フリクションプレートの係合過程のシミュレーション解析*
(第2報, 計算結果)矢部 寛^{*1}, 高橋 篤^{*2}, 熊谷 頼範^{*2}Numerical Simulation of Engaging Process of Friction Plate
(2nd Report, Calculated Results)Hiroshi YABE^{*3}, Atsushi TAKAHASHI and Yorinori KUMAGAI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Osaka Electro-communication University,
18-8 Hatsu-cho, Neyagawa-shi, Osaka, 572-8530 Japan

Based on the analytical model introduced in the previous report, numerical simulations of the engaging process of a friction plate are executed in this paper. Some fundamental quantities necessary for the calculation are firstly estimated to fit the calculated results with the experimental values. Then, some parameter survey studies are developed, for an example, the effects of permeability value of the facing material to the engaging characteristics are studied, so that the engaging mechanisms are theoretically discussed.

Key Words: Friction Plate, Numerical Simulation, Engaging Mechanism, Mixed Lubrication, Contact Model

1. 結 言

近年, 自動車用 AT の高性能化を支える要素の1つとして, より優れたクラッチが求められており, それに伴ってフリクションプレート(湿式クラッチ)の係合すきまでの現象を理論的に解析し, 係合過程をシミュレーション計算することによって, 過程全般のメカニズムを理解することが重要になってきている。

このような背景に立って, 前報⁽¹⁾では, フリクションプレート係合過程のシミュレーション計算の理論モデルを提案した。そこでは, コアプレートとセパレータプレート間の相互作用力として, 「マクロ油膜力」, 「マイクロ油膜力」, 「接触力」の3つを考えた。

「マクロ油膜力」はコアプレートとセパレータプレートの接近に伴うスクイズ油膜力で, フェーシング材の多孔質性, 係合すきま内およびフェーシング材内の流体に作用する遠心力項, フェーシング材表面の粗面としての潤滑特性を考慮して解析した。「マイクロ油膜力」はフェーシング材繊維素がセパレータプレートとの相対すべり速度の下で, ステップ軸受として機能することによる油膜力で, 簡単なステップ軸受理論でこれを評価した。「接触力」については, フェーシ

ング材表面繊維素が2層のばね系によってコアプレートで支持されているとのモデルを用いてこれを解析した。

これらをもとに, 係合過程のシミュレーション計算の基礎式としての, 係合すきまの変化を記述する方程式およびコアプレートの回転の運動方程式を提示した。

本報告では, 実験による摩擦モーメント特性の結果をシミュレーション計算によって説明することを試みるとともに, いくつかの作動パラメータに関するパラメータサーベイによって, フリクションプレートの作動特性について検討することとする。

2. 実験結果とシミュレーション計算

本研究では, まず, SAE #2 試験機によって, 汎用のペーパー摩擦材を用いたフリクションプレートの摩擦モーメント特性を実測した。フェーシング材形状としては半径方向溝を有しない円環状の場合の他に, 等間隔に6本あるいは24本の半径方向溝を有する場合を対象とした。なお, 実験は1枚のコアプレートを2枚のセパレータプレートではさむ構成で行っており, 次の図1で示す摩擦モーメントはコアプレート両面に作用するモーメントの和であることを注記する。

実験で設定した諸寸法諸元および作動条件を表1に示す。諸記号の定義等については前報を参照のこと。表中, *印を付した項目は, 実験段階ではその値が不詳であり, 従来からの経験による推定値, あるいはシミュレーション計算によってその値を同定する必要がある。

* 原稿受付 2006年12月15日。

^{*1} 正員, 名誉員, 大阪電気通信大学工学部(〒572-8530 寝屋川市初町18-8)。^{*2} (株)本田技術研究所(〒321-3393 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630)。

E-mail: yabe@isc.osakac.ac.jp

ある特性値項である。後者については、摩擦モーメント特性の実験結果とシミュレーション結果が一致するように値を設定した。表1中にはこのように同定した値も併せて記載している。なお、これらの中、フェーシング材の透過率 k 、母材部弾性係数 E_{p0} 、および摩擦係数 f は摩擦モーメント特性に及ぼす影響が比較的大きい。逆に言えば、その他のパラメータの値については、摩擦モーメント特性に及ぼす影響が比較的小さく、同定に際しての誤差が大きい可能性がある。

表1のパラメータの中、フェーシング材の透過率 k は最も重要なパラメータの1つであり、その妥当性について検討しておく必要がある。

Natsumeda ら⁽²⁾やBerger ら⁽³⁾は係合過程のシミュレーション計算においてフェーシング材の透過率を $k=$

$10^{-14} \sim 10^{-12} \text{ m}^2$ とし、特にBerger らは、代表的な値として $k=10^{-13} \text{ m}^2$ を挙げている。他方、服部ら⁽⁴⁾は、フェーシング材の気孔径を測定し、それを直円管に置き直してその管摩擦係数から透過率を見積り、 $k=7.1 \sim 13.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ を得ている。

実験による透過率の測定結果の報告はあまり多くはない。山本・江口ら⁽⁵⁾は数種類のフェーシング材の透過率を測定し、代表的な気孔率の場合、 $k=1.0 \sim 1.8 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ の結果を得ている。しかし、この値は、フェーシング材の厚さ方向に流体を流して測定したものである。本研究での透過率は、流体がフェーシング材面内を面に沿う方向に流れる場合の値であり、流れの方向に対する透過率の異方性も考えておかなければならない。江口らは続いて、面に沿う方向への流量を測定している⁽⁶⁾が、透過率の値は示していない。筆者が彼らの実験条件をもとに推定したところ、 $k=0.84 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 程度となった。

透過率の値は、無論、フェーシング材材質に依存する。そのような点を考慮しても、表1での透過率の値は、以上の文献での値と比較的によく一致しており、ある程度の妥当性があるものと考えられる。

図1は実験結果と、表1に示したパラメータ値を用いて行った、溝数 N_g が0本、6本および24本の場合のシミュレーション結果の比較である。

フリクションプレート係合過程での係合すきままでの状態については次章でより詳しく検討することとし、ここでは、諸パラメータの値を同定することによって、実験結果と定性的にも定量的にも比較的近いシミュレーション計算結果が得られていること、半径方向溝数が多いほど係合すきまから潤滑油がスクイズアウトされやすく、そのため、フェーシング材繊維とセパレータプレートとの接触がより早期から生じ、結果として、溝数が多いほど摩擦モーメントの立ち上がりが顕著になること等を指摘しておくにとどめる。

3. 摩擦モーメント特性に及ぼす諸パラメータの影響

本章ではシミュレーション計算によって、摩擦モーメント特性に及ぼすいくつかのパラメータの影響について検討する。シミュレーション計算に際しては、基本的な諸元および作動条件を表1の値とし、パラメータサーベイする当該パラメータについては、表1を参考にして、その値を数種類設定した。なお、半径方向溝数は24本とし、また、1枚のコアプレートを2枚のセパレータプレートではさんだ構成を想定した。

3-1 フェーシング材透過率の影響 フェーシング材の透過率はフリクションプレートの摩擦モーメント特性に及ぼす影響が大きいパラメータの1つである。

図2にフェーシング材の透過率 k を変化させたとき

Table 1 Specifications and experimental conditions

	Symbol	Unit	Value
Facing material			
Outer radius	r_o	mm	59.0
Inner radius	r_i	mm	47.1
Thickness	h_p	mm	0.4
*Permeability coefficient	k	m^2	3.0×10^{-13}
*Elastic modulus (Fiber)	E_{pf}	MPa	10.0
*Elastic modulus (Matrix)	E_{p0}	MPa	400.0
No. of grooves	N_g	—	0, 6, 24
Angular span of groove	θ_g	deg	1.08
*Coefficient of friction	f	—	0.125
Fiber			
Radius of fiber (ave.)	R_f	μm	20.0
*Elipticity	e	—	0.7
*Standard dev. of heights	σ_p	μm	5.0
Oil			
Viscosity (67°C)	μ	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	9.0×10^{-3}
Density (67°C)	ρ	kg/m^3	831.0
Others			
Moment of inertia	I	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.122
Load	w_0	N	6664
Time const. of loading	t_p	s	0.02
Initial gap height	h_0	mm	0.25
Initial rotating velocity	N_0	min^{-1}	2940
Atmospheric pressure	p_a	MPa	0.1013
Reference gap height	h_{ref}	μm	1.0
Reference time	t_0	s	0.001

Fig. 1 Experimental and theoretical results

のシミュレーション計算結果を示す。

図 2(a)は $p_a r_0^3$ で除して無次元化した全摩擦モーメント T_0 の計算結果である。ただし、 p_a : 大気圧、 r_0 : フェーシング材外半径、である。フリクションプレートの摩擦モーメント特性の実測結果報告⁷⁾では、2つの典型的なパターンが見られる。1つは、係合開始直後に全摩擦モーメントの値が急峻に増大し、最大値を経て、その後徐々に減少していく特性を示すもの、もう1つは係合開始直後での全摩擦モーメントの増大の後もゆるやかにその値が増大していくという特性を示すものである。図 2(a)において、透過率の値が比較的大きい場合 [$k=5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ の場合など] では、その傾向はそんなには明確でないが、おおむね前者のパターンとなり、透過率の値が小さい場合 [$k=1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ の場合など] では後者のパターンとなっている。

(a) Dimensionless moment

(b) Dimensionless rotating velocity

(c) Fractions of components of moment

作動指標値の1つとして、無次元コアプレート回転角速度 [$\Omega = \omega / \omega_0$, ω : 回転角速度, ω_0 : 初期回転角速度] を取り上げ、図 2(b)に示す。コアプレートの回転角速度は係合開始初期を除いて、ほぼ直線的に低下する。また、図 2(a)において、透過率の値が大きい場合は摩擦モーメントの値のレベルが高く、したがって係合完了までの時間が短くなる。それに対応した傾向が図 2(b)に示されている。

全摩擦モーメント T_0 は、流体せん断摩擦モーメント T_f と接触摩擦モーメント T_c から成る。図 2(c)は、透過率の値が大きい場合および小さい場合として、 $k=5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 、および $k=1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ の2つを取り上げ、全摩擦モーメントの内訳を示す。流体せん断摩擦モーメント成分 T_f については、表 1 に示した条件の場合は、摩擦モーメント全体に対する寄与は小さく、ま

(d) Fractions of components of load

(e) Dimensionless gap height

(f) Fractional ratio of contacting fibers

Fig. 2 Effects of permeability coefficient

た、透過率の大きさの影響も小さい。図 2(a)に示されている透過率の影響は、主として、接触摩擦モーメント成分 T_c の相違によって生じていることが分かる。

このときの様子をよりよく理解するために、無次元負荷〔負荷を $p_0 r_0^2$ で除して無次元化した値〕について検討する。フェーシング材をセパレータプレートに押し付ける力 W_0 は、マクロ油膜力 W_f 、マイクロ油膜力 W_m 、および接触力 W_c の和と釣り合う。図 2(d)に、無次元負荷を各成分に分けて示す。図から分かるように、マイクロ油膜力 W_m が占める割合は比較的小さい。マクロ油膜力 W_f は主として係合すきまでのスクイズ作用によって生じる。フェーシング材の透過率が大きければ、すきま内にスクイズ油膜圧力が生じて、容易に周囲に抜け出し、結果として、マクロ油膜力は小さくなる。そうすると押し付け力に対抗すべく、接触力 W_c が増加することになる。

図 2(e)はノミナルすきまの大きさの計算結果を代表的 2 例の透過率の値の場合について示す。図 2(d)に示したマクロ油膜力に対するフェーシング材透過率の影響と比べて、すきまに及ぼす透過率の影響は若干小さい。ところで、油膜せん断モーメント T_f は、主として、すきまの大きさとコアプレートの回転角速度に依存し、油膜圧力には直接的には関係しない。結局、図 2(c)で、油膜せん断摩擦モーメント T_f に対して透過率の影響が比較的小さかったのは、すきまに及ぼす透過率の影響が比較的小さかったことによっていると説明できる。

次に、接触力について検討する。図 2(f)は、セパレータプレートと接触する繊維素の割合 α の計算結果である。フェーシング材の透過率が大きい場合は、係合直後を除いて、マクロ油膜力は小さいため、比較的初期の段階から接触が始まり、やがて接触がほぼ飽和した状態になる。このとき、押し付け力は殆どが接触力で支持される〔図 2(d)〕。他方、透過率の値が小さい場合は、マクロ油膜力がある程度維持されるため、徐々に繊維素が接触していき〔図 2(f)〕、それに応じて、接触力が増加していく。この接触力 W_c は、それに比例した形で、接触摩擦モーメントに影響する。

図 2(c)に戻って、透過率の値が大きい場合は、係合開始後、ある時間を過ぎると、接触摩擦モーメント成分がほぼ一定になる〔図 2(f)〕のに対して、油膜せん断モーメントは、コアプレートの回転速度の低下とともに減少していくので、全摩擦モーメントは、ごくわずかなではあるが、ある時刻以降は減少に転じる。他方、透過率が小さい場合は、時間の経過とともに接触摩擦モーメントが増加していくので、全摩擦モーメントも、ゆるやかに増加し続けることになる。

図 2(a)に示した、フェーシング材透過率の影響の傾向は、結局、このように説明される。

3・2 透過率の大きさと溝数の相乗効果 前項では係合過程に及ぼすフェーシング材透過率単独の影響について論じた。透過率の大きさの影響の程度は他のパラメータの値にも依存する。ここでは透過率の影響を溝数との関係で検討する。図 3 にシミュレーション結果を示す。透過率の値が大きい場合は係合すきま内の潤滑油は溝数にかかわらずスクイズアウトされ易く、摩擦モーメントに及ぼす溝数の影響は小さいが、透過率の値が小さくなると、スクイズアウト流量に及ぼす溝の存在の影響が大きくなり、溝数が多いほど摩擦モーメントの立ち上がりが鋭くなる。

長時間使用されたフェーシング材は、目つまり等によって、新品より透過率の値が減少するが、このとき、溝数を多くして摩擦モーメント特性を若干は回復させるという対処法が実際の場で採られることがある。図 3 の結果はその理論的背景を与えていると言える。

3・3 フェーシング材母材部の弾性係数の影響 ここでは、フェーシング材の弾性変形状況を支配するパラメータの 1 つであるフェーシング材母材部弾性係数 E_{p0} の影響について検討する。図 4 に計算結果を示す。ここでは図 4(a)：無次元全摩擦モーメント、図 4(b)：摩擦モーメント成分、図 4(c)：無次元負荷の成分、のみを示している。フェーシング材母材部の弾性係数 E_{p0} が小さくなると、セパレータプレートと繊維素の間の接触によるフェーシング材母材部の変形量が大きくなり、スクイズアウトされる潤滑油量が多くなるので、その結果、マクロ油膜力成分は大きくなる〔図 4(c)〕。その分、接触力成分は小さく、接触摩擦モーメント成分も相対的に小さい〔図 4(b)〕。また、係合完了までの時間が若干長くなることになる。

3・4 フェーシング材繊維部の弾性係数、繊維素高さ分布標準偏差の影響 フリクションプレートの係合過程の特性には、実験段階では未知のパラメータである、フェーシング材繊維部の弾性係数 E_{p1} 、およ

Fig. 3 Correlative effects of k and N_g

(a) Dimensionless moment

(b) Fractions of components of moment

(c) Fractions of components of load

Fig. 4 Effects of elastic modulus of facing matrix, E_{p0}

び、繊維素頂点の高さ分布の標準偏差 σ_p も関係する。

図5および図6に、それぞれ E_{p1} および σ_p を変化したときの無次元全摩擦モーメント T_0 のシミュレーション計算結果を示す。本研究で設定した表1の条件下では、これらのパラメータの影響は比較的小さい。

4. むすび

本報告では、フリクションプレートの係合過程に関し、前報で示した解析モデルを基に、シミュレーション計算を行った結果について述べた。

まず、SAE #2 試験機によるフリクションプレートの摩擦モーメント特性をシミュレーション計算によって説明することを試み、いくつかの作動特性パラメータの値を同定することによって、実験結果を理論シミュレーション計算で再現できることを示した。

次いで、フェーシング材の透過率等のパラメータの

Fig. 5 Effects of elastic modulus of fiber elements

Fig. 6 Effects of roughness of facing surface

値を変化させ、パラメータサーベイ計算を行い、それらのパラメータがフリクションプレートの作動特性に及ぼす影響について理論的に検討するとともに、フリクションプレート係合すきま内での作動状況を、いくつかの作動指標値をもとにして、検討した。

本報告では、いくつかの作動特性パラメータについては、実験値とシミュレーション結果が一致するように決定したが、実験や計測手法を工夫することによって、それらのパラメータの値の確度をあげ、それをもとに、本研究で示したシミュレーションモデルの妥当性について検討する必要があると考える。

文 献

- (1) Yabe, H. et al, Numerical Simulation of Engaging Process of Friction Plate, 1-st Report: Analytical Model for Numerical Simulation, *Trans. of JSME*, 73-731, (2007) pp. 2149-2155.
- (2) Natsumeda, S. & Miyoshi, T., Numerical Simulation of Engagement of Paper Based Wet Clutch Facing, *Trans. ASME, J. of Lub. Tech.*, 116-2, (1994) pp. 232-237.
- (3) Berger, E. J., et al., Finite Element Modeling of Emgagement of Rough and Grooved Wet Clutches, *Trans. ASME, J. of Lub. Tech.*, 118-1, (1996) pp. 137-146.
- (4) Hattori, Y. & Kato, T., Stability of Frictional Vibration of Paper-based Material of Wet Clutch, *Proceedings of Trib. Conf.*, (Tokyo-1995) pp. 453-456.
- (5) Yamamoto, T., Yamada, T. & Eguchi, M., Measurement of Permeability Coefficient of Paper-based Material of Wet Clutch, *Proceedings of Trib. Conf.*, (Tokyo-1994) pp. 447-450.
- (6) Eguchi, M. et al., A Study of Steady Flow between Paper-based Friction Material and Mating Surface, *Proceedings of Trib. Conf.*, Tokyo (1996-5) pp. 33-35.
- (7) Miyoshi, T., Friction Characteristics of a Paper-Based Friction Material, *J. Jap. Soc. Tribologists*, 36-12 (1991) pp.952-955.