

# 仮想呈示と塗布流動解析により化粧品使用感を解析する バーチャルサイコロメトリーとその応用

首都大学東京

水 沼 博

When a cosmetic base oil was applied, oscillatory friction of 50 Hz appeared. This oscillation was produced by not only a moving plunger at the friction test but also finger application. It was confirmed that this oscillation gave preferable feeling to the application. The mechanism of this oscillation was discussed based on a theoretical stick-slip model, and a reasonable agreement was obtained between the experiments and the numerical results. These results suggested that an introduction of stick-slip condition into a cosmetic base oil might improve its sensory characteristic in the application.

## 1. 緒 言

化粧品の使用感とレオロジー特性の関係は、調整されたレオロジー特性の試料を複数のパネラーが使用し、その使用感とレオロジー特性の相関として調べられている。しかし、指先で塗り広げられる化粧品の流動の複雑さにより、その流動の解析はこれまでほとんど省略され、ブラックボックス化されてきた。このため、化粧品のレオロジー特性と官能特性の因果関係のメカニズムは理解されておらず、この点が課題として残されている。著者は液体の塗布流動特性と官能評価との相関を調べ、仮想現実感を用いてその結果を検証することで、塗布感を評価する新たな方法（バーチャルサイコロメトリー、Virtual Psycho-Rheometry）<sup>1)</sup>を提案した。本研究ではこの方法をもとに上記課題の解決をめざす。バーチャルサイコロメトリーを利用する研究は次の手順でその研究を進める。

1. 液体を塗布するとき指先に働く力を、図1に示すように塗布面に対して平行と垂直な成分 $F_p$ と $F_n$ に分けて測定する。
2.  $F_p$ と塗布距離 $x$ の関係( $F_p-x$ 曲線)を液体のレオロジー特性量と $F_n$ の関数として実験的に定式化する。本研究ではレオロジー特性として粘度 $\eta$ を対象とする。
3. 図2のスライダーを指で動かし、同時に測定する $F_n$ と装置に設定するレオロジー特性量からスライダーに上記2で得られる $F_p-x$ 曲線に対応する仮想反力 $F_p$ を与える。このように指に仮想的な塗布感を与え、 $F_p-x$ 曲線を検証する。
4. 化粧品の塗り広げを解析し、その解析から $F_p, F_n-x$ 曲

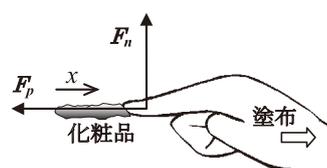


図1 指に働く力の成分の測定

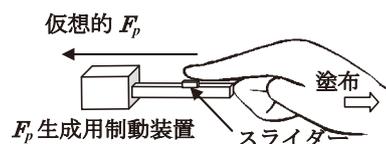


図2 仮想呈示装置による測定の検証

線を検証する。 $F_p, F_n-x$ 曲線を理論的に検討し、レオロジー特性と官能特性の因果関係のメカニズムを解明する。

本研究ではこのようなバーチャルサイコロメトリーの方法を確立するとともに、その応用としてある種の化粧品用油剤を塗布した時に生ずる50Hz程度の微細な摩擦振動現象に着目し、この振動現象がなぜ生ずるのか、そしてその振動現象が使用感、特にすっきり感に及ぼす影響のメカニズムを明らかにすることを研究目的としている。

## 2. 実 験

### 2.1 油剤

本研究で使用した試料は化粧品の原材料として用いられている油剤であり、表1のイソノナン酸イソノニル(試料I)、グリセリン脂肪酸エステル(試料G)、スクワラン(試料S)、トリオクタノイン(試料O)、イソステアリン酸ポリグリセリル-2(試料P)、トリイソステアリン(試料T)の6種類の油剤(日清オイリオグループ)である。表1の粘度は文献<sup>2)</sup>に示されている値である。これら油剤以外に比較のため水も用いた。油剤の表面張力はWilhelmyプレート法(全自動表面張力計CBVP-Z, 協和界面科学)により測定した。表1に示すように、どの油剤の表面張力も23から30N/mの範囲にあり、大きな違いはみられなかった。



Virtual psycho-rheometry and its application (Sensory study on application of cosmetic base oil using virtual reality and flow analysis)

Hiroshi Mizunuma  
Tokyo Metropolitan University

油剤の濡れ性を調べるため、その接触角をポリエチレン平板上に0.5 $\mu$ lの液滴を滴下し、その液滴輪郭から接触法により測定した。表1に示すように、試料Iが最も小さい接触角となった。

## 2.2 摩擦実験

摩擦係数を測定する装置を図3に示す。指を模擬した半円筒状の測定端子表面と平面状摺動面との間に油剤を挟み、測定端子を摺動面に沿って平行にリニアモーターで移動させる。このときに測定端子に働く摩擦力 $F_p$ を測定し、クーロンの摩擦則 $F_p = \mu W$ から摩擦係数 $\mu$ を測定した。 $W$ は摺動面に働く垂直力で、本研究では分銅を載せることにより一定になるよう調整し、 $W = 3.0 \sim 3.4\text{N}$ とした。測定端子が摺動面に及ぼす垂直力 $W$ と水平力 $F_p$ は摺動面の下に取り付けたロードセル(CB17600G11, ミネベア)により測定した。一部の試料で水平力の振動が生ずることを考慮し、摩擦係数は時間平均摩擦係数 $\mu_m$ とその標準偏差 $\sigma_\mu$ について調べた。

油剤液量は5 $\mu$ lとし、測定端子の速度は20mm/sとした。摩擦実験の半円筒状測定端子表面は、加工樹脂そのままの場合とバイオスキン(ビューラックス)で覆った場合に

いて測定した。塗布面はアクリル板に貼り付けた人工皮膚(サブラーレ, 出光テクノファイン)の面とした。摩擦実験時に測定端子がどのように油剤を摺動面に塗布していくか調べるため、その塗布をハイスピードビデオカメラ(MEMRECAMci, NAC)により撮影した。撮影速度は毎秒500フレームとした。

## 2.3 塗布感の仮想呈示装置の試作

緒言で述べたように、油剤塗布時の指にかかる摩擦力を仮想的に再現する装置を図4に示すように試作した。指を置く指置き台は、直線レールの上を自由にスライドする。指置き台とともにスライドする薄板を電磁石(LY2DC12, オムロン)で挟むことにより、液体を塗布したときに指に働く水平方向の抵抗を仮想的に作る。この抵抗は、想定する液体の粘度、レール上の指の位置そして指が台を押す垂直力に基づいて計算される。指の位置はレーザ変位センサー(ZX-LD100, オムロン)により測定され、指が台を押す垂直力はロードセル(CB17600G11, ミネベア)により測定される。

ある種の液体を塗布するとき生ずる微細なスティック・スリップのような振動を仮想的に発生させるため、指

表1 実験試料

略称	試料名	性状	用途
—	水	無色透明	
I	イソノナン酸イソノニル	低粘性液状油、無色透明	ライトクリーム、ローション、バスオイル
G	グリセリン脂肪酸エステル	液状油、無色～淡黄色透明	
S	スクワラン	液状油、無色透明	
O	トリオクタノイン	液状油、無色透明	ほとんど全ての化粧品
P	イソステアリン酸 ポリグリセリル-2	高粘性液状油、淡黄色～黄色透明	W/Oクリーム、ヘアケア製品
T	トリイソステアリン	高粘性液状油、淡黄色	口紅、リップグロス

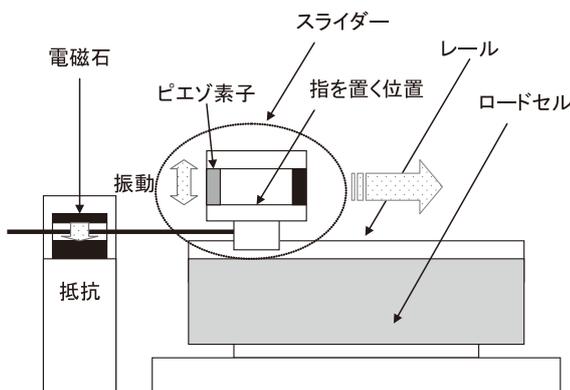


図4 塗布感の仮想呈示装置

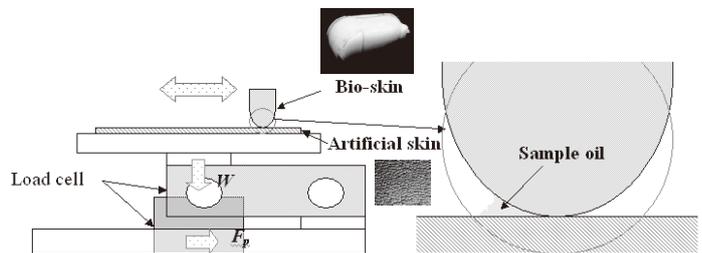


図3 塗布摩擦の測定装置

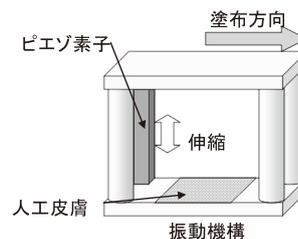


図5 塗布時の振動を仮想的に呈示する装置

置き台に図5のような piezo素子 (AE0203D44H40F, NEC Tokin) を取り付けた。piezo素子に正弦波、三角波、矩形波の電圧を印可することにより、piezo素子が伸縮振動し、その振動を指に伝える。仮想呈示装置の制御はマイクロコンピュータ (Arduino MEGA) により行われる。

### 3. 結果

#### 3.1 摩擦係数の測定

実験結果の一例を図6に示す。図からわかるように、各油剤が塗布開始から終了までの間に示す摩擦係数の時間的変化は次の3つのパターンに分類できる。

- ①摩擦係数の値が大きく変動し、その変動の大きさを示す標準偏差  $\sigma_\mu$  の値が非常に大きくなる。試料 I がこれに該当する。
- ②塗布開始直後の高い摩擦係数の後、塗布とともに一定の値まで単調に減少していく。固体壁間に生ずる静止摩擦から動摩擦への変化と似た変化である。
- ③上記②と同様に摩擦係数は塗布開始後に一定の値まで減

少するものの、その後再び増加する。この時間的変化は主に高粘度の油剤で観察される。

このように試料 I は摩擦の変動現象により大きな  $\sigma_\mu$  の値を示す。試料 I は表2に示すように粘度が低く、かつ接触角が小さい。このような振動現象が生ずる条件を調べるため、摩擦測定端子の表面をバイオスキンで覆わない、粗面の樹脂端子、および表面をなめらかに研磨した樹脂端子についても摩擦係数の測定を行った。その結果、粗面の樹脂測定端子を用いた場合、試料 I だけでなく試料 S と試料 O も摩擦の変動現象を示し、 $\sigma_\mu$  の値が大きくなった。試料 S と試料 O は表2に示すように比較的粘度が低く、接触角が小さい。これらの条件が振動をもたらし上で重要と考えられる一方、この変動現象は油剤固有の物性の問題だけでなく、油剤物性、測定端子表面及び塗布面の各条件と関連して生ずると考えられる。なお、機械でなく指による塗布の場合にも図7に示すように同様の摩擦の変動が測定された。図7は試料 I と試料 G を指で往復して塗布した場合の水平力の時間的変化を示しており、試料 I の場合には塗

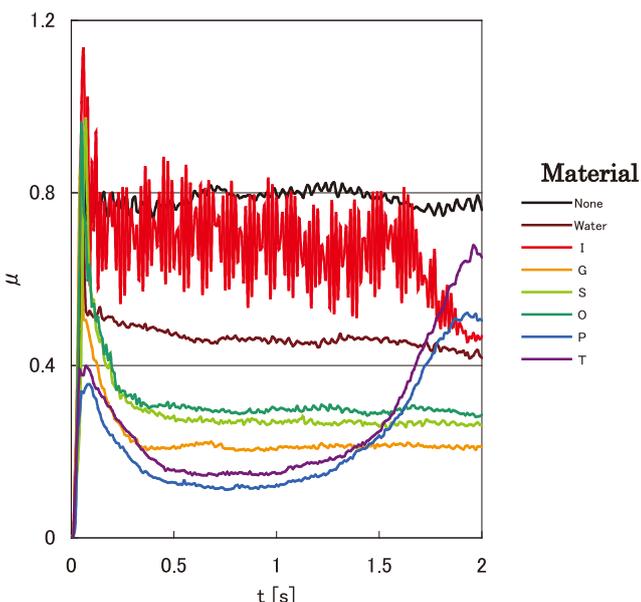


図6 塗布時の摩擦係数の時間的変化 (図3の測定装置)

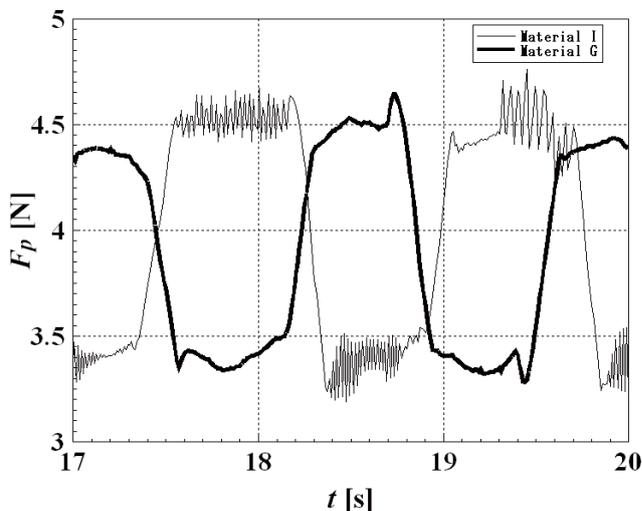


図7 人の指による塗布時の摩擦係数の時間的変化 (図3の測定装置を用い、測定端子ではなく人の指で塗布)

表2 試料物性値 (20°C)

略称	試料名	比重 s	粘度 $\eta$ [mPa·s]	表面張力 [mN/m]	接触角 $\theta$ [°]
—	水	1	1	70.7	92.3
I	イソノナン酸イソノニル	0.856	6	25.4	6.19
G	グリセリン脂肪酸エステル	0.997	196	29.6	14.3
S	スクワラン	0.812	36	28.6	10.4
O	トリオクタノイン	0.953	30	28.6	7.63
P	イソステアリン酸 ポリグリセリル-2	0.987	6540	29.4	24.0
T	トリイソステアリン	0.905	14500	23.5	27.0

布時に微細な振動が重畳して発生しているのに対し、試料Gの場合にはそのような振動は観察されない。

試料I、試料G、試料Tの3つの試料に対し、摩擦実験時の測定端子が油剤を塗布する運動をハイスピードビデオカメラにより撮影した。3つの試料のうち、摩擦の変動を示した試料Iの場合にのみ、撮影画像上で端子と塗布面の間に振動現象が観察された。この振動現象の周波数は約55.6Hzであった。一方、摩擦実験で観察された摩擦水平力の変動周波数は約50Hzであった。したがって、摩擦力の変動と撮影された振動現象とは同一のものであるといえる。

摩擦の振動現象としては、スティック・スリップがよく知られている。黒板にチョークを立てて滑らしたときやガラスに爪を立てて滑らせたときなどに生ずる。機械システムにおいても生ずることがあり、固体壁間のスティック・スリップ<sup>3)</sup>は比較的良好に研究されている。ビデオの観察結果も、観察された振動がスティック・スリップの一種であることを示した。しかしながら、本研究で観察された振動現象は油剤を介しての振動現象であり、このような摩擦の振動現象はほとんど研究されていない。得られた結果をまとめると、振動の生じやすい条件は、①低粘度、②小さな接触角、③粗面、といえる。また、測定端子表面と塗布面の接触面外に形成されるくさび状の空間は、その進行方向側に油剤が蓄えられ、その油剤は接触面へと供給される。このくさび空間に蓄えられる油剤量は、ビデオ観察では振動を発生させる試料Iの場合に最も少なかった。

### 3.2 塗布感の官能試験と仮想呈示装置による塗布感の検証試験

評価する官能特性の項目を、「伸びの軽さ」、「なじみや

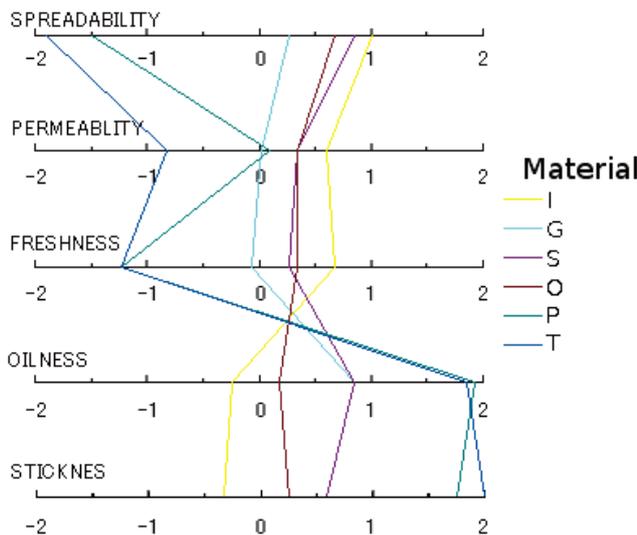


図8 塗布感の官能評価結果

すさ」、「みずみずしさ」、「あぶらっぽさ」、「べたつき」の5項目とした。皮膚健常者の被験者12名が、各油剤ごとにそれらの評価項目を段階評定尺度法によって-2~2の5段階で評価した。塗布部は前腕内側とし、滴下量は5 $\mu$ Lとした。塗り心地を感覚的に捉えやすくするため、被験者全員が全項目について水の尺度を0として評価した。試験結果を図8に示す。「あぶらっぽさ」や「べたつき」など、人が嫌う傾向にある項目では試料Iの値が小さい。これは他の試料に比べて試料Iの塗り心地が良いことを示すものであり、 $\sigma_{\mu}$ の値と塗布感の良さとの相関を示唆する。

この $\sigma_{\mu}$ の値と塗布感の良さとの関係を検証するため、2.3で述べた塗布感の仮想提示装置を用いて官能試験を行った。電磁石の負荷により与える水平方向の抵抗は、試料Iの粘度の液体を塗布したときと同じになるように設定した。指に与える振動は周波数50Hzの振動をピエゾ振動子により与え、正弦波、三角波、矩形波の各振動を与えた。皮膚健常者である被験者7名により、各変動波形を段階評定尺度法によって-1~1の3段階で評価した。ただし、被験者全員が振動なしの尺度を0とした。試験の結果は表3に示すように、摩擦実験の振動波形と同様の50Hzの三角波振動を仮想的塗布動作に加えたときに塗布感が良いという評価を得た。これらの結果はスティック・スリップ状の振動が好ましい官能特性をもたらすことを示唆する。なお、矩形波の場合は共振のような振動を図5の指置き台に発生させ、官能特性も悪い結果となってしまった。

## 4. 考察

ある特定の油剤を塗布する時に約50Hzの摩擦の変動が生ずることを摩擦係数の測定と塗布時のハイスピードビデオ観察から確認した。ビデオ観察から考えるかぎり、この塗布時の振動現象は一般にしばしば観察されるスティック・スリップであり、静止摩擦と動摩擦のように、塗布抵抗の大きくなるときの小さくなるときの2つの状態が交互に生ずる結果と考えられる。このスティック・スリップが生じやすい条件は塗布面が粗面で、油剤の粘度が低かつ接触角が小さい場合である。このような条件の下では、油剤の粘度は低く、塗布面を容易におおうことができる。いっぽう、接触角は小さいため、油剤は塗布面の周囲に逃げやすく、塗布面との間に固体壁間の摩擦が生じやすい。このように粘度が低いことと接触角が小さいことは互いに異なる二つの状態を導きやすく、これによりスティック・ス

表3 仮想呈示装置による塗布感の検証試験

	正弦波	三角波	矩形波
1 (良い)	5	6	2
0 (変化なし)	6	5	5
-1 (悪い)	1	1	6

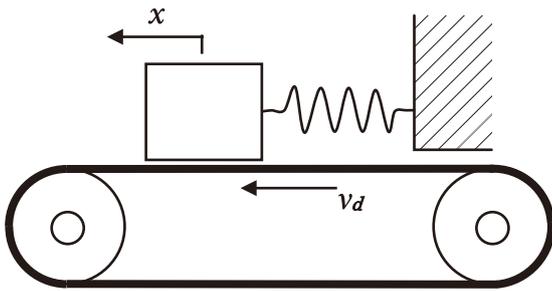


図9 stick-slipの力学モデル

リップが生ずるのではないかと推測される。スティック・スリップを発生させる油剤は官能試験で好ましい塗布感覚を与えた。塗布感の仮想呈示装置にピエゾ振動子による振動を再現できるよう改造し、官能試験を行った結果でも、このスティック・スリップ状の振動は好ましい塗布感を与えた。このようなスティック・スリップ状の振動の機構について次に考察する。

stick-slip を発生させる力学モデルの例を図9に示す。質量  $m$  の物体が一定速度  $v_d$  で移動するベルトの上に乗っており、この物体は固定壁とバネで結合されている。物体にはベルトからの力  $f$  とバネからの力  $kx$  ( $k$  はバネ定数、 $x$  はバネの伸び) が働き、物体の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x} + kx = f \quad (1)$$

この系はある条件の下でstick-slipを示すことが知られている。物体がベルト上をすべるslipでは、ベルトから受ける力  $f$  はすべり摩擦  $f_{\text{fric}}$  に等しく、

$$\text{Slip: } f = f_{\text{fric}} \quad (2)$$

すべり摩擦  $f_{\text{fric}}$  は次式で表される。

$$f_{\text{fric}} = -\frac{F_s \operatorname{sgn}(v_r)}{1 + \delta |v_r|} \quad (3)$$

ここで、 $v_r$  はベルトに対する物体の相対速度で、 $v_r = \dot{x} - v_d$  の関係にあり、 $\delta$  は定数、 $F_s$  は物体が動き始めるときの静止摩擦である。一方、物体がベルトとともに移動するstickでは、バネの伸びが小さく  $f_{\text{fric}} > kx$  のときはベルトから力  $f = kx$  を受けながらベルトとともに移動する。しかし、バネの伸びが大きくなり  $f_{\text{fric}} < kx$  となるとベルトからの力は  $f = f_{\text{fric}}$  へ切り替わる。したがって、

$$\text{Stick: } f = \min(|kx|, F_s) \operatorname{sgn}(x) \quad (4)$$

以上のように、 $f$  は

$$\text{Stick } (v_r = 0): f = \min(|kx|, F_s) \operatorname{sgn}(x) \quad (5)$$

$$\text{Slip } (v_r \neq 0): f = -\frac{F_s \operatorname{sgn}(v_r)}{1 + \delta |v_r|} \quad (6)$$

と不連続に変化する。このような不連続関数は運動方程式

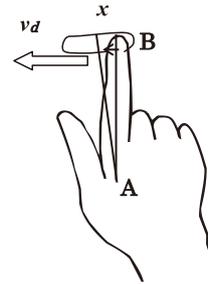


図10 指の stick-slip

指の付け根Aが空間に固定され、塗布面が一定速度  $v_d$  で移動

の数値積分を難しくするが、Leineら<sup>4)</sup>は  $f$  に対する次式のような連続関数が良い近似を与えることを示している。

$$f(v_r) = -F_s \frac{2}{\pi} \frac{\arctan(\varepsilon v_r)}{1 + \delta |v_r|} \quad (7)$$

ここで、 $\delta$  と  $\varepsilon$  はすべりの摩擦力を定義する定数である。

次に油剤塗布時の振動現象を上記stick-slipモデルと対比して考える。図10の指の付け根Aは腕とともに一定の塗布速度で右方向に移動するが、ここでは図9の物体と図10の指の運動が同じになるように、点Aが空間に固定され、塗布面が一定速度  $v_d$  で移動する場合を考える。指先Bは塗布による摩擦により  $x$  だけたわむ。このたわみは点Aで固定された片持ちはり(指)のたわみと考えることができる。したがって、図9のバネの伸縮を図10の指のたわみと考え、図9の物体とベルト間の摩擦は指先で油剤を塗布するときの摩擦と考える。油剤の粘度が非常に低い場合、運動方程式(1)において、指のたわみ  $x$  に対する弾性力が右辺の摩擦力に比べ大きい。式(1)の両辺を  $k$  で除し、 $k \rightarrow \infty$  とすれば、 $x = 0$ 、すなわち塗布面に対する指先Bの相対速度  $v_r = -v_d$  と一定になりstick-slipは生じない。stick-slipは塗布液の粘度が比較的高く、式(1)右辺の摩擦力が、左辺の指先のたわみによる弾性力と同等かもしくは弾性力を上回る大きさになるときに生ずる現象と考えることができる。

運動方程式(1)は下記の無次元変数を用いて表すこととする。

$$\begin{aligned} x^* &\equiv kx/F_s, \quad t^* \equiv \sqrt{k/m} \cdot t, \\ v_r^* &\equiv \sqrt{mk} \cdot v_r/F_s, \quad v_d^* \equiv \sqrt{mk} \cdot v_d/F_s \end{aligned} \quad (8)$$

式(1)はこれら無次元数を用い

$$\frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + x^* = \frac{2}{\pi} \frac{\arctan(\varepsilon^* v_r^*)}{1 + \delta^* |v_r^*|} \quad (9)$$

ここで、 $\varepsilon^*$  と  $\delta^*$  は、

$$\varepsilon^* \equiv \varepsilon F_s / \sqrt{mk}, \quad \delta^* \equiv \delta F_s / \sqrt{mk} \quad (10)$$

また、

$$v_r^* = \frac{dx^*}{dt^*} - v_d^* \quad (11)$$

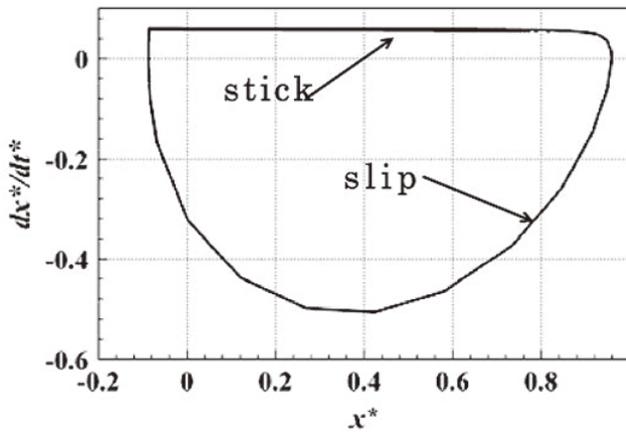
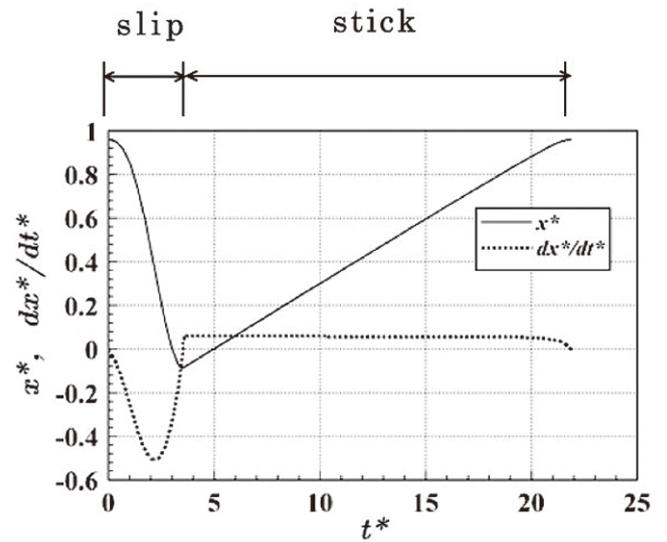


図 11 位相図

指の付け根の速度（塗速度布） $v_d$ と力学的パラメーター  $F_s$ 、 $m$ 、そして  $k$  が与えられれば、式 (9) と (10) から指の運動が計算される。塗布時に振動が観察された例として試料 I を選び、摩擦力  $F_s = 0.77\text{N}$ 、指先質量  $m = 10^{-3}\text{Kg}$ 、指の付け根の速度（塗速度布） $v_d = 0.06\text{m/s}$  とする。また、指先に力  $F_s$  を加えたときの変位  $x$  の測定から、指のバネ定数を  $k = 600\text{N/m}$  とした。また、Leine ら<sup>4)</sup> が用いた値と同じく  $\delta$  は 3、そして  $\varepsilon$  は  $10^3$  とした。このときの式 (1) に対する変位  $x$  の周期解を Leine ら<sup>4)</sup> の shooting 法により求めた。図 11 は得られた周期解の  $x^*$  と  $dx^*/dt^*$  の関係を示す位相図であり、図 12 は  $x^*$  と  $dx^*/dt^*$  を  $t^*$  の関数として示した。 $x^*$  は約  $-0.1$  から  $0.9$  の間で変化し、 $x (= x^*F_s/k)$  は約  $1\text{mm}$  の振幅となる。一方、 $t^* = 21.9$  となり、振動周期  $t (= t^*\sqrt{m/k})$  は約  $20\text{ms}$  となる。周波数では約  $50\text{Hz}$  であり、この周波数は実験で観察された周波数とほぼ等しい。

ここで提案した指先の振動に対する stick-slip モデルは、油剤塗布時の振動現象を比較的良く説明することができた。すなわち、観察された stick-slip は指先を動かすときに指


 図 12 変位  $x^*$  と速度  $dx^*/dt^*$  の時間的变化

先に働く油剤の塗布摩擦と指の弾性的なたわみをもたらす振動現象といえる。この微小な振動現象は好ましい塗布感を与えるので、油剤の粘度等をこの現象の生ずる条件に調整することにより、油剤の塗布感を向上させることも可能になると期待できる。

#### (引用文献)

- 1) Mizunuma H, Nishizawa K, Hirose S, Segawa T.: Virtual Psychorheometry: Concept and Application, Int. Congress on Rheology, AIP 1027, 1390-1392(2008).
- 2) 化粧品原材料品カタログ、日清オイリオグループ株式会社
- 3) Feeny B, Guran A, Hinrichs N, Popp K.: A Historical Review on Dry Friction and Stick-Slip Phenomena, Appl. Mech. Rev., 51-5, 321-341(1998).
- 4) Leine RI, Campen DHV, Kraker AD, Steen LVD.: Stick-Slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models, Nonlinear Dynamics 16, 41-54, 1998.