弾性変形を利用した空圧ダイリップ 駆動機構の開発*

富 田 良 幸**

Development of Die-lip Driving Mechanism Based on Elastic Deformation
by Pneumatic Control

Yoshiyuki TOMITA

In the laminating process, automatic profile control of extruded film thickness in cross-direction is required for better productivity and product uniformity. The thickness profile is determined by the gap pattern of the die-lip heated at 350°C. Conventionally the correction of the gap is made by manual adjustment of the individual die bolts equipped in the side of the die. In this paper, a new method, which utilizes the mechanical elastic deformation of the lip by a pneumatic pressure control, is proposed with its construction and characteristic. Two bellows, which pressure is controlled with electro-pneumatic converter, are constructed in each zone of the die as actuators. As a result, the resolution of deformation 1.0 μm and the response time 0.4 s are obtained in heated condition. Additionally, a decoupling method for the model is proposed, in order to compensate the interactive deformation characteristic which is caused by continuum construction of the lip. Consequently, decoupling accuracy of 1% per full span and 0.6-1.0 μm resolution of deformation are obtained.

Key words: laminating process, automatic profile control, die-lip, mechanical elastic deformation, pneumatic pressure control, decoupling method

1. 緒 言

ラミネートプロセスは、幅約1~2mの基材（フィルム、紙、アルミニウム箔等）に加熱溶接された樹脂をコーティングするプロセスである。近年、製品の品質化あるいは生産性の向上等の目的から、コーティング膜厚の幅方向精度を管理するための、膜厚制御システムの必要性が高まっている。

ラミネート部周辺の代表的機械構成を図1に示す。溶融樹脂は、250~350°Cに加熱されたダイよりフィルム状に流出し基材にコーティングされる。この際、コーティング膜厚の幅方向精度は、ダイにおける流出口（以下リップと呼ぶ）の開度の調整に支配される。従来この調整は、同図のダイ側面に設けられた多数のボルトを、人手によって操作することによって行われてきた。このため、調整には多大な労力と熟練を要し、また、製品の品質化、生産性の向上の点から

も、その自動化が必要である。

そこで筆者らは、ダイのリップ開度の調整を自動化するための駆動機構として、新たに弾性変形方式によるリップ駆動機構の開発を行った¹⁾²⁾。本機構では駆動源として空気圧を用い、ダイに組み込んだ多数のベローズの発生力を用いてリップ部に曲げ弾性変形を

Fig. 1 Outline of laminating apparatus

* 原稿受付 平成元年5月12日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会（昭和63年10月4日）および1989年度精密工学会春季大会学術講演会（平成元年3月23日）にて発表

** 住友重機械工業(株)（田無市谷戸町2-4-15）

生させ開度調整を行う方式を用いた。

本論文では、まず今回開発した駆動機構の構造について述べ、その基本駆動特性を明らかにする。次に、その制御方式として各駆動点の変位の相互干渉を補償する干渉補正方式について述べ、その有効性の評価を行う。

2. 開発の目的

フィルム膜厚の精度は、その誤差発生要因から次の3種類に大きく分類できる。第一は幅方向精度（均一性）であり、主にリップ部のすきま調整誤差、ダイの幅方向温度分布などに起因している。第二は流れ方向精度（均一性）であり、樹脂温度あるいは樹脂圧力の時間的変動に起因している。第三は平均膜厚精度であり、押出機からの熔融樹脂の総流量誤差によるものである。今回の開発の主眼は、第一の項目に述べた幅方向精度の向上のための制御システムを構築することにある。

一般に、リップ部からの局所樹脂流量 q （単位幅当たりの樹脂流量）は次式により表される³⁾。

$$q = \left[\frac{n}{2(2n+1)} \right] \left(x^{2n+1} \frac{p}{2\eta_0 \dot{\gamma}_0^{1-n} L} \right)^{1/n} \quad (1)$$

ここで、 n ：樹脂レオロジー係数、 x ：リップ部開度、 p ：樹脂圧力、 $\eta_0, \dot{\gamma}_0$ ：任意の標準状態における樹脂粘度及びせん断速度、 L ：スリット長（流れ方向）。

上式において、 $n, \dot{\gamma}_0, L$ は定数であり、また圧力 p はダイの幅方向に対してほぼ一定と見なすことができる。一方 η_0 は温度の関数であることから、フィルム膜厚の均一性を確保するためには、ダイの幅方向温度分布に対応し、リップ開度比（開度の絶対値ではないことに注意）を任意に調整することが必要となる。その調整のための駆動分解能としては、基準ギャップ量及び樹脂の種類によって多少異なるが、幅方向目標精度から、約 $1 \mu\text{m}$ 程度が必要となる。

但し、ダイは幅方向に連続した構造体であり、駆動方式としては適当な幅ごとに駆動点をもつ方式とならざるを得ない。後述するように駆動部はその幅方向に対して図2のように区切られており、以下では、この各区切りをゾーンと呼ぶ。また、各ゾーンの変位量は、その駆動点での変位量により代表させることとする。

以上の前提のもとで、リップ駆動機構の開発目標として次のような項目を設定した。

- (1) 各ゾーンごとに独立した開度比調整（非干渉駆動）が可能であること。
- (2) 駆動分解能 $1 \mu\text{m}$ 以下。

Fig. 2 Structure of die

Fig. 3 Cross section of driving mechanism

- (3) 応答時定数 1 s 以下。
- (4) すべてのゾーンを同時駆動可能であること。
- (5) 350°C の高温下において安定な駆動特性をもつこと。

3. 基本構造および設計¹⁾

3.1 基本構造

$1 \mu\text{m}$ 以下の高い駆動分解能をもつ駆動方式としては、油圧⁴⁾あるいは電圧素子⁵⁾など種々の方法があるが、駆動対象が $250 \sim 350^\circ\text{C}$ に加熱されていることを考慮し、本研究では、空気圧駆動によるリップ部の弾性変形方式を考案した。ダイ全体構造図を図2に、駆動部の基本構造を図3に示す。

ダイ駆動部を幅方向に多数に分割し、分割された各ゾーンに対してそれぞれ2組のベローズを設けた構造とした。各ゾーンのベローズは、ダイ本体、及び駆動

Fig. 4 Calculated lip deformation (FEM)

アームにそれぞれ固定され、本体内部の給気路を通してそれぞれ独立に給気される。ペローズの発生力は駆動アームによりリップ部に伝達され、モーメントを発生する。その結果生ずる「弾性変形部」の曲げ変形により、リップ開度調整を行う。

本機構は以下のような特徴を有している。

- (1) 弾性変形方式を用いているため、給気圧・変位特性に対するガタ・バックラッシュ等の機械的非線形性の影響が極めて小さい。このため、空気圧の制御によりサブミクロン程度の高い駆動分解能を実現できる。
- (2) ダイ内部の樹脂への、熱的影響が少ない。
- (3) アクチュエータがダイ本体へ直接組み込まれた構造となっており、コンパクトな構造となっている。
- (4) 空圧制御系の応答速度から、1 s 以下の応答時定数を実現できる。

一方、リップ部は、均一な流れ面を確保するために連続構造とならざるを得ず、そのため各ゾーンの駆動量間には剛性による変位の相互干渉が存在する。この問題については、後述する干渉補正方式の適用により解決を図った。詳細については第5節にて述べる。

3.2 設 計

本駆動機構の設計では、給気圧、及びダイ内部を流れる樹脂の圧力変動の両者に対するリップ変位量の関係について、解析を行った。解析方法としては有限要素法を用いた。これは、対象が幅方向に連続した構造体となっており、その変形量を理論的解析によって行うことが困難であるためである。解析結果の一例を図4に示す。

同図は給気圧に対する、各ゾーンのリップ変位量を

Fig. 5 Characteristic of deformation

Fig. 6 Schematic view of measuring method

解析した結果である。横軸はダイ幅方向位置、縦軸はリップ変位量を表している。解析は、中央1ゾーンにのみ空気圧を加える条件で行った。同図は、その際の左右各1ゾーンを含む計3ゾーンの変位分布を示している。圧力値として0.147 MPaから0.588 MPaまで0.147 MPaステップで行った。なお、図中△印はアクチュエータの配置位置を示している。この結果から各点は圧力値に対してほぼリニアに変位し、また、ゾーン間には強い変位の相互干渉が存在することがわかる。

次に、樹脂圧力の影響については、その変動幅に対するリップ部変位量として約0.5 μmという結果を得ており、目標とするフィルム膜厚精度から、実用上問題は無いと考えられる。

4. 基本駆動特性¹⁾

4.1 圧力変位静特性

弾性変形部の、給気圧に対するリップ部変位の静特性の一例を図5に示す。同図は、中央1ゾーン(ch2)にのみ給気した際の隣接するch2及びch3の変位特性を、常温下及びダイ全体を320℃に加熱した状態において、それぞれ測定した結果である。横軸は各ゾーンへの給気圧、縦軸は各ゾーン中央の代表点変位をそれぞれ表す。

この際、変位量の計測は、リップ部を直接計測することが困難であることから、図6に示すようにリップ部上面にステンラターゲットを固定し、その変位量を渦電流センサ(新川電機製、分解能0.2 μm)に

よって計測する方式を用いた。

図5に示されるように、常温特性では、各ゾーンの変位量がch2への給気圧にほぼ比例しており、ヒステリシスも見受けられないことがわかる。また、各ゾーン間の構造的干渉によって、ch3は、ch2の約40%変位している。以上の特性は、図4の解析結果に近い値となっており、設計モデルの妥当性を裏付けている。

次に、加熱時の特性は、ダイ内部の温度分布及びその時間的変動とその変位センサへの影響等により、変位検出値として $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の変動を伴うが、全体的な傾向としてはch2において約6%変位量が増加し、ch3において約8%減少する結果となっている。これは、加熱により材料のヤング率が低下し全体剛性が低下したことに起因していると考えられる。剛性低下の割合は、約 300°C の温度上昇に対して10%以下であり、実用時のダイの温度変動幅 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ での割合は $\pm 0.1\%$ と計算される。これは、リップ駆動スパン約 $100\text{ }\mu\text{m}$ に対し $\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ という値となり、目標精度から考えて実用上問題はない。

4.2 駆動分解能

前項の結果から、弾性変形部の変位特性は給気圧に対してリニアな特性となっており、圧力によるリップ変位量の制御が可能であることが示された。ここではリップ変位量の駆動分解能について述べる。

本駆動方式の場合、その駆動分解能は空圧制御系の分解能によって決定されることから、次のような制御方式を用いた。

空圧制御弁として電空変換器を使用し、さらにその固有誤差(ヒステリシス $1\sim 2\%$)を押さえるために圧力検出器を用いたフィードバック制御系を構成している。この方式により圧力制御系の分解能として制御レンジ(0.6 MPa)の約 $1/400$ を実現している。

図7に、本制御方式を用いた際の連続ステップ駆動特性を示す。同図(a)は常温時の特性、(b)はダイ全体を 320°C に加熱した状態の特性を示している。なお実験はすべてのゾーンに同一空気圧を供給して行った。常温時のデータからは、 $0.67\text{ }\mu\text{m}$ の駆動分解能が確認されており、往復駆動時のヒステリシスも見られない。また、応答時定数は 0.4 s となっており、十分な応答性を有していることがわかる。一方、加熱状態では、常温状態と比較すると $0.1\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ のステップ変位量のばらつきをもつ結果となっている。また、同図(c)は同一条件での圧力の応答波形を示しており、その圧力ステップ量のばらつきは10%、変位量にして $0.07\text{ }\mu\text{m}$ 以内に入っている。このことから、

Fig. 7 Measured continuous step response

ステップ変位量のばらつきは、主にダイの熱的ひずみ、変位センサのドリフトなどに起因しているものと考えられる。

以上の結果から、本駆動方式は、駆動分解能、応答性、耐高温性など、リップ駆動機構としての必要機能を達成していることがわかる。

5. 干渉補正方式と駆動特性¹⁾²⁾

5.1 干渉補正方式

幅方向フィルム膜厚を高精度に制御するためには、各ゾーンにおけるリップ駆動量を独立に制御する必要がある。一方、リップ部は、幅方向に連続した構造体となっているため、前項の静特性結果からも明らかなように、各ゾーンのリップ変位量には相互干渉が存在する。これを補償するための方法として、以下に述べる干渉補正方式を用いることとする。

各ゾーンにおける給気圧と、リップ部変位量の関係は、次式により表すことができる。

$$\Delta y = G^{-1} K_{PT} \Delta p \quad (2)$$

$\Delta p = \{\Delta p_1, \dots, \Delta p_i, \dots, \Delta p_n\}^T$: 各ゾーンへの給気圧ベクトル, $\Delta y = \{\Delta y_1, \dots, \Delta y_i, \dots, \Delta y_n\}^T$: 各ゾーンのリップ変位量ベクトル, $K_{PT} = \text{diag}\{K_{PT1}, \dots, K_{PTi}, \dots,$

Fig. 8 Block diagram of control system

K_{PTn} : 各ゾーンへの給気圧に対するペローズ発生力ゲインマトリクス, G : 駆動部構造体の剛性マトリクス.

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & & & & \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & & & \\ & g_{i,i-1} & g_{i,i} & g_{i,i+1} & & \\ & & & & g_{n-1,n-2} & g_{n-1,n-1} & g_{n-1,n} \\ & & & & & g_{n,n-1} & g_{n,n} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} 0 \\ \\ \\ 0 \end{matrix}$$

上式において, 剛性マトリクス G 及び圧力~発生力ゲインマトリクス K_{PT} は既知であり, 次式に示す干渉補正演算により各ゾーンへの圧力指令値を算出する.

$$\Delta p_r = \hat{K}_{PT}^{-1} \hat{G} \Delta y_r \quad (3)$$

$\Delta y_r = \{\Delta y_{r1}, \dots, \Delta y_{ri}, \dots, \Delta y_{rn}\}^t$: 目標リップ駆動量ベクトル, $\Delta p_r = \{\Delta p_{r1}, \dots, \Delta p_{ri}, \dots, \Delta p_{rn}\}^t$: 圧力制御系への指令値ベクトル, $\hat{K}_{PT}, \hat{G}$: K_{PT} 及び G に対する制御系内部の数式モデル.

式 (3) は, 制御対象の逆モデル演算であるため, 系の干渉補正精度は, 数式モデル $\hat{G}, \hat{K}_{PT}$ の精度によって決定される. ここで特に問題となる剛性マトリクス G については, 有限要素法解析による設計値を, 実測により修正して求めた.

図 8 に, 本制御系の全体構成を示す. 式 (3) の干渉補正演算はマイクロコンピュータを用いて行い, その結果は D/A より各ゾーンごとに設けられた圧力制御系に入力される.

5.2 駆動特性

まず, 干渉補正方式の効果を確認するための比較実験として, 干渉補正入力の有無による各ゾーン間の変位干渉量の評価を行った. 結果を図 9 に示す. なお, 実験はすべて常温下で行った.

同図 (a) は, 干渉補正方式により, ch2 に移動量 0, また左右に隣接する ch1 及び ch3 には約 $20 \mu\text{m}$ の変位ステップに対応する圧力指令値を連続的に入力した場合の結果である.

一方 (b) は, ch2 への補正入力を行わない場合の結果であり, ch1 及び ch3 は (a) と全く同一の圧力指令を行った場合の結果である. 同図 (b) の場合, ch1 及び ch3 の約 $110 \mu\text{m}$ の駆動量に対し, ch2 は構造的干渉により約 $70 \mu\text{m}$ 変位している.

これに対して, 同図 (a) の場合には約 $1.1 \mu\text{m}$ に低減されており, 干渉補正方式の効果を確認できる.

Fig. 9 Measured effect of decoupling method

Fig. 10 Measured influence of temperature

次に、本制御方式に対するダイ温度の影響を確認するため、本体を 350°C まで加熱し、常温時の特性との比較実験を行った。結果の一例を図 10 に示す。同図 (a) は、常温時の結果であり、ch 3 に 0.6 μm のステップ状目標値を連続的に入力している。また同図 (b) は、ダイ本体を加熱した場合の結果であり、目標値は常温時と全く同様とした。(a)、(b) 両結果を比較すると、高温下では各ゾーンの変位量に 1~2 μm 程度のゆっくりした変動が見られるが、これは、4.1 項と同様の理由によるものと考えられる。ch 3 の駆動

ステップ量とその隣接ゾーンへの影響は常温時とはほぼ同等であり、高温下においても安定した駆動特性を得ることができている。

以上の結果は、全駆動軸について同様に確認されており、本駆動方式の有効性を示している。

6. 結 言

- (1) 空気圧を駆動源とし、ペローズの発生力により生ずるリップ部の弾性変形を利用した、リップ駆動機構を開発し、その基本特性を明らかにした。その結果、常温下において駆動分解能 0.67 μm 、応答時定数として 0.4 s を実現した。さらに、高温下 (320°C) においても 1 μm 程度の駆動分解能を確認でき、本方式がリップ駆動機構として実用上十分な特性を有することを確認した。
- (2) 各駆動ゾーン間の変位の相互干渉を補償する制御方式として、逆モデル演算による干渉補正方式を提案し、その効果を実験により検討した。その結果、常温下において全変位量の 1% 以下の精度で各ゾーンを独立に駆動できることを確認した。さらに、高温下での駆動結果として 0.6~1.0 μm の安定な駆動を確認でき、本制御方式の有効性を確認した。

参 考 文 献

- 1) 富田良幸：空圧微小駆動方式によるフィルム成形用ダイリップ調整機構、昭和 63 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1988) 507.
- 2) 富田良幸：空圧微小駆動方式によるフィルム成形用ダイリップ調整機構 (第 2 報)、1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1989) 649.
- 3) J. M. McKelvey and K. Ito: Uniformity of Flow from Sheet Metal Dies, Polym. Engg. Sci., **11**, (1971) 258.
- 4) 富田良幸：油圧制御による微小駆動機構、第 26 回 SICE 学術講演会予稿集 (1987) 819.
- 5) 内野研二：圧電アクチュエータ開発・応用の要点、日本工業技術センター (1986).