

(技術資料)

# 新型大型樹脂混練機 (LCM-IM)

## Newly Developed Large Size Continuous Mixer (LCM-IM)



山口和郎\*<sup>1</sup>  
Kazuo YAMAGUCHI



黒田好則\*<sup>1</sup>  
Yoshinori KURODA



岡田 徹\*<sup>2</sup>  
Toru OKADA

A new generation continuous mixer has been developed to cope with the advancement of bi-modal high density polyethylene (HDPE), which is more difficult to mix. Basic mixing experiments were carried out to confirm that the new continuous mixer, which has been developed on the basis of a new mixing theory, effectively eliminates the gels of the bi-modal HDPE film and exhibits mixing performance superior to that of conventional continuous mixers. Furthermore, a new technique for measuring the action force of mixing has been developed. This technique was used to obtain data, which was analyzed by a newly established analysis method to confirm the mechanical reliability of the new continuous mixer.

まえがき＝一次造粒に使われる LCM のような大型混練機 (図 1) に対しては、樹脂製造工程の上流のリアクタで重合されてできたパウダ状の樹脂を溶融、混練し、必要な添加剤などを均一に混合することが求められる。そうしたなか、近年では、耐久性や強度に優れ、かつ成形性もよい Bi-Modal HDPE (High Density Polyethylene, 高密度ポリエチレン) 樹脂の開発が盛んになってきている<sup>1)</sup>。これら新開発 HDPE 樹脂には従来材料に比べて原料パウダ中の高分子成分の均一化が困難で、混練が難しいグレードがある。

そこで、このような新開発の Bi-Modal HDPE 樹脂への対応のため、混練操作の中心的役割を担うロータ形状の従来の設計理論を発展させ、かみあい型ロータを採用することによって従来ロータより優れた混練性能を得ることに成功した。

また、混練時にかみあいロータが受ける反力は未知であったことから、その反力を正確に測定する方法を開発した。これによって測定した反力を設計に適用でき、かみあい型ロータ採用の混練機としての信頼性を確保することができるようになった。

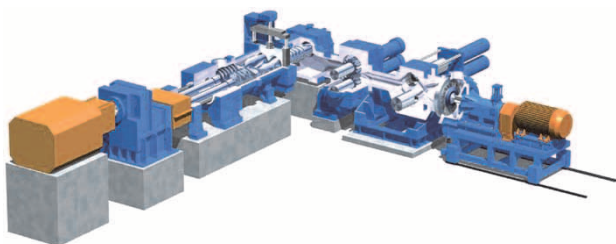


図 1 大型樹脂連続混練機 LCM-H  
Fig. 1 Continuous mixer and pelletizing system (LCM-H)

### 1. 混練ロータ開発

まず、より省エネルギーで高混練品質が得られるロータ断面形状を 2 次元モデル試験機を用いて探索し、その断面形状を連続混練機に適用するという手順を採った。

#### 1.1 混練理論

ゲル (未分散高分子塊) の分散は、混練翼による樹脂流動から生じるせん断や伸長の流体作用力による。当社では従来、混練翼チップ通過時のせん断応力、およびチップを通過し材料がせん断応力を受ける回数を基礎として混練性能を評価していた<sup>2)</sup>。近年開発されている Bi-Modal HDPE 樹脂の混練品質を確保するため、従来のロータ形状に対してはせん断応力を大きくすること、およびチップ通過回数を増加させることに主眼をおいていた。

したがって生産機においては、生産量を減らして滞留時間を増加させ、チップ通過回数を増加させるか、チップクリアランスを小さくして高せん断応力を与えることになる。しかしながら、結果として消費エネルギーが増加することや、樹脂温度が過度に上昇して樹脂劣化が生じるなどの問題が起こることがある。また、生産量を確保するためには大きいサイズの混練機が必要になる。

新型連続混練機の混練翼断面形状を新たに設計するにあたり、せん断による混練作用に加えて伸長による混練作用も重視し、与えるエネルギーに対してゲルの減少率が最大になるようエネルギー効率を考慮した。

このように、生産量を従来機械サイズで確保し、低エネルギーで品質を達成することを新型連続混練機の開発目標とした。

#### 1.2 混練評価方法

ガス管などへの用途となる HDPE のパイプ用グレー

\*<sup>1</sup> 機械事業部門 産業機械事業部 樹脂機械部 \*<sup>2</sup> 技術開発本部 機械研究所

ドについては、カーボンを混合分散させた際の白のこり (White Spot) をゲルとみなし、その大きさ (以下、ISO ratingという)、および量 (白残り面積比: White Spot Area, 以下WSAという) によって評価する。図2にゲルの含まれる顕微鏡写真の例を示す。

### 1.3 2次元モデルによるロータ断面形状の評価

#### 1.3.1 実験方法

ロータ断面形状を評価するため、2次元モデル実験装置を使用した。これは、連続混練装置の2次元断面を模して混練実験を行う装置である (図3)。二つのロータのかみあい度合いを接線型とかみあい型2種類とし、チップクリアランスと作用面の傾斜角度 (Front Angle) を主たるパラメータとして15種類のロータ断面形状を準備した (表1)。

これらのロータを2次元モデル試験装置にセットし、パウダ材料と着色用カーボンブラックパウダを投入した。所定の時間混練運転した後、熔融混練された材料を取り出し、ISO ratingとWSAを比較した。

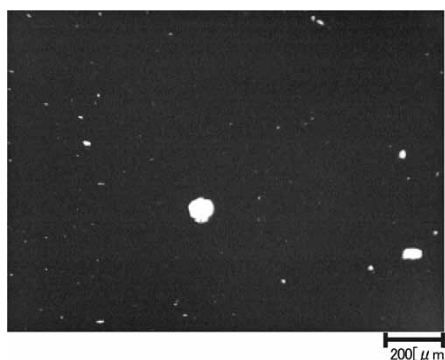


図2 カーボンブラックで着色したポリエチレンコンパウンドペレット中のゲル (白残り)

Fig. 2 Gels (white spots) in polyethylene compound pellet colored by carbon black

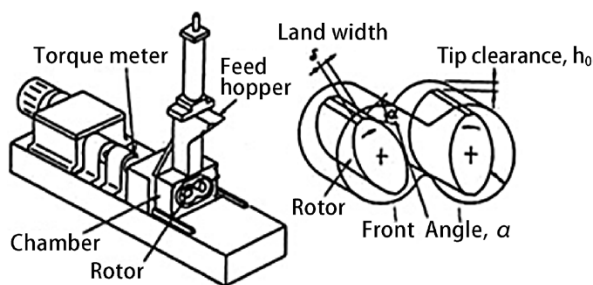


図3 2次元モデル試験装置

Fig. 3 Test mixer of 2D model

表1 2次元モデル試験用ロータ断面形状

Table 1 Cross-sectional shapes of rotors for 2D model test

		Front angle			Land width	New concept shape
		Small	STD	Large	Large	
Tip clearance	Narrow	Rotor # 15A	Rotor # 15B	Rotor # 15C	Rotor # 15L	Rotor # 15P
		Rotor # 15E	Rotor # 15F [STD]	Rotor # 15G	Rotor # 15M	Rotor # 15Q
	STD	Rotor # 15H	Rotor # 15J	Rotor # 15K	Rotor # 15N	Rotor # 15R
	Wide					

#### 1.3.2 実験結果

一般に混練作用と混練エネルギーはおおむね比例関係となり、エネルギーが大きいほど混練が進む。実験結果の中で、小さい投入エネルギーで混練結果のよいロータが高効率で高性能なロータということになる。

そこで、ロータ形状ごとの分散能力の結果は、混練に要した総エネルギーを充填量で除した値である比エネルギーで正規化して比較した。標準接線型ロータ群の中で最も良好な、すなわち低い投入エネルギーで良好な混練性能を示した15Fロータ、およびかみあいロータ群の中で最も良好であった15Qを用いた場合の2次元モデル試験装置での混練時間と混練物のWSA値の減少の様子を図4に示した。

接線型ロータでは、チャンバ内壁とロータチップ間の楔 (くさび) 状空間で生じるせん断作用が主な混練作用である。標準接線型ロータ群の中でも15F形状が最も効率良く混練物にせん断作用が与えられる形状と考えられる。

かみあいロータ群の中では、15Q形状が15F形状よりもさらに良好な性能を示した。すなわち、短い混練時間で非常に良好なWSA値となった。かみあいロータでは、従来のチャンバ内壁とロータチップ間のせん断作用に加え、ロータがかみあう中央付近で複雑な流動場が生じ、伸長作用流が発生しているものと考えられる。伸長応力場では、せん断応力場と比較してより小さいエネルギーでゲルが分散する。このため、より効率的にゲル分散が行われたものと考えられる<sup>3)</sup>。

#### 1.4 連続混練機への適用

連続混練機のロータは、材料を下流へ送るスクリュ部と混練作用を与えるロータ部からなる。ロータ部は、比較的リードの長いねじれを持っており、ロータ回転時に材料を送る方向と戻す方向を組み合わせるのが一般的である。

候補としたロータ断面形状を連続機に適用する際にも、送り部と戻し部の長さ、ねじれ度合い、および従来接線ロータも含めて組み合わせ、最適となる組み合わせを探索した。

種々の組み合わせ実験の結果、従来LCM-Hの混練思想を踏襲した2段混練型ロータ構成とし、第一混練部に

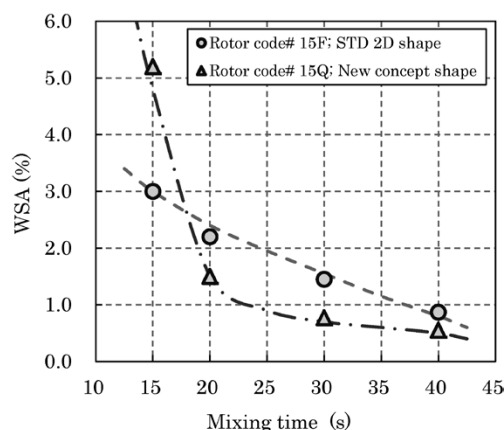


図4 2次元モデル試験装置による混練実験結果

Fig. 4 Relationship between WSA reduction and mixing time

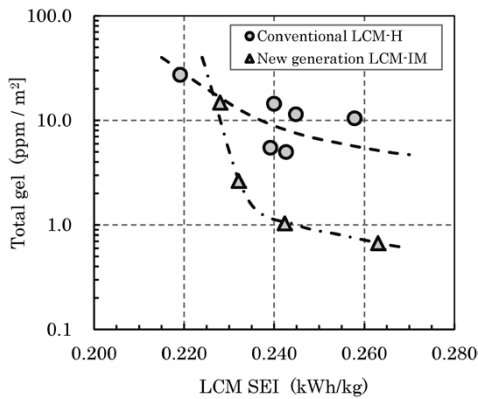


図5 連続混練機による混練実験結果  
Fig. 5 Gel reduction in film by SEI

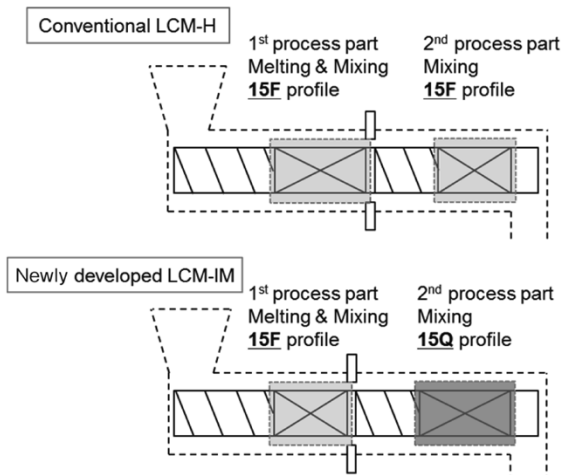


図6 従来LCM-Hおよび新型LCM-IMのロータ構成の比較  
Fig. 6 Comparison of rotor arrangements between conventional LCM-H and newly developed LCM-IM

接線型ロータを、第二混練部にかみあい型ロータを適用した構成が最も混練性能が優れていた。従来LCM-Hと新型開発機LCM-IMによってBi-modalのHDPEフィルム用グレードを混練造粒し、作成したペレットをフィルム状に成形した。そのフィルム中のゲルの総面積の減少を混練に要した比エネルギー（SEI）で整理した結果を図5に示した。

また、開発した新型LCM-IMのロータ構成模式図を従来型LCM-Hと比較して図6に示した。新型LCM-IMでは第1段目に15F断面、第2段目に15Q断面を採用している<sup>4)</sup>。

## 2. 混練荷重測定

LCMの設計において、混練荷重は重要な要素である。LCMでは、樹脂の熔融混練に必要な力をロータの回転による機械的作用力として与える。ロータにはその反力が発生する。また2軸押出機と異なり、ロータを支えるベアリングでこの反力を支持する。このため、ロータは繰り返しの曲げ応力を受けることになり、許容応力を超えれば疲労破壊に至る。

混練荷重は、LCM開発当初から形状を変更する都度、測定を行ってきた。しかし、かみあいロータについては前例がなく未知である。このため、新たにかみあいロー

タを採用するにあたり、その混練荷重をより詳細に測定した。

### 2.1 混練荷重測定システム

新型LCMの混練ロータは二段混練を採用しており、第一混練部と第二混練部を備える。それぞれの混練部における作用力を独立して測定するために、ひずみゲージによる荷重測定システムを構築した。

ロータは、ドライブエンド側に2点、ウォータエンド側に1点の合わせて3点のベアリングで支持されている。このため、混練荷重が付加されたときのたわみは不静定梁（はり）問題となり、混練荷重が2か所に作用するモデルでは、重ね合わせ原理が適用できる。図7にロータ支持方法とひずみゲージ設置位置、荷重位置の関係を示す。

ドライブエンド（DE）側とウォータエンド（WE）側のそれぞれのひずみ値は、第一混練部と第二混練部それぞれに作用する混練荷重によるひずみ値の合成値となる。そこで、第一混練部および第二混練部それぞれに単独に荷重を付加した場合のひずみ値をあらかじめ測定しておき、荷重—ひずみの線形係数 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ を求めておく。第一混練部と第二混練部に作用する混練荷重をそれぞれ $F_1$ 、 $F_2$ 、DE側ひずみを $\varepsilon_{DE}$ 、WE側ひずみを $\varepsilon_{WE}$ とすると、混練荷重と測定されるひずみの関係は次の連立式で表される。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{DE} &= \alpha_1 \cdot F_1 + \alpha_2 \cdot F_2 \\ \varepsilon_{WE} &= \beta_1 \cdot F_1 + \beta_2 \cdot F_2\end{aligned}$$

この連立方程式に測定したひずみを代入して解くことにより、第一混練部と第二混練部にかかる混練荷重を独立して求めることができる<sup>5)</sup>。

### 2.2 混練荷重測定結果

測定した混練荷重の事例を示す。第一混練部および第二混練部で測定した混練荷重変動を図8に示す。また、混練部で最大荷重が発生した瞬間の混練荷重方向と大きさを図9に示す。

これらの評価結果を基に、運転中のロータに作用する荷重を考慮しつつ、折損などの恐れのないロータ設計が可能である。

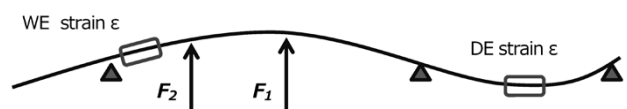


図7 混練荷重とひずみの関係  
Fig. 7 Relationship between mixing force and strain

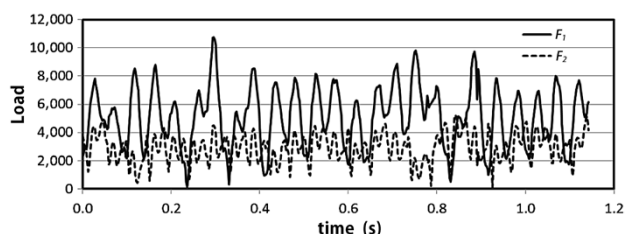


図8 混練荷重の時刻歴波形  
Fig. 8 Time history of mixing force



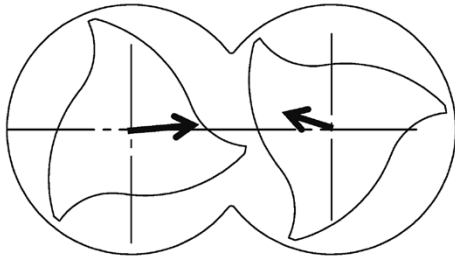


図9 混練荷重方向測定例

Fig. 9 Example of mixing force direction measurement

むすび=新型連続混練機の開発における混練性能向上のためのロータ形状開発と、それをサポートする精度の高い混練荷重測定技術の開発は車の両輪であり、当社の大型造粒機開発の根幹であると考えている。HDPEの材料開発は、材料メーカーにおいて今も引き続いて行われてい

る。当社の連続混練機もその開発に遅れを取らないように常に混練性能を向上させていく必要がある。

本稿で紹介した技術は今後のロータ開発において基礎となるものである。さらに、当社技術開発本部で開発中の流動解析技術を組み合わせることによって、市場の要求にタイムリーに応えられるものと考えている。今後とも技術開発体制を整え、競争力をさらに向上させていく所存である。

#### 参 考 文 献

- 1) 永井洋三. 日本ゴム協会誌. 2007, 80巻, 8号, p.315-316.
- 2) 井上公雄ほか. R&D神戸製鋼技報. 1994, Vol.44, No.3, p.53-56.
- 3) ㈱神戸製鋼所. 連続混練装置. 特許第5832172. 2015-11-06.
- 4) ㈱神戸製鋼所. 連続混練装置. 特許第6242232. 2017-11-17.
- 5) ㈱神戸製鋼所. 混練機の混練ロータに発生するロータ荷重を求める方法, ロータ荷重演算装置, および混練機. 特開2016-028877, 2016-03-03.