

# 食品包装向け無延伸シート成形装置の要素技術とAI・IoT技術

## Elemental and AI/IoT Technologies of Sheet Production Line for Food Packaging



浜崎 紘輝  
Hiroki Hamasaki



博士(工学) 申崎 義幸  
Dr. Yoshiyuki Kushizaki



田代 健太郎  
Kentaro Tashiro



川上 孝之  
Takayuki Kawakami

### 要 旨

フードロス対策として賞味期限を延長するために、カップ容器、青果物包装や弁当容器などの食品包装用シートの需要が伸びている。そのため、本報告では、無延伸シート成形装置について多層化、タッチ成形、AI/IoTの技術紹介を行った。これらの新技術を搭載した2023年度に立ち上げ予定のテストラインについての紹介を行う。

### — Synopsis —

To extend the expiration date as a measure against food loss, demand for multi-sheet for food packaging, such as cup containers, fruit and vegetable packaging, and lunch boxes, is growing. Therefore, in this report, it was introduced the technologies of multi-layer, touch molding and AI/IoT for Sheet Production Line, and new test line scheduled to be launched in FY2023 equipped with these new technologies.

## 1. 緒 言

無延伸シート成形装置(図1)は、押出機、Tダイ、キャスト装置および巻取機から成る機械構成であり、生産性や製品厚みの均一性に優れる。それゆえ、大量生産されるポリオレフィン系樹脂などの成形に用いられ、我々の身近に存在するカップ容器、透明材、青果物包装や弁当容器などの食品包装用のシートがそれに該当する。また、食品包装

の要求品質として、①内容物の酸化や移り香を防ぐための保護性、②内容物の視認性、③製品厚みの均一性など多岐にわたる。この際、①は機能の異なる樹脂を積層化する『多層化技術』、②はシートに光沢と透明性を付与する『タッチ成形技術』、③は人間の勘と経験に頼らない『AI/IoTを活用したソフトウェア技術』が必要となる。本報告では、これらの技術取り組みと2023年度に立ち上がる新技術を搭載したテストラインについての紹介を行う。

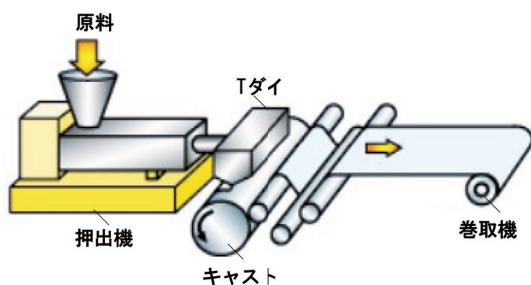


図1 無延伸シート成形装置

## 2. 無延伸シート成形技術

### 2.1 多層化技術

食品包装では、機能の異なる樹脂を積層することによって、必要な特性を持たせることが一般的である。当然、積層する樹脂粘度が異なるため、適切な条件で積層しないと界面で不安定現象が生じる。一方で、積層時の界面が自由境界であるがゆえ、境界条件が複雑となり、解析

などを用いた理論構築が難しく、試行錯誤による経験的な成形調整に終止してしまう。

樹脂を積層する方法として、図2に示すように、Tダイ内で樹脂を積層する方法(積層Tダイ方式)、フィードブロックと呼ばれる流路内で積層する方法(フィードブロック方式)の2種類存在する。積層Tダイ方式は、積層する樹脂を拡幅した後、積層するため各層の層比の乱れが少ないが、流路形状の変更が困難なため、層比や樹脂の変更などが困難であり、成形条件に制約ができる。一方、フィードブロック方式は、流路変更が比較的容易で、層比変更や樹脂の変更が可能であるが、積層後に樹脂を拡幅するため、層比の乱れやフィードブロック内で生じた界面の不安定現象が拡大し、品質として無視できなくなる恐れがある。食品包装用途では、一つの機械で複数の品種を取り扱うため、フィードブロック方式を採用する機会が多く、不安定現象の対策は重要な課題の一つである。

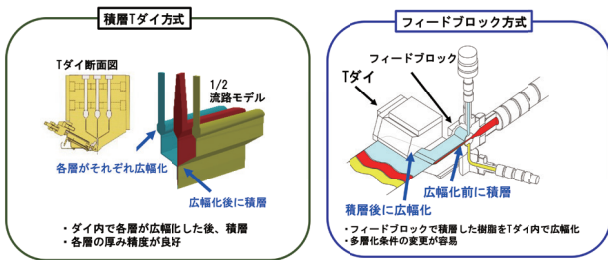


図2 積層方法

図3に樹脂を積層する際に生じる不安定現象の例を示す。典型的な不安定現象は2種類存在し、1つ目の不安定現象は、図3(a)に示す積層後の界面荒れである。この界面荒れは積層時界面の荒れが表面に伝播し生じるものであり、原因として、脂表面にジグザク模様が生じることで樹脂に生じるせん断応力の差が68 KPa以上<sup>(1)</sup>となる場合と、表面が波長の大きい波のような模様が生じる際、積層時の樹脂の流速差<sup>(1)</sup>の場合が考えられる。樹脂により生じやすい不良が異なるため、流路設計を行う際に、せん断応力差を重視するのか流速差を重視するかは、成形調整時の考えに依存する。

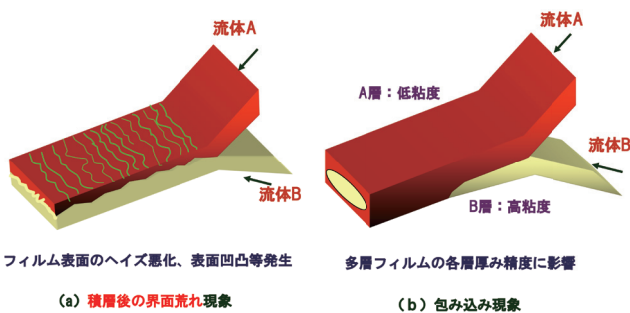


図3 多層化の成形不良

もう一方の不安定現象は、図3(b)に示すように、積層後に粘度の小さい樹脂が粘度の大きい樹脂を包み込む不良であり、包み込み現象と呼ばれている。この現象は純粘性流体では生じず、樹脂が粘弾性特性を有するため発生する現象で、第2法線応力差が原因と考えられている。単純せん断流れにおいて、流動方向を「1」とし、せん断方向を「2」とし、厚み方向を「3」とすると体積を一定とするため、 $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{33}$ とそれぞれの方向に応力が生じ、力のつり合いをとる。ここで、第1法線応力差は $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ 、第2法線応力差は $\sigma_{22} - \sigma_{33}$ で表される。また、一般的に第1法線応力はレオメーター等で測定することが可能であるが、第2法線応力については、正確に測定する方法が確立していない。それゆえ、この包み込み現象と呼ばれる不良現象の理解を困難にしている。

この問題に対して、当社では、数値解析技術を用いて対策検討を試みている。解析では、式(1)～(3)で表現されるCEF (Criminale-Ericksen-Filbey)モデルを用いた。

$$\tau = 2\eta\mathbf{D} - \Psi_1 \overset{\nabla}{\mathbf{D}} + 4\Psi_2 \mathbf{D} \cdot \mathbf{D}, \quad \dots (1)$$

$$\overset{\nabla}{\mathbf{D}} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{D} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{D} - \mathbf{D} \cdot \mathbf{L}^T, \quad \dots (2)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} + \mathbf{L}^T), \quad \mathbf{L} = (\nabla \mathbf{v})^T \quad \dots (3)$$

ここで $\tau$ は余剰応力テンソル、 $\eta$ はせん断粘度、 $\mathbf{D}$ は変形速度テンソル、 $\mathbf{L}$ は速度勾配テンソル、 $t$ は時刻、 $\mathbf{v}$ は流速ベクトルである。 $\Psi_1$ および $\Psi_2$ はそれぞれ第1法線応力 $N_1$ 、第2法線応力差 $N_2$ によって決定する定数であり、 $\dot{\gamma}$ をせん断速度とすると、式(4)、(5)で求められる。

$$\Psi_1(\dot{\gamma}) = N_1 / \dot{\gamma}^2 \quad \dots (4)$$

$$\Psi_2(\dot{\gamma}) = -0.1\Psi_1 \quad \dots (5)$$

以上のCEFモデルにて、図4に示す単純矩形流路を対象に多層流動解析を実施した。解析には粘度の異なる2種類のPP樹脂(プライムポリマー製 F-300SP (MI = 3.0 g/10 min)、F-704NP (MI = 7.0 g/10 min))を使用した。解析条件は、表層にF-704NP、中間層にF-300SPを採用し、層比は表層:中間層:表層 = 1:2:1、樹脂の設定温度を210℃一定とした。図5(a)、(b)はそれぞれ、積層結果と層比となる。なお、比較として、準粘性モデルも併せて実施した結果を図5(b)に示す。図より準粘性モデルでは、中心から端部まで層比がほぼ均一であった。それに対して、CEFモデルでは、端部付近で低粘度樹脂の層が厚くなっており、包み込み現象が認められた。一般的には、粘度の異なる樹脂を積層させて矩形

流路に流した場合、法線応力効果により低粘度樹脂が高粘度樹脂を包み込むような層分布になるため<sup>(2),(3)</sup>、CEFモデルは包み込み現象を表現できたと考えられる。これらの結果から、CEFモデルを用いた解析により、多層流動の層比の乱れを予測できる可能性が示唆された。

このように、当社では、多層化技術のノウハウ構築に加えて解析による理論構築を行っている。

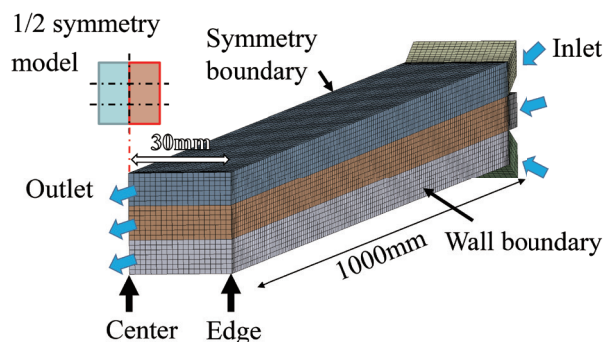


図4 解析モデル

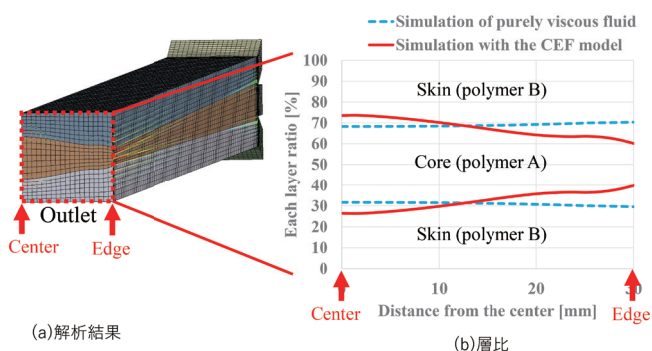


図5 解析結果

## 2.2 タッチ成形技術

無延伸フィルムの成形方法の一つに金属タッチロール法がある(図6)。この成形法はシートの両面を全面密着させるため、急冷却と鏡面転写が可能であり、成形速度も50 m/min程度まで対応可能な成形法である。短所としては、全面密着であるため、偏肉調整がシビアであり、特に0.3 mm以下の薄物成形では密着不良などの成形不良が発生しやすくなる。当社が開発した金属弾性体のタッチロール(JFロール)は、この薄物成形におけるフィルム

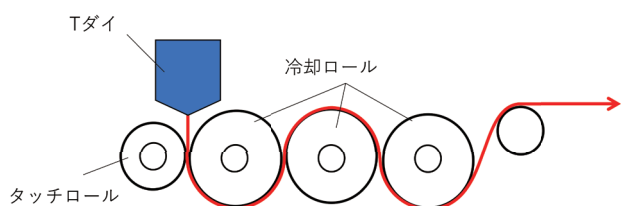


図6 金属タッチロール法

シートの厚みムラに対する追従性、柔軟性に長けた成形ロールである。一般的な金属ロールと異なり溶融樹脂が接触する外筒の内面に円周方向にネジミゾがあり、フラットロールより断面二次モーメントが一桁小さく、ロール幅方向のロール柔軟性が高いことが特徴である(図7)。

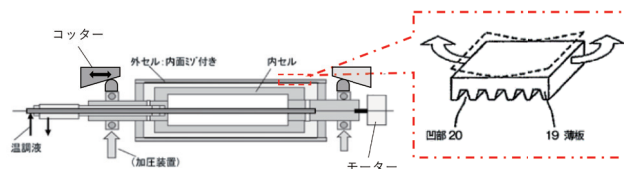


図7 JFロールの構造

図8には、冷却ロールとタッチロールで樹脂を狭窄した際の樹脂変形様式を示す。図に示すように、内面にミゾを持たないフラットロールでは幅方向の柔軟性が少ないため、縦縞方向に未圧搾部が生じるが(図8(a))、JFロールはその構造により、シートの厚みムラに対し、均一な成形性能を得ることができる(図8(b))。また、同じ弾性体ロールとして、ロール表面をシリコンやテフロンなどにしたゴムロールがあるが、金属ロールと比べると熱伝導性が悪く鏡面性も劣る。対してJFロールは金属かつ外筒の内側にミゾを持つため、表面積の増加により冷却能力が高く、外筒表面は鏡面の他に梨地、彫刻ロールにも対応できるため適応範囲が広い長所を持つ。

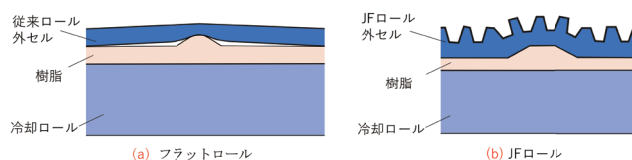


図8 ロール違いによる樹脂変形様式

また、JFロールの特徴として、成形調整の容易さが挙げられる。一般的に弾性体ロール以外のタッチロール成形では、キャストロールとタッチロールの隙間距離をコッターと呼ばれる平型の楔で微調整する必要がある。この隙間調整は成形するフィルムシートの厚みに合わせて設定が必要であり、左右の厚みバランスに対しても微調整を行わなくてはならない。特に薄物かつ透明性が必要なフィルムシートにおいては均一性を高めるためにこの調整に時間を要する場合が多い。それに対して厚みに対する柔軟性を持つJFロールはコッターなしで成形を行うため、これらの調整作業を大きく軽減できる。

その他、JFロールは成形可能な樹脂も多く、薄物ポリプロピレン(PP)からシクロオレフィンコポリマー(COC)などについて納入実績がある。また、ポリメタク



リル酸メチル樹脂(PMMA)、ポリカーボネイト(PC)やポリエチレンテレフタレート(PET)などにも適応可能である。また、シート厚さではPETの0.06 mmからPPで1.7 mmまでの厚み調整が可能であり、JFロールは幅広い原料と厚みに使用できる成形ロールである。

### 2.3 AI/IoT を活用したソフトウェア技術

無延伸シート成形技術において、人の経験と勘に基づいて成形調整を行う工程が多く存在している。今後の人口減少を想定した品質維持には、AI/IoTを活用した成形調整の自動化が重要である。ここでは、当社が取り組んでいる押出機の自動立ち上げシステム(ezDRIVER®)、完全自動Tダイ(Smart Adjuster™)について紹介する。

#### (1) 押出機の自動立ち上げシステム(ezDRIVER®)

図9に押出機立ち上げのSTEPを示しているが、押出機を立ち上げるには数多くの確認項目と実施項目が存在し、それぞれのステップで、立ち上がりの状態を観察しながら押出機の条件を変更し、装置を立ち上げていく。加えて、シート成形機には付帯装置が多く、押出機だけでなく下流機器への影響も考慮した立ち上げが必要で、操作や手順を間違えると下流にまで影響を及ぼす大きなトラブルに繋がる。

このような課題を解消すべく開発されたのが「ezDRIVER®」であり、その機能の一つに、押出機先進運転支援(Advanced Driver-assistance Systems: ADAS)が存在する。本機能は、図10に示すように運転に必要なパラメータ(フィーダ合計供給量、Q/Ns、G/P入口圧力SV値や目標圧力値、回転数の加速/減速レート)を予めテーブルに設定することにより、それ以降は、

ボタン一つで押出機や付帯装置が正しい順序で自動的に起動していく。また、押出機がうまく立ち上がらない場合においても、機械保護のインターロックシーケンスを搭載しているため、装置が故障するリスクを回避することが可能である。また、無延伸シート機は多層成形を行うため、複数材の押出機を同時に立ち上げる必要があるが、本機能は、複数台設置についても対応可能であり、各押出機の立ち上げのタイミングを同時にするか、遅らせて起動するかを設定値次第で実現可能である。

#### (2) 完全自動Tダイ(Smart Adjuster™)

Tダイ流路は、樹脂の粘度に基づき、Tダイ出口において、幅方向の流速が均一となるように設計を行う。しかしながら、成形中のネックインなどの樹脂の変形特性によって、製品の最終厚みが変わるため、このような特性に応じて、Tダイの厚み調整ボルトで厚みを調整する必要がある。厚み調整に際して、樹脂の流動特性、Tダイの構造ならびに成形中の樹脂変形挙動を理解しながら



図10 設定パネル

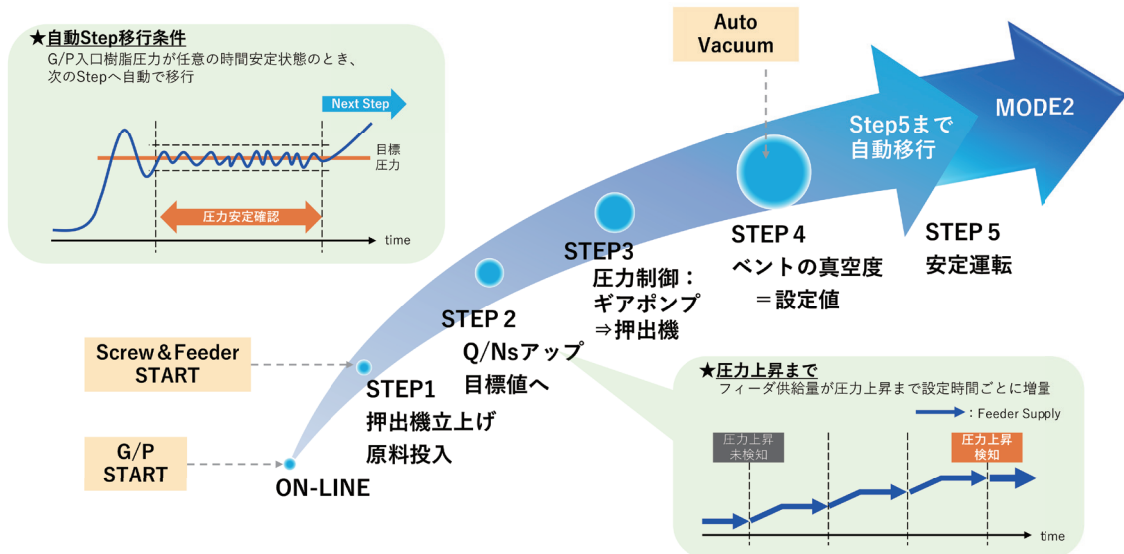


図9 押出機立ち上げのSTEP

ら行わねばならず、経験豊富なベテランでないと所望の品質を出すことが難しい。そこで当社では、図11に示すように、調整リップに従来のヒートボルト方式にモータを付け加えた「Smart Adjuster™」を開発し、既存の自動厚み調整システムである「J-TAC」と連動させることで、リップ調整の完全自動化を可能とした。従来のヒートボルト方式では、熱膨張を利用してリップの間隙を調整するため、可動範囲に限界があり、粗調整を手動で行う必要があった。一方、「Smart Adjuster™」は、モータを採用したことで粗調整が可能かつ粗調整量が数値化可能となった。粗調整量の数値化が可能となったことにより、そのデータを「J-TAC」と連動させることで、リップ調整を完全に自動化でき、なおかつ、その調整履歴を記憶させ学習することで、調整時間を短縮できる。また、複数個の調整リップを同時に調整可能なため、幅広のTダイにおいては、大幅な調整時間の短縮に繋がる。最近では、ヒートボルトを廃し、粗調整および微調整もモータで行うことで、図12に示すように、Smart Adjuster™は従来のヒートボルト方式に比べて、厚み調整が速くなっている。

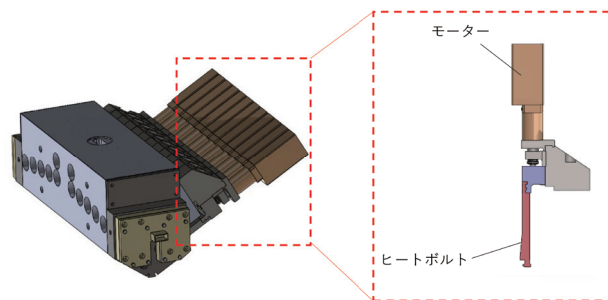


図11 完全自動 T ダイ

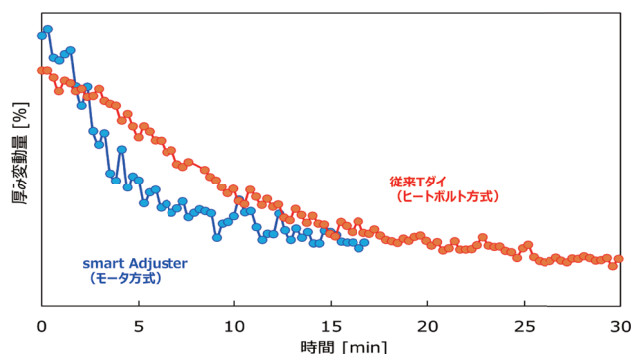


図12 Smart Adjuster (モーター方式) と従来 T ダイ (ヒートボルト方式)

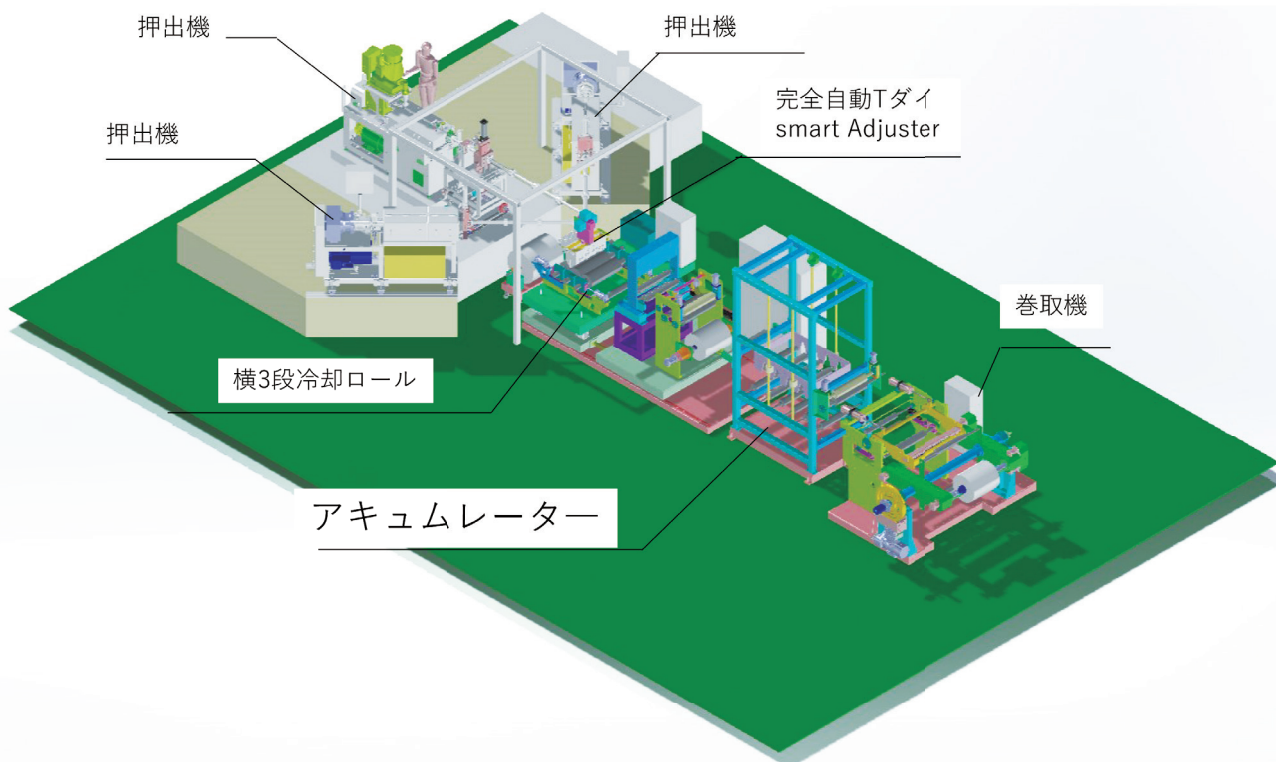


図13 新設テストライン

### 3. 新設無延伸シート成形装置

当社は、これまで構築してきた『多層化技術』、『タッチ成形技術』、『AI/IoTを活用したソフトウェア技術』を搭載した新しい無延伸シートテスト装置(新設テスト機)を2023年度に立ち上げ予定である(図13)。この新設テスト機では、3種5層の多層化に対応し、前節で紹介した「ezDRIVER<sup>®</sup>」、「Smart Adjuster<sup>™</sup>」、「Repex J-TAC<sup>™</sup>」を搭載している。また、少量サンプルでの試験可能なように装置もコンパクトであり、必要な押出量は最大で100 kg～120 kg/h程度である。成形可能なシート幅は0.05 mm～500 mm、シート厚みは0.05 mm～1.5 mmで、機械速度は最大200 m/minである。本装置は、設置後も新規開発アイテムならびにAI/IoT技術を随時搭載するデモ機であり、自動化についての最新技術の搭載や成形中のフィルム温度やロール熱伝達係数などについても自動計測可能とする予定である。

### 4. 結 言

フィルムシートの要求品質は年々高くなっており、それに伴い無延伸シート成形装置の要求性能も高くなっている。今後も当社は、AI/IoT分野や無延伸シート装置の要素技術を高め、その成果を新設テスト機に随時搭載していくことで、お客様の製品開発に協力したいと考えている。また、近年では、海洋プラスチックなどフィルムパッケージが問題となっている一方で、フードロスなどの問題から、食品を長持ちさせるため、フィルムパッケージ需要が高まっている。このような矛盾を解消するため、減容化を可能とし、リサイクル性の高い装置を開発し、今後予測されるサーキュラーエコノミーに貢献していきたいと考える。

### 参 考 文 献

- (1) Walter Michaeli and Christian Hopmann : Extrusion Dies for Plastics and Rubber : design and engineering Computations, Hanser Pub. Inc. (2016)
- (2) E. Mitsoulis, J. Vlachopoulos, and F. A. Mirza : "Numerical simulation of entry and exit flows in slit dies" Polym. Eng. Sci., No. 24 (1984), pp. 707-715
- (3) R. B. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassager : Dynamics of Polymeric Liquids, Vol. 1, Wiley (1977)

ezDRIVER<sup>®</sup>は株式会社日本製鋼所の登録商標です。