

入門講座

圧延理論入門-10

材料組織変化を考慮した圧延理論

Rolling Theory in Consideration of Microstructural Evolution of Steels

瀬沼武秀
Takehide Senuma

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所
鋼材第一研究部長

1 はじめに

今回の講座では金属学の視点で圧延理論を考えてみたい。圧延理論において金属学が最も影響を及ぼすのが変形抵抗である。特に熱間の変形抵抗は圧延に伴うダイナミックな組織変化の影響を受け、組織変化を予測できないと精度の良い変形抵抗値を予測できない。熱間圧延工程での組織変化に関わる金属学的現象は変形に伴う転位の導入とその消滅過程である回復、再結晶、そして高エネルギー場である再結晶粒界の消滅過程である粒成長が挙げられる。また、析出物形成元素が添加されている場合は条件によっては圧延工程で微細な析出物が大量に析出し、析出強化により変形抵抗を高めることもある。そして、この析出現象が回復・再結晶や粒成長を遅延し、組織変化の挙動にも影響を与える。

また、熱間圧延での圧延理論を複雑にしている要因の一つに不均一性が挙げられる。実操業において温度の不均一性は避けられず、変形抵抗も温度分布により各部で異なる。それにより導入される転位も変化し、再結晶、粒成長などの組織変化も各部で異なることになる。それゆえ、圧延理論の高精度化のためには応力-温度-組織変化を連成した理論の構築が必要になる。

一方、冷間圧延では圧延に伴う集合組織の形成並びに圧延後に行われる焼鈍によって形成される再結晶集合組織の形成に影響を与える各結晶粒におけるひずみエネルギーを求めることが金属学的な興味の対象になる。もちろん熱間圧延においても集合組織は形成されるのであるが、通常の熱間圧延はオーステナイト域で行われ、その後 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態において集合組織がランダム化されるため、熱間圧延においては集合組織形成に対する興味は薄かった。しかし、最近になって熱延鋼板の機械的性質の面内異方性や冷延鋼板の集合組織制御に熱延における集合組織制御が注目され始めている^{1,2)}。特に、熱間圧延をフェライト域で行う場合は顕著な集合組織形成が

見られ、それを有効に利用することにより材料開発に新たな展開が図られつつある²⁾。

本講座では紙面の関係もあるので冷間圧延については立ち入らず、冶金現象に大きな影響を受ける熱間圧延を対象に圧延理論と金属学の関係を考えてみることにする。また、最近の熱間圧延による材質作りこみ技術のトピックスを2, 3紹介し、それに関連した圧延理論への課題を提示したい。

2 熱間変形抵抗

本シリーズの講座でも示されたように、圧延理論に基づき圧延時の圧延荷重、トルクなどを求めるには材料の変形抵抗を知らなければならない。圧延理論では材料は一般に等方性の剛塑性体として取り扱われることが多い。この場合材料が変形するための降伏条件は主応力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 に関する関係式で表すことが出来る。これらの関係式で広く使われている式の一つとして式(1)に示すMisesの式が挙げられる。ここで、 k^* は単純引張あるいは単純圧縮変形での降伏応力である。圧延変形の場合、変形が平面歪条件で行われるので $\sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ の関係があり、降伏条件式は式(2)のようになる³⁾。

$$\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\} = 2k^{*2} \dots\dots\dots (1)$$

$$3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 4k^{*2} \dots\dots\dots (2)$$

降伏応力は材料の成分、内部構造の他に、ひずみ ϵ 、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ および温度 T に依存することが知られているので、これらの依存性を別途実験で求めておく必要がある。材料の内部構造とは組織の状態を意味し、結晶粒径や残存する転位密度によって定量的に表現されることが多い⁴⁾。

厳密に圧延による変形挙動を求めるにはロールバイト内外の応力を受ける各部において温度、変形、組織の情報を連成して数値計算で求める必要がある。しかし、圧延理論におい

て圧延荷重やトルクを解析的に解こうとすると降伏応力の分布を考慮することは不可能である。そこで、多くの解析解は降伏応力を一定と仮定して導かれている。実際の降伏応力は一定ではないので、何らかの代表値を用いることになる。この代表値 K_m を平均降伏応力、あるいは圧延現場では変形抵抗と呼ぶことが多い。

式(3)は解析解の一例であるSimsの近似解による圧延荷重の予測式⁵⁾であるが、実際に使われている現場の圧延荷重予測式もこれに類似する形で圧延荷重 P が変形抵抗 K_m に比例する形になっている。

$$P = K_m (R' \Delta h)^{1/2} Q_p \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 R' はロールフラットニングを考慮したロールの半径、 Δh は板厚減少量、 Q_p は圧下率関数である。圧下力関数はSimsの近似解の場合は接触弧長全体で固着摩擦条件を仮定したので、幾何学的関数になるが、通常は摩擦係数の関数でもある⁶⁾。

Bland & Ford⁷⁾はひずみ、ひずみ速度、温度などを圧延方向では変化するが板厚方向では一定として、降伏応力を圧延方向だけの関数と考え、変形域全長にわたり降伏応力を圧延方向で積分して K_m を求める方法を提案している。しかし、実際の変形抵抗値はこのようには求められておらず、他の変形様式、たとえば円柱圧縮試験や平板の平面ひずみ圧縮試験で求めた応力-ひずみ曲線を積分して求めた平均降伏応力を用いることが多い⁸⁾。変形抵抗の測定装置並びにデータは文献8)に数多く収録されているので参照されたい。

3 熱間変形抵抗の金属学的意味

次に熱間変形抵抗の金属学的意味について考えてみる。変形抵抗とは書いて字のごとくで変形に対する抵抗である。金属の変形は一般に、すべり変形、双晶変形および粒界すべりによって起こる。熱間圧延の温度、ひずみ速度領域では結晶のすべりが変形を支配する。すべり変形は結晶構造に依存した特定のすべり系で転位が動くことによって起こるので、熱間変形抵抗は高温で転位の動きを妨げる現象である。変形抵抗に及ぼす成分、組織の影響は強化機構で分類して説明することができる。強化機構には固溶体強化、析出強化、粒界強化、加工強化、変態組織強化がある。固溶体強化は固溶元素と転位の相互作用により転位の動きが抑制される現象である。析出強化は転位が析出物をカッティングして移動する時、あるいは転位が析出物の周囲に転位ループを残して移動する時に生じる抵抗である。粒界強化は粒界によって移動を止められた転位がそこに応力場を作り、隣接する粒のすべり系を降伏させ活動させる現象に基づく。加工強化は加工によってすでに存在する転位と新たに生じた転位の相互作用により転

位の動きが抑制される現象である。最後の変態組織強化は変態時に生じた変態転位と生成した組織に含まれる第2相による転位の動きの抑制に基づく。

これらの強化機構は熱的活性化過程に支配されるため温度依存性を示す。合金元素の添加は上記の転位の動きの障害となって直接変形抵抗を高めるのと同時に転位との相互作用により加工中の回復(動的回復)を遅らせることにより熱間変形抵抗を高める。一般には合金元素の添加が多いほど変形抵抗は大きくなるが、炭素は条件によっては添加量が増えることで軟化することが報告されている。その理由として侵入型元素の存在により鉄の自己拡散の活性化エネルギーが低くなり回復が容易に進むためと考えられている⁹⁾。

スラブ加熱は温度も高く、時間も長いので一般にスラブ加熱中に形成される析出物は数が少なく粗大になるので析出強化として変形抵抗に与える影響は小さい。一方、熱間圧延中に析出が起こる場合は析出物が微細で数多く生成することがあり、析出強化の機構により変形抵抗が高くなる可能性がある¹⁰⁾。しかし、析出物形成元素が高い固溶強化能を有する場合は析出することにより固溶体としての強化能を失い、逆に変形抵抗が下がることもあり得る。

降伏応力に及ぼす結晶粒径の影響は粒径の $-1/2$ 乗に比例することが知られている。しかし、熱間圧延においては後記するように圧延中に動的再結晶などにより組織が変化するので、変形抵抗に及ぼす結晶粒径の影響を考慮するのは単純ではない。

加工強化は前の加工で導入され、今回の加工までに消滅しなかった転位とのインターアクションに基づく抵抗で、後述する累積ひずみの効果がこの現象に基づく。

次に加工条件と熱間変形抵抗の関係について述べる。熱間変形抵抗はひずみ、ひずみ速度、温度に依存することは周知の通りである。熱間変形抵抗の特徴は加工に伴う転位の導入による加工硬化と熱的活性化過程による軟化現象が同時に起こることである。ここでいう軟化現象は動的回復あるいは動的再結晶で加工中に回復ならびに再結晶が起こり転位密度が減少する過程である。このように熱間加工の変形抵抗は転位密度を媒介に考え、定式化するのが最も適切と考えられる。

一般に変形応力と転位密度の間には式(4)の関係が成り立つことが知られている。この応力は応力場の作用のような長範囲に働く応力で内部応力 σ_i と呼ばれる。ここで、 α は定数で1前後の値、 μ は剛性率を表す。

$$\sigma_i = \alpha \mu \rho^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

一方、転位による応力は内部応力のほかに、転位の運動を妨げようとする動的な抵抗が存在する。この応力は有効応力と呼ばれ、温度、ひずみ速度の影響を顕著に受け、加えた応力より内部応力を引いて求めることが出来る。ところで転位

の速度は周知のように熱的活性化過程に支配される。その時の越えなければならない活性化の山（活性化エネルギー）は有効応力が強く働けば容易に越えることが出来る。すなわち、転位の動く速度と有効応力の間には式 (5) のような関係がある。

$$v = a_1 \exp \left[- (Q_0 - a_2 \sigma_a) / kT \right] \cdots \cdots (5)$$

ここで、 v は転位の速度、 Q_0 は応力が作用しないときの転位の運動の熱的活性化エネルギー、 k はボルツマン因子、 σ_a は有効応力、 a_1 、 a_2 は定数である。ところで、すべりによる変形は式 (6) が示すように転位が移動することにより起こる。

$$\epsilon = b \rho s \cdots \cdots (6)$$

ここで、 ϵ はせん断ひずみ、 ρ は転位密度、 s は全ての転位が平行なすべり面上ですべり方向に動いた距離、 b はバースペクトルである。転位の動く速度は式 (6) を時間で微分することにより式 (7) で表すことが出来る。

$$\dot{\epsilon} = b \rho v \cdots \cdots (7)$$

式 (4)、(5)、(7) の関係を式にまとめて整理すると応力と転位密度の間には式 (8) の関係が成り立つ。

$$\sigma = \alpha \mu \rho^{1/2} + [Q_0 - kT \ln \{ (b a_1 \rho) / \dot{\epsilon} \} / a_2] \cdots \cdots (8)$$

正確には右辺の第一項の転位密度は全転位密度を表し、第二項の転位密度は可動転位密度を表す。しかし、全転位密度中の可動転位の割合はひずみによっても異なり、定量的に十分には明らかになっていない。そこで、ここでは全転位密度と可動転位の密度は比例するとして取り扱っている。また、上式には応力に及ぼす結晶粒径の影響が考慮されていないので、それを考慮するために Hall-Petch の関係を式 (8) に加えることもできるが、そうすると結晶粒径の影響が全ひずみ域で一定値になり、ひずみの増加に伴う組織変化の影響をうまく表現できない。一般にはひずみの増加に伴い初期の結晶粒径の影響が小さくなるので、それを表現する方法として結晶粒径が多いと同じひずみを加えたとき導入される転位が多くなるという仮定で結晶粒径の影響を取り入れることもできる¹¹⁾。

式 (8) を見れば分かるように第一項の内部応力は転位密度と共に高くなるのに対し、第二項の有効応力は逆に転位密度が低いときに大きくなる。すなわち、有効応力は転位密度の低い加工度の低いところで顕在化し、加工度が大きくなると無視しうる存在となる。

次に、前記した熱間変形抵抗の特徴である加工硬化と熱的活性化過程による軟化現象が同時に起こる現象の定式化について述べる。加工に伴い導入される転位密度の増加と動的回復により減少する転位密度の減少を考慮した転位密度の変化は次式で与えられる。

$$d\rho = (\partial \rho / \partial \epsilon) d\epsilon + (\partial \rho / \partial t) dt \cdots \cdots (9)$$

ここで、加工に伴い導入される転位密度はひずみ量に比例し、動的回復により減少する転位密度の減少速度は存在する転位密度に比例すると仮定するとひずみ速度が加工中一定ならば転位密度とひずみの関係は次式で表される。ここで、 ρ_s はひずみが無限に大きくなったときの転位密度、 a_3 は定数である。

$$\rho = \rho_s [1 - \exp(-a_3 \epsilon)] \cdots \cdots (10)$$

一方、加工が進みあるひずみ ϵ_c に達したときに再結晶が起こる場合を考える。この動的再結晶の進行は次式によって表されると仮定する。ここで、 p は定数、 G は再結晶の進行速度を表すもので一般にひずみ速度、初期粒径、温度などに依存する。

$$x = 1 - \exp[-G(\epsilon - \epsilon_c)^p] \cdots \cdots (11)$$

このような形で動的再結晶が進行すると、未再結晶粒内の転位密度は式 (9) に従って増加するが、再結晶が起こった部分は今まで存在した転位が解放された状態になる。しかし、その再結晶粒も加工が連続して加わるため、再び転位が増殖され、その密度を増していく。そして粒内の転位密度がある値以上になると再び動的再結晶が起こる。動的回復と動的再結晶を考慮した場合の転位密度の変化の導出は文献4) を参照されたい。

4 累積ひずみ効果を考慮した変形抵抗予測式

通常の熱間加工は多パスの連続加工の場合が多い。その場合、パス間で軟化が進行し、高温で比較的パス間時間の長い粗圧延や仕上圧延の前段では再結晶が完結し、加工によって導入された転位は消滅した状態となる。ただし、結晶粒径は変化するので、その影響が変形抵抗に及ぶ。一方、仕上圧延の後段や線材圧延のようにパス間時間が短くなると再結晶が終了せずに、図1が示すように加工で導入された転位が残留して、次の加工時に変形抵抗の増加をもたらす。このような残留ひずみの効果を考慮しないと板厚精度に最も影響を及ぼす終段でのギャップ設定に大きな誤差を生じることになる。

この変形抵抗に及ぼす累積ひずみの影響は式 (8) の転位密度の項に加工直前に残留していた転位密度 ρ_0 を加算することにより定量的に考慮することが出来る。図2は八幡製鐵所連続熱延工場での変形抵抗の実測値と計算値の比較を示す。(a) は美坂の式¹²⁾ を用いたときの結果であり、(b) は式 (8) を現場用にモディファイした式を用いたときの結果で、累積ひずみ効果を考慮した変形抵抗式を用いることにより後段での変形抵抗の予測精度が顕著に向上した。

5 オーステナイトの組織変化予測モデル

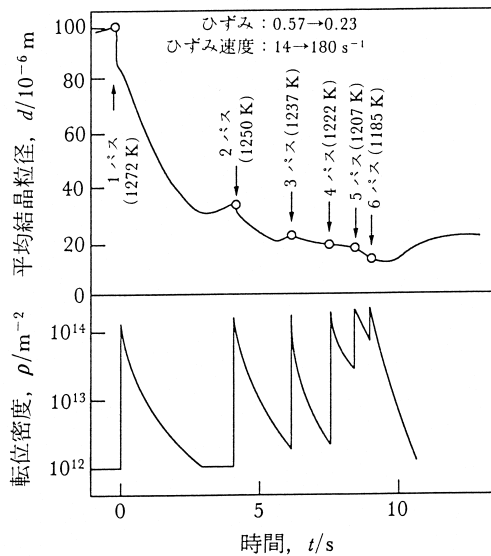


図1 6パスの仕上圧延における材料中の転位密度の変化(シミュレーション計算結果の一例)¹⁸⁾

3、4章で組織変化に伴い転位密度が変化することを述べ、その現象を考慮することにより変形抵抗の高精度予測が可能なることを示した。本章では熱間圧延工程で起こる金属学的現象の定式化について述べる。図3は一般に熱間加工により起こる組織変化を模式的に示す。すでに言及したように加工中に起こる回復、再結晶を動的回復、動的再結晶という。また、加工後に起こる回復、再結晶を静的回復、静的再結晶という。そして、動的再結晶粒が加工後に成長しながら加工粒を侵食していく現象を準動的再結晶という。これらの現象を定式化するには高精度の試験機によりひずみ、ひずみ速度、温度などを設定し、各条件で加工した後の組織変化を調べる必要がある。図4はその種の試験機の一つで、ひずみ速度 300 sec^{-1} 程度が得られ、ホットストリップ圧延の加工をシミュレートできる。また、加工直後に 1000°C/sec 程度の冷却が可能のため、動的再結晶組織もほぼ観察可能である。このようにして得られたそれぞれの冶金現象の定式化を表1にまとめて示す¹³⁾。

熱間加工工程の金属学的現象の定式化として析出挙動のモデル化も行われている^{14,15)}。材料中に存在する転位を核生成サイトとして熱力学的条件を考慮して、核生成・成長により析出物が生成する挙動を定式化したもので、大きさ、数、量が求まるため、既存の析出強化の式を用いることにより変形抵抗への影響も算出することが出来る。一方、析出に伴いピンニング効果により回復・再結晶・粒成長が抑制され変形抵抗が高くなる。Nb鋼などでNb添加により回復・再結晶・粒成長が遅延するモデルは開発されているが、表1に示された各モデル式の係数や熱的活性化エネルギーの値を合わせ込んだものが大半でピンニング効果を式の中に取り込んだ定式化には至っていない^{16,17)}。また、熱間連続加工で析出が起きたために変形抵抗が上がった例はすでに報告があり¹⁰⁾、成分系によっては熱延中に析出物が数多く微細析出すること

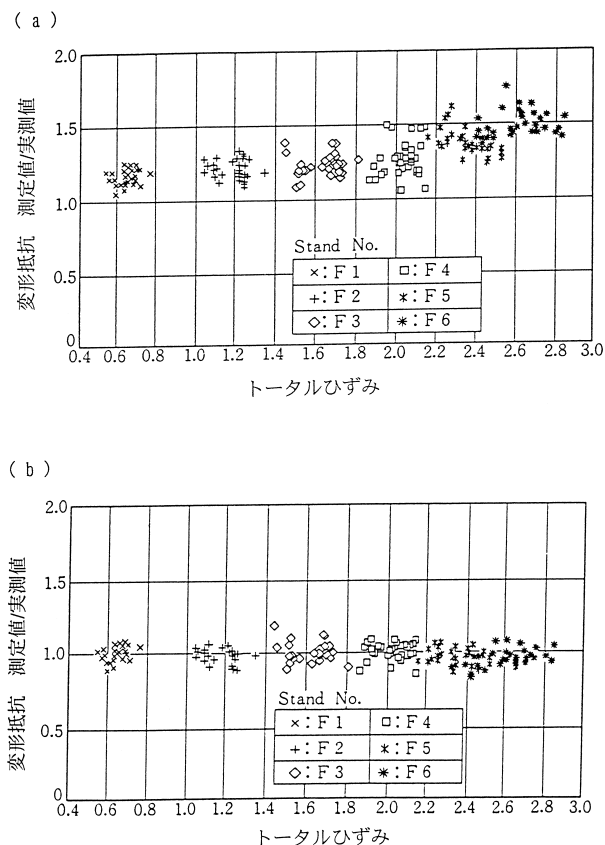


図2 八幡製鐵所連続熱延工場での変形抵抗の実測値と計算値の比較
(a) 美坂の式¹²⁾を用いたときの結果、
(b) 式8を現場用にモディファイした式を用いたときの結果⁴⁾

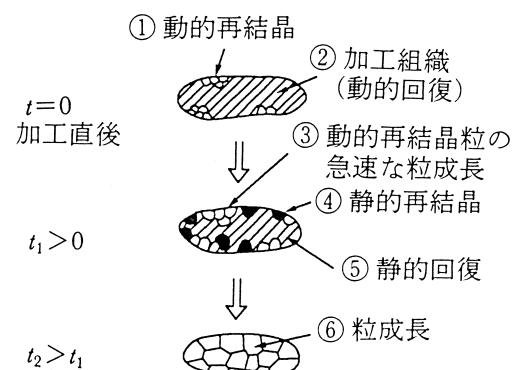
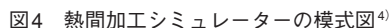


図3 熱間加工により起こる組織変化(模式図)¹⁸⁾



これらの熱間組織変化予測モデルならびに析出予測モデルは変形抵抗の高精度予測のためにだけ開発されたものではなく、本来の目的は熱延鋼材の組織、材質を予測するために構築されたシステムの一部である¹⁸⁾。それゆえ、その他にも加熱工程における初期組織予測モデル、冷却時の変態組織予測モデル、巻取時の巻取組織変化予測モデル、組織-材質予測モデルなどが開発されている。組織材質予測モデルは研究開発の分野では重要な手段として利用されているが、現場での実用化に関してはコンピュータの容量、モデルの精度、適用鋼種範囲、投資対効果などの問題で未だにごく一部でしか実現していない。しかし、これからは以下のニーズにより更なる発展が期待できる。

- ・ 総合シミュレーションシステムによる無駄のない（品質安定性）環境に優しい（省合金、易リサイクル性）材質作り込み技術の確立。
- ・ IT社会に対応する材質自動設計による短納期化。
- ・ コンピュータメタラジーモデルによる製造技術のグローバル化ならびに品質安定化。
- ・ ニーズの多様化を銅種集約思想で作り分けるフレキシブル製造体制の確立。
- ・ 労働人口の逓減に伴う技術の電子化。

表1 炭素鋼オーステナイト熱間加工組織変化の定式化¹⁸⁾

ひずみ：0.1～0.8， ひずみ速度：1～300 s⁻¹.

復旧過程 [単位]		計	算	式
①動的再結晶	限界ひずみ [—] 粒 径 [m]	$\varepsilon_c = 4.76 \cdot 10^{-4} \exp(8000/T)$		(a)
		$d_{\text{dyn}} = 0.0226[\varepsilon \exp(Q/RT)]^{-0.27} = 0.0226 Z^{-0.27}$		(b)
		$Q = 267 \text{ kJ/mol}$		
	再結晶率 [—]	$X_{\text{dyn}} = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0.5}}\right)^2\right]$		(c)
		$\varepsilon_{0.5} = 5.476 \cdot 10^{-2} d_0^{0.28} \varepsilon^{0.05} \cdot \exp(6420/T)$		(d)
	転位密度 [m ⁻²]	$\rho_{s0} = 8.73 \cdot 10^8 [\varepsilon \cdot \exp(Q/RT)]^{0.248}$		(e)
		$\rho_s = \rho_{s0} \exp[-90 \exp(-8000/T) \cdot t^{0.7}]$		(f)
②動的回復*		[m ⁻²]	$\rho_e = \frac{c}{b} (1 - e^{-be}) + \rho_0 e^{-be}$	(g)
③動的再結晶後の粒成長	[m]	$dy = d_{\text{dyn}} + (d_{\text{pd}} - d_{\text{dyn}}) \cdot y$		(h)
	[m]	$d_{\text{pd}} = 5.38 \cdot 10^{-3} \exp(-6840/T)$		(i)
		$y = 1 - \exp[-295 \varepsilon^{0.1} \exp(-8000/T) \cdot t]$		(j)
④動的再結晶	粒 径 [m]	$d_{\text{st}} = 5 \cdot 10^{-6} (S_V \cdot \varepsilon)^{0.6}$		(k)
		$S_V = \frac{24}{\pi d_0} (0.491 e^\varepsilon + 0.155 e^{-\varepsilon} + 0.1433 e^{-3\varepsilon}) \cdot 10^{-6}$		(l)
	再結晶率 [m]	$X_{\text{st}} = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t - t_0}{t_{0.5}}\right)^2\right]$		(m)
		$t_{0.5} = 0.286 \cdot 10^{-7} S_V^{-0.5} \cdot \varepsilon^{-0.2} \cdot \exp(18000/T)$		(n)
⑤静的回復		[m ⁻²]	$\rho_r = \rho_e \exp[-90 \cdot \exp(-8000/T) \cdot t^{0.7}]$	(o)
⑥粒 成 長		[m]	$d^2 = d_{\text{st}}^2 + 1.44 \cdot \exp(-Q/RT) \cdot t$	(p)

・ナノ組織製造技術など、シミュレーションによる作り込み技術の構築並びに設備設計への展開。

また、この材質予測システムを圧延理論と融合することにより板厚方向で多様な組織を有するハイブリッド鋼材の製造など新たな世界への展開も期待できる。

組織材質予測制御技術の現状についてはISIJ Internationalの特集号を参照されたい¹⁹⁾。

6 変形-温度-組織を連成したFEM熱間圧延解析

図5は5章の組織変化予測モデルとロール抜熱や加工発熱などを考慮した温度モデルを連成したFEMを用いた熱間圧延時のロールバイト内の転位密度の変化と動的再結晶の進行を求めた計算結果である。温度分布は物質移動項を含む2次元定常熱伝達方程式を与えられた境界条件のもとでカラーキン法により定式化しFEMにより計算した²⁰⁾。圧延条件はロール径1000 mm、圧延速度3.1 m/sec、初期板厚100 mm、初期温度1000℃である。圧下率60%ではロールバイトの前半から動的再結晶が起き始め、初期粒径が小さいほどその進行は速い。また、圧下率20%では動的再結晶は起きず、ロールバイト後半での転位密度の減少は見られない。この結果は動的再結晶が起これば、60%の大圧下圧延にもかかわらず変形抵抗に関しては20%圧下の場合と大差がないことを示す。もちろん、圧延荷重やトルクは圧下力関数が圧下率により異なるので差が現れる。しかし、動的再結晶が起こる条件では意外と圧延荷重やトルクが大きくならないことを意味する。

一方、図6は50%圧下を行った時の圧延板の相当応力 σ の分布の計算結果を示す。(a)は組織変化予測モデルを連成

した結果で、ロールとの接触によるせん断変形により表面近傍層で動的再結晶が起こり、軟化現象が生じている。一方、従来タイプのひずみ、ひずみ速度、温度の関数の変形抵抗式を用いた場合には σ はロールバイト出口に向かって単純に増加している。両者の圧延荷重の差は約25%であった²¹⁾。

また、本結果が示唆するように、粗圧延や仕上圧延の前段では部分的に動的再結晶が起こる可能性があり、その際の板反りの解析では単に温度分布の非対称性さだけではなく、それに伴う動的再結晶などのメタジカルな変化の非対称性さも考慮できる連成モデルを用いないと精度の良い解析は期待出来ない。

7 最近の熱延材質作りこみ技術のトピックスとそれに関わる圧延技術の課題

7.1 潤滑熱延

ロール長寿命化や焼き付き防止を目的として熱間圧延において潤滑を施すことは従来から行われている。その場合、留意されていたのは圧延性、特に噛み込み不良を起こさないように潤滑により摩擦係数を著しく落とさないことであった。ところが最近、仕上圧延をフェライト域で潤滑を施し、摩擦係数を下げることにより、IF鋼の深絞り性が向上することが明らかになり、摩擦係数を下げる潤滑熱延のニーズが高まった²²⁾。また、オーステナイト域においても摩擦係数を下げる潤滑熱延が r 値の向上に若干ではあるが寄与することが分かった²³⁾。摩擦係数を下げる潤滑熱延はこのような鋼板の特性を高める可能性があるだけでなく、圧延荷重、トルクを低減し、製造エネルギーの削減に寄与する。また、潤滑により摩擦係数を下げて圧延した熱延鋼板はスケールの生成厚が薄く酸洗コストの低減にも寄与する可能性がある²⁴⁾。

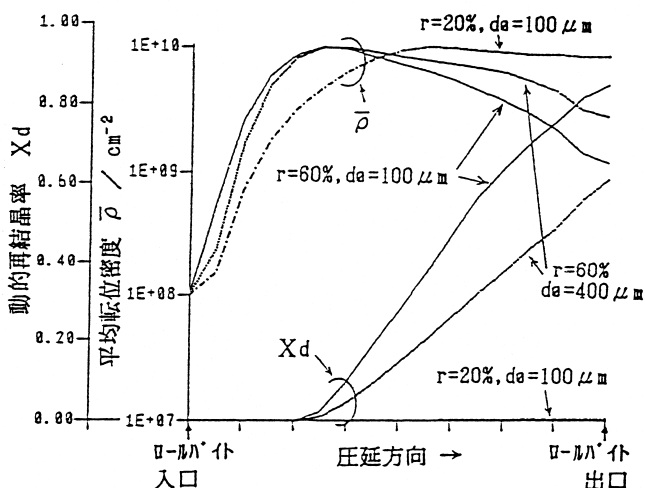


図5 ロールバイト内での転位密度、動的再結晶率の変化²¹⁾

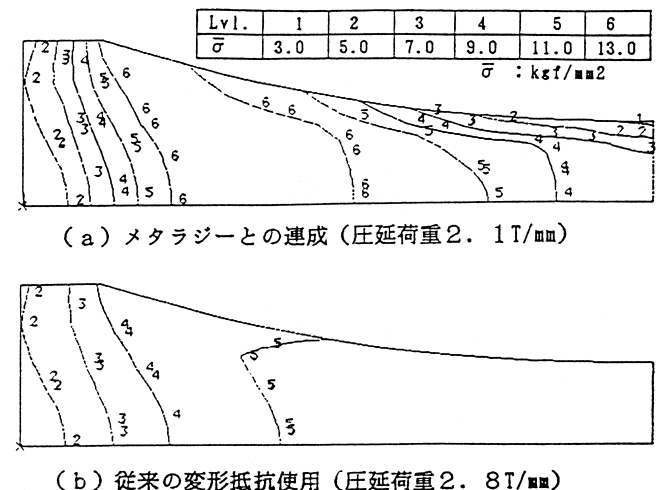


図6 圧延中の組織変化を考慮した場合と、しない場合の圧延材中の相当応力分布と圧延荷重の計算結果²⁰⁾

現在すでに実機において摩擦係数を下げた熱延が行われ、それにより製造された熱延板を素材にした冷延鋼板で r 値=3の超深絞り用鋼板が製造できる可能性が示された²⁵⁾。

また、ヨーロッパではエネルギーコストの低減、薄手材の製造容易性、ロール原単位の向上、冷延時に加工硬化が比較的小さい素材が製造できるなどの理由でIF鋼だけではなく、低炭素鋼でもフェライト域熱延が積極的に行われている²⁶⁾。これらの圧延も低摩擦係数で行われればメリットが拡大する。

この潤滑熱延技術を確認たるものにするには以下の圧延技術の確立が必要である。第一に高精度の通板制御技術を開発し、噛み込み不良、スリップなどの圧延性を阻害する要因を取り除く技術の確立。第二に少量の潤滑油の供給でも十分な摩擦係数の低減を可能にする潤滑油の開発。第三にストリップの全幅、全長にわたり均一で、安定した潤滑を可能にするノズルの配置や水切り技術など効率的な潤滑方法の確立などが挙げられる。また、フェライト域熱延に関しては、フェライト域や2相域に適用できる高精度の変形抵抗式の開発も望まれる。

7.2 超細粒鋼

組織を微細にすることにより鋼の特性を向上させる試みは以前よりなされていたが、最近「強度2倍、寿命2倍」のキャッチフレーズで $1\mu\text{m}$ 前後の結晶粒組織を持つ鋼を製造する試みがなされている²⁷⁾。このような微細組織を熱間圧延で得るには Ar3 変態点直上のオーステナイト域、オーステナイト/フェライトの2相域、そしてフェライト域のいずれかの領域で大圧下圧延を行うことが不可欠であると報告されている²⁸⁻³⁰⁾。 $1\mu\text{m}$ の圧延で結晶粒を $1\mu\text{m}$ 前後まで微細化するには80%近い大圧下圧延が必要となる。析出物を微細に析出させておくと、組織微細化に必要な圧下率が低減できることも報告されている³¹⁾。また、ホットストリップ圧延のようにパス間時間の短い圧延では累積ひずみ効果が利用できる³²⁾。しかし、ホットストリップ圧延のように圧延速度が速いと変形がほぼ断熱的に起こり加工発熱による顕著な温度上昇が生じる。この温度上昇は結晶粒の微細化に不利に働くので圧下率には最適値が存在する。その最適値は圧延直後の冷却能力によって変化する。圧延技術的な課題としては後段大圧下圧延に耐えられるロール、ハウジングの設計開発、形状制御技術ならびに即冷・急冷装置の開発などが挙げられる。また、オーステナイト/フェライトの2相域、フェライト域の大圧下圧延でも組織の微細化は可能なので、大圧下圧延特有の加工誘起変態ならびにフェライトの動的再結晶などを考慮した変形抵抗式の開発も望まれる。

8 おわりに

本講座では圧延理論の中で重要な役割を果たす変形抵抗について金属学的視点から論じ、より高度な圧延理論を構築するには、圧延される材料の組織変化を予測することの重要性を述べた。周知のように圧延の目的は単に必要な形状を造り込むことだけではなく、要求される材質を作り込む使命もあることから今後の圧延技術の発展には材質予測制御技術の開発との連携は不可欠である。しかしながら、材質予測制御技術は適用鋼種範囲に限られるなどまだ未完の部分が多く本格的な実用化には多くの開発が必要である。この技術を成熟させるには各関係箇所が単独に開発を推進するには負荷が大きい。第5章でも述べたように材質予測制御技術は省エネ、省資源化など社会全体に対する貢献度も高く、各社共通したニーズもあるので我が国の国際競争力強化のためにも今後は圧延と材料の技術者、研究者が産学官で連携して参画する(国家)プロジェクト的な開発が推進されることを期待したい。

参考文献

- 1) 瀬沼武秀, 亀田正春: 日本金属学会誌, 60 (1996), 717.
- 2) 瀬沼武秀, 矢田浩, 松村義一, 山田健二: 鉄と鋼, 73 (1987), 1598.
- 3) 例えば, 松本紘美: 板圧延の理論と実際, 日本鉄鋼協会, (1984), 12.
- 4) 瀬沼武秀, 矢田浩, 松村義一, 濱渦修一, 中島浩衛: 鉄と鋼, 70 (1984), 1392.
- 5) R. B. Sims: Proc. Instn. Mech. Engr., 168 (1954), 191.
- 6) 柳本左門, 玉野敏隆: 日本機械学会論文集, 42 (1976), 965.
- 7) D. A. Bland and H. Ford: Instn. Mech. Engr., 159 (1948), 144.
- 8) 例えば, 浜渦修一: 板圧延の理論と実際, (1984), 日本鉄鋼協会, 161.
- 9) 酒井拓, 大橋正幸: 鉄と鋼, 67 (1981), 2000.
- 10) B. Dutta and C. M. Sellars: Met. Sci. Tech., 2 (1986), 146.
- 11) 矢田浩, 瀬沼武秀: 塑性と加工, 27 (1986), 34.
- 12) 美坂佳助, 吉本友吉: 塑性と加工, 8 (1967), 414.
- 13) 瀬沼武秀, 矢田浩, 松村義一, 二村忠: 鉄と鋼, 70 (1984), 2112.
- 14) 赤松聡, 矢田浩, 松村義一, 瀬沼武秀, 石川信二: 鉄と鋼, 75 (1989), 933.
- 15) 岡本力, 末広正芳: 鉄と鋼, 84 (1998), 650.

- 16) A. Yoshie, M. Fujioka, Y. Onoue and K. Okamoto :
Proc. of Gilbert R. Speich Symposium, ISS-AIME,
(1992), 119.
- 17) Kwon, O. and DeArdo, A. J. : Acta metall. Mater. 39
(1991), 529.
- 18) 矢田浩, 瀬沼武秀 : 日本金属学会会報, 29 (1990),
430.
- 19) Special issue on recent advances in modeling on
microstructural evolution and properties of steels :
ISIJ Int., 32 (1992) 3.
- 20) 濱渦修一, 山田健二, 菊間敏夫, 瀬沼武秀, 矢田浩 :
日本機械学会中国・四国支部第26期総会・講演会,
209, 43.
- 21) 濱渦修一, 山田健二, 菊間敏夫, 瀬沼武秀, 矢田浩 :
CAMP-ISIJ, 1 (1988), 482.
- 22) Senuma, T. & Kawasaki, K : ISIJ Int., 34 (1994),
51.
- 23) Senuma, T. : International Symposium for LC and
ULC Sheet Steels, Aachen, (1998), 157.
- 24) 今江敏夫, 金成昌平 : 創形創質工学部会シンポジウム,
熱延潤滑圧延の現状と今後の課題, 日本鉄鋼協会,
(1997), 15.
- 25) 坂田敬, 松岡才二, 小原隆史, 角山浩三, 白石昌司 :
まてりあ, 36 (1997), 376.
- 26) J. C. Herman : Proc. of IF- steels 2000, Pittsburgh,
(2000), 181.
- 27) 例えば, Proc. of '98 workshop of structural materials
for 21st century, NRIM, Tsukuba, (1998)
- 28) T. Torizuka, O. Umezawa, K. Tsuzaki and K. Nagai :
CAMP- ISIJ, 11 (1998), 565.
- 29) 足立吉隆, 富田俊郎, 日野谷重春 : 鉄と鋼, 85 (1999),
620.
- 30) H. Yada, Y. Matsumura and T. Senuma : Proc. Ther-
mec 88, (1988), 200, Tokyo, ISIJ.
- 31) M. Fujioka, Y. Abe and Y. Hagiwara : CAMP- ISIJ,
13 (2000), 1136.
- 32) Y. Matsumura and H. Yada : Trans. ISIJ, 27 (1987),
492.

(2002年10月11日受付)