塗料の作業性についての研究 (第 I 報)

二次元動力計の製作とその応用

久 下 靖 征*

Studies on Workability of Paints (I)

Development of a Two-Dimensional Dynamometer
and Its Application

Yasuyuki KUGE*

Abstract

A two-dimensional dynamometer was developed to measure the drag of brush and the pressure applied on it during brushing of paints.

The dynamometer consists of a working table, two strain-gauged octagonal rings and others. The horizontal force and vertical force acting upon the working table can be measured without cross-interference by connecting gauges into two independent bridges. The signal from the dynamometer is fed to a strain-meter and recorder.

Some measurement of force during brushing and other application were shown.

要 旨

はけ塗り、へら付けなどに際して、これら工具を動かすに要する力・工具に加える圧力を同時に計測することを目的とした二次元動力計を試作した。動力計は作業テーブル、八角弾性リング、その他から成り、作業テーブル上で塗装作業を行なった際に、工具に加わる力の反力として作業テーブルに加わる力を、水平および垂直の二成分に分けて検出することができる。

市販塗料のはけ塗りなどについて測定したところ、はけ塗り操作の相違、重ね塗りの影響、はけの大きさの相違などを明確にとらえることができた。

1. 緒 言

作業性は塗料の重要な性質のひとつであるにもかかわらず、それに関する研究が少ないが、はけ塗り作業性については比較的多く行なわれていて、Asbek¹⁾ら、Berberian²⁾、室井ら³⁾、Mell および Finn⁴⁾、吉田⁵⁾などの研究がある。

これら先行研究では、はけさばきと塗料の流動性との関係について検討され、はけ塗りに際してはけを動かすに要する力・はけに加える圧力と塗料の流動性との関係を表わす式も提出されている。しかし、実際にそれらの力を測定して、その当否を確かめた例はない。

はけ塗り作業性に関する実用的な試験機としては、RCI 形はけさばき試験機が有名であり、この試験機を使用した実験については、植木の報告がある⁶⁾。また、ひずみゲージを接着したはけを使用して、はけ塗りの際のはけの曲げモーメント (bending moment) からのはけ塗

昭和 52.2.16 受理

* 職業訓練大学校

神奈川県相模原市相原 1960

* Institute of Vocational Training

1960, Aihara, Sagamihara-shi, Kanagawa,
Japan

Fig. 1. Illustration of the dynamometer

り操作を分析した Bishop⁷⁾ の報告がある。こうした試験機は実用性にはすぐれているが、塗料の作業性についての定量的な研究に使用するには、まだ十分な機能をもったものとはいえない。

筆者は塗料の作業性について研究するために、機械工学の分野では古くから利用されている工具動力計の設計手法を応用して、はけ塗り・へら付けなどに際して、これら工具を動かすに要する力（塗面に水平な力）・工具に加える圧力（塗面に垂直な力）を同時に計測することを目的とした二次元動力計を試作し、計測に成功したので動力計の製作の概要とその応用例について報告する。

2. 二次元動力計の製作

2.1 目的および原理

本動力計の目的は、図-1 に示すように作業テーブル上ではけ塗り・へら付けなどの作業を行ない、その際、はけ・へらなどの工具に加わる力の反力として作業テーブルに加わる力を水平および垂直の二成分に分けて検出し、記録しようとするものである。

製作上の要点は作業テーブルの支持法および力の検出法である。コロとバネばかり、コイルスプリングと変位計の組み合わせなども検討したが、結局、機械工学の分野で使用されている八角弾性リングとひずみゲージの組み合わせ⁸⁾を採用した。

すなわち、本動力計の原理は作業テーブルを八角弾性リングによって支え、作業テーブルに加わった力に応じて生じた八角弾性リングの変形（ひずみ）を、ひずみゲージによって検出し電気信号に変換するものである。

なお、八角弾性リングの変形はごく微小であり、はけ塗り操作などにおいて、はけの動きにひきずられて作業テーブルが動かないのが、RCI 形はけさばき試験機と比較した場合の本動力計の特色である。

2.2 構成

動力計は作業テーブル、八角弾性リング、その他から成り、ひずみ増幅器および記録計が付属する。図-2 に全景を示し、以下各部について説明する。

Fig. 2. The two-dimensional dynamometer for workability studies of paints

Fig. 3. The load-deformation model of circular ring
— unloaded — loaded

2.2.1 作業テーブル

この上に試験板（600×300 mm）を固定して、はけ塗りなどの作業を行なう。軽量でかつ曲げ剛性の大きいことが要求される。ここでは、2本の補強ばり（長さ 500 mm の 30×30×3 mm t L 型鋼と 40×40×5 mm t L 型鋼とを L 形にボルト締めしたもの）を 125 mm 間隔で平行に配置し、その上に合板（600×300×18 mm t）をボルトで固定して、作業テーブルを構成した。

2.2.2 八角弾性リング

a. 原理

はりの中心線が平面曲線をなすものを曲りはり (curved beam) といい、これに関する理論は鎖リンク (chain link)、輪 (ring) およびかぎ (hook) 等の問題に応用されている⁹⁾。

いま、円輪 (circular ring) に作用する応力とその変形のモデルを示すと、図-3 のようである。図-3 左のように円輪の鉛直直径に沿って力が作用すると、a, c, d, f 点で応力（ひずみ）はゼロ、b, e 点で応力（ひずみ）は最大となる。図-3 右のように円輪の水平直径に平行に力が作用すると、b, e 点で応力（ひずみ）はゼロ、c, f 点で応力（ひずみ）は最大となる。力の作用する方向を逆にすれば、a, d 点で応力（ひずみ）が最大となる。

ここで、図-3 左のような圧縮荷重 P が円輪に作用するとき、図-4 のようなく形断面を有する円輪での応力とその位置は、つぎの (1), (2), (3) 式によって示

Fig. 4. Stress acting upon a circular ring

される。

$$\sigma = -\frac{P}{A} \left\{ \frac{1}{\pi(1+\kappa)} + \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{\pi(1+\kappa)} - \frac{1}{2} \cos \varphi \right) \frac{\pm e}{\rho_0 \pm e} \right\} \quad (1)$$

軸線から距離 e のところに作用する応力 σ を求める式

σ_T (外側) のとき $+e$

σ_C (内側) のとき $-e$

$$\kappa = \frac{1}{3} \left(\frac{e}{\rho_0} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{e}{\rho_0} \right)^4 + \frac{1}{7} \left(\frac{e}{\rho_0} \right)^6 + \dots \quad (2)$$

曲りはり (く形断面) の形状係数 κ を求める式

$$\cos \varphi = \frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{\kappa}{1+\kappa} \cdot \frac{\rho_0}{e} \right) \quad (3)$$

中立点 ($\sigma=0$ の点) の位置 (φ) を求める式

ここで,

$$e = \frac{R-r}{2} \quad \rho_0 = \frac{R+r}{2} \quad \frac{e}{\rho_0} = \frac{R-r}{R+r} \quad A = 2e \times B$$

いま, 基準円 (外径円) に対する b, e 点 ($\varphi=0$), a, c, d, f 点 [(3) 式から求められる φ] および g, h 点 [$\varphi=(\pi/2)$] での接線をつなぐと, 図-5 のような八角形が得られる。この八角形の外形を有するリング (八角弾性リング) についても, 円輪に作用する応力とその変形との関係が近似的に適用できる。

したがって, リングの鉛直直径 g, h に沿って圧縮荷重 P が作用したとき, b, e 点に生じるひずみ ε は, (1) 式および $\sigma = \varepsilon \cdot E$ (E : リングの材質のヤング率) の関係から求めることができる。また逆にひずみ ε を得れば, 荷重 P を求めることもできる。

なお, 図-3 右のような水平直径 b, e に平行な力が作用したときに, c, f 点 (あるいは a, d 点) に作用する応力を求める式は示されていないが, 八角弾性リングを設計する上では, 圧縮荷重の場合とほぼ同じと考えておいてよい。

以上のような八角弾性リングに作用する応力とその変形との関係から, これを荷重検出器の基体として利用することができる。すなわち, a, b, c, d, e, f 点にひずみゲージを接着すれば, b, e 点からは垂直分力が, a, c, d, f 点からは水平分力が同時にかつ相互に干渉されることなく検出される。

表-1 に, 今回設計した八角弾性リングの諸元を示す。

b. ひずみゲージの接着位置

図-6 に示すように, b, e 点の外側, 内側に垂直分力検出用のひずみゲージを, a, c, d, f 点の外側に水平分力検出用のひずみゲージを接着する。図-3 のよ

Table 1. Detail of the octagonal ring designed

Load Range (P_{max})	Radius		Width (B)	Neutral Node ($\varphi=0$)	Out put ($P=50\text{kg}$)			
	(R)	(r)			(σ_T)	(σ_C)	($\bar{\sigma}$)	$\bar{\varepsilon}$
50 kg	30 mm	26 mm	60 mm	$49^\circ 19'$	1.43 kg/mm^2	1.79 kg/mm^2	1.61 kg/mm^2	77×10^{-6}

Fig. 5. Octagonal ring

Fig. 6. The position of gauge application

Fig. 7. The form of a Wheatstone bridge

うな力が作用すると, T_1 , T_2 が引張側, C_1 , C_2 が圧縮側になる。

c. 回路構成

垂直分力検出用ひずみゲージと水平分力検出用ひずみゲージを別々に, それぞれ図-7 のように結線してブリッジを構成した。

本動力計では, 八角弾性リングを 2 個使用しているので, 垂直用, 水平用のブリッジ別にそれぞれ入出力を並列に接続して, 個々の八角弾性リングのひずみ量が異なっても, その算術平均に比例した出力電圧が得られるようにしてある。

2.2.3 ひずみ増幅器および記録計

三栄測器 (株) 製 6M52 形ひずみ増幅器および 5L 形ビジグラフ (電磁オシログラフ) を使用した。

2.3 動力計の検定

垂直分力については, 作業テーブルの中央部に 100~1,600 g のウェイトをのせて, ひずみ出力を測定し, 水平分力については, 作業テーブルの中心線を通りかつ水平な方向から力が加わるように, プーリーを介して 100~1,600 g のウェイトをワイヤーでつるし, ひずみ出力を測定して, その結果から荷重~出力関係を検定した。図-8 に検量線を示す。

なお, 垂直方向の力を加えた場合に, 干渉によって水平分力として生じる出力は約 3%, 逆の場合は約 1% である。

また, 作業テーブル上の位置による出力の変動は, 垂

Fig. 8. The relationship between applied load and strain of the dynamometer manufactured

直および水平方向とも $\pm 2\%$ 以下である。

3. 二次元動力計の応用例

図-9~11 に, 市販の各種塗料を試験板 (600×300 mm, 塗装部分 450×300 mm) にはけ塗りした際の記録図形を示す。垂直分力と水平分力とは図-8 からわかるように, 動力計の感度 (ひずみ出力) が異なるので, 同じ力が加わっても記録図形では, 垂直分力の方が小さく表示される。

図-9 は, 合成樹脂調合ペイントを筋違いはけ (はけ幅 30 mm) を用いて塗装した際の記録図形である。一般にこうした遅乾性塗料のはけ塗り操作は, 塗り付け—ならし—むら切りの三段階に分けて行なわれる。塗り付けは被塗面に, ある間隔を置いて塗料を配る操作である。ならしは配られた塗料を被塗面全体に均一に塗りひろげる操作で, 塗料を引きのばしてスキ間を埋めるために, はけ先にかかなりの力を必要とする (ふつうは塗り付け方向と直角にはけを使うが, 今回は同一方向に行なっている)。むら切りははけ目を小さくし, 一方向にそろえる操作であり, ごく軽くはけを動かして行なう。図-9 からは, こうしたはけ塗り操作の際のはけに加わる力の相違を明確に読み取ることができる。

図-10 は, 白毛筋違いはけ (はけ幅 45 mm) によるクリヤラッカー塗りの記録図形である。クリヤラッカーなどの速乾性塗料では, 一般に棒状塗りといって調合ペ

Fig. 9. Typical trace of brush application process of oil paint

Fig. 10. Traces showing effect of lapping on brushability of clear lacquer

Fig. 11. Traces showing effect of brush-size on brushability of emulsion paint

Fig. 12. Typical trace of spatula application process of oil putty

Fig. 13. Traces showing effect of worker's skillness on honing of plane iron

ントなどのような三段階操作は行なわず、ひとはけごとに塗り仕上げる。図-10 左は合板素地に塗った場合で、図-10 右はクリヤラッカーを下塗りした上に重ね塗りした場合である。下塗り塗膜の再溶解による影響が認められる。

図-11 は、エマルジョンペイント塗りの記録図形である。図-11 左は幅 30 mm の筋違いばけを使用した場合で、図-11 右は幅 84 mm の平ばけを使用した場合である。使用したはけの大きさの違い（塗面との接触面積の違い）によるはけに加わる力の相違が示されている。

図-12 に市販の油性パテを幅 60 mm のプラスチックへらでへら付けした際の記録図形を示す。塗り付けの際の水平分力はへらの進行にともない低下している。すなわちへらの進行方向前面にはパテのたまりがあり、へらはこれを変形させてパテ層とするのであるが、はけ塗りの場合と異なり、たまりの変形抵抗が無視できないことがわかる。

図-13 に木べらの製作などでも使用するカンナの刃のときの記録図形を示す。図-13 左は未経験者がといた場合で、図-13 右は経験者（経験 30 年）がといた場合である。加える力の大きさおよび加え方（現象波形）に大きな相違のあることがわかる。もちろん、これをもって熟練度に応じた特徴と判断するには被験者の数が少なすぎるが、はけ塗りも含めて熟練度の定量的評価への一つのアプローチが考えられる。

4. む す び

試作した二次元動力計により、はけ塗り・へら付けなどに際して、これら工具を動かすに要する力・工具に加える圧力を同時に計測することと、それらにおよぼす塗装条件の影響を明確に検出することが可能であることがわかった。

したがって、塗料のはけ塗り作業性に関する先行研究において示された工具に加わる力と塗料の流動性との関係系を追試することの可能性がひらけた。

また、記録図形から得られる数値（振幅～力の大きさ、周期～工具を動かす速度、作業時間）と感覚的なはけさばき性との関係を検討することによって、はけさばき性の定量的な表示も可能ではないかと考えられる。

終りに、この二次元動力計を試作するに当たり、ご指導ご協力をいただいた職業訓練大学校海邦昭氏、磯野宏秋氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) W.K. Asbeck, D.D. Laidermann and M. Van Loo: *J. Colloid Sci.*, 7, 306 (1952)
- 2) E. Berberian: *Off. Dig.*, 28, 1037 (1956)
- 3) 室井宗一, 酒井昭二, 渡部一孝: 色材, 40, 256 (1967)
- 4) C. C. Mell, S. R. Finn: *Rheologica Acta*, 4, 260 (1965)
- 5) 吉田豊彦: 色材, 43, 158 (1970)
- 6) 植木憲二: 色材, 33, 148 (1960)
- 7) D. M. Bishop: *J. Paint Technol.*, 33 [4], 16 (1969)
- 8) N. H. Cook, E. G. Loewen and M. C. Shaw: *American Machinist*, May 10, 125 (1954)
- 9) 湯浅亀一: 改訂“材料力学(中巻)”, p.22, コロナ社 (1956)