

棒線圧延時の中心圧下に及ぼす粗列パスの影響

中崎 盛彦^{1*}・西村 信己^{2*}

Effects of caliber shapes on center deformation in bar and wire-rod rolling mill.

Morihiko Nakasaki and Nobuki Nishimura

Synopsis: In order to satisfy demands for higher precision rolling, importance of CAE analysis with rolling caliber design has been growing. In this work, cross section shapes of rolling products, strain and stress were investigated by CAE analyses (CORMILL) both with steel experiments and with plasticine (oil clay) experiments.

The findings are as follows:

- (1) In order to compare square-diamond caliber with round-oval caliber, steel rolling and 3-dimensional CAE analysis "CORMILL" were examined. Almost identical cross section shapes were obtained from both analyses and experiments.
- (2) Spread estimation by the CAE was accurate (within 5%).
- (3) With plasticine experiments center holes of billets through round-oval passes closed at the No.3 pass, while billet holes through square-diamond passes did not close at No.3 pass.
- (4) The hydrostatic stress parameter, Gm, which is usually used in forging, has been applied to rolling in this work. According to plasticine simulation results and CAE simulation results, Gm can be applied to rolling as an elimination parameter of center porosity.

Consequently, pressing effect of the round-oval pass on center porosity can be the same as or more than that of the square-diamond pass.

1. 緒言

近年、環境及び省エネルギーの観点から素形材製品のニアネットシェイプ化のニーズが高まっている。これに伴い棒鋼・線材圧延においても製品の寸法精度向上や表面キズ等の欠陥がないことが要求され、それを実現する精密圧延技術が必要とされている。そのような環境の中、棒鋼・線材圧延におけるパス設計は生産性・製品品質の観点から重要である。

これらのパス設計方法についての基礎的な検討は以前からなされており、代表的なものとしては篠倉¹⁾や斉藤ら²⁾による矩形換算法がある。しかし、中心部へのひずみやロールバイトでの変形といった材料内部の局所的な変形について検討できないという問題があった。こうした内部の局所変形を知るには有限要素法解析が有用である。一般に三次元CAE (Computer Aided Engineering) 解析は変形に対し厳密に取り扱うことができるが、要素数の増加に対し計算時間が指数関数的に増加することが問題であった。しかし、

コンピュータの飛躍的な進歩により計算速度がアップしたため、従来二次元的に取り扱っていた形状でも、三次元で取り扱うことができるようになった。棒線圧延は板圧延と異なり断面が三次元的な変形であるため、より精密に検討できる三次元CAEの適用が特に有用である。形鋼圧延³⁾、棒線圧延⁴⁾などへの適用はその一例であり、圧延工程における三次元CAEは有用である。

今回、棒線圧延時の中心圧下に及ぼす粗列パスの影響を検討するにあたり、スクエア-ダイヤパスとラウンド-オーバルパスの2種類の工程を、実機実験、プラスチック実験及び三次元圧延解析コード⁵⁾を用いた解析の3種類の手法により、比較検討した。また、自由鍛造で用いられている空隙圧着パラメータ⁶⁾を解析結果から計算して圧延分野への適用も試みた。

2. 棒線圧延パスの特徴

棒線圧延工程においては、一般に粗列では減面率を大き

*1 プロセス開発G

*2 条鋼製造部条鋼技術グループ

くとれ、デスクレーリング性に優れたスクエア-ダイヤパスを、仕上列では表面品質・形状に有利なラウンド-オーバルパスを用いることが多い⁷⁾。これまで、当社第二棒線工

場においても、粗列にスクエア-ダイヤパスを、中間列から仕上列にかけてラウンド-オーバルパスを適用してきた。当社の代表的なパススケジュール例をFig.1に示す。粗列をスクエア-ダイヤ形状にすることで減面率の大きいパスを設定できるメリットはあるが、その反面角部が折れ込んだり引っ掻いたりして、高合金鋼等熱間加工性の悪い一部鋼種では表面キズが発生ししやすいデメリットがある。一方、ラウンド-オーバル形状は減面率を大きく取りにくいものの、スクエア-ダイヤよりさらに均一変形に近く、表面性状及び断面形状に優れるメリットがある。また、当社では丸ピレットを採用しており、丸ピレットからオーバル形状への変形は無理がない。以上の理由から、粗列パスの断面形状をスクエア-ダイヤとした場合とラウンド-オーバル形状とした場合の検討を行うこととした。両パスにおける変形挙動及び中心部圧下度合いへの影響について、実機及びプラスチックにて実験を行い、CAE解析と比較した。

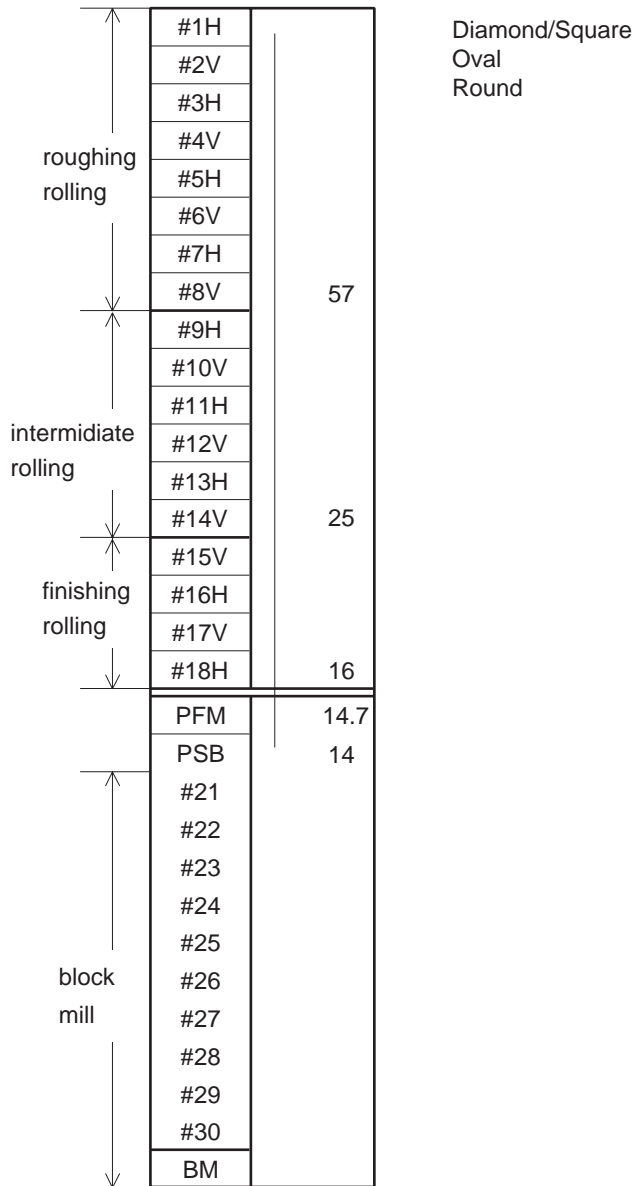


Fig. 1. Schematic diagram with pass schedule of No.2 rolling mill.

3. 実験方法

3.1 実機による圧延実験

Fig.2に粗列パスの詳細を、Table 1に圧延条件を示す。従来は#1～#4の粗列パスにてスクエア-ダイヤパスを、#5以降でラウンド-オーバルパスを採用していた。今回#1～#4のパスをラウンド-オーバルパスに変更して実機での圧延を行い、ラウンド-オーバルパスのかみ止め材より各パス入側・出側の断面形状を調査した。供試材はSCR420、圧延温度を1000 とした。

3.2 プラスティシン実験機によるモデル試験

また、プラスチック圧延機によるスクエア-ダイヤ及

Table1. Rolling conditions in steel

Diameter of roll/mm	460 ~ 500
Steel	SCR420
Rolling temperature/	1000

	billet	#1	#2	#3	#4	#5	#6
former pass	●	◇	◇	◇	◆	○	●
#1-#4 square-diamond							
#5-#6 round-oval	φ167						φ 74
		H	V	H	V	H	V
new pass	●	○	●	○	●	○	●
#1-#6 round-oval	φ167						φ 74

: Round : Oval : Square : Diamond

Fig. 2. Pass schedule of No.2 rolling mill line.

びラウンド-オーバルの圧延シミュレーション実験を行った。プラスチック圧延実験機の外観をFig.3に、圧延条件をTable 2に示す。ロール材質はS45Cであり、潤滑剤に炭酸カルシウムを用いた。モデルの大きさは実際の約1/3とし、供試材には直径55mmの白色プラスチックを用いた。中心空隙の圧着度合いの評価を行うため、供試材の中心に直径10mmの貫通孔を作って圧延実験を行った。



Fig. 3. Rolling test machine for plasticine.

Table2. Rolling conditions for plasticine simulation (roughing line)

Caliber shape	(a) square-diamond (b) round-oval
Total pass number	6
material	plasticine (white)
lubricant	CaCO ₃ ($\mu = 0.30$)
Temperature	20

3・3 圧延のCAE解析

3・3・1 解析条件の検討

圧延解析には柳本らの開発した三次元剛塑性定常圧延解析コード「CORMILL」⁵⁾を棒線圧延用に機能特化し、GUI (Graphical User Interface) を強化したバージョン⁶⁾を用いた。Fig.4に解析画面の一例を示す。

繰り返し計算を行う数値シミュレーションの場合、計算の精度と計算にかかる時間は反比例の関係にある。計算精度を上げるために繰り返しの計算回数を増加させると計算時間が長くなるが、計算時間を短くするために繰り返し回数を減らすと精度が低下する。この精度と計算時間はシミュレーションに使用するパラメータの設定値によって左右される。そこで、パラメータを変更して精度と時間の双方を満足させる領域を探索した。CORMILLにおける計算パラ

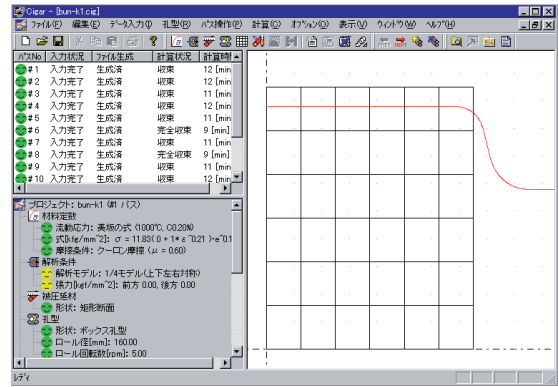


Fig. 4. Operation image of the CORMILL (Bar and wire rob rolling limited edition Ver. 3)

Table3. Calculation conditions in CORMILL

Parameter	Default
Mesh system Nx x Ny x Nz	6 x 6 x (4 + 8 + 2)
Change in thickness of rolled strip	0.001
Norm ratio of velocity vector	0.0005
Normalized inequilibrium stress	0.001
Volume imbalance coefficient	0.2 , 0.1
Friction coefficient	0.30

メータをTable 3に示す。これらのうち、計算精度及び計算時間に最も影響するのは緩和係数と呼ばれるパラメータである。そこで、緩和係数を様々に変化させて計算を行い、時間及び精度に及ぼす影響を調査した。解析事例は丸ピレットからオーバルカリバーにて圧延した場合とし、幅広がりを実測値と比較することにより検討した。結果をFig.5に示す。Fig.5から緩和係数の最小値は計算時間と比例関係にあるが、最大値は無関係であった。また最小値を変更した場合、例えば計算時間は0.1 0.2と変更した場合、計算精

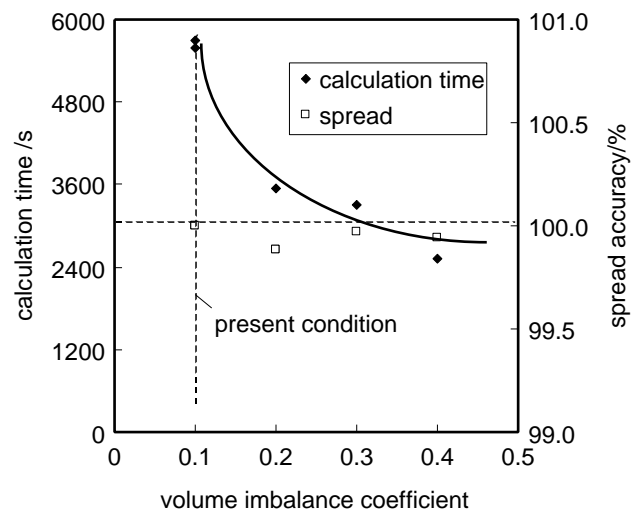


Fig. 5. Relationship between calculation time and accuracy

度はほとんど変わらなかったものの、計算時間がほぼ半分になった。計算時間にばらつきがあるのは、使用したコンピュータがネットワークに接続しているため、他のPCからのアクセス等、外乱が入ったためと考えられる。上記の結果から、緩和係数の最小値を0.2と設定し、計算を行うこととした。

3・3・2 粗列圧延のCAE解析条件

前節で決定した解析条件を用いて、従来パス及び改良パスの粗列#1～#6パスまでの実機圧延テスト材の断面形状と解析結果の比較を行った。解析条件をTable 4に示す。素材はS20Cとし、変形抵抗には美坂の式⁹⁾を適用した。断面内温度一定を標準条件に、内部と外部の温度差を100～300 と仮定して計算を行った。また、本来は前パスのひずみの一部が次パスに累積する可能性はあるが、本報ではひずみがパス間で完全回復すると仮定して計算を行った。

Table4. Calculation condition for roughing line

Caliber shape	(a) square-diamond (b) round-oval
Total pass number	6
Steel, temperature	S20C , 980
Flow stress	Misaka's fomula ⁹⁾ $\sigma = 12.34 \epsilon^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.13}$
Friction coefficient	$\mu = 0.30$
Mesh system Nx x Ny x Nz	6 x 6 x (4 + 8 + 2)
Volume imbalance coefficient	0.3 , 0.2
Temperature difference (surface and center)	0 , 100 , 200 , 300

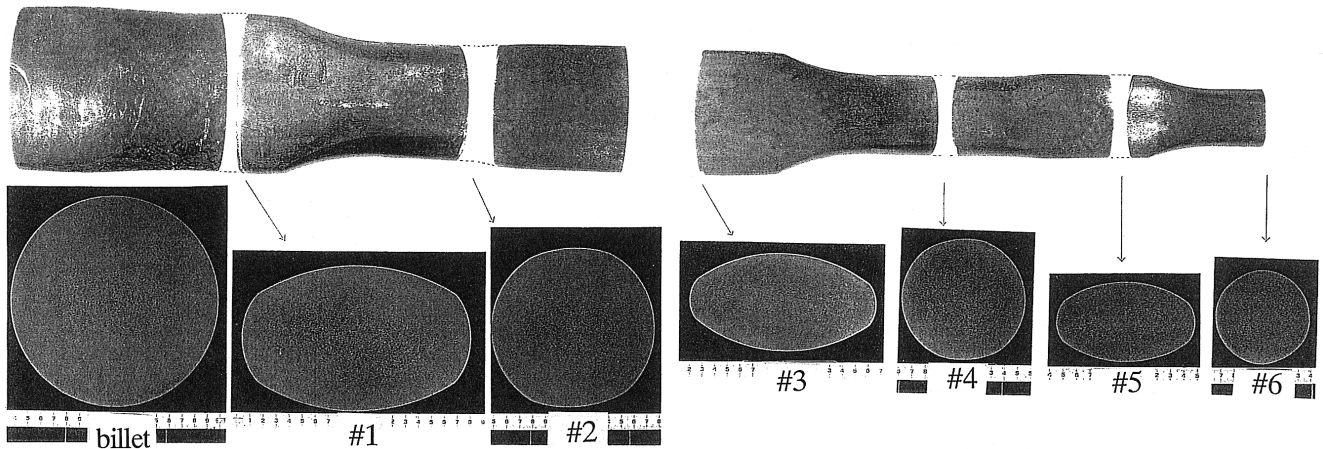
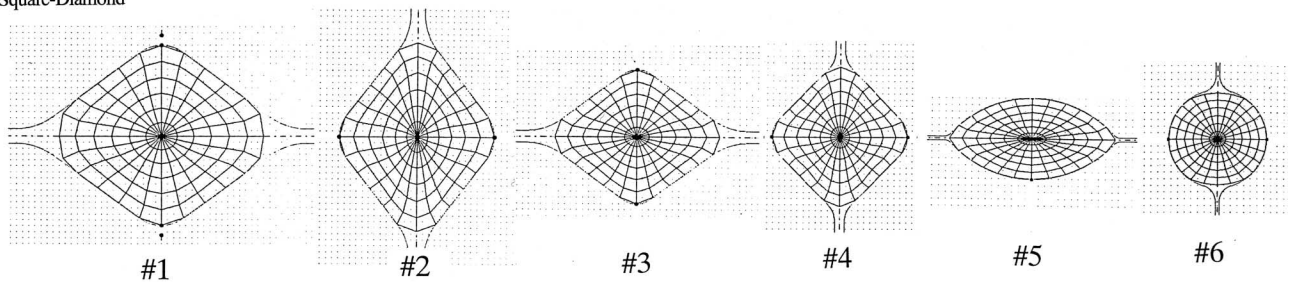


Fig. 6. Appearance of deformation area (top) and cross section (bottom) in Round-Oval passes

(a) Square-Diamond



(b) Round-Oval

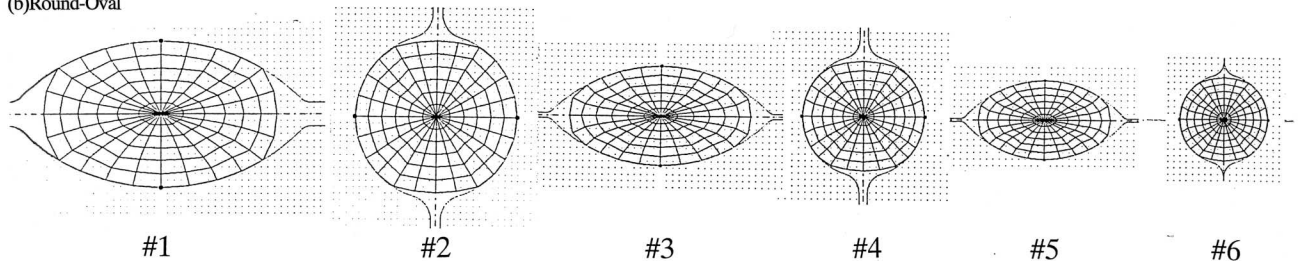


Fig. 7. Cross section shapes of No. 2 rolling mill (calculation)

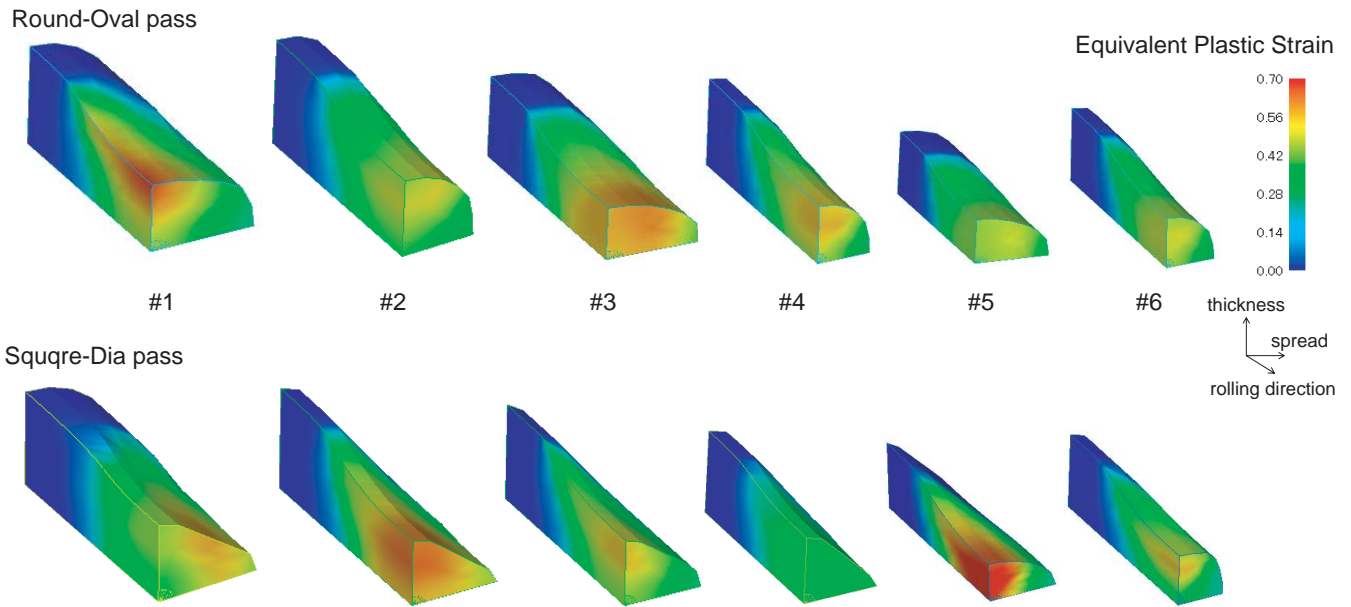


Fig. 8. Distribution of equivalent plastic strain (1/4 cross section)

4. 実験及び解析結果

ラウンド-オーバルパス実鋼かみ止め材の断面形状と、解析による圧延後の断面形状をそれぞれFig.6とFig.7に示す。解析と実鋼の両者を比較すると、断面形状はよく似ていることが分かる。また、Fig.8に各パスの相当ひずみ分布を示す。スクエア-ダイヤ、ラウンド-オーバルのいずれの工程でもひずみはロールと接触する領域で高くなる。また、いずれのパスにおいてもひずみの分布には局所的な集中が見られず、均一変形に近いことが分かる。

CAEによる幅広がり予測値と実寸との比較をラウンド-オーバルの各パスで行った。結果をFig.9に示す。Fig.9には

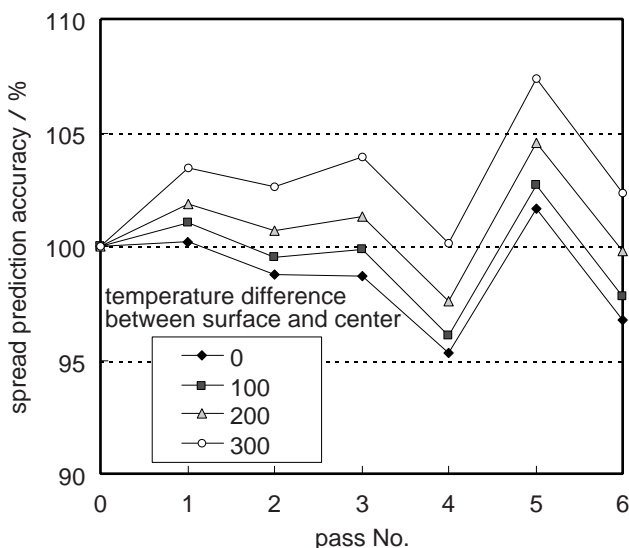


Fig. 9. Relationship between temperature differences and spread prediction accuracy

表面と内部の温度分布を仮定した解析結果も併せて示している。標準条件で行った解析結果から、幅広がり誤差は $\pm 5\%$ 以内に抑制されることがわかった。この結果から、今回の事例では、表面と内部に100の温度差を仮定することで1~3パスの予測精度を1%以内に抑制することが可能になることがわかった。これは、実機でも予想される範囲の温度差である。すなわち、計算による幅広がり予測が可能であり、内部と表面の温度差を考慮することで幅広がり予測精度を向上させることができる。

次に、プラスチック実験による中心空隙の圧下実験結果をFig.10に示す。両パスを比較すると、スクエア-ダイヤでは3パス終了時点で中心空隙が残っていたのに対し、ラウンド-オーバルでは3パス終了時点で空隙が残らなかった。両工程の各パスにおける減面率をFig.11に示す。ラウンド-オーバル工程では3パスでの減面率が大きく、一方のスクエア-ダイヤ工程では5パスでの減面率が大きくなっており、減面率配分の影響もあると考えられるものの、減面率の差はそれほどないことからカリバー形状による影響であると考えられる。以上、減面率と均一ひずみの効果により、今回のラウンド-オーバルパスはスクエア-ダイヤパスより少ないパス回数で中心圧下効果を得られると考えられる。

5. 考察

鋼片・鋼塊を圧延または鍛造する際の中心圧下に影響を及ぼす因子については諸説がある。木内らは空隙内部に材料が流入することでエネルギーが減少し、空隙が圧着されることを極限解析の手法で確認した¹⁰⁾。この方法はより厳

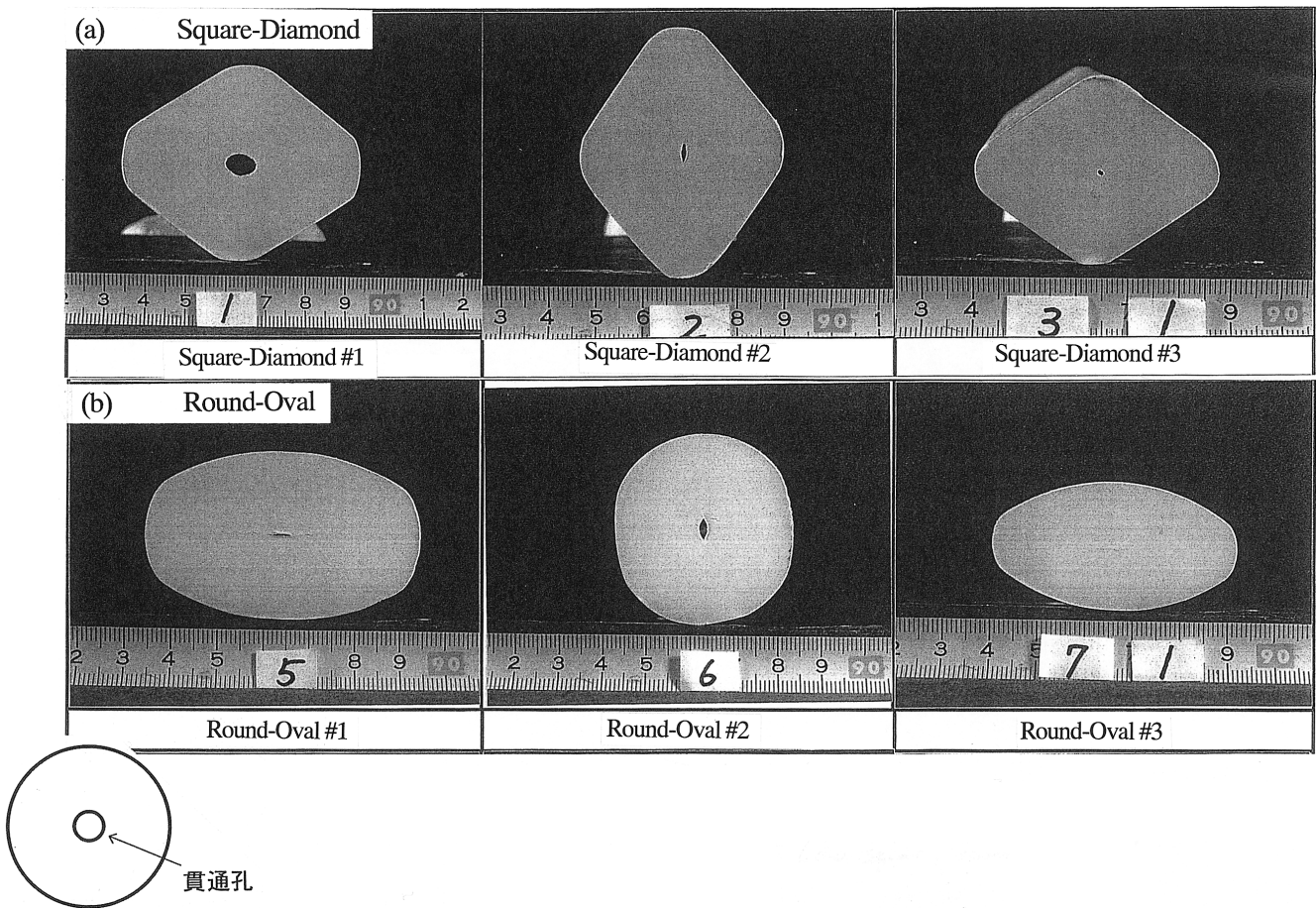


Fig. 10. Plasticine test (Square-Diamond, Round-Oval)

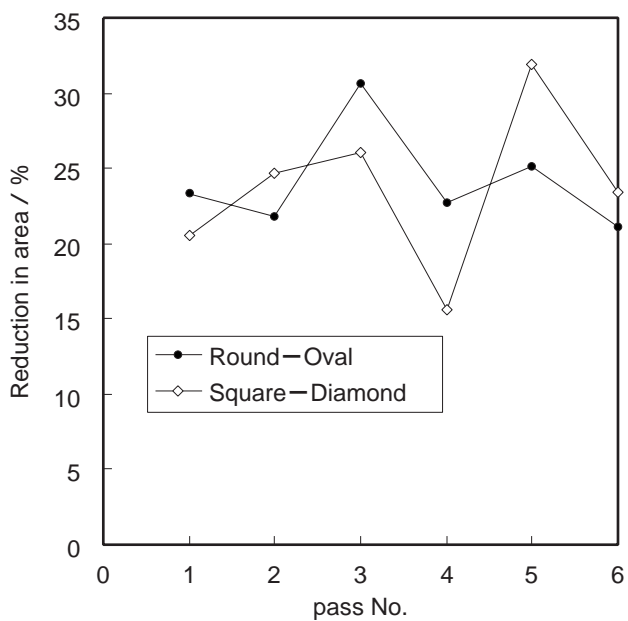


Fig. 11. Change of reduction in area

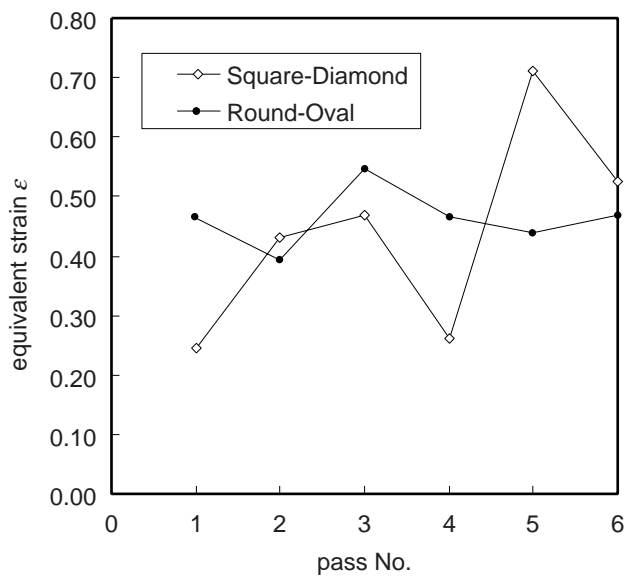


Fig. 12. Changes of equivalent strain (center)

密な方法であるが、局所的な変形を表現しにくいことから今回の解析には適用しなかった。小野らは空隙圧着パラメータの考え方を導入し、有限要素法解析と実験から自由鍛造の際の静水応力成分を相当ひずみで積分した値が中心圧

下に影響を及ぼすと述べている⁶⁾。また、圧延及び鍛造で総括的に取り扱うことが可能であること、明確な指標を示しやすい利点がある。そこで本報ではそのままの空隙圧着パラメータを用いて今回のプラスチック実験とCAE解析について検討を行った。

まず、Fig.12に中心部の相当ひずみの推移を示す。今回、各パスでのひずみ継承は行っていないが、ラウンド-オーバルパスでは中心部の相当ひずみがほぼ一定で推移していることが分かる。

続いて、空隙圧着パラメータGmの計算を行った。応力の静水成分をひずみで積分した無次元化エネルギーGmは、以下に示す(1)式で表される。

$$Gm = \int_0^{\varepsilon_f} (-p/\sigma_{eq}) d\varepsilon_{eq} \quad \dots (1)$$

ここで、 $p = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$ 静水応力 σ_{eq} : 相当応力 ε_f : 中心部の最大ひずみ ε_{eq} : 相当ひずみ

このGmが増加するに伴い、空隙圧着率は増加し、最終的に空隙が閉鎖する。Fig.13に材料中心部の各パスでのGmと、各パスでのGmを累積した ΣGm を示す。Gmが単純加算で比較できるという従来知見はないが、両パスの中心圧下度合いを比較するため、ここでは簡易的な取り扱いとしてGmをパス毎に累積した ΣGm を用いた。実際に空隙の圧着したラウンド-オーバルの3パスとスクエア-ダイヤの4パスにおける ΣGm の値はいずれも0.5前後とほぼ同じである。実際の材料において空隙はもっと小さいので、今回のモデル実験とはオーダーは異なるものの、空隙圧着パラメータを用いた解析結果は、穴径が $\phi 10$ である場合プラスチック実験とよく一致しており、これを正とするならば本解析結果は妥当であると考えられる。

しかし、ラウンド-オーバルにおける2パスの空隙面積は1パスの空隙面積より広がっている。一方、Gmの値は単調増加であり、実際の挙動と一致していない部分もある。Gmが増加するのは静水応力が負の場合であり、厚み方向

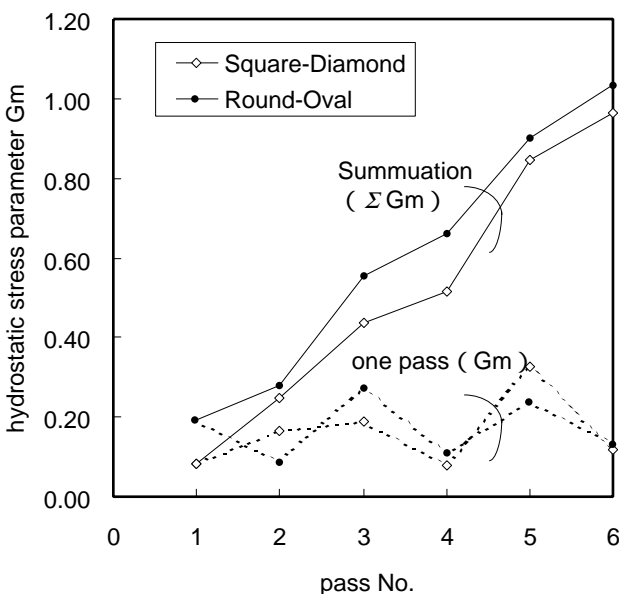


Fig. 13. Change of hydrostatic stress parameter Gm

の圧縮応力が大きいために全パスで静水応力が負になっているが、田川らが圧延時の厚み方向応力が影響することをモデル実験で確認した¹¹⁾ように、各方向の応力成分についてももう少し検討を加えれば、Gmによる空隙圧着の精度はより向上する可能性がある。

また、Fig.13では、ラウンド-オーバルパスでの値がスクエア-ダイヤパスでの値を上回っていることから、今回使用したラウンド-オーバル工程の圧着効果は従来のスクエア-ダイヤ工程の圧着効果と同等以上と推定される。

6. 結言

粗列のスクエア-ダイヤ工程及びラウンド-オーバル工程の比較を目的として第二棒線粗列パスのCAE解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 実鋼圧延及び三次元圧延解析コード「CORMILL」による解析を行い両者を比較したところ、圧延後の断面形状は実機と解析でよく一致し、解析により実機圧延のシミュレーションが可能であることがわかった。
- (2) CAE解析による幅広がり予測を行った結果、幅広がり予測精度は $\pm 5\%$ と良好であった。
- (3) 中心空隙のあるプラスチックビレットを用いてスクエア-ダイヤ及びラウンド-オーバルの圧延モデル実験を行った結果、ラウンド-オーバルの方が3パスで空隙圧着したのに対し、スクエア-ダイヤでは3パスでは空隙圧着しなかった。
- (4) CAE結果を用いて、鍛伸の解析に使用される空隙圧着パラメータGmの圧延への適用を試みた。計算結果はプラスチック実験の結果と同じ傾向を示し、本手法の圧延工程への適用が可能であることがわかった。

以上の結果から、減面率が同等である場合ラウンド-オーバルパスによる中心圧下効果はスクエア-ダイヤパスと同等以上であると考えられる。

現在、第二工場棒線圧延粗列ラインは、完全ラウンド-オーバルパスを採用している。品質改善では表面キズ低減、原価改善では歩留り向上・ロール原単位向上・工程休止削減等の様々な効果をあげている。

文 献

- 1) 篠倉恒樹：塑性と加工，34-384（1993），18
- 2) 斎藤好弘，高橋洋一，森賀幹夫，加藤健三：塑性と加工，24（1983）1070
- 3) 角村義幸，武藤毅，井上健一，柳本潤：CAMP-ISIJ，13（2000），290
- 4) 小野訓正，神原進，富田正威，浅川基男，柳本潤，木内学：塑性加工春期講演会論文集，（1994），333
- 5) 柳本潤，木内学，中村充，倉橋隆郎：32-367（1991），1000

- 6) 田中光之, 小野信市, 常野誠: 塑性と加工, 28-314 (1987), 287
- 7) 鉄鋼便覧 (2), 862 (1980), 日本鉄鋼協会
- 8) 柳本潤, 木内学, 宮澤英之, 浅川基男: 鉄と鋼, 86-7 (2000), 452
- 9) 美坂佳助, 吉本友吉: 塑性と加工, 8-79 (1976), 414
- 10) 木内学, 向四海: 塑性と加工, 22-248 (1981), 927
- 11) 田川寿俊, 田中淳一, 平沢猛志, 角南英八郎: 鉄と鋼, 62-13 (1976), 1720

