

ファイン バランス

—卓越さと平凡さの違いにおいて

A Fine Balance - The Difference between Excellence and Mediocrity

リチャード・ディクソン *1) Richard DICKSON
ポール・ロビンス *2) Paul ROBBINS
ヤーハ・マムードカーニー *3) Yahya MAHMOODKHANI
訳：高木 茂 嘉 *4) Shigeyoshi TAKAGI

アルミニウム押出メーカーにとり、生産性／収益性は必須の改善・向上目標である。その改善に対処する上で、メーカーによっては従来の技術に加えさらに新たな技術も追及し、そこでの諸種パラメータを実行して改善するケース（スーパー押出メーカー）がある一方で、普通に考えられる改善パラメータに終始する、普通の押出メーカーがあるのも事実である。著者たちは、生産性のベンチマーク指標をベネット・ナンバー（参考文献を参照）から、コンタクト効率（実際の押出時間サイクル率）、歩留、ラム速度を引用、更に著者らが関わる押出コンテナ（ヒーター内蔵で3層構造）等の押出工具：特に押出中コンテナ内に発生する熱の、外部への放散性を強調、ピレット合金材の挙動、生産性に寄与するダイ設計、等より、7種のパラメータについて有限要素法シミュレーション・モデリングも交えスタディーし、生産性への最適化を解析している。そして個々のパラメータは必ずしもすべてがベストに突出する必要はなく、それらの組合せの中でバランスをとること、最も重要な概念は材料、時間、速度の3要素がバランスしていること、と結論付けしている。

緒 言

平均的な押出メーカーを、卓越したスーパー押出メーカーに潜在的に変えるために、測定、設備、プロセスにおけるベンチマークの手順や諸種の改善手順が、広く文献で議論されてきたが¹⁾、この種の知識のすべてにおいて、恩恵を受けたのは主

にスーパー押出メーカーであった様に思える²⁾。それらメーカーは生産性と収益性において最大の利得を実現している一方、普通のメーカーは僅かな改善のみで後塵を拝している。これは何故なのだろうか？

ケルビン卿（注：絶対温度を導入）がかつて言っていた言葉に、“人が何かについて話そうとしていることを測定できる時、それについて何かが分かっている。数で表現ができない時、その知識は乏しく不満足な類である。知識の始めであるかもしれないが、考え方において科学の状態にほとんど進んでいない³⁾。押出操業における3種のバ

*1 Hydro Aluminum Metals USA, PhD

*2 Castool Tooling Systems, Canada, General manager
EXCO Technologies, Canada, Vice president

*3 Castool Tooling Systems, Canada,
Process Simulation Engineer, PEng

*4 テクノコンサル ベンチマークス、技術士（金属部門）

ラメータについてベネット・ナンバーを引用して、R・フィールドィングは 押出操業でのベンチマーク化について説明している^{1),8)}。

それらは次の様に名付けられている；

- コンタクト効率：全押出サイクルに対する実質の押出サイクルの比率
- 歩留：使用したピレットに対する売上げに供する押出材の重量比率
- ラム速度：押出速度への表示

これらベネット・ナンバーがどうバランスしているかによって、全生産性に大きな影響がある点、注意をするに値する。

一定の押出機デッドサイクルタイムとピレット長さにおいて、生産性の高い押出機ではコンタクト効率は最も低くなるのが一般的である。コンタクト効率を上げる最も簡単な方法は、より長いピレットを使用すること、非稼働時間に比例して押出時間が直ちに増加する。ある押出メーカーが、特にコイルの生産で期待される改善を経験したものの、長いピレットではコンテナ内での大きな摩擦問題を克服しなければならなかった。これは温度が高くなる程ダミーブロックへの応力が高くなることに起因し、メタルフローとバットシアーに問題がある⁴⁾⁻⁶⁾。残る選択肢としては、ラム速度を下げ、コンテナとダイスからの多い熱放散と相殺しない限り、生産性で望まれる利益はキャンセルされる。

歩留は、90%ないしはそれ以上も可能であるが、最高の生産性を上げる押出機では80%台の前半側で操業する。同様なことがラム速度についても言える。しかしながら、不良発生により低い歩留状態でラム速度が高い場合、良い結果にはならない。すべてでそうである様に、歩留と生産性の間の適切にバランスを見出す必要がある。いずれか一方に焦点を当てすぎると、卓越さを妨げることがあり得る。プロセスの全工程を見た時、1%の歩留ロスが生産性20%以上の改善が償うに値す

ることがある。

押出プレスサイクルは、1980年代初頭になされた、元のベンチマークスタディーとあまり変わらない。どの押出メーカーも、特定の型材と合金種に対し、同じ押出出口温度の制約に当面している。押出の物理的特性は同じで、各押出メーカーの対処する必要があるのは：

押出機の保有押出圧力で押出をする（低すぎると高過ぎるピレット温度、高過ぎると押出を遅らせる、ことを意味する）、

自動サイクルで押出をする（デッドサイクルタイム、無駄タイムを減らす）、スクラップを押出してはならない（残す厚いバットの押出は、スクラップ生産となり時間無駄にする）。

押出メーカーがこれらルールに従わないなら、お金をテーブルに置いておくか、ビジネスから出ていくことになる。

ムダの概念³⁾は、最高結果を達成するメーカーと、一般的多数のメーカーとの間の相違を理解する上で重要である。ムダは先ず同定され、除去する必要がある。これにベストを尽くすことで、ベストな押出メーカーになる。

ムダは多くの形で現れる

1. スクラップは、押出プロセスに現れる明らかなムダである。製品へのキズ等を最小にして下工程に流すと共に、押出工程計画（正確なピレット長さと合金種をもって正確な押出本数）において、詳細に注意を払いバランスが達成される。
2. 時間は容易に浪費され易い大切なリソースである。時間は本質的に稼働率、現実に売上げを達成している押出サイクルそのものに関わる。平均的な押出メーカーとスーパー押出メーカーの間にみられる違いは大きくなく、恐らく60%対65%程度である。この範囲は、全サイクルタイムのほぼ50~70%の範囲にある。ムダ時間には、押出プレスのデッドサイクルだけでなく、後面テーブル一杯、故障、ダイス交換等

表 1 押出工具の製作に使用する共通工具鋼の主要な材料特性

材料名	化学組成 (Wt%)							高温強度 500°C (MPa)	硬 度 (HRC)	衝撃強さ (ジュール)	熱伝導度 (W/mK) 室温 - 500°C	コスト 要因
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V					
4340	0.4	0.7	0.25	0.8	1.9	0.25	---	800	34-36	100	45-42	100
L6 (1.2714)	0.55	0.9	0.3	1.1	1.7	0.5	0.1	1000	38-42	40	36-35	150
H11	0.4	0.4	1	5	---	1.3	0.4	1000	38-42	30	25-30	190
H13	0.4	0.4	1	5	---	1.5	1	1100	38-48	25	24-29	200
E40K	0.35	0.3	0.3	5	---	1.75	0.8	1100	44-52	30-35	28-30	400+
Q10	0.36	0.4	0.25	5.1	---	1.9	0.55	1200	44-52	30-35	29-33	400+
DAC3	0.4	0.6	0.3	5.2	---	1.6	0.7	1300	44-52	30-35	25-33	400+
タフテンパー (Castool)	0.36	0.3	0.3	5	0.2	3.75	0.8	1300	44-52	25-30	30-35	400+

の非稼働時間が挙げられる。ここでいうキーとなるツールは、ベンチマーキングで、この後詳細に述べられる。新規の押出機に 10~12 秒のデッドサイクルが存在するが、既設の押出機にはスーパー押出メーカーは通常使わない。設備の信頼性に関連して非稼働時間を起こすことがあるためである。

3. ラム速度は、最大の変動性を潜在的に有している；6XXX 系の合金に対しては 3 mm/sec. から 18~20 mm/sec. の範囲で可能である。ここに平均的な押出メーカーとスーパー押出メーカーとの間に大きなギャップが示される。

押出における温度は、時として均等ではない。そこで、ピレット、コンテナ、ダイス、押出型材の温度の安定性を目指そうとする。正しい設備は必ずしも最新である必要はない。多くのスーパー押出メーカーは、最新の押出プレスと設備を保有しているとは限らない。

ファインバランスの事例

本報文では、いくつかの事例を、ファインバランスの概念と、それが如何に押出工場の生産性を改善するかで提示をする。各事例は、エンジニア

リングの世界ではモデリングの目的で使用され、十分に実証された有限要素ソフトウェア (HyperExtrude® および SolidWorks® プロフェッショナル) でのシミュレーション結果によりサポートされている。

工具材料の選定

押出工具 (コンテナ、ダミーブロック、ダイス) に対する最も重要な材料の特性は、摩耗抵抗、靱性、熱伝導度、そしてコストである。表 1 に何種かの共通の熱間工具鋼の特性リストを示す。適切な材料選定は、生産性を最適化するために、マシン能力を最大限利用するための材料間のバランスを保つ上でなされねばならない。

図 1 は、定常状態条件の下で働く、ヒーターを内蔵した 3 層コンテナのシミュレーションによる予測を示す。コンテナのモデリングの目的は、応力モデルではなくプロセスからの熱放散のモデル化で、それによりライナー温度を確実に安定化させるためである。

3 層コンテナの中間ライナー (サブライナー) に、2 種の異なる材料を使用してそれぞれに対する結果を比較した。即ち、低熱伝導度を持つ超硬度鋼 H13 (図 1 左) と、4340 鋼、高い熱伝導度を持つ高強度鋼 (H13 に対しては低強度) で

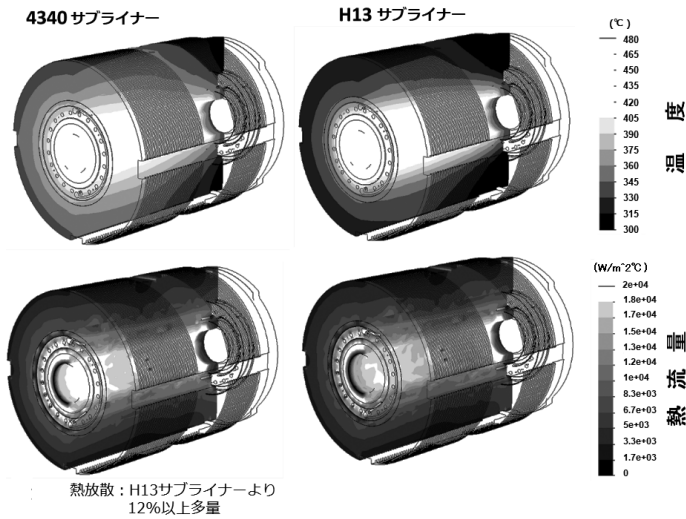


図1 4340 サプライナー（左）とH13 サプライナー（右側）の、コンテナにおける温度と熱の流れ

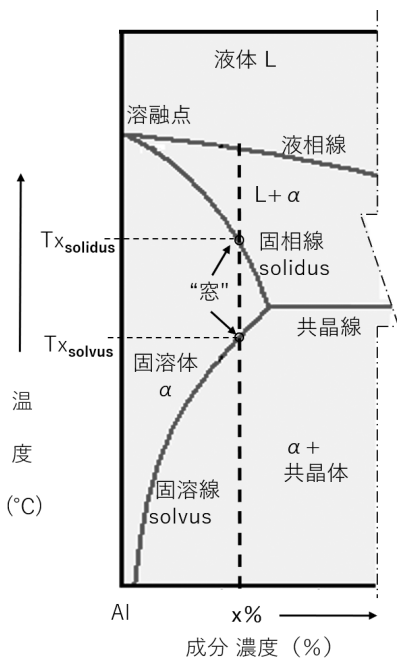


図2 金属平衡状態図から solidus-solvus 間の窓

ある。両事例に対するシミュレーションに基づく、サプライナーはライナーやタイヤよりも有効応力（von ミーゼスによる）と静的応力の両者において低い応力下にある。他方、4340 鋼サプライナーは熱伝導度が高いため、低い熱応力がパーツ間に生成され、加えて、4340 サプライナーは

外部への熱放射が高いので、結果としてコンテナは熱的飽和への抵抗が大きくなる。この材料選定で、好ましい別の要素に、4340 は H13 よりも材料コストの低いことがある。

ピレット材料の効果

金属学的な視点から、合金元素を添加するとアルミニウムの融点を大きく下げるが、同時に合金元素を溶体に戻すためにより高い温度が必要である。このことは、6xxx 系や 7xxxx 系のような熱処理可能な合金には重要である。金属の相平衡状態図で溶解が始まる温度を固相線 solidus と言い、合金元素を溶体に溶け込ます最低の温度を固溶線 solvus と呼んでいる。

押出中、きれいな押出材表面品質と同時に必要なマイクロ組織を有するには、押出出口温度は固溶線と固相線の間の固溶体の領域内にあらねばならない。時間が充分にある条件下で、固溶線は Mg や Si を固体状合金に固溶させる温度である。熱処理 T4 あるいは T6 を施すには、合金の温度にて可能な時間で Mg と Si を充分固溶させるため、プレス出口での温度を充分高くする必要がある⁹⁾。その時間は、ダイ出口と焼き入れ装置間の距離を出口速度で割った値で表されるため長い時間ではない。その時間（通常、5~10 秒の範囲）で Mg と Si を完全に固溶させるには、固溶線を超える温度であることを必要とする（図2）。

一方、表2を参照すると、この固相線-固溶線で構成される固溶領域幅（solvus-solidus の“窓”）は、AA6063 に対する 95°C から、AA6082 に対する 7°C まで変っている。温度を制御する窓が狭いと、出口温度の制御が難しくなる。一般的に、より多くの合金元素を含む硬質合金は、温度を制御する窓が小さくなる。しかし、硬質合金は、最終用途に対する多くの要求される仕様を有し、一方で操業での制御温度の窓が狭いため、その窓内

表 2 アルミニウム押出合金：仕様と押出プロセス条件^{10)~12)}

合金種	化学組成 (%)							好ましい出口温度 固相線-固溶線 間の温度 (°C)	温度制御幅 (窓) (°C) <small>* 左欄における 温度範囲差</small>	押出 出口速度 [m/min.]	サイクル タイム [分] 押出比50 1020mm長 ピレット	面圧 [MPa]	コンテナ内 熱発生 [KW]	必要とする 熱放散 [KW]
	Si	Mg	Mn	Cr	Cu	Zn	Zr							
軟質系	1100				0.1			<643		50-80	1-2	410	309	25
	3003			1.2	0.1			<643		30-70	1-2	480	362	27
中力系	6063	0.4	0.7					520-615	95	35-80	1-2	550	414	30
	6005A	0.8	0.5	0.15-0.5				530-600	70			620	156	15
	6061	0.6	1		0.2	0.3		560-582	22	5-25	3-10	620	156	15
硬質系	6082	1	0.7	0.5				570-577	7			620	156	15
	7003		0.7				6	540-600	60	5-20	4-10	620	156	15
超硬質系	7075		2.5		0.2	1.6	6	465-480	15	1-2	25-55	690	17	3

に留まれないと結果は重大事につながる。

アルミニウムの熱間変形抵抗は、数%の合金元素を添加するだけでその大きさのレベルが増大することがある(図3)。同じ温度と変形率の下で、AA7075は市販の純アルミニウム(AA1050)よりも10倍強い。この変形抵抗の大きな違いは、広い範囲で押出性に交換され、軟質アルミニウム合金は硬質アルミニウム合金よりも100倍のレベルの高速で押出ができる。コンテナ内で発生する熱の総量は、硬質合金の押出に対しては大きくなる一方、本文で取り上げようとしているのは熱発生率対熱放散率である。AA7075の押出中のサイクルタイムは長いため、その結果コンテナを介しての熱の放散率はコンテナ内での熱発生率よりも大きくなる。他方、軟質合金の押出中の状況は反対で、コンテナ中の熱発生が熱放散より勝り、コンテナは熱的には飽和状態となる。コンテナ内における熱放散力は、熱伝導性、設計、及び外部冷却方式の関数となる。押出されるアルミニウム合金に基づいて、これらパラメータの適切な組合せで必要な熱放散力に供するよう選択されなければならない。

大きな温度感受性に加えて、硬質合金は更に多くの押出力を必要とし(大抵の場合、かなり高い面圧プレスが必要)、結果としてコンテナ及びダミーブロックを含むツーリングに負荷される力が高くなり、その場合、より強い材料の使用が必要

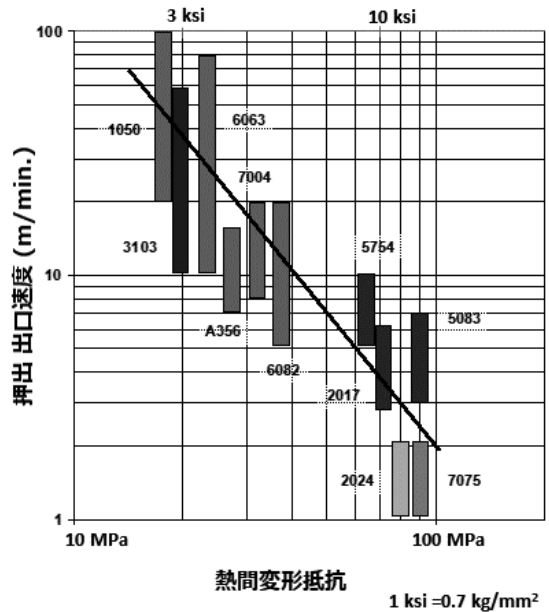


図3 押出速度 vs アルミニウム合金の熱間変形抵抗¹³⁾

となる。次に示す画像(図4)は、807MPaの高圧力での、硬質合金の押出中の応力分布を示す。そこではサブライナーに伝達される応力は、4340鋼材の降伏応力に近い。同じ熱的条件下で、H13サブライナーを備えたコンテナでは、ライナーは良好なサポートを受け、少ない変形下にあることを示している。同時に、サブライナーの応力レベルは4340サブライナーと同じに留まっている。熱伝導率の低いH13は4340と比較し、コンテナを介しての熱の逃げが少なく、高強度合金におい

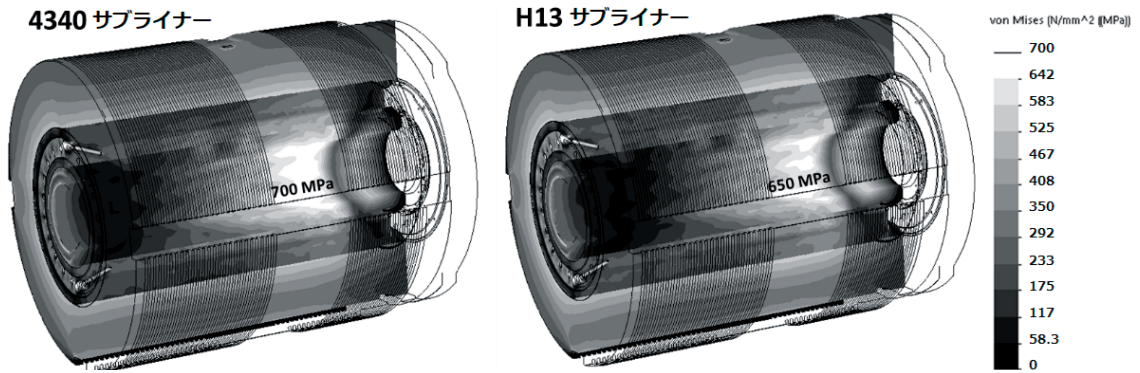


図4 H13 ライナーと 4340 タイアの 3 層コンテナで、サブライナーに H13 または 4340 を備え 807MPa (117ksi) のピーク面圧で押出中の応力分布

ては狭い固相線-固溶線の温度域へのチャレンジを示している。

ダイス設計

ダイス内では、変形の大部分が、従って温度上昇が生じ、押出プロセスにおいては大きな役割を担う。すべてのことがダイス内で非常に速く起こる¹⁴⁾。例えば、変形熱は通常放散するだけの時間は充分になく、材料内に滞留する。結果として、発熱を少なくする様に最適化されたダイ設計は、熱放散への技術よりも大きな役割が果せる。

押出出口温度と生産性向上にダイ設計の効果を

観察するために、有限要素 (FE) ベースのソフトウェア HyperExtrude[®] を使用してシミュレーションベースの研究が行われた。3 タイプの異なるダイセットについて、図5に示す異なるポートホールとチャンバーサイズを設計・モデル化し、それらに Die1、Die2、Die3 と名付けた。ダイセットはいずれも同じ形材形状を押出成形する様、同じダイプレートとマンドレルコア形状を使用した。ポートホールと溶着チャンバーのサイズは、Die1 から Die3 へと増やし、Die1 を押出するのに最も困難、Die3 は押出に最も簡単、Die2 はそれらの中間とした。

モデル予測によると、押出荷重と出口温度は、ダイセットのポケット内を広げるだけで大幅に低下する。これらにより、押出メーカーが生産性を向上させるための押出機のスピードアップに役立つ (図6)。

表3の上側2行は同じラム速度 10 mm/sec. で Die1 と Die3 の予測出口温度と押出力を示し、3行目は Die1 (1行目) の出口温度と一致するように 30%高いラム速度 13 mm/sec. にした、Die3 のモデル予測を示す。ここで興味深いのは、Die3 でラム速度を 30%上昇させると、押出力は Die1 と Die3 の差の 25%増加するが、温度差は変わらずに維持

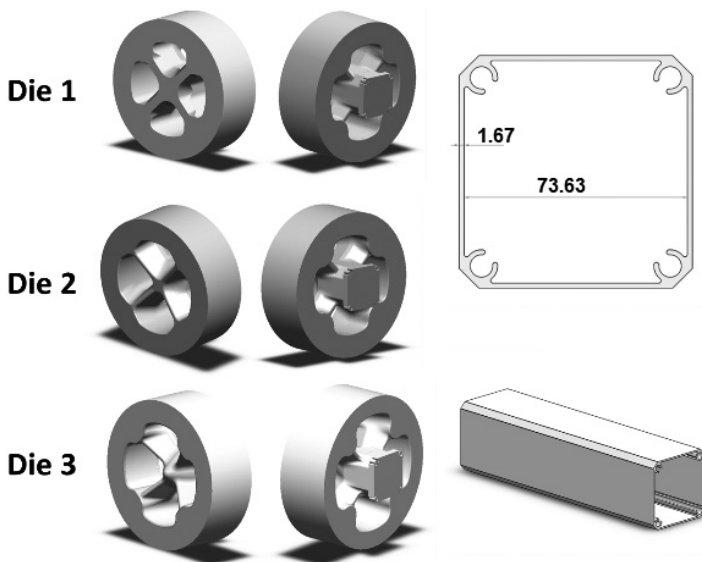


図5 スタディーで使用された3種のダイ (左) と形材形状 (右)

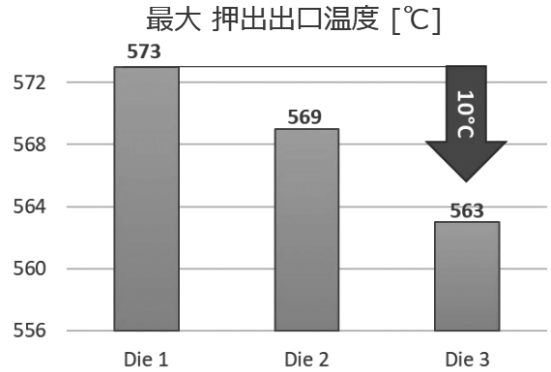
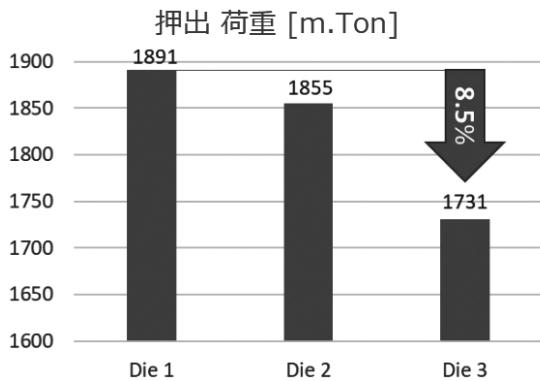


図 6 ダイ出口時の押出材の押出荷重と最大温度のモデル予測

表 3 Die3 で 30%ラム速度改善

	ラム速度 [mm/s]	最大出口温度 [°C]	押出力 [US ton]
Die1	10	573	1891
Die3	10	569	1731
Die3	13	563	1750

表 4 ポート内全容積と前端スクラップについてのダイ設計の効果

	ポート内容積 (リットル)	9"での相対的な長さ (mm)	915 mm ビレット長での比率 (%)
Die1	1.48	35	3.9
Die2	1.62	40	4.4
Die3	2	48	5.3

されている。これは、ダイ設計に起因する押出荷重の小さな減少が、ラム速度をアップする上では大きな潜在力となっていることを示している。

ダイのポート内を広くした結果として、押出前端のスクラップの増加はどうか、という質問があるかもしれない。表 4 は、ダイ設計の変更の影響が歩留に如何に大きいか、を理解するに必要なデータを示している。過大評価となるが、前押出サイクルでダイ内部に残ったアルミニウムを廃棄すると仮定した場合、Die1、Die2、Die3 の押

出前端スクラップの割合は、それぞれ 3.9%、4.4%、5.3%である。これは、Die1 から Die2 に変わると、押出前端スクラップはせいぜい 0.5%増となることでもある。また、Die1 が Die3 に置き換えられた場合、前端スクラップの増加はせいぜい 1.4%である。

この歩留の低下は、本報文の次の章において生産性計算に関連して考えられる。Die2 と Die3 を使用する場合、生産性の大幅な増加に比べて、歩留では軽微な低下なので無視することがあるかも

表 5 変数パラメータとレベルのリスト

コード	説明	レベル 1	レベル 2	レベル 3
CC	コンテナ熱伝導 (W/m ² °C)	24 (H13 鋼)	42 (4340 鋼)	---
OC	外部からの冷却 (W/m ² °C)	2 (静止エア)	5 (自然エア)	8 (強制エア)
RS	ラム速度 (mm/s)	3	5	7
BT	ビレット温度 (°C)	420	450	480
BL	ビレット長 (mm または in.)	711 mm ・ 28 in.	813 mm ・ 32 in.	914 mm ・ 36 in.
BD	ビレット径 (mm または in.)	178 mm ・ 7 in.	203 mm ・ 8 in.	229 mm ・ 9 in.
DD	ダイ設計	1 (難)	2 (中間)	3 (容易)

しれない。

多工程でパラメータのバランスで押出の最適化

本研究では、表5に示す7つのパラメータ（因子）を最適化のために選んだ。押出工具のパラメータ（コンテナサイズとダイ設計）と調整可能なプロセス条件（ラム速度、ビレット予熱温度、ビレット長さ）の組合せを考慮に入れた。さらにコンテナの熱放散能力に関連して、コンテナの熱伝導率および外部冷却の2パラメータの追加を考えた。これら2パラメータは、通常、押出メーカーや押出機メーカーの両者では考慮されない。この研究に対し選択した材料は、軟質系6xxxシリーズに属する、最も普及している押出アルミニウム合金AA6063である。ここでの研究の結果と結論は、他の合金材料にも定性的に引用できる。

一方、要因とレベルの数をベースに、これら押出荷重と温度へのパラメータの影響を分析し、生産性改善へのベストな組合せを見出すために、田口（玄一）式L18直交表による実験計画法¹⁵⁾が使用された。異なるパラメータ値の組合せをし、18の有限要素（FE）シミュレーションをすることで、荷重と温度に対する結果が抽出される。通常の押出操業に基づいて各ケースに対するベネット・ナンバーと正味の生産性も計算される。

分析と最適化

異なるプロセスパラメータの主な効果のプロットを図7に示す。これらプロットを検証すると、各パラメータの有意性と、関心ある項目への反応（この場合は押出荷重と出口温度）にどう対処するかアイデアが示される。

回帰法と曲線当てはめ技術を使用すると、18のケースそれぞれに対して可能な最大押出型材速度が推定される（表7）。使用されるプロセス制約は次の通りである。

1. 最大出口温度は600°C未満であること、
2. 押出荷重は、2,500 mton 未満であること（押出機容量）、
3. 型材速度は100 m/min.未満であること（プラー速度能力）、
4. ラム速度は30 mm/s.を超えないこと（押出機の速度能力）。

最適な生産性を見出すために、表5に示す6パラメータ（全7パラメータ中ラム速度を除いて）の全範囲に対し、そして各パラメータの精度を上げるため5水準について、最大押出速度を計算した。次いで、生産性とベネット・ナンバーを各ケースについて計算した。

表8は、最大および最小の生産性（範囲）をもたらすパラメータへのレシピ（プロセスパラメー

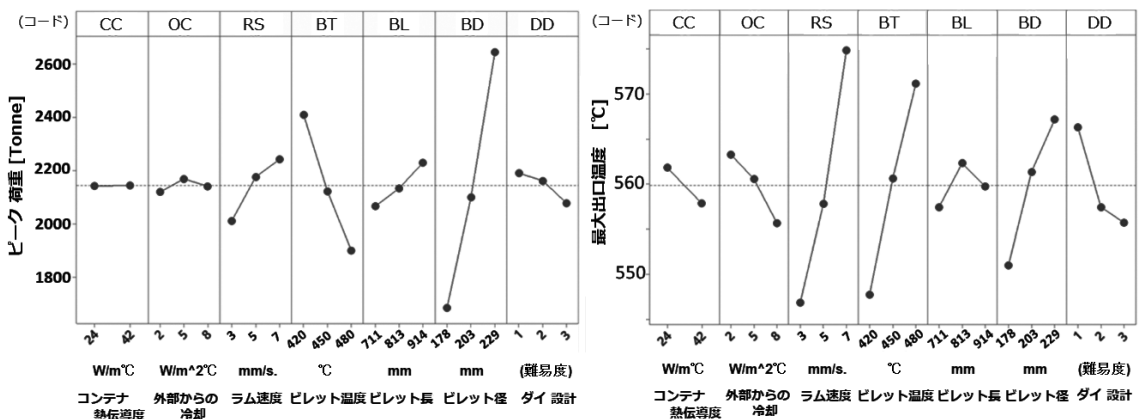


図7 押出荷重と出口温度に対する押出プロセスパラメータの主な影響

表 6 最大/最小の両極端にある生産性に対するプロセスパラメータの予測

変数	グローバル範囲		普通にある範囲	
	最高のレシピ	最悪のレシピ	最高のレシピ	最悪のレシピ
コンテナ熱伝導率	42	42	24*	24*
外部冷却 (W/m ² C)	8	8	2*	2*
ピレット温度 (°C)	435	420	420	420
ピレット長さ	914 mm (36 in.)	914 mm (36 in.)	813 mm (32 in.)	914 mm (36 in.)
ピレット径	190 mm (7.5 in.)	229 mm (9 in.)	190 mm (7.5 in.)	229 mm (9 in.)
ダイ設計	3	1	1*	1*
達成可能な最大 押出型材速度 (m/min)	86	3	53	4
最大押出荷重 (ton)	2,500	2,500	2,500	2,500
ダイ出口最大温度 (°C)	600	495	600	510
コンタクト効率 (%)	34	95	43	95
歩留 (%)	82	86	83	86
ラム速度 (mm/s) (8"ピレット相当)	29	0.75	16	0.85
正味の生産性 (kg/hr.)	2,464	277	1,882	301

*伝統的な押出条件を表すため一定を保つ

タの組合せ)を示す。生産性の範囲には、グローバルな範囲と、普通にある範囲の2セットの生産性範囲がある(表6)。グローバルな範囲では、パラメータ値すべて可能な組合せを考慮、他方、普通にある範囲は、押出メーカーが通常に使用する低熱伝導性コンテナ、低冷却能力のコンテナ、そして押出すのに難があるダイス、を使用するケースである。

2,464 kg/hr.の正味の生産性へのグローバル範囲で最良のレシピは、熱放散が最も高く、押し易いダイスを使用する優れたプロセス条件を示している。この場合、最大に可能な押出出口温度は600°Cで、押出機は最大容量に近い状態で作動をする。興味深いことに、グローバル範囲には最小な生産性277 kg/hr.が、押出メーカーが非加熱のピレットを使用し、押出機の限界となるような負荷容量で、しかも高い放散性をもってなされる。他方、コンテナが良好な放散能力を持たず、保守的で押し難いダイスを使用する様もあり触れた条件であると、正味の生産性は1,882 kg/hr.にも達し

表 7 生産性と歩留の予測モデル

	最適な生産性 (kg/hr.)	生産性比	歩留 (%)
Die1	2,130	100	83
Die3	2,310	108	82.5
Die3	2,464	116	81.5

ない。以上で意味するところは、放散性のあるコンテナとダイ設計を適用すると、生産性を30%向上させることができる。これら数値は、他のすべてのパラメータが最適化される場合に対してであることに留意しておく必要がある。

プロセスからかけ離れた内容を、ダイ設計に盛り込むとそこにはコストがかかる。基本的には、熱が増加し、ラム速度を低下させる。プロセス環境を改善するためにダイスに対してできることは、Die3の様な設計に向い、そこで生産性を大幅に向上させる。

普通にある押出条件を使用した時、最悪ケースのシナリオの方がグローバルの最小値よりも優れ

表 8 異なる押出力容量で最大の生産性を実現へのプロセスパラメータ予測

変数	押出力容量 (メトリック・トン)			
	2,270	2,500	2,730	2,950
ビレット温度 (°C)	450	440	430	425
ビレット径 (in. 及び mm)	7.5 (190 mm)	7.5 (190 mm)	8 (203 mm)	8.5 (216 mm)
正味の最大生産性 (kg/hr.)	2,142	2,464	2,694	2,906

ている (301 kg/hr. vs. 277 kg/hr.) ことには、言及する価値がある。これは、熱放散を増加させ、ダイ設計を改善することによって卓越性と生産性を求めている押出メーカーは、ビレット温度やラム速度などの他のプロセスパラメータにより注意を払わねばならないことを意味する。さもないと保守的な押出メーカーに遅れをとる可能性がある。

前述のように、ホローダイポート内を大きくとる結果として、押出材前端的スクラップが増加する影響が生産性の最適化の計算で考えられる。表 7 に示すデータに基づくと、Die1 に代わり Die2、Die3 を使用すると、生産性は 8%、16% と向上するが、歩留は 0.5%、1.5% だけ低下をする。

これまでの最適化はすべて、2500 mton の押出力量をもつ押出機に基づいてなされてきた。もし押出力容量が低い場合、または高い場合はどうなるだろうか？ 表 8 は、異なる押出力容量に対する予測される最適なレシピを示す。

要約及び結論

すべてのケースで、最適なレシピには最高の熱伝導率と外部冷却が含まれることが観られる。最適なビレット温度は、ビレット径が増加する一方で、押出力容量とともに減少する。

温度を上げるどのプロセス部分も、ラム速度を低下させる可能性がある！ メタルの流れへの抵抗を増加させるどのプロセス部分も、二重の効果を持つ可能性がある、即ち流れに対する抵抗は、押出力を使い切る一方で、余剰な熱を生成する。これら両者は高い生産性に好ましくない。不安定

に温度上昇を生じるプロセスの部分は、やはりラム速度を低下させ、メタルフローを制御する摩擦を使用する等、多くの特徴を持つダイを必要とする。スーパー押出メーカー達は、運に恵まれてスーパー押出メーカーになっただけではないのは明らかだし、また、成功に対する同じマ

ジック的な公式を分け合っているなどもあり得ない。ただし、共通して持っているものがある。平均以上の正味の生産性からの利益を見ると、40~50%の範囲の数値が見られる。平均的な押出メーカーは、その種の改善を見たいと思わないのだろうか？

材料、時間、速度の3要素の、ここでの議論で取り上げるべき最も重要な概念は、バランスである。もしそれらのうちのどれかでも個別に封筒に押し込むとすれば、他において失敗のリスクに向かい、生産性向上（そして勿論利益も）はすっかり消えてしまう。このバランスを理解することは、スーパー押出メーカーになるための最初の前提条件である。そこに到達するための経路は異なるかもしれない。それは、押出メーカーの所定の機器のすべての物理的要因、そのオペレーター、彼らが従う手順にどれほど精勤するか、温度をどれだけ慎重に測定して制御しているか、そして最終的には品質と収益性を最大化する最終製品にどれだけ配慮するかに依存をする。

謝意

著者らは、CAD 設計を提供してくれた、Castool デザインチーム及び EXCO Extrusion Dies に感謝の念を表したい。

参考文献

- 1) Fielding, R., "Benchmarking," Proceedings of the Eleventh International Aluminum Extrusion Technology Seminar, (ET 2016), Vol. 2, pp. 235-246, Chicago, Illinois, May 2016, Extrusion

- Technology for Aluminum Profiles Foundation.
- 2) Robbins, P., "Who are the Super-extruders?," Light Metal Age, April 1997, pp. 67-69, 1997.
 - 3) Liker, J.K., The Toyota Way: 14 Management Principles from the, New York: McGraw-Hill, 2004.
 - 4) Robbins, P., Mahmoodkhani, Y., Jowett, C., and Dickson, R., "Extrusion Productivity - Billet Geometry/Container/Dummy Block," Proceedings of the Twelfth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, (ET' 2021) , [Publishing May 2021] Orlando, Florida, May 2020, Extrusion Technology for Aluminum Profiles Foundation.
 - 5) Chien, K., Robbins, P., Jowett, C., and Wang, Y., "Extrusion Productivity, Part I ? Billet Geometry," Light Metal Age, Vol. April, 2018, pp. 28-31.
 - 6) Chien, K., Robbins, P., Jowett, C., Mahmoodkhani, Y., and Wang, Y., "Extrusion Productivity, Part II ? Predicting Ram Speed," Light Metal Age, Vol. February, 2019, pp. 12-16.
 - 7) Knowles, E., The Oxford Dictionary of Quotations, New York: Oxford University Press, 1999.
 - 8) Fielding, R., "Managing the Performance of an Extrusion Plant," Proceedings of the Eighth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, (ET 2004) , Vol. 1., pp. 565-570, Orlando, Florida, May 2004, Extrusion Technology for Aluminum Profiles Foundation.
 - 9) "T Temper: Thermally treated," in ANSI H35.1/H35.1M-2017: American National Standard Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum, The Aluminum Association, 2017.
 - 10) Davis, J.R., ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993.
 - 11) Saha, P.K., Aluminum Extrusion Technology, ASM International, 2000.
 - 12) Misiolek, W.Z., and Kelly, R.M., "Extrusion of Aluminum Alloys," in ASM Handbook, Vol. 14A: Metalworking: Bulk Forming, 2005, pp. 522-527, ASM International.
 - 13) Fourmann, J., "Aluminum Alloys - Extrusion Application," Presented at Aluminum Extrusion Seminar, Long beach CA, 2017.
 - 14) Mahmoodkhani, Y., "Mathematical Modelling of the Material Flow and Microstructural Evolution During the Extrusion of AA3003 Aluminum Alloy," University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2013.
 - 15) Roy, R.K., Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement, John Wiley & Sons, New York, New York, 2001.

2 カ国語 (和英) 対訳

新アルマイト理論

THEORIES OF ANODIZED ALUMINUM 100 Q & A

佐藤 敏彦・神長 京子 共著

B5判 本文 248頁 定価 8,191円+税

アルミニウム表面処理技術に関する専門書や便覧は既に数冊が出版されている。しかし、これらの本はアルミニウム表面処理に関する“HOW TO”本である。アルミニウム表面処理技術の理論的裏付けを解説した本はない。本書では、アルミニウム表面処理技術の“WHY”について解説する。例えば、

- (1) アルミニウム陽極酸化のための硫酸浴はなぜ 20°Cなのか
- (2) 酸化皮膜を中間電解してから電解着色すると、なぜ多色着色が可能か
- (3) 酸化皮膜上に電着塗装するとき、なぜ 150V の高電圧を印加しなければならないのか

などについて解説する。

●発行 カロス出版

〒104-0031 東京都中央区京橋 1-17-12
TEL (03) 3562-5736/FAX (03) 3561-7080