

第1章

成形加工法の種類と押出加工の位置付け

見本

押出加工における単軸スクリュー押出と二軸スクリュー押出は、現状では、前者はチューブ、電線、ケーブル、シート、異形品、タイヤ等の製品押出しに使用されている場合が多く、後者は、塩化ビニル、各種プラスチックのコンパウンドすなわちペレットを製造することに主として使用され、特に導電性、難燃性、各種機能性コンパウンドに使用される場合が多いように思われる。

押出加工技術の最近の研究は、次のような項目に注目し、そのための材料、設備、加工技術のバランスの取れた研究が強く望まれている。

① 押出機、関連設備の性能向上

温度制御技術の向上、スクリュー構造の研究(単軸、二軸)

② 押出材料の粘性流動性の研究とシミュレーション技術の確立

可視化技術の研究、伸長流動の研究と加工中の材料劣化の抑制

③ 加工不良対策と品質向上

オンライン性能評価技術



本書では、単軸押出加工設備を主とした押出加工技術を中心とし、ゴム、プラスチックを対象材料とした押出加工技術を説明することにしたい。また、従来加工工程中に加硫、架橋が起るゴム、エラストマーに関する押出技術の文献が少ないことを考慮して、こちらに少しウェイトをおいて記述していきたい。

(1) 混合・混練	①ロール ③密閉式混練機	②ニーダー ④二軸押出機
(2) 一次成形加工(射出成形)	①射出成形 インライン方式、プリプラ方式 ②電動射出成形 ③ハイブリッド(油圧-電動)射出成形 ④超高速射出成形 ⑤射出圧縮成形 ⑥多色多材質射出成形 ⑦ガスインジェクション射出成形等	
(3) 一次成形加工(押出成形)	①汎用、多層押出成形 ③異形押出成形 ⑤紡糸-フィラメント押出成形 ⑦電線押出成形	②フィルム、シート押出成形 ④発泡押出成形 ⑥チューブ、パイプ押出成形 ⑧架橋PE連続架橋電線ケーブル押出成形
(4) 一次成形加工 (中空-ブロー押出成形)	①ダイレクトブロー押出成形 ②射出中空押出成形 ③多層中空押出成形	
(5) 一次成形加工(発泡成形加工)	①射出発泡成形	②押出發泡成形
(6) 一次成形加工(粉末成形)	①回転成形	②焼結成形
(7) 二次成形加工(熱成形)	①真空成形	②圧空成形
(8) 二次成形加工	①熱加工 ③接合 ⑤表面処理	②塑性加工 ④接着

図 1-1 成形加工法の分類

第2章

押出機の基本と実際の押出作業に影響する
ポイント

見本

4. 将来計画，実作業に影響する重要ポイント

4.1 バレル径によって決まる押出機の能力

押出機の能力(容量)はバレル径によって決まる。最初に自社製品の種類，サイズ，生産量を決め，それに応じて購入する押出機のサイズ，能力を決めるが，将来の計画をよく検討して決めなければならない。図2-5に示すようにサイズと製造能力の関係を参考にとるとよい⁵⁾。

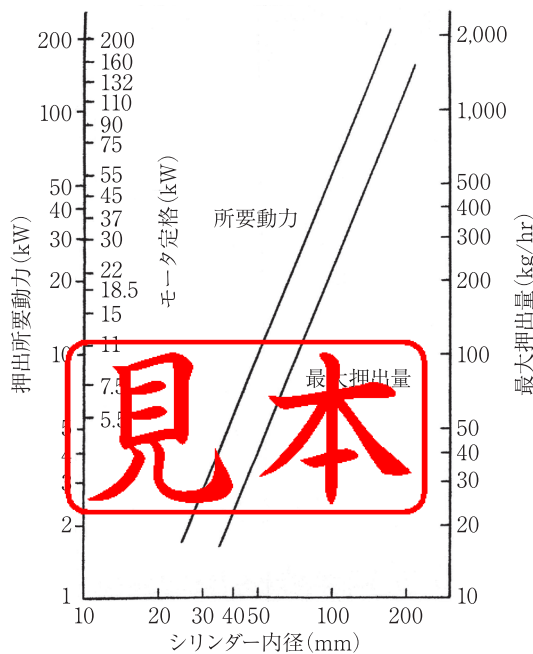


図2-5 バレルのサイズで決まる単軸押出機の容量

4.2 スクリュー構造による押出機の性能の違い

スクリュー構造は押出機の性能を左右する。以下にスクリュー構造の違いが押出機の性能に与える影響を記す。これらの詳細は，後述の第3章3.2項を参照されたい。

- ・ スクリュー基本構造(フルフライト型，バリアー型，ミキシング型)
可塑化効率，ブレイクアップ現象，不良対策に差が出る
- ・ 計量部の溝深さ(浅溝，深溝)(図2-6，図2-7参照)
押出量の大小と変動は二律背反の関係にあり(浅溝は変動は小で押出量少ない)
- ・ せん断流動型スクリュー構造，伸長流動型スクリュー構造
押出製品特性への影響あり(伸長流動は劣化が小)

第3章

押出作業の基本工程での生産性向上，品質向上
(不良低減)のための実践技術

— 押出機，押出材料，粘性流動性と適正加工性指標等
からの考察 —

見本

2. 押出機内の材料の溶融、流動、移送と基礎的な押出理論

第2章で述べたように、押出機内の材料はバレル内にセットされたスクリーウの回転による基本的な移送機構によって進み、バレルにセットされた加熱源と材料自身のせん断発熱によって軟化し、溶融された材料がホッパーからスクリーウ内部、先端部のメッシュを通過してプレークプレートからヘッド、ダイへと送られていく。この時、材料がどのような溶融状態でスクリーウ各部を通過しながら移動していくかということは、適正な押出しを行うために大変重要なことである。ここでは、適正な押出しを行うためのスクリーウ内の押出材料の溶融挙動と移送の状態を確認し、押出しの基礎理論を述べたい。

2.1 押出機内での押出材料はどのように溶融して流動するのか

押出機内の押出材料は、バレルの外側に設置されたヒーターや熱媒体の循環等により、バレルとスクリーウの間を流れる際に加熱される(図3-16、図3-17)。すなわち、熱源からの伝熱、ふく射熱等による加熱である。また、スクリーウ回転による材料自身のせん断発熱による温度上昇がある。これらによって押出材料が軟化、溶融し、スクリーウの溝内をヘッド方向に流れていく。このせん断発熱は、押出材料の動的損失係数、粘度およびせん断速度が大きいほど大きい。そのためプラスチックよりゴムの方がせん断発熱が大きい。このせん断発熱は材料の過熱による劣化、ゲル化、スコーチ現象に繋がることもある。また、このせん断発熱を上手く利用すると省エネ押出しに役立つともいわれている。

$$\text{せん断発熱 } \Delta T = 2 \cdot L \cdot \eta \cdot \gamma \cdot J \cdot \sigma \cdot C \cdot R$$

η : 材料粘度, γ : せん断速度, C : 比熱, R : ガス定数

優れた押出製品を作るために、スクリーウ構造、特に計量部の溝深さや加工条件(温度、せん断力、せん断速度等)等による基礎的な押出理論、可視化技術やシミュレーション技術によってスクリーウ内での溶融モデルが作られている(図3-18)。スクリーウ構造の詳細は後述するが、材料を投入するホッパー側からペレットの大部分が固体状のまま移動する供給部、溝の深さが徐々に浅くなり材料を圧縮しながら移動させる圧縮部、溶融が完全に終了し均一な粘度の流体となって流れる計量部の3ゾーンからなっている。

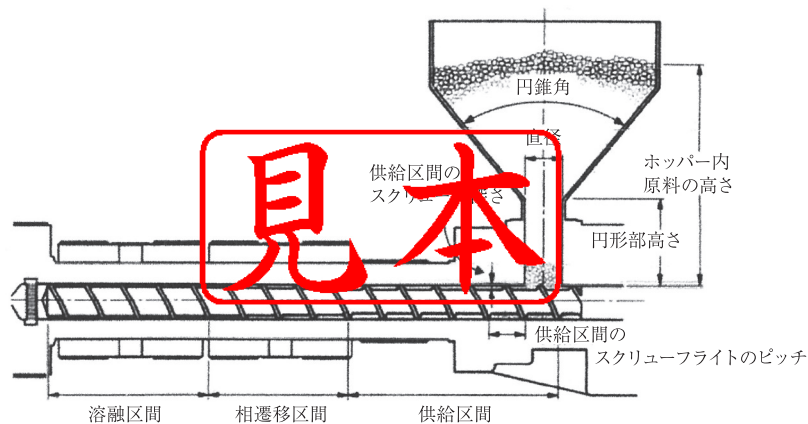
ここで重要なことは、スクリーウ各部における適正な溶融である。図3-18にも記載してあるが重要なことなので再度以下にまとめておきたい。

3. 押出工程(ホッパー, スクリュー, ブレーカープレート, メッシュ, ヘッド, ダイ)での押出成形の実践技術

3.1 ホッパー部

ホッパーからの材料フィード方法が押出製品の品質に大きな影響を与えることは、実際にはあまり認識されていないのではないだろうか。均一なフィードが製品品質に与える影響を以下にまとめて示す。

- ① 均一な押出量に繋がり、外径変動、コブ等の不良を減らす。
- ② スクリュー内への空気の巻き込みを減らし、スクリュー内での材料の劣化を防止し、ゲル化、変色を低減する。またボイドの生成を抑える(図3-25)。



- (1) ベレット形状 (2) ホッパー下部の開口面積 (3) 円錐面積
- (4) ホッパー内材料高さ (5) 供給部スクリー溝深さ, 形状
- (6) 供給部スクリーフライトピッチ (7) 供給部シリンダー温度

図3-25 ホッパーにおけるフィードの安定性向上のポイント

- ③ パレル, スクリュー, 材料との摩擦力のバランスを保ち押出量の安定性を確保し, 生産性の向上に繋がる。既に第2章3項で述べたように, パレル表面の粗面化は, 押出量と生産性の向上に顕著な効果を示すことを忘れてならない(図3-26)。

3.2.4 スクリュー設計，構造に関する改良および実践技術

スクリューは押出成形の中で最も重要な役割を担っており，従来その研究開発が進められている。設計，構造および実際の押出作業に従事するにあたり，必要な実践技術をまとめておきたい。

(1) バリヤー構造，ミキシング構造

練り効果，可塑化効率の進歩に貢献するバリヤー構造，ミキシング構造，スクリューフルフライト構造は，標準的なスクリュー構造として押出成形に貢献しているが，限定された長さの中で効率的な練りと可塑化効果を望むのは無理があり，どうしても可塑化を促進する機構が必要である。そこで提案されたのが，スクリューの圧縮部終わりから計量部に設けられるバリヤー構造，ミキシング構造である(図3-31)。

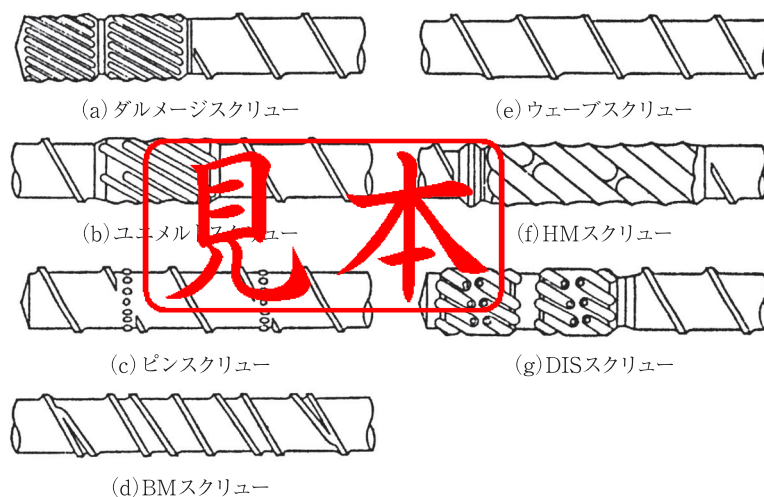


図3-31 各種スクリューのバリヤー構造，ミキシング構造

この構造は，スクリュー計量部の最初の溝から3溝に設けられるのが一般的な設計になっている。それ以上設けても効果は変わらず，逆に押出量の減少に繋がりがねないので3溝が一般的である。この中の代表的なものを取り上げ少し詳しく説明しておきたい。

図3-31 (d) BMスクリューは，スイスのマイファー社の特許製品で既に数十年前に提案されており，現在は第3世代の新しい特許が提案されている。もちろん基本原理は同じである。世界的に最も広く使用されている構造であり，成形加工学会にノーベル賞があれば受賞に値する技術であるともいわれている。

このスクリュー構造の原理は比較的シンプルであり，図3-32に示すモデル図で説明する。すなわち，スクリュー計量部の3溝に従来のフライトに沿ってサブフライトを付ける構造と

第4章



押出成形で注目される課題

見本

前章までで、押出成形の基本技術として押出機の構造や押出しの原理等について、成形の実践技術としてヘッドからダイまでの押出工程の基本的な技術をゴム、プラスチックで代表されるポリマーを対象に述べてきた。本章では、その中でも少しゴム材料に重きを置いてプラスチックと対比しながら押出加工技術を考えることにし、従来の押出加工技術の専門書の中では詳細な考察が不足していると考えられる次のような課題について考察したい。

- ① ゴムとプラスチックの押出加工性の比較
- ② 押出加工性向上のための押出材料の混練技術(主としてゴム材料)
- ③ 押出加工性向上のための押出材料の配合技術(ゴム, プラスチック)
- ④ ゴム, プラスチックの押出-連続加硫(連続架橋)技術
- ⑤ 押出加工における生産性向上と品質

1. ゴムとプラスチックの押出加工性の比較

ゴムとプラスチックの押出加工性は大きく異なる。これは粘弾性特性の違いから流動特性に差があるためである。第3章(2項でも触れたように)流動速度が変化した時の粘度の変化が大きく異なる。押出加工性から見たポリマーは、熱可塑性樹脂とゴムに分類するとわかりやすい。

これらポリマーの加工性評価のための加熱による溶融時の粘度は、基本的に図4-1(c)のように非ニュートン流動(擬塑性型流動)を示し、粘度はせん断速度が増加すると放物線状に低下する。これをゴムとプラスチックに分けて示すと、図4-2のようにプラスチックは非ニュートン流動を示すが、ゴムは全く異なり直線関係を示す。しかも、ゴムの種類、配合剤の配合量に関係なく、その勾配はパワーロー方程式のべき定数 n の値が約0.3で一定である。これは第3章でも説明したように、ゴム自体の粘度が高いことと多量のカーボンブラック、白色フィラー、その他配合剤が配合されており、その影響が大きく出ているため起こる現象であると説明されている。

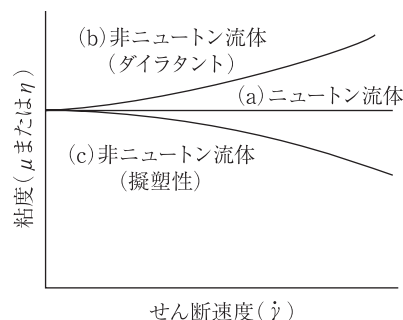
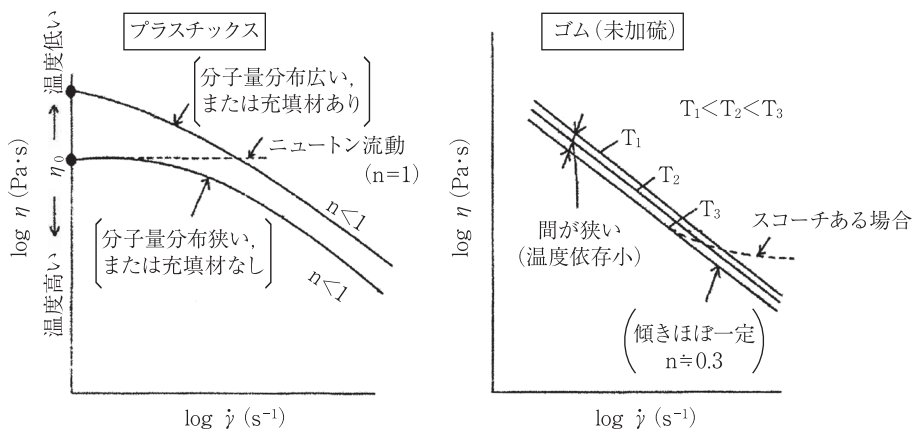


図4-1 ポリマーのニュートン流動, 非ニュートン流動における粘度のせん断速度依存性



プラスチックは典型的な非ニュートン流動を示すが、ゴムは全く異なる挙動を示す。

図4-2 ゴムとプラスチックにおける粘度のせん断速度依存性(細管流動計で測定)

プラスチックは典型的な非ニュートン流動を示し、せん断速度が増すと粘度は放物線状に低下することは明らかであるが、樹脂によっては低下する勾配を示すべき定数 n の値が異なる。この各種樹脂の n 値を表4-1⁶⁾に示すが、プラスチックを結晶性樹脂と非晶性樹脂に分類すると、非晶性樹脂の n 値は、PC樹脂を除いて結晶性樹脂に比較して小さいものが多く、せん断速度の変化に対する粘度の変化が大きいことを意味する。一方、ゴムは、ゴムの種類、配合剤の種類、配合量を変えてもほとんど同じ直線関係である。

表4-1 各種プラスチックのパワーロー方程式におけるべき定数 n の値

樹脂	ガラス転移温度 T_g (°C)	結晶融解温度 T_m (°C)	べき定数 n	測定温度 (°C)	備考
PVC	77		0.14~0.42	150~220	非結晶性樹脂 PCのみ例外 PC以外はべき定数 n の値が結晶性樹脂より比較的小さい
PS	100		0.33	165~250	
PMMA	105		0.33~0.37	200~260	
ABS	110		0.25		
SAN	115		0.30		
PC	150		0.70		
LDPE	Δ 120	110	0.37~0.53	160~290	
LLDPE	Δ 120	125	0.34~0.50	151~262	
HDPE	Δ 122	140	0.60		
			0.40~0.63	161~274	
			0.40~0.43	170~230	
			0.36~0.37	210~320	
			0.43~0.48	220~300	
PP	Δ 10	165	0.30~0.42	240	
PVDF	Δ 40	170	0.38		
PA6	50	220	0.70		
PBT	22	224	0.60		
PA66	50	260	0.75		
PET	69	265	0.60		
FEP	70	280	0.60		

2. 押出加工性向上のための押出材料の混練技術(主としてゴム材料)

優れた押出製品を作るには、ゴム材料の配合と混練性が優れていることが極めて重要である。加工性を向上させる配合については次項で、特に加工助剤、加工性付与剤を中心に説明する。ここでは、混練性についてゴムの混練設備と混練方法の観点から説明したい。

まず、混練技術と後述する配合の問題の前に押出加工に適した原料ゴム、ベース樹脂の選択の問題で基礎的かつ重要な T_m (結晶融解温度)、 T_g (ガラス転移温度)の関係から考えてみたい。

押出しに使用する代表的なゴム、プラスチック材料の T_m と T_g を表4-6に、 T_m と T_g および押出加工温度との関係を図4-16に示す^{6,7)}。一般的にポリマーの温度上昇による弾性率の変化は、図4-17に示すように一定の相関性がある³⁰⁾。そしてポリマーの分子量、分子構造とも関係しており、ゴムについての加工性、特性との関係を表4-7に示す。

表4-6 各種ゴム、プラスチックの T_m と T_g (°C)

高分子物質	T_m	T_b	T_g
シリコンゴム			
ポリジメチルシロキサン	-52~-54	-60~-65	-125±7
メチルフェニルシロキサン(含有ゴム)	-	約-90	-112
ポリブタジエン			
高シス-BR	約-2	-97~-107 ^{b)}	-95~-110
低シス-BR	-	-74~-96 ^{b)}	-75~-85
高トランス-ポリブタジエン	100~110	-	-83
1,2-BR ^{c)}	156	-	-
ポリイソプレン			
NR	14~28	-55~-62 ^{b)}	-69~-74
IR	-	-56~-67 ^{b)}	-68~-72
1,4-トランス-ポリイソプレン	65~74	-	-
ゲッタペルカ	55~65	-	-53
IIR	-	-48~-51 ^{b)}	-67~-75
EPDM	-	-90,-70 ^{b)}	-50~-58
SBR 25% スチレン ^{d)}	-	-44~-46	-57
NBR 20% アクリロニトリル ^{e)}	-	-	-57
40% アクリロニトリル ^{e)}	-	-18~-22	-29
CR	30	-35~-39	-45~-50
多硫化ゴム	-	7~-50	-
ポリエチレン			
低密度	109~125	<-70	-125,-21
高密度	130~135	<-70	-125,-21
ポリプロピレン	165~175	-	4~-12,-20~-35
ポリ塩化ビニル	-	<-40	80~85
ポリスチレン	-	-	80~100

a) 含有量10 mol%, b) 加硫ゴム, c) 98%シンジオタクチシティ, d) T_g (コールドラバー) = $(-78+1.28S)/(1-0.005S)$. ただし, S: 含有スチレン重量%²⁾, e) T_g = $(-85+1.40A)$. ただし, A: 含有アクリロニトリル重量% (A=20~40の範囲で成立).

5. 押出成形における生産性向上技術

押出成形における生産性向上は、最も注目されている課題であり押出設備(押出機本体、スクリュー、ダイ等主要設備)、押出加工条件、押出制御技術、押出材料等の総合技術の十分な検討が必要となる。このような観点から、ここで説明する内容は既に述べてきた内容と少し重複するところも出てくるがその点はお許しいただきたい。

5.1 設備面から見た生産性向上のための施策、確認項目

以下のような押出機および押出工程全体から整理してみたい。

- ・ 押出機の容量の決定と各部の押出量低下減少要因の確認
- ・ 容量(スラストベアリングの強度、バレル内径、最高スクリュー回転数)
- ・ ホッパー(ペレットサイズ、リボンサイズ、形状、真空引き、ドライヤータイプ)
 - (供給部スクリューフライト構造、強制送りロールタイプ、振動付与タイプ)
- ・ スクリュー構造(L/D、圧縮比、構造、バリヤー、フルフライト、ミキシング)
 - (供給部/圧縮部比率、圧縮部/計量部比率、スクリュー冷却)
 - (計量部溝深さの決定—スクリュー特性曲線からの検証)
 - (バレル内面粗度、スクリュー面粗度(摩擦係数の検証))
 - (スクリュー特性曲線とダイ特性曲線の比較と作業点の確認)
- ・ ブレーカープレート/メッシュ(メッシュ大きさ、材質、設置枚数、絞り比検証)
- ・ ヘッド構造(内部流路の流動解析による圧力降下の確認と修正)
- ・ ダイ構造(ダイアングル、コンパウンドスペース、ダイランド長と圧力降下の確認、ダイ温調とダイ構造の修正)

押出機を選択では、生産性向上のための考え方として重要なことは、容量の大きな余裕のある押出機を揃えることではなく、適正な容量の最も効率的な押出機を揃えることである。自社で生産する製品の種類、サイズを考慮し、適正な容量、サイズを選択することである。最大許容スクリュー回転数の意味をよく理解し、メーカーの保証値を過大評価しないで精度の高い製品製造能力を確立することである。そしてバレルは高価であるためスクリューを目的に合わせて数本作ることを基本としたほうが経済的であることを銘記しておくことが大切である。

生産性向上には、ホッパーの均一なフィード、品質向上のための機能性ホッパー(ホッパードライヤー、真空引タイプ、振動付与型、フィードローラー補助型、均一食込み型スクリューフライト構造、バレル供給部の適正温調精度)、押出ペレット、リボンのフィード性能の改良(プ

第5章



押出成形のトラブル対策



押出成形の最近の課題は、品質の向上とトラブルの撲滅が重要な課題としてクローズアップされてきている。これは、言い方を変えるとトラブル対策が徹底されれば品質が向上することになるわけであり、現場での生産技術のレベルアップに繋がるからである。

ここでは、ゴム、プラスチックを中心とした押出材料を対象として代表的な押出製品に発生するトラブルを取り上げ、押出設備、加工技術、押出材料の面からその対策をまとめてみたい。

押出成形においては、加工製品の品質を支えるのは押出材料、押出設備、加工条件とその制御技術であるといわれており、製品不良の問題を議論するにはこの3大要因から考察することが好ましい。

しかしながら、この考察は要因が複雑に関連しているので必ずしも明確な対処法があるわけではなく、適切な対策を講じることは難しい。まず押出材料の特性、制御条件(加工条件)を整理しておく必要がある。参考資料として図5-1、表5-1～表5-3に示す³⁹⁾。ここに示されているようにトラブル対策には相互の要因が複雑に関連しており、考察が難しくなることが理解できよう。

見本

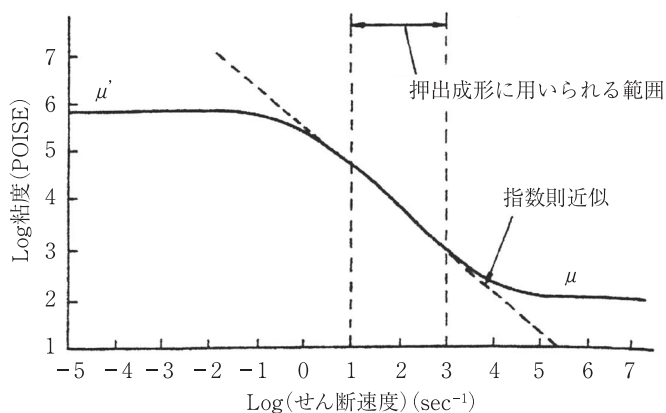


図5-1 押出材料の粘度特性

表5-1 押出加工性から見たポリマー材料の特性と加工性への影響

特性	押出加工性への影響
熱可塑性	粘度, 流動性, 変形
熱分解性	ゲル化, ヤケ, 押出安定性, 劣化
熱の不良導体(銅の1/3,000)	溶融時間, 押出条件の制御性
高粘性流体(水の106倍)	粘度, 流動速度, 生産性, 省エネ
非ニュートン流体	温度制御, 圧力制御, せん断速度, シミュレーション解析
粘弾性体	流動性, 粘度, 変形
粉碎品, 添加剤(かさ密度)	フィード性, ボイド, 粘度の変動, 製品特性の変動

表5-2 押出成形の主な不良原因とプラスチックの性質との関係

