

特別講演

□学術功績賞受賞記念

圧延板の高品質化に関する解析的研究

Analytical Research on Quality Improvement of Plate Rolling

石川孝司 名古屋大学 大学院工学研究科 教授
Takashi Ishikawa



*脚注に略歴

1 はじめに

圧延板製品の品質、精度に対する要求は年々厳しくなり、すなわち、板厚精度±10数μm、完全平坦で欠陥のない板が要求されその要求を実現していくことが日本の圧延技術の生き残る道に他ならない。従来の経験的知識にCAE (Computer Aided Engineering) をうまく融合させることにより、さらなる進歩が図られるものと考え、圧延プロセスの最適化、加工精度の向上及び品質改善を目的として、力学的および材料学的立場から研究を行ってきた。今回の受賞対象になった圧延に関する研究を紹介する。

2 圧延板の板プロフィールおよび板形状の解析

圧延時の材料流れおよび応力分布等を解析できる3次元モデルとロールの変形解析とを連成させた新しい3次元解析法を開発して、従来予測できなかった圧延板の平坦度不良と板幅方向の板厚不均一の問題を解析可能とした。本解析法および結果は、応力・ひずみ状態や板プロフィール等に及ぼす種々の圧延因子の影響を検討するとき利用されるばかりでなく、近似モデルを作成する際、あるいは実機のオンラインモデル等作成の際に、その妥当性チェックのため利用された。

2.1 解析方法

2.1.1 板プロフィールの解析^{1,2)}

ロールの弾性変形は、4段圧延機の場合、(a) ワークロール表面偏平変形、(b) ワークロール軸心変形、(c) ワークロールとバックアップロールの接触変形、(d) バックアップロール軸心変形の4成分を考え³⁾、ロール出口のロール形状が

板に転写されるものとして板プロフィールを計算した。

材料の3次元変形は、図1のようにスラブ法を3次元に拡張して、圧延方向および板幅方向の力の平衡方程式を解くことにより解析し、各応力分布を求めた。

板厚分布を仮定して材料の変形解析により荷重分布を求め、その荷重分布からロールの出口面における変形形状を計算し、それが仮定値と一致するまで収束計算した。

2.1.2 板形状の解析⁴⁻⁶⁾

板厚が薄くなり圧延板の圧縮残留応力が限界を超えると座屈を生じ面外変形が発生して形状不良となると考え、ロールギャップ出口の除荷過程を有限要素法で解析して残留応力分布を求め、固有値解析により座屈判定と座屈後の形状を計算した。

2.2 実験

2.2.1 圧延圧力分布の測定⁷⁻⁹⁾

圧延時の圧延圧力分布を測定するため、図2のように側圧

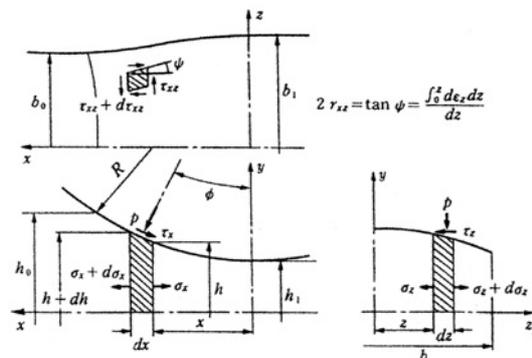


図1 スラブ法による解析²⁾

*昭和53年3月に名大大学院工学研究科博士後期修了、同4月に名大工学部助手、平成2年4月から同大学講師、5年3月同大学助教授、6年8月に同大学教授に昇進し、現在に至る。

(c) は、 σ_x と同じような分布状態を示す。板幅方向せん断応力 τ_{xz} (図 (d)) は、板幅中心付近でほぼ零である。板縁では、入口で幅広がりを生じさせるような向きに作用し、出口に向かうとそれを抑制するような向きに変わる。そして、板縁より少し内側では、板縁とは反対向きの応力が作用している。図 (e) は摩擦応力の作用方向、すなわち、ロールに対する材料の相対的な流れの方向を示したものである。板幅中心のかなり広い範囲では、ほぼ圧延方向に流動しているのに対し、板縁近傍では幅方向に材料が流れていることがわかる。図7²⁾は板プロフィールを実験結果と比較したものである。各種の圧延条件で計算結果は実験結果とよくあっている。また、実機での解析精度についても確認している¹²⁾。図8⁹⁾は側圧ピンによる測定結果である。広幅になると圧力の最大値が板

縁寄りに現れる点など、解析結果は実験結果とよくあっている。また、この解析を通板時の蛇行解析¹³⁾や6段HCミルの3次元解析などに適用している。

2.3.2 残留応力分布

クラウンロールで軽圧下した場合と、中圧下した場合の残留応力の幅方向分布を実験結果と比較して図9¹¹⁾に示した。軽圧下の場合には板幅中央部に圧縮の残留応力が発生し、中圧下した場合には板縁に圧縮応力が発生する結果となっており、これは実験結果と一致している。

2.3.3 板形状

図10⁶⁾は、フラットロールとクラウンロールで圧延したと

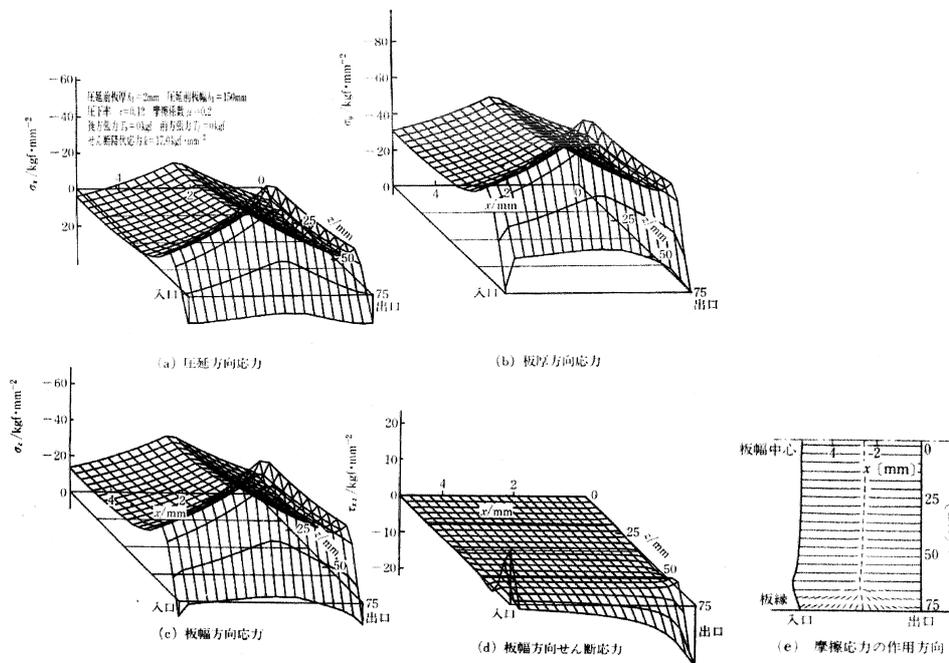


図6 解析結果の一例²⁾

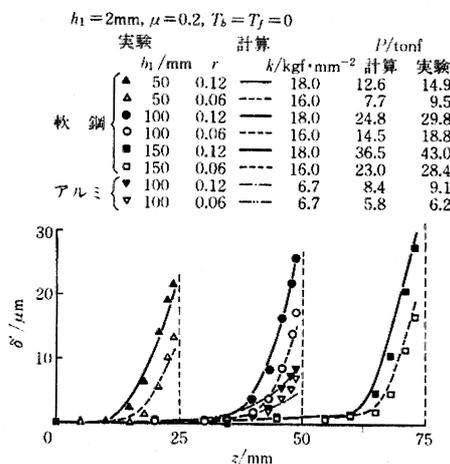


図7 実験との比較(板プロフィール)²⁾

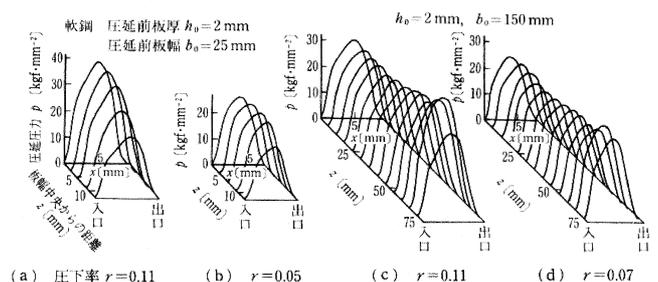


図8 圧延圧力の測定結果⁹⁾

きの圧延後の板形状を解析したもので、実験結果と比較して示した。量的にはやや差があるものの傾向は両者でよく一致している。

型圧延等の解析は有限要素法が有力であるが、板圧延については、ここに紹介した3次元解析は、板プロファイルの問題等が解析でき、解析対象によっては簡単で有効な方法である。

3 圧延板の表面疵変形成過程の解析

圧延板の表面疵の問題は古くからその低減のための研究や対策が検討されてきたが、理論的な研究が皆無であった。平成12年度より筆者が主査となって、本協会の「表面疵発生過程予測技術の開発」研究会にて活動を開始した。

3.1 解析^{14,15)}

圧延板に生じる疵の挙動を解析できる数値解析システムの開発を目的として、2次元剛塑性有限要素解析による理論解析を行い、実験結果と比較検討するとともに、圧延前の疵・突起形状と圧延後に残る疵形状の関係、圧延条件による疵の

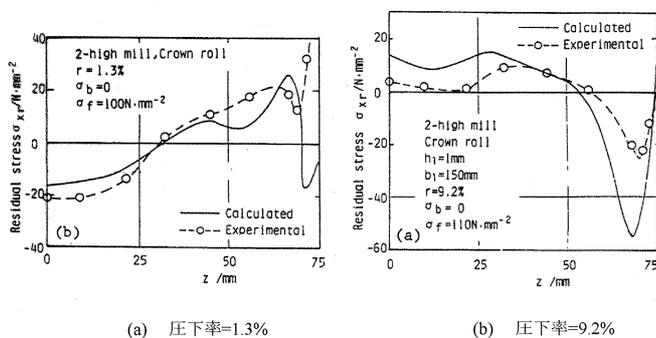


図9 残留応力分布

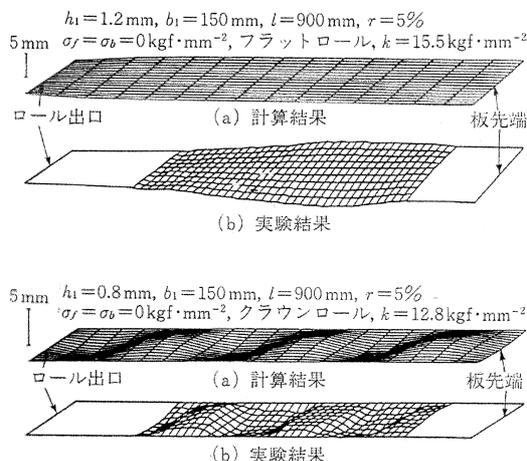


図10 板形状の比較⁶⁾

形状変化への影響について調査した。解析には著者らの研究室で開発している剛塑性有限要素解析ソフトRIPAD-2Dを用いた。このソフトはメッシュサイズの設定などが自由にコントロールできるため、局部変形解析など、微小領域の解析が可能である。表面疵の解析は板の上面に圧延方向に対して90°に疵を付け、平面ひずみ問題として取り扱った。解析に使用したメッシュの一例を図11に示す。

3.2 解析結果

アルミニウムのO材にV字疵を人工的に付けて圧延した実験結果と本解析結果を比較したところ、両者には良い一致がみられ、解析によって表面疵の形状変化を予測することが可能であることを確認した。図12に示す各種欠陥のある板を想定し、圧延後の疵形状を計算で求めた。ここでは矩形形状の欠陥(凹凸)のみの計算結果を紹介する。板厚20mmの軟鋼板を1200℃で圧延することを想定し、ロール径200mm、圧下率30%とした。欠陥の形状は、深さ1mm、幅2mmの矩形形状凹疵と高さ1mm、幅1mmの矩形形状突起(凸)のある場合を摩擦係数0.2として計算した。その結果を図13および図14に示す。欠陥の位置を固定して示してあり、右上部からロールが回転して材料に接触する様子を示している。

矩形形状凹形疵はロールにかみこまれていくと圧延方向前方の壁面が鋼板表面に露出した状態になり、壁面の下方で若干の倒れこみがおこり小さな疵として残る。疵の後方壁面は

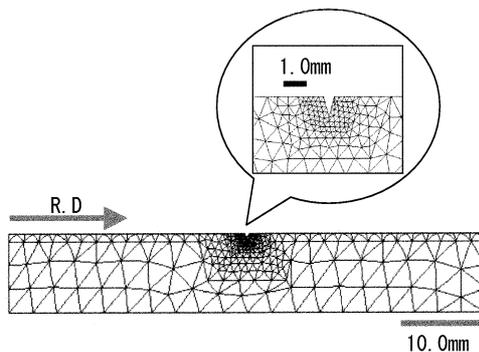


図11 解析メッシュ

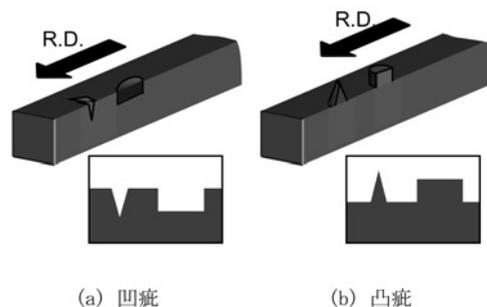


図12 初期疵形状

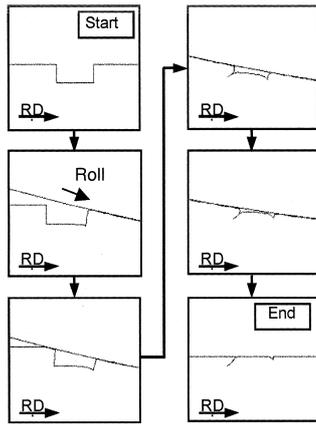


図13 矩形凹疵の変形過程

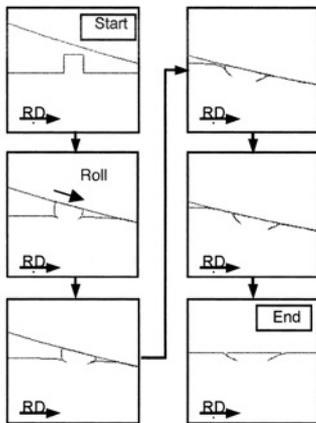


図14 矩形凸疵の変形過程

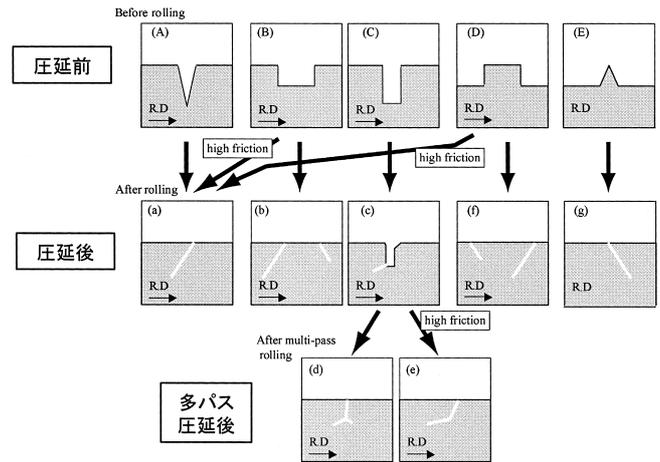


図15 表面疵変形マップ

4 まとめ

有限要素法をはじめとするCAEソフトは成形・加工の分野でも2D(2次元)解析から3D解析へと実用レベルになりつつあり、圧延、鍛造、プレス成形、粉末成形、機械加工、熱処理、鋳造、射出成形など製造業の広い分野で利用が進んでいる。この背景には解析技術および計算機能力の進歩があることはいうまでもない。大学や研究所の大型計算機でなく、工場の片隅に置かれたパソコンで実用計算ができる時代になっている。より大きく複雑な問題をより詳細に解析することを可能とし、粗いモデルではわからなかった現象も解明できるようになってきた。非線形問題の、しかも複数の物理現象を連成して扱う問題の解析も試みは始めている。これを有効に使いこなさない手はない。今後も挑戦を続けたい。

最後に、栄誉ある学術功績賞を受賞できたのは諸先生の御指導と、研究室の教職員はじめ卒業生、企業・学会関係者の皆さんの御協力の賜物であり、感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 戸澤康壽, 中村雅勇, 石川孝司: 塑性と加工, 17 (1976) 180, 37.
- 2) 戸澤康壽, 石川孝司, 岩田徳利: 塑性と加工, 23 (1982) 263, 1181.
- 3) 板圧延 (1993), 日本塑性加工学会編, コロナ社
- 4) 湯川伸樹, 石川孝司, 戸澤康壽: 塑性と加工, 28 (1987) 318, 726.
- 5) 高紅維, 湯川伸樹, 石川孝司, 戸澤康壽: 塑性と加工, 29 (1988) 330, 761.
- 6) 石川孝司, 湯川伸樹, 戸澤康壽, 中谷和通: 塑性と加工, 30 (1989) 336, 91.

圧延により前方へと倒れこみ、凹状欠陥の底部と接触し、大きな疵として残りハの字を呈する。

突起はロールにかみこまれるとロールにより下方に圧縮変形をうける。その結果バルジングがおこり、そのまま突起部は鋼板表層に埋没していく。そのため突起部の前方と後方に大きな疵が残る。この場合は逆ハの字状の疵となる。

図15は、結果をまとめたものである。ここでは圧延時の疵形状の変化を模式的に考えたもので、実際の現場においては同じ矩形であっても大きさや角度などが様々であり、一様ではない。しかし、圧延前の疵形状により、圧延後にその疵が示す形状はある程度絞ることができるのではないかと考えられる。圧延後の疵形状からその原因をある程度は推定することが可能であると考えられ、疵防止対策の手段となることが期待できる。

完全な疵フリー鋼板の製造技術の確立には、圧延技術者だけでなく、製鋼、材料、計測研究者を含めた広い連携が不可欠であり、今後の展開を期待する。

- 7) 加藤隆, 戸澤康壽, 中村雅勇, 石川孝司, 井上健次: 塑性と加工, 21 (1980) 236, 800.
- 8) 戸澤康壽, 中村雅勇, 石川孝司, 加藤隆, 井上健次: 塑性と加工, 21 (1980) 238, 999.
- 9) 石川孝司, 戸澤康壽, 中村雅勇, 加藤隆, 加藤憲明: 塑性と加工, 22 (1981) 247, 816.
- 10) 戸澤康壽, 中村雅勇, 加藤隆, 石川孝司, 伊藤泰成: 塑性と加工, 22 (1981) 249, 1030.
- 11) 石川孝司, 戸澤康壽, 中村雅勇, 荒牧恵明: 塑性と加工, 25 (1984) 276, 60.
- 12) 李道隆, 石川孝司, 戸澤康壽: 塑性と加工, 28 (1987) 316, 440.
- 13) T. Ishikawa, Y. Tozawa and J. Nishizawa: ISIJ, 28 (1988) 6, 485.
- 14) 石川孝司, 湯川伸樹, 吉田佳典, 殿畑勇飛: 鉄と鋼, 89 (2003) 11, 1142.
- 15) 湯川伸樹, 石川孝司, 吉田佳典, 小谷内章: 鉄と鋼, 91 (2005) 12, 861.

(2006年5月8日受付)