製紙機械の安定した連続運転を実現する合成潤滑油*

エクソンモービル L & PS ○ピーター ワイス, ステファン エリオット
 エクソンモービルマーケティング(有) 高野 聡, 笠井 隆志

Synthetic Solution for Pulp and Paper Mills

Peter J. Weis and Stephen W. Eliot

ExxonMobil L & PS

Satoshi Takano and Takashi Kasai

ExxonMobil Marketing Services Pte. Ltd.

ピーター ワイス

There are a lot of myths today around the use of synthetic lubricants. However, the realization that synthetic lubricants can contribute to a pulp & paper mills bottom line is becoming a reality.

The objective of this presentation is to provide an understanding on the use of synthetic lubricants and to assist mill personnel in the evaluation of their application. To accomplish this the term "synthetic" needs to be defined. The different types of synthetic lubricants along with the specific performance benefits will be addressed. We would like to provide a technical answer on the benefits of using synthetic lubricants and how to identify the areas in the mills where the benefits may be achieved.

Specific mill case histories will be highlighted to support how the benefits are realized. These case histories will involve both synthetic oil and grease applications. Synthetic lubricants must be able to do what a mineral oil lubricant can not or provide an economic benefit. We would like to provide ideas for personnel to go back to their mills and be able to identify cost saving areas.

分類: W₀ その他, Z₂ 紙パルプ産業一般

1. 緒 言

弊社は長年に渡り世界中の製紙メーカーに対し潤滑油を供給してきた。モービルが1999年に供給した製紙機械向け潤滑油の量は約5万キロリットルで、全世界の約25%（エクソンモービル推定）のシェアを有している。

安定した連続運転の実現に潤滑油は欠くことのできないものであるが、近年の著しいマシン高速化、製品品質の向上に伴って高温下で運転されることも多く、

潤滑油への性能要求はさらに厳しいものとなっている。また、環境への配慮から廃棄物量を削減するために潤滑油の交換周期の延長を求める声も多く、この点においても潤滑油の高性能化が必要となっており、合成油の適用が望ましい潤滑箇所が増加している。

合成油は目的とした構造の化合物を化学反応により作り出した油であり、求める性能に合わせて数多くの種類が存在する。ここでは製紙機械について、近年の製紙機械用潤滑油への要求項目、弊社の潤滑油開発への取り組み、適正な潤滑油の使用による実機での経験について過去数年の取り組みを紹介する。

*平成12年度年次大会講演（講演 No. B 16, 17）

2. 製紙機械が求める潤滑油への要求項目

2.1 製紙機械用潤滑油に求められる性能

一般の循環系統油に求められる性能は適正な粘度、長寿命（酸化安定性）、耐摩耗性、ろ過特性、低泡立ち性等が挙げられる。製紙機械の潤滑油についてはこれに加えて防錆/防食性、水分離性、スラッジ分散性が加わる。特に防錆性については水、さらには白水が混入した際にも十分な防錆性能を発揮できるようにしなければならないため、特に要求の厳しい項目である。

近年紙の需要増に対応するため機械の新設や増設、さらに既存設備の改造が行われた結果、現在稼動している設備はスピードアップに伴う潤滑箇所の高温化など、潤滑油への要求は厳しくなっている。さらに環境への負荷軽減の観点から油の使用量削減が叫ばれており、使用条件が著しく厳しくなっているにもかかわらず、潤滑油の長寿命化（熱・酸化安定性の向上）が求められている。

以下に製紙機械用潤滑油に要求される性能をまとめてみる。

- ・長寿命
- ・耐摩耗性
- ・低スラッジ性
- ・水分離性
- ・防錆/防食性
- ・ろ過性能
- ・低泡立ち性
- ・ベアリングの疲労防止
- ・粘度温度特性（高粘度指数）

潤滑油の開発では要求項目の選定と、各項目についてどの程度の性能が必要となるかを決定する過程が、開発初期の最重要課題であり、この過程に狂いが生じると、その後の方向性は全く異なる側に進む可能性が高い。

次に決定した要求性能を満たすべく処方決定していくのであるが、一般に工業用潤滑油の処方は95%以上の基油と5%以下の添加剤の混合物である。潤滑油の性能は基油に由来する部分と添加剤の効果による部分とがあり、基油に由来する性能は添加剤によって改良できないことが多いため、基油の選定は重要である。また、ある特定の性能に注目しすぎる余り、他に悪影響を及ぼすような処方をしないように、常に性能のバランスに注意する必要がある。

3. 合成油の特長と種類

潤滑油に求められる究極の性能は摩擦、摩耗が全く

無く、あらゆる条件下において物理的、化学的な変化が無いことである。天然に存在する物質から作られる鉱物油や天然油脂類ではこれらを実現することは不可能であり、また改良の余地はそれほど残されていないが、構造を特定して製造することのできる合成油には性能向上の余地は十分に残されていると思われる。

3.1 合成油の種類

天然に存在せず化学合成によって作った油を合成油とするならば、この世には数限りない種類の合成油が存在することになる。しかし潤滑油の用途として性能、価格の面から使用される合成油の種類は限られる。その分類に関しては、種々の分け方が考えられるが、使用量と構造により大別すれば炭化水素系〔ポリアルファオレフィン（PAO）、ポリイソブチレン（PIB）、アルキル芳香族〕、エステル系（ポリオールエステル、ジエステル）、ポリグリコール系（水溶性、油溶性）、その他（フェニルエーテル、リン酸エステル、シリコン油等）とすることができる。これらの合成油の中から各潤滑条件に適した油を選定していくことが求められる。

3.2 成油の優れた特性

合成油はその種類によって様々な特徴を持っている。代表的なものとしては以下のようなものが挙げられる。

3.2.1 粘度特性

重合系（ある繰り返し単位を重合させた構造をもつ化合物）の合成油は粘度の調節が可能で、重合度により低粘度から高粘度まで自由に製造できる。中でもPAO、エステル、ポリグリコールといった分子の屈曲性の良いものは温度によって見かけの分子の大きさが変化するため温度に対する粘度変化が小さい（粘度指数が大きい）。一方で分子構造中に立体障害となる芳香核やかさ高い側鎖を持つものは粘度指数が小さいが、粘度圧力係数が大きく高トラクションを得られる。

3.2.2 酸化安定性・熱安定性

ポリオレフィン系の合成油は構造的には鉱油と類似しているため、基油単体としての熱・酸化安定性は鉱油のそれと殆ど変わらない。しかし、ポリオレフィンには鉱油に含まれているような不純物が含まれていないため添加剤の添加効果が高く、適切な添加剤処方により優れた安定性を発揮する。また、分子量分布が非常に狭いので蒸発損失は少ない。

エステル系の合成油は構造的に熱・酸化安定性が優れており、特にβ位の炭素に水素が結合していないヒンダードエステルは他のエステルに比べても優れた安定性を発揮する。また、蒸発損失は非常に少なく、引火点も高い。

ポリグリコール系の合成油は基油のみで考えると他の基油に対して熱・酸化安定性に劣る。劣化の際には、構造中のエーテル結合部の反応性が高く、反応の結果低分子のアルデヒド、カルボン酸の形で空气中に飛散する。その結果スラッジの生成は少ない。

3.2.3 低温流動性

合成油は鉱油と異なりワックス分を含まない。ワックス分は低温度領域で油中から析出し、3次元的に結晶が成長して流動性が妨げられるため、一般的な鉱油で-5℃から-10℃にて流動性が失われる。それに対し合成油はワックス分を含まないため、例えばPAOであれば-50℃以下でも流動性がある。エステルやポリグリコールは分子構造に極性を持つためPAOより若干劣るものの、優れた低温流動性を示す。

3.3 合成油採用によるメリット

前述した合成油の特長を生かし、合成油を採用することによって以下のメリットが期待できる。

3.3.1 エネルギー効率の向上

合成油は粘度指数が高いため潤滑部分の温度が高い場合、鉱油よりも1つ下の粘度グレードの油を使用できる場合がある。油の粘性（内部）抵抗を低減することができる。また低温流動性に優れるため機械の起動時などには大幅なトルク低減が期待できる。従って、内燃機関や各種歯車用の潤滑油として合成油が使用された場合には、鉱油に比べてエネルギー効率が向上する。特にウォームギヤについては、油の攪拌抵抗がエネルギー損失に与える影響が大きいため、合成油の採用によるメリットが大きい。図1は弊社が過去に実施したウォームギヤでの効率に関する調査の結果である。この評価では合成油の使用により鉱物油使用時に比べ2%から8.8%の効率向上が確認されている。

3.3.2 使用温度範囲の拡大

以下のような理由から高温側、低温側ともに使用温

度範囲を拡大できる。

高温側：

- ・粘度指数が高いため高温でも粘度を保てる。
- ・熱・酸化安定性に優れている。
- ・分子量のばらつきが少なく蒸発量が少ない。

低温側：

- ・粘度指数が高いため低温領域で粘度の上昇が少ない。
- ・ワックス分を含まないため流動点が低く、低温流動性に優れる。

3.3.3 適用範囲の拡大

潤滑油が使用される各種機械装置は、日々改良が加えられ、高出力、高効率、小型といった方向性で進歩を重ねている。これらはその殆どが潤滑油にとって過酷な方向であり、従来の鉱物油では対応できない場合があった。そのような場合には合成油を適用することで、それを解決できる場合も多い。

3.3.4 メンテナンス/オペレーションコストの低減

合成油の適用により大幅なメンテナンスやオペレーションコストを削減できる。合成油は一般に鉱物油に比較して長寿命で適用温度範囲も広く、低蒸発性であるため、油の交換周期の延長、季節毎に粘度の異なる油への交換が不要、油補給量の低減が可能である。

4. 製紙機械用潤滑油の開発

4.1 モービルの潤滑油研究開発

弊社の潤滑油開発は製紙機械メーカー殿、ベアリング等の機械要素メーカー殿及び製紙会社殿との連携により成り立っている。各メーカーと機械や油の技術動向についてディスカッションを繰り返し、油の要求性能に対する方向性をお互いに確認し合いながら、その要求性能に基づきラボ試験、弊社独自のテストリグを使用した評価、実機試験、特定地域での多数の実機評価を行っていく。特に弊社における長年の開発において培われたテストリグでの経験は、試作油の実機での性能を予測するのに非常に役立っている。

4.2 製紙機械用潤滑油の開発課題

製紙機械用潤滑油には製紙機械ならではの以下のような要素が絡んでくる。

- ・高温での操業
- ・各種材料の混入（硫酸バンド、マグネシウムケイ酸塩、白土等）
- ・腐食性のロール洗浄材の混入
- ・多量の水の混入（プロセス水、冷却水、凝縮水）
- ・メンテナンス頻度の減少
- ・油補給量の減少

図1 合成油の使用による効率の向上（鉱物油使用時との比較）

これらの要素を考慮に入れて先に挙げた製紙機械用潤滑油の要求性能を満たすように、開発を進める必要がある。

5. 潤滑油性能の評価

なぜ JIS, ASTM 等の標準化された試験のみではなく独自の試験を行うのかと疑問に思う方も多いことと思う。確かに独自の試験方法を用いることは、競合他社品との性能差を第三者が判断することを難解にしている。しかしながら、その評価を導入することによって実機に近い状態での潤滑油性能を見ることになるため、各種潤滑油の性能差をより明らかにすることができるのである。従って優れた評価方法を持つ事は、潤滑油の開発には欠かせないものであり、試験法自体の開発も必要不可欠である。

弊社では機械メーカー殿の試験方法と弊社独自の試験方法にて評価を行っている。以下に代表的な幾つかの試験方法と評価について述べる事とする。

5.1 FAG FE-8 ベ어링テストリグ (写真 1)

この試験機は評価する油やグリースの種類に合わせて様々な評価を行うことができる。製紙機械用潤滑油の評価では油の潤滑性、耐摩耗性、清浄性、劣化度合い、添加剤の消耗度を評価することができる。特にこの試験では油の性状によりヒーターボックス内のスラッジ生成に差が出る。熱・酸化安定性、清浄性に劣る油の場合ヒーターボックス内のプレートに多量の堆積物が生成する (写真 2)。

5.2 ペーパーミルベ어링リグテスト (写真 3)

高温下での清浄分散作用と酸化安定性を評価する試験。球面軌道ころ軸受に高温の油を循環式で供給する。また、定期的な水分の混入も行う。この状態で数百時間運転した後の堆積物量及び油の劣化状態を判定する。

5.3 テーパーローラーベ어링テスト

水分の混入した油を使用した場合のベ어링寿命を測定する試験で、油の疲労防止性能を評価する。

5.4 加速劣化試験 (プロパティリーテンションテスト)

油の劣化と清浄分散性を評価する試験。高温、長時間の循環試験で、定期的に水を混入させながら実施される。油の劣化度合いと系統内のフィルターの清浄度合いによって、循環系等油に必要とされる酸化安定性、ろ過性、清浄分散性を評価し、潤滑油性能が長時間の使用によってどのように変化していくのかを検証する。

5.5 薄膜防錆試験

この試験はオイルタンクの気相部分での防錆性に視点を置いた試験である。鉄板を油に浸し、高温のエア

写真 1 FAG FE-8 テストリグ

写真 2 ヒーターボックス

写真 3 ペーパーミルベ어링テスト

オープン中に吊るしておく。これにより鉄板の表面には極めて薄い油の膜のみが残った状態になり、これを湯煎の上に設置して板に錆が出るまでの時間で評価する。

5.6 B-10 酸化試験

4 種類の触媒金属を入れた潤滑油を高温の条件下で空気の吹き込みを行い油の劣化を測定する試験。試験時間と試験温度により幾つかの試験条件がある。

6. 適正潤滑油の選定

機械の連続した安定操作のためには、適正な潤滑油

の選定が不可欠である。潤滑油の選定に際して最も重要な項目は、潤滑箇所における油膜厚さであり通常EHL（弾性流体潤滑）理論に基づいた計算式によって算出される。EHL理論の詳細については紙面の関係上割愛するが、その概念を転がり軸受の潤滑理論を例にして簡単に述べる（図2）。

転がり軸受での潤滑は点ないし線の接触により形成される外接表面（ノンコンフォーミングサーフェス）において行われる。荷重下で転がり軸受は高圧接触のため、金属の弾性変形を生じ、この変形により出来た微小表面の中に取り込まれた油が、高圧下の潤滑油膜を形成する。この油膜をEHL油膜（弾性流体油膜）と呼ぶ。EHL油膜は極めて薄く、 $0.25\mu\text{m}$ のオーダーにあり、適正な潤滑を確保するためには、相接する二面の表面粗さの持つ突起を十分に分離するに足る厚さの油膜を形成する必要がある。薄すぎる油膜では、これらの突起部分が接触を起こし、摩擦を増大し、摩擦やカジリ、あるいは疲労による軸受の損傷を招く結果となり、逆に厚すぎる油膜では転動体が回転せずに滑りを起こすことがある。

7. 合成油適用の実例紹介

これまで、合成油の優れた特性を述べてきたが、ここでは合成油の実際の適用例をペーパーミルの部分を例にとりて紹介する。ペーパーミルでは潤滑油が非常に高温にさらされることが多く、合成油の適用によるメリットの大きい個所である。

7.1 スーパーカレンダー

近年のスーパーカレンダーは紙の表面を滑らかに仕上げるため、ロールの表面温度は高く、潤滑油に対して高温での優れた酸化安定性が求められる。しかもオイルタンクは小さくなる傾向にあるため、熱負荷が常にかかり易い状況となっている。合成油の適用により、この厳しい条件下においても安定した長期にわたる連

続運転が実現できる。

7.2 攪拌機のギヤボックス

油温が上昇してしまうギヤボックスの潤滑油には、合成油を使用することで温度低減の効果（潤滑油内部粘性抵抗の減少）、より厚い潤滑膜の形成（歯車噛み合い箇所及び軸受部）効果が期待でき、ギヤボックスの安定した長期にわたる連続運転が可能となる。

7.3 ドライヤーパートのベアリング

弊社は各軸受に形成される潤滑油膜厚さをEHL理論に基づいて計算することが可能であり、適正な油膜厚さの製品を選定することで、大幅にベアリング寿命を伸ばすことができる。潤滑箇所が高温になる場合には合成潤滑油の適用により潤滑油の粘度を大きく変更することなく適正な油膜厚さを維持できる。もちろん、潤滑油自体の寿命も長く、かつシステムを長期にわたりきれいに保つことができる。

これらの潤滑箇所においても、それほど厳しくない運転条件下では、鉱物油でも十分に優れた性能を発揮することができる。高温箇所の潤滑など鉱物油の適用が難しい箇所の潤滑や、省エネルギー効果、機械寿命の延長が要求される場合には、合成油の適用が望ましい。合成油は油の単価は高いものの、機械寿命の延長、メンテナンスコストの低減、省エネルギー効果などからトータルとしてのコストセービングを可能にする。

ここで再度合成油の優れた特長をまとめる。

- ・粘度温度特性（高い粘度指数）
- ・熱・酸化安定性
- ・低温流動性
- ・油寿命の延長/油交換の減少
- ・エネルギーロスの低減
- ・低蒸発性による消費量の低減

最後に合成油によるトータルコストセービングを端的に表した、あるエッセイストの言葉を紹介して終わりたい。

"It's unwise to pay too much, but it's worse to pay too little. When you pay too much, you lose a little money, that is all. When you pay too little, you sometimes lose everything, because the thing you bought was incapable of doing the thing it was bought to do."

The common law of business balance prohibits paying a little and getting a lot—it can't be done.

If you deal with the lowest bidder, it is well to add something for the risk you run, and if you do that, you will have enough money for something better" (John Ruskin, English Essayist, 1819–1900)

図2 玉軸受における玉と内輪との接触面の概要図

海外における高温ジャケットロールによる製紙カレンダーの運転実例 —ソフトカレンダー、及びハードニップカレンダー—

トクデン株式会社 シンガポールオフィス 藤本 壹裕

今日、日本をはじめ、海外の多くの製紙工場で、ペーパー、及び板紙のカレンダーに、高温ジャケットロールが、数多く運転されている。主として、ソフトカレンダーとハードニップカレンダーが、高温で、しかも高速で運転されている。

最近、とみにあらゆるペーパーや板紙が、嵩があって平滑性がよいこと、そして印刷性に優れていることが要求されてきている。また、ハイグロスであることも要求されている。これらペーパー、及び板紙の品質向上の要求には、高温ジャケットロールが要求を満たしている。すなわち、ソフトカレンダーやハードニップカレンダーに組み込まれたジャケットロールが、高温で、ワンパス及び低ニップでカレンダー掛けをされるので、これらの要求に込えている。

また、従来、コーテッドペーパー (Coated paper) は、高温ロールでのカレンダーでは、カレンダー後の表面仕上がり状態に問題があった。水ぶくれのような現象を起こしたり、コーティングカラー (Coating Colour) が剥離するということがあった。しかし、現在ではかなり、コーティングカラーの開発をされている。ソフトカレンダーで、かなりの高温のジャケットロールによって運転をされている。その結果は、顧客の満足を得るものとなっている。

また、板紙では、ハードニップカレンダー、すなわち、高温ロールで、ワンパスの低ニップでのカレンダー掛けが重要である。従来のように、6段や4段のマシンカレンダーでは、とても板紙の嵩を得ることができない。

(本文 87 ページ)

製紙機械の安定した連続運転を実現する合成潤滑油

エクソンモービル L & PS ピーター ワイス、ステファン エリオット
エクソンモービルマーケティング(株) 高野 聡、笠井 隆志

今日、合成潤滑油の優れた面に関する漠然とした理解があり、その一方で、合成潤滑油を製紙機械に使用した場合、経費節減をもたらすという現実がある。

本報の目的は、合成潤滑油の使用に関する理解を深め、合成潤滑油の製紙機械への適用の手だてとしていただくことである。まず「合成」という言葉を説明し、異なった特長を持つ、さまざまな合成潤滑油の種類について紹介する。合成潤滑油の特長は、下記の通りである。

①優れた粘度温度特性、②高い熱・酸化安定性、③優れた流動特性、④鉱物油との親和性 (特にポリアルファオレフィン)、⑤オイル交換周期の延長、⑥摩擦損失の低減、⑦オイル消費量の低減

また、合成潤滑油がもたらす利益についての技術的なアドバイスと、その製紙機械の適用箇所を見つける方法について述べる。

合成潤滑油が鉱物油と比較して、いかに経費節減に貢献するかについて、具体的な適用例を取り上げながら説明する。本報が、実際に製紙機械の運転や管理に携わる方々の経費節減のヒントに繋がることを望む。

(本文 96 ページ)