

ビレットのジェオメトリーが 生産性に及ぼす効果

How Billet Geometry Can Effect Productivity?

ポール・ロビンス *1)

Paul ROBBINS

ヤヒヤ・マムードカーニ *2)

Yahya MAHMOODKHANI

訳：高木 茂 嘉 *3)

Shigeyoshi TAKAGI

本報文は押出生産性に及ぼすビレットのジェオメトリー（幾何形状：ビレットの長さど径）の影響を検討する。押出圧力、押出温度、そしてビレットの変形モードに、ビレットジェオメトリーが如何に影響するかを確認に対し、特に3次元シミュレーションを利用した。シミュレーションは、最大生産性につながるコンテナ寸法、押出工具、ダイス設計の最適化を可能にする上で、押出メーカーにとって貴重であることを示している。

緒 言

押出メーカーの多くは、現在長いビレットの使用に移行する傾向にある。より長いビレットの使用で稼働率の改善があるとの報告がされ、恐らく、それがより高生産性を意味すると想定している。押出プレスフロントローディングタイプが一般的に使用される状況では、ビレット長さを最大にするのは容易なことである。明らかに、コイル製品を生産する押出メーカーは、低押出速度でより長いビレットを好んでいる。他方、一般の押出メーカーにとっては、高押出生産性に対しどのオプションの選択をしたらよいかは、即座には必ずしも明確ではない。

同じ押出長さの押出材を生産するには、押出されるビレットの重量当たりの体積は一定に保たれ

ねばならない。例えば、ビレット径を小さくすると（小型のコンテナにおいて）、ビレット長さは増さねばならない。一方、小径ビレットの使用で生産性を維持するには、減少した押出比をカバーするためにラム速度を上げなければならない。

本報文では、押出力及び出口温度に対するビレット長さど径の影響を分析するために、他方、押出速度（生産性）を一定に維持するために、一連のシミュレーションを用いた。そこで、ダミーブロック、コンテナ、ダイスへのビレットジェオメトリーの影響を、圧力と荷重の予測を用いて検証した。

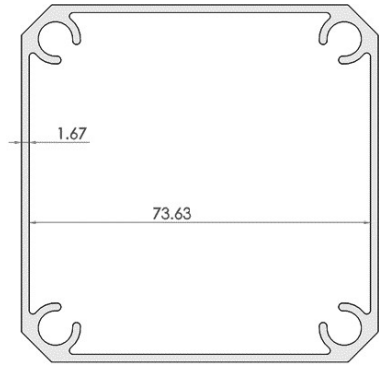
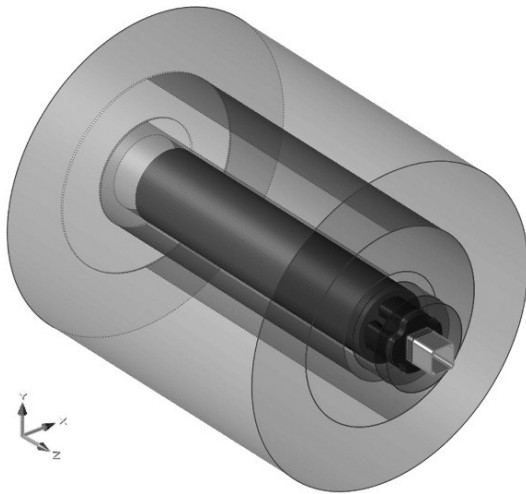
数学的な手順

アルティア社の有限要素法ベースのコード HyperExtrude® を、押出プロセスの熱力学的解析のために3次元シミュレーションに用いた。押出モデルと押出材の2次元図面を図1に示す。押出材は標準のAA6063合金である。変形をするAA6063材の変形抵抗を定義するために、正弦双曲線の構成方程式を使用した：

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

*2 Castool Tooling Systems, Canada,
Process simulation engineer, PEng

*3 テクノコンサル ベンチマークス、技術士（金属部門）



← (a) 押出モデル図

↑ (b) 押出材図

図1 3次元押出モデル図及び2次元の押出材図

$$A [\sinh(\alpha\sigma)]^n = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

ここで σ 、 $\dot{\epsilon}$ 、 T はそれぞれ変形応力 (MPa)、ひずみ速度 (1/s)、温度 (°K)、 A 、及び α 、 n 、 Q は材料定数でそれらの値は、 $5.91052 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 、 0.04 MPa^{-1} 、 5.385 、 141.55 kJol/mole 。¹⁾ R は一般的な気体定数 (8.314 J/moleK)。

ピレットとダイスの予熱温度は 850°F (454°C)、コンテナは 800°F (427°C) にセットした。プロセスは、準定常的に熱バランスが取れた数本のピレットが押出された後の状態になるので、シミュレーションは定常状態でなされる。

ピレットの直径と長さを、2水準の変数として扱う。一つの中心点を持つ要因計画 (5つのラン

ニング) を、シミュレーション実験に適応した (表1)。 7 in. 、 8 in. 、 9 in. のピレット径と 32 in. (813 mm)、 48 in. ($1,219 \text{ mm}$)、 64 in. ($1,626 \text{ mm}$) のピレット長さでカバーした。ラム速度は、それぞれに対し、押出機出口速度が 140 ft/min. (42 m/min.) となる様 (8 in. のピレット径で 30 in./min. : 7.6 m/min. に相当するラム速度) に調整した。表1には、押出力 (ダミーブロックへの荷重)、コンテナとダイセットへの部分的荷重、ダミーブロック面への平均圧力と押出材の出口温度を含めた、押出中のすべてのケースに対する荷重と温度の結果を要約した。押出材出口温度に対しては、最大と平均の2つの値がある。出口での最大温度は、ダイ出口での押出材断面の瞬時的な最大温度を表す。

表1 簡単な要因デザイン: 1つの中心点で2つの要因と2つのレベル及びFE (有限要素法) で予測する荷重と温度

ピレット長さ in. (mm)	ピレット径 in.	押出力 ton	コンテナ への荷重 ton	ダイス への荷重 ton	ダミーブロック への荷重 ksi (kg/mm ²)	最大 出口温度 °F (°C)	平均 出口温度 °F (°C)
32 (813)	7	1,778	602	1,176	83 (58.1)	1,069 (576)	1,042 (561)
32 (813)	9	2,627	716	1,911	76 (53.2)	1,060 (571)	1,033 (556)
64 (1,626)	7	2,271	1,172	1,099	106 (74.2)	1,080 (582)	1,054 (568)
64 (1,626)	9	3,304	1,444	1,860	96 (67.2)	1,063 (573)	1,036 (558)
48 (1,219)	8	2,460	991	1,469	89 (62.3)	1,067 (575)	1,042 (561)

表1の結果は、長くて径の小さいピレットから、径を大きくして短いピレットに移行すると、同じ押出材及びプラー速度で、出口温度と、ダミーブロックへの圧力の両方を減少させることを示している。これらは、径を大きく短いピレットを使用する方に利点があるが、表1を見ると、押出荷重がかなり大きく増している。しかし、得策な情報としては、より大きなピレット径では出口温度が低いため（プレス荷重容量に到達）、荷重の低下を望むとすると、より高温な予熱温度の使用で可能、あるいは（プレスの荷重能力に余裕があるなら）生産性を上げるためにラム速度の増速も可能である。モデルからの予測では、同じピレット重量であるなら押出材の出口速度を大きく増すことが可能なことを示している。7 in.ピレットの代わりに、同じ重量の8 in.、9 in.ピレットを使用すると、最大出口温度が1080°F（582°C）となる前に押出材速度はそれぞれ18%と25%と増大することが予測される。

ピレット径と長さを、荷重と出口温度への方程式に近似させるため回帰分析を使用した。これには、ピレット/コンテナの接触面積を表す混合パラメータ（ピレット径×ピレット長）の影響を考慮した。

以下に、押出荷重と平均出口温度に対する値を予測したモデルに近似した式を示す。両式とも、99.9%以上の決定係数 R^2 ($= 1 - \text{RSS} / \text{TSS}$ 、R

SS：残差変動、TSS：総変動）に対し良い近似を示す、即ち、近似式は、新しい範囲における各点への応答を補間するために、適切なレベルの精度を持って使用可能なことを意味している。

押出荷重 [ton]

$$= -1049 + 332.5 \text{ ピレット径 [in]} \\ - 4.72 \text{ ピレット長さ [in]} \\ + 2.875 \text{ ピレット径 [in]} \times \text{ピレット長さ [in]}$$

平均出口温度 [°F]

$$= 554.05 + 0.7656 \text{ ピレット長さ [in]} \\ - 0.07812 \text{ ピレット径 [in]} \times \text{ピレット長さ [in]}$$

荷重と温度を予測するシミュレーションで統計的に解析し、予測された応答でピレット寸法の標準化への効果を計算した。標準化効果は、標準偏差によって分けられる手段の違いである。²⁾ 表2には、かなり優位性のあるピレットのジオメトリ因子（ピレット径、ピレット長、および長さ×直径）で、これらパラメータの標準化効果の比較を通して評価をした。この研究においては、押出荷重とダイセットへの一部の荷重は、ピレット長よりもピレット径により影響を受けるが、対照的に、ダミーブロック面への圧力とコンテナへの荷重の一部は、ピレット直径よりもピレット長

表2 荷重と温度の反応への、ピレット径、ピレット長 及び混合ファクター（直径×長さ）の標準化の効果

応答される内容	標準化効果の影響		
	ピレット径	ピレット長さ	径×長さ
押出 荷重	30	18	3
コンテナへの荷重	95	30	12
ダイスへの荷重	20	2	1
ダミーブロック圧	25	9	2
最大出口温度	15	9	4
平均出口温度	33	20	11

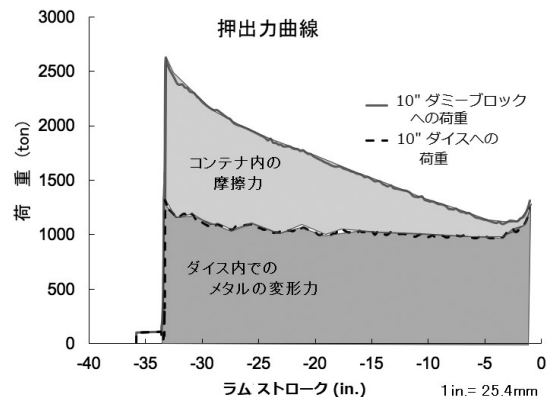


図2 ダミーブロックとダイス面の上の荷重：コンテナ内での摩擦力及びダイス内でのメタル変形力⁴⁾

により影響されると結論付けられる。標準化された値からは、一般に、ビレット直径はダイスセットへの荷重で決まるが、一方でビレット長は小さな影響しか及ぼさないことを示す。それらは、偶々表1に見られる間接的な効果である。

ビレット長さは、コンテナでの荷重の一部として最も大きい影響を及ぼすが、ビレット径もまたコンテナへの荷重を決定する重要なパラメータで、ビレット長さの様に直接的に影響を及ぼす。ビレット径の方がビレット長さよりずっと影響するように、最大と及び平均的な温度もこの両者と同じ程度の影響を示している。

短いビレット 対 長いビレット

短いビレット 対 長いビレットのブレイクスルー圧を比較する場合、使用される1つは次の式である³⁾：

$$\text{圧力} = A \log(\text{押出比}) + B (\text{合金せん断応力} \times \text{ライナー表面積})$$

第1項は、ビレットをpush out材へと面積を減らしていく力の一部、または基本的にはダイスセットへの荷重の一部を表わす。第2項は、金属がコンテナ内を移動して行く時に、ビレットのせん断力に勝る力を計算する。変形の熱を介しての温度上昇の複雑性については、有限要素法モデリングに

よってより正確に計算される。

以前の研究でも、押出生産性へのビレットのジェオメトリー（幾何学要因）の効果を取り上げた。^{4,5)} そこでは、径に対して5倍よりも、7倍の長さのビレットをpush outの方がよいかどうかを考慮した。その実験のために、直径 8.375 in. のコンテナで 8 in. 径×56 in. (1,422 mm) 長さのビレット、及び 直径 10.375 in. のコンテナで 10 in. 径×35.84 in. (910 mm) 長ビレットを使用した。結果は極めて興味深く、図3に要約した。図3aは、2種のビレット径（8 in. と 10 in.）と、2種の温度に対するpush out荷重（または、ダミー・ブロックへの荷重）を示す。要約すると、固定した合金種、ビレット重量、ダイス、及びpush out速度では、ブレイクスルー圧はほとんど同一だった。図3bは、2種のビレット径に対する、ダミーブロック面での圧力を示す。8 in. 径の長いビレットで、800°F/427°C（約 120 ksi：約 84 kg/mm²）で、最大のダミーのブロック面圧力は、同じ体積の10”の短いビレット（約 80 ksi：約 56 kg/mm²）より約50%大であった。この大きな違いは、ダミーブロック並びにコンテナとシステムの耐久性に影響する。

8 in. ビレットをpush outメカニカルな仕事量は、10 in. ビレットよりも約35%は大きく（800°F/427°Cで、8 in. に対しては約 20 MJ vs 10 in. に対しては約 15 MJ）、エネルギー消費で35%以上変換される。他方、8 in. ビレットに対する面圧には

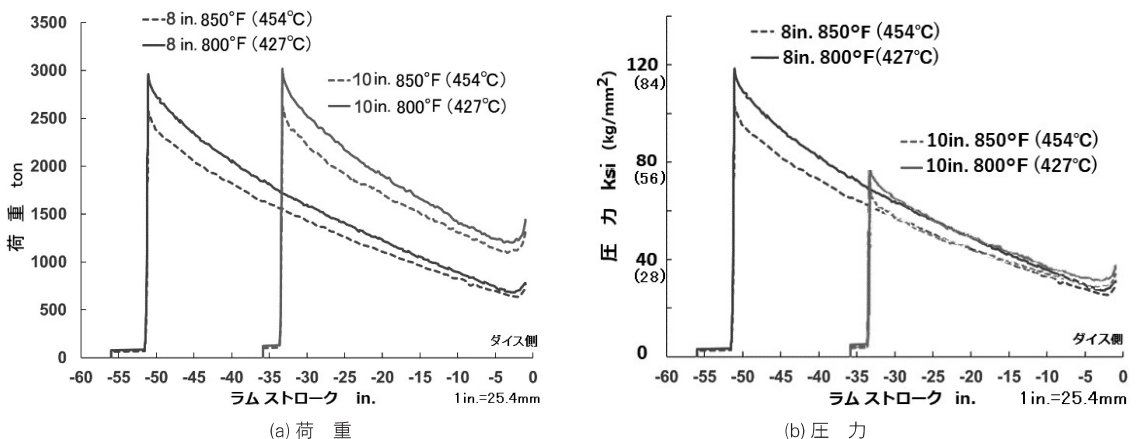


図3 2種のビレット径及び温度に対するダミーブロックへの荷重(a)と、ダミーブロックへの圧力(b)

大きな差があり、ダミーブロックとコンテナのデザインを難しくする。これへの簡単な解決法には、より大きなピレット径を使用することを示唆しているかもしれない。

前回のピレットジオメトリーに対する研究では、一般的に、より高い生産性達成を期待しての長いピレットの押出は、必ずしも適正ではないことを示した。^{4),5)} むしろ最適なピレット長さはプロダクツミックス、押出材重量、そして押出材外接円サイズにより決まる、更に、より長いピレットでは、ダミーブロック、コンテナには高い圧力を、高い油圧オイル流量による高いラム速度を必要とし、そしてアップセットと押出材の前中後での寸法変化への問題があり得る傾向がある、とした。必要とするブレークスルー圧力が低い場合、押出速度を上げる大きなポテンシャルを得るには、短いピレットを低い温度に加熱することで可能である。

図4は、押出荷重へのピレット径の影響を示す結果で、一方で押出材速度とピレット重量を一定に保持しての有限要素法（FE）シミュレーションの結果を示す。コンテナとダイスへの荷重の一部は、ピレット寸法の影響を見るため分離している。ピレット長さと同ピレット重

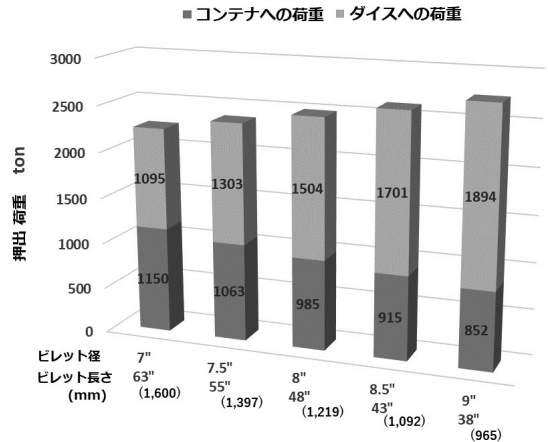
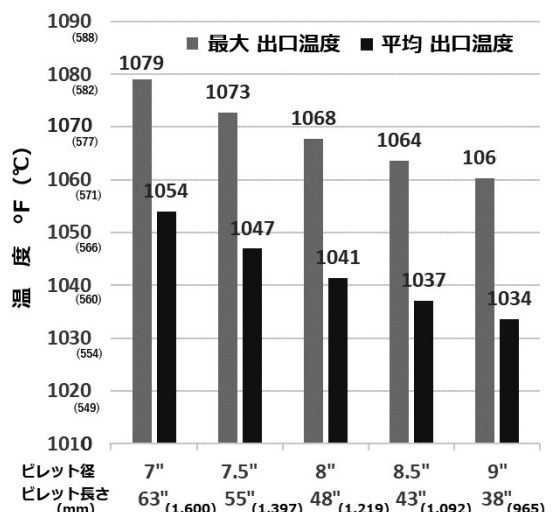
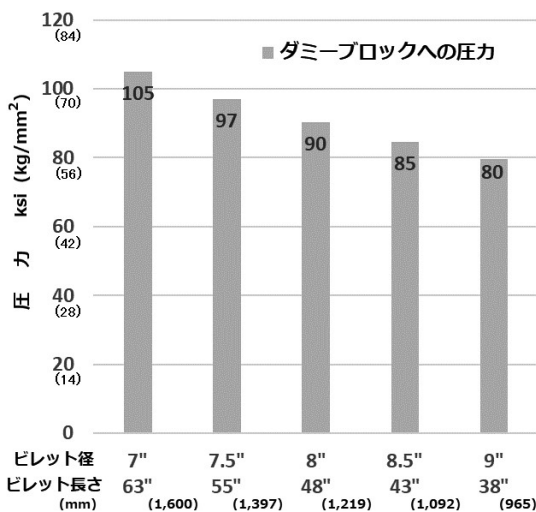


図4 一定な押出速度とピレット重量に対する、押出荷重へのピレット寸法の影響

量と押出速度を得るために調整されるが、押出荷重はピレット径を増すと共に増加する。

ダイスセットへの荷重の一部は、多くが面積の減少に費やされるためピレット径と共に増加するが、コンテナへの荷重は、ピレット/コンテナの接触面積が減少するために低くなる。

ダミーブロックへの最大荷重はピレット径と共に増加するが、図5で示すモデルでの予測では、ダミーブロック面での圧力はピレット径を増すと大きく減少することを示している。



(a) ダミーブロック面圧力への影響

(b) 押出材出口温度への影響

図5 一定の押出速度とピレット重量に対する、ダミーブロック面の圧力と押出材出口温度へのピレット寸法の影響

理由は、表面面積の増加とラム速度とビレット長さとの減少する組合せから、圧力が低下するからである。押出材の出口温度は、ビレット径と同じ傾向を示す。出口温度の平均と最大との差は、ビレット径と共に増加するが、ビレット径が増すと大きくは変わらない様に見える。

表3では、同じ重量ではあるが異なる径のビレットを比較している。出口速度は出口温度を得るまで調整をする。出口速度は、ビレット径を7 in. から9 in.に大きくした時に見られた様に、出口温度を維持している間は25%改善が可能である。

表3 ビレット重量と出口温度の一定化において、ビレット径を増加する場合の生産性改善

ビレット径/長さ in. (mm)	最大 出口温度 °F (°C)	押出材速度 ft/min (m/min.)	正常化した 押出材速度 ft/min (m/min.)
7 in./63 (1,600)	1079 (582)	140 (42)	100 (30)
8 in./48 (1,219)	1079 (582)	165 (49.5)	118 (35.4)
9 in./38 (965)	1079 (582)	175 (52.5)	125 (37.5)

要旨と結論

理想的な条件の下、即ち 最小のビレット温度で押出をすると仮定すると、押出機は妥当なダミーブロックへの面圧で押出が可能となり、満足のいく品質を最高速度で達成するが、如何なるビレット重量の増加は、ビレット温度の上昇と押出速度の減速を必要とする。製品によっては（重量ある押出材、特別合金、コイル製品、他）、この点、歩留と生産性には利点となる。しかし、ビレット重量を増すのに如何なる理由があろうと、ビレット長さを増すことが今日の傾向である様にみえる。その様な変化は、押出プロセスの異なる部分々に複雑さを与える、例えば、高い面圧に対応するコンテナとダミーブロックのデザインに、ランアウトにおける押出材前中後の寸法変化に、不十分なメタルフロー、スクラップの発生、等である。そこで、この様なアプローチに従う場合、次の注意点を提案したい。

本報文にて報告した押出条件を使用しての私たちの計算では、ビレット径を大にしてビレット重量を増やす効果は、ビレット長さを増やすことより利点があることを示している。事実、低い実績押出速度、ダミーブロックへの高い圧力、ライナー内面の前部から後部に変動して付着するメタルスキン厚さの問題、等々の、長いビレットで生じた課題が、ビレット径を増すことで改善されることを示唆している。

箇条書きにして整理すると、

- 出口速度とビレット重量を維持することで、径の大きいビレットは出口温度とダミーブロック面圧を低下するが、僅かながらピーク荷重を増やす、
- 出口速度を維持することで、押出荷重と出口温度はビレット径に敏感である、その一方で、ダミーブロック面圧はビレット長さに敏感である。
- 同一の出口速度と ビレット重量に対して、8 in.ビレットでの押出は10 in.ビレットでよりも約35%多いエネルギーを消費する、
- 大なるビレット径の使用は、コンテナのダイ側面の応力を減少する。

謝 辞

著者らは、Chris Jowett 氏及び Richard Dickson 氏の貢献、サポートに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) "InspireExtrude 2019.3," Altair HyperWorks, 2019.
- 2) M. A. Hardy and A. Bryman, Handbook of Data Analysis, London: SAGE Publication, 2004.
- 3) M. Bauser, G. Sauer and K. Siegert, EXTRUSION, Materials Park, OH: ASM International, 2006.
- 4) K. Chien, P. Robbins, C. Jowett and Y. Wang, "Extrusion Productivity, Part I - Billet Geometry," LIGHT METAL AGE, vol. April 2018, pp.28-31.
- 5) 上記[4]の日本語訳版、アルトピア、vol.48、No.7, 2018, pp.29-35