

鋼の連続铸造用モールドパウダーの粘弾性挙動

反町 健一*・坂井 重郎*・藤井 徹也*

Visco-elastic Behaviour of Mold Powder for Continuous Casting of Steel

Kenichi SORIMACHI, Shigeo SAKAI and Tetsuya FUJII

Synopsis : To make clear the lubrication mechanism in the mold of continuous casting of steel, unsteady state friction analysis has been performed with the special attention to visco-elastic behaviour of the mold flux.

The mold flux behaves as Maxwell type fluid.

Elasticity of 10 Pa and 50 Pa are obtained at viscosity of 0.28 Pa·s and 2.3 Pa·s respectively.

The difference between the obtained friction force and the predicted one as Newtonian fluid, and the phase shift of maximum friction peak become significant when the oscillation frequency exceeds 200 cpm. These transitions can be explained quantitatively by the introduction of elasticity to the mold powder characteristics.

Key words : continuous casting ; mold powder ; mold ; lubrication ; visco elasticity.

1. 緒言

自動車用外板に代表されるごとく、品質厳格材の需要が増加する中で、スラブ連続機に求められていることは、高速铸造による高生産性を確保しつつ、鑄片の欠陥の発生を防止して、連続-圧延工程の直結化の実現と言えよう。高速铸造を実施する上での問題点の一つは拘束性ブレイクアウト（以下拘束性B.O.）の発生である。これは、高速化によって鑄型内の鑄片にかかる摩擦力が上昇することで生ずるものと考えられている^{1)~3)}。これまで拘束性B.O.の発生を防止するため、潤滑性に優れたモールドパウダーの開発⁴⁾⁵⁾、操業条件の検討⁶⁾が行われてきた。その結果、潤滑性を確保するためには、低粘性、低融点パウダーの使用、ポジティブ時間を増大する鑄型振動法の採用⁷⁾が効果的であることが報告されている。

一方、鑄片の高品質化を図る上での課題は、鑄片の表層介在物および表面割れを低減することである。例えば薄板用の低炭素鋼、極低炭素鋼については、鑄型内のパウダー巻込みを減少させるために、より高粘性のパウダーの使用が求められている⁸⁾。また、中炭素鋼の表面割れを防止するためには高塩基度、高融点のパウダーを使用して鑄片の緩冷却化を行うことが望まれている⁹⁾。さらに、鑄片の表層介在物を低減するためには、オシレーションマーク深さを浅くするため、高鑄型振動数で铸造することが有効である¹⁰⁾。しかしながらこれらの技術を採用しようとする、いずれの場合も拘束性B.O.の発生が懸念される¹¹⁾。したがって、今

後の連続技術開発を行う上では、鑄型/鑄片間の潤滑および摩擦機構を明らかにし、潤滑性を確保しつつ、上記要求を満足させることが不可欠である。

従来、鑄型内の潤滑および摩擦に関しては数多くの研究が行われてきた^{12)~14)}。しかしながら、いまだモールドパウダーによる潤滑機構、拘束性B.O.の発生機構に関しては不明な点が多い。これは一つには、拘束性B.O.の起点となるメニスカス近傍で凝固シェルに作用している摩擦力の解析が不十分であることが考えられる。このような観点から、本研究では鑄型内の潤滑、摩擦機構を解明すべく、モールドパウダーの粘性測定装置を用いた非定常流動解析と実機鑄型での操業条件を再現できるホットモデルシミュレーターを用いて、実機では測定不可能な鑄片にかかる摩擦力を直接測定することを試みた。また、それらの結果を、トライボロジーの観点から解析し、モールドパウダーの粘弾性挙動について考察した。

2. 従来の知見と問題点

鑄型/鑄片間の溶融パウダーによって発生する摩擦力の解析は、パウダーをニュートン流体とみなし、かつ鑄型振動による非定常性を無視した定常解析が採用されてきた⁷⁾。Fig. 1に鑄型内の模式図を示す。Fig. 1は、鑄型と鑄片が平行であり、一定間融の隙間にパウダーが介在する最も簡単な平行平板モデルを示している。このモデルにおける定常解析では、溶融パウダーによって発生する鑄片にかかる摩

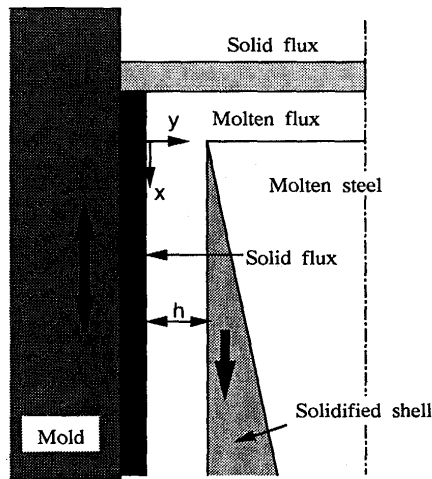


Fig 1. Schematic view of meniscus periphery in mold.

摩擦力（せん断応力） τ は、(1)式で示される。

$$\tau = \eta \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_{y=h} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η はパウダーの粘度、 u は鋳型の動きを考慮した相対的パウダー流速を示す。(1)式からわかるように、摩擦力は、鋳型と鋳片の速度差とパウダーの粘度のみによって決定される。通常、鋳型振動はサイン波形などの時間の関数であり、この意味では(1)式は時間の関数となっている。しかしながら、0.5s程度の高速往復運動をする場合、モールドパウダー特性値として、定常測定で得られた粘性値で代表しうるかどうかの検証が必要と思われる。

また摩擦力を測定する試みとして、鋳型にかかる荷重を計測して鋳型の慣性力を分離する方法が提案されている¹²⁾¹³⁾。この方法の問題点として以下の点が指摘される。測定される摩擦力の値は鋳型面全域で発生する摩擦力であり、拘束性B.O.の起点と考えられるメナスカス近傍での摩擦力を反映していない。測定された摩擦力の値は鋳型にかかる値であり、拘束性B.O.と直接関係のある鋳片にかかる摩擦力とは異なっている可能性がある。

以上のことから鋳型内の潤滑性を評価するためには、i)鋳型振動条件を再現した非定常状態で、ii)メナスカス直下の鋳片にかかる摩擦力を測定することが非常に重要である。しかしながら、実機鋳型内でこのような測定をすることは困難であることから、モデル実験装置による上記の摩擦力測定が有効な手段となる。

そこで、本研究では、次の2点の検討を行うものとした。

1) 高温粘度計を用いたパウダー粘度測定実験を行うことにより、非定常流動時のモールドパウダー物性を評価した。

2) 鋳片にかかる摩擦力が測定可能なホットモデルシミュレーター（以下、摩擦力シミュレーター）を用いた高鋳型振動数条件下での実験を行い、鋳片摩擦力を評価した。

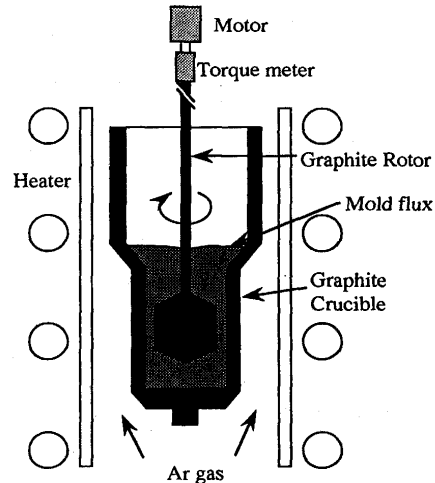


Fig 2. Apparatus for the viscosity measurement of mold flux at unsteady state.

Table 1. Physical properties of mold flux.

softening temperature	1070°C
solidification temperature	1110°C
viscosity	$\eta = 0.28 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ at 1220°C $= 2.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ at 1120°C

Table 2. Chemical composition of mold powder. (mass%)

T.C	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	F	CaO/SiO ₂
2.9	34.4	33.0	6.1	0.2	13.4	8.1	0.96

3. 実験装置と実験方法

3・1 溶融パウダーの非定常流動実験

実験に使用した粘度測定装置の概略をFig. 2に示す。ごく短時間のステップ応答を調べるためには、測定系の感度を十分高くする必要があります。市販の粘度測定装置では、システム全体（トルクメーター、出力電圧変換器、ペンレコーダー）として、1～2 sec程度の時間遅れが生じる。そこで0.2sec以内の急激なトルク変化の測定が行えるように、新しく感度の高いトルクメーターを用い、出力データをA/D変換器を介して32bitパーソナルコンピュータに取り込むようにした。これによって測定システム全体として、2 msecの応答性でトルク測定が可能となった。

加熱は外熱式の電気抵抗発熱炉を使用した。測定はArガス雰囲気中で行い、粘度測定用の浸漬ロッドと外周の坩堝の材質は高純度グラファイトを用いた。トルクメーターは回転用モーターとグラファイトローターの間にセットした。回転数はモーターに直結したエンコーダーで測定した。坩堝の内径は42mmφ、浸漬ロッドの最大径は35mmφである。使用したモールドパウダーの化学成分と代表的な物性値をTable 1, Table 2に示した。実験は1220°Cと1120°Cで行い、それぞれの温度の粘度は0.28Pa・sと2.3Pa・sであった。

3・2 実機操業条件下の摩擦力シミュレーション実験

実験に使用した摩擦力シミュレーターの装置概略図をFig. 3に示す。装置は上下2枚のディスク (100mmφ) を平行に配置し、ディスク間の隙間にモールドパウダーを充填する構造となっている。上部ディスクは鋳片を模擬したものであり、上部のモーターにより一定方向に回転運動する。下部ディスクは鋳型を模擬したものであり、下部に設けたモーターとクランク機構により、サイン波形の往復振動運動を行うことができる。各駆動系とディスクの間にはトルクメーターを配置し、独立にトルク計測が可能である。ディスク材質は高純度グラファイトを用いた。ディスクおよびモールドパウダーはAr雰囲気下の電気抵抗炉によって一様に加熱され溶融される。

上部ディスクのセンタリング用軸受は、外乱トルクを最小にすべく、軸径を可能な限り小さくした (15mmφ)。また軸およびディスクの重量をできるだけ軽量化し (2 kg以内)、スラストベアリングを使わず、2つのラジアルベアリングのみでディスクを支持するようにした。

次に実験条件について述べる。ディスク間の隙間すなわち、鋳型-鋳片間のパウダー厚みに相当する量は、実操業での回収パウダー膜厚に近い2 mmとした。上軸回転数は10rpmで、この値はディスク半径の半分位置において鋳造速度1.6m/minに相当する。下軸振動の振れ角は6度で、この値は、上記位置で鋳型ストローク5.5mmに相当する。使用したモールドパウダーは前節と同一のものである。低炭アルミキルド鋼の鋳造に用いる平均的な組成である。実験はトルク測定値の外乱を考慮し、1150°Cで行った。この時の粘度は0.39Pa・sである。実験は鋳型振動数を100~400cpmに変化させた時の、上部ディスク、すなわち、鋳片にかかる摩

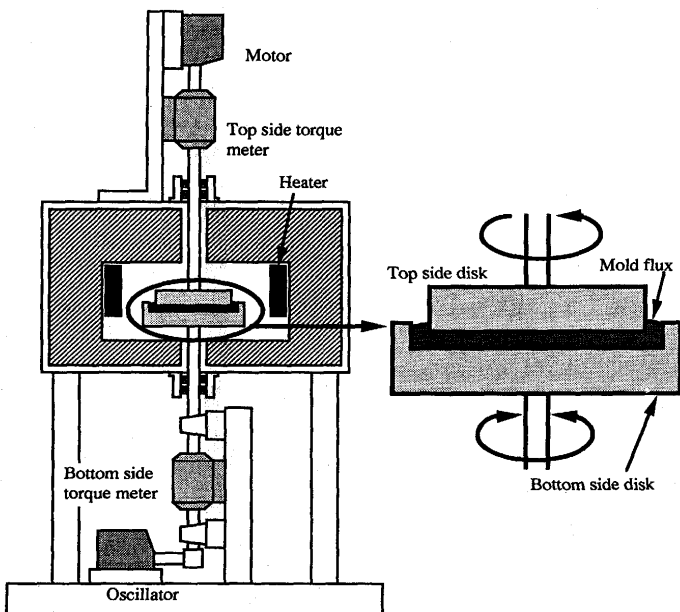


Fig. 3. Schematic view of the new friction simulator.

擦力を測定し、得られた結果を評価した。

4. 実験結果と考察

4・1 溶融パウダーの非定常流動特性

ローターの回転数を0から300rpmに急激に変化させた時の回転数および発生トルクの時間変化の一例をFig.4に示す。また、坩堝内を空にした状態での同様の回転数変化を与えた時のトルク変化を同図内に示した。坩堝内を空にした状態で発生したトルクは、ローター支持部に発生する摩擦力

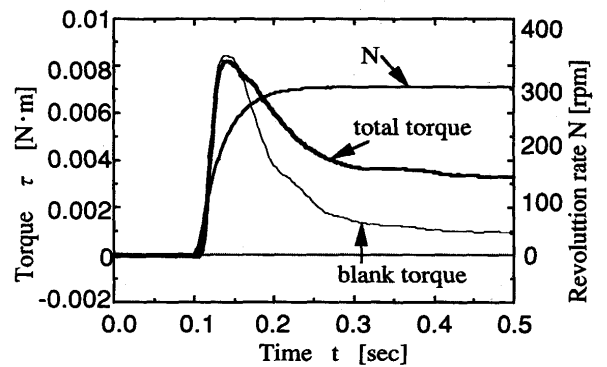


Fig. 4. Change in revolution rate of rod, total torque and blank torque with time.

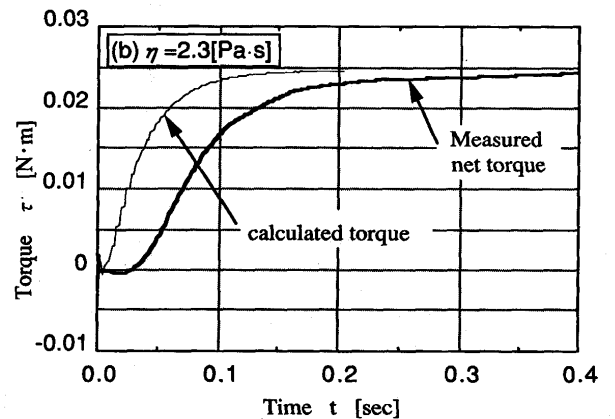
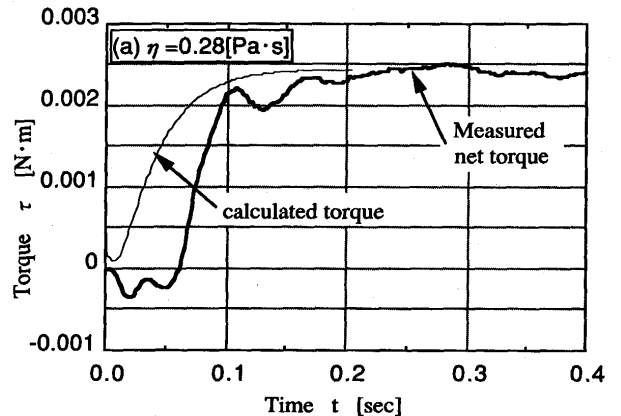


Fig. 5. Comparison of measured net torque and calculated torque with unsteady state Newtonian fluid flow analysis.

やローター自身を回転させるために発生する慣性力による
と考えられる。したがって、パウダーそのものによって発生
する正味のトルクは各時刻において全体で発生するトルク
から、坩堝空時のトルクを引いたものとして評価できる。

このようにして求めた正味のトルクの経時変化をFig. 5に
示した。

ここで、粘性値と速度変化がわかっているため、モールド
パウダーによって生じる粘性トルクの計算値を同図内に併
せて示した。この結果から、測定されたトルクは計算値
と比較して、その立ち上がりが遅れていることがわかる。

コロイドや高分子の変形と流動は一般的にレオロジイカ
ルな挙動を示すことが知られている¹⁵⁾。そこで、シリケート
ネットワークの発達したモールドパウダーでも同様な粘弾
性挙動を示すことが考えられる。J.H.Simmons¹⁶⁾らは560°C
のソーダライムシリケートガラスにおいて粘弾性特性の出
現することを報告している。今回の実験のように、坩堝の規
定条件下でその時の応力変化を求めるために、粘弾性理論
におけるMAXWELLモデルを適用して解析した。MAX-
WELLモデルの模式図をFig. 6に示す。基礎方程式は(2)式
で示される。

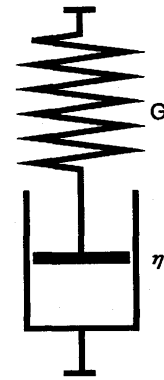


Fig 6. Schematic representation of Maxwell model.

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ζ はひずみ量であり、Gは物質の弾性率である。
いま、定常状態での τ 値よりパウダーの粘度 η を求め、非
定常時のローター軸の回転数変化の実測値を用いて、Gをパ
ラメーターとしてトルク τ の数値計算を行った。その結果と
トルク τ の実測値をFig. 7に示した。

実測側は、粘弾性を考慮した計算値とよく一致している
ことがわかる。弾性定数Gの値は、粘度0.28Pa・sの場合で
10Pa程度、粘度2.3Pa・sの場合で50Pa程度の値であるこ
ろがわかった。

4・2 ホットモデルシミュレーターで得られた鋳片に作用する摩
擦力

鋳型振動数が100cpm, 300cpmの条件下で得られた、上部
ディスクにかかるトルク(すなわち、鋳片にかかる摩擦力)
の経時変化をFig. 8, Fig. 9に示した。ニュートン流体の粘
性理論によれば、(1)式によって表わされるパウダー内せん
断応力が、ディスクとパウダーが接触している全面で発生
しているとして、面積分することによって軸にかかるトル
クが求められる。このトルクTは(3)式で求められる。

$$T = \frac{\pi\eta R^4(\omega_1 - \omega_2)}{2h} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、Rはディスクの半径、 ω_1 は上部ディスクの角速度、
 ω_2 は下部ディスクの角速度、hはディスク間のギャップであ
る。

このようにして求めた、トルクTの計算値を同図内に併せ

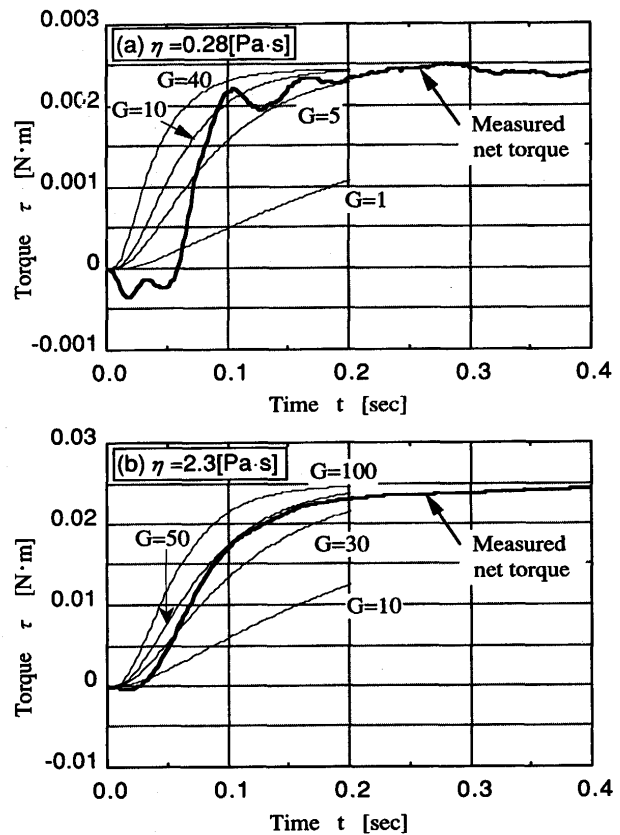


Fig 7. Comparison of measured net torque and calculated torque with visco-elastic flow analysis.

て示した。

Fig. 8, Fig. 9よりニュートン流体として求まる計算トルク
と実測トルクを比較すると次の2点が指摘される。

1) 鋳型振動数が100cpm, 300cpmのいずれの場合も実測
トルクはニュートン流体理論で求められるトルクよりも小
さな値となっている。

2) 実測トルクとニュートン流体理論で求まるトルクの波
形間に時間的な位相のズレが存在する。これは鋳型振動
数が300cpmの場合に顕著である。

すなわち、メニスカス近傍の鋳片には、従来の定常解析
で推定されていた値よりも小さな摩擦力しか作用していな

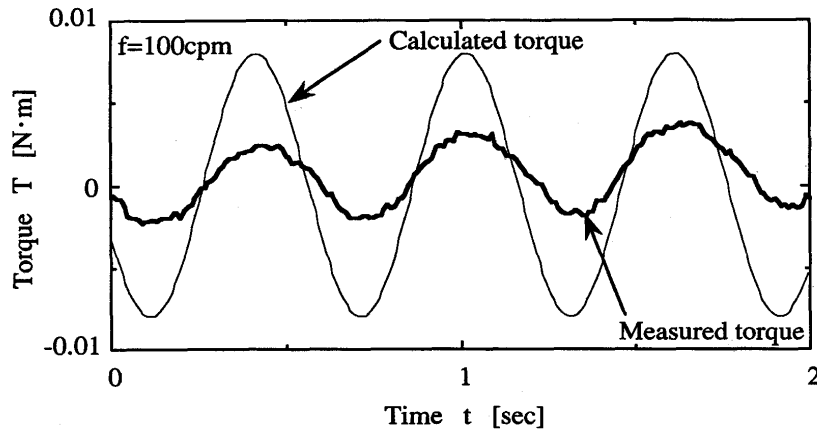


Fig 8. Comparison of measured torque and calculated torque with Newtonian fluid flow analysis at hot model simulator

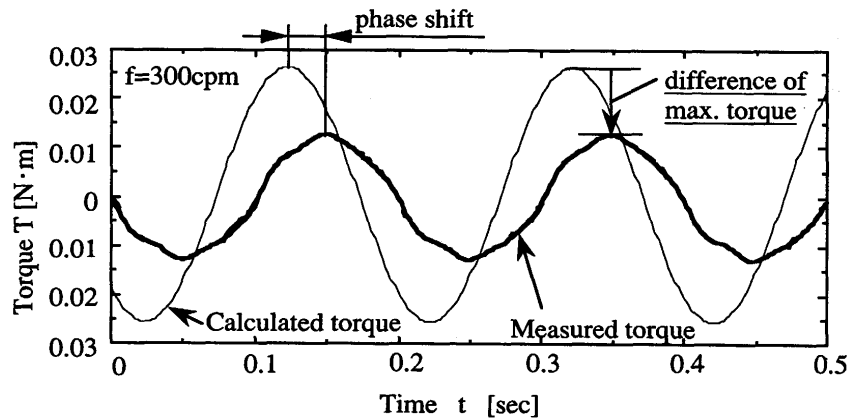


Fig 9. Comparison of measured torque and calculated torque with Newtonian fluid flow analysis at hot model simulator.

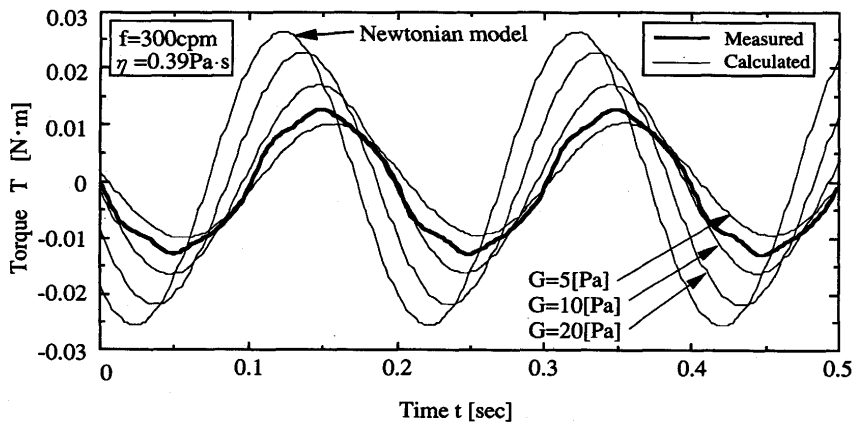


Fig 10. Comparison of measured torque and calculated torque with visco-elastic flow analysis of hot oscillation simulator.

いことが判明した。また、その差は高振動数ほど著しいことがわかった。

次に、これらの結果を理論的に説明しうる非定常性を考慮したモデルによって実験結果の解析を試みた。

前節で明らかとなった、モールドパウダーの粘弾性を考慮したMAXWELLモデルを用いて、鋳片にかかる摩擦力を評価した。すなわち、(2)式を用いて、Gをパラメーターと

してトルク値を計算し、実測値と比較した結果をFig.10に示した。これから、Gとして5～10Paを用いることにより、摩擦力と位相のズレの両者を説明しうることが判明した。

また、ステップ法で求めた弾性値は0.28Pa・sの時に10Paであり、回転振動法で求めた弾性値は0.39Pa・sの時に5～10Paと装置、方法の違いによらず概略、一致した値が得られたことは注目される。

以上の結果より、モールドパウダーには粘弾性の特性が存在し、固有の物性値としては粘度 η と弾性率 G が存在することが明らかとなった。

また、上部ディスクにかかるトルク、すなわち鋳片にかかる摩擦力を低減するためには、粘度 η を下げる方法のほかに、弾性率 G を下げることも有効な方法になりうると考えられる。パウダー粘度を低下させるとモールドパウダーのまき込み等の問題点も指摘されており¹⁷⁾、上記の観点に立った実用研究が期待される。

5. 結論

連続铸造型内の潤滑、摩擦機構を解明すべく、モールドパウダーの粘性測定装置を用いた非定常摩擦力解析を行った。さらに、鋳型振動によるパウダー流動の非定常性を考慮し、かつ、鋳片にかかる摩擦力を直接測定することを目的に、摩擦力シミュレーターによるホットモデル実験を行い、以下の結論を得た。

(1) モールドパウダーはMAXWELL型の粘弾性特性を示し、 $0.28\text{Pa}\cdot\text{s}$ の粘度の時に弾性率は 10Pa 程度、 $2\cdot 3\text{Pa}\cdot\text{s}$ の粘度の時に弾性率は 50Pa 程度の値を示す。

(2) 実機相当条件のシミュレーション実験の結果、鋳片にかかる摩擦力はニュートン流体理論で求められるトルクよりも小さな値となっている。また、その差は高振動数になるほど著しい。

(3) 鋳型振動数が 300cpm の場合、実測トルクとニュートン流体理論で求まるトルク波形の間には、位相のズレが存

在する。このズレはモールドパウダーの弾性的性質に起因するものとして定量的に説明できた。

文 献

- 1) 鈴木幹雄, 宮原 忍, 北川 融, 内田繁孝, 森 孝志, 沖本一生: 鉄と鋼, **78** (1992), p.113
- 2) 松下 昭, 磯上勝行, 天満雅美, 二宮健嘉, 大橋 渡: 材料とプロセス, **1** (1988), p.153
- 3) 糸山誓司, 鷲尾 勝, 西川 廣, 山中啓充, 田中修二, 藤井徹也: 鉄と鋼, **74** (1988), p.1274
- 4) 中戸 参, 野崎 努, 西川 廣, 反町健一: 鉄と鋼, **74** (1988), p.1266
- 5) 小山邦夫, 長野 裕, 中野武人: 製鉄研究, **324** (1987), p.39
- 6) 田中 誠, 原 賢一, 和田耕治, 藤野伸司, 上原彰夫, 大崎真宏, 合田聡樹: 材料とプロセス, **4** (1991), p.303
- 7) 水上秀昭, 川上公成, 北川 融, 鈴木幹雄, 内田繁孝, 小松喜美: 鉄と鋼, **72** (1986), p.1862
- 8) 大塚良郎, 湯山英俊, 櫻尾茂樹, 鈴木 真: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1225
- 9) T.Chikano, K.Ichikawa and O.Nomuma: Shinagawa Tech. Report, **31** (1988), p.75
- 10) H.G.Baumann, E.A.Elsner and J.Pirdzun: Stahl und Eisen, **9** (1971), p.139
- 11) M.Mangin, P.Bardet, A.Leclercq, B.Sarter and M.Sese: Revue de Metallurgie, **81** (1984), p.553
- 12) 中森幸雄, 藤懸洋一, 常盤憲司, 片岡冬里, 常岡 聡, 三隅秀幸: 鉄と鋼, **70** (1984), p.1262
- 13) 大宮 茂, 中戸 参, 垣生泰弘, 江見俊彦, 浜上和久, 馬田 一, 福原 涉: 鉄と鋼, **6** (1982), p.S726
- 14) K.C.Mills, T.J.H.Billany, A.S.Normanton, B.Walker and P.Grievson: Ironmaking and Steelmaking, **18** (1991), p.253
- 15) 中川鶴太郎: レオロジー(1978), p.157 [岩波書店]
- 16) J.H.Simmons, R.K.Mohr and C.J.Montrose: Journal de Physique, **C9** (1981), p.439
- 17) 松永 久, 菅原 健, 石橋 靖, 二階堂満, 菅原克俊, 黒沢 進: 材料とプロセス, **2** (1989), p.307