

かみ合い型二軸押出機内の 流れの基礎研究

James L. White*¹翻訳 金井俊孝*²

1. はじめに

本報告では、かみ合い型二軸押出機内の流動挙動解析技術の開発に関して述べたい。かみ合い型異方向回転二軸押出機は、1920年代より重要になってきており、初期にはオイル用のポンプ、そして、1950年代には硬質塩ビの異形押出用のポンプとして使用されていた。また、熱硬化性樹脂や塩ビの押出機として、1930年代後半に、初めて商品化されたかみ合い型同方向回転二軸押出機は、しばらくは際だった技術的な注目はされなかったが、1960年代にコンパウンド、脱気、反応押出を意図したモジュール型の機械が開発されるにいたった。モジュール方式かみ合い型異方向回転二軸押出機は1960年代後半に開発され、1970年代や1980年代には、モジュール型の同方向回転システムの対抗機種として著名となった。

上記のかみ合い型同方向および異方向回転二軸押出機の背景に関する簡単な解説は、この二つが基本的には、機能上たいへん似通っていることを述べている。しかし、これは事実ではなく、二つの押出機の作用機構は、全く異なっている。かみ合い型同方向回転二軸押出機は、スクリュ流路は開いており、単軸押出機に似たポンプ機構を持っている。いいかえれば、スクリュらせんまわりの前方への推進流れ機構を持っている。

かみ合い型異方向回転二軸押出機はギヤポンプ、カムポンプに似たポンプである。かみ合い型同方向回転二軸押出機のポンプ機構はスクリュ軸に沿ってC字型

流路からダイへの輸送に関係している。かみ合い型同方向および異方向回転二軸押出機の分配混合と分散混合の仕組みも異なる。これは、スクリュの異なる運動とミキシング部分の異なる性能の両方に関連している。

このセクションでは、モジュールタイプのかみ合い型同方向および異方向回転二軸押出機の流れのメカニズム、流れと混合の数学的シミュレーションの技術の開発について述べたい。

2. かみ合い型同方向回転二軸押出機

a. 技術の開発

特許情報では、かみ合い型同方向回転二軸押出機の歴史は、単軸押出機と同じくらい古く、Coignetによる1969年のMalaxator¹⁾にさかのぼる。その後の70年間、かみ合い型同方向回転二軸押出機に関する非常に多くの特許が出願されている^{2)~10)}。Eastonの1920年に特許⁶⁾の中に、かみ合い型同方向回転二軸押出機の利点が初めて明確に議論されている。かみ合い型同方向回転二軸押出機の第一の利点は、セルフクリーニング性である。そして、コークス炉や乾留用加熱容器のように、望ましくない堆積物が蓄積される所へこのような機械の適用が望まれる。

かみ合い型同方向回転二軸押出機の初の商品開発は、1937年、イタリアのTurinにあるLavorazione Materie Plastiche (LMP)社の結成に関係する¹¹⁾。企業の重鎮の一人であったRoberto Colombo^{11)~15)}は、かみ合い型同方向回転二軸押出機を塩ビや熱硬化性樹脂の押出用としてLMP社で使用するだけでなく、広く商品化されるように研究開発し、特許を出願した。LMPの最初の取引先の中に、1943年に連続重合反応用の機械としての使用を特許出願したI.G. Farbenindustriesが含まれている¹⁶⁾。LMPの操業は、1940年代初め第二次世界大戦によって停止された。

戦後、Colomboら^{13)~15)}は、かみ合い型同方向回転

*¹ アクロン大学 高分子工学センター
Institute of Polymer Engineering, University of Akron
Akron, OH 44313, U.S.A.

*² Toshitaka Kanai
出光石油化学(株)
樹脂研究所 構造物性研究室
市原市姉崎海岸 1-1 (〒299-01)
1992.7.28 受理

二軸押出機の開発を精力的に行った。ライセンス交渉が、フランスの CAFL(Creosot-Loire now Clextral), イギリスの R. H. Windsor¹⁷⁾, 日本の池貝鉄工¹⁸⁾との間で行われた。R. H. Windsor の機械は R. J. Stokes Company¹⁹⁾ を通してアメリカに販売された。

現在の同方向回転二軸押出機は、異なる過程をたどり開発された。1940年代の間、かみ合い型同方向回転二軸押出機の工業化過程の開発プログラムは、Bitterfeld 近くの I. G. Farbenindustries の Wolfen 工場で行われた。プログラムには、総リーダー K. Riess の下で W. Meskat, R. Erdmenger, A. Geberg^{20), 20), 21)} らが関わった。かみ合い型同方向回転二軸および三軸押出機の特許は、Meskat と Erdmenger^{22)~24)} によって 1943~1944 年に出願された。第二次世界大戦で、ドイツが敗れたことと、それに起因した事情のため、特許は 1952~1953 年頃まで発行されなかった。

戦後、Riess, Meskat と Erdmenger らは、現在の Bayer AG に入社した。Riess は管理職、Meskat と Erdmenger はそれぞれ Dormagen と Leverkusen の技術者として加わった。Erdmenger^{20), 25), 26)} は同方向回転ディスクのセルフワイピング性を基本とした、連続ニーディングとミキシング装置の開発に目を向けた(この中には、Nelson⁸⁾ によって一部先を越されているものもある)。初期のニーディングディスク機は、Riess と Erdmenger による報文²⁷⁾の中に書かれている。Meskat と Pawlowski²⁸⁾ は右ねじ前進ポンプスクリュと左ねじ後退ポンプスクリュエレメントを含んだモジュール方式かみ合い型二軸押出機を開発した。これは圧力分布制御の可能な改良型ミキシング機である。Meskat-Pawlowski の装置でセルロースのアセチル化への応用が Riess の 1955 年の報文²⁹⁾の中で記述されている。

その後、Erdmenger^{20), 30)} は、右、左ねじスクリュエレメントだけでなく、ニーディングディスクエレメントも含んだモジュール型同方向かみ合い型機を開発した。これにより、混練と混合の改良にめざましい進歩をもたらした。Bayer AG は化学会社やコンパウンダーに製造と販売を目的とした国際ビジネスを築いているシュツツガルトの Werner & Pfeiderer^{1), 2), 31)} に機械の独占製造権を譲った。Werner & Pfeiderer は 1957 年に最初のモジュール型の機械を製造した。現在、モジュール型同方向回転二軸押出機はドイツの Werner & Pfeiderer, Leistritz AG, Hermann Berstorff Maschinenbau Anstalt GmbH, 日本では日本製鋼所、池貝鉄工、東芝機械、三菱重工業、神戸製鋼所、アメリカでは APV Chemical Machinery と

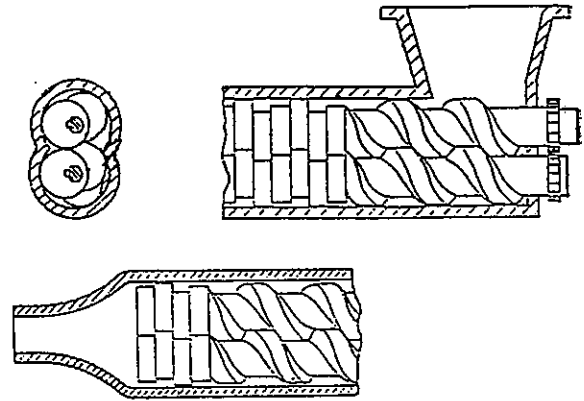


図 1 スクリュとニーディングディスクエレメントを備えたモジュール方式かみ合い型同方向回転二軸押出機

Teledyne Readco などを含む世界中の多くの会社で製造されている。

b. モジュール型の機械

現在のかみ合い型同方向回転二軸押出機(図 1)は、軸にスクリュ、ニーディングディスクやその他のミキシングのエレメントを取り付けたモジュール型の機械である。機械メーカーは一連の同方向回転二軸押出機を製造している。スクリュ径 D と軸中心線間距離 C_L の寸法の違いはあるが、その他の点では本質的な相違はない。

c. 形 状

セルフワイピング型同方向回転スクリュの形状は大変重要である。形状については、Wunshe⁴⁾, Easton^{5), 6)}, Pease¹⁰⁾ や Colombo¹²⁾ から初期の研究者によって論じられたが、大部分は明確ではない。Erdmenger²⁰⁾ は、セルフワイピング型同方向回転スクリュ断面形状を数学的に解いた A. Geberg を信頼した。1980年に Booy³²⁾ は、セルフワイピング性の数学的な公式化に関する最初の報告を行った。スクリュの外周とバレル間の距離の関数 $H(\theta)$ は、(1) 式で得られる。

$$H(\theta) = R_s(2 - \rho_c) \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\alpha}{2} \quad (1a)$$

$$H(\theta) = R_s \left[1 + \cos \left[\theta - \frac{\alpha}{z} \right] - \sqrt{\rho_c^2 - \sin^2 \left[\theta - \frac{\alpha}{z} \right]} \right] \quad \frac{\alpha}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{N} - \frac{\alpha}{2} \quad (1b)$$

$$H(\theta) = \delta_0 \quad \frac{\pi}{N} - \frac{\alpha}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{N} \quad (1c)$$

ここで、

$$\rho_c = \frac{C}{R_s} \quad \alpha = \frac{\pi}{N} - 2\delta \quad (1d)$$

N_T は、ニーディングディスクのスクリュの条数である。二次元式であり、ニーディングディスクエレメントのスクリュにも有効である。

ニーディングディスクエレメントに対して (1a~c) 式は、スクリュ軸に沿った距離 l に有効である。形状は、角度 β (スタガー角, 食い違い角) で回転し、ニーディングディスクブロック領域で、それぞれのエレメントが繰り返される。

スクリュエレメントに対し、(1a~c) 式の形状は、スクリュピッチで定義される軸まわりのらせん内で連続的に展開される。

d. 流動メカニズム

かみ合い型同方向回転二軸押出機に関して最初に発表された論文には、Riess-Meskat²¹⁾, Riess-Erdmenger²⁷⁾, Erdmenger^{33,34)} の報文が含まれている。Erdmenger³⁴⁾ は実験的考察を述べ、流動メカニズムを提案した。彼は、流れは 8 の字状の動きで、スクリュのまわりを進み、スクリュ流路が開放されていることを示した。

ニーディングディスク領域における流動メカニズムは、Erdmenger の特許^{25),26)} や、1964 年の彼の報文³⁴⁾ の中で初めて論じられた。近年、メカニズムは Werner^{35,36)}, Szydlowski ら^{37)~39)} によって研究されている。スタガーニーディングディスクは、ニーディングディスクが右まわりに施回するとき、スクリュのような形状となり、前向き推進流れで動く。さらに、ニーディングディスクのチップを通る後方への漏洩流れや蠕動ポンプの運動がある。

モジュール型機の流れの特徴は、まず初めに Armstroff と Zettler⁴⁰⁾ により、その後 Werner³⁵⁾ や White ら^{41)~43)} によって記載されている。飢餓供給条件下でのモジュール型同方向回転二軸押出機は、完全充満領域と飢餓領域の両方を有することが実験的に観察されている。これは、スクリュ軸に沿った異なったエレメントのポンプ能力とダイ圧力や押出量とが調和した結果である。

e. 完全充満スクリュエレメント内の流動シミュレーション

スクリュ内の流れは、一般的にスクリュ形状を平面化し、直交座標系で解析し計算することにより予測することができる。この手法は単軸押出機に関する初期の解析以来行われている方法であり、同方向回転二軸押出機に関する同様に扱われている。すべての著者は、スクリュフライトの中心に埋め込まれた座標系を利用する慣例にしたがっている。スクリュ流路に沿った方向を“1”，スクリュ軸およびパレルに対して垂直な方向を“2”，流れに垂直な方向を“3”として座標系を取る。

もし、“2”方向だけにせん断を考慮すると圧力 p に対して σ_{11} および σ_{33} の変化分を取ると運動方程

式は次式のように表せる。

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} \quad (2a)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} \quad (2b)$$

境界条件は、

$$v(0) = 0 \quad v_1(H) = U_1 \quad (3a)$$

$$v_3(0) = 0 \quad v_3(H) = U_3 \quad (3b)$$

ただし、 H はスクリュ溝深さであり、パレル壁面に沿って変化する。

ここで、 $H(x_3)$ は (1) 式のセルフワイピングのスクリュ溝深さ分布に従うとする。

スクリュエレメント内のニュートン流体とした流れのシミュレーションは Herrmann と Burkhardt⁴⁹⁾, Denson と Huang⁵⁰⁾ および Szydlowski と White⁵¹⁾ らによって行われた。Kalyon ら⁵¹⁾⁵²⁾ は曲率およびかみ合い部分の効果を考慮した有限要素法を用いたシミュレーションの結果を報告した。

スクリュエレメント内の非ニュートン流体シミュレーションは 1989~1991 年に Lai-Fook ら^{54),55)}, 1989 年に Wang と White^{42),56)}, 1990 年に Potente ら⁵⁷⁾, そして翌年には、Chen と White⁵⁸⁾ らによる報文の中で報告されている。異なったアプローチがこれらの研究者によって行われている。スクリュの特性カーブは吐出量 Q と圧力 Δp 上昇を関係づけて計算されている。非ニュートン性の増大 (n の減少) はポンピング能力を減少させることを示している。これは良く知られた結果であり、単軸押出機内でも観察されている。高せん断速度での圧力流れは、換算粘度に関係し、より大きな量の後進流れを生じさせる。Lai-Fook ら^{54),55)}, Wang と White⁵⁶⁾ は、有限要素法による解析を報告し、前者らは依存性 $v_1(x_2, x_3)$ の考慮、後者の著者は $v_2(x_2, x_3)$ および $v_3(x_2, x_3)$ を考慮している。さらに最近では Vergnes と Agassant⁵⁹⁾ が有限要素法による解析結果を報告した。

Chen と White⁵⁸⁾ は、デザイン変更した場合のスクリュエレメントに対するスクリュポンピングの特性について報告している。彼らはスクリュ径 D に対する軸中心間距離 C_L の比の影響について考慮した。

すなわち、

$$\begin{aligned} \rho_c &= \frac{C_L}{R} = \frac{2R-H}{R} \\ &= 2 - \left[\frac{H}{R} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 H は最大流路溝を表す。 C_L および ρ_c の減少は H の増加と等価である。様々な ρ_c の値でのモジュール型同方向回転スクリュ押出機のスクリュ特性曲線が決定された。小さな ρ_c , すなわち大きな流路溝

深さのスクリュは、大きな推進能力を有し、らせん角の大きな値は大きなポンプ能力を示す。

f. ニーディングディスク内の流れのシミュレーション

ニーディングディスク領域内の流れは、最初に Erdmenger^{25),26),34)} によって検討された。よりわかりやすい研究が H. Werner³⁵⁾ による 1976 年の博士論文の中で報告され、続いて Szydowski ら^{37),38)} により報告されている。Szydowski らは最初の報文中で、修正 FAN 法によるシミュレーションを行っている。ここで方向“1”はスクリュ軸に平行、方向“3”を円周方向に取っている。方向“2”はスクリュの谷底に対して垂直に取っている。彼らは、ニーディングディスク領域内の圧力、流量を計算している。

ニーディングディスク領域内の流量はスクリュ軸に平行な前進流れ Q_L 、円周方向流れ Q_c 、およびスタガー（食い違い配置）ニーディングディスクのチップ間の後進流れ Q_b で表現される。各流れの流量比率は次式の分率から決定される。

$$f_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_c + Q_b} \quad (5a)$$

$$f_c = \frac{Q_c}{Q_L + Q_c + Q_b} \quad (5b)$$

$$f_b = \frac{Q_b}{Q_L + Q_c + Q_b} \quad (5c)$$

一般に、流体の約 65~80% は軸方向に前進する動きをし、またスタガー角に依存するが、10~35% は後方に漏れる。約 1~2% はニーディングディスクチップからオーバーフローする。スタガー角 β が 60° のとき、最大の後進流れとなる。Szydowski と White³⁹⁾ および Wang ら⁴²⁾ は指数法則流体を用いて計算した。非ニュートン指数法則流体では、指数法則の指数が減少するに従い、後進漏洩流量分率 f_b が増加し、前進流分率 f_L が減少する。

Szydowski と White³⁹⁾ はニーディングディスクブロック内で蠕動ポンプの動きがあることを指摘した。このことは Werner & Pfeiderer GmbH によって報告された流れの可視化実験の観察によって示唆されている。これらの動きは著者らによってモデル化され、スクリュ回転の周期によって生じる脈動を予測している。

Kalyon ら^{60),61)} や Manas Zloczower ら⁶²⁾ は、ニーディングディスク領域内の三次元流れの有限要素法シミュレーション結果を報告し、三次元速度場での比較がなされた。しかしながら、彼らはそれより以前の Werner³⁵⁾、Szydowski ら^{37)~39)}、Wang ら⁴²⁾ の研究以上の価値ある情報を与える結果には至っていない。

ニーディングディスクエレメントの平均ポンピング

能力を表す $Q-\Delta p-N$ スクリュ特性プロットを計算するために、この章の流動解析を利用することができる。指数法則のべき指数 n の減少によって特徴づけられる非ニュートン性の増大はポンピング能力を減少させる。

g. モジュール型二軸押出機のシミュレーション

モジュール型同方向回転二軸押出機内の流れは、White と Szydowski⁴¹⁾、Wang ら⁴²⁾、White ら⁴³⁾ によって予測計算されてきた。彼らのシミュレーションの第一の目的は、圧力分布とともに充満および未充満の押出機内の領域を予測することである。

用いた論理は次のようである。モジュール型同方向回転二軸押出機は一般に定量フィードで操作される。二軸押出機の吐出量は既知である。もし、ダイ特性がわかっているとすると、スクリュ先端の圧力は既知である。そこで、計算したスクリュ特性曲線を利用し、スクリュ長さに沿って後方へと圧力損失の計算を行う。通常、スクリュ先端における圧力は高くなく、スクリュに沿う計算圧力はすぐに 0 になる。これは、飢餓領域のはじまりである。スクリュ特性曲線に関する 2 つの一般的な手法を示す。

$$Q = AN - B(\Delta p) \quad (6a)$$

および、

$$Q = \phi AN \quad (6b)$$

ここで ϕ は充満度である。(6a) 式は充満スクリュ、(6b) 式は飢餓スクリュに対する式である。圧力のある領域においては、(6a) 式を適用する。しかし、圧力が大気圧まで下がった場合には (6b) 式を使用する。 Q が (6b) 式で表されているかぎり、飢餓特性は保持される。このことは、(6b) 式の中の係数 A が負である左ねじスクリュエレメントには成立しない。 A が非常に小さいあるニーディングブロックの組み合わせでも成立しない。このようなタイプのエレメントは充満し、負の圧力勾配ができる。(6a) 式は圧力上昇の計算に利用される。(6a) 式を次のスクリュエレメントに応用し、モジュール型スクリュに沿って後方へと計算を進めていく。モジュール型同方向回転二軸押出機のスクリュ軸に沿う圧力分布および飢餓状態の予測はアクロン大学の著者らや Paderborn 大学の Potente らにより行われ、コンピュータープログラムの開発がなされた。

かみ合い型異方向回転二軸押出機

a. 技術開発

かみ合い型異方向回転二軸押出機は古い技術であり、少なくとも 19 世紀後半にさかのぼる。スクリュ流路は開いておらず、かみ合い型のフライトとスクリュにより閉じられているため、かみ合い型同方向回転二軸

スクリュ押出機や単軸スクリュ押出機と異なる押出技術であることを考えておくべき必要がある。流れは閉じられた輸送C字型流路内で閉じ込められながら供給口からダイへ前進する。完全かみ合い型二軸押出機は推進流れのメカニズムで機能する単軸押出機というより、むしろギヤポンプに類似している。1874年のWiegand⁶³⁾の初期特許やK. Werner^{64),65)}やHoldaway⁶⁶⁾による今世紀の特許はこのことを示唆している。Holdawayの特許に記載された図には厚いスクリュフライドで、完全かみ合い型の同じ寸法をもつ流路を示している(図2)。かみ合い型異方向回転二軸スクリュ押出機の最初の商品化は1920年代であり、これらの機械は潤滑油などの中粘性流体用のポンプとして使用されていた。初期の製造メーカーは、NurembergのMaschinenfabrik Paul Leistritz^{67),68)}であった。

開発の第二世代は1930年代であり、I. G. Farbenindustriesは、懸濁液や合成ゴムなどの材料のポンピングと練る作用を行うニーディングポンプを開発することの必要性を実感している。そして、フランクフルトのI. G. Farbenindustries EngineersとNurembergのMaschinenfabrik Paul Leistritz間でジョイントプログラムが設立された。I. G. Farbenindustriesチームは潤滑油エンジニアとして定評のあるS. Kiesskalt^{69),70)}がリーダーとなり、LeistritzチームはP. Leistritz, F. Burghauserによってリードされた。ニーディングポンプの二つの異なったデザインはこのプログラムの中で開発され、一つはKiesskaltと共同研究者⁷¹⁾により、そしてもう一つはP. LeistritzとF. Burghauser⁷²⁾によって開発された。Kiesskaltらのポンプはフライド厚みは初め小さく、徐々に大きくなっており、輸送体積は軸に沿って減少する。Leistritz-Burghauserのデザインは、完全かみ合い型であり、C字型流路体積が押出方向の軸に沿って減少する。ニーディングポンプの内容はKiesskalt^{73)~75)}, RiessとMeskat²¹⁾, RiessとErdmenger²⁷⁾, そしてさらに最近ではHerrmann¹⁾やWhite²⁾らの報文の中にまとめられている。

戦後、I. G. Farbenindustries-Leistritzのジョイントプログラムは終了した。しかし、この時まででLeistritzは他への応用、つまり狭い滞留時間分布の利点とセルフクリーニング性が有用とされる塩ビ押出などの応用に二軸押出機をデザインしている。

第二次世界大戦後に多くの企業、特にドイツ、オーストリアやルクセンブルグ(Schenkel⁷⁶⁾やWhite²⁾の報文参照)の企業が塩ビ用のスクリュポンプとしてモジュール方式かみ合い型異方向回転二軸押出機を開発した。この事業は、Battenfeld, Berhardt Ide, Hans Weber, ReifenhäuserとCincinnati Milacronなどの企業で現在も受け継がれている。

最近のモジュール方式かみ合い型異方向回転二軸押出機は、1960年代後半にLeistritzのH. Tennerによって開発された。この押出機は、スクリュポンプエレメントやKiesskaltらのニーディングエレメントを含む特殊なミキシングエレメントを備えている。Leistritzの機械はThieleら^{77)~79)}の報文の中に述べられている。

第二のモジュール型かみ合い型異方向回転二軸押出機は日本製鋼所によって開発された。これは、ニーディングディスクエレメント同様のスクリュポンプを備えており、KiesskaltらやLeistritzによって使用された特殊ミキシングエレメントとは異なっている。この機械は酒井ら^{80),81)}の報文の中に記載されている。

b. 流動メカニズム

異方向回転完全かみ合い型スクリュのポンピング機構は長い間エンジニアの重要な検討項目である。充滿したC字型流路の前進ポンピングであることが暗に意味されており、19世紀および第一次世界大戦前の特許の中で、すでに良く解釈されているように思われる。この機構は、Wiegand⁶³⁾による1874年の特許出願の中に記載されている。この考え方はまたHoldaway⁶⁶⁾による1915年の特許出願の中に明確に記載されている。

1927年、Kiesskaltの報文⁶⁹⁾の中にはかみ合い型二軸スクリュポンプの前進ポンピング容量を次のように表している。

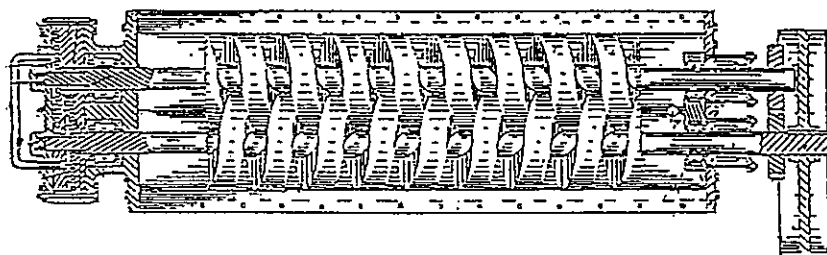


図2 Holdawayのかみ合い型異方向回転二軸押出機

$$Q = NV_c - Q_{\text{leak}} \quad (7)$$

ここで V_c は全C字型流路容積, Q_{leak} は後方への漏洩流れを表す。

公開された文献の中で, 熱可塑性樹脂用かみ合い型異方向回転多軸スクリュ-押出機の最初の報告は Schenkel⁷⁶⁾ によるものであり, 彼は次のように表している。

$$Q = mNV_c \quad (8)$$

ここで Q は吐出量, m はスクリュの数, N はスクリュ回転数, V_c はスクリュ当たりのC字型流路容積である。流路の容積は Schenkel⁷⁶⁾ によって計算されている。Leistritz の Doboczky^{82), 83)} は二軸スクリュに対して次式で表している。

$$Q = 2iNV_c \quad (9)$$

ここで i は平行なフライトの数である。

二軸スクリュ-押出機モデルを平面化すると, V_c を次のように見積ることができる。

$$V_c = HWL_c \quad (10)$$

ここで L_c はC字型流路の長さである。 L_c の値はスクリュ径とらせん角のピッチに関係する。他のスクリュと交差する点間のスクリュ流路まわりの移動距離は次式となる。

$$L_c = \frac{\pi D}{\cos \phi} \quad (11a)$$

ここで, V_c は近似的に次式で表せる。

$$V_c = \frac{\pi DHW}{\cos \phi} \quad (11b)$$

c. 完全充滿流路内の流れのシミュレーション

C字型流路内の流体は停滞していると考えべきではなく, スクリュとパレルの相対運動により引き起こされた循環流れが生じる。C字型流路内の流体は流路の後方と前方において動く壁によっても束縛される。C字型流路内の流れパターンは, Kim, Skatschkow や Jewmenow⁸⁴⁾, Klenk^{85), 86)}, Janssenら⁸⁷⁾, さらに最近では White や Adewale^{90), 91)} によりモデル化されている。ここで示すモデルはスクリュ流路に沿った速度成分のみを考慮している。速度場を規定する運動方程式はスクリュとパレル間のせん断を考慮している。もし, せん断に対するスクリュフライトの寄与を無視すると, 運動方程式は次のようになる。

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} \quad (12a)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} \quad (12b)$$

境界条件は,

$$v_1(0) = -U_N \quad v_1(H) = U_1 - U_N \quad 0 = \int_0^H v_1 dx_2 \quad (13a)$$

$$v_3(0) = 0 \quad v_3(H) = U_3 \quad 0 = \int_0^H v_3 dx_2 \quad (13b)$$

ここで U_N はC字型流路内の相対的位置が変化しない場合のスクリュチャンネルに沿って前進する座標系での速度である。すなわち,

$$U_N = \frac{\pi DN}{\cos \phi} \quad (14)$$

上記の解析の主な結果はC字型流路内に循環流れがあり, '1' と '3' 方向の両方の圧力勾配が負であることを示している。これは最大圧力がC字型流路の背後にあり, 前端フライトに沿ったところに存在することを意味する。

d. かみ合い型スクリュエレメントの漏洩流れのシミュレーション

かみ合い型二軸スクリュポンプ内の漏れとその意味は少なくとも Kiesskalt⁶⁹⁾ 以来, 長い間理解されてきた。後に, Leistritz の Doboczky^{82), 83)} により, 1965年に, 最近の二軸スクリュ押出機への応用の中で明確に指摘している。Doboczky はこれらを次のように記述した。

$$Q = Q_c - Q_{cL} - Q_{pL} - Q_{FL} \quad (15)$$

ここで, Q_{cL} , Q_{pL} と Q_{FL} はそれぞれ異なる漏洩流れを表している。これらの漏洩流れは Doboczky により 'Flankenschleppstrom (スクリュ間のカレンダー漏洩流れ)', 'Druckstrom zwischen den Flanken (圧力漏洩流れ)' と 'Leckstrom über die Schneckenstege (フライト漏洩流れ)' として記述されている。かみ合い型異方向回転二軸スクリュ押出機内の漏洩流れに関する問題は引き続き Janssen ら^{87)~91)}, White と Adewale^{92), 93)} によって検討されている。一般には次のように考えられる。

$$Q_{cL} > Q_{pL} > Q_{FL} \quad (16)$$

すなわち, カレンダー漏洩流れが最も大きく, スクリュフライトの漏洩流れが最も少ない。しかし, これは詳細なスクリュディメンジョンに依存する。

Doboczky⁸²⁾, Janssen ら^{87)~91)} および White や Adewale^{92), 93)} はそれぞれの漏洩流れ Q_{cL} , Q_{pL} , Q_{FL} に対する方程式を導いた。これらはすべてニュートン流体の潤滑油近似であり, 次のように表現される。

$$Q_{cL} = \pi h W H N \cos \phi - \frac{h^3 W}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial x_1} \quad (17)$$

ここで, h はクリアランスを表す。

$\partial p / \partial x_1$ を決定するために, $p(x_1)$ に対して (17) 式を解かなければならないが, これは Janssen らやその後の研究者により議論されている。

e. 特殊ミキシングエレメント

モジュール型二軸押出機のミキシングの流動メカニ

ズムは上記の完全かみ合い型スクリュとかなり異なった特殊なエレメントによって支配されるので、上記の式は、かなり簡略化されたものである。

Leistritz のモジュール型二軸押出機の中には Kies-skalt のエレメントを含んだ特殊ミキシングエレメントとポンピング能力のない他の特殊ミキシングセクションが導入されている。これらのエレメントのどちらにも流れのシミュレーションはない。日本製鋼所のモジュール型二軸スクリュ押出機はモジュール方式のかみ合い型同方向回転二軸押出機で見られるようなネーディングディスクブロックを備えている。これらのエレメントで異方向回転の形状と関係づける流れのシミュレーション技術はまだない。

f. モジュール型の押出機

モジュール型のかみ合い型異方向回転二軸押出機の作用に関する研究について述べてきた。モジュール型の同方向回転二軸押出機のような機械は、ダイの近くに充満領域を有する飢餓供給機である。同方向回転機の場合、流速と圧力は機械の軸に沿って、連続でなければならない。しかしながら、モジュール型の異方向回転機に対する圧力や充満率分布のシミュレーション技術は存在していない。ポンピング能力のないミキシングエレメントは、完全充満状態であり、また隣合ったすぐ前のスクリュエレメントの充満度を上げる効果のあることを考慮しておかなければならない。

g. スクリューのたわみ

カレンダー間隙の漏洩流れにより、かなりの圧力が生じ、2つのスクリュを引き離す傾向があることは以前から知られていた。近ごろ、AdewaleとWhite⁹³⁾は、スクリュのたわみ度合いと成形条件とを関係づける式を導いている。

参 考 文 献

- 1) Herrmann, H.: *Schneckenmaschinen in der Verfahrenstechnik*, Springer, Berlin (1972)
- 2) White, J. L.: *Twin Screw Extrusion: Technology and Principles*, Hanser, Munich (1991)
- 3) Coignet, F.: U. S. Patent 93,035 (1869)
- 4) Wunsche, A.: German Patent 131,392 (1901)
- 5) Easton, R. W.: British Patent (filed Spet. 25, 1916) 109,663 (1917)
- 6) Easton, R. W.: U. S. Patent (filed June 2, 1920) 1,468,379 (1923)
- 7) LaCasse, H.: U. S. Patent (filed August 25, 1919) 1,356,296 (1920)
- 8) Nelson, W. K.: U. S. Patent (filed June 4, 1931) 1,868,671 (1932)
- 9) Baur and Cie: German Patent (filed May 6, 1933) 617,432 (1935)
- 10) Pease, F. F.: U. S. Patent (filed August 17, 1933) 2,048,286 (1936)
- 11) Anonymous: *LMP and Polytal, The Extrusion Specialist*, Polytal and LMP, Turin (1986) (distributed at Dusseldorf K 86 Show)
- 12) Colombo, R.: Italian Patent (filed Feb. 6, 1939) 370,578 (1939); Swiss Patent (filed Jan. 3, 1941) 220,550 (1942)
- 13) Colombo, R.: British Patent (filed May 2, 1946) 629,109 (1949)
- 14) Colombo, R.: U. S. Patent (filed August 7, 1947) 2,563,396 (1951)
- 15) Colombo, R.: Canadian Patent (filed Dec. 27, 1949) 517,911 (1955)
- 16) Anonymous: German Patent (filed July 24, 1943) 895,058 (1953)
- 17) Baigent, K.: *Trans. Plastics Inst.* (Apr) 34 (1956)
- 18) Anonymous: *Introduction to Plastics Machinery*, Ikegai Corporation (distributed at 1988 Osaka Japan Plas.)
- 19) Greenwood, S. H.: *Rubber World*, 129, 73 (1953)
- 20) Erdmenger, R.: *Schneckenmaschinen für die Hochviskos-Verfahrenstechnik*, Bayer AG, Leverkusen (1978)
- 21) Riess, K. and Meskat, W.: *Chem. Ing. Tech.*, 23, 205 (1951)
- 22) Meskat, W.: German Patent (filed Oct. 17, 1943) 852,203 (1952)
- 23) Meskat, W. and Erdmenger, R.: German Patent (filed July 7, 1944) 862,668 (1953)
- 24) Meskat, W. and Erdmenger, R.: German Patent (filed July 28, 1944) 872,732 (1953)
- 25) Erdmenger, R.: German Patent (filed Sept. 24, 1949) 815,641 (1951); U. S. Patent (filed Sept. 20, 1950) 2,670,188 (1954)
- 26) Erdmenger, R.: German Patent (filed July 28, 1953) 940,109 (1956); U. S. Patent (filed July 27, 1954) 2,814,472 (1957)
- 27) Riess, K. and Erdmenger, R.: *VDI Zeitschr.*, 93, 633 (1951)
- 28) Meskat, W. and Pawlowski, J.: German patent (filed Dec 10, 1950) 949,162 (1956)
- 29) Riess, K.: *Chem. Ing. Tech.*, 27, 457 (1955)
- 30) Erdmenger, R.: U. S. Patent (filed Aug., 17, 1959) 3,122,356 (1964)
- 31) Fritsch, R. and Fahr, G.: *Kunststoffe*, 49, 543 (1959)
- 32) Booy, M. L.: *Polym. Eng. Sci.*, 20, 1220 (1980)
- 33) Erdmenger, R.: *Chem. Ing. Tech.*, 34, 751 (1962)
- 34) Erdmenger, R.: *Chem. Ing. Tech.*, 36, 175 (1964)
- 35) Werner, H.: Dr. Ing Dissertation, University of Munich (1976)
- 36) Werner, H. and Eise, K.: *SPE ANTEC Tech. Papers*, 25, 181 (1979)
- 37) Szydowski, W., Brzoskowski, R. and White,

- J. L.: *Int. Polym. Process.*, 1, 207 (1987)
- 38) Szydlowski, W. and White, J. L.: *Int. Polym. Process.*, 2, 142 (1988)
- 39) Szydlowski, W. and White, J. L.: *J. NonNewt. Fluid Mech.*, 28, 29 (1988)
- 40) Armstropp, O. and Zettler, H. D.: *Kunststofftechnik*, 12, 240 (1970)
- 41) White, J. L. and Szydlowski, W.: *Adv. Polym. Technol.*, 7, 419 (1987)
- 42) Wang, Y., White, J. L. and Szydlowski, W.: *Int. Polym. Process.*, 4, 262 (1989)
- 43) White, J. L., Montes, S. and Kim, J. K.: *Kautschuk Gummi Kunstst.*, 43, 20 (1990)
- 44) Anonymous: *Engineering*, 114, 606 (1922)
- 45) Rowell, H. S. and Finlayson, O.: *Engineering*, 126, 249 (1928)
- 46) Carley, J. F., Mallouk, R. S. and McKelvey, J. M.: *Ind. Eng. Chem.*, 45, 974 (1953)
- 47) Meskat, W.: *Kunststoffe*, 45, 87 (1955)
- 48) Paton, J. B., Squires, P. H., Darnell, W. H., Cash, F. M. and Carley, J. F.: *Processing of Thermoplastic Materials* edited by E. C. Bernharot, Reinhold, NY (1959)
- 49) Herrmann, H. and Burkhardt, U.: in the 5th Leobener *Kunststoffkollquim Doppelschnecken-Extruder*, p.11, Lorenz Verlag, Vienna (1978)
- 50) Denson, C. D. and Hwang, B. K.: *Polym. Eng. Sci.*, 20, 1220 (1980)
- 51) Szydlowski, W. and White, J. L.: *Adv. Polym. Technol.*, 7, 177 (1987)
- 52) Kalyon, D. M., Gotsis, A. D., Gogos, C. G. and Tsenoglou, C.: *SPE ANTEC Tech. Papers*, 34, 64 (1988)
- 53) Kalyon, D. M., Gotsis, A. D., Imazer, V. Y., Gogos, C. G., Sangani, H., Apal, B. and Tsenoglou, C.: *Adv. Polym. Technol.*, 8, 337 (1988)
- 54) Lai Fook, R., Senouci, A., Smith, A. C. and Isherwood, D. P.: *Polym. Eng. Sci.*, 29, 433 (1989)
- 55) Lai Fook, R., Li, Y. and Smith, A. C.: *Polym. Eng. Sci.*, 31, 1157 (1991)
- 56) Wang, Y. and White, J. L.: *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 32, 1989
- 57) Potente, H., Ansahl, J. and Wittemeier, R.: *Intern. Polym. Process.*, 5, 208 (1990)
- 58) Chen, Z. and White, J. L.: *Intern. Polym. Process.*, 6, 304 (1991)
- 59) Vergnes, B. and Agassant, J. F.: *Paper presented at Annual Polymer Processing Society Meeting*, New Delhi, India, March (1992)
- 60) Gotsis, A. D. and Kalyon, D. M.: *SPE ANTEC Tech. Papers*, 35, 44 (1989)
- 61) Gotsis, A. D., Z. Ji and Kalyon, D. M.: *SPE ANTEC Tech. Papers*, 36, 139 (1990)
- 62) Manas-Zloczower, I.: *Paper presented at Annual Polymer Processing Society Meeting*, Hamilton, Ontario, April (1991)
- 63) Wiegand, S. L.: U. S. Patent (filed April 28, 1874) 155,602 (1874)
- 64) Werner, K.: German Patent (filed July 12, 1912) 281,104 (1914)
- 65) Werner, K.: German Patent (filed Jan. 18, 1917) 317,981 (1920)
- 66) Holdaway, W. S.: U. S. Patent (filed June 2, 1915) 1,218,602 (1917)
- 67) Leistritz, P. and Burghauser, F.: German Patent (filed April 24, 1926) 453,727 (1927)
- 68) Plachenka, H.: *Leistritz Schaubenspindelumpfen aus Nuremburg*, Leistritz, Nuremburg (1965)
- 69) Kiesskalt, S.: *VDI Zeitschr.*, 11, 453 (1927)
- 70) Kiesskalt, S.: *VDI Zeitschr.*, 13, 1502 (1929)
- 71) Kiesskalt, S., Tampke, H., Winnacker, F. and Weingaertner, E.: German Patent (filed July 26, 1935) 652,996 (1937)
- 72) Leistritz, P. and Burghauser, F.: German Patent (filed Dec. 1, 1935) 682,787 (1939)
- 73) Kiesskalt, S.: *VDI Zeitschr.*, 86, 752 (1942)
- 74) Kiesskalt, S.: *VDI Zeitschr.*, 92, 551 (1950)
- 75) Kiesskalt, S.: *Kunststoffe*, 41, 414 (1951)
- 76) Schenkel, G.: *Kunststoffe Extrudertechnik*, Hanser Verlag, Munich (1963)
- 77) Thiele, W.: *SPE Antec Tech. Papers*, 40, 127 (1983)
- 78) Thiele, W., Petrozelli, W. and Lorenc, D.: *SPE Antec Tech. Papers*, 36, 120 (1990)
- 79) Thiele, W., Petrozelli, W. and Martin, C.: *SPE Antec Tech. Papers*, 37, 1849 (1991)
- 80) Sakai, T. and Hashimoto, N.: *SPE ANTEC Tech. Papers*, 32, 360 (1986)
- 81) Sakai, T., Hashimoto, N. and Kobayashi, N.: *SPE ANTEC Tech. Papers*, 33, 146 (1987)
- 82) Doboczky, Z.: *Plastverarbeiter*, 16, 58 (1965)
- 83) Doboczky, Z.: *Plastverarbeiter*, 16, 395 (1965)
- 84) Kim, W. S., Skatschkow, W. W. and Jewmenow, S. D.: *Plaste u Kautschuk*, 20, 696 (1973)
- 85) Klenk, K-P.: *Plastverarbeiter*, 22, 105 (1971/2)
- 86) Klenk, K-P.: *Plastverarbeiter*, 22, 189 (1971/2)
- 87) Janssen, L. P. B. M., Mulders, L. P. H. R. M. and Smith, J. M.: *Plast. Polym.*, 43, 93 (1975)
- 88) Janssen, L. P. B. M., Pelgrom, J. J. and Smith, J. M.: *Kunststoffe*, 66, 724 (1976)
- 89) Janssen, L. P. B. M. and Smith, J. M.: *Plastics and Rubber Proc.*, 44, 90 (1976)
- 90) Janssen, L. P. B. M.: *Twin Screw Extrusion*, Elsevier Amsterdam (1978)
- 91) Speur, J. A., Mavridis, H., Vlachopoulos, J. and Janssen, L. P. B. M.: *Adv. Polym. Tech.*, 7, 39 (1987)
- 92) White, J. L. and Adewale, A.: *Int. Polym. Process.* (in press)
- 93) Adewale, A. and White, J. L.: *SPE Antec Tech. Papers*, 38, 717 (1991)