

# 討13

## 厚板圧延における変形抵抗式の数式モデル

日本鋼管 技術研究所

 ○山本定弘、藤田米章  
 大北智良、大内千秋  
 大須賀立美

### 1. 緒言

近年制御圧延技術の発展に伴ない、圧延温度領域は  $A_{r3}$  変態温度付近の  $r$  低温域から、さらに  $r + \alpha$  二相域まで展開されるようになってきている。このような低温領域では著しいミル荷重の増大が経験され、圧延荷重予測においては、もはや従来の該当パス変形条件のみの関数としての変形抵抗式は使えず、パス間の歪残留を考慮した変形抵抗式が必要となる。<sup>(1)</sup> これまで繰り返し圧延の際の復旧過程を考慮した荷重予測モデルがいくつか報告されているが、著者らは志田や美坂の式を前提とし、かつ残留歪を導入するモデルにより、厚板制御圧延時のミル荷重予測を実操業に十分な精度で行なえることを示した。<sup>(1)(2)</sup> しかし上記基本の変形抵抗式自体、成分の影響、特に Nb, Ti 等の微量元素の効果が取り入れられておらず問題がある。また先に報告した著者らのモデルも、歪残留率等必ずしも全ての制御圧延条件をカバーしうるものでなかった。

本報告は以上の観点から高速多段圧縮試験機を用い、制御圧延時の変形抵抗の検討を行なったもので前半では1段圧縮により変形抵抗に及ぼす各種添加元素、変形条件の影響を主に 900℃ 以下での低温領域で調査し、変形抵抗の基本式を検討した。後半では断続的多段変形における Flow stress 挙動についてパス間の静的回復、再結晶挙動に及ぼす微量添加元素の影響を主体とした検討を行ない、歪の累積効果を導入した御制圧延における変形抵抗式のモデルを考察した。

### 2. 実験方法

本研究で用いた供試鋼は表1にその成分範囲を示す様に、0.10C-0.25Si-1.10Mn をベースに各種添加元素を変化させた 35 鋼種であり、軟鋼から低合金高張力鋼までの実用的な範囲で合金元素及び微量元素量を変化させた。用いた試験機は真空下での高周波加熱による圧縮試験機であり、歪速度が  $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 20 \text{ s}^{-1}$  の範囲で連続的に可変であり、三段までの断続的な圧縮が可能である。各種の熱加工履歴は全自動プログラム化され、荷重及び変位の出力は Transient memory, Micro computer を経て Plotter に真応力-真歪曲線として描き出される。図1には 0.10C-1.10Mn 鋼における一段圧縮の一例を示す。1100℃ に加熱後同温度で 25% の加工を加え再結晶  $r$  粒径を約 35  $\mu$  に調整した後、各温度で二段目の加工を加えた時の S-S 曲線である。1 段目の変形は実際の厚板圧延における粗圧延後に対応した  $r$  粒径を得るためのものである。本研究で検討した温度範囲は  $r + \alpha$  二相域を含む 650℃ ~ 1000℃ であり、歪速度は  $1.4 \text{ s}^{-1} \sim 20 \text{ s}^{-1}$  の範囲である。平均変形抵抗は次式に従って計算した。 $K_m(\epsilon) = \int_0^\epsilon \sigma \frac{d\epsilon}{\epsilon}$

### 3. 変形抵抗に及ぼす成分および加工条件の影響

#### 3-1 成分元素の影響

まず図2にC含有量を変化させた場合の  $\epsilon = 0.30$  における平均変形抵抗を示した。変形抵抗に及ぼすCの影響は従来指摘されているように高温では小さく、変形温度が低下するとC含有量に伴う平均変形抵抗の増加量

表1 供試鋼の成分範囲

(wt%)									
C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti
0.01/0.23 (0.10)	0/1.02 (0.25)	0.39/1.87 (1.10)	0/2.16 (0)	0/7.55 (0)	0/2.00 (0)	0/1.04 (0)	0/0.072 (0)	0/0.098 (0)	0/0.082 (0)

( ) ベース成分; その他の成分 P; 0.007, S; 0.005, sol Al; 0.020 ~ 0.030, T.N; 0.005 ~ 0.007

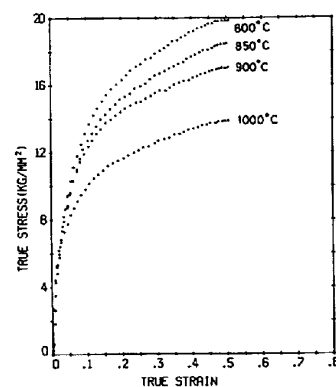


図1 応力-歪曲線の例  
(0.10C-1.10Mn 鋼,  $\dot{\epsilon} = 21 \text{ s}^{-1}$ )

が増す傾向がある。900℃における0.1% C当りの増加量は0.60 Kg/mm<sup>2</sup>

である。一方図3及び図4にはそれぞれ合金元素、微量元素の添加量を変化させた場合の900℃における平均変形抵抗(K(0.3))を示した。合金元素ではMn, Cu, Ni等の変形抵抗への影響は、本実験成分範囲内では軽微である。CrおよびSiは変形抵抗をわずかに上げ、Moは合金元素の内では変形抵抗を大きく上昇させる元素であることがわかる。これらの合金元素に比べ微量元素は添加量のわりには変形抵抗を大きく上昇させており特にNb, Tiの効果が大きい。表2には各種添加元素0.1%当りの平均変形抵抗の上昇量及びCによる上昇量との比を示した。微量元素の影響が大きいことが明らかであり特にNb, TiはCよりも2~3倍の変形抵抗への寄与がある。従って制御圧延における基本の変形抵抗式においては、従来のように成分としてCのみを考慮するだけでなく、特にNb, Ti等の微量元素及びMo等の合金元素をも考慮する必要がある。

鋼のγにおける高温変形では、動的回復あるいはまた動的再結晶が加工硬化と相殺する形で生じるが圧延のような高歪速度でかつ限られた歪量では動的再結晶には至らず、動的回復のみが支配していると考えられる。Nb, Ti等の微量元素による変形抵抗の上昇がより大きいのは、これらの元素の動的回復抑制力が大きいためである。この動的回復抑制に寄与しているのは固溶状態のNbあるいはTiであり、Fe原子との大きなMisfitがこの抑制力の主な原因であると考えられる。

3-2 加工条件の影響

ここでは変形抵抗の支配因子として歪、歪速度、変形温度等の変形条件の影響をみる。図5は一例として0.036%Nb鋼をε = 21s<sup>-1</sup>で変形した場合の平均変形抵抗と歪との関係である。一般にKとεとの間には(1)式が成立すると言われているが、本実験の場合nの値は歪とともに大きく変化するものの温度、成分による特異な挙動はみられず、結局歪指数nはn = f<sub>1</sub>(ε)で整理された。

$$Km \propto \epsilon^n \quad (1)$$

次に平均変形抵抗の歪速度依存性を750℃~1000℃の温度範囲で調査した。歪速度が1.4S<sup>-1</sup>~21S<sup>-1</sup>の範囲ではlnKとlnεの間には従来言われているように直線関係があり、(2)式が成立する。

$$Km \propto \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

歪速度指数mは温度、歪の影響を受けるが、成分には依存せずm = f<sub>2</sub>(ε, T)で整理された。

図7は各歪での平均変形抵抗(Km)と温度(1/T)の関係を示しており、両者にはよい相関が認められた。すなわち特定の歪における平均変形抵抗は温度の関数として次式で整理される。

$$Km \propto \exp(A/T) \quad (3)$$

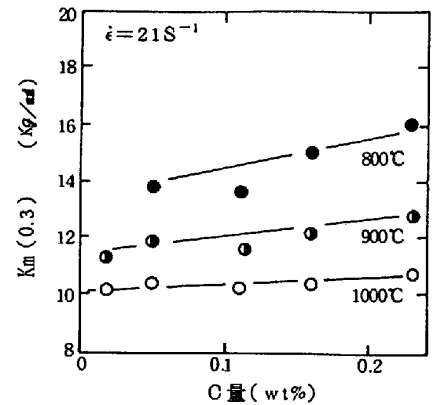


図2 平均変形抵抗に及ぼすCの影響

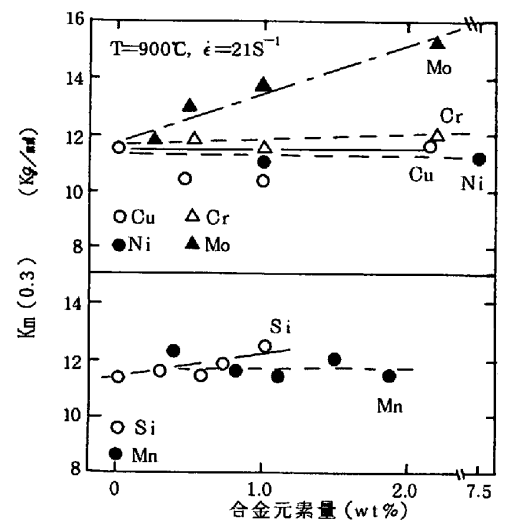


図3 平均変形抵抗に及ぼす合金元素の影響

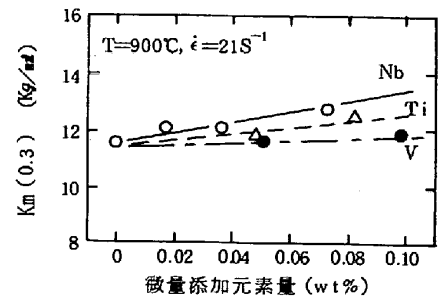


図4 平均変形抵抗に及ぼす微量元素の影響

表2 0.1 wt %添加当りの平均変形抵抗の変化(T=900℃, ε=21S<sup>-1</sup>)

	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti
ΔK(0.3) (kg/mm <sup>2</sup> )	0.60	0.08	0	0	0	0.02	0.17	2.00	0.40	1.1
ΔKM/ΔKC	1	0.13	0	0	0	0.03	0.28	3.33	0.67	1.83

#### 4. 歪の累積効果と変形抵抗式への導入法

##### 4-1 歪の累積効果

すでに指摘されているように、制御圧延での繰り返し加工の場合の変形抵抗においては、単に該当パスの変形条件や成分だけでなく、多パス圧延中の歪の累積効果を考慮することが必要である。この歪の累積効果はオーステナイトの静的回復、再結晶の進展に支配されるため、特に回復、再結晶制御効果の大きいNb等の微量元素、粗圧延時の $r$ 粒径、およびパス間時間、温度等の変形条件の影響を受ける。以下ではパス間の軟化挙動に及ぼす因子の基本的な影響について、多段圧縮試験による応力-歪曲線の変化から求めた軟化度( $X_s$ )をもとに検討する。

圧下間時間を制御した二段加工で一段目の降伏応力を $\sigma_{yo}$ 、最大応力を $\sigma_m$ 、二段目の降伏応力を $\sigma_y$ とすると $X_s$ は(4)式で求められる。

$$X_s = (\sigma_m - \sigma_y) / (\sigma_m - \sigma_{yo}) \quad (4)$$

図7にはSi-Mn鋼、Nb鋼、V鋼、Ti鋼における圧下間保持時間に伴う $X_s$ の変化を900℃と1000℃について示した。初期 $r$ 粒径は140 $\mu$ 、前段歪は0.69である。 $X_s$ は圧下間時間の増加に伴ない20~30%を境にして急激に増加しており、組織観察からこの時点が静的再結晶の開始に対応している。1000℃ではSi-Mn鋼、Nb鋼とも変形後1秒程度で軟化が急激に進んでいるが、900℃ではSi-Mn鋼に比べNb、Ti添加鋼では軟化が小さく、加工間での回復、再結晶の進行が共に抑制されていることがわかる。V鋼の軟化挙動はSi-Mn鋼とNb鋼あるいはTi鋼の中間に位置することも明らかである。また回復のみに支配されている軟化度が20%~30%以下の領域では成分の影響は小さいことも本図からわかる。

実際の厚板圧延においては、その加工条件を考慮すると大きな歪累積効果が生じるのは、Si-Mn鋼では約800℃以下、0.03Nb%鋼、0.08%Ti鋼では約900℃以下と考えられる。一方、実際の繰り返し圧延では累積された歪は次第に増大することになるが、逆にこの歪は再結晶の促進効果を通してパス間の軟化に多大の影響を及ぼすことになる。すなわち歪の累積効果の評価に際し、上述した成分の影響及び加工温度、パス間時間といった基本的な加工条件に加え、前段までの有効な歪をも考慮することが重要である。

##### 4-2 変形抵抗式への歪の累積効果の導入法

制御圧延時の変形抵抗式のモデルは、まず1パス圧延時の変形抵抗式を確立し、この変形抵抗式の歪の項に該当パスの圧下歪のかわりに累積歪を加算した「実質歪」を代入するものである。すなわち $i$ パスでの圧下歪を $\alpha_i$ 、 $i$ パスまでに残留累積した歪を $\beta_i$ として、実質歪 $\epsilon_i$ 、歪残留率 $\lambda_i$ を次式で定義して表わす。

$$\epsilon_i = \alpha_i + \beta_i \quad (5)$$

$$\lambda_i = \beta_i / \epsilon_{i-1} = \beta_i / (\alpha_{i-1} + \beta_{i-1}) \quad (6)$$

$\lambda$ はパス間の軟化の程度に応じて $0 \leq \lambda \leq 1$ の範囲で変化する。 $i$ パスでの実質歪は一般的な表示として(7)

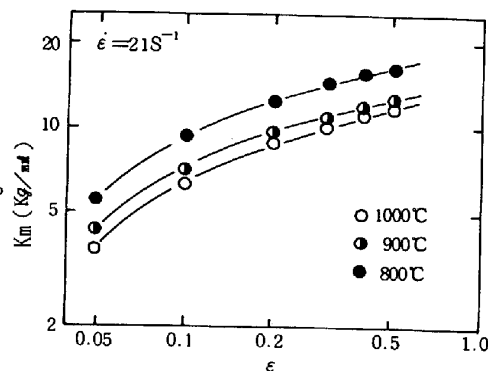


図5 歪による平均変形抵抗の変化

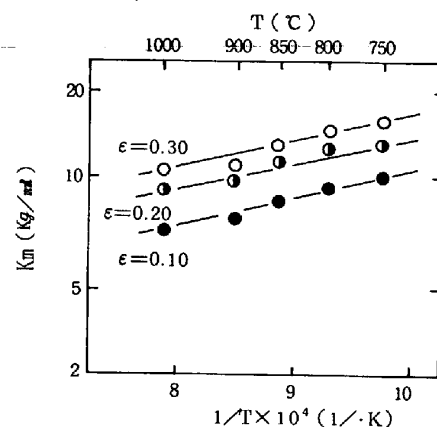


図6 平均変形抵抗と温度との関係

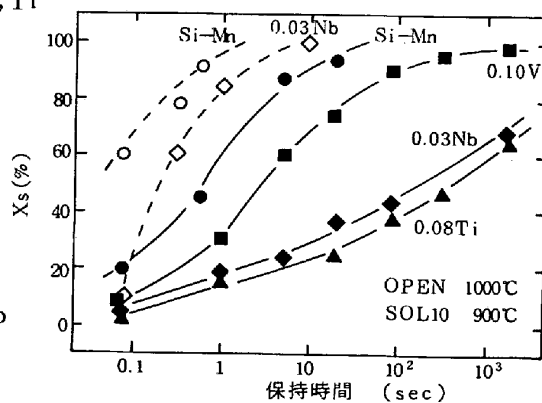


図7 Si-Mn及びNb, V, Ti添加鋼の軟化挙動 (基本成分0.09C-1.50Mn)

式で示すようになる。

$$\epsilon_i = \alpha_i + \alpha_{i-1}(\lambda_i) + \alpha_{i-2}(\lambda_{i-1} \cdot \lambda_i) + \dots + \alpha_2(\lambda_3 \cdot \lambda_4 \dots \lambda_i) + \alpha_1(\lambda_2 \cdot \lambda_3 \dots \lambda_i) \quad (7)$$

歪残留率  $\lambda$  の定量について、すでに著者らは一段及び断続的多段圧縮試験により、二段プレス時の応力-歪曲線と多段プレス時の後段の最大応力を比較する方法を報告したが、ここではさらに平均変形抵抗に基づいた解析も試みた。すなわち1段プレスでの平均変形抵抗を  $K_m = f(\epsilon)$  として与え、歪  $\alpha_1$  と  $\alpha_2$  の二段圧縮試験によって、 $f(\alpha_2 + \beta_2) = K_{m2}$  ( $K_{m2}$  は二段目の平均変形抵抗) を満足する  $\beta_2$  を求め  $\lambda_2 = \beta_2 / \beta_1$  とした。

図8はこのようにして求めた各鋼種の  $\lambda$  の温度依存性の一例である。この場合は  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.1$ 、またプレス時間は 10 sec である。前段歪が小さいため Si-Mn 鋼でも 900℃ で 0.5 程度の  $\lambda$  値を示している。しかし基本的にはこの  $\lambda$  は前段歪にも大きく依存し、結局  $\lambda = f(c, \epsilon, \Delta t)$  として、成分(c)、前段までの歪( $\epsilon$ )、パス間時間( $\Delta t$ )の関数としてモデル化される。なお平均変形抵抗に基づいて求めた  $\lambda$  の値と、著者らがすでに報告した最高応力により求められる  $\lambda$  の値には、ほとんど差異はなかった。

5. 変形抵抗の数式モデル

以上の結果をもとに変形抵抗の総合モデルを検討した。基本的には  $K = \epsilon^n \dot{\epsilon}^m \exp(C + A/T)$  関数を用い、変形抵抗式の歪の項には、該当パスの歪に代わり変形前に残留累積した実質的歪を導入する。個々の指数あるいは定数は以下に示すとおりであり、特に成分としては C, Mo, Nb, V, Ti を考慮している。すなわち、 $r$  低温域 (750℃ - 1000℃) における平均変形抵抗式は次式で示される。

$$K_m = \epsilon_1^n \cdot \dot{\epsilon}^m \exp(C + A/T) \quad \begin{matrix} (0 \leq \epsilon \leq 0.40) \\ (1 \leq \dot{\epsilon} \leq 20) \end{matrix} \quad (8)$$

$$n = -1.45\epsilon + 0.82 \quad (9)$$

$$m = 0.0003T - 0.12\epsilon - 0.23 \quad (10)$$

$$C = 0.082\dot{\epsilon} - 4.624\epsilon + 0.34 + \alpha \quad (11)$$

$$A = (0.4\epsilon - 0.013\dot{\epsilon} + 0.48) \times 7369 \quad (12)$$

ここで  $\alpha$  は成分の寄与の項、 $\epsilon$  は残留歪を加算した実質歪の項である。図9には1段プレス時の平均変形抵抗の計算結果と実験結果との比較の一例を示した。 $r$  低温領域を主体に巾広い歪領域において、基本式が十分な精度を有していることがわかる。

6. まとめ

制御圧延における  $r$  低温領域を主体とした変形抵抗式について、高速多段圧縮試験により検討した。成分特に Nb, Ti 等の微量元素の影響やパス間歪残留効果を考慮し、十分な精度で実操業における厚板制御圧延でのミル荷重の予測が可能な総合モデルを確立した。しかし  $r + \alpha$  二相域では各相の分率、組織等により変形挙動、歪累積効果が複雑に変化し、この組織が著しく変態前の熱加工履歴の影響を受け、これらを実験的に再現することが非常に難しいため、二相域での変形抵抗モデルについては、今後さらに詳細な検討が必要であると思われる。

参考文献

- (1) 大内、「制御厚延技術の基礎とその展開」鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会編(1980) P67
- (2) C. OUCHI et al, Trans ISIJ vol 20 (1980) No 12 掲載予定

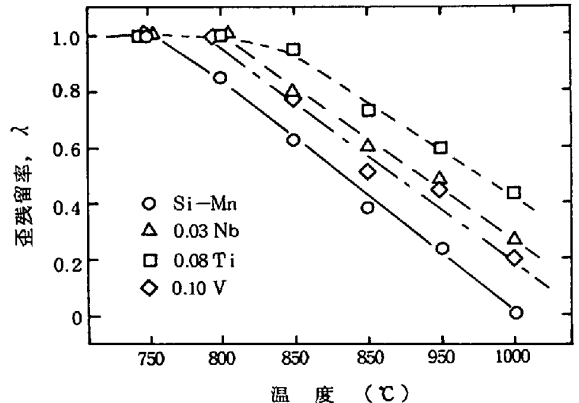


図8 温度、成分による歪残留率の変化 ( $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.10, \Delta t = 10 \text{ sec}$ )

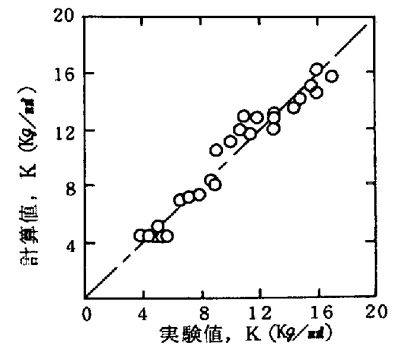


図9 圧縮試験における実験値と計算値の関係(鋼種0.036%Nb)