

# ホットストリップミルにおける薄鋼板圧延技術

## Rolling Technology for Thin Steel Strip in Hot Strip Mill Train

本 城	恒 元	機械事業本部産業システム事業部	技師長
遊 佐	覚	技術開発本部基盤技術研究所材料研究部	課長
三 上	昌 夫	株式会社アイテック 技術開発センター	主任技術員
山 口	方 士	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部	次長 博士（工学）
石 井	肇	株式会社アイメック 産業機械設計部	部長代理

熱間薄鋼板圧延について金属組織と圧延特性の関係を考察した。稼働中のホットストリップミルを解析対象設備として選び、1.2 mm 仕上げ厚みの低炭素普通鋼について冶金組織解析シミュレータによって解析した。仕上 6 スタンドを備える圧延設備での薄鋼板圧延であるため板温度低下が大きく、下流スタンドがフェライト域近傍の圧延となるが、金属組織としては普通鋼の組織と大きな差は起きないことが解析で示された。圧延時の板厚方向温度分布に基づく組織への影響についても考察した。薄鋼板圧延特有の圧延不安定現象に対処するための機械設備仕様についても考察した。

Thin steel strip rolling performance in the hot strip mill train has been investigated, mainly the metallurgical microstructure. A compact hot mill train producing normal steel strip with 1.2 mm final thickness was assumed, and the characteristics were theoretically calculated and analyzed. Strip temperature drop is large due to the thin thickness causing higher flow stress and higher rolling load. Hot finishing temperature (FDT) falls under the Ar3 transformation temperature. Nevertheless, the calculated results have shown similar microstructure as that of cases with FDT above the Ar3 temperature, suggesting normal metallurgical quality of the thin strip. Besides temperature control, various mechanical devices must be taken into consideration to achieve thin strip rolling. Major mill components for the purpose are explained.

## 1. 緒 言

鉄鋼熱間薄鋼板圧延においてはバー接合設備などを使用した高速極薄鋼板圧延設備が報告されている<sup>(1)</sup>が、一方ではバッチ式の在来型設備での薄鋼板圧延も行われている。コスト低減を図るためスタンド数を少なめにしたバッチ式の在来型圧延設備では、一般に圧延速度は低めとなる。圧延設備規模を小さめにした、いわゆるコンパクトホットストリップミルではさらに速度低下の傾向となる。特に薄鋼板圧延のときは、圧延負荷が増す状態での圧延操業となるため圧延温度はさらに低下し、圧延温度的にはフェライト域近傍の圧延となる場合が多い。薄鋼板圧延において温度低下条件を前提にしたフェライト域圧延を行うことの利点の分析報告もされている<sup>(2)</sup>。

本稿では、バッチ式圧延設備例での上記冶金特性を中心に、薄鋼板圧延特性と設備特性を考察したので報告する。

## 2. 連続熱間圧延設備での検討

### 2.1 解析対象熱間圧延設備

解析対象例として、第 1 図に示す帯鋼熱間圧延設備

(ホットストリップミル)を計算モデルとして想定した。本設備は粗圧延機 1 基と仕上 6 スタンドを備える圧延設備である。

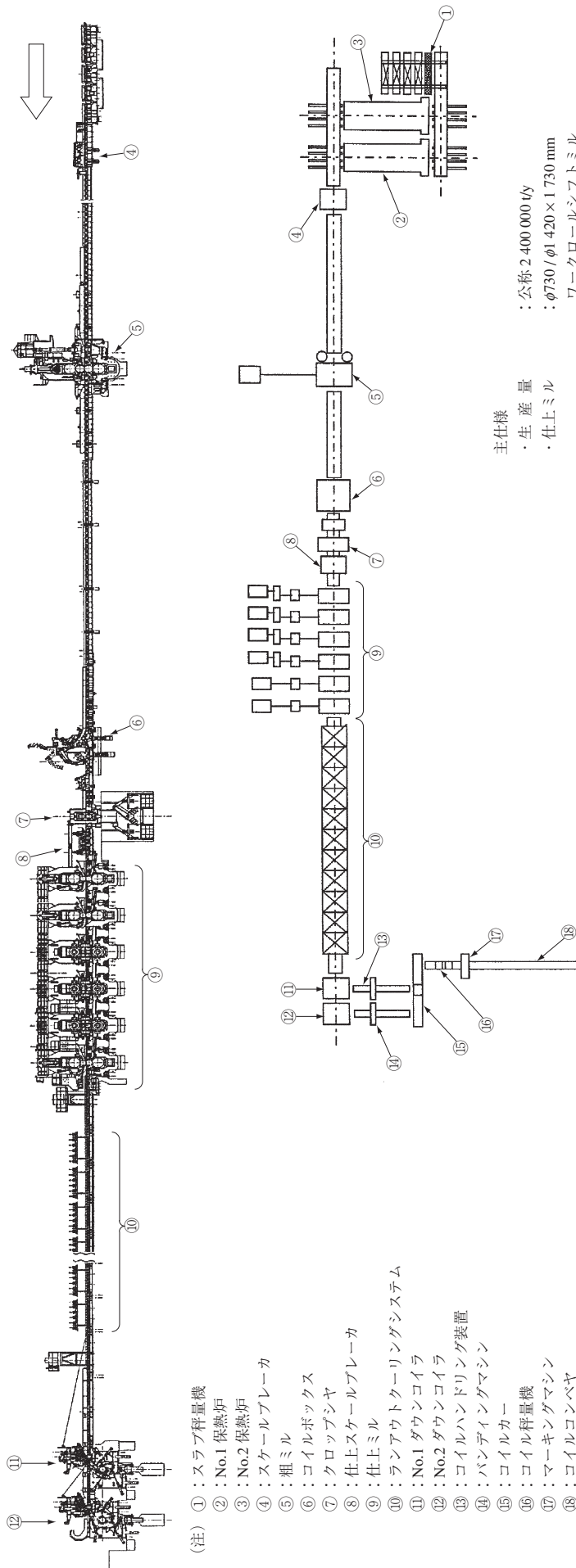
第 1 表に 1.2 mm 厚みの低炭素鋼板を生産する場合を想定した圧延条件(ケース-R)を示す。圧延負荷・伝熱計算などから仕上圧延設備出口温度(FDT)が低めとなる計算結果である。仕上げフェライト域圧延と称するものにも、① デイレイテブルに水冷設備を置いて仕上圧延設備第 1 スタンドから最終スタンドまでの仕上げ圧延全体をフェライト域圧延に入れる方式<sup>(3)</sup>② 仕上げ圧延のうちの上流スタンド、中流スタンドは Ar3 温度以上(オーステナイト域)で行い、下流スタンドのみを Ar3 温度以下(フェライト域)とする方式、が報告されている<sup>(2)</sup>。

本稿では後者の方式を実施した場合を前提として、以下の解析を行った。

### 2.2 フェライト域近傍の圧延負荷・温度特性

予備試験として、大阪大学の試験圧延機を使用し、低炭素鋼材をフェライト域を含む温度域で熱間圧延試験を行った。

試験圧延条件を次に示す。



- (注) ① : スラブ秤量機  
 ② : No.1 保熱炉  
 ③ : No.2 保熱炉  
 ④ : スケールブレーカ  
 ⑤ : 粗ミル  
 ⑥ : コイルボックス  
 ⑦ : クロップシヤ  
 ⑧ : 仕上スケールブレーカ  
 ⑨ : 仕上ミル  
 ⑩ : ランアウトクレーリングシステム  
 ⑪ : No.1 ダウンコイラ  
 ⑫ : No.2 ダウンコイラ  
 ⑬ : コイルハンドリング装置  
 ⑭ : パンディングマシン  
 ⑮ : コイルカー  
 ⑯ : コイル秤量機  
 ⑰ : マーキングマシン  
 ⑱ : コイルコンベヤ

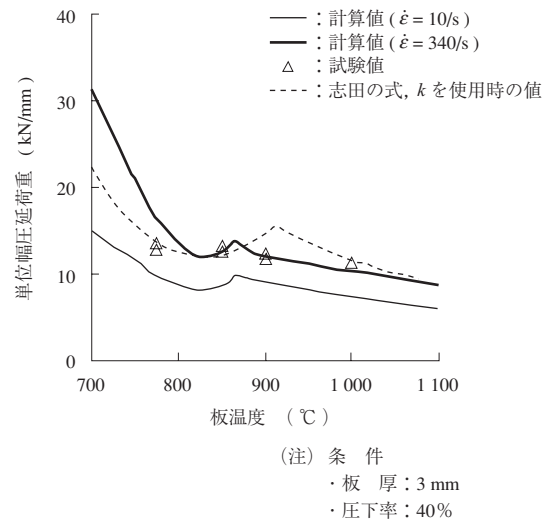
第 1 図 圧延設備全体図  
 Fig. 1 Configuration of the compact hot strip mill train

第1表 仕上げ圧延負荷および温度計算 (ケース-R)  
Table 1 Calculated temperature and rolling load of finishing train (Case-R)

仕上スタンド		出口板厚 (mm)	圧延速度 (m/min)	出口温度 (板先端) (℃)	平均変形抵抗 (N/mm <sup>2</sup> )	圧延荷重 (MN)	トルク (MN・m)
No.	呼 び						
		26.4	28	955			
F1	第1スタンド	10.8	58	949	145.0	18.98	1.257
F2	第2スタンド	5.13	123	924	193.1	19.71	0.759
F3	第3スタンド	2.87	224	901	223.4	18.32	0.425
F4	第4スタンド	1.86	365	877	251.9	17.02	0.241
F5	第5スタンド	1.4	497	842	262.6	14.01	0.122
F6	第6スタンド	1.2	595	801	243.0	8.88	0.050

(注) 圧延条件  
 ・公称仕上げ作業ロール径: 730 mm  
 ・スラブ厚み: 229 mm  
 ・板幅: 950 mm  
 ・炉抽出温度: 1230℃  
 ・粗圧延作業: 粗7パス

試験圧延材料  
 鋼種 低炭素鋼 (C 0.04%, Mn 0.12%, Si 0.02%)  
 寸法 板厚 3 mm × 幅 30 mm × 全長 500 mm  
 試験機 装置名称 高速熱間圧延試験装置 (大阪大学)  
 圧延機 型式 2HI 型圧延機  
 ロール径 530 mm  
 圧延速度 6 ~ 45 m/s  
 加熱炉 型式 ミル入り側電気炉 (2台)  
 温度 室温 ~ 1400℃  
 圧延条件  
 目標圧下率 40%  
 ロール周速 900 m/min  
 炉温度設定 700, 750, 775, 800, 850, 900, 1000℃



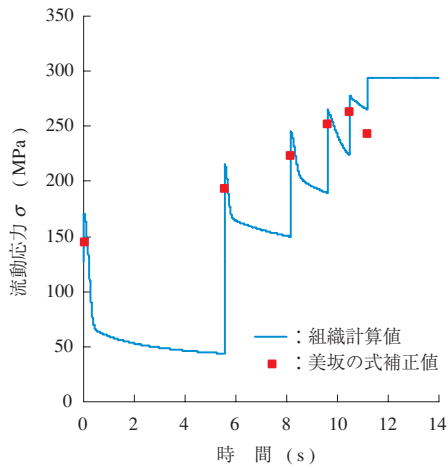
第2図 圧延荷重の試験と計算の比較  
Fig. 2 Comparison of the calculated rolling load with the experimentally measured results

第2図に圧延荷重の試験と計算の比較を示す。試験結果を図中に△で示す。図中には本材の  $m$  値,  $n$  値実測に基づく変形抵抗式 (ひずみ速度  $\dot{\epsilon} = 10/s, 340/s$ ) および志田の変形抵抗式<sup>(4)</sup>を用い、志田の Sims の式を適用した圧延理論式<sup>(5)</sup>で計算した結果も示した。圧延試験はひずみ速度 340/s に相当する。

フェライト域近傍では変形抵抗値が温度低下とともに減少する領域があることが知られている。第2図の結果でも 800℃近傍の温度域での温度低下による負荷増大は、

700℃近傍ほど過大ではないことが示されている。したがって、フェライト域圧延近傍での圧延は異常負荷にはならないと予想される。ただし連続熱延の場合はスタンド間通過時間が短いので、転位密度累積による変形抵抗増大を考慮した補正をする。第3図に美坂の式<sup>(6)</sup>による変形抵抗式 (各パス後回復が行われているという前提) に対して、今回のケース-R の場合の連続圧延での組織計算からの流動応力計算値 (各パスでの転位密度累積を考慮している) を対比させた。この結果を圧延負荷計算における変形抵抗式値の補正に用いた。

代表ケースである第1表に示すケース-R を評価するため、各種圧延条件 (ケース-S, -T, -U) に対して、温度履歴計算をも含む負荷計算を行った。板温度計算は板厚



(注) 圧延条件  
・ケース-R (第1表)

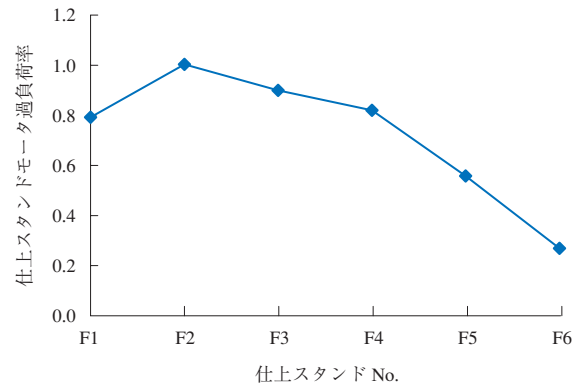
第3図 転位密度累積による変形抵抗補正

Fig. 3 Modification of the flow stress by the transition of dislocation density

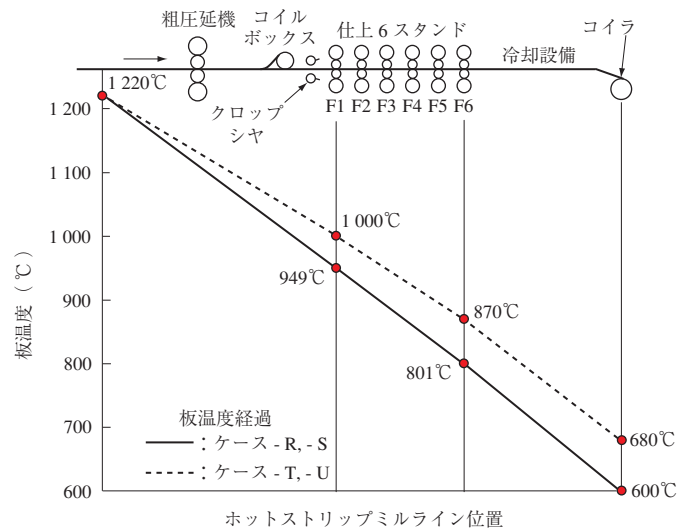
方向には同一温度であるという仮定のもとに行った. この結果を第1表, 第2表, 第4図および第5図に示す. 平均変形抵抗値は美坂の式による結果に対して前記のように補正したものを, 圧延理論式は Sims の式<sup>(6)</sup>を適用し求めた. 第1表および第4図に示すように, 6 スタンドで 1.2 mm 仕上げ厚みに圧延する場合は, 上流スタンドでは圧延荷重, トルク (モータオーバロード値) とともに許容限界値に近く, 結果として全体の圧延速度はモータベース速度 (最大トルク時の速度) 近辺の低速となっている. 板厚が薄いため板の冷えが早く, 変形抵抗が増加して荷荷が増す. このため圧延速度を上げて板温度を高く保つことが難しくなる. 第5図に示すように, 仕上げ最終圧延温度としては 800℃と低くなり, Ar3 変態点以下となる.

### 2.3 金属組織の解析結果と考察

第1表, 第2表の圧延荷荷・温度の計算結果を基に,



第4図 ケース-R: 負荷トルク特性計算結果  
Fig. 4 Calculated motor overload in Case-R



(注) 1. 本設備は薄鋼板圧延を代表とし, 圧延条件はケース-Rである.  
2. ケース記号 (-R, -S, -T, -U) の圧延条件は, 第1表と第2表に示す.

第5図 ホットストリップミル板温度経過  
Fig. 5 Temperature transition in compact hot strip mill

第2表 ホットストリップミル圧延条件および解析結果  
Table 2 Calculation condition and calculated results of hot strip rolling

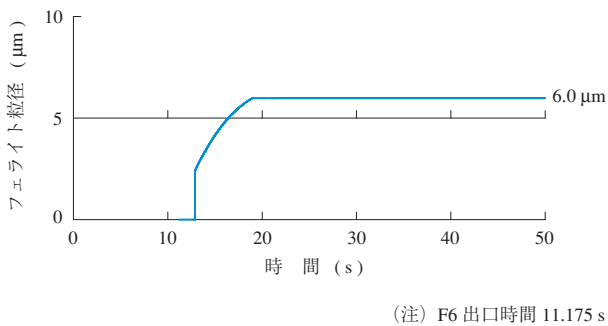
ケース	解析前提条件					解析・計算結果				
	板厚 パー厚み/ 仕上げ厚み (mm)	炭素量 C (%)	温度 (板先端)		圧延速度 F6 (m/min)	特性	仕上第1スタンド 到着から巻取機 までの到着時間 (s)	フェライト 粒径 ( $\mu\text{m}$ )	各相の比率 a: オーステナイト f: フェライト p: パーライト b: ベイナイト	再結晶率 動的/静的
R	26.4 $\Rightarrow$ 1.2	0.150	949	801	600	2相域フェライト圧延	21.6	6.00 (第6図)	(第9図)	(第12図)
S	26.4 $\Rightarrow$ 1.2	0.045	949	801	600	2相域フェライト圧延	21.6	7.57 (第8図)	(第11図)	
T	26.4 $\Rightarrow$ 1.2	0.150	1000	870	680	仮想オーステナイト圧延	17.3	6.65		
U	30.4 $\Rightarrow$ 2.0	0.045	1000	870	680	オーステナイト圧延代表	17.3	8.85 (第7図)	(第10図)	

(注) ( ) は掲載図 No. を示す. 詳細は本指図図による.

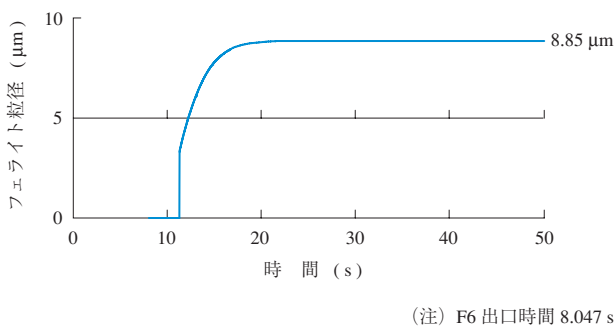
金属組織シミュレータを使用して、巻取り後の組織を求めた。本シミュレータは2001年6月に社団法人日本鉄鋼協会圧延理論部会の材料機能創出FEM解析技術検討会で配布された電算プログラム<sup>(7)</sup>を整備して使用した。本シミュレータは加工域としてはオーステナイト域圧延を対象としているが、ラストスタンド近辺でAr3温度を下回る程度のときに適用しても、マクロな解としては妥当であると判断して本計算に使用した。仕上圧延設備第1スタンド入口のオーステナイト結晶粒径は80 $\mu\text{m}$ とした。

第2表の右側半分に組織シミュレーションによる計算結果の一覧を示す。ケース-Rがコンパクトホットストリップミルでの実現可能な薄鋼板圧延温度操業に対応し、ケース-Uは一般的な厚みでのオーステナイト温度域圧延操業に対応する。第6図～第8図に本解析モデルによる結晶粒径変化を示す。

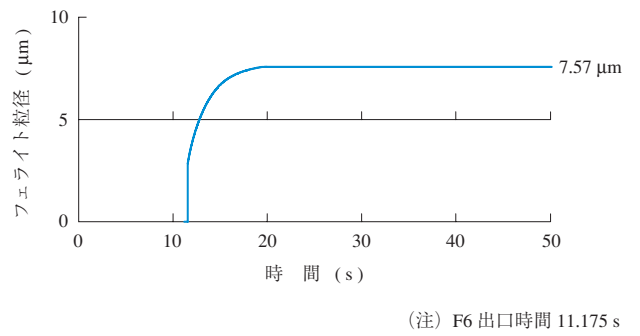
第9図～第11図に巻取り後の板の各相の比率の解析結果を、第12図に再結晶率の変化を示す。第9図の記号aはオーステナイト組織を、fはフェライト組織を、pはパーライト組織を、bはベイナイト組織を示す。各図で横軸は仕上圧延設備第1スタンドがかみ込んだ時点から0秒とした経過時間である。第2表でケース-R、-Sが本検



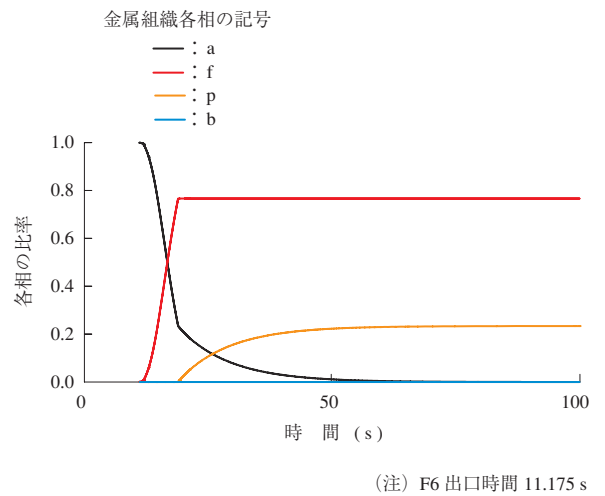
第6図 ケース-R：フェライト粒径変化  
Fig. 6 Ferrite grain size transition in Case - R



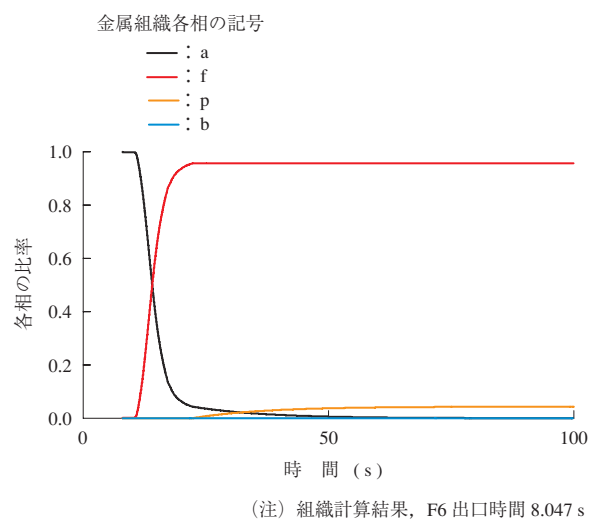
第7図 ケース-U：フェライト粒径変化  
Fig. 7 Ferrite grain size transition in Case - U



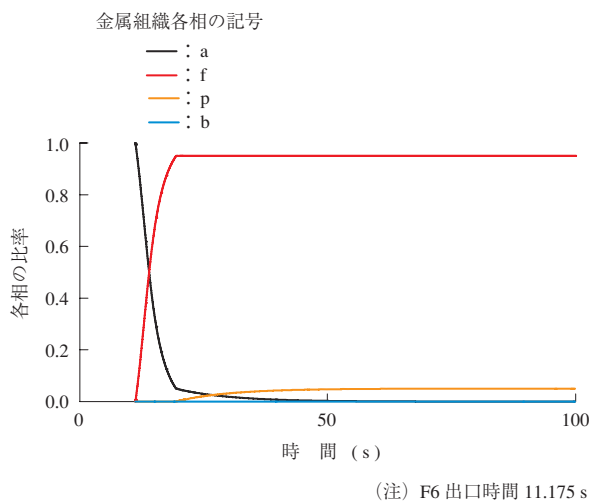
第8図 ケース-S：フェライト粒径変化  
Fig. 8 Ferrite grain size transition in Case - S



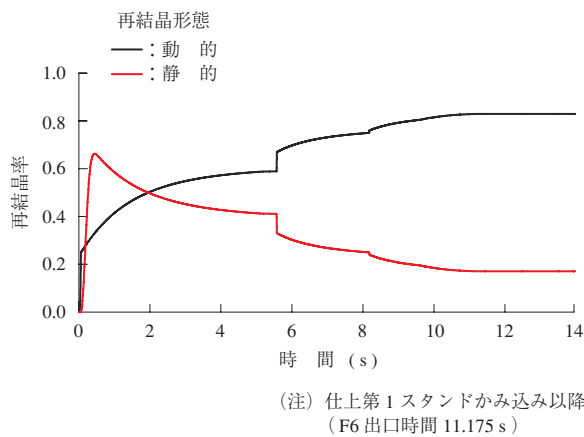
第9図 ケース-R：各相の比率  
Fig. 9 Transition of volume fraction in Case - R



第10図 ケース-U：各相の比率  
Fig. 10 Transition of volume fraction in Case - U



第 11 図 ケース - S : 各相の比率  
Fig. 11 Transition of volume fraction in Case - S



第 12 図 ケース - R : 再結晶率  
Fig. 12 Transition of recrystallization ratio in Case - R

討対象設備例の薄鋼板実圧延に近い場合、ケース - R、- S を中心に冶金組織特性を考察した。この結果、次の 5 項目が分かった。

- (1) 第 2 表の解析条件に示すように、薄鋼板圧延のケース - R、- S では、FDT が Ar3 温度を下回っているが、上流、中流スタンドは Ar3 温度を上回っている。ラストスタンド付近では Ar3 温度以下であるが、第 6 図～第 8 図の変態時間からみて、圧延はオーステナイト域主体の圧延が行われ、ランアウトテーブル以降でフェライト変態が始まる状況となっている。
- (2) 一般に市販されている低炭素鋼板の結晶粒径は 5 ～ 10  $\mu\text{m}$  程度で報告されている例が多く、ケース - U がこの一般的なオーステナイト温度域圧延品に該当

する。ケース - R はこのケース - U の結晶粒径組織に類似であり、FDT が Ar3 以下であっても品質的には、一般的なオーステナイト温度域圧延品に対して大きな差はもたらさないことを示した計算結果である。

- (3) ケース - R と - S の比較およびケース - T と - U の比較結果から、オーステナイト域あるいはフェライト近傍域で圧延しても、炭素量が少ないとフェライト粒径は大きくなる。
- (4) ケース - T は薄鋼板圧延温度低下をケース - R より小さめに仮定した場合である。設備モータパワーを第 1 図の設備例（ケース - R）より大きくするなどの何らかの対策で粗圧延温度、仕上げ圧延温度を中厚鋼板並みに高くして薄鋼板圧延を行う場合の操業に相当する。
- (5) ケース - R の組織はケース - T にも近く、圧延終了はフェライト域近傍での温度域圧延であるが、オーステナイト域圧延に近い組織結果を与えている。したがって、設備モータパワーなどの設備仕様を強化しなくても、薄鋼板製品の金属組織品質は正常に保たれ得ることを示す。

### 3. 板厚方向温度分布の金属組織への影響

2 章で述べた計算は、板厚方向温度分布均一として組織計算した結果である。一般に熱間圧延においては、圧延速度が低いときは、ロール接触時間が長めとなるために接触部の板温度が局部的に下がる。板厚方向の温度不均一が大きめとなり、板厚方向の組織不均一が大きめになると定性的に予想される。

薄鋼板 2 スタンド熱間圧延設備と圧延条件を仮想的に設定して、ロール接触弧に沿ってのひずみ速度分布を CORMILL シミュレータ<sup>(8)</sup>で求め、別途温度分布計算を行い、これらの結果を前記組織シミュレータにインプットして板厚表面と板厚中心の組織分布を求めた。第 3 表に解析条件を示す。

第 13 図、第 14 図にケース - I、- J の温度分布を、第 15 図、第 16 図にケース - I、- J のフェライト粒径変化を示す。各図で横軸は第 1 スタンドかみ込み後の時間を示す。第 13 図～第 16 図から考察した結果を次に示す。

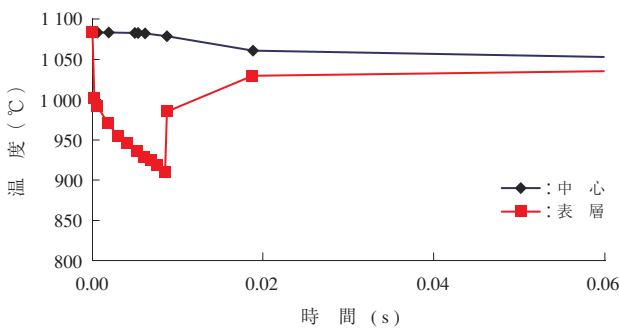
- (1) 総圧下率を 2 章の例よりも小さく設定したため、フェライト粒径は 2 章の場合の 2 倍近い 15  $\mu\text{m}$  前後となっている。このあと熱間圧延パスを繰り返し、

第3表 板厚方向組織分布解析条件と結果

Table 3 Calculation condition and calculated results for microstructure distribution along thickness

ケース	解析条件					解析結果		
	圧延パス厚み 総圧下率 44% (mm)	第1パス 入口圧延速度 (m/min)	第1パス 入口板温度 (°C)	巻取温度 (°C)	第1スタンド ロールから 巻取機までの 到着時間 (s)	板温度経過 (°C)	板厚 方向位置	巻取り後 フェライト粒径 (μm)
I (1スタンド) 圧延	1.7 ⇒ 0.952	90	1 083	685	11.2	(第13図)	板表層	13.3 (第15図)
							板中心領域	13.3 (第15図)
J (2スタンド) 圧延	1.7 ⇒ 1.36 ⇒ 0.952	90	1 083	685	12.0	(第14図)	板表層	12.5 (第16図)
							板中心領域	14.8 (第16図)

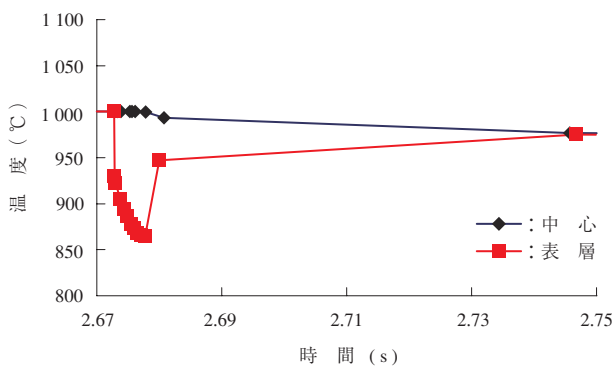
- (注) 1. 少数スタンド圧延モデルによる結果を示す。  
 2. 圧延機作業ロール直径はすべて 475 mm である。  
 3. 鋼板炭素量 (C) は 0.045% である。  
 4. ケース-J、-I ともに圧延終了後に水冷バンクを通過し、通過後に巻き取る設備条件とした。  
 5. ( ) は掲載図 No. を示す。詳細は本指示図による。



(注) 圧延機かみ込み後の時間を示す。

第13図 ケース-I: 温度分布

Fig. 13 Transition of temperature distribution in Case - I



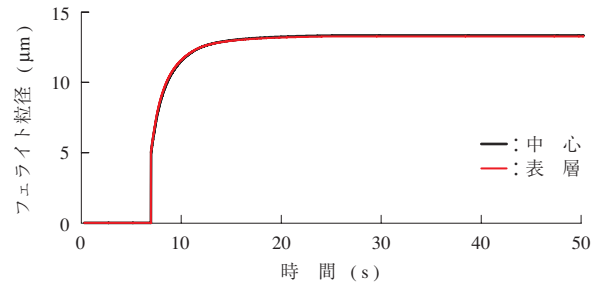
(注) 第1スタンドかみ込み後の時間を示す。

第14図 ケース-J: 温度分布 (第2スタンド通過時)

Fig. 14 Transition of temperature distribution in Case - J

総圧下率を2章と同じ程度にとれば、粒径は2章と同程度になると予想される。

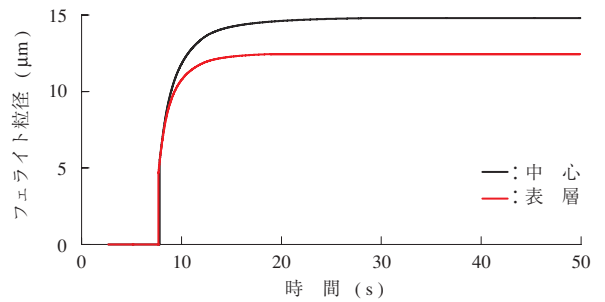
(2) ロール接触弧近傍の板表層では板温度は大きく低



(注) 炭素量 (C) 0.045%, 圧下率 44%

第15図 ケース-I: フェライト粒径変化

Fig. 15 Transition of ferrite grain size distribution in Case - I



(注) 炭素量 (C) 0.045%, 圧下率 20 → 30%, 2パス目圧延終了時間 2.677 s

第16図 ケース-J: フェライト粒径変化

Fig. 16 Transition of ferrite grain size distribution in Case - J

下するが、中心部では温度はあまり低下しない板厚方向温度分布となる。圧延接触弧を出ると板表層は短時間に復熱するため、前段スタンドの板厚方向温度分布が次スタンドの板厚方向温度分布へ与える影響は小さい結果となっている。

- (3) 同じ総圧下率 44%を 1 スタンドで行う場合（ケース -I）と 2 スタンドで行う場合（ケース -J）では、板中心領域の結晶粒径は、前者の方が細くなるが、その差は小さく 1 割程度である。
- (4) 本条件での板表層と板厚中心のフェライト結晶粒径は、ケース - J は表層粒径の方が中心粒径より 15%程細くなっている。ケース - I は中心と表層はほぼ同一粒径となっている。ケース - J はパスでの圧下率が小さく、塑性変形が板中心に及びにくいと推定する。
- (5) 圧延板の組織を概略的に解析評価する場合は、第 1 表、第 2 表に示すように、板厚方向の温度分布を均一として解析しても大きな差はないといえる。

#### 4. 熱間薄鋼板圧延設備の必要機能

熱間薄鋼板圧延を少数スタンドでバッチ式で行う場合は冶金組織的な製品品質留意事項以外に、2 章で述べた圧延荷重の増大に起因する薄鋼板圧延不安定現象に対処する必要がある。第 9 図、第 11 図に示すように仕上げ圧延時に Ar3 温度を下回っていても、フェライト変態が実際に始まるのは仕上げ圧延終了後である。このため、圧延時には板の冶金組織変態による形状不安定は起きないが、薄鋼板高荷重・高トルク圧延は種々の不安定現象を伴いやすい。バッチ式であるためのかみ込み、尻抜け回数が多いことが荷重変動を多くしており、次のような諸機器を操業環境に合わせて適宜設置することが望ましい。

- (1) 圧延荷重の増大によるロール表面性状の悪化に対する対策

適切な作業ロール黒皮を維持するための薄鋼板圧延ロットの板厚ごとのサイクリック化<sup>(9)</sup>、あるいはハイスロール<sup>(10)</sup>の採用などが望まれる。熱延潤滑システムもロール表面性状維持に有効である。

- (2) 圧延荷重の増大などによる板平たん度悪化への対策

ロールシフト式ミルなどによる形状制御能力の強化とクラウン形状制御自動化システムの整備<sup>(11)</sup>によって、板平たん度悪化を防ぐことが必要になる。作業ロールシフト式ミルであれば、ロールシフト磨耗分散方式採用によるロール段差磨耗への対処も可能になる。

- (3) 油圧ルーパ<sup>(3)</sup>の採用

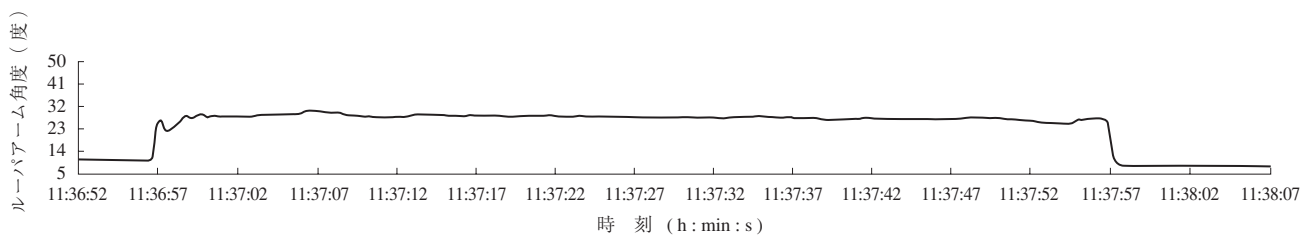
油圧シリンダによって駆動される油圧ルーパは、電動ルーパよりも低慣性高応答になるので板ネッキング防止、板絞込み防止などに適している。第 17 図に圧延時における油圧ルーパアーム角度の変動実測例を示す。ホットストリップミル仕上第 3 スタンドで PT（油圧力検出装置）による張力制御を行った場合の油圧ルーパの動き例である。いっそうの高精度張力制御を行うためにはロードセル搭載の油圧ルーパが望ましい。

- (4) ランアウトテーブルでの薄鋼板の通板、巻取りへの対処設備の導入

ダウンコイラ前高速通板装置、コイル切り分け・巻取り設備などの採用<sup>(12)</sup>によって、板先端コイラへ巻きつけ後の加速とコイル切り分け圧延が可能になる。大単重スラブから板温度の低下を防ぎつつ、コイル切り分けを行う場合に有効である。

- (5) 圧延機軸箱安定化装置<sup>(13)</sup>の設置

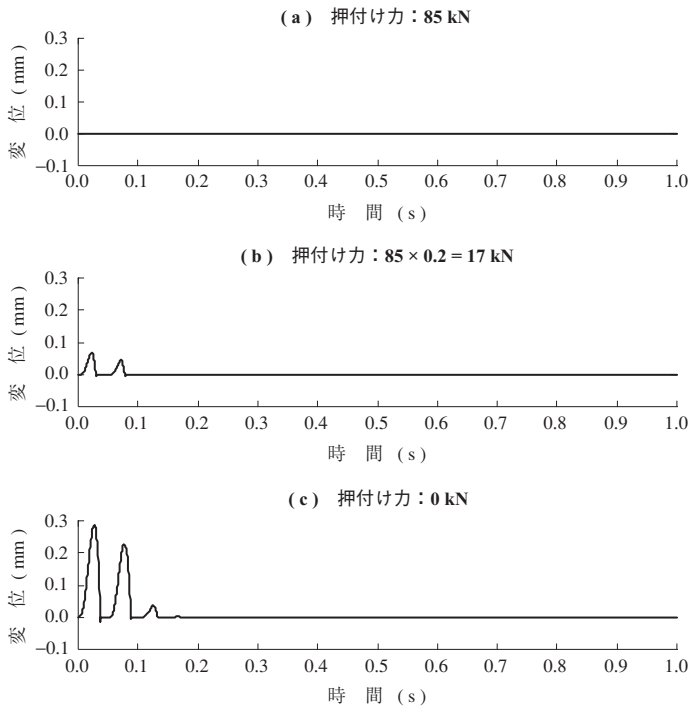
必要に応じて、通板時の軸箱の振動的動きを抑えて板の通板安定性を増す装置の採用が望ましい。第 18 図に軸箱安定化装置の挙動計算例を示す。ホットストリップミル仕上第 3 スタンドで、軸箱 1 個当たりの水平押え荷重を変化させた場合の軸箱の動きの計算例である。第 4 表に計算条件を示す。実測でも本装置によって軸箱変位が大きく減少することが確認された。



(注)・油圧ルーパ設置位置：ホットストリップミル仕上第 3 スタンド出側  
・スタンド間板厚 : 11 mm

第 17 図 圧延時油圧ルーパ角度変動実測例  
Fig. 17 Measured arm angle transition at hot strip mill hydraulic looper





(注) 出側のガタを完全に殺した状態にし、シリンダ押付け力を変化させた場合の下部作業ロール軸箱の振動応答を示す。

第 18 図 軸箱安定化装置挙動計算例  
Fig. 18 Calculated chock position transition in hot strip mill

第 4 表 軸箱安定化装置性能計算条件  
Table 4 Calculation condition of chock stabilizer

項目	単位	計算条件	
想定対象ミル	—	ホットストリップミル 仕上第 3 スタンド	
圧延ロール	mm	$\phi 760 / \phi 1520 \times 1730$	
作業ロール軸箱重量	kN/軸箱	32	
駆動系固有ねじり振動数	Hz	20	
想定減衰比	ロール系	—	0.08
	軸箱系	—	0.05
圧延力	MN	21.6	
圧延トルク	kN·m	635	
板厚	mm	9.5 ⇒ 5.0	
出口板速度	m/min	144	

(6) 蛇行制御システム

通板安定化装置として蛇行制御システムを設置する場合もある<sup>(14)</sup>。

5. 結 言

熱間薄鋼板圧延における圧延特性について、冶金組織面を中心に解析的に考察した。特に仕上 6 スタンドという少数スタンドで 1.2 mm の薄鋼板を圧延する場合の圧延設備のあり方を検討した。

(1) バッチ式の仕上 6 スタンド圧延設備で、薄鋼板圧

延 (1.2 mm 程度) を行う場合、板温度が低下しやすい。このため、FDT は、Ar3 温度より下回る現象が起きやすい。

(2) 上記 (1) の結果として変形抵抗が上昇し、圧延負荷が大きめとなる。このため、モータ出力の点から圧延速度は低めとなり、さらに圧延温度は低めとなる。ただし、変形抵抗の上昇はフェライト域近傍ではやや低下する傾向があるので 800℃前後までは負荷の増大は小さく、操業可能な範囲にあるが、一方では圧延転位密度の累積でこの低下傾向は相殺されている。

(3) 上記 (1) および (2) の状態のもとでの板巻取り後の冶金組織を組織シミュレータを用いて解析すると、結果としての組織は、いわゆる Ar3 温度以上で圧延が終了するオーステナイト域圧延の場合と類似した板組織となる解析結果を得た。

(4) 別途熱間薄鋼板圧延モデルで、板厚方向の温度分布、ひずみ速度分布を求め、この結果を組織シミュレータにインプットして解析した。板厚方向の組織不均一は小さく、板厚方向均一温度分布で解析する結果と大きな差はもたらさないとされる。

(5) 以上の解析結果から、例えば FDT が 800℃、巻取り温度が 680℃の条件での 1.2 mm 薄鋼板圧延製品の場合、冶金組織としては、オーステナイト域圧延操業で生産される通常厚み (例えば 2 mm) 板製品と大差ない品質に保たれる。

(6) 他方、薄鋼板圧延では、高負荷圧延による各種圧延不安定現象が起き得るので、これらの各種現象に対処した設備機能を備えることが望ましい。

— 謝 辞 —

本稿における試験圧延に当たっては、大阪大学 斎藤好弘名誉教授、左海哲夫准教授からご援助をいただきました。また、組織シミュレータの使用方法については東京大学生産技術研究所 柳本潤教授からご指導を受けました。ここに記し、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

(1) 二階堂英幸：熱間圧延におけるエンドレス圧延技術の開発 第 169 回、第 170 回西山記念技術講座 1998 年 11 月 pp. 79 - 108  
(2) K. Eckelbach et al. : Innovative Technologies of

- Thin Gauge Hot Rolled Sheet ISS Symposium Hot Rolling of Thin Gauge Sheet Steel ( 2000. 4 )
- ( 3 ) 今成宏幸：熱間薄板圧延における板厚，温度制御の動向 日本鉄鋼協会 2006 年計測・制御・システム工学部会第 3 回公開フォーラム「圧延工程における制御技術の話題」 2006 年 6 月
- ( 4 ) 志田 茂：炭素鋼の変形抵抗に及ぼす炭素含有量・温度・ひずみ速度の影響 - 炭素鋼の熱間変形抵抗・第 1 報- 塑性と加工 第 9 巻 85 号 1968 年 2 月 pp. 127 - 132
- ( 5 ) 志田 茂：熱間圧延における圧延荷重について 塑性と加工 第 7 巻 67 号 1966 年 8 月 pp. 424 - 439
- ( 6 ) 日本鉄鋼協会圧延理論部会：板圧延の理論と実際 日本鉄鋼協会初版 1984 年 9 月 pp. 36 - 37, pp. 195 - 196
- ( 7 ) 社団法人日本鉄鋼協会圧延理論部会材料機能創出 FEM 解析技術検討会：材料機能創出 FEM 解析技術検討会報告書 2001 年 6 月 pp. 163 - 167
- ( 8 ) 柳本 潤：数値圧延機の開発と応用 生産研究 1991 年 11 月 pp. 46 - 53
- ( 9 ) 西村和之ほか：熱間圧延ロールの肌荒れについて 昭和 63 年度社団法人日本塑性加工学会春季講演会技術懇談会資料 1988 年 4 月 pp. 27 - 35
- ( 10 ) 日本鉄鋼協会圧延ロール研究部会：圧延ロールの技術はどこまで進歩したか 圧延ロール研究部会報告書 1995 年 2 月 pp. 61 - 130
- ( 11 ) 佐藤全佳ほか：熱間帯鋼仕上圧延設備における鋼板形状制御技術 石川島播磨技報 第 44 巻 5 号 2004 年 9 月 pp. 352 - 357
- ( 12 ) 桑野博明：エンドレス熱間圧延ラインにおける巻取り設備の概要 第 112 回日本鉄鋼協会圧延理論部会資料 112 圧理- 2 2000 年 6 月
- ( 13 ) IHI：公開特許公報 2003-19504 井出賢一
- ( 14 ) 桑野博明ほか：センサー方式蛇行制御システムのホットストリップミルへの適用 第 37 回塑性加工連合講演会前刷集 No.116 1986 年 11 月 pp. 61 - 64