

平成21年4月1日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2006～2008
課題番号：18360070
研究課題名（和文） ゲル・固体界面の微細周期構造による乾湿摩擦の制御と福祉関連機器への適用
研究課題名（英文） Friction design between gel and solid materials under dry/wet condition with the help of periodic microstructure and its application to welfare equipments
研究代表者 諸貫 信行 (Moronuki Nobuyuki) 首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・教授 研究者番号：90166463

研究成果の概要：滑りに起因する事故等の抑制を目指し、床や手すりに微細凹凸構造を設けることで乾湿状態によらず摩擦を一定に保つための指針を検討した。人の踏み込み動作を模擬した実験を行い、適切な設計によって水や油が介在する条件でも滑りにくい表面が得られることを明らかにした。さらに、手すりの把持のように接触後に往復摺動する動作も検討し、官能試験とも合わせたところ、痛点間隔よりも小さい300ミクロン程度の間隔で構造を設けた場合に、痛みが小さく、かつ滑りにくくできることがわかった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，生産工学・加工学

キーワード：微細周期構造，摩擦，ストライベック曲線，弾性体，転倒事故，官能試験

## 1. 研究開始当初の背景

我々の手足の指紋はゲル材料表面の微細な周期構造（テクスチャ）と捉えられ、これによって平滑な表面に対しても乾湿状態によらず比較的安定した摩擦が得られるようになっていると考えられる。安定した摩擦はロボットのグリップを含む把持機構などの工業的な応用だけでなく、福祉機器類のハンドルや手すり部でも求められており、各部にテクスチャの付与が行われているものの、その設計は試行錯誤により進められているのが実情である。

一方、濡れた床でのスリップは多くの人が経験するものであり、自宅浴室での転倒事故

は高齢化社会の問題のひとつとなっている。たとえ指紋があったとしても石鹼水のような介在物の条件や動圧効果によって、摩擦係数が極端に小さくなってしまうためである。これは工作機械テーブルの位置決めで問題となるスティックスリップと類似の問題でもある。この問題も床にミクロンオーダーのテクスチャを設けることで解決できることが最近わかってきている。しかし、どのような周期、深さの凹凸を設ければよいかは明らかにされていない。

これら二つの問題は、それぞれに凹凸を持つゲル表面と固体表面どうしの摩擦という意味では同じ課題に帰着させることができ

る。弾性材料を対象とした摩擦問題は、アスファルト路面上でのタイヤのスリップ関連の研究が行われてはいるものの、速度域やテクスチャ寸法が大きく異なるとともに粘性特性も異なるため、必ずしも前記のゲル材料上の周期構造設計に適用することはできない。さらには、ミクロンオーダーの微細周期構造を付与した型の製作から転写などを含めた製法も十分には確立されていない。

よって、安全・安心な社会を実現するためのテクスチャ設計指針を検討する必要がある。なお、本研究で用いる「ゲル」の意味は一般的に用いられるものとは必ずしも一致せず、直接的には人の肌を想定している。

## 2. 研究の目的

濡れた床でツルンと滑った経験は多くの人が経験しているものであり、そのメカニズムは図1左に示すような摩擦係数の速度依存性で説明できる。すなわち、静摩擦状態では固体どうしが接触しているが、例えば速度が増した時に動圧が発生し、潤滑膜として2固体の間に入り始め、ついには完全に流体で浮上した状態になる(流体潤滑)。同図右に示すように、固体表面に設けた微細構造によって圧力を下げ、流体潤滑への遷移条件を変えることができ、事故の発生を抑制できると考えられる。一方、図2に示すようなハンドルや手すりでは滑り速度が大きく異なるため、構造設計も異なると考えられる。

そこで乾湿環境下で手足のようなゲル状物質と機器類の間の摩擦を安定化できるような表面構造設計の確立を目的に、下記の研究を進める。

- (1) モデル解析：介在物の流動と動圧分布を考慮したモデルの構築と、構造寸法による摩擦制御設計の検討
- (2) 床材を想定した実験：滑り速度や接触圧力を変化させた実験に基づく、動圧効果を考慮した構造設計指針の検討
- (3) 手すりを想定した実験：滑りにくだけでなく、感触のよいものを検討するため官能試験を含む

研究の中では、いわゆる MEMS 関連技術を用いた微細構造製法も併せて検討する。

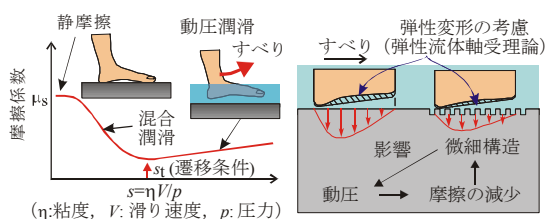


図1 床の摩擦特性と構造による効果の概念

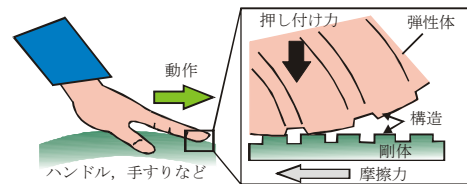


図2 ハンドルなどと指の間での滑り

## 3. 研究の方法

### (1) モデル解析

図1に示すように足が浮き上がるような状態解析のための理論は既に確立されている。しかし、弾性体の変形を考慮する場合は、弾性流体潤滑 (Elasto-Hydrodynamic Lubrication) 解析を行わなければならない。これは流体の動圧解析と圧力による構造の変形を連成させた数値解析である。そこで、図3に示すような有限要素モデルを用いた数値解析を行った。ただし、接触問題を含めた解析は容易ではないため、弾性体を徐々に近づけながら接触を始める直前の動圧を解析し、これによる弾性体の変形を連成させ、釣り合い条件に至った時の圧力から浮上がり力を求めた。解析条件は表1に示したとおりであり、寸法等は後の実験と対応させた。

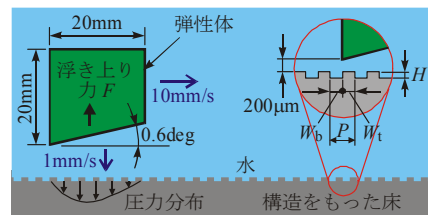


図3 弾性流体潤滑解析 (EHL) モデル

表1 解析条件

粘度 [mPa s]	1 (水)
$W_t/W_b$ [µm]	20/40, 50/100, 100/200, 500/1000
ピッチ $P$ [µm]	60, 150, 300, 1500
高さ $H$ [µm]	20, 50, 150, 100, 500

### (2) 床材を想定した実験

機械部品等の摩擦試験は、通常、ピンオンディスク等の方法で評価される一方で、床材あるいは靴底材料等の摩擦試験には図4に示されるような方法が既に標準化されている。しかし、図1に示すような摩擦係数の速度依存性を加味したものではないので、本研究の目的ではこれらを適用することができない。

本研究では人の踏み込み動作を模擬すること、方向性を有する構造も対象に含まれること、等の理由から図5に示すような独自の装置を製作し、評価を行った。主な動作は、スライダに取り付けた弾性体試料を横運動

させながら、構造を設けた床材を上昇・接触させ、踏み込み動作を模擬するものである。ハンドルを操作する時のように下から押付けた後に左右に往復運動させることもできる。

この時、上下ステージ直下に設けられた力センサが押付け力と摩擦力を同時に測定し、摩擦係数を計算により求めた。なお、ウェット雰囲気での実験では、水や油を材料上に散布した後に摩擦実験を行った。

実験条件は表 2 に示すようなものであり、人が歩く時のかかとの接触を想定した。また、ミクロンからミリに至る寸法範囲での構造製作に際し、典型的には、厚膜フォトレジストとリソグラフィを組合せて型を製作し、これに PDMS (シリコーンゴム) を流し込んで転写する方法を多用した。図 6 には、手すりを想定した実験に用いたラインアンドスペース状の構造と円柱が並んだ例を示す。

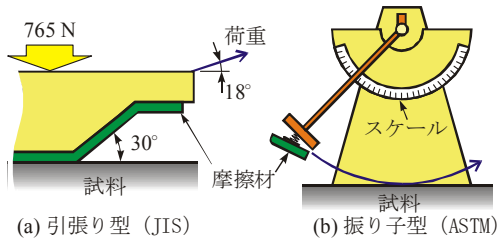


図 4 現状の摩擦試験方法

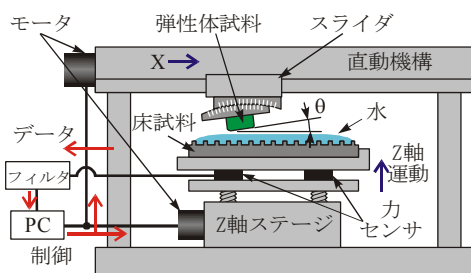


図 5 摩擦試験装置と典型的な実験条件

表 2 実験条件

粘度 $\eta$ [mPa s]	1, 44, 53, 246
すべり速度 $V$ [m/s]	0.01-1.8
接触面圧 $p$ [Pa]	25
ピッチ $P$ , 凸部幅 $W_t$ , 凹部幅 $W_b$ , 高さ $H$ [ $\mu\text{m}$ ]	12, 4, 8, 4 150, 50, 100, 50 300, 100, 200, 50 300, 100, 200, 100 1500, 500, 1000, 500

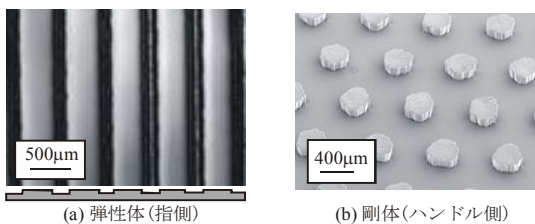


図 6 実験に用いた構造例

### (3) 手すりを想定した実験

滑り速度が低い点を除けば、基本的に床材を想定した実験と同様であるため、図 5 の装置で実験を行った。また、人が接する部分の構造設計であるため、摩擦係数のみでなく感触を調べる必要がある。そこで、官能試験を行い、設計の指針を明らかにした。

## 4. 研究成果

### (1) モデル解析

図 7 に弾性流体潤滑 (EHL) 解析の結果を示す。同図左は試料長さ (20mm) にわたる圧力分布を示す。いずれの結果も平滑面に比べて圧力分布が大きくなり、構造を設けることで浮き上がりやすくなることがわかる。ピッチ 1.5mm の場合、構造の周期を反映した圧力の変動が見られるとともに、圧力が高くなるのがわかる。この場合、摩擦を上げるというよりは下げる効果が強く、いわゆるステップ軸受と同様の潤滑効果が得られ、摩擦を大きくするという意味では逆効果になることがわかる。

同図右は圧力分布を積分し、浮き上がり力を比較した結果を示す。ピッチ  $P$  が 150 ミクロン程度で浮き上がり力が最小となることがわかった。

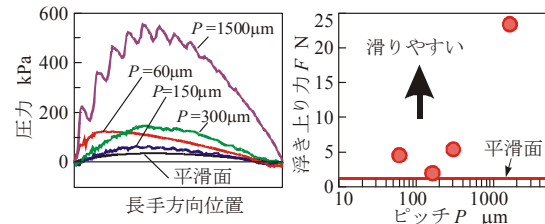


図 7 解析結果の例

### (2) 床を想定した検証実験

一般的な浴室床材である不飽和ポリエステル製の板にピッチが異なる溝構造を設け、水を散布した状態でシリコーンゴム (かかとの硬さ程度) との間の摩擦係数を評価した結果を図 8 に示す。この図はいわゆるストライベック曲線であり、流体の粘度と面圧を一定にした場合、横軸は滑り速度を示し、縦軸は摩擦係数を示す。速度の増大に伴って摩擦係数が急激に低下する部分が混合潤滑から流体潤滑への遷移条件であり、この条件を図の右側にずらすような設計が好ましい。接触面積の増大による摩擦係数の増大も見込むならば曲線を右上にシフトすることとなる。

図を見ると、構造を設けることで確かに右上にシフトする傾向があることがわかり、150-300 ミクロンが適切な条件となる。ピッチ  $P$  が 1500 ミクロンの場合は傾向が異なるため無視すべきであろう。適切な設計によれば、平滑面に比べ 2 桁以上速度を増しても浮

き上がらないことがわかり、構造設計に関する重要な知見が得られた。

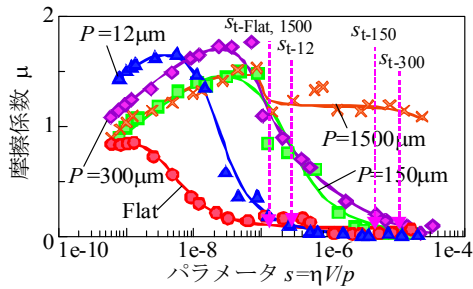


図8 床構造仕様による摩擦特性の違い

図9は、流体潤滑への遷移条件に対する構造ピッチと高さの影響をまとめたものであり、同図右は構造のアスペクト比を横軸としている。この結果より、ピッチは150–300ミクロン付近にピークがあることがわかる。アスペクト比  $H/W_b$  が大きいと製作が難しいだけでなく構造的な強度も低下してしまうが、0.25程度でも十分に滑りにくくする効果が得られることが分かった。

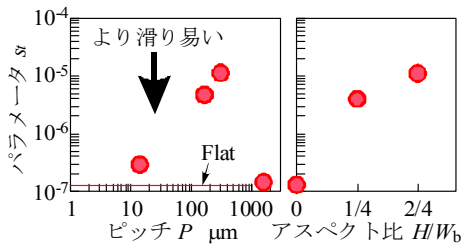


図9 仕様が流体潤滑条件遷移に及ぼす影響

### (3) 手すりを想定した検証実験

図10はハンドルや手すりを想定した実験の動作を示す。ここでは手すりに触れる程度の面圧を与えた後に5mmのストロークで往復運動させた時の摩擦を調べた。

なお、実験に用いた構造は図6に示したものであり、弾性体には指紋を模したラインアンドスペース状の凹凸を設け、ハンドル側の剛体側には円柱構造を並べたものになっている。寸法仕様は表3に示したとおりであり、円柱のピッチはその直径の2倍としながら直径と高さの種々異なるものを準備し、実験を行った。

手すりを想定し、図8の条件に比べ滑り速度を低い範囲に設定したため、混合潤滑から流体潤滑への遷移が起こる条件ではなかった。そこで、構造寸法の影響を調べた結果を図11に示す。ピッチ500ミクロン程度で摩擦係数が小さくなる傾向があることがわかった。ただし、この条件では湿潤状態より乾燥状態の摩擦係数が小さくなっており、データの信頼性にやや疑問がもたれる。

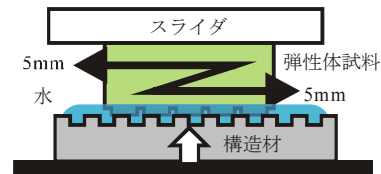


図10 ハンドルを想定した往復摺動

表3 構造の寸法仕様

	Size [ $\mu\text{m}$ ]			
	P	W	H	
①	1000	500	100	
②	800	400		
③	500	250		
④	300	150		
⑤	500	250	60	
⑥	500	250	20	
Elastic body	$W_t$	$W_b$	H	
	400	100	100	

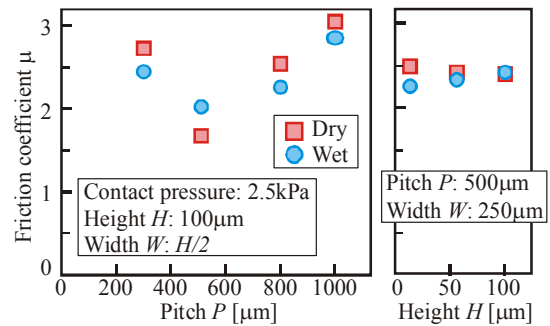


図11 構造寸法の影響

図12は押付け力に対する摩擦係数の変化を調べた結果であり、パラメータとしてピッチを変化させている。この結果より、押付け力の増大に伴って摩擦係数が減少する傾向にあるものの、構造ピッチPが小さい場合にその傾向が弱まることわかる。ピッチが大きい場合は構造の変形に伴って界面に含まれる水が介在することで摩擦係数を下げたと考えられる。一方、構造が小さい場合は、変形を生じやすい分だけスクレーパのように水をかき出す効果があって摩擦係数の低下を防いだと考えられる。

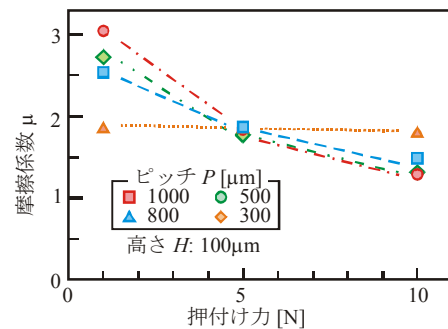


図12 種々の因子が摩擦係数に及ぼす影響



図 13 は摩擦係数と官能検査の関係を示す。20 代の男女 14 名を対象に、濡れた状態での指の感触を調査した。摩擦係数の増大に伴い、「滑りにくい」という感覚と「痛い」という感覚が強い相関をもって現れることがわかる。つまり、細かな構造が指に引っかかる感覚と捉えられる。しかし、構造ピッチ  $P$  が 300 ミクロンの場合だけは傾向が異なり、摩擦係数を適度に保ちつつ、痛みを感じにくくすることができることがわかった。受容器(痛点)の間隔(0.5-1mm)より狭い構造ピッチにしたため、痛いという刺激を少なくしつつ摩擦を大きくできたためと考えられる。

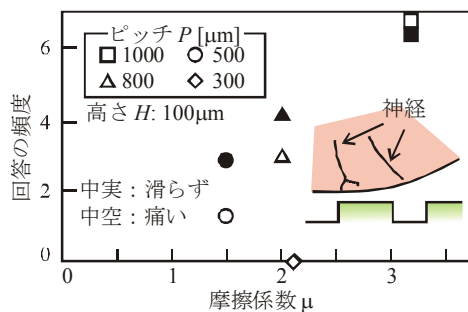


図 13 微細構造と官能検査の関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Osada, A. Kaneko, N. Moronuki and T. Kawaguchi, Design of structured surfaces for directional mobility of droplets, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 査読有, 9, 3, 2008, pp. 13-17.
- ② D. Aruga, A. Kaneko and N. Moronuki, Design of Quick-Dry Surface Using Structured Surface, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, 査読有, 2, 4, 2008, pp. 773-782.
- ③ 諸貫信行, ナノ・マイクロ形状創成技術と表面機能, 機械の研究, 査読無, 59, 11, 2007, pp. 1133-1138.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 諸貫信行, 金子新, 転倒事故防止のための床面表面微細構造設計, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008.8.4, 横浜.
- ② N. Moronuki, Integration of top-down and bottom-up processes for functional surfaces, 1st International Symposium on Functional Surfaces, 2008.6.18,

Bremen, Germany.

- ③ 諸貫信行, 金子新, 弾性体表面に設けた微細構造による乾湿摩擦の改善, 精密工学会秋季大会, 2007.9.13, 旭川.
- ④ N. Moronuki, D. Kajita, A. Kaneko, Micro-structure design of the floor to prevent slip, Proc. 7th euspen, 2007.5.23, ドイツ・ブレーメン.
- ⑤ 梶田大毅, 諸貫信行, 岩井 満, 鈴木弥志雄, 床材の摩擦特性評価法と表面微細形状の影響, 精密工学会春季大会, 2007.3.22, 東京.
- ⑥ 諸貫信行, 梶田大毅, 金子新, 表面微細構造による床材の摩擦特性改善, 日本機械学会第 6 回生産加工・工作機械部門講演会, 2006.11.25, 葉山.

[図書] (計 1 件)

- ① 諸貫信行編修, リアライズ AT, 微細加工と表面機能, 2007, 300.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

諸貫 信行 (Moronuki Nobuyuki)  
 首都大学東京・システムデザイン学部・教授  
 研究者番号: 9 0 1 6 6 4 6 3

(2) 研究分担者

金子 新 (Kaneko Arata)  
 首都大学東京・システムデザイン学部・助教  
 研究者番号: 3 0 3 4 7 2 7 3

角田 陽 (Kakuta Akira) [2006-2007 年度]  
 [2007 まで] 首都大学東京・システムデザイン学部・助教  
 [現在] 東京工業高等専門学校・機械工学科・准教授  
 研究者番号: 6 0 2 2 4 3 5 9

(3) 連携研究者

鈴木 弥志雄 (Suzuki Yashio)  
 (株)日立ハウステック, 研究開発部