

各種穀物潤滑によるチタン薄板のエリクセン値の向上

吉村 博文*・西原 俊文*²・野西 利次*・井ノ内 直良*

Improvement of the Erichsen Values of Titanium Sheets Using Various Cereal Flour Lubricants

Hirofumi YOSHIMURA, Toshifumi NISHIHARA, Toshitugu NONISHI and Naoyoshi INOUCHI

Synopsis : The lubrication by various cereal flours, such as wheat flour, rice flour, and so on, was studied to develop a nonpolluting lubricant for sheet metal forming. The lubricants were prepared in the following way. (1) Each cereal flour was dissolved in water at several concentrations. (2) Each suspension was coated on a titanium sheet. (3) The specimens were dried and cereal particles, thus, remained on the both surfaces of a specimen. The performance of these lubricants were evaluated by the Erichsen cupping test. Most of the flours show higher Erichsen values than grease. Furthermore, the cereal particles on the deformed specimens were observed by scanning electron microscopy, and analyzed by electron probe microanalyzer. The observations suggest that the starch particles covered with protein and lipid can reduce the friction between dies and a specimen.

Key words: Erichsen cupping test; sheet metal forming; lubricant; titanium sheet; suspension; starch particle; lipid; protein; cereal flours.

1. 緒言

我々の日常生活の利便性に大きく寄与している機能性豊かな多くの工業製品は、その製造あるいは使用の過程において、資源、環境の面で多くの問題を引き起こしている。例えば、機械油をはじめとする油類のすべては、工業的には極めて優れた機能を発揮するものの、いったん公共の場に漏洩すると、水質汚濁や海洋汚染の例からもわかるように、環境に対しては決して優しい物質ではない。また油類は、天然資源で有限であることを考えると、これを継続して使用し続けることに将来の不安を残さざるを得ない。

ここでとりあげる薄板のプレス成形加工においてもさまざまな問題がある。例えば、潤滑油そのものの取り扱い方、加工後の製品からの油の除去工程での環境に対する影響、使用した後の廃油の処理方法などである。そのために従来の潤滑油に代わる、地球に優しく、かつリサイクル可能な新しいタイプの潤滑剤が望まれる。

そこで、これを満たす可能性のある新しいタイプの潤滑剤として考えられるものを、我々人間の生活を構成している衣食住の中、特に「食」に求めることにした。その理由は、人間の体内に入ってくるものであれば少なくとも地球環境に対しても優しいはずであるとの考えにもとづく。

著者の一人は、新しいタイプの潤滑剤の探索において、チタンおよびステンレス薄板を用いて、エリクセン(Er)値の向上に小麦粉が効果があることをつきとめり、これを契機に小麦粉を中心として、これに準ずる他の穀物の中にも、このような性能が潜んでいるのではないかとの見地から、

本研究を立案し実施した。なお、今回選んだ穀物類は、小麦系3種類、米系4種類およびとうもろこし系3種類の計10種類である。また供試薄板には、食品関連機器に多用され、かつ近年需要が急速に拡大しているチタン薄板を用い、エリクセン試験によって潤滑性能を探索した。それとともにこれらの数種類の穀物による潤滑効果の差を見ることによって、穀物の潤滑効果の要因を調べ、その機構解明を試みた。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

プレス成形用供試材には、工業用純チタン(JIS1種)の薄板材(板厚:0.5mm)を用いた。供試材の引張特性、表面あらさをTable 1に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 エリクセン試験

試験片としては、1辺が90mmの正方形で板厚0.5mmの薄板を用いた。試験方法として、ダイスとしわ押さえ間に

Table 1. Tensile properties and surface roughnesses of a titanium sheet.

| Tensile properties | | | Roughness | |
|-------------------------|------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 0.2% proof stress (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Ave. (μ m) | Max. (μ m) |
| 182 | 321 | 45.5 | 0.26 | 2.36 |

平成12年9月6日受付 平成13年4月12日受理 (Received on Sep. 6, 2000; Accepted on Apr. 12, 2001)

* 福山大学工学部 (Faculty of Engineering, Fukuyama University, Gakuen-cho Fukuyama 729-0292)

*2 福山大学大学院生 (Graduate Student, Fukuyama University)

Table 2. Composition of various cereals (mass%).

| ① Wheat flours | | | | | |
|-----------------|-------------------|---------|-------|-------|-------|
| | Carbo- hydrate | Protein | Lipid | Water | Ashes |
| Soft flour | 75.9 | 8.0 | 1.7 | 14.0 | 0.4 |
| Hard flour | 71.6 | 11.7 | 1.8 | 14.5 | 0.4 |
| Wheat starch | 86.0 | 0.2 | 0.5 | 13.1 | 0.2 |
| ② Rice flours | | | | | |
| | Carbo- hydrate | Protein | Lipid | Water | Ashes |
| Rice flour | 77.9 | 6.5 | 1.3 | 14.0 | 0.3 |
| Rice bran | 46.1 | 13.2 | 18.3 | 13.5 | 8.9 |
| Waxy rice flour | 79.1 | 6.9 | 1.3 | 12.5 | 0.2 |
| Rice starch | 89.3 | 0.2 | 0.7 | 9.7 | 0.1 |
| ③ Corn flours | | | | | |
| | Carbo- hydrate | Protein | Lipid | Water | Ashes |
| Corn A | 75.0 | 6.6 | 2.6 | 14.0 | 0.7 |
| Corn B | 82.0 | 7.3 | 0.75 | 8.0 | 0.56 |
| Corn starch | 86.3 | 0.1 | 0.7 | 12.8 | 0.1 |

試験片の厚みの他に0.05 mmのすき間を設けた状態で行う、JISエリクセン試験A法を適用し、試験片が破断した時のポンチ先端がしわ押さえ面から移動した距離をもってエリクセン値（以下、Er値と記す）とした。

なお、試験工具の主要部寸法は、ポンチ先端の直径が20 mm、ダイスおよびしわ押えの内径が、それぞれ27 mmおよび33 mmである。

2.2.2 潤滑剤の塗布条件

チタン薄板表面への潤滑剤の塗布条件は次の3通りである。①各種穀物の粉を水で溶いた懸濁液を塗布するもの。②潤滑剤を塗布しないもの。③通常のエリクセン試験で使用されるグラファイト系グリースを塗布するもの。

(1) 各種穀物

今回使用した穀物の粉は10種類であり、次のように小麦、米、とうもろこし、の3系統に分類することができる。

- ①小麦系：薄力粉，強力粉，小麦デンプン（小麦粉の炭水化物より抽出したデンプン）。
- ②米系：米粉，米ぬか，もち粉，米デンプン（米粉の炭水化物より抽出したデンプン）。
- ③とうもろこし系：試作品・コーンA（とうもろこしを粉碎した粉），コーンB（とうもろこし粉を一度糊化した後再粉化），コーンスターチ（とうもろこし粉の炭水化物より抽出したデンプン）。

なお、穀物粉の主成分は、炭水化物，タンパク質，脂質，水分，灰分で構成されており，各種穀物粉の成分例をTable 2に示す。

(2) 懸濁液

各種穀物の粉をそれぞれ水に溶かして攪拌し懸濁液とす

る。懸濁液は，穀物粉の濃度5，10，20および30質量%をそれぞれ水に溶かしたものとし，以下これを～%剤と記す。これを薄板試験片の両面に塗布し，その後，乾燥機に入れて乾燥の後，エリクセン試験を行いEr値の測定を行った。

2.3 表面観察

エリクセン試験の前と後との試験片表面における穀物粉の付着状態（濃度20%）を，走査型電子顕微鏡(SEM)によって観察した。

試験後の観察場所は，ダイスとポンチにより試験片が曲がり始める部分のダイス側面とポンチ側面の両面である。

試験片表面には，懸濁液が乾燥して，薄膜となって付着しているために，金属光沢がなく，電導性が良くない。そこで，観察前に試験片表面に金の蒸着を行い，電導性を良くして観察を行った。

2.4 表面状態の分析

塗布乾燥された穀物粉の成分がどのように分布しているのか，その分布状態を調べた。分析用供試材には，小麦系薄力粉を選び，その懸濁液（濃度1%）を試験片に塗布，乾燥したものを電子線微量分析装置(EPMA)によって分析した。

分析ではデンプンとタンパク質の分布状態に着目した。デンプンは小麦粉の主成分である炭水化物の中に含まれ，その主成分はぶどう糖($C_6H_{12}O_6$)であるので，デンプンの確認はこの中の炭素を判定元素として選んだ。またタンパク質，いわゆるグルテン(NHCO)は，その中の窒素を判定元素³⁾として選んだ。すなわち，炭素と窒素の分布は，それぞれデンプンとタンパク質の分布に対応する。

3. 実験結果

3.1 Er値の向上

各種穀物潤滑によるチタン薄板のエリクセン試験の結果を小麦系，米系，とうもろこし系の順に示す。

なお，試験片に各種穀物の粉の懸濁液を塗布乾燥後エリクセン試験を行ったものの他に，これらとの比較を行うために薄板に潤滑剤を塗布しない未処理のもの，およびグラファイト系グリース（以下グリースと記す）を塗布したのも調べた。その結果，Er値は前者（未処理）が約10.2 mm，後者（グリース）が約11.2 mmであった。

(1) 小麦系の場合

小麦系懸濁液濃度を増加させることによって，Er値がどのように変化するのかをFig. 1に示す。

Er値は，小麦粉（薄力粉，強力粉）懸濁液濃度の増加とともに向上する。例えば，5%剤を塗布したものでEr値は既にグリースよりも高い約11.6 mm，30%剤では約12.8 mmまで向上し，両懸濁液ともにほぼ同程度の値を示す。なお，試験片に付着した小麦粉の片面膜厚の違いを濃度

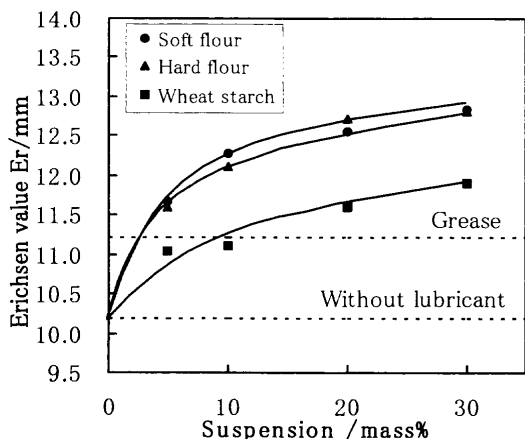


Fig. 1. Effects of the concentrations of wheat flours on the Erichsen values of titanium sheets (Ti JIS-1).

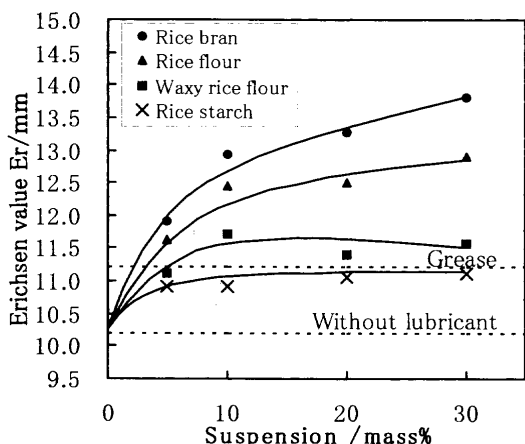


Fig. 2. Effects of the concentrations of rice flours on the Erichsen values of titanium sheets (Ti JIS-1).

10% 剤と 30% 剤で比較すると、10% 剤では、片面膜厚約 20 μm、30% 剤では約 50 μm 付着していた。

一方、小麦粉の炭水化物より抽出した小麦デンプンでは、10~20% 剤でグリースより高い値を示すものの、前述の小麦粉に比べ、各濃度で 1.0 mm 程度の低い値である。すなわち、小麦デンプンよりもこれにタンパク質、脂質を含む、いわゆる普通の小麦粉の方が Er 値向上に対しては有効である。

(2) 米系の場合

米系懸濁液を使用した場合についても同様に、Er 値がどのように変化するかを調べた。その結果を Fig. 2 に示す。

米系懸濁液において、米粉、米ぬかの Er 値は、濃度の増加とともに向上する。例えば、米粉の場合 5% 剤で約 11.6 mm であり、各濃度では前述の薄力粉とよく似た傾向を示す。米ぬかでは、5% 剤で約 11.9 mm、30% 剤では約 13.8 mm であり極めて高い値を示した。

一方、米粉の炭水化物より抽出した米デンプンでは、未処理に比べ Er 値がわずかに向上するものの、濃度によらず、グリース並のほぼ一様な値を示した。

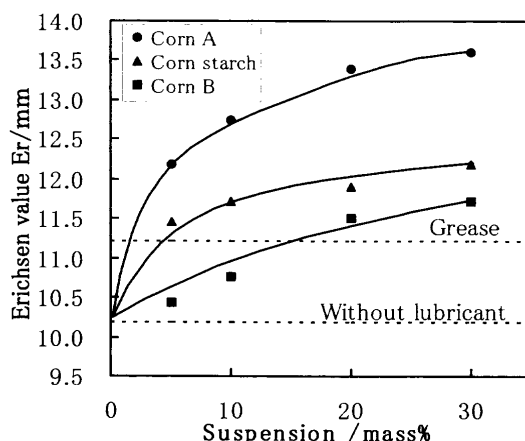


Fig. 3. Effects of the concentrations of corn flours on the Erichsen values of titanium sheets (Ti JIS-1).

もち粉では、唯一 10% 剤の約 11.7 mm をピークにして若干減少傾向を示した。

(3) とうもろこし系の場合

とうもろこし系懸濁液濃度を増加させることによって、Er 値がどのように変化するかを Fig. 3 に示す。

懸濁液濃度の増加と共にすべての種類で Er 値は向上する。例えば、コーン A の Er 値は、5% 剤において約 12.2 mm を示し低濃度において極めて高い値を示した。そして、高濃度においても約 13.6 mm であり優れた値を示した。

とうもろこし粉の炭水化物より抽出したコーンスターチの Er 値は、5% 剤で約 11.5 mm、30% 剤で約 12.2 mm であり、前述の米デンプン、小麦デンプンよりも優れた向上を示した。また、コーン B の Er 値は 20% 剤付近でグリースより高くなるものの、あまり優れた値を示さなかった。

3.2 試験前後での表面観察

3.2.1 ダイス側表面

(1) 小麦系の場合

薄力粉を用いたエリクセン試験前・後の SEM 観察結果をそれぞれ Fig. 4(a), (b) に示す。観察場所は、試験片のダイス側表面である。

試験前では表面全体に大粒および小粒の球状粒子が緻密に混在している。それぞれの粒径は、大粒が約 20 μm、小粒が約 5 μm である。試験後では、これらの粒子の一部に変形したのが見られたものの、壊れたものは見られない。一部転がって移動したものと推測も可能である。

強力粉、小麦デンプンについても観察を行ったが、ほぼ同様の大小それぞれの粒子が緻密に混在し、それらは試験後においてもほぼ同様の状態であった。

(2) 米系の場合

米ぬかでも小麦粉の場合とよく似た様相を示し、比較的小さな粒子と細胞壁とが見られた。また試験後では、小さな粒子は小麦同様に転がって移動しているように観察できる。

米粉、米デンプン、もち粉についても観察を行ったとこ

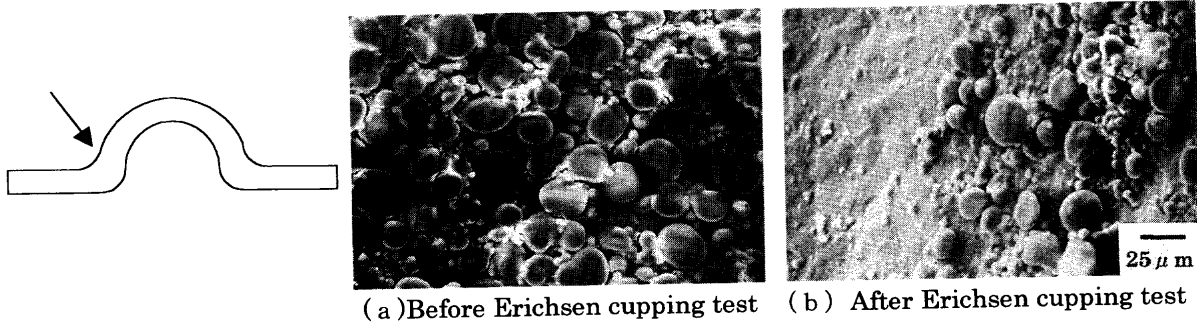


Fig. 4. SEM micrographs of soft flour on the die-side surface of titanium sheets before and after the Erichsen cupping test.

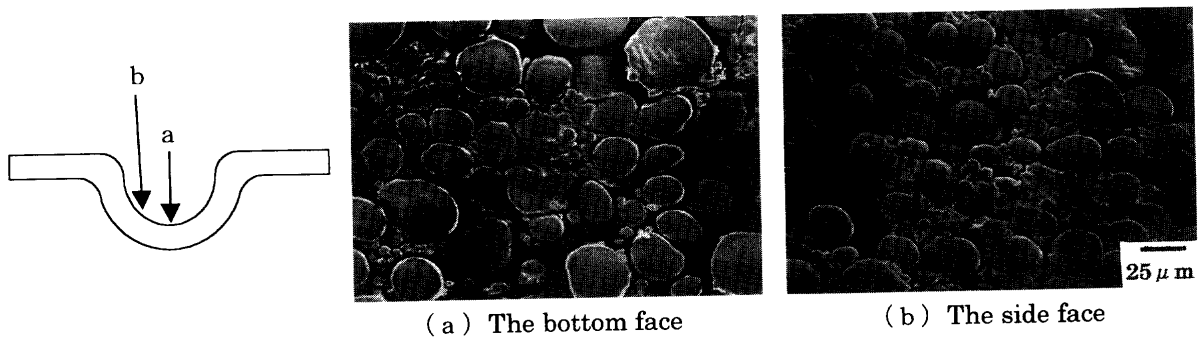


Fig. 5. SEM micrographs of soft flour on the punch-side surface of titanium sheets after Erichsen cupping test.

る、いずれにおいても次のような特徴を有する粒子が確認された。すなわち、その形状は、多少角張った多角形状粒子であり、粒径は約 $5\mu\text{m}$ であった。試験前後において、破壊した粒子は見られなかった。

(3) とうもろこし系の場合

コーンスターチおよびコーンAでも、同じように表面に粒子の存在が確認された。その形状は、丸みのある多角形であり、粒径は小麦粉の大粒および小粒の中間的な約 $15\mu\text{m}$ であった。また、試験後の観察では破壊した粒子はなかった。

一方、コーンBでは、試験前には比較的大きな粒子であったものが、試験後には小さな粒子になり、その粒子には破壊したものが見られた。これは、一度糊化したものを再粉化した粉末のためであろう。

これら穀物の中で小麦デンプン、米デンプン、コーンスターチのように、タンパク質、脂質の含有割合がほぼ同じであるもののEr値を比較してみると、その値の高い順にコーンスターチ、小麦デンプン、米デンプンとなっている。これを粒径と関連づけると、コーンスターチの様な、粒子が比較的大きく、かつ粒子が丸みを帯び、均一なものがEr値が高い。その次の小麦デンプンは大小異なる粒子が存在し、大きいものは前のコーンスターチよりも大きい、小粒もかなり存在して、大小が混在している。米デンプンは全般的に小粒である。すなわち粒径が大きく、しかも揃っているものほど、Er値は高い値を示している。

3.2.2 ポンチ側表面

試験後の試験片ポンチ側表面で、しかも凹部に付着している、底面と側面の小麦系薄力粉の状態をSEMにて観察した結果をそれぞれFig. 5(a), (b)に示す。

底面(a)に付着した薄力粉の大粒は、ポンチによって押されることで粒子が球状から楕円状に変形している。

また、側面(b)もほぼ同じように、粒子は楕円状に変形をしている。しかし、破壊しているものは見られなかった。

なお、小粒は底面、側面ともにほとんど変形していない。

3.3 表面状態分析

Fig. 4, 5で観察された大小それぞれの粒子とその周辺の構成を調べるため、EPMAを用いて炭素と窒素を分析し、それらの分布状態を調べた。エリクセン試験前のサンプルについて得られた、SEM像およびデンプン粒子をあらゆる炭素とグルテンをあらゆる窒素の分布をそれぞれFig. 6(a)~(c)に示す。

まず(b)の炭素が高い大小それぞれの塊部分は(a)の大小それぞれの粒子部分と一致することがわかる。このことより、大小それぞれの粒子は炭素を主成分とするデンプン粒子であることが確認された。

また、(c)と(a)の比較を行ったところ、大小それぞれの粒子の周辺部分において、最も窒素の強度が高いことがわかる。このことより、試験片表面全体には窒素を主成分とするタンパク質中のグルテンが分布していることが確認さ

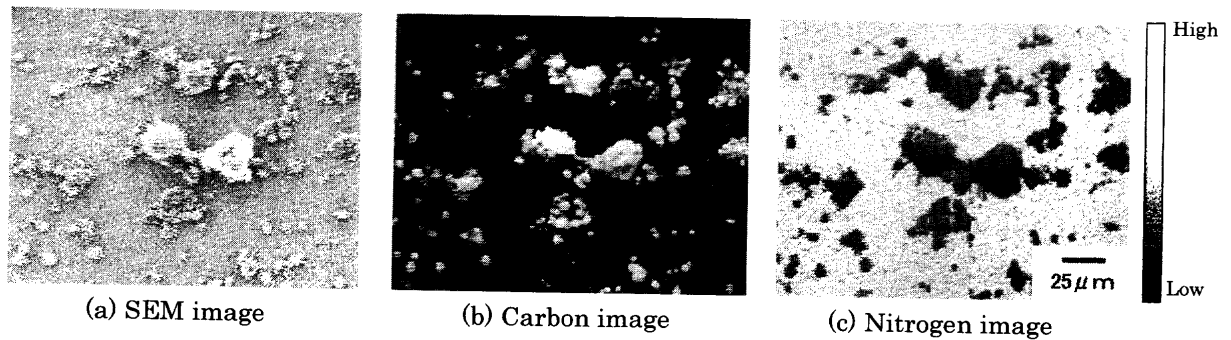


Fig. 6. EPMA analysis of soft flour on the surface of a titanium sheet.

れた。

4. 考察

各種穀物潤滑によるエリクセン試験の結果を総括すると、まずEr値が高い値を示したものは、その高い順に、米ぬか、コーンA、米粉、薄力粉、強力粉、コーンスターチ、小麦デンプン、コーンB、もち粉であり、あまり高い値を示さなかったのが米デンプンである。

また、これらを供試薄板に塗布しエリクセン試験した時のEr値および試験前後での表面状態をSEMで観察した結果などから、穀物系潤滑剤によるEr値の向上要因は次の3点にあると思われる。すなわち①穀物懸濁液濃度、②穀物の中に存在する粒子、③タンパク質、脂質の影響である。これらを順を追って考察する。

まず、濃度の影響であるが、濃度が増すとEr値が高くなるのは、塗布乾燥した時の穀物粉の付着厚さが厚くなるためである。これは単に潤滑性能を有する物質の付着厚みが増せば、それだけ潤滑効果が顕著に現れることを示している。

そして、ここで最も注目すべき点は、これら穀物懸濁液を試験片表面に塗布、乾燥させた付着状態では、多くの粒子が存在していることである。しかも、粒径が大きく比較的揃っているものほど、Er値が高い傾向がみられる。そして、これらの粒子は試験中壊れていないことから、転がって移動しているものと著者らは推測する。

丸味を帯びた粒子が転がることは、固体と固体との間の摩擦軽減に有効であることは容易に推定される。そして、この粒子をタンパク質、脂質等が取り囲んで、粒子の転がりを助長することによる相乗効果によって、摩擦が軽減されてEr値が向上しているものと考えられる。これを模式的に示したのがFig. 7である。

なお、各系の潤滑効果は上記のように考えているが、各穀物粉間、例えば小麦系の薄力粉、米系の米ぬか、とうもろこし系のコーンAとの間のEr値の微妙の理由については、まだ明らかではなく今後の研究課題である。

また、本研究は新しいタイプの潤滑剤開発のためのシー

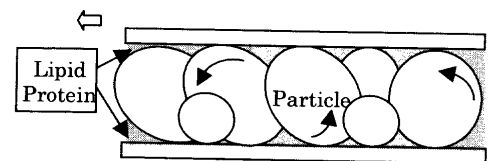


Fig. 7. Schematic illustration of cereal flour lubrication.

ズ探索研究であるが、今後は摩擦係数などに関する基礎研究と実用化のための応用研究が必要であり、現在研究中有である。また、粒子の転がりによる潤滑向上という仮説も今後検証されるべき課題である。

5. 結論

小麦粉に代表される各種穀物系潤滑剤10種を選び、これらをチタン薄板に塗布してエリクセン試験を行い、最適な潤滑作用のある穀物粉選択のための探索研究を行った。また、これら穀物潤滑の潤滑機構解明も試みた。

その結果は、次の通りである。

(1) 小麦系のEr値向上が確認された。小麦より抽出した小麦デンプンにも潤滑効果があるものの、脂質、タンパク質を含む小麦粉（薄力、強力）ほどのEr値向上効果はない(Fig. 1)。

(2) 米系では、米粉にも高い潤滑効果があるが、脂質の多い米ぬかではさらに高く、今回使用した穀物の中で最も優れた潤滑効果を示す(Fig. 2)。

(3) とうもろこし系では、コーンスターチにも高い潤滑効果があるが、脂質、タンパク質の多いコーンAではさらに高い(Fig. 3)。

(4) SEMおよびEPMAにより、試料表面にはデンプン粒子とそれを取り巻くタンパク質、脂質が観察された。エリクセン試験後も粒子形状はほぼそのままの形が維持されている。また、粒子径が大きく、揃っているほどEr値が高い。

穀物潤滑の潤滑機構は上記の結果から、次のように推測される。

(1) デンプン粒子が成形時に転がる。

(2) デンプン粒子を取り囲む脂質、タンパク質は、粒子が転がる時の潤滑を助長する役割を果たす。

本研究でとりあげた小麦をはじめとする穀物潤滑は、エリクセン試験の結果により、グリースを上まわるプレス成形性を有することが確認され、その機構に関して興味深い知見が得られた。このように、穀物潤滑剤は新しいタイプの無公害潤滑剤として、今後、実用化に向けた更なる検討が期待される。

また、福山大学卒業生・貫目剛史、坂本貴浩、上垣内裕

之君に実験の協力を得たことを記し、ここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) H.Yoshimura, T.Hayashi, J.Katayama and E.Fuwa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **40** (1999), 134.
- 2) 二國二郎, 中村道徳, 鈴木繁男: 澱粉科学ハンドブック, 朝倉書店, 東京, (1977), 392.
- 3) 理化学辞典第5版, 岩波書店, 東京, (1998), 498.