

米糠,こめ油等の物理性について

誌名	宇都宮大学農学部學術報告 = Bulletin of the College of Agriculture, Utsunomiya University
ISSN	05664691
著者	竹永, 博 細川, 明 河又, 虎好
巻/号	14巻1号
掲載ページ	p. 41-56
発行年月	1989年3月

米糠, こめ油等の物理性について

竹永 博・細川 明・河又 虎好

Study on physical characteristics and properties of rice bran and rice bran oil

Hiroshi TAKENAGA, Akira HOSOKAWA and Torayoshi KAWAMATA

Résumé

The extracting and refining processes have a considerable potential field to obtain food oil and chemical industrial materials. Still energy requirement in refining process of rice bran oil has not been evaluated yet. There are all kinds of source to obtain food oil, but rice bran has been used a little as a source of edible oil. Particularly in rice-producing developing countries rice bran has been used only for animal feed. Therefore, rice bran was selected as experimental materials for making use of rice bran for edible oil. And we measured experimentally the energy requirement in extracting and refining process, estimated these, and further stimulated the reduction of energy used in refining. Additionally, we took up this work in the hope that the experience and techniques acquired through this work might be utilized in developing simple but energy efficient devices and processes which would be useful for rice-producing countries in introducing their own rice bran oil processing plants.

The fundamental data such as physical characteristics and properties of rice bran and rice bran oil were essential to achieve the work mentioned above. So, we obtained experimentally the fundamental data in our laboratory. The measured items were for rice bran, repose angle, size distribution, granular density and bulk density, and for rice bran oil viscosity and density. These results were shown in Table 1.

Table 1 The physical characteristics and properties of rice bran and rice bran oil.

RICE BRAN	granular size distribution	coefficient of uniformity	1.69		
		granular size range (80% in all)	0.35-0.85 mm		
		average granular size	0.50 mm		
	repose angle	raw rice bran	57.62 deg.		
		scorched rice bran	48.70 deg.		
	density	granular density	1,321 kg/m ³		
bulk density		324 kg/m ³			
press cake density		1,160 kg/m ³			
(after several minutes out of cage)					
RICE BRAN OIL	density (kg/m ³)	temperature	10 deg.	100 deg.	200 deg.
		crude oil	935	867	—
		dewaxed oil	926	869	806
		refined oil	923	870	811
	viscosity (mPa·s)	crude oil	184.6	8.7	—
		dewaxed oil	132.5	10.0	2.3
		refined oil	122.2	9.4	2.5

The relational equation between density (ρ : kg/m³) and temperature (t: deg.) in refining rice bran oil could be expressed.

Crude oil	(6—60 deg.)	$\rho = 943 - 0.840 t$
	(60—100 deg.)	$\rho = 931 - 0.636 t$
Dewaxed oil	(6—200 deg.)	$\rho = 933 - 0.635 t$
Refined oil	(8—200 deg.)	$\rho = 929 - 0.592 t$

The relational equation between viscosity (μ : mPa·s) and absolute temperature (T) in refining rice bran oil could be expressed.

Crude oil	(6—55 deg.)	$\mu = 73 \times 10^{-6} \exp(4,172.37/T)$
	(55—100 deg.)	$\mu = 4,542 \times 10^{-6} \exp(2,816.69/T)$
Dewaxed oil	(6—45 deg.)	$\mu = 513 \times 10^{-6} \exp(3,526.69/T)$
	(45—200 deg.)	$\mu = 9,325 \times 10^{-6} \exp(2,603.04/T)$
Refined oil	(6—51 deg.)	$\mu = 350 \times 10^{-6} \exp(3,612.28/T)$
	(51—200 deg.)	$\mu = 16,953 \times 10^{-6} \exp(2,355.90/T)$

The calculated values using these equations were in good agreement to experimental values.

1. はじめに

農産物油脂は欠くべからざる食糧であり、また石鹼、塗料、合成樹脂等の化学合成材料として、さらに医薬品の原料としても広く我々の日常生活に貢献している。日本の油脂化学工業技術は戦後の技術革新、高度経済成長の波に乗り、海外技術の導入にさらに日本人的な創意工夫を積み重ね、今日世界一級のレベルにある。しかし、1973年のオイルショック以来、化石資源の節減が提唱され、食品加工の多くの分野でエネルギー分析が行われ、省エネ対策が採られるようになったが、搾油・搾汁及び精製プロセスのエネルギー評価は未だ明らかにされていない。

現在、世界の米の生産量は約4億7千万トンであるが、これを搗精すると3,700万トンの糠が発生することになる。しかし、このうち1,700万トンは油脂原料として利用されているが残り2,000万トンは未利用のままである。そこで、米糠の有効利用を考え、米糠の搾油、米油の精製のエネルギー評価を行うとともに、開発途上産米国でも利用できるようなプロセスの開発を目的とし実験を行ったが、この「米糠及び米油の物理性」は上述の実験を行うにあたり、その基礎資料を得るために行ったものである。

2. 実験概要及び実験目的

米糠及び米油の化学的組成及び成分についての資料は数多く報告されているが、これらの物理性に関する資料は殆ど報告されていない。

米糠の搾油、米油原油⁽¹⁾の精製実験を行うに当たって、また米糠の製油工場現場における米糠及び米油の

ハンドリングに際し、米糠及び米油の物理的性質を明らかにしておく必要がある。

すなわち油脂原料としての米糠の運搬、貯蔵等における容器の形状、サイズ決めをする際、また圧搾搾油時の体積変化率等を推測する場合に、米糠の粒度分布、安息角、かさ密度等の値を必要とする。

また精製実験において、濾過工程での実エネルギーの算出及び各工程で用いる油容器の容量決めをする場合に、米油密度の値を必要とする。また、米油の搾油、特に冷圧搾油時における搾油温度の検討、各精製プロセスにおける作業時間の短縮等には、米油の温度と粘度の関係を明らかにしておく必要がある。

ここでいう物理性とは米糠の粒度分度、安息角、かさ密度、米油の密度、粘度等である。これらの物理性を実験によって明らかにし、米糠の搾油・精製の各工程の必要エネルギー、処理時間の分析に役立てるとともに、米油精製工場現場での基礎資料に資することを目的とした。

3. 米糠の粒度分布

(1) 実験方法

供試材料は、大学の近くの米屋から予約購入した糠であり、実験当日精米されたものであった。玄米は昭和59年度栃木県産のコシヒカリであり、糠の含水率は10.9%であった。

実験には、タイラー篩¹⁾による篩分け法を用いた。供試篩は試験用篩（勝丸東製作所製、内径φ200×深さ80mm、真鍮製）であり、使用篩を4種類の目開きのもの

(1)：原油と粗油は同じものであるが、一般的に油脂材料から得られた状態のものは粗油、精製の原料としての油は原油と言われている。

Table 3-1 The standard opening of each sieve

Mesh No. (inch)	Wire diameter (mm)	Standard opening (mm)
14	0.635	1.170
28	0.318	0.589
48	0.234	0.295
100	0.107	0.147

とした。それらの目開きの規格値は Table 1 の通りであった。

操作方法としては、これらの篩と受け皿を用い、先ず受け皿（パン）を置き、その上にメッシュ100, 48, 28, 14と篩を順に積み重ね、これに供試米糠50gを入れ、上蓋を載せた。ロータップ振動機がないので、人力によりこれを約200回振り、各篩に残留した米糠をそれぞれ計量した。実験を3回繰り返した。

(2) 実験結果及び考察

実験結果を Table 3-2 に、実験すべての平均値を Table 3-3 に、また Table 3-3 の結果を基に、Fig. 3-1

に粒度曲線（粒径加積曲線）を示す。

Table 3-2 について、まず、篩のメッシュ14と28の残留百分率を加える。さらにメッシュ48と100と受け皿の残留百分率を加え、各々を均一係数の合計10で割る。3組の実験において、求められた各々の数値に最も近い整数は3と7であった。これが細粒と微粒の相対的割合を示す。すなわち Table 3-3 より、3組の実験の供試試料は、細粒：微粒=3：7であった。

また細粒率 (Fineness Modulus, FM) は材料の粗さを表す係数であり、乗積の合計を残留百分率の合計で除して求められる。Table 3-3 より、供試材料の FM は 2.26 であった。さらに平均粒径 Dmm は次式で計算することができる¹⁾。

$$\text{すなわち, } D = 0.104 (2)^{\text{FM}}$$

この式の FM に 2.26 を代入して、 $D = 0.498$ を得た。

以上より、供試米糠の平均粒径は約 0.5 mm であった。

Fig. 3-1 粒度曲線において、通過質量10%に相当する粒径を有効径と呼ぶが、有効径 D_{10} は 0.32 mm であった。また通過質量60%に対する粒径 D_{60} と有効径との比を均

Table 3-2 Fineness Modulus of experiments

Exp. No.	Mesh No. (inch)	Remained bran weight (g)	Remained bran percentage (%)	Sum (10)	Multiplication
1-1	14	1.63	3.26	$\frac{30.24}{10} = 3.02$	4 = 13.04
	28	13.49	26.98		3 = 80.94
	48	30.27	60.54		2 = 121.08
	100	3.37	6.74	$\frac{68.34}{10} = 6.83$	1 = 6.74
	Pan	0.53	1.06		0 = 0.00
		Sum	49.29	98.58	
	Loss	0.71	1.42		FM = 2.25
1-2	14	1.66	3.32	$\frac{30.08}{10} = 3.01$	4 = 13.28
	28	13.38	26.76		3 = 80.28
	48	29.55	59.10		2 = 118.20
	100	3.90	7.80	$\frac{67.72}{10} = 6.77$	1 = 7.80
	Pan	0.41	0.82		0 = 0.00
		Sum	48.90	97.80	
	Loss	1.10	2.20		FM = 2.24
1-3	14	1.50	3.00	$\frac{31.32}{10} = 3.13$	4 = 12.00
	28	14.16	28.32		3 = 84.96
	48	29.84	59.68		2 = 119.36
	100	3.42	6.84	$\frac{66.98}{10} = 6.70$	1 = 6.84
	Pan	0.23	0.46		0 = 0.00
		Sum	49.15	98.30	
	Loss	0.85	1.70		FM = 2.27

Table 3-3 Mean of Fineness Modulus

Exp. No.	Mesh No. (inch)	Remained bran weight (g)	Remained bran percentage (%)	Sum (10)	Multiplication
Mean	14	1.60	3.20	$\frac{30.56}{10}=3.06$	4 = 12.80
	28	13.68	27.36		3 = 82.08
	48	29.89	59.78		2 = 119.56
	100	3.56	7.12	$\frac{67.86}{10}=6.77$	1 = 7.12
	Pan	0.39	0.78		0 = 0.00
		Sum	49.12	98.24	
	Loss	0.88	1.76		FM=2.26

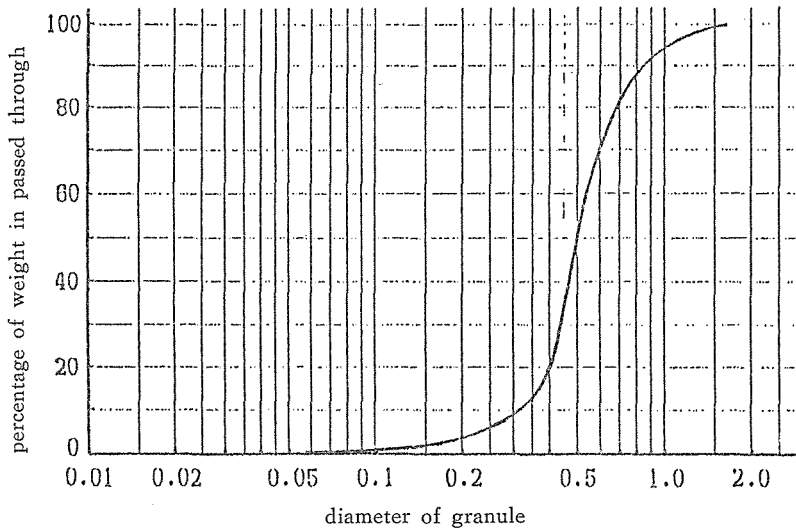


Fig. 3-1 Gradation analysis curve

等係数と呼ぶ。

$$\text{均等係数} = D_{60}/D_{10} = 0.54/0.32 = 1.69$$

均等係数は1.69と非常に小さな値であった。すなわち粒度曲線の傾きが大きく、粒径のバラつきが少ないことを示した。糠の粒径分布では、0.30~0.85mmのものが全体の約80%を占め、0.1mm以下及び2.0mm以上のものは極めて少なかった。

4. 米糠の安息角

(1) 実験方法

供試材料は前述の「米糠の粒度分布」の実験で用いたものと同じである。ただし、含水率は12.2%であった。

供試材料を生糠と煎り糠とした。煎り糠には、肉厚のアルミ鍋(φ23cm×10.5cm, 肉厚3mm)に生糠を約500g入れ、600Wのヒータで15分間煎ったものを用いた。煎り糠の含水率は0.0%であった。

安息角の測定法としていくつかの方法があるが、貯蔵

時の容器の形状決め、圧搾搾油時のケージ内への糠の充填等を考え、落下法を採った。実験としては約30cmの高さに設置したロート(出口内径10mm)より供試材料を落下させ、下に堆積した糠の円錐形の山の稜線の傾斜角を水平に調節した読み取り顕微鏡(株式会社エルマ光学器械製作所、型式A、精度0.02mm)で測定した。

(2) 実験結果及び考察

生糠の安息角は最小55.64度、最大60.76度、平均57.62度であった。また煎り糠の安息角は最小46.67度、最大50.82度、平均48.70度であった。煎ると約9度小さくなった。煎ることによって水分が蒸発し、油脂が糠表面に出ることにより粒子間の摩擦抵抗が小さくなると思われる。

糠の貯蔵でのハンドリングには、安息角の小さい方が扱い易く、貯蔵容器内でのブリッジ等も発生し難い。すなわち煎り糠の方が運搬、容器からの取り出しに際し、ハンドリング性がよいことが分かった。

比較の対象として粳，玄米の安息角を測ったが，それぞれの平均は約40度，約35度であった。

5. 米糠の密度の測定

5-1 米糠の粒子密度の測定

粒子密度とは粒子間の空隙を試料表面を濡らし易い液体に浸し気泡を十分取り除き，試料の実体積を求め，乾燥質量で除したものである。

(1) 測定方法

供試材料は，大学の近くの米屋から予約購入した糠であり，実験当日精米されたもので，「3. 米糠の粒度分布」，「4. 米糠の安息角」の実験で用いたものと同じものである。

主な使用機器は以下の通りである。

ゲーリュサック形比重瓶

ソックスレー (Soxleh) 油脂抽出装置 (SHIBATA : 12A 6コ掛け)

乾燥器 (ヤマト科学器械(株) : 型式 DZ-24 100V 1.2kW MAX. 150°C)

デシケーター (岩城ガラス(株)，内径30cm)

電子秤 (綯長計量器製作所 : TYPE JP-160 CAPACITY 160g READABILITY 0.1mg)

真空ポンプ DAIA VACUUM ENGINEERING : CRP-200 OIL ROTARY PUMP 0.4kW

ヘキサン (Hexan) FW 86.18 Fraction (66~70°C) 比重0.66

生糠中の脂肪は水に不溶解性であり，タンパク，でんぷん等は水に溶解性であるため，土壤の比重試験法で行

われている水による生糠の体積置換法は不向きである。

試験方法は脱脂糠の粒子密度を求め，含油率，含水率より間接的に生糠の粒子密度を求めた。まず供試生糠を乾燥器で 205°C 5時間乾燥し，含水率を測定した。またソックスレー油脂抽出装置により沸点の高いヘキサンを溶剤として生糠の含油率を求め，ソックスレーの円筒濾紙に残留した脱脂糠を粒子密度測定を試料とした。脱脂糠の粒子密度測定方法では，秤量した試料をゲーリュサック形比重瓶に入れ，ヘキサンを体積置換液とし，試料中の脱気には減圧法を用いた。操作手順は土壤の比重試験法 (JIS A 1202-1978) に準じた。

実験中の平均室温は15°Cであった。

(2) 測定結果及び考察

測定結果，生糠の含水率，含油率は11.18%，20.20%であった。これより脱脂乾燥糠の生糠に対する重量割合は68.62%であった。

脱脂糠の粒子密度測定結果は Table 5-1-1 の通りである。

Table 5-1-1 より，算出値の平均をとり粒子密度を 1.61g/cm^3 とした。

生糠の粒子密度 (ρ_{ar}) は水，米油及び脱脂糠の合成密度と考え，生糠の単位重量当りの各成分の重量割合を各々の密度で除し，各成分の体積を求め，各々の占める体積の総和で生糠の重量を除し，粒子密度を求めた。

生糠の重量を $1,000\text{g}$ とし，粒子密度を求めると以下のようなになる。

生糠 $1,000.0\text{g} \cdots \cdots W$
水 $\cdots \cdots 111.8\text{g}$ (密度 $\rho_1 : 1,000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Table 5-1-1 Granular density of deoiled rice bran

W	P	P'	$\frac{W}{(P+W-P')}$ ①	$Sr=0.666 \times \frac{①}{\rho_{ab}}$
3.105	110.780	112.592	2.402	1.600
3.147	111.684	113.542	2.441	1.626
3.043	105.137	106.930	3.434	1.621
3.084	107.760	109.560	2.401	1.599
3.079	110.489	112.290	2.410	1.605

$$Sr = \frac{W}{P+W-P'}$$

Average

1.610

where,

Sr : Real specific gravity (Hexane: Substitutional liquid for volume)

ρ_{ab} : Granular density (Water: Substitutional liquid for volume)

W : Weight of sample (g)

P : Weight of Pycnometer filled with Hexane (g)

P' : Weight of Pycnometer filled with Hexane and sample (g)

Specific gravity of Hexane: 0.66 (15°C)

15°Cの米油……202.0g (密度 ρ_2 : 923 kg·m⁻³)(#)
 (#): 後に述べる「6. 米油の密度と温度の関係」より引用

脱脂乾燥糠……686.2g (密度 ρ_3 : 1,610 kg·m⁻³)
 生糠1,000g中, 水の占める体積……111.8cm³…… V_1
 生糠1,000g中, 米油の占める体積……218.9cm³…… V_2
 生糠1,000g中, 脱脂乾燥糠の占める体積
 ……426.2cm³…… V_3

これより, 生糠の粒子密度は

$$\rho_{br} = \frac{W}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{1,000}{111.8 + 218.9 + 426.2}$$

$$= 1.321 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

以上より, 生糠の粒子密度を 1,321 kg·m⁻³ とした。

5-2 米糠のかさ密度について

(1) 測定方法

供試材料は, 前項 5-1 の実験で用いたものと同じものである。

容積 596.8cm³ の空き缶 (缶詰用の缶) を容器とし, 土壌測定法により, 米糠を約 10cm の高さより静置した容器に流下し, 平に均した場合と空き缶に振動を与えながら密実に入れた場合について, それぞれの米糠の質量を計り, 空き缶の容積で除すことにより, 粗密度及び充密度を求めた。

(2) 測定結果及び考察

粗密度の平均は 273 kg·m⁻³, 充密度の平均は 376 kg·m⁻³ であった。これらより, かさ密度を乾燥土壌の見かけの密度の算出と同じように考え, かさ密度=(粗密度+充密度)/2 とすれば, かさ密度は 324 kg·m⁻³, すなわち 1 m³ 当り 324 kg であった。

間隙率 (n), 間隙比 (e) は以下の式で求められる。

$$n = V_v / V \times 100 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$$e = V_v / V_b \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ただし, V_v : 間隙の体積, V : 米糠の体積, V_b : 米糠の実体積

前項 5-1 の結果より生糠の粒子密度は 1,321 kg·m⁻³ であった。これは, 間隙率 = 0 の場合である。

これより, 粗密度, 充密度及びかさ密度の間隙率, 間隙比を求めると以下ようになる。

粗密度 $n = 79.3\%$, $e = 3.83$

充密度 $n = 71.5\%$, $e = 2.51$

かさ密度 $n = 75.5\%$, $e = 3.08$

以上より, 糠の貯蔵状態の圧縮度を「かさ密度」程度と考えると, 糠の占める容積の約 3/4 は空気であり, 糠を油脂材料として運搬するのは不利である。

5-3 米糠ケーキ (圧搾ケーキ) の密度について

(1) 測定方法

圧搾油の供試糠は, 購入した米糠から, 目開き 0.85 mm のフルイを通過させて予め夾雑物, 碎米等を取り除いたものとした。篩に残留した粗糠 (ゴミ, 碎米, 胚芽等) は購入した糠全体の 13~15% であった。

供試米糠ケーキは, ケージプレス (内径 190.2 mm) による圧搾油によって得た搾油粕のケーキであり, 載荷荷重をすべて 15 トン (55.0 kgf/cm²) とし, 圧搾時間もすべて 48 分とした。

これらのケーキの質量 (g) を電子秤 (Mettler: PR 700, MAX. 700g) で量り, ノギス (300 mm, 1/20 mm) で厚さと直径を計り, 体積 (cm³) を求めた。

質量を体積で除すことにより, みかけの密度, 即ちかさ密度を求めた。

(2) 測定結果及び考察

測定結果を Table 5-3-1 に示す。

この表から分かるように, 500g 1 層, 500g 3 層, 500g 4 層の圧搾法の間に密度の差が見られるが, ごく僅かであった。

この結果, 層を重ねても, 1 層当りの糠の量が同じであれば, かさ密度は殆ど同じ値を示し, その平均は 1,160 kg·m⁻³ であった。

次に, 米糠ケーキの粒子密度を求め, 間隙率, 間隙比を用いて米糠の締め固まり程度を考察する。

生糠を構成している成分 (水, 米油, 脱脂糠) の割合は一定であるので, 5-1 で述べたように, 生糠の粒子密度の値は定温であればほぼ定数である。しかし, 米糠ケーキの場合には, 搾油により米油が流出し, 成分の割合が変化するので, それに伴い粒子密度は変化する。そこで, 搾油率と米糠ケーキの粒子密度の関係を求めた。

米糠ケーキ中の水分の占める容積を (V_w), 油分の占める割合を (V_o), 脱脂糠の占める容積を (V_b) とすると, 各々の占める容積は以下の式で表される。

$$V_w = \frac{aW}{\rho_w}, \quad V_o = \frac{bW(1-c)}{\rho_o},$$

$$V_b = \frac{W}{\rho_b} (1-a-b)$$

また, 米糠ケーキの重量 (W_k) は $W(1-bc)$ で表される。従って, 米糠ケーキの粒子密度 (ρ_k : kg·m⁻³) は

$$\rho_k = \frac{W_k}{V_w + V_o + V_b}$$

$$= \frac{1-bc}{\frac{a}{\rho_w} + \frac{b(1-c)}{\rho_o} + \frac{1-a-b}{\rho_b}} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ただし, a : 原料糠の含水率 b : 原料糠の含油率

Table 5-3-1 Apparent density of press cake in different layers

Multilayers	Press cake of rice bran					
	Exp. No.	Weight (g)	Thickness (mm)	Diameter (mm)	Volume (cm ³)	A. Density (kg·m ⁻³)
1 layers by 500 g expressing time 40~48 min.	206	454.4	14.68	189.0	411.64	1,100
	209	440.9	12.93	189.0	362.57	1,220
	210	442.0	13.30	189.0	372.95	1,190
	301	453.5	14.68	189.0	411.64	1,100
	302	446.4	13.87	189.0	388.93	1,150
	303	446.1	13.74	189.0	385.28	1,160
	304	447.3	13.76	189.0	385.84	1,160
Average		447.2	13.85	189.0	388.41	1,150
3 layers by 500 g expressing time 48 min.	305	1,339.4	41.12	189.0	1,153.05	1,160
	306	1,322.8	40.87	189.0	1,146.04	1,150
	307	1,351.3	41.73	189.0	1,170.15	1,150
	401	1,390.2	42.78	189.0	1,199.59	1,160
	403	1,395.5	43.03	189.0	1,206.60	1,160
Average		1,359.8	41.91	189.0	1,175.09	1,160
4 layers by 500 g expressing time 48 min.	402	1,843.4	56.55	189.0	1,585.72	1,160
	404	1,860.7	57.64	189.0	1,616.28	1,150
Average		1,852.1	57.01	189.0	1,651.00	1,160
Average						1,160

c : 搾油率 W : 原料糠重量 (kg)

ρ_w : 水の密度 (kg·m⁻³)

ρ_o : 米油の密度 (kg·m⁻³)

ρ_b : 脱脂糠密度 (kg·m⁻³)

実験を通して、原料糠の含水率 (a) は 11~12% であり、搾油前と搾油後でこの値は僅か 0.3% の差で、圧搾によって水分の排出は殆ど見られなかった。含油率 (b) は 19~21% であった。また、脱脂糠の密度は 1,610 (kg·m⁻³) であった。さらに、後述の「6. 米油の密度と温度の関係について」より、米油の密度 (ρ_o) は温度 (t) の関数で、 $\rho_o = 0.933 - 0.000635 t$ で求められる。これらを (5.3) 式に入れ ρ_k を c の関数とすれば、 ρ_k は次式で表される。

$$\rho_k = \frac{1 - 0.202c}{0.5380 + \frac{0.202(1-c)}{0.9171}} \quad \begin{array}{l} 25^\circ\text{C の場合} \\ \dots\dots\dots(5.4) \end{array}$$

ただし、含水率、含油率の値を、前述「5-1 米糠の粒子密度の測定」に供試したものと同一数値とした。すなわち、 a : 0.1118, b : 0.202 である。(5.4) 式と同じよ

うに、15°C, 20°C, 30°C, 35°C についても式を求め、各温度毎に搾油率から米糠ケーキの粒子密度を算出し、Fig. 5-1 に示した。

搾油温度により米糠ケーキの粒子密度に僅かの差があるが、搾油率が低い場合であり、その差は搾油率 0% のとき、15°C と 35°C で 5 kg·m⁻³ である。25°C を例に、搾油率に対する粒子密度を見ると、0% のとき 1,319 kg·m⁻³, 50% のとき 1,387 kg·m⁻³, 100% のとき 1,483 kg·m⁻³ である。これより搾油率を 50% とすれば、間隙率は、 $1,160/1,387 = 0.836$, すなわち 83.6% であり、間隙比は $164/836 = 0.196$ である。ただし、米糠ケーキはケージから取り出して数分経過したものを測定したので、応力緩和による体積膨張があり、ケージ内で圧搾載荷されている状態とは異なる。しかし、搾油中にケーキの体積を正確に測定できれば、(5.4) 式を (5.5) 式に変形し、体積から搾油率を推算することができる。

$$c = \frac{0.7583\rho_k - 1}{0.2203\rho_k - 0.202} \quad \dots\dots\dots(5.5)$$

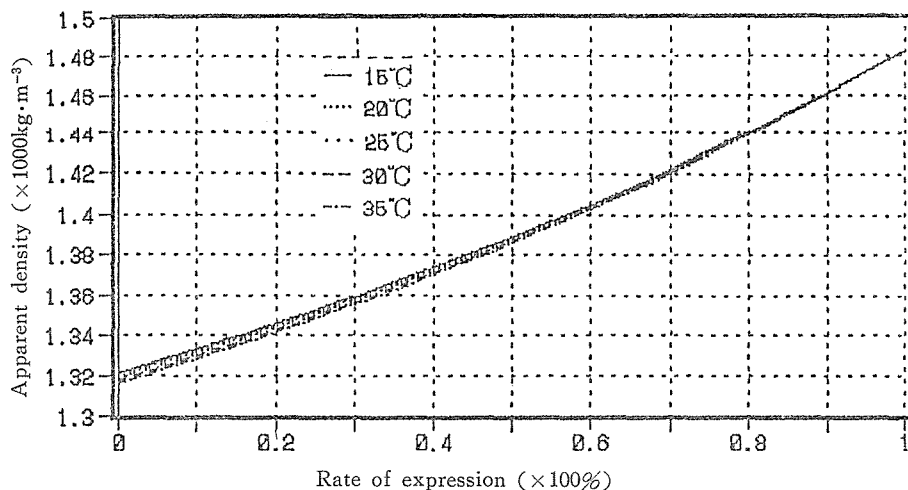


Fig. 5-1 Relation between apparent density and rate of expression in different temperature.

6. 米油の密度と温度の関係

(1) 実験方法

供試材料は、

① 米油精製工場から購入した溶剤抽出原油、

② 原油を濾過して蠟分を除去した脱蠟油、

③ すべての精製工程を経て得られた精製油、すなわち米油の製品
の3種である。

主な使用機器は以下の通りである。

オイルバス (TOKYO SEISAKUSHO MODEL OC-24S, 700W, 500W)

ルシャテリエ比重瓶 (柴田化学器械工業株式会社 呼び容量 250, 全量290, 副目盛り249.8~251.2 279~290)

水銀棒状温度計 (目盛り範囲 300°C, L型, 温度刻み 1°C)

電子秤 (Mettler: PR700 MAX. 700g 0~70g 0.01g 70~700g 0.1g)

上記3種の試料油すべてに、ルシャテリエ比重瓶を用いた。

一定質量の米油を計り、ルシャテリエ比重瓶に入れ、それをオイルバスに入れる。加熱昇温させ、副目盛りにより体積を読み取り、その温度における密度を求めた。しかし加熱昇温に伴い米油の体積が膨張し、副目盛りの範囲を越え、体積を読み取れなくなるので、温度範囲によって試料の質量を最小230gから最大265gまで5種とした。

昇温の温度刻みを約10°Cとし、温度の範囲を20°Cから

200°Cまでとした。ただし原油については、泡立ちがひどく測定不能になるので100°Cまでとした。また20°C以下の温度については、家庭用冷蔵庫を用いて6°Cにおける密度を求めた。

(2) 実験結果及び考察

測定結果を Table 6-1 に示し、その結果を Fig. 6-1 に示した。

測定した密度の最大値は6°C 940 kg·m⁻³ (原油)、最小値は196°C 809 kg·m⁻³ (脱蠟油)であった。

各々の油の密度 (ρ) と温度 (t) の関係は高い相関を示し、以下の式で表された。

原油 (6~60°C) $\rho = 943 - 0.840 t$ (kg·m⁻³)... (1')

(60~100°C) $\rho = 931 - 0.636 t$ (kg·m⁻³)... (1)

脱蠟油 (6~200°C) $\rho = 933 - 0.635 t$ (kg·m⁻³)... (2)

精製油 (8~200°C) $\mu = 929 - 0.592 t$ (kg·m⁻³)... (3)

求められた回帰式の温度係数 (熱膨張係数) は、式 (1), (1') のように一定ではなく約58°Cに屈折点が見られた。そこで脱蠟工程で濾布に残ったケーキ (蠟分) をビーカーに入れ、ウォーターバスで加温したところ58~65°Cに融点があることが確かめられた。米糠原油には3~9%の蠟が含まれており、米糠の蠟は低融点約27°C、中融点約42°C、高融点約82°Cの蠟から成ると言われるが²⁾、筆者の実験では、中融点の蠟が大部分であると推察された。

植物油の熱膨張係数は15~100°Cの範囲でほぼ一定で0.64~0.74であると報告されている³⁾。式(2), (3)より熱膨張係数は脱蠟油、精製油では8~200°Cでほぼ一定で、それぞれ0.635, 0.592であった。

Table 6-1 Experimental values, density of rice bran oil to temperature

Temp. °C	Density ρ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Temp. °C	Density ρ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Temp. °C	Density ρ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
6.0	940	6.0	932	8.0	927
8.0	935	20.0	921	20.5	919
20.0	926	30.0	915	30.5	911
30.0	918	40.0	908	40.5	906
40.0	909	50.0	902	51.0	898
50.0	902	60.0	894	60.0	892
60.0	892	69.0	888	70.0	886
70.0	886	80.0	882	81.0	879
80.0	883	90.0	875	90.0	873
90.0	875	98.0	869	100.0	870
100.0	866	110.0	860	110.0	865
Crude oil		119.5	853	120.0	859
		124.5	854	130.0	853
		128.5	852	140.0	845
		137.0	844	150.0	839
		146.0	838	160.0	834
		153.0	835	170.0	828
		158.0	833	180.0	822
		163.0	830	190.0	817
		168.0	827	198.0	816
		176.0	822	Refined oil	
		180.0	820		
		188.0	814		
		195.0	812		
		196.0	809		
		Dewaxed oil			

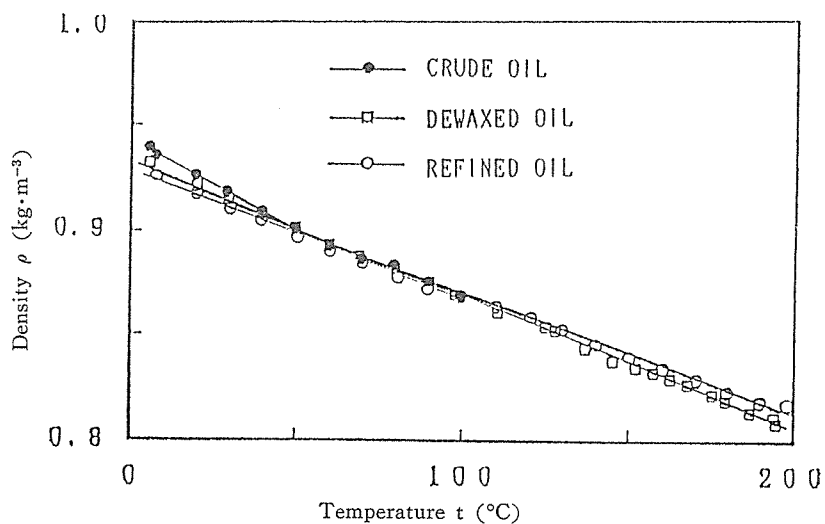


Fig. 6-1 Correlation between density of rice bran oil and temperature

Table 6-2 Density of semi-drying oil in vegetable oil

Vegetable oil	Density (¹⁵ / ₄)
Cotton seed oil	912~932
Corn oil	920~928
Sesame oil	914~929
Rape seed oil	910~918
Rice bran oil	912~928

密度は、約50℃までの温度範囲では、原油、脱蠟油、精製油の順に大きかった。これは蠟分等の含有量の差異によるものと推測された。

なお、主な半乾性油の密度は Table 6-2 のように報告されている。

(3) の回帰式より算出すると、精製油の密度は 15℃ :

920, 4℃ : 927であり Table 6-2 と比較し僅かに大きかった。これはウインタリング (0℃付近で析出する低融点蠟及び固体脂肪を除去すること) 工程を省略したため、僅かに蠟分が残余しているものと推察された。実際冬季精製油を実験室 (約10℃) に置いておくと白濁し、これを濾過したところ約 1.7% の蠟分がフィルターに残った。ただし、温度の高い産業開発途上国では、このウインタリング工程の必要はないと思われる。

7. 米油の粘度と温度の関係

(2) 実験装置及び実験方法

供試材料は前項の「密度の測定」で供試した 3 種類の米油である。

実験に用いた主な使用機器は以下の通りである。

回転粘度計 (東京計器 BL型 内筒回転型粘度計)

Table 7-1 Experimental values, viscosity of rice bran oil to temperature

Temp. °C	Viscosity μ mPa·s	Temp. °C	Viscosity μ mPa·s	Temp. °C	Viscosity μ mPa·s
21.4	107.6	21.5	81.7	9.8	130.2
24.3	93.0	22.5	78.1	19.8	79.6
29.5	74.8	29.0	60.1	21.5	76.0
30.0	61.4	30.3	57.9	30.8	49.5
39.3	41.0	40.0	40.3	32.0	49.7
40.0	49.0	40.5	39.2	39.6	38.5
50.0	33.2	50.0	27.6	40.5	35.3
50.0	27.8	50.0	29.6	49.3	24.7
59.0	16.3	59.0	22.5	50.5	25.9
59.5	20.7	60.0	23.4	61.0	19.7
60.5	21.5	69.0	18.4	62.0	19.4
70.0	16.0	70.0	18.4	70.3	15.2
79.2	13.0	78.0	15.7	70.5	15.5
80.0	12.8	80.0	15.6	80.1	12.9
88.5	11.1	90.0	13.7	80.5	13.1
90.0	10.9	91.0	13.9	89.5	11.1
91.5	10.5	92.5	13.0	96.0	11.0
		95.0	13.0	115.0	7.6
		107.0	9.3	126.0	6.4
		119.0	7.1	133.0	5.6
		131.0	5.8	145.0	4.7
		142.0	4.8	150.0	4.3
		150.0	4.3	160.0	3.8
		161.0	3.6	173.0	3.3
		170.5	3.2	202.0	2.5
		180.5	2.9		
		201.0	2.4		
Crude oil				Refined oil	
Dewaxed oil					

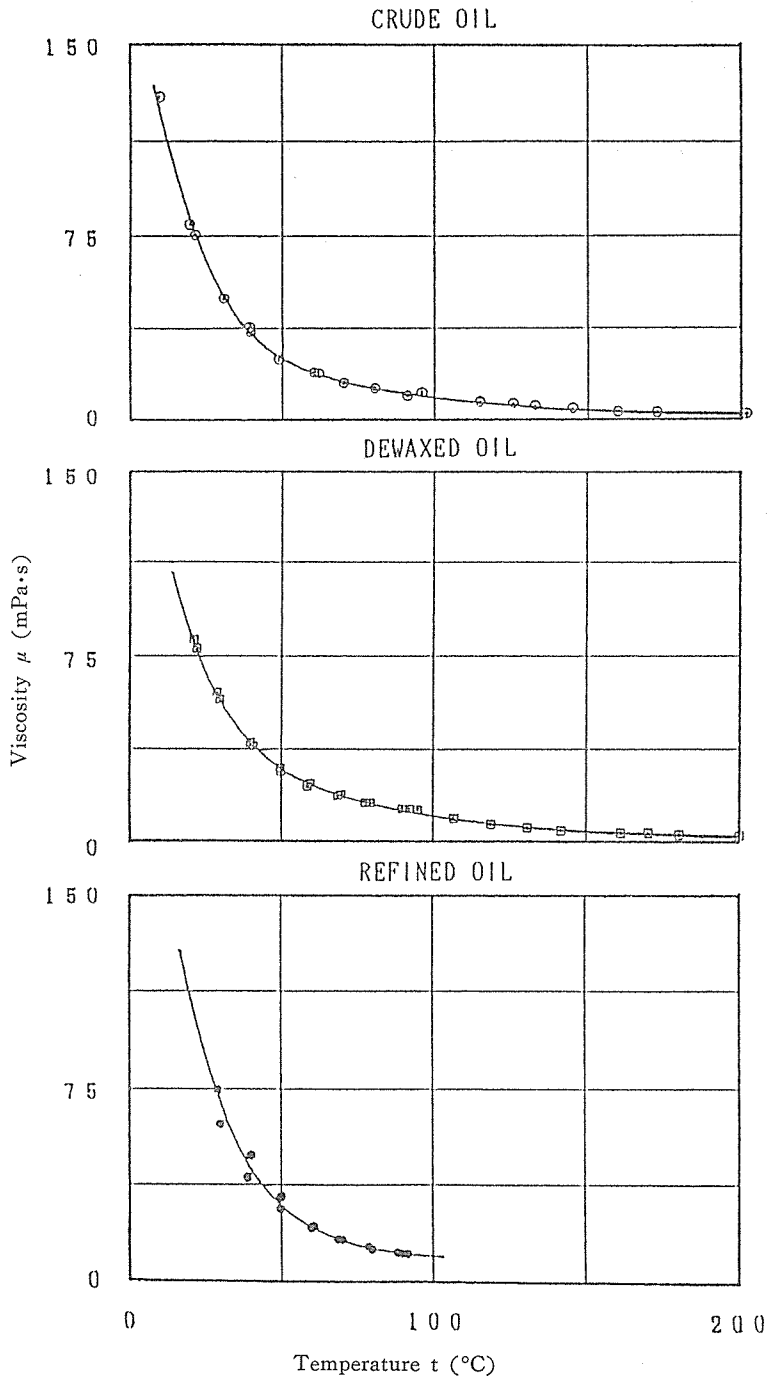


Fig. 7-1 Relation between viscosity and temperature in rice bran oil

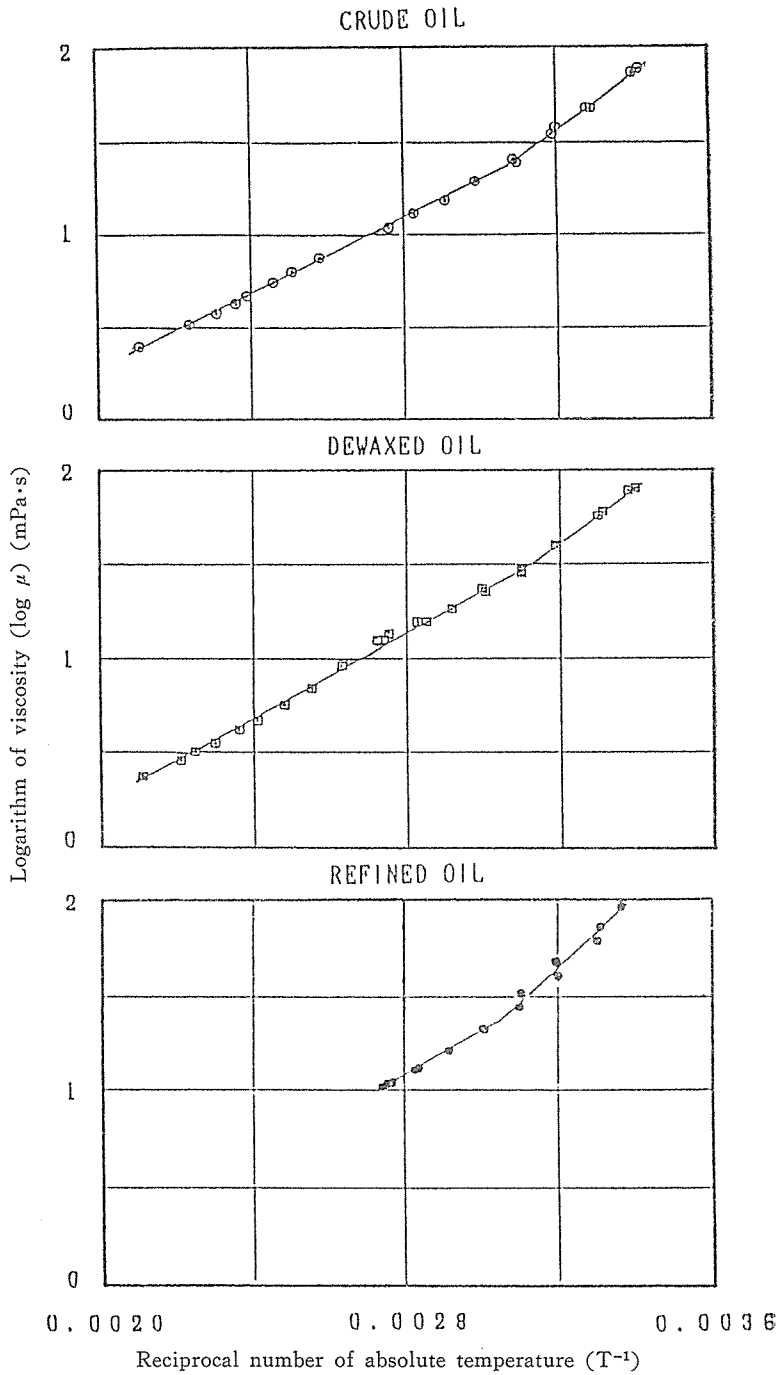


Fig. 7-2 Correlation between logarithm of viscosity and reciprocal number of absolute temperature

オイルバス (TOKYO SEISAKUSHO MODEL OC-24S 700W, 500W)

ビーカー (容量 500)

水銀棒状温度計 (目盛り範囲 0~300°C, L 型, 目盛り 1°C)

実験に用いた粘度計は操作が簡単で, 測定範囲も広く (10^{-5} ~ 10^{-2} Pa·s), 連続測定もできる回転粘度計である。この粘度計の計測部は内筒が受ける粘性トルクをトーションスプリングで平衡させ, このとき生じる偏角を直接読み取るものである。

測定には原油, 脱蠟油, 精製油をそれぞれ500g採り, 容量 500g のビーカーに入れた。密度の測定で用いたオイルバスにこれらのビーカーを入れ, オイルバスの液温の刻みを約10°Cとし, 粘度計のローターをビーカーのほぼ中心に設置し, 各温度に対して粘度を3回測定しその平均を測定値とした。

液温の測定には水銀棒状温度計を用い, オイルバスの液温を測り, 被測定油の油温とした。脱蠟油, 精製油に

ついては常温から約 200°C まで, 原油については泡を生じるので常温から 100°C までとした。

(2) 実験結果及び考察

実験結果を Table 7-1 に, その結果を Fig. 7-1 に示した。

粘度の最大値は 9.8°C, 130.2 mPa·s (精製油), 最小値は 201°C, 2.4 mPa·s (脱蠟油) であった。温度に対する粘度の変化率は低温から約50°Cまでの範囲で非常に大きく, 特に原油については, 僅かの温度変化に対して粘度は大きく変化した。

各米油の粘度の測定値と絶対温度の逆数 ($1/T$) を片対数方眼紙にプロットすると, その関係はそれぞれ一定の範囲で高い相関が見られ, 指数関数で表された。

$$\mu = A \cdot \exp(B/T) \dots\dots\dots(4)$$

ここに, μ は粘度 (mPa·s), T は液体の絶対温度 (K), A は粘度に関する常数, B を Andrade⁴⁾ は液体の活性化エネルギーに関係のある常数と呼び, $B=U/R$, U は見かけの活性化エネルギー (activation energy,

Table 7-2(1) Computation on Density, Viscosity, Coefficient of kinematic viscosity and Coefficient of temperature to viscosity for temperature
Crude oil

Temp. °C	Density ρ kg·m ⁻³	Viscosity μ mPa·s	ν^* m ² ·s ⁻¹	α^{**} -B·T ⁻²
0	943	316.83	255.98 × 10 ⁻⁶	-5.60
5	939	240.68	256.37	-5.40
10	935	184.62	197.54	-5.21
15	930	142.93	153.62	-5.03
20	926	111.62	120.52	-4.86
25	922	87.90	95.34	-4.70
30	918	69.77	76.01	-4.55
35	914	55.79	61.07	-4.40
40	909	44.93	49.41	-4.26
45	905	36.44	40.25	-4.13
50	901	29.74	33.01	-4.00
55	896	24.36	27.19	-2.62
60	893	21.42	23.99	-2.54
65	890	18.90	21.24	-2.47
70	886	16.74	18.88	-2.39
75	883	14.87	16.84	-2.33
80	880	13.26	15.07	-2.26
85	877	11.86	13.54	-2.20
90	874	10.65	12.18	-2.14
95	871	9.58	11.00	-2.08
100	867	8.65	9.97	-2.03

ν^* : Coefficient of kinematic viscosity

α^{**} : Coefficient of temperature to viscosity

Table 7-2(2) Computation on Density, Viscosity, Coefficient of kinematic viscosity and Coefficient of temperature to viscosity for temperature

Dewaxed oil

Temp. °C	Density ρ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Viscosity μ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	ν $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	α $-\text{B} \cdot \text{T}^{-2}$
0	933	209.15	224.24×10^{-6}	-4.73
5	930	165.79	178.36	-4.56
10	926	132.50	143.03	-4.40
15	923	106.72	115.60	-4.25
20	920	86.60	94.13	-4.11
25	917	70.76	77.18	-3.97
30	914	58.21	63.71	-3.84
35	910	48.19	52.93	-3.72
40	907	40.13	44.23	-3.60
45	904	33.62	37.18	-3.49
50	901	29.49	32.73	-2.50
55	898	26.08	29.05	-2.42
60	895	23.15	25.88	-2.35
65	891	20.62	23.13	-2.28
70	888	18.43	20.75	-2.21
75	885	16.53	18.67	-2.15
80	882	14.86	16.86	-2.09
85	879	13.41	15.26	-2.03
90	875	12.13	13.86	-1.98
95	872	11.01	12.62	-1.92
100	869	10.01	11.52	-1.87
105	866	9.13	10.54	-1.82
110	863	8.34	9.67	-1.78
115	860	7.64	8.89	-1.73
120	856	7.02	8.19	-1.69
125	853	6.46	7.57	-1.64
130	850	5.95	7.00	-1.60
135	847	5.50	6.50	-1.56
140	844	5.09	6.04	-1.53
145	840	4.72	5.62	-1.49
150	837	4.39	5.24	-1.46
155	834	4.08	4.89	-1.42
160	831	3.81	4.58	-1.39
165	828	3.55	4.29	-1.36
170	825	3.32	4.03	-1.33
175	821	3.11	3.79	-1.30
180	818	2.92	3.57	-1.27
185	815	2.74	3.36	-1.24
190	812	2.58	3.18	-1.21
195	809	2.43	3.00	-1.19
200	806	2.29	2.84	-1.16

Table 7-2(3) Computation on Density, Viscosity, Coefficient of kinematic viscosity and Coefficient of temperature to viscosity for temperature

Refined oil

Temp. °C	Density ρ kg·m ⁻³	Viscosity μ mPa·s	ν m ² ·s ⁻¹	α -B·T ⁻²
0	929	194.96	209.86×10 ⁻⁶	-4.85
5	926	153.67	165.94	-4.47
10	923	122.15	132.33	-4.51
15	920	97.87	106.37	-4.36
20	917	79.01	86.15	-4.21
25	914	64.25	70.28	-4.07
30	911	52.60	57.72	-3.94
35	908	43.34	47.72	-3.81
40	905	35.94	39.70	-3.69
45	902	29.98	33.22	-3.57
50	899	25.14	27.95	-3.46
55	896	22.32	24.89	-2.19
60	893	20.03	22.42	-2.13
65	891	18.04	20.26	-2.06
70	888	16.30	18.37	-2.00
75	885	14.77	16.70	-1.95
80	882	13.42	15.22	-1.89
85	879	12.22	13.91	-1.84
90	876	11.16	12.75	-1.79
95	873	10.22	11.71	-1.74
100	870	9.38	10.79	-1.69
105	867	8.63	9.96	-1.65
110	864	7.96	9.21	-1.61
115	861	7.35	8.54	-1.57
120	858	6.80	7.93	-1.53
125	855	6.31	7.38	-1.49
130	852	5.86	6.88	-1.45
135	849	5.46	6.43	-1.42
140	846	5.09	6.01	-1.38
145	843	4.75	5.64	-1.35
150	840	4.45	5.29	-1.32
155	837	4.17	4.98	-1.29
160	834	3.91	4.69	-1.26
165	831	3.67	4.42	-1.23
170	828	3.46	4.17	-1.20
175	825	3.26	3.95	-1.17
180	822	3.08	3.74	-1.15
185	819	2.91	3.55	-1.12
190	817	2.75	3.37	-1.10
195	814	2.60	3.20	-1.08
200	811	2.47	3.04	-1.05

Table 7-3 Activation energy (cal/mol) for rice bran oil

Rice bran oil A temperature of inflection (°C)	Crude (54.8)	Dewaxed (45.5)	Refined (50.7)
High temperature	8.286	7.004	7.174
Low temperature	5.594	5.170	4.679

where,

Low temperature=temperature regions below a point of inflection

High temperature=temperature regions upper a point of inflection

cal/mol), R は気体常数=1.986cal/mol である.

各々の米油について, (4) 式の係数 A, B を求めるため, 測定値を $\log \mu = \log A + B/T \cdot \log e$ で表し, 各点をプロットしたものを Fig. 7-2 に示した.

それぞれ固有の温度で屈折点を生じ, この点を境にして回帰直線の傾きが異なった.

これらの回帰直線より, (4) 式の A, B を求め, 以下の式を得た. ただし, μ の単位は $\text{mPa}\cdot\text{s}$ である.

原油

$$(6 \sim 55^\circ\text{C}) \mu = 73 \times 10^{-6} \exp(4,172.37/T) \dots (5)$$

$$(55 \sim 100^\circ\text{C}) \mu = 4,542 \times 10^{-6} \exp(2,816.69/T) \dots (6)$$

脱蠟油

$$(6 \sim 45^\circ\text{C}) \mu = 513 \times 10^{-6} \exp(3,526.69/T) \dots (7)$$

$$(45 \sim 200^\circ\text{C}) \mu = 9,325 \times 10^{-6} \exp(2,603.04/T) \dots (8)$$

精製油

$$(6 \sim 51^\circ\text{C}) \mu = 350 \times 10^{-6} \exp(3,612.28/T) \dots (9)$$

$$(51 \sim 200^\circ\text{C}) \mu = 16,953 \times 10^{-6} \exp(2,355.90/T) \dots (10)$$

各々の油について, 求められた 2 つの回帰式を連立させ, 屈折点の温度を求めると, その温度は $45 \sim 55^\circ\text{C}$ の範囲にあった.

更に, 粘度の温度係数 α (温度 1°C 変わったときの粘

度の変化率%) を求めて見る. α は次式で表される⁴⁾.

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dT} \dots (11)$$

(11) 式に (4) 式を代入すると

$$\alpha = \frac{-B}{T^2} \dots (12)$$

即ち, 温度係数 α は $1/T$ に比例することが分かった.

求めた回帰式を用いて, 各油温に対する米油の粘度を算出し, 前項で求めた米油の密度と温度の回帰式から各油温に対する密度を算出して, 動粘性係数 ($\nu = \mu/\rho$) を求めた. また (12) 式を用いて温度係数 (α) を求め, これらを併せ Table 7-2 に示した.

また, (5) ~ (10) 式の B より見かけの活性化エネルギー (U) を $U = B \times R$ より求め Table 7-3 に示した.

活性化エネルギー (U) は流動の指標と見なすことができる. すなわち, U が大きいということは, 流動度が小さいことを示す.

Table 7-2, Table 7-3 より米油の粘度の温度係数は低温では大きく, 高温では著しく小さい. また, 原油, 脱蠟油, 精製油の順に小さな値であった.

なお, 搾油時及び蠟過工程の温度は低温の範囲に属するものであることが分かった.

参考文献

- 1) S. M. Henderson, R. L. Perry: Agricultural Process Engineering, Second Edition, pp. 128~136
- 2) 諫山忠幸 (1975): 米, その商品化と流通. pp. 295~311
- 3) 桑田 勉 (1956): 改稿 油脂化学, 岩波書店, pp. 133~138
- 4) 川崎種一 (1980): 回転粘度計による粘性測定の実際, New Food Industry, Vol. 4~6, p. 30