

二軸延伸ポリプロピレン(BOPP)用横延伸機のプロダクティビティ向上

Productivity improvement of transverse stretching machine for biaxially oriented polypropylene (BOPP)



串崎 義幸*
Yoshiyuki Kushizaki



二宮 俊幸*
Toshiyuki Ninomiya



辻 輝彦*
Teruhiko Tsuji



濱田 和馬**
Kazuma Hamada



中村 素惟*
Motoi Nakamura

要 旨

BOPPの需要増加に伴い、BOPP用延伸機も生産性向上が要求されている。そのため、JSWでは、解析技術を用いたBOPP用横延伸機の高速度化技術開発を行っている。本報告では、その中から、以下に示す2つの開発内容について報告する。

- ① 高速運転でのクリップ摩耗と安定開閉のための、非接触開閉式クリップ（磁気開閉式クリップ）形状の最適化と、磁気開力の最適化に関する検討
- ② オープン内の汚れ成分捕集のためのエアパーティショナー設置による補修効率最適化の検討。

また、①②の解析結果を基に設計した磁気開閉式クリップとエアパーティショナーを実機生産ラインに搭載し、性能を評価した結果、期待どおりの性能が発揮できた。

— Synopsis —

Since the demand for BOPP film is increased, high productivity is required in BOPP transverse stretching machine. JSW is developing some technologies for high productivity in BOPP transverse stretching machine based on elemental techniques. We introduce the following two technologies from among them.

- ① Optimum shape of the magnetic clip to open and close in high production speed.
- ② Air partitioner to eliminate contaminated air in ovens and evaluation of suction efficiency.

BOPP production line equipped with these developments could achieve the expected performance.

* 広島製作所 樹脂加工機械部
Plastics Processing Machinery Dept., Hiroshima Plant

** 広島製作所 技術開発部
Technology Development Dept., Hiroshima Plant

1. 緒 言

二軸延伸ポリプロピレンフィルム(以下 BOPP)は、全世界で年間1千万トンの生産能力があり、全ての延伸フィルムの約60%を占める⁽¹⁾。BOPPの主な用途は包装品であり、その他として、コンデンサーや工業用として用いられる。また、BOPPは包装材として優れた機械特性を持ち、低コストで生産性も高いため、年率6%以上の安定したペースで成長を続けている⁽¹⁾。さらに、今後、東アジア地方での都市化と生活水準の向上により、包装用のBOPP需要が更に増加することが予想される。このような需要増加から、BOPP装置には、生産性向上のために更なる高速化が要求されている。

BOPPを成形する代表的なプロセスとして逐次二軸延伸法がある。図1に示すように、逐次二軸延伸法は、押出機、キャスト成形機、縦延伸機、横延伸機と巻取機から構成される装置を用いて実施される。これらの装置でBOPPを製造する場合は、以下のような工程がある。①押出機にてポリプロピレン樹脂を溶融・可塑化する。溶融・可塑化した樹脂を、②キャスト成形機の冷却ロールにて冷却し、矩形状のシートとする。③縦延伸機では2本のロールの回転速度の差によりフィルム走行方向(以下、MD)に延伸を行う。④横延伸では、シート両端をクリップで把持し、温調されたオープン内に配置されたレールに沿ってクリップを走行させる。その際に、レールの間隔を広げることでフィルム幅方向(以下、TD)に延伸する。⑤延伸により厚みが10~20μm程度となったBOPPフィルムを巻取機で巻き取る。これらの装置の中で、横延伸機は、ライン速度の影響を強く受け様々の課題が発生するため、装置の最適化が必要である。

BOPP用横延伸機の高速度に際して、レール潤滑油の飛散、オープン加熱高効率化、開閉時のクリップ磨耗やフィルムへの汚れ成分付着などの課題がある。これらの課題に対して、JSWでは要素試験や解析技術を用い、対策を検討することでBOPP用横延伸機の完成度を高める活動を行っている^{(3),(4)}。本報告では、これらの取り組みの中で、以下の2つの解析検討結果について報告する。

- ① 磨耗対策として採用した非接触開閉式クリップの形状最適化による、高速での開閉動作の安定性評価。
- ② テンター内の飛散粒子による汚染対策として、エアパーティショナーの設置と補集効率の評価。

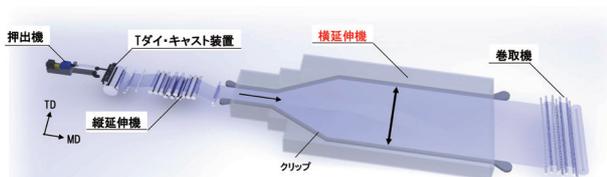


図1 逐次二軸延伸ライン

2. 非接触開閉式クリップの最適設計による高速運転時の摩耗防止

2.1 クリップ開閉機構

横延伸機は、入口でクリップを閉じフィルム両端を把持し、出口ではクリップを開きフィルムを開放する機構である。この機構の一例として、クリップを開く機構(オープナー)の模式を図2(a)、(b)に示す。図2(a)は接触開閉式クリップ、図2(b)は非接触開閉式クリップの機構を示す。接触開閉式クリップ(図2(a))は、レバーを円盤状のオープナーに接触させることでクリップを開く機構である。一方、非接触開閉式クリップ(図2(b))は、クリップの上方かつ進行方向に複数個の磁石を、クリップが倒れる方向に磁力が作用する様に配列することで、磁力によって非接触で、クリップを開く機構である。これらの方式は、ライン速度により選択されるが、ライン速度が約300 m/min以上となると、接触開閉式クリップではクリップとオープナーが衝突し、クリップが磨耗するため、非接触開閉式クリップが好まれる。一方で、非接触開閉式クリップでは、磁石の配列が適切でない場合、クリップ上方に配置した磁石により伝達される磁力(以下、磁気開力)が小さく、クリップが開かない場合に問題となる。

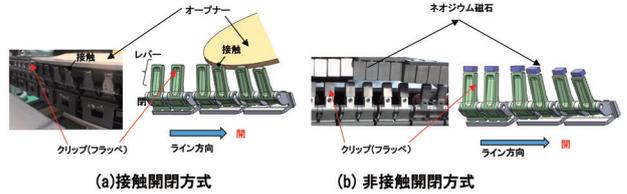


図2 クリップオープナーの模式

図3に、非接触開閉方式にてクリップを開閉する際の力の釣合い関係を示す。クリップを閉じる場合には、磁力により、レバーを倒せばよい。一方で、クリップを開く場合は、クリップ下部の凹凸部(以下、セレーション)がシート食い込み、すべり摩擦が生じているため、この力に打ち勝つだけの磁気開力を発生させてレバーを引き起こす必要がある。以下に、クリップを開く際に必要な磁気開力を示す。

$$F > W \times R/L$$

ここで、Fは磁気開力、Lはレバー長、Wはすべり摩擦力、Rはセレーション回転半径である。この式より、R/LはLが大きいほど、開ける場合に有利であるが、機構や装置の取り付けから相対的にLの長さが制限される。そのため、クリップの開く動作を安定させるには、限られたLでのすべり摩擦力Wを延伸時にフィルムが外れない程度の必要最低限に抑え、磁気開力Fを向上させる必要がある。

そこで、非接触開閉式クリップのセレーション形状とフラッペ形状の最適化することで、すべり摩擦力を低減し、磁気開力の向上を目指した。

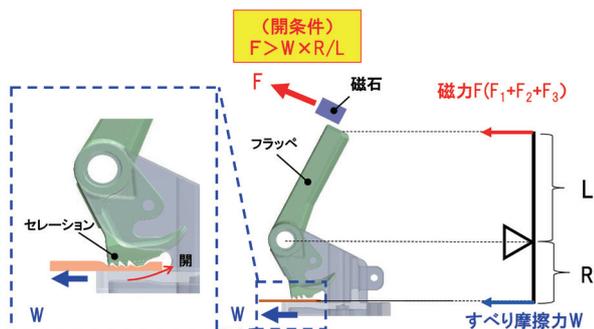


図3 クリップの開閉機構と力の釣合い

2.2 クリップ下部のセレーション形状の検討と結果 (すべり摩擦力の低減)

本節では、PPシートを対象に、セレーション形状がすべり摩擦力に及ぼす影響を検討した。試験を行う前に、くさび力の理論式⁽⁵⁾によりすべり摩擦力を算出し、その結果をタグチメソッド⁽⁶⁾により、すべり摩擦力への寄与率(感度)を整理し、図4に形状1と表記する最適形状を導いた。形状1は、従来形状である形状2のセレーションの山谷の深さと、頂部の長さを変更することで、シートへの食い込みを調整したものである。試験では、形状1と形状2のすべり摩擦力を測定した。

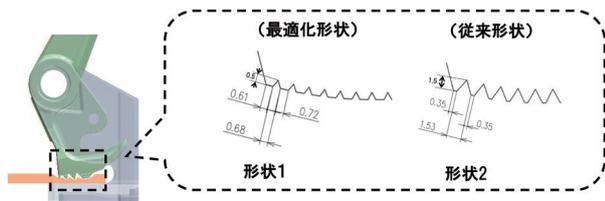


図4 セレーション形状

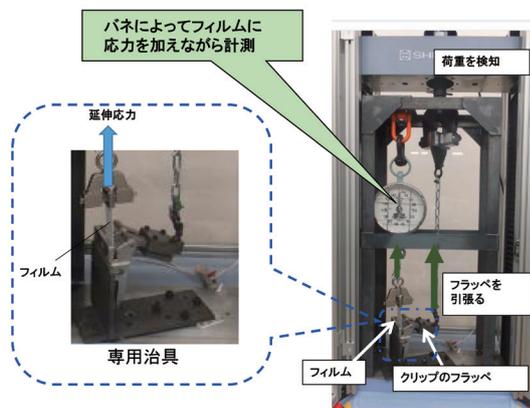


図5 すべり摩擦力測定装置

すべり摩擦力を測定するに際して、図5に示すように、クリップで挟んだPPシートに延伸応力を模擬した応力を加えられる専用治具を作製し、それを万能試験機(島津製作所製 型番AG-XPlus)に取り付けた。次に、専用治具にてPPシートに図6に示すような延伸応力パターンをバネばかりの指示で調整しながら加えた後、クリップ頭部に接続したチェーンを万能試験機にて持ち上げることで、すべり摩擦力を計測した。なお、PPシートに加えた延伸応力パターン1は、延伸中にPPシートに加わる延伸応力を模した条件である。パターン2、3は、延伸及びフィルムを幅方向に弛緩するToe-in処理を模した条件である。これらのパターンは、予め小型二軸延伸機装置にて、延伸温度155℃、倍率9倍、ライン速度500m/min相当のひずみ速度、2種類のToe-in処理の条件の下、PPシートの応力-ひずみ特性を測定したデータを用いた。

通常の生産条件に近い、延伸応力パターン2ですべり摩擦力を測定した結果を図7に示す。図7のすべり摩擦力の最大値がクリップの拘束を外すための抵抗となるすべり摩擦力である。従って、磁石によりこのすべり摩擦力以上の磁気開力を生じさせれば、クリップが開く。また、各条件はすべり摩擦力の最大値を5回測定し、それらを平均した結果を図8に示した。図8より、すべり摩擦力は延伸応力パターンに依存することと、セレーション形状1(最適化形状)は、形状2(従来形状)よりもすべり摩擦力が平均で10%程度小さいことが分かる。

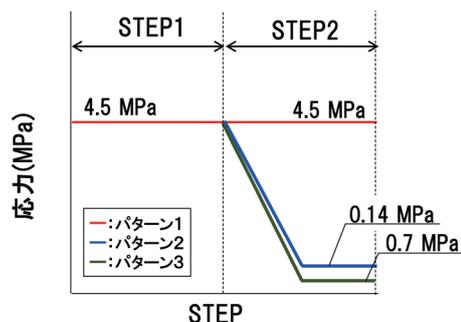


図6 応力パターン

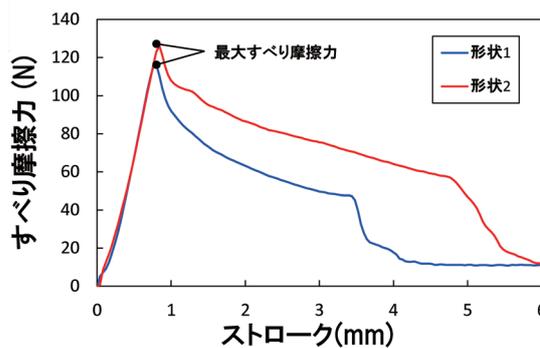


図7 すべり摩擦力の測定結果(パターン2)

このことから、すべり摩擦力を低減するためには、形状1が有効であることがわかる。また、すべり摩擦力が延伸応力に依存することから、磁気開力は最大の条件を想定し、応力パターン1のすべり摩擦力 230N から約 160N (230×0.64 [R/L]) と想定した(通常、BOPP では Toe-in 処理を行うためクリップ開力 230N は非常に大きい条件である)。

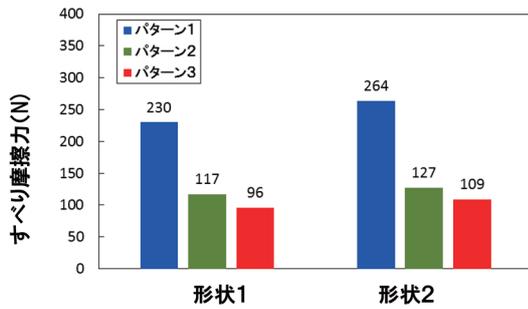


図8 各条件でのすべり摩擦力

2.3 クリップ上部のフラップ形状の検討 (磁気開力の向上)

本節では、前述したように磁気開力を 160N 以上とするため、磁場解析を用いて、フラップ形状の最適化を行った。なお、フラップ形状の検討を行う際に、事前にタグチメソッドにて、磁気開力への寄与率が高くなる、クリップ頂部の形状について検討を行い、図9の形状1(最適化形状)を導き出した。解析は、電磁解析ソフトウェア JMAG を用いた解析条件として、磁石とフラップの成す角度が 12.5° の位置に磁石を配置し磁石近傍の解析で分割した要素の各節点に生じる磁力を求め、形状1(最適化形状)と形状2(従来形状)の比較を行った結果を図9に併記する。図中には、クリップを長手方向に引っ張る様に生じ、開閉に寄与しない節点磁力の総和(引き抜き力)と、クリップの開閉に寄与する節点磁力の総和(磁気開力)を示している。図より、形状1の方は、引き抜き力が 100N に対して、磁気開力が 155N と大きく、磁力を効率よく磁気開力に変換できている。一方で、形状2では、引き抜き力が 153N と大きいが、磁気開力は 100N と小さく、開閉に寄与しない力の方が大きい。

また、以上の解析の妥当性と磁石配置の影響を検討するため、図10に示す計測機器で磁気開力の測定と、磁石配置を変更した際の解析を行った。それらの結果を図11に示す。形状1の場合は、形状2に比べて磁気開力が最大で 20% 向上していることと、 $10^\circ \sim 12.5^\circ$ の広い範囲で、150N 以上の磁気開力が生じており、クリップが安定的に開くと推察される。一方、形状2の場合は、磁石とフラップのなす角 θ が 12.5° の際に磁気開力が最大となるが、その角度を外れると急激に磁気開力が低下する傾

向が認められる。このことより、形状1は、クリップ振動による磁石配列のズレや、調整ミスなどの外乱にも強いいため、そのような外乱の影響を受けやすい高速運転時にもクリップの開閉動作が安定すると推察される。

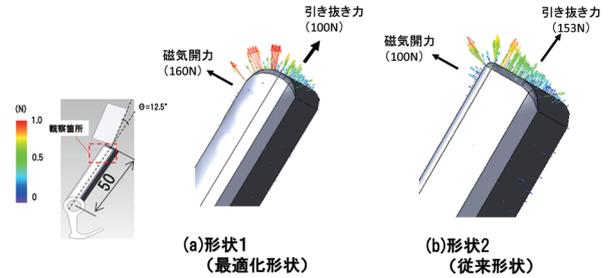


図9 磁場解析結果

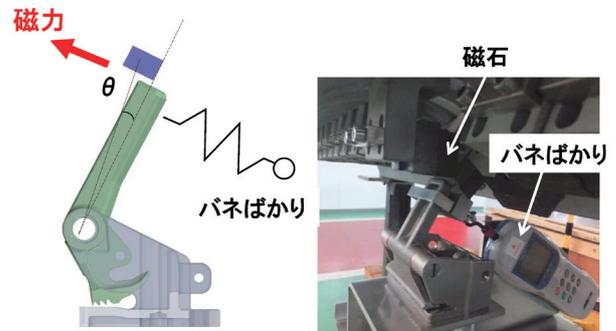


図10 磁気開力測定手法

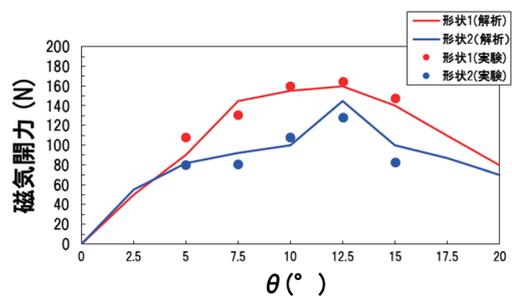


図11 磁気開力の解析と実験結果

3. オープン内の汚れ成分捕集用システムの検討

3.1 エアパーティショナー機構

高速化における BOPP の課題の一つとして、PP 樹脂中の添加剤によるオープン内の汚染がある。この課題は、PP 中の添加剤がフィルム延伸中に分離し、にじみ出る現象(ブリード現象)により、オープン内に添加剤が拡散することが原因である。また、拡散した添加剤が、温度の低い中間ゾーンや冷却ゾーンに侵入することで固化し、それがフィルムに付着することで重大な品質不良を生じさせる。特に、BOPP ラインを高速化する際には、フィルムに随伴し、他のゾーンに混入する加熱エア(以下、随伴流)の流量が多い。

そのため、オープン内での添加剤の拡散も多く、適切に対策を施す必要がある。その対策として、随伴流の他ゾーンへの混入を防ぐためにカウンターエアを噴き付け、そのエアを回収することで添加剤を補集するエアパーティショナー(図12)を開発し、設置した際の補集効率の評価を行った。図12に示すように、エアパーティショナーは設定温度が低くなる中間ゾーンの直前の熱固定ゾーンに設置する。また、中間ゾーンに混入する随伴流を遮断するため仕切りを適切に設置することで、補修効率を高めている。このエアパーティショナーは高温のカウンターエアを噴き付け、気体状態の添加剤を補集・排気することで、オープン内の添加剤濃度を低下させる機構である。

3.2 エアパーティショナーの設置位置と風量検討による添加剤捕集効率の最適化

(1) 解析による検討

エアパーティショナー設置による、中間ゾーンに混入する随伴流抑制効果(以下、解析I)と添加剤補収効率を評価(以下、解析II)するため、2種類の気流解析を実施した。両解析とも中間ゾーン直前の熱固定ゾーン1室、中間ゾーンと、中間ゾーン直後の冷却ゾーンを解析領域とし、3室のフィルム面より上半分をモデル化した。解析には、気流解析ソフト SOLIDWORKS FLOW SIMULATION を用いた。解析手法は、有限体積法、流体モデルは、RANS法、乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルとした。その他の解析IとIIの条件や仮定は図13に示した。

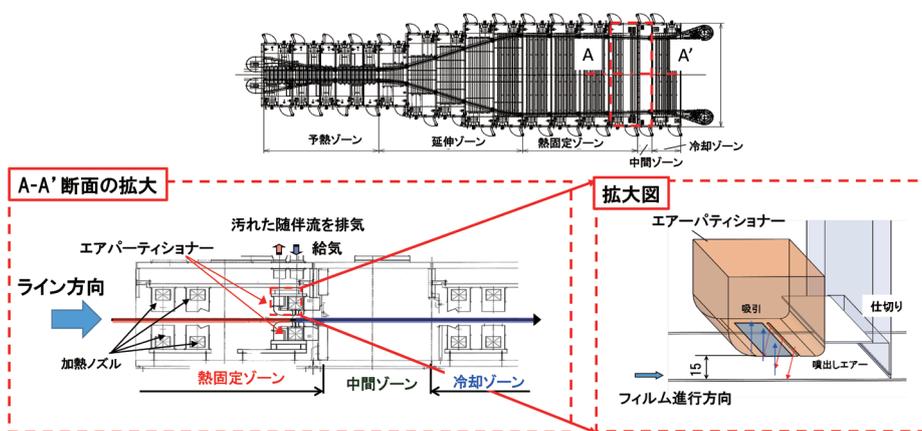
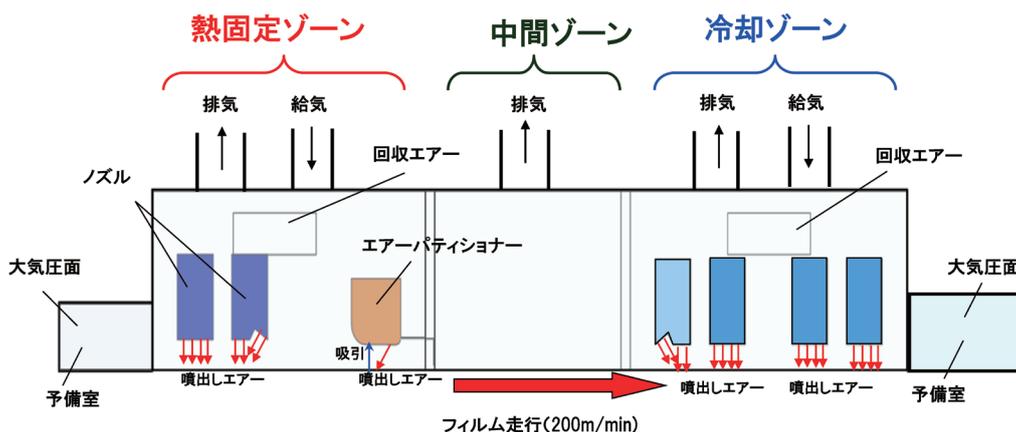


図12 エアパーティショナーの設置位置



解析I条件(随伴抑制効果確認)

- ①熱固定・予熱ゾーンの前後からのフィルム随伴流を模擬するため、前後に大気圧の予備室を設けた。
- ②各ゾーンに給・排気量条件を設定した(ただし、中間ゾーンは排気のみである)。
- ③フィルムの走行速度は、200m/minとした。
- ④各ゾーンの各ノズルに噴出エアを流量で設定した。
- ⑤エアパーティショナーの噴出エア速度は5m/min、吸引流量は80m³/minとした。
- ⑥性能評価のために、エアパーティショナーのエア噴出、吸引流量ありとなしの条件とした。(吸引流量ありは、エアパーティショナー-onと称し、吸引流量なしエアパーティショナー-offと称する。)

解析II条件(補収率の評価)

- ①解析Iと同様な解析条件で、エアパーティショナーの前に、添加剤を模擬した粒子(飛散粒子成分)を100万個配置。
- ②フィルム内部の圧力が安定する所定の時間まで解析を実施し、中間ゾーン(評価位置1)や冷却ゾーン(評価位置2)の一定体積中に滞留する飛散粒子成分の個数をカウント。
- ③補修率を飛散粒子成分の個数/100万ppmと定義して評価。

図13 気流解析モデル

(2) 解析結果

図14に解析Iの結果を示した。図14(a)には、エアパーティショナー on、図14(b)はエアパーティショナー off の中間ゾーン内の風速の大きさと流れ方向を示している。また、図15に on と off の状態で、熱固定ゾーンから中間ゾーンに流れ込む添加剤を含んだ随伴流量 Q_1 を比較している。

図14、15より、エアパーティショナー on の場合は、中間ゾーンに流れ込む Q_1 が $1.1 \text{ m}^3/\text{min}$ に対して、エアパーティショナー off の場合は $3.4 \text{ m}^3/\text{min}$ と、約3倍添加剤成分が流入する量が多いことがわかる。また、エアパーティショナー on の場合は、中間ゾーン内の気流の乱れが少ないが、エアパーティショナー off の場合は、中間ゾーンに高温の Q_1 が大量に混入することで、ゾーン内の圧力バランスが乱れている。そのため、冷却ゾーンからも冷却エアが流入し、中間ゾーン内で添加剤を含む随伴流と冷却ゾーンから混入した冷却エアが攪拌されながら舞い上がっている。以上のことより、エアパーティショナーを設置することで、中間ゾーンに流入する随伴流量 Q_1 を70%程度低減することができ、添加剤の中間ゾーンでの拡散を抑制できると推察される。

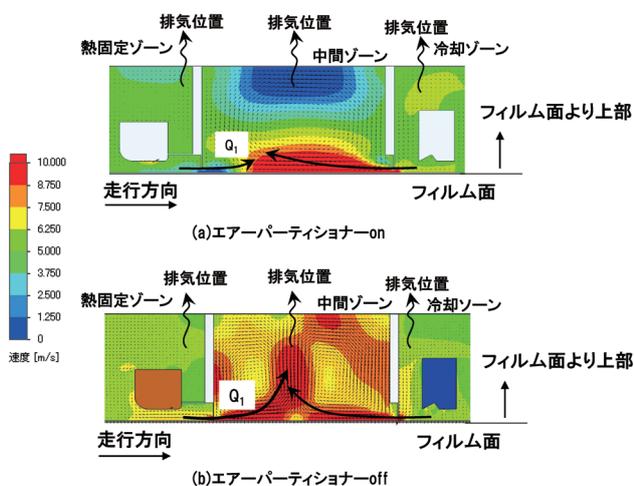


図14 中間ゾーンの風速のコンター表示

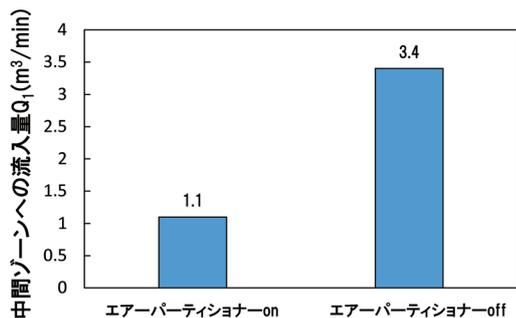


図15 樹脂添加剤の流入量

図16に、冷却ゾーンへの添加剤へ流入量を評価するために行った解析IIの結果を示す。中間ゾーン評価位置1では、エアパーティショナー on は 24ppm、off の場合は、18ppm と、on の場合は 25% 混入量が低減する。計測位置2では、on の場合は4、off の場合は2ppm と流入量が50%低減している。

(3) 解析の実験検証

解析結果を検証するため、生産機内に汚れ成分の濃度が計測可能な全炭化水素計を設置し、解析した位置で添加剤の飛散粒子濃度の計測を行った。図17には、測定位置と結果を示す。測定位置は、フィルム面に対して下側に20mm、側面から100mmの位置とした。図17に示すように、エアパーティショナー設置前と後では添加剤飛散粒子は中間ゾーンで55%低減し、冷却ゾーンでは、25%低減していることが分かった。解析は幅方向全体の平均的な値であるのに対して、実験は局所的な値であるため、若干相違が認められるが、実験でも解析と同様の効果があることが分かった。本報告では、ライン速度 $200\text{m}/\text{min}$ の結果のみであるが、ライン速度 $400\text{m}/\text{min}$ 以上の生産ラインにおいても、本装置を設置し、樹脂添加剤のフィルムへの付着が低減することも確認済みである。

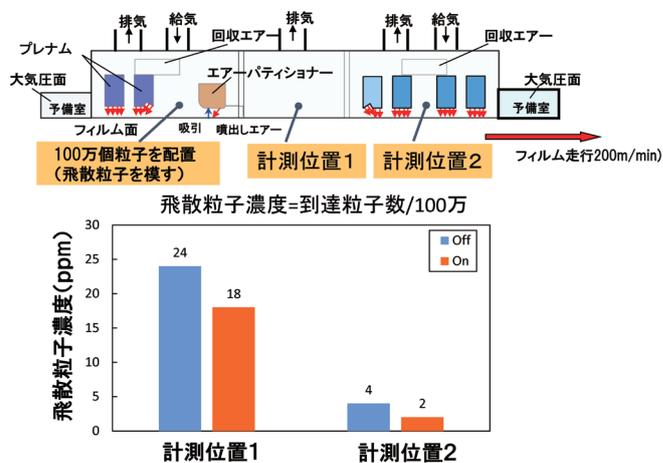


図16 樹脂添加剤の粒子追跡

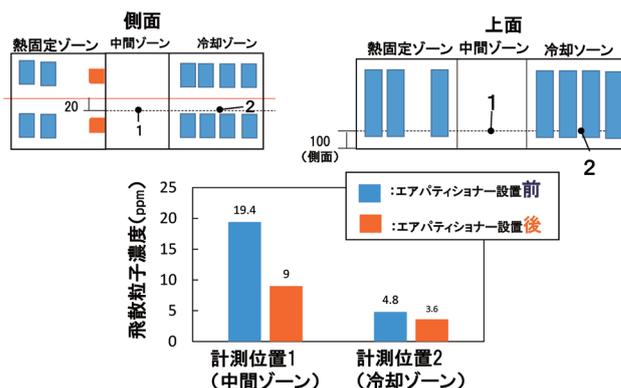


図17 粒子追跡の検証試験

4. まとめ

BOPP用横延伸機にはライン速度 500 m/min 以上の高速化が求められるとともに、清浄なフィルム品質が求められる。そこで、高速化対応するために採用した、非接触方式クリップ開閉動作安定性についての検討と、エアパーティショナーによるフィルムへの樹脂添加剤付着の対策を行った。

非接触開閉方式は、フィルム延伸条件によって、必要以上のすべり摩擦力が生じないようなセレーション形状と、磁石配置に依存せず広い範囲で、開力が高い値を示すフラッペ形状を検討した。これらの検討結果より、セレーションとフラッペの組み合わせを最適化することで、ライン速度に限らず、より広い延伸条件においてクリップの動作安定性を確保することが出来るようになった。

フィルムへの樹脂添加剤付着については、エアパーティショナーを設置することで、冷却ゾーンへの添加剤成分の流入が 50%低減できることが分かった。

今後も、BOPP用横延伸機を改良・改造することで、より生産性を向上させ、品質の高いフィルムを生産できるように、装置の完成度を高める活動を実施する。

参 考 文 献

- (1) 金井俊孝, フィルム成形のプロセス技術, p411
- (2) 大藪英雄, 高温潤滑課での機械摺動面の摩擦摩耗特性, 日本製鋼所技報, 62号(2011), p19
- (3) 大藪英雄, クリップ装置, 特許公開番号 2011-031528号
- (4) 串崎義幸, BOPP フィルム用横延伸機加熱ノズルの開発, 日本製鋼所技報, 66号(2015), p122
- (5) 日本機械学会, 機械工学便覧 a2 機械工学 (2004), p30
- (6) 立林和夫, 入門タグチメソッド (2004)