

押出生産性、パート 2 — 押出ラム速度の予測

Extrusion Productivity, Part II - Predicting Ram Speed

ポール・ロビンス *1)

Paul ROBBINS

クリス・ジョウエット *2)

Chris JOWETT

ヤーハ・マムードカーニー *3)

Yahya MAHMOODKHANI

ユー・ウォング *4)

Yu WANG

本報は、昨年7月号に掲載された押出生産性、パート1 — ビレットジェオメトリー（ビレット径と長さの組合せ）に続く、シリーズパート2となる。ここでは、押出生産性に寄与する押出ラム速度の予測を取り上げている。始めに、生産性、特に操業の業績を改善する方法を考える上で、ビレットサイクルチャートをより科学的に捉えた解析手法として説明し、このチャートの中で、特にコンタクトタイム（アルミニウムの押出中の時間）がラム速度の認識に有効なことを示唆し、更にプロセスの独立変数として、ラム速度、ビレット温度、コンテナ温度、コンテナの温度テーパー、鋼材の熱伝導率の5種を取り上げ、加えてこれらがコントロールする、2種の従属変数、ダミーブロック荷重とダイス温度について、実験計画法を用い18モデルについて解析をしている。この解析から、押出モデルを通して精度あるダイス温度を計算でき、それにより最大の押出速度が決められることを示した。今後のシリーズの研究として、型材の形状、押出比、ダイス設計、コンテナ冷却などの影響を含めた、よりデータの特定化に言及している。

緒 言

アルミニウムの押出加工における生産性には、シフト当たりのビレット数や、時間当りの生産重量など様々な測定方法がある。これら数値は押出機の稼働状態を知る上では有用な測定尺度であるが、連続的な工程改善への指針とはならない。操業を続ける中での弱点、あるいは改善すべき工程の特定をすることはできない。基本的に、単に総

生産性では、アップセットしたビレット重量、押出ラム速度、及びラムが稼働している時間の掛け算の積に過ぎない。これらに売り上げられる生産品の歩留りを掛けると、正味の生産性が得られる。

生産性を考える一つの見方として、ビレットサイクルチャート（ビレット当りの時間チャート）がある。これは、1970年代に Alcan 社が開発した興味深い方法である。このチャート（図1）を用いて、有人の拘束時間下での押出機の稼働時間（稼働予定時間、最終のシフト、最終の週、最終の年）を合計し、その値を押し出したビレット数で割ると、押出に要した平均時間が算出できる。この方法で、押出操業における時間管理について簡

*1 Castool Tooling Systems, General manager, EXCO International, Vice president

*2 元 Rio Tinto Aluminum (旧 Alcan), Ph.D

*3 University of Waterloo (カナダ)

*4 University of Waterloo (カナダ)

有人操作時間					
プロダクションタイム		コンタクト タイム	ダイス試験 時間	故障/修理による ダウンタイム	その他の ダウンタイム
デッドタイム					
デッドサイクル	ムダ時間				

図1 ビレットサイクルチャート

単に調べることができ、押出機が有人で生産可能な状態にある時間、生産の稼働状態、ラムの作動で押出機が加圧している時間、押出機が稼働していない時間、などが分かる。言い換えると、無駄なデッドタイムを見出すことができ、この情報を元に操業の業績を改善する方法を探ることができる。

デッドタイムは重要な問題であり、押出機のデッドサイクルだけでなく、バンプサイクルやダイス交換など様々な小休止時間を含む。操業において細部に注意を払うことで、この種の中止時間を減らすことにつながる。最終的に、生産性に影響する主な要因は、ライブサイクルタイムまたはアルミニウム押出中のコンタクトタイムを如何に短くするか、つまり、押出ラム速度を如何に上げるかになる。しかし、コンタクトタイム比率（総サイクルタイム中のライブの割合）に注意を配りすぎると、判断を誤る可能性がある。コンタクトタイム率が高い場合効率的であることを示すが、他方、

押出速度が低いことを示す場合もある。

ある特定のダイスを使ってその形材を押出する場合、品質要求を満たし

て安全に押出できる最大速度について、多くの押出メーカーは、経験的に認識している。例えば、6061は6063ほど速く押出できないこと、中空形材は中実形材よりも速度が遅いことなども承知している。また、形状の複雑さや、ダイスの設計が速度へのキーになることも理解している。しかし、この種の知識は技術的と言うよりも経験的である。

過去の実績や経験に基づいて、従来のダイ設計やよく知られている合金をもって、同じ様な形状の形材を生産する押出メーカーは、理想的なラム速度の推測をする。しかし、そのラム速度は一定せず変化する傾向があり、その結果、押出実績や生産性は科学的なデータに基づくよりもオペレータの自信の程度に依存する。本報文のシリーズの目的は、使用するビレット、利用可能な押出プレス荷重、ツーリング（特にコンテナのデザインと材料、ダイスのパラメータなど）に基づいて、最大のラム速度を予測する手段を探ることにある。

これにより、押出メーカーは正しいデザインと鋼材材質のコンテナの使用が可能となり、一層の生産性を改善するコンテナの設定温度、ビレットの温度設定への情報が得られる。

以前の報文において、押出生産性に及ぼすビレットのジオメトリー（径と長さの要因）による影響に取り組んだ（Light Metal Age、2018年4月号/アルトピア 同年7月号）。そこでは、ビレット長さを、その径の5倍とするよりも7倍以上にした方が適切かどうかを検討した。そのために、8 in. ϕ \times 56 in. (1,422 mm) 長さのビレットと 8.375 in. (212.7

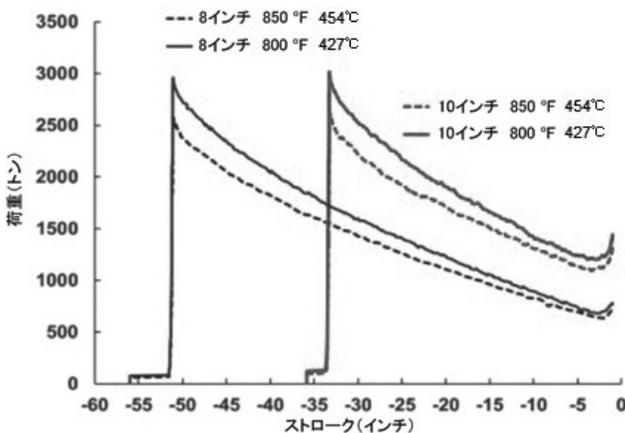


図2 異なるビレット径と温度に対するダミーブロック荷重

mm) ϕ のコンテナ、10 in. ϕ \times 35.84 in. (910 mm) 長さのビレットと 10.375 in. (263 mm) ϕ のコンテナのそれぞれの組み合わせの実験をした。実験結果は大変興味深く、図 2 と図 3 に要約した。図 2 は 2 種類のビレット径 (8 in. 及び 10 in.) と 2 条件の温度に対するダミーブロックへの荷重を示す。短的には、合金、ビレット重量、ダイス、押出速度を一定とした場合、ブレークスルー荷重はほぼ同じとなる。図 3 は、2 種類のビレット径に対して、ダイベアリング温度の時間変化は類似していることを示している。しかし、8 in. ビレットでは面圧に大きな差があり、ダミーブロックとコンテナの設計を難しくしている。これは、径の大きなビレットを使った方が簡単に解決することを示唆しているかもしれない。

一般的に、ビレットジェオメトリーに関する以前の研究では、より高い生産性の達成を期待して長いビレットの使用は必ずしも得策ではないことを示唆している。むしろ、最適なビレット長さは、プロダクトミックス、押出材重量、型材の外接円サイズによって決まる。さらに、ビレットが長いと、ダミーブロックとコンテナへの大きな荷重の負荷、高い油量流を伴う高いラム速度が必要、そして アプセット圧及び押出材の押出前方と後方の寸法の違いなどの問題、が生じる傾向がある。一方、ビレットが短いと必要なブレークスルー圧力が低くなり、加熱温度を低く抑えることができ、押出をより高速化できる可能性が大きくなる。

今回の報文では、ビレットのジェオメトリーは無視した。代わりに、ラム速度を予測するためのより良いパラメータを見出すため、メタルがダイスに到達する前の、コンテナ内部で起きる現象について検討することを目的とした。

今回の実験結果

5 種のプロセス変数 (ラム速度、

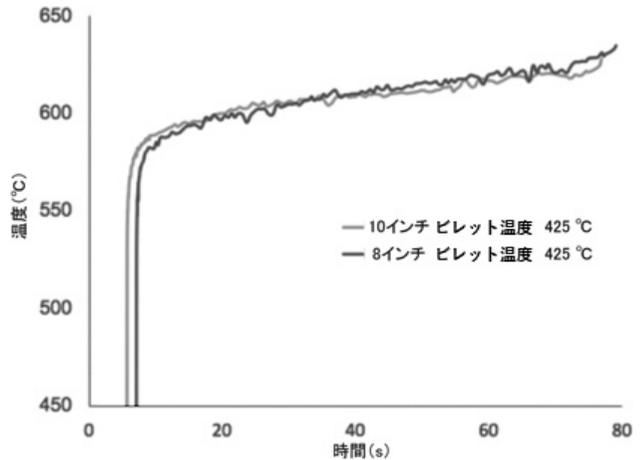


図 3 異なるビレット径に対するダイベアリング温度

ビレット温度、コンテナ温度、コンテナの温度テーパー、鋼材熱伝導率) について、それぞれ 3 レベルで検討した (表 1)。独立変数が 2 種の従属変数をコントロールする関係にあり、その従属変数としてダミーブロック荷重とダイス温度を考慮した。さらに、鋼材の熱伝導率については、2 水準 (H13 と SAE 4340 の鉄鋼で、それぞれ熱伝導率は 24 W/mK と 42 W/mK) を考慮した。コンテナ材質の熱伝導率を考慮したのは、高伝熱性のツールリングを使うことで変形ゾーンからの抽熱性能を改善できるとの理論に基づいている。

これら 5 種のプロセス変数を調べるため、8 in. \times 56 in. (1,422 mm) 長さの、1 サイズのビレットを使用した。押出した型材は 6063 合金で、形状は直径 32 mm (1.275 in.) の単純な丸棒とした。ダイスにはポケットやフィーダープレートは用いなかった。

この実験では、統計学的な実験計画を用いて、前述の変数間の交互作用を解明するアプローチを

表 1 5 種の変数と設定値

	変 数	レベル 1	レベル 2	レベル 3
A	コンテナ熱伝導率(W/mK)	24	42	-----
B	ビレット温度(°C)	426	454	482
C	ラム速度(mm/s)	11.7	14.6	17.6
D	コンテナ設定温度(°C)	398	426	454
E	コンテナ・テーパー温度(°C)	0	40	80

とった。完全要因計画であれば160例を超えるところ、一部実施要因計画により18例の実験が施された。18の押出成形モデル(表2)のそれぞれについて、表1に示した各設定ポイントを選択し、特定の要因計画に基いて個々に実施した。

ダミーブロック荷重についての結果：ダミーブロックとダイスの荷重の一例を図4に示す。上側のプロット線からは、ブレークスルー荷重が2,700トンと高くなっている。その後荷重は低下し56”(1,422mm)

表2 実験計画法

#	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

長さのビレットの終端では約20%まで落ちている。ダイス面への荷重も予想通りで、押出開始から最後まで平均荷重は比較的一定であった。通常、ダイスの荷重は常に僅かな低下があるが、これは押出前部から後部にかけて温度が徐々に上昇するからである。ダミーブロック荷重に対する5独立変数それぞれの主なる影響(図5)は、次の通りに要約できる。

- ラム速度を11.7から17.6 mm/secに上げるとブレークスルー荷重は4%増える。
- ビレット温度を482°Cから56°C下げて426°Cにすると、荷重は2,440トンから2,990トンに増える。(20%強の増加)
- コンテナ温度を454°Cから56°C下げて398°Cにすると、荷重は7%増える。
- コンテナ後端の温度を80°C下げると荷重は5%増える。
- コンテナの熱伝導率を24 W/mKから42 W/mKに上げる(鋼材をH13からSAE 4340に替えて)と、1%以下の荷重の増加がある。

5種の変数に対するブレークスルー荷重の回帰分析結果を式1に示す。

$$\begin{aligned}
 & \text{ダミーブロック荷重 (トン)} \\
 & = 8,232 - 1.51 \times \text{熱伝導率 (W/mK)} \\
 & \quad - 9.820 \times \text{ビレット温度 (°C)} \\
 & \quad + 21.36 \times \text{ラム速度 (mm/s)} \\
 & \quad - 3.545 \times \text{コンテナ温度 (°C)} \\
 & \quad + 1.931 \times \text{コンテナテーパー温度 (°C)}
 \end{aligned}
 \tag{式 1}$$

測定荷重と計算荷重の相関を図6に示す。

ダイベアリング温度の実験結果：温度出力の一例として、ベアリング表面と押出材芯部の、押出ストロークの前から後にかけての温度を図7に示す。上側のプロット線が、ダイベアリングを通過するビレットの温度を示す。著者らの経験では、プロセス全体でここが最も高温となる。下側のプロット線は、金属がダイス孔から出る時の押出材芯部の温度を示す。両部分の温度差は100°Cに近い。この温度差は、押出材がダイス孔から出て0.2秒後に消滅するが、それは冷却効果というよりも押出材内への熱伝導による。

最も重要な温度は、ダイベアリングの

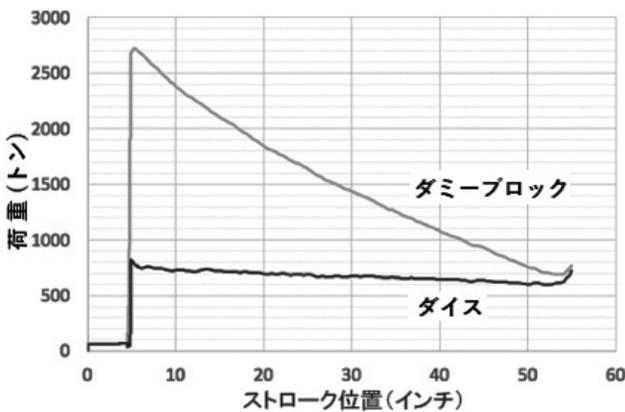


図4 荷重対ストロークのグラフの例 (上はダミーブロック荷重、下はダイス荷重)

温度である。押出ストローク過程で変
化し、通常押出前部から後部
にかけ上昇する。これは特に
長いビレットで顕著であった。
後端付近で起きる急激な変化
のため、ダイベアリング温度は
押出される 56 in. (1,422 mm)
長さのビレット中の、50 in.
(1,270 mm) 長さで測定した。
ダイベアリング温度に対する 5
独立変数それぞれの主要な影
響 (図 8) は次の通り要約でき
る。

- ラム速度を 11.7 mm/sec. から 17.6 mm/sec. に上げると、ダイ温度は 22°C 上昇する。
- ビレット温度を 482°C から 56°C 下げて 426°C にすると、ダイ温度は 9°C 低下する。
- コンテナ温度を 454°C から 56°C 下げて 398°C にすると、ダイ温度は 16°C 低下する。
- コンテナ後端の温度を 80°C 下げるとダイ温度は 7°C 以下の低下がある。
- コンテナの熱伝導率を 24 W/mK から 42 W/mK に上げる (鋼材を H13 から SAE 4340 に替えて) と、ダイ温度は 7°C 低下するが、これは負の効果無く好効果がある。

基本的に、ある製品ないしは顧客向け製品の押出に対し、決っているよりもベアリング温度が上がり最大となると、押出メーカーは速度を抑えなければならない。その逆の場合もあるとすれば、押出メーカーは速度を上げることができる。本報文では、6063 の合金固相線温度 (または融点) よりも 10°C 低い 620°C を限界温度として想定している。一般的には、押出前部と後部方向の温度変化が大きい場合 (図 7)、ダイベアリング温度が所定の値 (6063 合金

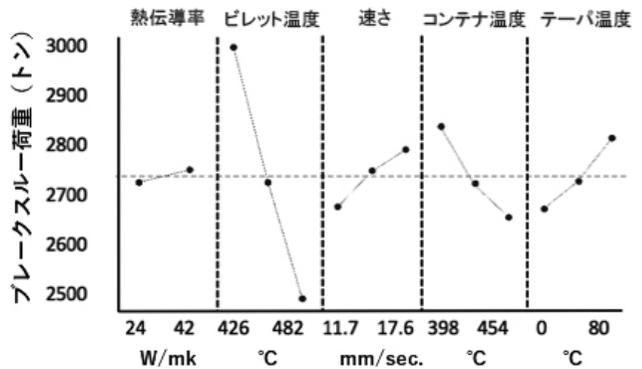


図 5 ダミーブロック荷重に対する 5 変数の主な影響
X 軸は 5 種の変数の値、Y 軸は荷重。

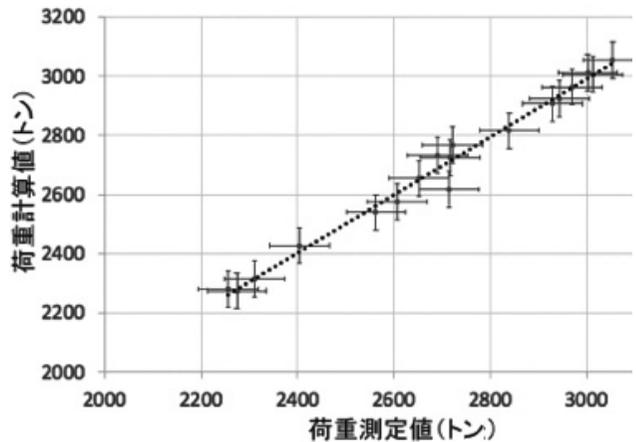


図 6 ブレードスルー荷重の測定値と計算値の相関性

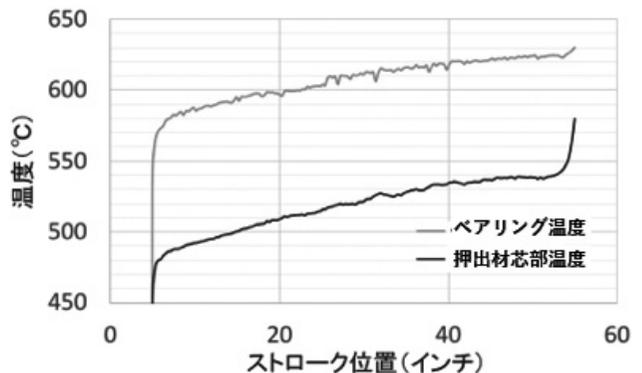


図 7 ダイベアリング (上側) と押出材芯部 (下側) の、
押出ストローク前部から後方にかけての温度

の場合 620°C) を超えないよう、押出メーカーは押出サイクルの終わり近くでラム速度を下げる必

要がある。

全データに対するダイベアリング温度（56 in./1,422 mm のビレット長さで、ストローク 50 in./1,270 mm の位置）の回帰分析の結果を式 2 に示す。

$$\begin{aligned}
 & \text{ダイベアリング温度 (}^\circ\text{C)} \\
 & = 395.5 - 0.323 \times \text{伝導率 (W/mK)} \\
 & \quad + 0.154 \times \text{ビレット温度 (}^\circ\text{C)} \\
 & \quad + 3.77 \times \text{ラム速度 (mm/s)} \\
 & \quad + 0.267 \times \text{コンテナ温度 (}^\circ\text{C)} \\
 & \quad - 0.053 \times \text{コンテナテーパ温度 (}^\circ\text{C)}
 \end{aligned}
 \tag{式 2}$$

温度の実測値に対する、この式による計算値の

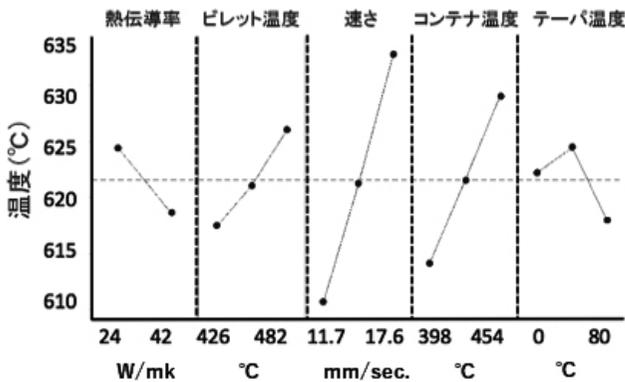


図 8 ダイベアリング温度に対する 5 種の独立変数の主な影響
X 軸は 5 種の変数の値

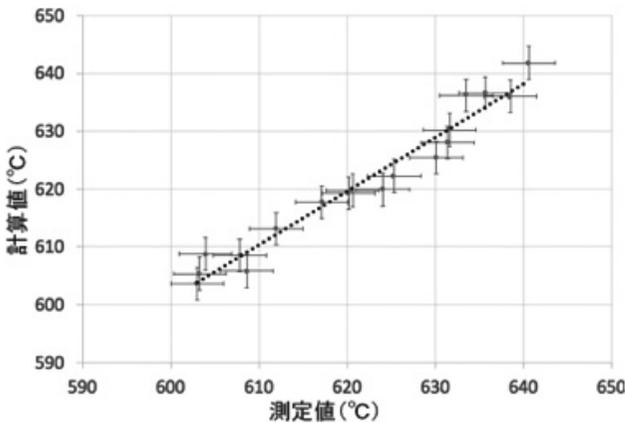


図 9 相関性の高いダイス温度の測定値と計算値

グラフを図 9 に示す。これから±3°C未満の誤差で相関性のあることが分かる。

押出前部と後部とでの温度の相違：ダイベアリングと押出型材芯部の温度差の例を図 7 と図 10 に示す。図 7 は model 2-design 11222 の結果である。この普通の状態（低い熱伝導率の鋼材、同じビレットとコンテナ温度、但しコンテナは僅かテーパ付き、そして中程度の速度）では、押出前部と後部とに大きな温度差が生じる。速度が大きいと、もっと極端に大きくなっていかかもしれないが実験計画には盛り込まれなかった。ダイベアリングと押出型材芯部の影響も同様である。

図 10 は、押出前部と後部の温度差を下げる試みをした結果を示している（model 17-design 2 3213）。ここでは、高い熱伝導率で、ビレット・コンテナ間の温度差が正であることから、ベアリング温度を等温押出に近づけている。型材芯部の温度は依然変化があるままにある。

生産性に及ぼす H13 vs SAE 4340 の影響：本実験結果で特に興味深かったのは、H13 vs SAE 4340 の比較使用において、鋼材の熱伝導率に驚くほどの好影響があったことである。SAE 4340 より熱伝導率が高くなるほど、ほとんど何ら不都合もなくダイス温度が低下する。ダイベアリング温度が下がると、ラム速度を上げられる可能性がある。仮にビレット温度を下げてラム速度を上げようとする、負の効果が出て押出圧力が上昇する。図 11 に、H13 に比べ高い熱伝導を持つ SAE 4340 のコンテナを使用した時の、縦軸にラム速度の増加率を示す。SAE 4340 製のコンテナは H13 製よりも、ビレットとコンテナ温度の可能な設定すべてにわたって良好な結果を示した。

押出速度の予測

押出速度を最大化するベストプラクティ

スは、先ず押出生産遅れが生じるほどに低くせずにビレット温度を下げること、言い換えると、押出機が可能までの最大荷重をラムに負荷することである。データからは、ダミーブロック荷重はビレット温度に応じて変化する（式1）が、図12に示すように単純なリニアな関係にはない。ダミーブロック荷重とビレット温度との関係には、若干変動があるが、これは速度による変形抵抗（歪速度感受性）とコンテナ温度の影響に変化があるためである。ダミーブロック荷重も、押出機のサイクル立ち上り速度とアプセットモードとともに変化することから、最適なビレット温度を決めるのは簡単ではない。どんな固有ビレット温度に対しても、荷重は7%まで変動することがあり得る。

最大ラム速度の予測は、ダイベアリングに許容可能な最高の温度を入力する計算に依って得られる（式2）。この温度はほとんどの場合、合金の融点（固相線温度）並びに押出後の押出材表面状態による。コンテナが熱を放散する能力（熱伝導度、コンテナ温度と温度テーパー）は、ビレット温度だけの影響というよりもラム速度の影響が大きい（図13）。例として、ビレット温度を50℃下げた場合、速度は2 mm/sec.上昇する。一方、熱伝導率を24から42にすると（H13からSAE 4340に替えて）速度は1.7 mm/sec.上昇する。コンテナに50℃の温度テーパーを用いると、速度は2.6 mm/sec.上昇する。勿論、高速用合金を使用すると限界温度を上げることができ（6063合金の620℃に対し、6360を使うと630℃）、その場合ラム速度は4 mm/sec.近い上昇が可能となる。

結論

本研究では、押出プロセスの5種の独立変数

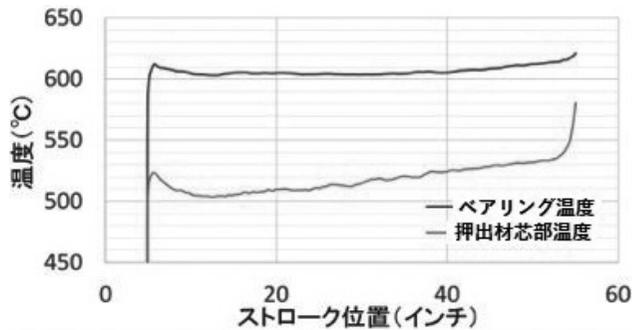


図10 低温コンテナ vs ビレット間の温度差で、押出前部と後部のかなり減少した温度差変化

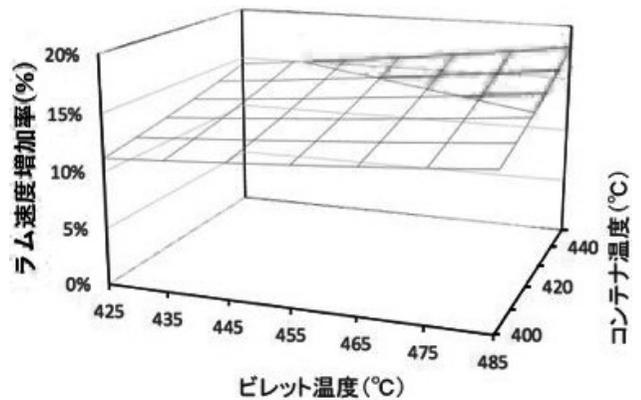


図11 高熱伝導の SAE 4340 使用のコンテナにおいて、コンテナとビレットの各温度の組合せ効果による、対 H13 使用コンテナに比してのラム速度の増加率

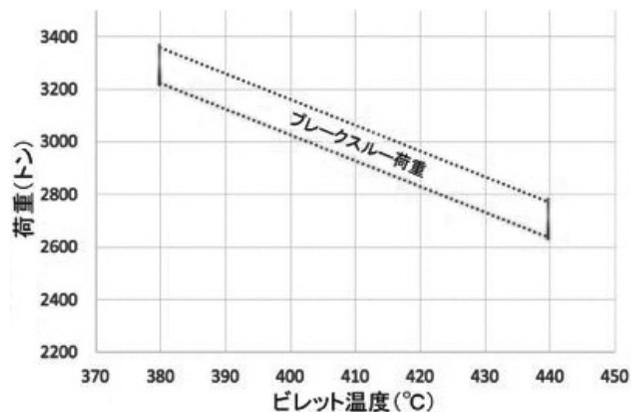


図12 ビレット温度に対するプレス荷重の影響

（ラム速さ、ビレット温度、コンテナ温度、コンテナテーパー温度、鋼材熱伝導率）について検討した。他に2種の従属変数（ダミーブロック荷重と押出ダイス温度）も検討した。

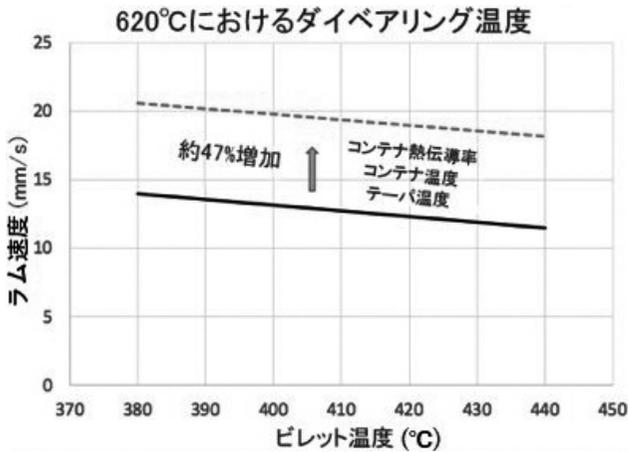


図 13 コンテナの材料、温度、温度テーパの効果を加えての、ビレット温度の関数としての可能なラム速度

本研究の結果、押出モデルで妥当な精度のダイス温度を計算でき、それにより最大の押出速度（結果としてダイベアリング温度が 620°C となる）が決められることが示された。コンテナに対するビレットの温度差が高いと（ビレットから熱を取り出し）、ダイベアリング温度を下げ、その結果押出速度を上げる可能性がある。コンテナの設計によく使われる 2 種類の鋼材（熱伝導率 24 W/mK の H13 と 42 W/mK の SAE 4340）で試験をすると、高い熱伝導率がこの効果を増長することも示された。

検討した 5 種の変数は、通常の生産であり得る以上の、2,500 ton から 3,000 ton の極度に大きな範囲でのダミーブロック荷重を生み出した。同様に、ダイベアリング温度の変動幅も 605°C から 640°C と広がった。5 種の変数 vs 測定荷重と温度は、正確に 3°C 以内に回帰した。

今後の研究

ここに示すデータは、如何なる重要なプロセス変数に対しても、最大ラム速度を予測することが目的の一部である。これは、ダイベアリング温度が安全な限界値（合金の固相線温度と顧客が必要とする表面品質による）に到達が可能な想定を前提としている。

今後の研究では、本報文で扱った変数に加え、形材の幾何学形状、押出比、ダイス設計、コンテナ冷却などの影響も含めて、より特定化したデータを提供する。それには次の 3 点に取り組む。

- 最終的に速度と生産性は、コンテナとツールングにおける過熱による変形が、除去不能であることが制約となる。従って、コンテナの空冷・水冷の効果を評価する必要がある。
- 押出形材の形状の影響は大きいので、当初は異なる径の丸棒で、それからより複雑な形状に引き続いていく。
- 最終的には、（ベアリング長さ、ポケット・フィーダー形状、最後に中空ダイスなどを考慮する）ダイ設計が、速度予測モデルを完全にするために含まれる必要がある。

謝意

本報文「押出生産性 パート II. — 押出ラム速度の予測（原題：Extrusion Productivity, Part II. — Predicting Ram Speed, 著者：Paul Robbins, Chris Jowett, Yahya Mahmoodkhani, Yu Wang）は、米国 Light Metal Age 誌 2019 年 2 月号にオリジナル掲載された。Fellom Publishing（米国カリフォルニア州サンフランシスコ）の 1 回限りの許可を得てここに掲載する。

日本語訳は、Castool Tooling Systems でなされ、本誌への掲載に当たり テクノコンサル ベンチマークス 高木茂嘉氏により見直し/修正/補正が加えられた。

* This article is a reprint of an article that first appeared in the February 2019 issue of Light Metal Age and is reprinted here with permission.