

連続圧延パス解析への静水圧積分の適用

中崎 盛彦^{*1}・高須 一郎^{*2}

Application for hydrostatic integration parameter for rolling pass schedule
Morihiro Nakasaki and Ichiro Takasu

1. 緒言

棒鋼あるいはその中間製品であるピレットの製造時に、連続鋳造及び鋼塊凝固時の収縮孔に起因する中心空隙不良が発生することがある。これらの対策には、鋳造方法の検討はもちろん、圧延及び鍛造といった塑性加工工程での改善も必要である。従来、材料の加工度は圧延形状比や鍛錬比といった全体の加工量を基に評価されてきたが、近年のコンピュータの大容量化・高速化によるCAE解析技術の向上によって部分的な加工度も評価することが可能になっている。そこでCAE解析を活用して圧延・鍛造工程の空隙閉鎖評価方法を確立し、それを現場工程の改善に適用することは、鋼材の品質向上や製品の競争力を付与する上で重要な技術となり得ると考えられる。

筆者らはCAE解析を用いて静水圧積分Gmを計算し、圧延及び鍛造工程の中心空隙閉鎖挙動を推定する方法を提案した^{1)~3)}。しかし、前報¹⁾では単独パスのみの解析結果であり、連続的な圧延、鍛造の評価を行っていないこと、並びに空隙閉鎖する静水圧積分Gmのしきい値が明確でないなどの問題があった。

本報告では、プラスティシン実験及びCAE解析により、連続圧延パスでの静水圧積分Gmの評価を行い、連続圧延での適用について検討すると共に、中心空隙防止に及ぼす分塊圧延時の圧下量の効果についての評価を試みた。さらに、前報で提案した静水圧積分Gmの補正係数を考案する事により、実際の製造工程における空隙閉鎖予測をCAE解析により可能にした。

2. プラスティシン実験による静水圧積分の補正

2.1 実験条件

筆者らは単パス圧延における圧下率と空隙閉鎖の関係について述べた¹⁾。単パス圧延の場合、圧下率が高いほど中心の圧下効果は高くなる傾向にある。ところが、実際に分塊圧延は連続パスによって行われており、パスによって圧

下方向が変わるという特徴がある。異なる圧下方向から圧下した場合、そのまま圧下効果を積算して良いかどうか不明であった。

そこで、連続圧延パスの空隙閉鎖挙動を確認するため、角ブloomから角ピレットを圧延する3種類のパススケジュールにおいて、プラスティシンによるモデル実験を行った。プラスティシン実験モデルの断面形状は実際の約1/5である幅75mm×高さ95mm、空隙サイズはブloom時点でφ10貫通孔とした。空隙の大きさは実際の鋼に存在する空隙よりもはるかに大きい、プラスティシンは変形に対する感受性が鋼より高いため、大きめの空隙に設定した。圧延パススケジュールの考え方は以下の通りである。上記のブloomを7パスまでに幅58mm×高さ50mmに成形する。この時点で中心空隙は長径3.3mm、短径2.4mmの楕円形になっている。実験Aでは中心空隙の閉鎖を目的として8、9パスの両パスにて強圧下した。また実験B、Cはこれら両パスをさらに数回のパスに分割することで、圧下効果を弱めたものである。実験Bは実験Aの8パスを3分割、9パスを2分割したもので、また実験Cは実験Aの8パスを3分割、9パスを4分割したものである。Table1に実験で用いたパススケジュールを示す。各圧延パスにおける中心の応力・ひずみは柳本らの開発した「CORMILL SYSTEM」⁴⁾を用いて計算した。

Table1. Rolling pass schedule in the plasticine experiment

Bloom size : B75mm × H95mm
Billet size : (after 7 passes) B58mm × H50mm

Experiment A				Experiment B				Experiment C			
pass	height	R.A.	Turn	pass	height	R.A.	Turn	pass	height	R.A.	Turn
8	37	26.0		8a	46	8.0		8a	46	8.0	
9	38	36.7		8b	42	8.7		8b	42	8.7	
				8c	37	11.9		8c	37	11.9	
				9a	50	17.6		9a	55	9.4	
				9b	38	24.0		9b	50	9.1	
								9c	44	12.0	
								9d	38	13.6	

: Rolling direction change
R.A. : Reduction of area / %
height : / mm

*1 研究・開発センター プロセス開発グループ

*2 研究・開発センター プロセス開発グループ長, 工博

2・2 強圧下パスによる空隙閉鎖挙動

プラスチック実験による空隙閉鎖挙動をFig.1に示す。実験Aでは8パス終了後に空隙が閉鎖寸前まで縮小し、9パス終了後に完全に閉鎖した。一方、1パスあたりの圧下量を小さくした実験Bでは、実験Aに対して8パス終了後に残存する空隙断面積が大きく、また9パス終了後も空隙が残存した。実験Cでも同様の傾向が見られ、9パス終了時に空隙が残存した。このことから、空隙閉鎖に対して強圧下パスの適用が有効であることが実験的にも確認された。

また、実験B、Cは1パスあたりの圧下量が異なるにもかかわらず、9パス終了時に見られる空隙サイズは実験Bで長径0.42mm×短径0.28mm、実験Cで長径0.53mm×短径0.36mmとほぼ同じであり、大きな差は見られなかった。

2・3 静水圧積分値の補正

筆者らは、小野らの提案した静水圧積分 G_m ⁴⁾により圧延材の内部空隙閉鎖の評価が可能であることを報告した¹⁾。静水圧積分 G_m は式(1)で求められる。

$$G_m = \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d \varepsilon \dots (1)$$

ここで、 σ_m ：静水応力、 σ_{eq} ：相当応力、 ε ：相当ひずみ

実験を行った3つのパススケジュールにおける静水圧積分 G_m の累計値 ΣG_m の推移をFig.2に示す。累積値 ΣG_m と空隙断面積の推移に相関があると考えられるものの、現状の G_m を単純加算する評価方法では連続圧延パスの空隙閉鎖挙動に合致しているとは言い難い結果となった。第一の点は、プラスチック実験の実験B、Cの結果では8パス以降も空隙が小さくなっているにもかかわらず、8パス終了後の実験B、Cの ΣG_m 値は実験Aの値と比べて非常に小さく、この両パスでは、ほとんど圧下効果が見られないような値になっている点である。第二の点は、9パス終了後の実験Bと実験Cを比べると、 ΣG_m の値は2倍以上異なっているが、前述の通り実験における空隙サイズはほぼ同じ

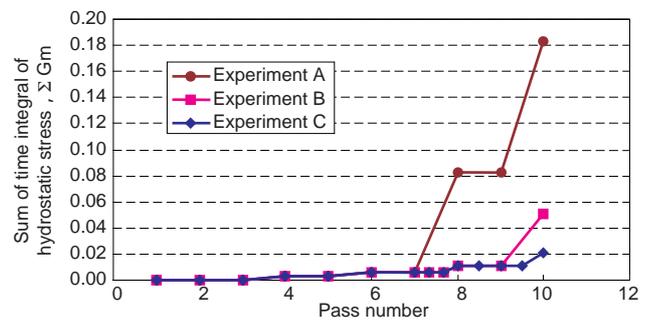


Fig.2. Relationship between pass schedule and ΣGm.

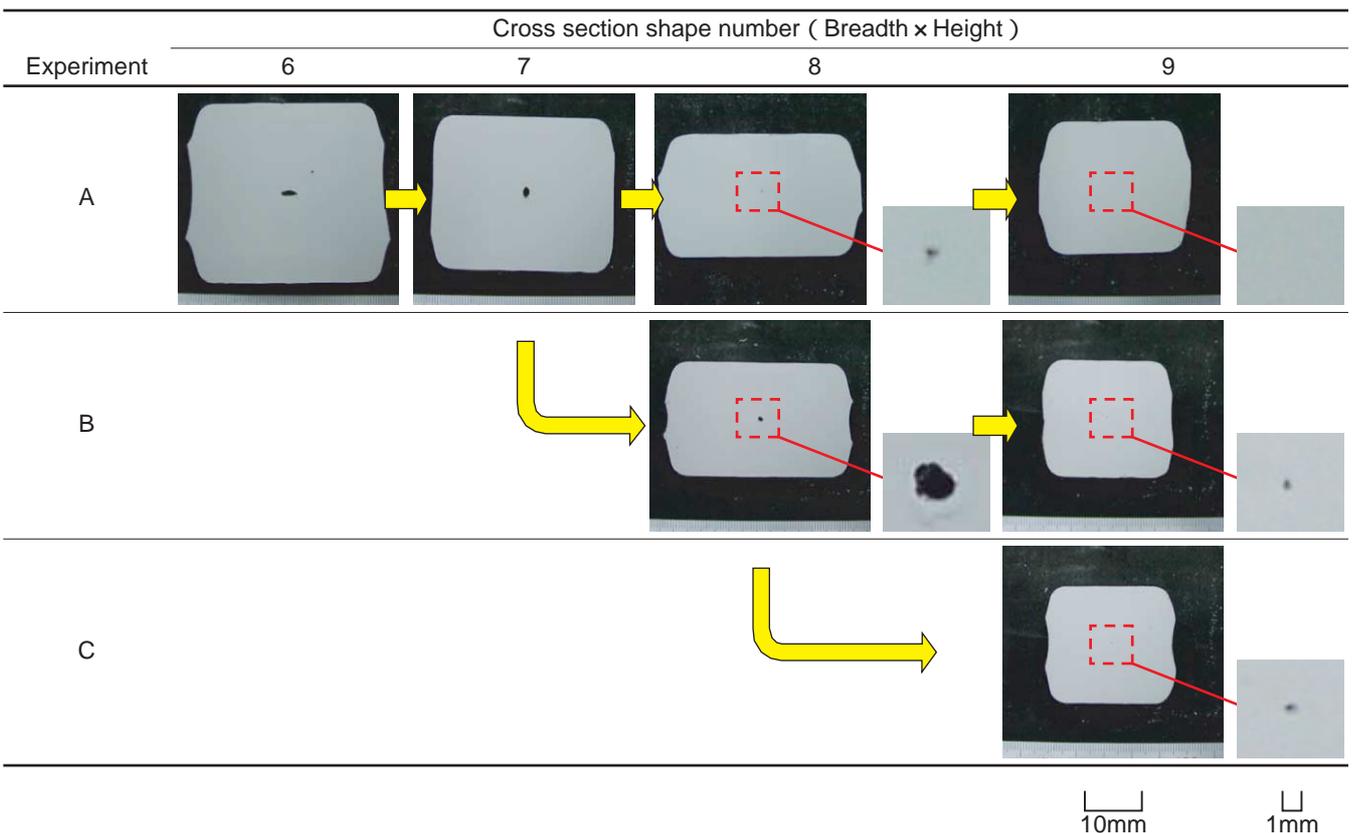


Fig.1. Cross section deformation in plasticine rolling experiment.

で、数値ほどの差は見られなかった点である。現状のGmを単純加算する評価方法では連続圧延パスの空隙閉鎖挙動を精度よく説明することは出来ない。

そこで、静水圧積分の値と実験との差について検討を加えた。まず、プラスチック実験における各パスで楕円状になっている空隙の長径と短径を測定し、円相当径に換算した。そして、圧延材全体の減面率で直径10mmの空隙相当部分が面積減少した場合の換算直径を式(2)を用いて、相乗平均で計算した。

$$d_n = d_0 \cdot \sqrt{r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n} \quad \dots (2)$$

d_n : nパスにおける空隙相当部分の換算径

r_n : nパスにおける圧延材断面の減面率

空隙と圧延材の円相当径を比較したものをFig.3に示す。圧延材の断面積減少と比べると、実際の空隙の断面積減少が早いことがわかる。特に8, 9パスといった強圧下パスにおいて空隙の減少が大きい。

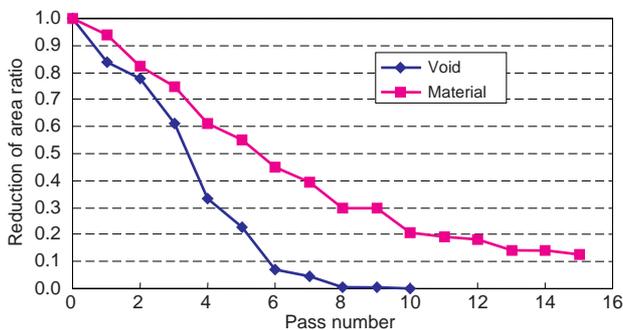


Fig.3. Comparison of void and material on area reduction.

そこで、空隙部分の前パスからの減面率を求め、Gmの値と比較したものをFig.4に示す。この結果より、空隙自体の減面率とGmの値には相関があることがわかった。す

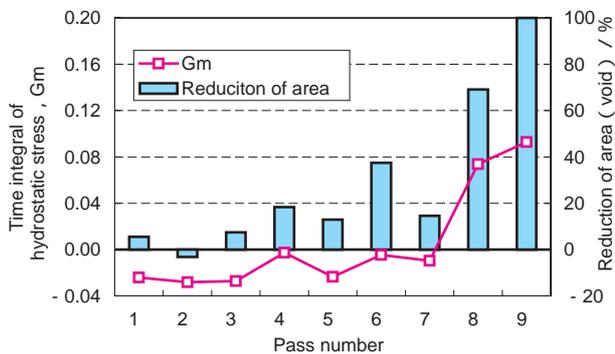


Fig.4. Comparison of void area reduction and hydrostatic stress for each pass number.

なわち、空隙閉鎖の減面率 r_v は、圧延材全体の減面率 r_a と、Gmが意味する圧下成分による減面率 r_g の加算の形で表されると考えられる。

$$r_v = r_a + r_g \quad \dots (3)$$

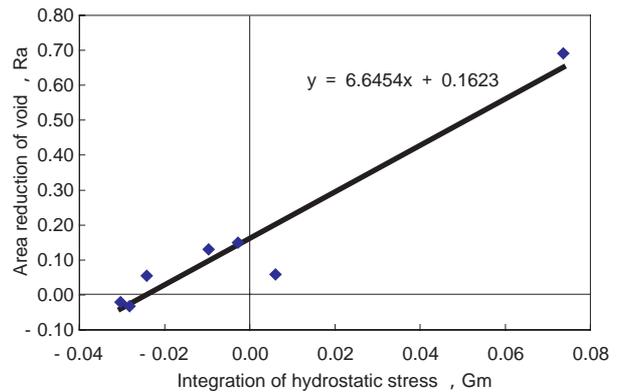


Fig.5. Relationship between Gm and area reduction of void.

空隙減面率とGmの値で回帰を行った結果をFig.5に示す。Gm = -0.024となるところで空隙減面率と圧延材全体の減面率が釣り合うことが分かった。この0.024とは、圧延における減面率が極めて小さい領域において応力が引張りになり、中心への圧下効果はほとんどない場合の補正を担うものと考えられる。Gmの値を全体的に0.024を加えた値は、静水圧積分の値は圧下成分による空隙減面率の加速成分を表すことになる。この補正された静水圧積分パラメータをGm+と名付けると、

$$Gm_+ = Gm + C \quad \dots (4)$$

となる。C = 0.024の値の物理的な意味については不明であり、今後の検討課題である。

本来圧下率0%の時はGm+ = 0である。しかし、(4)式では定数項を加えているので、圧下率0%のときGm+ = Cとなり0以上の値を持つことが問題になる。この場合、減

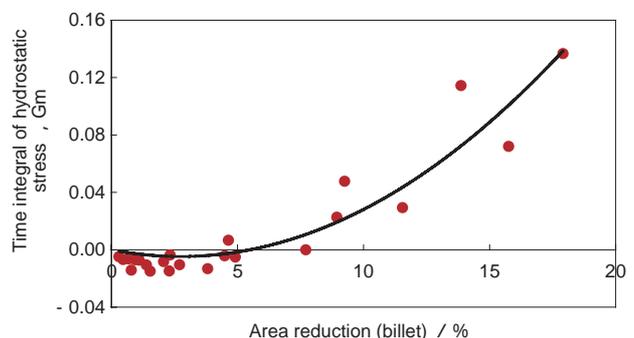


Fig.6. Relationship between Gm and area reduction.

面率が小さい場合はGmの値を加えないとすれば回避される。Fig.6に1パスのカリバー圧延における圧延材の減面率とGmの値の関係について計算した例を示す。圧下率が小さい場合、Gmの値が一旦下がり、その後上昇していく放物線様のグラフになることが分かる。この値を二次関数で近似すると、圧下率2.7%でグラフは極小値を取ることがわかった。すなわち、3%までは $Gm_{+} = 0$ として扱い、圧下率3%以上は(4)式で表される形で補正した。

この Gm_{+} 値を用いて、プラスチック実験の空隙減面挙動を評価した結果をFig.7に示す。静水圧積分 Gm_{+} の累積値 ΣGm_{+} で比較すると、8パス終了時の実験Aと実験B、Cの差はFig.2の結果と比べて小さくなった。また、10パス終了時の実験B、Cの ΣGm_{+} 値はほぼ同じであり、実験結果とよく一致している。以上の結果から、 ΣGm_{+} を中心

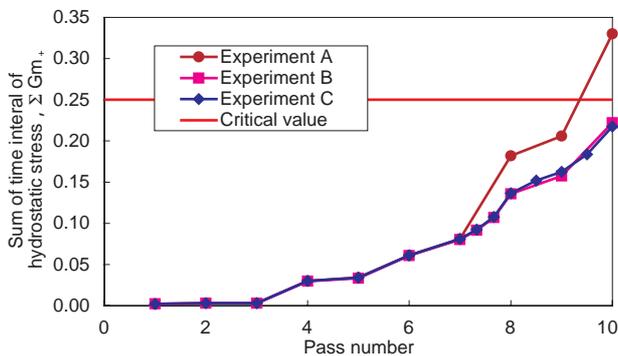


Fig.7. Change of ΣGm_{+} for each pass.

空隙閉鎖の評価指標として用いることにより、今回の実験結果と良く一致することが分かった。

また、Fig.7より、 $\Sigma Gm_{+} = 0.23 \sim 0.30$ の間に空隙閉鎖臨界値があると推定され、実験Aの8パス及び実験B、Cで残った空隙サイズが小さいことから、臨界値は0.25付近にあると考えられる。

3. 実パスへの適用

3.1 鍛造後圧延工程と直接圧延工程

大径棒鋼を製造する手段として、鋼塊及び鋳片を自由鍛造により鍛片を製造してから圧延を行う鍛造後圧延工程と、圧延のみで成形を行う直接圧延工程の2種類がある。Fig.8に当社の棒鋼製造工程を示す。鍛造後圧延工程において圧延前に鍛造を行うことは、中心への鍛錬効果が増加するため中心空隙欠陥の減少には有効である反面、工程数が増えるため生産性が低いという欠点がある。生産性を高めるためには直接圧延工程で製造するほうが有利であるが、従来、鍛造後圧延工程と直接圧延工程で製造出来る限界寸法は経験的知見に頼っていた。

当社大形圧延工場では、2001年8月に三重式四列並列大形圧延機からシフティングリバースタイプの新圧延機(S1ミル)に設備更新した⁶⁾。これに伴い、ロール径が従来の $\phi 635$ から $\phi 900$ (ロール新作時)にアップした。また、S1ミルの前工程である分塊圧延機のモーター容量をアップしたことにより、より圧下量の大きいパススケジュー

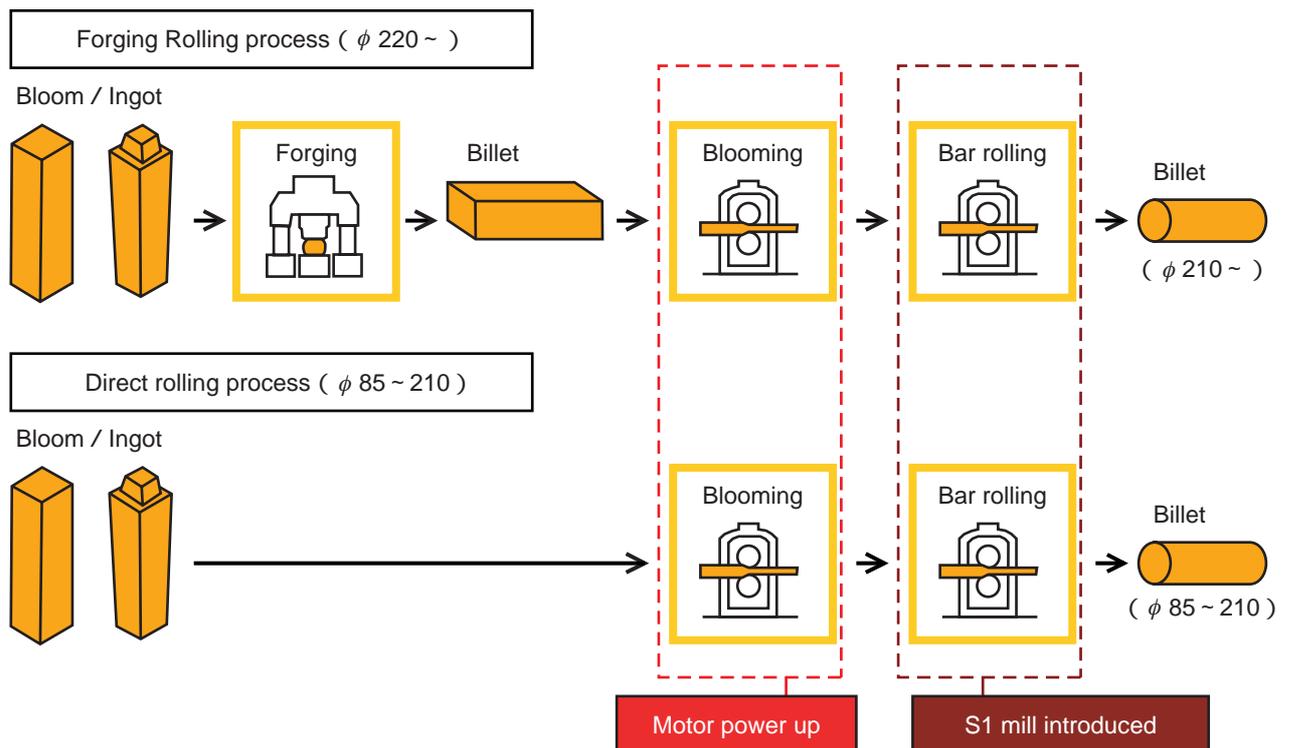


Fig.8. Manufacturing processes for steel bar forging and rolling.

ールの設定が可能になった。

そこで、静水圧積分 Gm_+ を実際の連続圧延パスに適用し、以前の大形圧延パスとS1ミルの比較及び鍛造後圧延工程と直接圧延工程における空隙閉鎖効果の定量的な評価を行い、直接圧延工程で生産可能な上限寸法引き上げによる生産性の向上を図った。

3・2 各サイズにおける静水圧積分の検討

旧大形圧延機とS1ミル導入後のパススケジュールにおいて、静水圧積分 Gm_+ を計算し、その累積値 ΣGm_+ の比較を行った。対象材は炭素鋼S45Cとし、その変形抵抗を用いて計算した。素材は連続鋳造ブルーム（断面490mm×380mm）とし、比較を行った。S45Cの従来の直接圧延工程の圧延上限寸法は $\phi 210$ mmであったため、 $\phi 180 \sim 210$ mmサイズでの中心圧下効果の比較を行った。

Fig.9に $\phi 180 \sim 210$ mm製品の中心圧下効果計算結果を示す。8パス目の強圧下パスは効果が大きく、分塊圧延で従来のパスに比べて20～30%程度静水圧積分が増加し、圧下効果が向上する結果となった。また、S1ミルでの圧下効果も加算され、全体で25～30%圧下効果の向上が見られた。

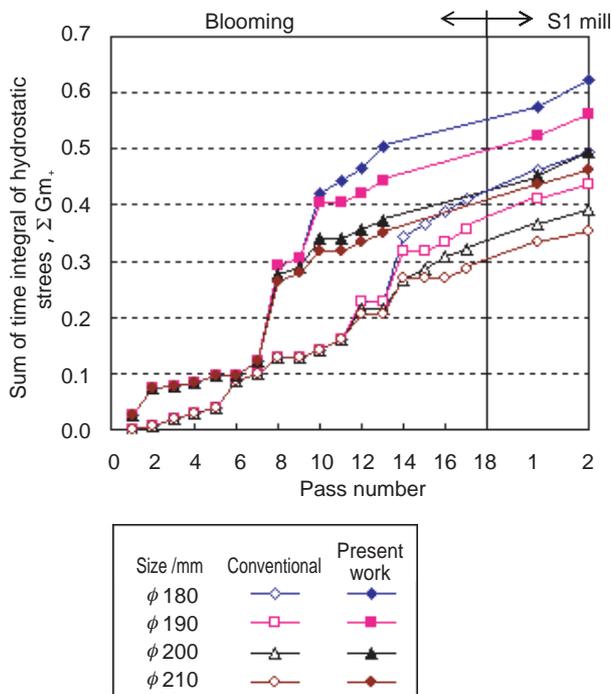


Fig.9. ΣGm_+ for each size of bars.

また、Fig.10に製品各寸法における ΣGm_+ 値の比較を示す。経験的な知見とプラスチック実験結果を総合し、S45Cでの限界値を0.30と定めた。その結果、従来 $\phi 210$ だった直接圧延工程製品は、新ミルの導入と空隙閉鎖パラメータを向上させるパススケジュールの適用により炭素鋼

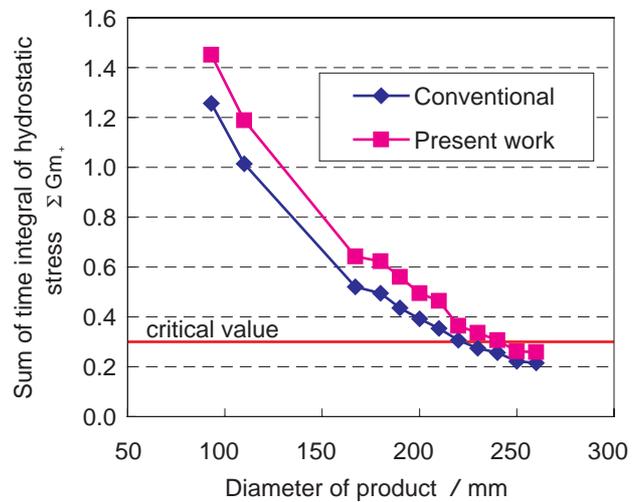


Fig.10. Comparison of ΣGm_+ between the conventional pass and the present pass.

で $\phi 240$ まで拡大可能となった。

4. 結言

- (1) 空隙閉鎖パラメータ Gm_+ を用いて連続圧延パスを評価した結果、実験結果と計算結果がよく一致することが分かった。 Gm_+ が臨界値0.25を越えると空隙は消滅した。
- (2) 圧延設備の変更に伴い、空隙閉鎖パラメータを用いて従来と新規パスの評価を行った。新ミルの導入による強圧下圧延により、空隙閉鎖パラメータを向上させるパススケジュールの適用が可能となり、圧延可能サイズが拡大すると共に、現行サイズの不良も低減された。

文献

- 1) 中崎盛彦, 高須一郎: 山陽特殊製鋼技報, 9 (2002), 21.
- 2) 中崎盛彦, 高須一郎: 第52回塑性加工連合講演会論文集, (2001), 317.
- 3) 中崎盛彦, 高須一郎: 材料とプロセス, 16 (2003), 1190.
- 4) 柳本潤, 木内学, 中村充, 倉橋隆郎: 塑性と加工, 32 (1991), 1000.
- 5) 田中光之, 小野信市, 常野誠: 塑性と加工, 28 (1987), 238.
- 6) 柴島淳弘: 山陽特殊製鋼技報, 10 (2003), 57.

著者



中崎 盛彦



高須 一郎