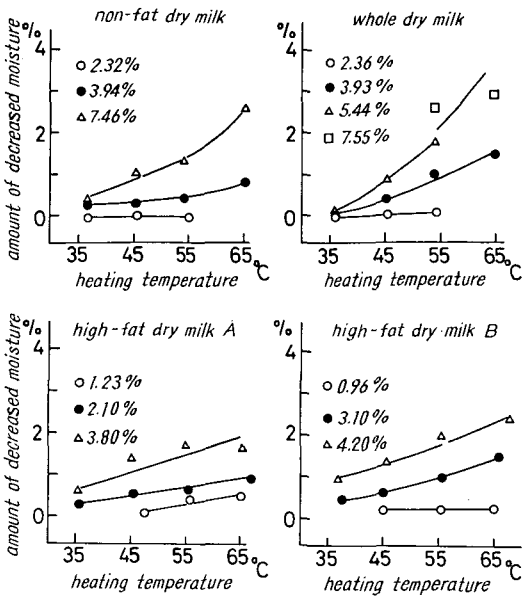

Fig. 8. Amount of decreased moisture during measuring period.

が増大することを知った。このように試料水分が比較的多い場合，熱伝導率の測定過程で試料層に乾燥部分が生じ試料の収縮によって比較ガラス面と試料面との熱の接触抵抗が増加し，これによってλが低下するものと考えられる。さらに高脂肪粉乳の場合，含有する脂肪の融解点がほぼ60°C であり，測定中に試料加熱面において脂肪が融解し，一部スポット状に陥没している状態を観察した。

(2) 加圧充填

Fig. 9 に試料加熱温度を一律45°C とした場合，充填密度とλとの関係を試料別に示す。測定に際し試料水分を各試料とも同一にすべく試みたが，高脂肪粉乳の場合水分を2% 以上に調整すると充填密度を0.500 (gr/cm³) 以上に高めることが不可能になったので，高脂肪粉乳 (A) は1.23%，高脂肪粉乳 (B) は0.96% にそれぞれ水分を調整した。脱脂粉乳と全脂粉乳の水分は3.94% および3.93% に調整した。各試料の組成，粒子径，水分によってλの値は異なるが，いずれの試料とも充填密度の増加に対して指数函数的にλが増加することを知った。これは充填密度の増加に伴って試料粒子間の空気量が減少してλが増加することと，充填密度の増加による粒子相互の接触個数が増加することに起因するものである。

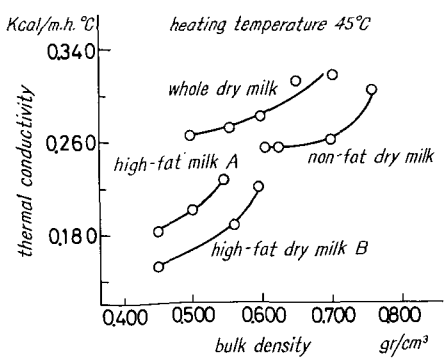

Fig. 9. Relation between thermal conductivity and bulk density.

今回の実験結果から試料別に充填密度とλとの関係を実験式で表わすと以下のごとくになる。

① 脱脂粉乳： $\lambda = 0.168e^{0.662D}$ $(0.610 \leqq D \leqq 0.757)$

② 全脂粉乳： $\lambda = 0.215e^{0.517D}$ $(0.480 \leqq D \leqq 0.700)$

③高脂肪粉乳(A)： $\lambda = 0.074e^{2.03D}$ $(0.450 \leqq D \leqq 0.546)$

④高脂肪粉乳(B)： $\lambda = 0.065e^{1.88D}$ $(0.450 \leqq D \leqq 0.598)$

ここに λ = 熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

D = 充填密度 (gr/cm³)

上記4つの実験式の精度を検討した結果，実測値との偏差の最大および平均値は以下に示すとおりである。

① 脱脂粉乳： $\delta_{max} = 8.51\%$ F.S.

$\delta_{mean} = 4.93\%$ F.S.

② 全脂粉乳： $\delta_{max} = 13.61\%$ F.S.

$\delta_{mean} = 6.27\%$ F.S.

③高脂肪粉乳(A)： $\delta_{max} = 4.66\%$ F.S.

$\delta_{mean} = 1.94\%$ F.S.

④高脂肪粉乳(B)： $\delta_{max} = 3.62\%$ F.S.

$\delta_{mean} = 1.89\%$ F.S.

ここに δ_{max}＝最大偏差

δ_{mean}＝平均偏差

要　約

合理的な粉乳の冷却方法を確立させることは粉乳の品質保持のために必要なことである。特に粉乳の物性値，すなわち熱的特性値を求める必要がある。本研究は種々の粉乳（脱脂粉乳，全脂粉乳，高脂肪粉乳 A, B）を用いて，各種条件下において熱伝導率を測定した。実験条件は，試料水分を0.96～7.55% に，試料加熱温度を35～65°C とし，充填方法は散布充填と加圧充填法を採用した。

実験結果を要約すると以下のごとくになる。

1. 全ての粉乳の熱伝導率は試料加熱温度の上昇と，試料水分の増加に伴って増加する。

2. 高脂肪粉乳の熱伝導率は試料加熱温度が 55°C の時に最大値を示し，さらに試料加熱温度が上昇すると熱伝導率が低下することを知った。この理由は粉乳中の脂肪の融解が起ることにあると考えられる。

3. 脱脂粉乳の熱伝導率は試料加熱温度 35～65°C, 試料水分 2.32～7.46% の範囲内で 0.207～0.289 (kcal/m・h・°C) なる値を示した。

4. 全脂粉乳の熱伝導率は試料加熱温度 35～65°C, 試料水分 2.36～7.55% の範囲内で 0.245～0.348 (kcal/m・h・°C) なる値を示した。

5. 高脂肪粉乳の熱伝導率は試料加熱温度 35～65°C, 試料水分 0.96～4.20% の範囲内で，0.220～0.260 (kcal/m・h・°C) なる値を示した。

6. 充塡密度の増加に伴って熱伝導率は増加し，充塡密度と熱伝導率との関係を実験式で示すと以下のごとくになる。

1) 脱脂粉乳：$\lambda = 0.168e^{0.662D}$ $(0.610 \leqq D \leqq 0.757)$
2) 全脂粉乳：$\lambda = 0.215e^{0.517D}$ $(0.480 \leqq D \leqq 0.700)$
3) 高脂肪粉乳(A)：$\lambda = 0.074e^{2.03D}$ $(0.450 \leqq D \leqq 0.546)$
4) 高脂肪粉乳(B)：$\lambda = 0.065e^{1.88D}$ $(0.450 \leqq D \leqq 0.598)$

ここに　λ=熱伝導率 (kcal/m・h・°C)
　　D=充塡密度 (gr/cm^3)

謝　辞

本研究の実施に際し，種々御教示いただいた，本学名誉教授吉田富穂博士，本学教授池内義則博士，ならびに供試材料の提供，粒度分布測定を快諾いただいた，雪印乳業株式会社技術研究室に対し深甚な謝意を表する。

引用文献

1) CHEN, A. C. and HELDMAN, D. R.: An analysis of the thermal properties of organic powder in a packed bed., *A. S. A. E. Annual Meeting Paper N. O.* 69-385. 1969
2) DIESSLER, R. G. and BOEGLI, R. G.: An investigation of effective thermal conductivity of powder in various cases., *Trans. A. S. A. E.* 1417-1425. 1958
3) FARRALL, A. W., CHEN, A. C., WANG, P. Y., DHANAK, A. M., HEDRICK, T. I. and HELDMAN, D. R.: Thermal conductivity of dry milk in a packed bed., *A. S. A. E. Annual meeting paper N. O.* 68-386. 1968
4) 国井大蔵：充塡層の有効熱伝導度，化学工学，**20**：564-566. 1956
5) 国井大蔵：粉粒体の伝熱，化学工学，**25**：891-898. 1961
6) OJHA, T. P., FARRAL, A. W., DHANAK, A. M. and STINE, C. M.: Determination of heat transfer through powdered food products., *A. S. A. E. Winter Meeting Paper N. O.* 66-823. 1966
7) 大竹伝雄・東稔節治：粉粒体の伝熱機構，粉体工学，**3**：37-43. 1968

Summary

It is necessary to establish the rational cooling method because of its effect on quality of a dry milk. It is desirabled to obtain the physical properties. The purpose of this study was to determine the thermal conductivity of the various type of the dry milk (non-fat dry milk, whole dry milk, high-fat dry milk) under the various conditions. The experimental data were obtained under the conditions: the moisture content of dry milk from 0.96 to 7.55% and heating temperature from 35 to 65°C. The adjustment of the bulk density was the loose density and the tight density.

The loose density was defined as the condition when the sample was placed in a apparatus naturally. The tight density, on the other hand, was defined as the condition when the sample was placed heavily pressured.

The following results were obtained:

1. All of the dry milk showed increased the thermal conductivity as the heating temperature and the moisture content increased.

2. The thermal conductivity of the high-fat dry milk attained to the maximum when the heating temperature goes to 55°C, and beyond 55°C, the thermal conductivity decreased because of liquefied the fat.

3. The thermal conductivity of the non-fat dry milk was from 0.207 to 0.289 (kcal/m・h・°C) for the heating temperture 35°C-65°C and the moisture content 2.32 to 7.46%.

4. The thermal conductivity of the whole dry milk was from 0.245 to 0.348 (kcal/m・h・°C) for the heating temperature 35-65°C and the moisture content 2.36-7.55%.

5. The thermal conductivity of the high-fat dry milk was from 0.220 to 0.260 (kcal/m・h・°C) for the heating temperature 35-65°C and the moisture content 0.96-4.20%.

6. All of the dry milk showed increased the thermal conductivity as the bulk density increased.

The thermal conductivity and the bulk density were expressed by the following experimental equations:

1) non-fat dry milk

$$\lambda = 0.168e^{0.662D} \quad (0.610 \leqq D \leqq 0.757)$$

2) whole dry milk

$$\lambda = 0.215e^{0.517D} \quad (0.480 \leqq D \leqq 0.700)$$

3) high-fat dry milk (A)

$$\lambda = 0.074e^{2.03D} \quad (0.450 \leqq D \leqq 0.546)$$

4) high-fat dry milk (B)

$$\lambda = 0.065e^{1.88D} \quad (0.450 \leqq D \leqq 0.598)$$

where λ=thermal conductivity (kcal/m·h·°C)
D=bluk density (gr/cm^3)