

二軸スクリュ押出機 TEX における新分野対応

Twin Screw Extruder “TEX” in a Wide Variety of New Processes

木村 嘉隆
Yoshitaka Kimura佐賀 大吾
Daigo Saga東定 誠
Makoto Tojo藤田 康文
Yasufumi Fujita村中 航平
Kouhei Muranaka

要 旨

二軸スクリュ押出機は主にプラスチックの溶融混練用途として開発され、プラスチック製造プロセスの開発及びプロセスの改良が盛んに行われる中大きく発展してきた。スクリュ回転速度やバレル設定温度のような運転条件を自由に変更できるといった二軸スクリュ押出機の持つ高いフレキシビリティと優れた混練性能により、近年はプラスチックの溶融混練用途だけに留まらず、界面活性剤系添加剤の反応・脱揮濃縮といった化学反応を伴う新プロセスへの適用が進んでいる。ここでは、従来のバッチミキサを用いた製造プロセスとの比較において、二軸スクリュ押出機の特徴を活かした新混練プロセスを紹介する。

— Synopsis —

The twin screw extruders “TEX” have been originally developed for plastics compounding and they have been significantly improved along with active demands for further development and rationalization in the plastics manufacturing processes. Because of the high flexibility such as the changeable operation conditions, and excellent mixing function, TEX series have been increasingly applied to a wide variety of new processes including reaction and devolatilization with concentration of surfactant additives.

We introduce as below the new mixing processes with the advantages of TEX in comparison with conventional processes using batch mixers.

1. 緒 言

二軸スクリュ押出機 TEX シリーズは 1978 (昭和 53) 年に開発が始まって以来、主にプラスチックの溶融混練用途として使用されている。様々な樹脂メーカー、コンパウンドにおいてプラスチック製造プロセスの開発及びプロセスの改良が盛んに行われる中、この TEX を使用するプロセスはその適用範囲を大きく拡大し、現在は、コンパウンド、ポリマーアロイ、脱揮、脱水、反応と多くの分野で使用されている。近年はこれらの分野のみならず、新たに、従来二軸スクリュ押

出機が使用されていなかった分野での TEX 適用の事例が増えている。例えば、従来反応釜によりバッチ処理で行われていた界面活性剤系添加剤の反応、脱揮プロセスなどを TEX を用いた連続プロセスとするなどの例がある。さらに、従来はインテンシブミキサやロールミキサを使用して混練していたプロセスも、TEX を使用した連続プロセスへと変換されるようになった。ここでは、従来のバッチミキサを用いた製造プロセスを TEX の特徴をどのように生かして新混練プロセスへ変換したかを紹介する。

2. 二軸スクリュ押出機 TEX の変遷

当社の二軸スクリュ押出機 TEX シリーズは 1978 (昭和 53) 年に開発がスタートし、プロト機としての嚙合型異方向回転方式 TEX65 (スクリュ外径 65mm) がその第一号機となった。写真 1 に当時の初期型 TEX65 の外観を示す。



写真 1 初期型 TEX65

TEX シリーズは当初コンパウンドを主用途として開発されたが、次第に様々な用途で使用され始め、1984 (昭和 59) 年に溶液法 L-LDPE の脱揮プラント向けに脱揮用 TEX305S を納入した (写真 2)。さらに TEX シリー



写真 2 脱揮用 TEX305S

ズは表 1 に示されるよう現在では第 9 世代へと進化し、2011 (平成 23) 年に数々の新しい設計製造技術を導入した TEX- α III が開発された⁽¹⁾。

第 9 世代となる TEX- α III が開発され、TEX シリーズが世界最高レベルのトルクを持ったことで、さらにエンジニアプラスチックやスーパーエンジニアプラスチックコンパウンドの分野で用いられるようになった。また自動車部材に多く使用されている TPV のような高機能エラストマのコンパウンドにおいても TEX シリーズの適用数が飛躍的に伸びている。そのため、これまで二軸スクリュ押出機にて生産されていなかったプラスチック及びプラスチック以外の新規原料分野への参入を試みている。

これは、現在バッチ(非連続)式ミキサにて生産されている製品を二軸スクリュ押出機で連続生産する方式に転換する技術である。従来のバッチミキサでは滞留時間をいくらでも長くできるといった特徴から、十分な反応もしくは混練を得ることが可能である反面、長い滞留時間が必要なため生産性が悪く、また原料を手投入する際の原料の飛散や原料を手作業で排出する等の作業環境の悪さなどが課題とされている。一方、二軸スクリュ押出機の場合連続式プロセスとなり、生産性の向上、作業環境の改善をはかることが出来る。一方、バッチミキサに比べると滞留時間が短いため十分な反応が行えない懸念はあるが、スクリュ形状、バレル構成やバレル温度の最適化により、課題を克服し反応性を改善することが可能となっている。図 1 にミキサによるバッチ方式と二軸スクリュ押出機 TEX を使用した連続方式とのプロセスの違いを示す。

表 1 TEX シリーズ変遷

世代・形式	第1世代 S	第2世代 SS	第3世代 C	第4世代 HCT	第5世代 XCT	第6世代 α	第7~8世代 α II (i-TEX)	新シリーズ α III
西暦年	1979-1984	1985	1986	1987-1989	1990-1993	1994-1995	1996-2011	2012-現在
減速機	異方向回転	同異切替式	同方向回転	同方向回転 HIGHトルク	同方向回転 SUPERトルク	同方向回転 SUPER HIGHトルク	同方向回転 ULTRA HIGHトルク HIGHスピード	同方向回転 ULTRA HIGHトルク HIGHスピード
スクリュ	1本物ネジ継ぎ	浅溝2・3条 セグメント 6角軸	浅溝2・3条 セグメント 6角軸	深溝2条 セグメント 6角軸	超深溝2条 セグメント 6角軸	超深溝2条 セグメント インボリュート軸	超深溝2条 セグメント インボリュート軸	超超深溝2条 セグメント インボリュート軸
シリンダ	ランダム・ロング	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック	ブロック NIC(オプション)	ブロック NIC(オプション)	ブロック NIC(オプション)
制御	-	-	-	-	-	EXANET 重量式フィーダー	EXANET 重量式フィーダー NET100	EXANET 重量式フィーダー NET100
TEX65トルク(N・m) (増加率)	1911 (100)	2489 (130)	2489 (130)	3185 (167)	3499 (183)	4018 (210)	4803 (251)	6741 (353)

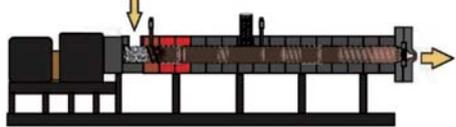
	低粘度原料用ミキサー	高粘度原料用ミキサー	幅広い粘度の原料 に対応可能	原料の粘度差、粘度 変化にも対応可能
				
	パドル式ブレンダー	加圧ニーダー	二軸スクリュ押出機	
低粘度原料 50mPa·s(cP)	◎ 乱流を生かした良好な混合 ブレンド時間の自由度が高い	× 運転は可能 回転速度が低く混合効率が悪い	△ 良好な乱流は得られるが、滞留時間は比較的短い	
中粘度原料 10Pa·s(10,000cP)	△ 原料によっては滞留が生じる 排出が困難な場合もある	△ 原料に付着性ある場合は排出 が困難	◎ 良好な混合が得られる セルフクリーニング性により原料の滞留がない	
高粘度原料 10kPa·s(10 ⁶ cP)	× トルク・強度不足で対応不可 原料の付着や滞留懸念	◎ 高トルクを生かした良好な混合 ブレンド時間の自由度が高い	◎ 高トルクを生かした良好な混合 ブレンド時間の自由度はL/Dに依存する	
固体原料	× トルク・強度不足で対応不可	◎ 高トルクを生かし、固体原料の 可塑性・熔融も可能	◎ 高トルクを生かし、固体原料の可塑性・熔融も可能	

図1 バッチ方式と連続方式プロセス

3. バッチ式ミキサと連続式ミキサ

バッチ式ミキサは低粘度原料用ミキサと高粘度原料用ミキサの二つに分類され、それぞれ原料の粘度によって使い分けられている。ここでは、バッチ式ミキサと、連続式ミキサであるTEXの装置及びプロセスを比較する。

3.1 バッチミキサ：低粘度原料用ミキサ

3.1.1 パドル式ブレンダー

一般には図2に示されるような反応釜がパドル式ブレンダーとして有名である。釜自体はジャケット構造となっており、そのジャケットにホットオイルもしくはスチームが通され原料を加熱する。また攪拌羽根が釜内部に設置されており、その攪拌により原料の溶融・混練・反応が行われる。原料は釜上部蓋部に設置された原料投入口から投入され、所定の時間を要し、反応・混練が行われる。攪拌羽根の構造上、攪拌羽根のトルク、強度が高くないため高粘度原料の混練には限界があり、主に低粘度原料、基本的には液体原料に限り使用される。攪拌羽根により流体中に高速の乱流が作り出され、主原料と添加剤、オイル等の副原料を良好に混合することが可能で、その混合時間を自由に調整できるという特徴を持っている。しかし、良好な混合を得るために必要な滞留時間が時には数時間必要なケースもあり、その生産性の低さが問題となる。また、原料の投入や製品の排出は図3に示されるよう基本的には手作業となり、人手がかかり生産効率の悪さからコスト増になることが懸念されている。特に粘度が高い原料を混練後排出する時、釜内部への原料付着によ

り排出が困難となり、その排出や、原料の置換のための清掃に時間がかかるため、環境性や安全性に課題がある。また図4に示されるよう手作業が多いと、人為的ミスなどによる製品の不良発生リスクも高い。

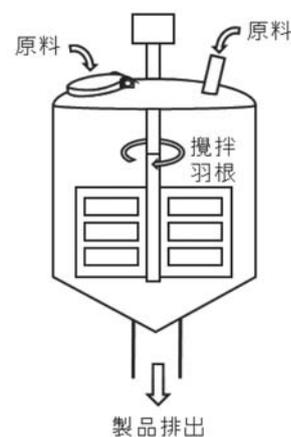


図2 反応釜概略図

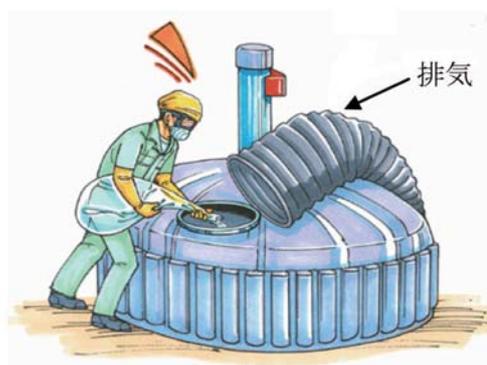


図3 反応釜への原料供給⁽²⁾

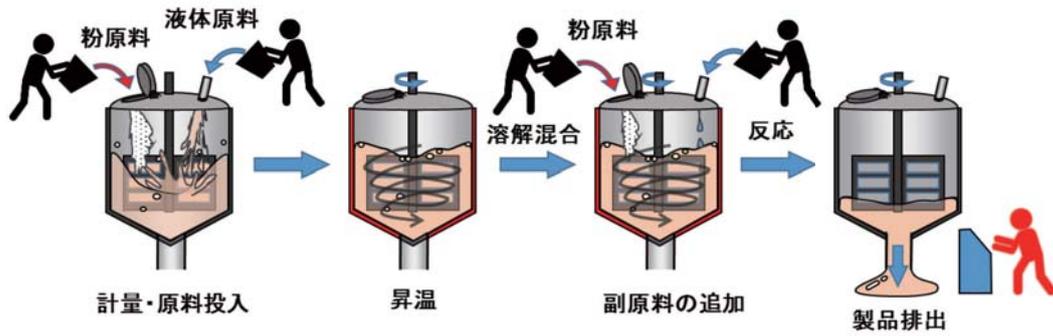


図4 反応釜使用プロセス

3.1.2 バッチミキサ：高粘度原料用ミキサ

バッチ式高粘度原料用ミキサには二つの型式の混練機、すなわち二本ロールミルと密閉式ミキサがある。二本ロールミルは研究・開発用混練機として今日でも広く用いられているが、通常、生産用には密閉式ミキサが用いられる⁽³⁾。

二本ロールミルは総ての密閉式ミキサの元祖である。図5に示されるよう水平に取り付けられた研磨され表面が磨かれ互いに逆回転する二本のロールを持った構造である。原料は回転するロール間に入り込むことにより、せん断が与えられ混練される。

密閉式ミキサは一般的にインテンシブミキサと呼ばれており、その代表的なものとして、バンバリミキサがある。その基本原理はロールミルと同じであるが、その混練性能はロールミルと比べずっと強力であり、図6に示されるよう二本の平行なニーディングロータを内蔵する密閉された8字断面の混合室、ホッパ、原料を加圧するラムそして落下あるいはスライド排出ドアからなっている。ロールミルと同様に二本の回転するニーディングロータ間のせん断により原料は混練される。混練強さは、ラムと呼ばれる上下に移動可能な加圧システムにより調節される。ニーディングロータ形状、回転速度、ラム圧力、混合室温度等により、混合度合いを変化させることが可能なミキサである。

機械構造が頑丈なため、トルク、機械的強度を持たせることが可能であり、高粘度原料での低温混練及び、固体原料の可塑性を伴う混練に適している。しかし、反応釜と同様にバッチ式であるため、原料排出時に人手がかかることによる生産効率、安全性、環境性に対する課題がある。また反応釜同様マニュアルでの運転が主流であり、作業者の経験と勘によるところも多く混練品の品質安定性に懸念がある。

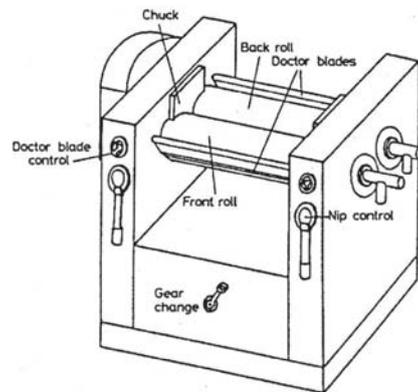


図5 二本ロールミル⁽⁴⁾

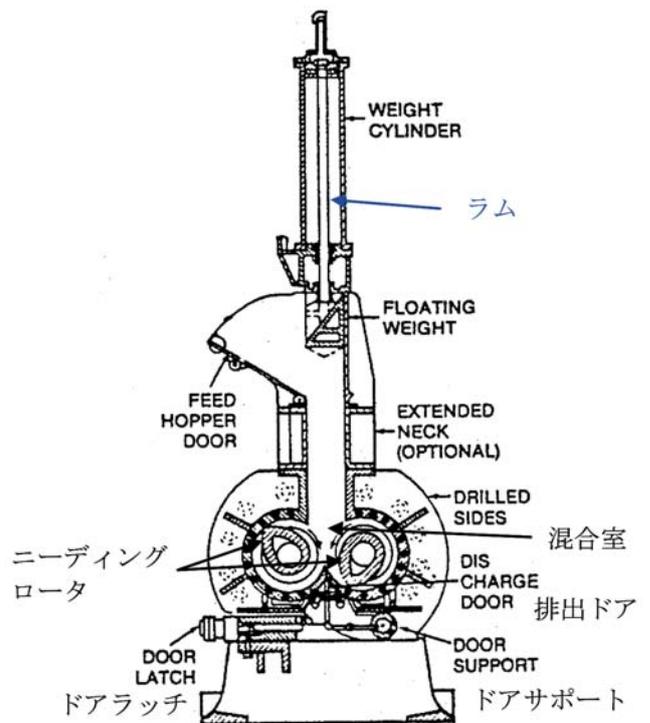


図6 バンバリミキサ⁽⁵⁾

3.1.3 連続式ミキサ：二軸スクリュ押出機 TEX

二軸スクリュ押出機の場合、滞留時間は時間当たりの吐出量、機械サイズ、押出機長さ(L)とスクリュ径(D)の比であるL/Dにより決められる。L/Dには制限があり、一般的には反応釜や、バンバリミキサと同等の滞留時間を得ることは難しい。それを克服するため、スクリュ形状やバレル構成の最適化により必要なエネルギーを混練品に与え、滞留時間が短いことによる反応不足欠点を補っている。また連続式というのはユーザーにとって大きなメリットがあるため、原料の配合等を、短時間でも反応や混練が進むような添加剤を用いる等の改良も行われている。またTEXの同方向噛み合い型の構造はセルフクリーニング性能が非常に高く、原料変更のために排出が容易に行えるため、バッチミキサの原料排出が困難でセルフクリーニング性が悪いという課題克服が可能である。図7に示されるよう二軸スクリュ押出機を使用したプロセスでは、原料はフィーダにより自動的に押出機に投入され、原料の供給、押出機の運転条件、排出等製品の反応・混練を制御するために必要なパラメータを二軸スクリュ押出機のコントローラにて集中管理することで連続的に、安定した製品品質を得ることができる。そのため製品ロスが少なく、生産効率を飛躍的に向上させることが可能となる。

次項からは、反応釜やバンバリミキサによる従来の生産プロセスを、生産効率改善、品質の更なる向上を目的に二軸スクリュ押出機 TEX を使用した連続式プロセスに転換した実例を紹介する。

4. バッチ式プロセスから二軸スクリュ押出機を使用したプロセスへ変換した実例

4.1 特殊用途添加剤の脱揮プロセス

反応釜にて生成された原料から副生成物を除去するための脱揮工程にて、従来薄膜蒸発機等が用いられ、長い時間をかけて純度の高い製品を得ていたが、生産性が悪く、また品種切り替え時の製品ロス発生等を改善するため、より効率の良い生産システムへの転換が検討されてきた。また、品種切り替え時等の作業環境の改善も近年必要となっている。そこで二軸スクリュ押出機を使用した連続化による生産性向上が目ざされた。

図8にて実プロセスで使用する原料で実験したときの二軸スクリュ押出機 TEX の装置概要を示す。原料は液体であり、定量性を保つことが可能なプランジャポンプにより連続的にTEXに供給される。供給された副生成物を含む原料は、TEX内でヒータによる外部加熱及びスクリュが回転によるせん断発熱により加熱され、ベント部でのスクリュによる原料の薄膜化と減圧効果により脱揮される。押出製品の副生成物残存濃度を目標以下にするため、L/Dを長くした押出機に複数のベント部を設けている。薄膜蒸発機よりも短い滞留時間を、スクリュによる断続的な加熱圧縮と複数設けられたベント部での減圧による膨張(発泡)及びベント部での真空曝露表面積を増加させるスクリュ形状を用いて脱揮効率を大幅に増大することで補い、目標の副生成物残存濃度にて製品生産が可能となる。

Latinenによる脱揮プロセスモデルにおいて一般に知られている下記の式からも、脱揮ゾーンの長さ(L)及び、真空状態への暴露表面積(S)が出口揮発分濃度(C)に与える影響が大きいのが明らかである⁶⁾。

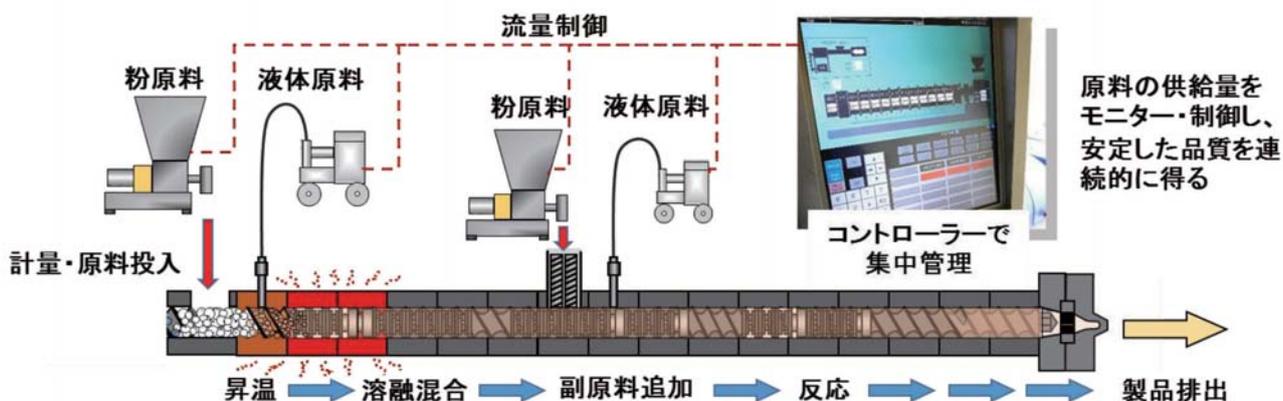


図7 二軸スクリュ押出機使用プロセス

$$\ln \frac{C_0 - C^*}{C - C^*} = K D \rho \frac{S L N^{1/2}}{Q}$$

Co : 入口揮発分濃度 (ppm)

C : 出口揮発分濃度 (ppm)

C* : ある温度、分圧化での平行濃度 (ppm)

K : 定数

Dd : 拡散係数 (m²/s)

ρ : ポリマー密度 (kg/m³)

S : 単位長さ当たりの真空状態への暴露表面積 (m²)

L : 脱揮ゾーンの長さ (m)

N : スクリュ回転速度 (rpm)

Q : 処理量(kg/h)

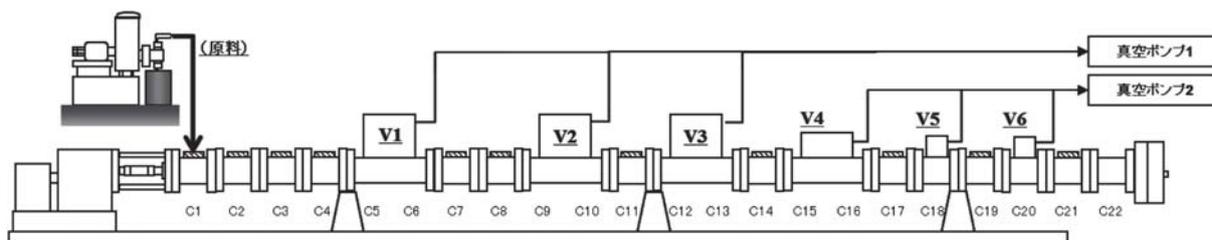


図8 脱揮テスト装置構成 (TEX30 a)

脱揮効率に影響する要因として主に原料に与えられる熱、真空下での暴露面積が挙げられる。図9にスクリュ回転速度と副生成物残存濃度の関係を示す。スクリュ回転速度が増加すると剪断速度も増加し、発熱量も増え溶剤が蒸発しやすくなる。またポリマーの表面更新向上により、溶剤が真空下に曝されやすくなり、脱揮効率が良くなることで、製品の副生成物残存濃度が低くなっている。しかし脱揮効率を向上するために過剰の熱を与えると品質の劣化が懸念される。

またベント部真空下の暴露表面積の異なるスクリュ形状と副生成物残存濃度の関係を示した例を図10に示す。暴露面積を大きくするスクリュセグメントを用いることで過剰な熱を与えずに脱揮効率が向上し、押出製品限界樹脂温度(160℃)を下回り300ppm以下の低副生成物残存濃度を達成した。この時暴露面積大スクリュは暴露面積小スクリュに比べ約2倍の暴露面積を持つ。

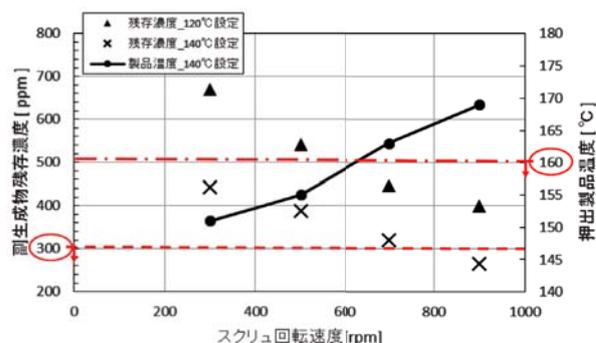


図9 スクリュ回転速度と副生成物残存濃度の関係

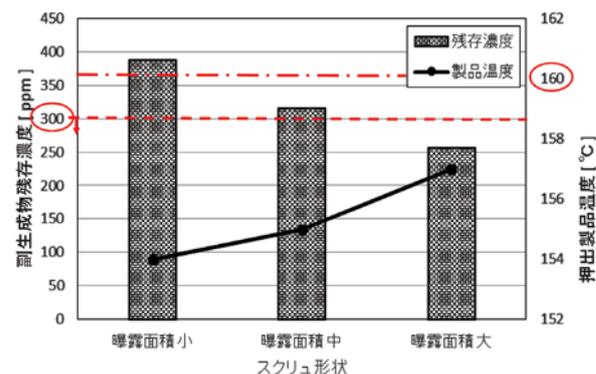


図10 スクリュ形状と副生成物残存濃度の関係

4.2 ABS+SAN コンパウンド

従来から ABS / アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン樹脂 (Acrylonitrile Butadiene Styrene Resin) + SAN / スチレン・アクリロニトリル共重合樹脂 (Styrene Acrylonitrile Copolymer) の混練には二軸スクリュ押出機が使用されている。しかし、未だにバンバリミキサ等バッチプロセスでの生産も行われている。バンバリミキサは ABS のような粘度のある固体原料の熔融・混練性に優れており、前記図6の平行ニーディングロータを低回転速度で時間をかけて混練することより、低樹脂温度での均一混練が可能となる。しかし、その低生産性、及び二軸スクリュ押出機による連続生産化へのプロセス変更を目的とし、二軸スクリュ押出機での連続化実験を実施した。

図 11 に実験装置概要を示す。実験は日本製鋼所製 TEX54a III にて実施された。ABS と SAN 原料は重量式フィーダにより定量的、連続的に二軸スクリュ押出機に供給される。ABS と SAN の混練では押出機から混練品が押し出される際の樹脂温度と、サンプルペレットを評価用押出機によりシート化し、そのシート表面の単位面積当たりの 100 μ m 程度以上の未混練異物である通称ブツの数によって品質評価される。バンバリミキサ同等の混練性を得るために使用されたのが写真 3 に示される偏芯 3 条ニーディングエレメントである。このスクリュエレメントはニーディングチップ部とパレル内面で発生する局部圧力を抑える効果を持っており、樹脂温度の上昇を抑制できる。また、高粘度の ABS と比較的 low 粘度の SAN を混練する場合、分散混練が難しいためスクリュ形状に注意が必要である。分散混練の指標は「 $\tau = \gamma \times \eta$ (せん断速度 \times せん断粘度)」で表されるせん断応力⁽⁷⁾であり、混練品の粘度を保つことがせん断応力を大きくし、分散能力を高める。SAN の熔融が促進することによる原料の粘度低下が ABS の混練を阻害するため、3 条ニーディングエレメントを入れて、SAN の粘度を保った状態で ABS の混練が行えるようなスクリュ構成としている。

図 12 に偏芯 3 条ニーディングエレメントを組み込んだ場合と通常ニーディングエレメントを組み込んだ場合の押出樹脂温度を示す。また、スクリュ回転速度を変更した場合の樹脂温度も併せて示される。図 12、偏芯 3 条ニーディングエレメントを組み込んだスクリュ形状のほうが通常ニーディングエレメントを組み込んだスクリュ形状より樹脂温度を低下させる効果があることが分かった。また、スクリュ回転速度を低くした条件により、限界樹脂温度(290 $^{\circ}$ C)以下を達成した。ここで、TEX シリーズの最新シリーズであるウルトラ高トルク二軸スクリュ押出機 a-III では回転速度を 10% 低減することができるため、樹脂温度を低下させることを可能とした。

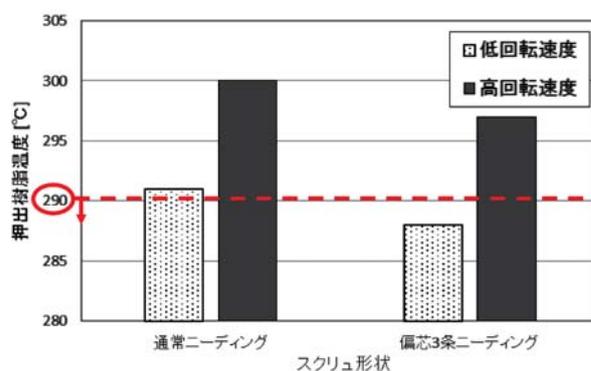


図 12 スクリュ形状と樹脂温度の関係



写真 3 偏芯 3 条ニーディングエレメント

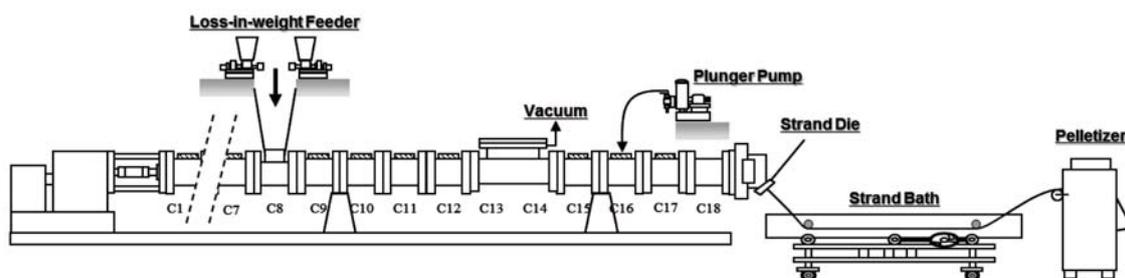


図 11 ABS+AS 混練テスト装置概要 (TEX54 a III)

図 13 にスクリュ形状とシート評価によるブツ数の関係を示す。同図にスクリュ回転速度とブツ数の関係も示される。偏心 3 条ニーディングエレメントを組み込んだスクリュ形状によりブツ数の目標を達成できている。

従来のバッチミキサでの製品と同等の混練性能を得られたことで、このテスト結果が実機生産機へ展開された。これは日本製鋼所の特殊技術である偏心 3 条ニーディングエレメントと世界最高レベルのトルクを持った TEX α -III シリーズを用いて初めて達成された性能である。

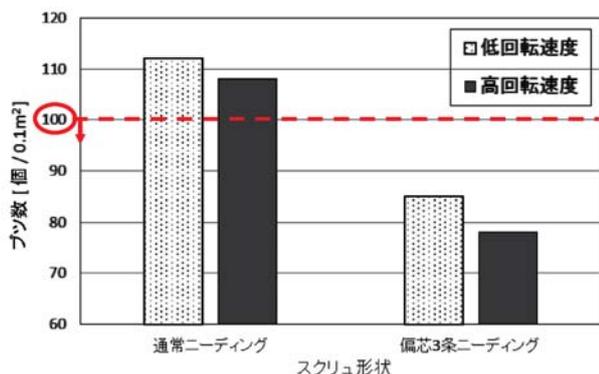


図 13 スクリュ形状とシート状ブツ数の関係

4.3 植物由来原料コンパウンド

近年、地球環境保護のため、植物由来の環境親和性の高い原料を使用したコンパウンドが注目されている。本報では一例として、ある植物由来原料から得られた繊維を副原料とし、主原料であるオレフィンとコンパウンドした結果を報告する。従来のバッチ式プロセスによるラボ試験により、オレフィンと繊維、添加剤等原料の配合最適化が行われてきた。この原料を連続して混練するための混練機の性能評価が必要となり、二軸スクリュ押出機により生産性と

繊維分散性向上を検討した。

図 14、図 15 に日本製鋼所製 TEX30a を使用したテスト装置概要を示す。最適化された原料は重量式フィーダを使用して定量的かつ連続的に TEX に供給される。オレフィンと繊維を溶融させた後で、繊維を供給し、溶融したオレフィンと繊維を混練する方法(プロセス1)ではオレフィン溶融による粘度低下のため、繊維へ有効にせん断応力が加えられず、分散性を向上できなかった。一方でオレフィンを溶融させる前に繊維を押し出機に供給し、繊維を微細化させた後にサイドフィーダにより供給されたオレフィンと混ぜ、一緒に溶融混練させるプロセス(プロセス2)を開発した。TEX30a により実験を行った運転条件を表 2 に示す。実験で得られたサンプルをホットプレスにより約 0.15mm 厚の薄膜フィルムとし、繊維の分散状態を写真 4 で観察した。繊維をオレフィン溶融後に混練するプロセス(プロセス1)、繊維をオレフィン溶融前に破碎しオレフィンと溶融混練するプロセス(プロセス2)の分散状態を比較している。結果では、白点の数が少ないほど分散が良好と考えられ、プロセス2において繊維の分散状態が良くなると推測される。それぞれの実験で得られたプロセスの違いによる比エネルギー(時間当たりの必要動力)を比較した結果を図 16 に示す。尚、比エネルギーの計算式は以下のとおりである。

$$Esp(\text{比エネルギー})[\text{kWh/kg}] = \frac{\text{モータ動力}[\text{kW}]}{\text{処理量}[\text{kg/h}]}$$

この結果からも植物繊維をオレフィン溶融前に破碎するプロセス(プロセス2)の方が、プロセス1より比エネルギーが約 14% 向上し、繊維およびオレフィンに十分なエネルギーを与えていることになり、写真 4 より繊維の分散性向上につながっていると言える。

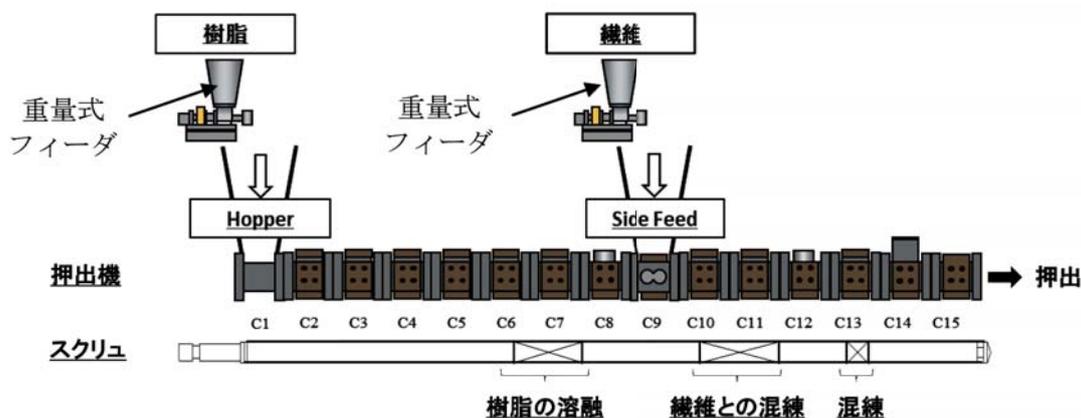


図 14 プロセス1 (オレフィンを溶融させて、繊維を供給)

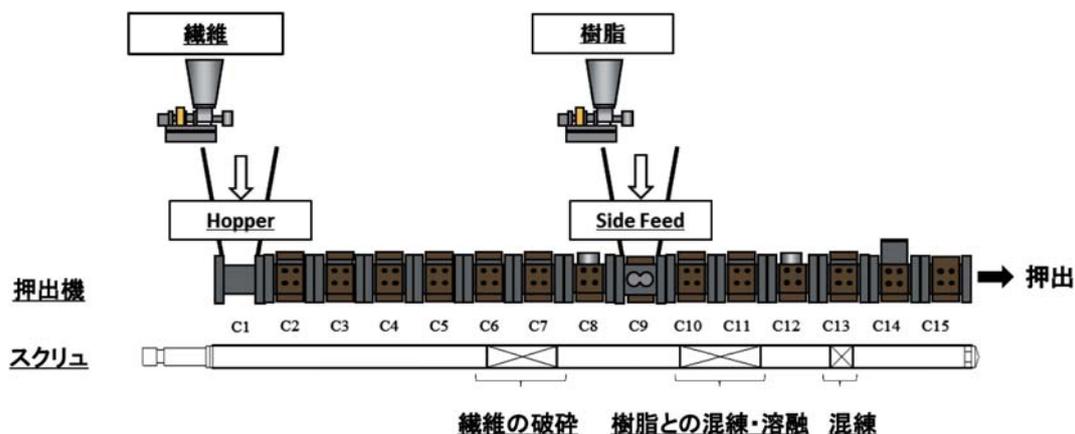


図 15 プロセス2 (繊維を微細に粉碎した後、オレフィンを溶融)

表 2 実験テスト条件表

押出機	: TEX30α
シリンダ長さ(L/D)	: 52.5
処理量	: 15kg/h
スクリュ回転速度	: 200rpm
シリンダ設定温度	: 100°C~180°C
植物繊維の割合	: 30wt%

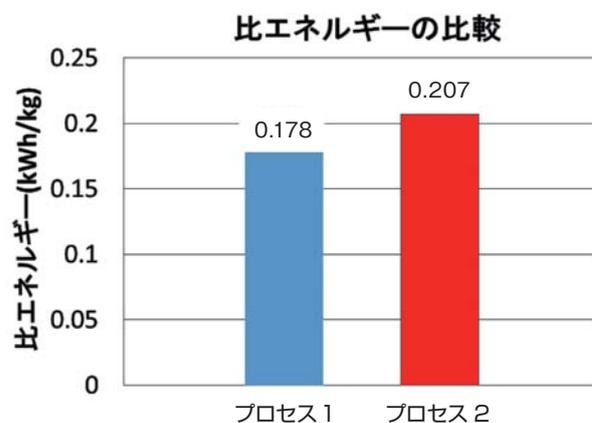


図 16 比エネルギーの比較

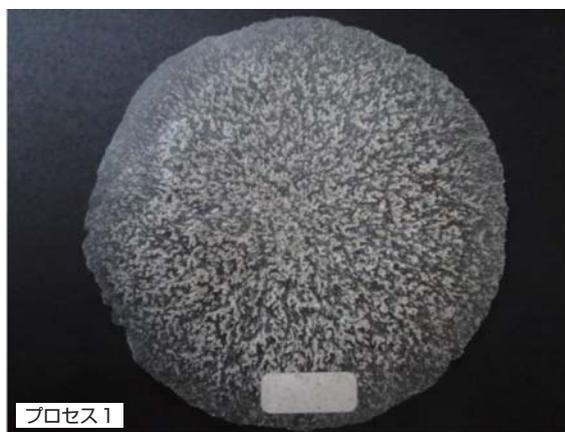


写真 4 各混練プロセスにおける繊維分散状態

5. 結 言

二軸スクリュ押出機 TEX シリーズは高トルク化、高回転速度化を成し遂げ、ハード面で発展を続けてきた。この世界的に最高性能を有する TEX を有効に活用するため、今後も様々な分野への適用が期待されている。その一つが今まで二軸スクリュ押出機が使用されていなかった分野である。こういった分野ではプロセスの改良による生産性の向上及び、環境面での改善が活発になると考えられ、今後もこういった分野からの日本製鋼所への期待、要望が大きくなっている。このような期待に答えられるよう、更なる TEX シリーズの改良及び、プロセス技術の向上に取り組んで行く所存である。

参 考 文 献

- (1) 住田、友光、佐賀、東定、清水、小館、石橋、柿崎、井上：日本製鋼所技報, 64号, (2013), p56
- (2) 厚生労働省：職場の安全サイト, abzeninfo.mhlw.go.jp/
- (3) 伊藤 公正：コンパウンディング, (1993) p4-5
- (4) 伊藤 公正：コンパウンディング, (1993) p4-5
- (5) 伊藤 公正：コンパウンディング, (1993) p4-9
- (6) “Devolatilization of Plastics”, VD I -VERLAG BmbH, (1980), p16
- (7) Dr. Sunghoon Kim, Dr. Costas G. Gogos : POLYMER MIXING STUDY POLYMER PROCESSING INSTITUTE, (1998), p102