

高機能樹脂の安定した品質は混練・分散工程から —オープンロール連続式混練機「ニーデックス」

岩 本 玄 徳*

はじめに

近年、自動車の低燃費化が急速に進み、軽量化のために多くのプラスチックが採用されるようになった。車載用のプラスチックには機械的高強度、寸法安定性、耐熱性、絶縁性などが求められ、ガラス繊維や炭素繊維などの強化材や無機フィラーを組合せたコンポジット材の開発が盛んに行われている。

また、電気・電子機器の分野では小型化、高容量・高出力化が進み、装置内部は高密度になっている。その結果、発生する熱エネルギーが大きくなっていることから、放熱対策が課題になっており、コスト、加工性や質量の観点から、高分子材料に熱伝導性フィラーを配合した高熱伝導性高分子複合材料の開発も行われている¹⁾。

このように多種多様な機能を付加するためには、フィラー材、安定剤、顔料などの配合材を樹脂中に均一に分散させる必要があり、ゴム・プラスチックの製造工程では、樹脂を加熱・溶融させた高粘度状態で混練する操作が必要となる。特に近年は機能を向上させるためにフィラーの高濃度配合が求められるケースが多い。

この操作で使用される混練機には押出機、ニーダ、コニーダ、バンバリミキサなどがある。これらと比較して2本ロール混練機には次の特徴がある。

- ① 強力なせん断作用を有する
- ② 比較的低温で処理できる
- ③ 揮発分の除去
- ④ 混練状態を目視で確認できる
- ⑤ 洗浄が容易で多品種・小ロット生産に適する

特にほかの混練機では分散できない場合や、少量・多品種生産へ対応できることから2本ロール混練機を使用している例も多い。

2本ロール混練機の多くはバッチ式で、ロール師と呼ばれる熟練工による付き切りでの作業が必要である。この作業は3Kの最たるもので、昨今はロール師不足という深刻な問題を抱えている。

また人手によるためにロットムラを防ぎきれない状況にある。

当社のオープンロール連続式混練機「ニーデックス」は、2本ロール混練機本来の機能を維持し、混練後の材料をシート状またはペレット状で連続的に取出すことを可能とし、連続化による省力化と品質の安定化を達成したものである。本稿では、その基本的な機構と最新のラインナップについて紹介する。

1. 「ニーデックス」の構造と特徴²⁾

図1に装置とロールの外観を示す。本機は、連続式の2本ロール混練機である。その特徴は、前後のロール表面にスパイラル溝を設けたことにある。

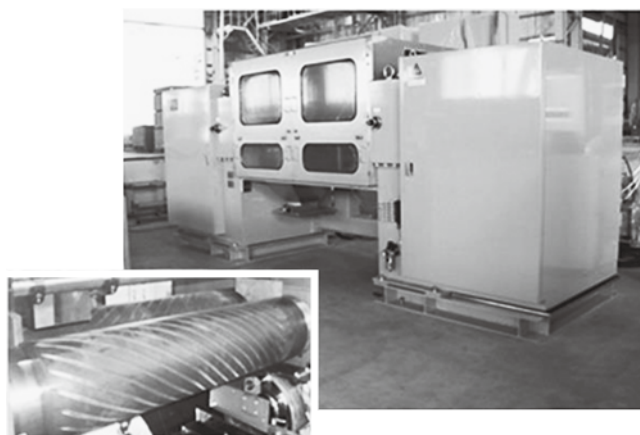


図1 「ニーデックス」及びロールの外観

* Motonori Iwamoto
日本コークス工業㈱ 化工機事業部
Tel. 0282-28-1161
Fax. 0282-28-1150

この溝が材料の搬送作用を生むと同時に、原材料の食い込み性とバンク部での混合作用の向上を図っている。また、滞留時間を確保するためにL/D（Lはロールの長さ、Dはロールの直径）を大きくしていることも特徴で、これらにより処理の連続化が可能となった。

前後2本のロールは個別のインバータモータで駆動され、回転速度及び回転比は広い範囲で任意に設定でき、ロール間隙は0.3～5mmで調整できる。

ロールの温度調節は熱媒体または冷却水による。媒体の通路はスパイラルとし温度分布の均一化を図っている。通路は各ロールに左右独立したゾーンがあり、材料や処理の目的に合わせ、4つのゾーンそれぞれで温度調節が可能である。なお、熱媒体の温度は標準仕様で250℃、オプションで最高350℃まで使用可能となっている。

このように、多様な運転条件が設定できるため、1台でいろいろな材料の混練が可能である。

ロールの加圧は油圧シリンダによって行う。また、この油圧シリンダを利用してロール間隙を50mmまで開放することができる。この開放はいつでも可能で、特に洗浄時に有利である。

ロールの材質は窒化鋼を標準とするが、特に摩耗性の強い材料の場合は超硬溶射も可能である。

1.1 混練機構

原材料はロールの左側に定量供給される。ここで溝の効果により、強力な圧縮・せん断作用を受けながらニップ部（ロール間隙部）に食い込まれる。また、ニップ部での発熱とロールからの伝熱とにより樹脂が軟化・溶融しロールに巻き付くことになる。どちらのロールに巻き付くかは温度や回転比で決定される。混練作用と安定運転のためには前ロールのみに巻き付かせることが必要である。

巻き付いた材料は、溝的作用により吐出側に送られる。この過程で、更に

圧縮・せん断作用を受け、また、バンク部での効果的な対流によりマクロ的な混合が行われて混練が進行していく。図2に混練機構の模式図を示したが、実際には各作用が同時に進行する。なお、溝内もニップ部を通過する時の強力な作用によりセルフクリーニングが行われ、ここに未混練物が残ることはない。

図3は溝の有無によるバンク（ロール溜り）部分の流動状態の比較である。溝のない通常の2本ロールでは、バンク部の対流は層流に近く、単にバンク中心部が回転するだけになって、回転中心部が混合できないことがある。ま

た、軸方向の入れ替わりもないため、混合作用は皆無に近い。これが通常のロールで人手による切り返し操作が必要とされる理由となる。

更に、溝がある方は折りたたみの作用が見て取れる。これは混練に必要な基本的な作用で、分散に寄与する。この作用によって、切り返し操作を行うことなく混練・分散が進行し、処理を終えた材料はロール末端部に設けた後述の装置により取り出される。

1.2 取出装置

ストリップカッタとペレタイザの2種類があり、交換が可能である。それ

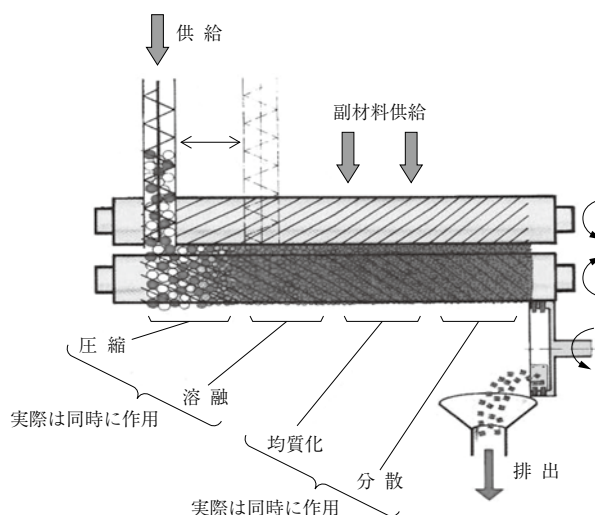
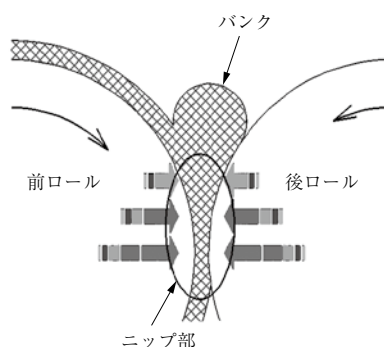


図2 混練機構



処理物：S-PVC + 青色顔料
回転速度：20min⁻¹
混練時間：15sec

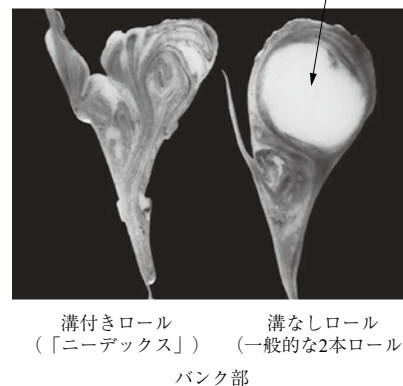


図3 バンクの流動

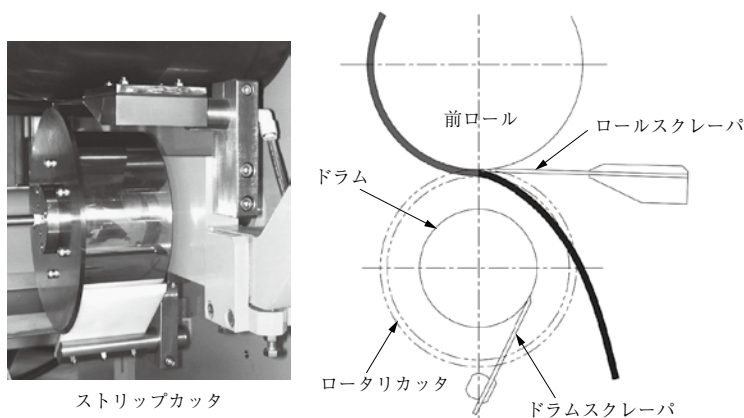


図4 ストリップカッタ

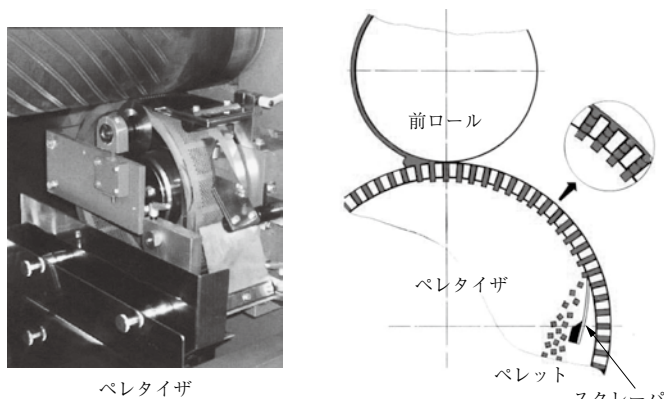


図5 ペレタイザ

それぞれの機構を図4、図5に示す。

ストリップカッタは、前ロールに巻き付いた材料層に回転刃を押し付けてこれをカットし、スクレーパによりシート状に取り出すものである。

ペレタイザは、多数の穴を設けたペレタイザリングを材料層に押し付けて、穴を通して内側に突き出た材料を固定刃でカットすることにより、ペレットを作製するものである。これは一種のホットカット形式で、ペレタイザも温度調節ができるようにジャケットを設けている。

2. 混練に影響を及ぼす諸因子²⁾

「ニーデックス」の操作条件を検討する場合、まず、どのような材料をどのような目的で混練するのかを考える

必要がある。熱硬化性樹脂で反応を伴う場合は温度と滞留時間が重要なファクターとなるし、配合剤の凝集物をつぶすのか、逆にガラス繊維のように繊維を切らずに混練するのかによってその操作条件が変わってくる。

したがって、せん断力の大きさと、そのせん断力をどの程度受けるかを考える必要がある。

ロール機の場合のせん断応力 σ は次式で与えられている。この σ を大きくする条件にすれば分散性が向上することになる。

$$\sigma = \frac{2\eta u \sqrt{Dh}}{hx} g(\theta) \quad (1)$$

ここで、 η は粘度、 D はロール径、 u は前後ロールの平均速度で $u = \pi D (N_F + N_B)/2$ 、 h はロール間隙、 x はバ

ンク高さである。また $g(\theta)$ はロール間隙とバンク幅に関わる複雑な関数である。

バッチ式混練機の場合の処理時間に相当する因子としては、滞留時間よりもむしろロール間隙（ニップ部）を何回通過したかで考えた方がよい。ニーデックスでの平均的な通過回数 n は次式で与えられる。

$$n = \frac{\pi h (D+h) LN}{Q} \quad (2)$$

ここで、 L はロールの有効長さ、 N は回転速度、 Q は吐出量である。

2.1 ロール温度

ロール温度を適切に設定、把握することは最も重要な因子である。

処理にあたっては、まず材料をロールに巻き付かせることが不可欠である。したがって、供給部分では速やかに樹脂を軟化・溶融させることが必要となる。次に、(1) 式で最も大きく影響する材料の粘度をコントロールする必要がある。強力なせん断作用を得るためには温度を下げるのが有効となるが、温度を下げ過ぎると巻き付いたシートが剥離する、過度のトルクがかかるなどの不具合を生じる。

これから、ロール設定温度は、供給側を軟化点+20℃、吐出側を軟化点程度とすることが多い。

2.2 回転速度

(1) 式と (2) 式から、回転速度が速いとせん断応力が大きくなり、通過回数も増加する。また、回転速度は溝による材料の搬送作用にも影響し、高速回転の方が搬送力も大きくなる。したがって、強い混練を目的とし、また大きな吐出量を得ようとする場合は高速回転の方が有利となる。

図6はロール温度を含めて他の条件を一定とした場合の各材料における回転速度と動力との関係を示したものである。

熔融時の粘度変化が急な材料ほど傾きが小さくなる傾向があり、動力の増加に伴う発熱で粘度低下が顕著になることを示している。ロール温度を下げることでせん断応力の低下を解消することができるが、それでも過度の力はせん断応力の低下を招くので注意が必要である。

2.3 回転比（フリクション比）

回転比を大きくするほど、局所的に大きなせん断応力が発生し、分散効果が得られる。

ただし、回転比を過度にとると、ニップ部への食い込みが悪くなってバンクがショートパスしたり、巻き付いたシートが切れたりするので注意を要する。

2.4 ロール間隙

(1) 式から間隙は小さいほどせん断応力が大きくなる。また、圧縮力も大きくなり材料の巻き付きにも有効となる。しかし、(2) 式から通過回数は減少することがわかる。

凝集物を破壊するために大きなせん断応力が必要なら間隙を小さく、凝集強度の弱い材料の場合は大きめにするなど、処理の目的に応じた設定が必要である。

3. 押出機ほかとの比較

2本ロール機と押出機及びほか混練機の大きな違いは、せん断作用域の大きさにある。図7に示すように、2本ロール機の場合は間隙の小さな範囲でしかないが、例えば二軸押出機では特に大きなL/Dとともに、混練ブロック相互とバレル間で大きな作用域を持っている。

(1) 式のせん断応力に作用域の面積を乗ずれば力となり、更に半径を乗ずればトルクとなる。仮に2本ロール機と同じせん断応力を二軸押出機に与えようとすれば、非常に大きなトルクが必要になり、軸強度に問題が生じる可

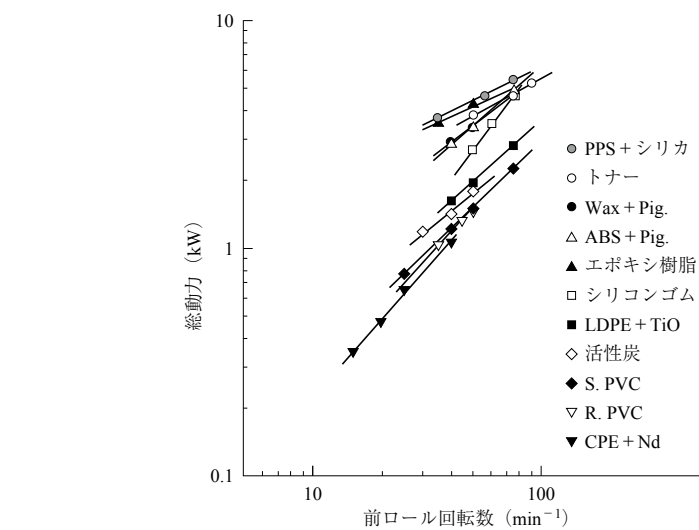


図6 前ロール回転速度と総動力

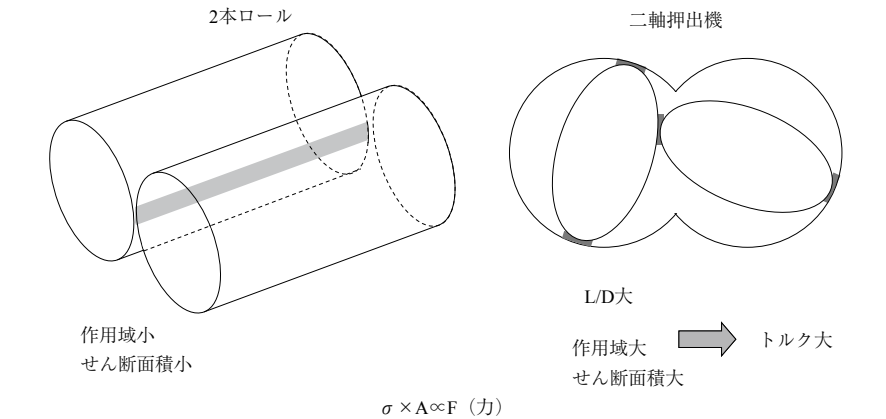


図7 2本ロールと押出機の比較

能性が高い。ほかの混練機も同様で、2本ロール機がいかに強力なせん断作用を持つかが分かる（表1）。

また、これが高粘度物を混練でき、圧縮作用も含めて高フィラー配合ができる理由である。実際に、押出機では希釈・分散ができなくなるような高フィラー配合のマスターバッチでもペレット化までの処理が可能であった。最近では、フィラー高充填による粘度上昇が原因で、押出機では作製が困難であった高熱伝導性高分子材料の作製に成功している³⁾。

ほかに、材料によっては「ニーデックス」のようなオープン型でないと混

表1 2本ロールと押出機の比較

	2本 ロール	二軸 押出機
作用域	小	大
せん断応力	小	大
生産性	小	大
高フィラー配合	可	難
粘度差ある配合	可	難
洗浄性	容易	難

練できないものもある。例えば熱硬化性樹脂である。もし、密閉型の装置内で硬化反応が進んでしまったら清掃に大きな労力が必要になるが、オープン型は材料の除去、洗浄が容易に行える。

4. スケールアップ

スケールアップ時の吐出量や装置条件を考える場合も、処理の目的・内容は何かが重要である。また、テスト結果からどの条件が律速になっているかの見極めが必要である。

(1) 式から、スケールアップにおいて次の設定条件でおこなえば、せん断応力 σ が等しくなる。またニップ部で発生する圧力も等しくなり、これらが基本条件となる。

回転速度： $N_F = \text{Const.}$ $N_B = \text{Const.}$

ロール間隙： $h = h_0 \cdot D/D_0$

材料温度： $t = \text{Const.}$ ($\eta = \text{Const.}$)

同じ分散にするためには、同じ大きさのせん断応力を同じ時間と回数だけ与えればよい。これは上の基本条件と(1)(2)式とから次式を得る。

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (3)$$

Q_0 , D_0 , L_0 はテスト機の条件である。 $L/D = \text{Const.}$ なら吐出量はロール径の3乗に比例する(表2)。

5. 高温タイプの開発

鉄鋼やセラミックスの代替として注目されるスーパーエンジニアリングプラチックは融点が300℃を超える高融点樹脂が多い。「ニーデックス」は熱媒体でのロール温度調節で350℃まで使用できるため、このような樹脂の混練も行える。

しかし、熱媒式の場合、ロールを支える軸受け部も高温になってしまうため、機械的に厳しい使用環境となる。潤滑油が漏洩した場合、軸受けが破損する。また、機械的な破損に伴って、高温の熱媒体が漏洩した場合には、オペレータが火傷するなどの人身事故が発生する可能性もあるため、安全と機械保護の両面に配慮した設計が必要である。

そこで、当社では誘導発熱方式を採用した「ニーデックス」を開発した。誘導発熱によりロールの処理有効範囲のみを温度調節することで、軸受け部の発熱を最小限にできる。これにより、軸受けの使用環境が標準仕様と同等となり、前述の軸受け破損や熱媒体が漏

洩するリスクがなくなった。

更に、ロール表面温度を最高400℃まで使用できるようになり、従来よりも高融点の樹脂混練が可能となった。

また、従来はロール温度調節のためのユーティリティとして温度調節器が必須であった。熱媒体を使用する場合、温度調節器本体や配管からの媒体漏れや、給油作業などにより、製造現場を清潔に保つことは困難であった。誘導発熱方式を採用した場合、温度調節器が不要となるため、設置の省スペース化はもちろんのこと、熱媒体による製造現場の汚染防止も可能となった。

5.1 処理例

表3に当社で行った基礎試験の結果を示す。

配合及びロール温度、回転速度、回転比などの運転条件を一定として、原材料の供給位置を変更し、PPS(「トレリナ」A900, 東レ)とガラス繊維(ECS03-631K, セントラルグラスファイバー)の混練処理を行った。

ここで用いたPPS原料はペレット状

表2 標準仕様

型 式	単位	MOS100-400	MOS160-560	MOS240-840	MOS300-1050	MOS380-1330
ロール寸法	mm	$\phi 100 \times 500$	$\phi 160 \times 800$	$\phi 240 \times 1,040$	$\phi 300 \times 1,360$	$\phi 380 \times 1,720$
ロール有効長さ	mm	400	560	840	1,050	1,330
ロール回転速度	min^{-1}	7.5 ~ 75	7.5 ~ 75	7.5 ~ 75	7.5 ~ 75	7.5 ~ 75
動 力	kW	5.5	7.5 × 2	22 × 2	45 × 2	90 × 2
隙間調整	mm	0.3 ~ 5	0.3 ~ 5	0.3 ~ 5	0.3 ~ 5	0.3 ~ 5
幅	mm	1,350	2,800	3,300	4,600	5,140
奥行き	mm	750	820	1,360	1,800	1,900
高 さ	mm	1,000	1,450	1,800	1,900	2,000
重 量	kg	700	1,500	4,500	9,000	13,000

表3 高温タイプの基礎試験結果

材料名	単位	PURE PPS	PPS + GF			PURE PEEK	PEEK + GF
ロール有効長	mm	—	210	420	840	—	840
シャルピー衝撃強度	kJ/m^2	2.5	6.2	7.5	7.0	6.8	7.4
引張り強度	MPa	82.3	135	148	147	96.6	145
破壊応力	MPa	77.9	135	148	147	80.6	145
破壊ひずみ	%	8.2	2.4	2.2	2.2	26	2.4
破壊呼びひずみ	%	6.8	2.9	2.8	2.8	20	3.2
引張り弾性率	MPa	3,690	9,590	10,600	11,200	3,910	10,300
GF平均長	μm	—	242.7	351.5	275.6	—	201.0

でロールに巻き付きづらい形状だったため、前処理として当社のセントリカッター⁴⁾を用いて平均粒径350～400 μm 程度まで粉碎した。

ガラス繊維を分散させたPPSは原料と比較すると、すべての条件で機械的特性が向上した。また、供給位置を変えることで滞留時間が変化するが、ロールの処理有効長420mmの位置で供給した場合に、ガラス繊維の平均繊維長が最も長くなり、機械的特性も最も向上した。

また、PEEK (Victrex PEEK 450G, Victrex plc.) についても類似の試験を実施したところ、機械的特性が向上した。

今回示した処理例のガラス繊維濃度は30wt%だが、60wt%以上の高配合も可能である。

6. バッチ式小型試験機の開発

前項までで述べたように「ニーデックス」は多様な混練処理に対応できる。しかし、連続式であるため、条件出し試験を行うためには数kgから数十kgの原料が必要になる場合もある。したがって、スーパーエンブラや稀少なフィラー剤を用いる場合、原料を準備することが困難などの理由から、試験が行えないケースが散見された。

そこで、約50～100mLと少量で試験できるバッチ式の小型試験機を開発した。基本仕様を表4に、外観を図8に示す。

はじめに述べたとおり、バッチ式の2本ロール混練機は人手による切り返しが必要である。しかし、当社が開発した小型試験機は、ロールにスパイラル溝を設けた連続式「ニーデックス」の特徴をそのまま有しているため、直接材料やロールに触れる必要がなく、簡単かつ少ない操作で人手の切り返しと同じ効果が得られるため、短時間で処理が行える。

実際には材料や目的によって処理時間は異なるが、早いものだと1バッチ

表4 小型試験機の仕様

型 式	単位	MOS060-200
ロール径	mm	$\phi 60$
ロール有効長さ	mm	200
ロール回転速度	min^{-1}	Max.58
動 力	kW	0.75
隙間調整	mm	0.1～1.5



図8 「ニーデックス」小型試験機の外観

当たり5min程度で処理ができる。洗浄性も良く、材料変更が容易なため、1回の試験で運転条件、配合、材料など多くの検討が行える。

これにより、混練処理の可否確認や配合などの各種検討が少ない材料で、非常に簡単に行えるようになった。

おわりに

「ニーデックス」は、ここで述べたように他の混練機では処理できない高フィラー配合だけでなく、粘度差のある配合材の混練も得意とする。また、合成木材、封止材、ボンド磁石、ワックス入りで混練困難なカラートナーなどでも多く利用されている。

更に、当社では小型試験機の開発により、初期の配合、条件検討から生産機へのスケールアップまでが、よりス

ムーズに行えるようになった。

はじめに述べたとおり、近年、プラスチックには多くの機能が求められており、高機能プラスチックの発展は我々の生活を豊かにし、産業を牽引していくものと考えており、優れたコンポジット材の創造に利用いただければ幸いです。

参 考 文 献

- 1) Y. Agari, Polymers, 3 78 (2006).
- 2) 中野要介, “オープンロール連続押出機「ニーデックス」,” 第90回日本資源学会, 40, No.3 (1993).
- 3) 奥山杏子, “高充てんアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の新規加工法と熱伝導率評価,” 第39回日本熱物性シンポジウム (2018).
- 4) 関根靖由, “ダブル冷却構造を搭載した低融点樹脂用粉碎機の開発,” プラスチックスエージ, 64 (1), 68 (2018).