

# 厚鋼板の制御冷却中の反り解析

吉原 直武\*・藤掛 政久\*<sup>2</sup>

Analysis on Warping of Steel Plate under Controlled Cooling

Naotake YOSHIHARA and Masahisa FUJIKAKE

**Synopsis :** A numerical analysis on the warping of steel plates during the controlled cooling, has been conducted by beam model with one-dimensional stress and thermo-elastic-plastic material. In order to prove the validity of this analysis, experiments were conducted using a newly designed experimental device. The continuous changes in temperature and warping were measured in water cooling.

(1) The validity of this analysis was quantitatively proved by comparison with the experiment results. It is expected that this calculation technique will be applied to control of warping of steel plates and shape steels in the controlled cooling process.

(2) From the results of this analysis, it was found that the main factors of warping were phase transformation, yield stress and thermal conductivity.

① In the case of low-temperature-transformation, both warping behavior during cooling and residual warp are large, because of large expansion in phase transformation and high yield stress at low temperature.

② A higher yield stress leads to a larger warping.

③ A higher thermal conductivity leads to a high, steep temperature slope in thickness, which causes a higher thermal stress and larger warping.

**Key words :** steel plate ; controlled rolling ; warping ; bending ; transformation.

## 1. 緒言

現在、厚板のオンライン制御冷却設備が各社に設置され、高強度、高靱性かつ溶接性の優れた製品が生産されている。寸法の大きな厚鋼板のオンライン制御冷却では必ずしも上下面の冷却バランスを取るの容易ではなく、上下方向の反り発生は避け難い。また、冷却設備の通板上の理由から冷却中の反りの大きさに制限がある。したがって、制御冷却中および冷却終了後の厚板形状を平坦に制御する必要があり、反り解析モデルの確立とその有効活用が望まれている。

本研究では、制御冷却中の反りに関する熱応力解析モデルを検討し、材料特性の影響要因について調査した。冷却過程における反りの因子として相変態の潜熱、変態膨張が重要と思われる。Fig. 1に3種類の材料の温度・伸び線図を示す。A材は相変態の冷却速度依存性の高い代表的な制御冷却材SM490、B材はほとんど相変態が冷却速度の影響を受けない高合金の9%Ni鋼、C材は相変態のないオーステナイト系ステンレスSUS304である。普通、制御冷却用の鋼材は冷却速度の相変態開始終了温度や相変態時の膨張時

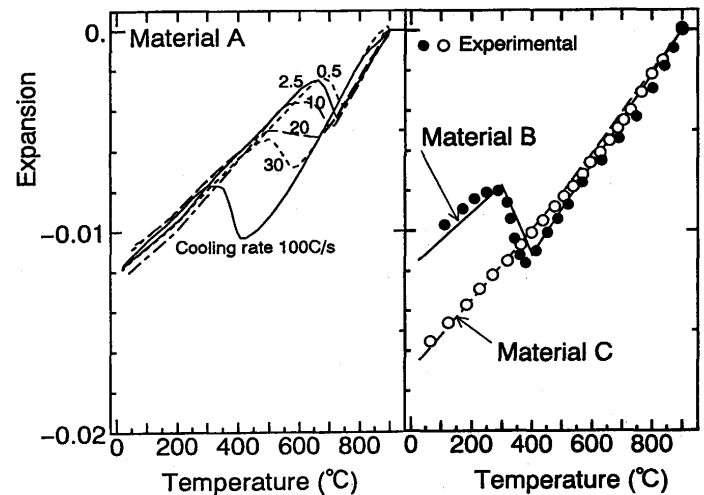


Fig. 1. Dilatation curves of material.

期、膨張量への影響が非常に大きい。制御冷却では、板厚内における冷却速度の差異が大きいため、精度の高い反り解析をするためには、相変態の冷却速度依存性の考慮が重要となる。そこで、A材に対しては、相変態の計算にはTTT線図を用いる手法で相変態の冷却速度依存性を考慮し、熱

平成8年4月24日受付 平成9年4月11日受理(Received on Apr. 24, 1996; Accepted on Apr. 11, 1997)

\* NKK総合材料技術研究所(現:鋼管計測(株))(Materials & Processing Research Center, NKK Corp., now Kokan Keisoku K.K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

\* 2 NKK総合材料技術研究所(Materials & Processing Research Center, NKK Corp.)

弾塑性材料モデルによる水冷中の反り解析を行った。

玉野ら<sup>2,3)</sup>、有吉ら<sup>4,5)</sup>はTTT線図を用いる手法によって相変態を計算し、厚鋼板の制御冷却中の熱弾塑性解析を行い、残留反りに及ぼす上下水量比と冷却水量の影響を調べている。しかし、その熱応力解析の妥当性に関しては十分な検証は行われていない。本研究では、反り解析モデルの妥当性を定量的に検証するため実験装置を試作して冷却中の鋼板の反り挙動の時間的な変化を調べる実験を行い、数値解析結果と実験結果との比較検討も行った。

## 2. 厚鋼板冷却時の反り計算方法

### 2.1 温度の計算方法

長さ方向の熱流束を無視し、板厚方向の熱流束のみを考える。相変態に関してFischerら<sup>9)</sup>の行った冷却中のレール反り解析では、相変態温度範囲が冷却速度によらず一定で、相変態潜熱を相変態温度範囲で割った値を加算して見かけ比熱として考慮し、相変態膨張は一定の線膨張率で近似している。一方、相変態の冷却速度依存性を考慮して解析した文献<sup>4,5,7-9)</sup>では、相変態による発熱は相変態潜熱と相変態率に比例し、相変態潜熱を、①相変態時のエンタルピーの変化から計算し<sup>4,7,8)</sup>、温度の関数としている場合と、②相変態潜熱の温度依存性はなく一定としている<sup>9)</sup>場合に分類される。

相変態潜熱の値に関するデータ<sup>10,11)</sup>は非常に少ない。相変態潜熱測定に関する研究<sup>12)</sup>が行われているが、対象は共析鋼であり、必ずしも、本A材には適用できない。本論文では、上記①のように相変態潜熱が温度に依存するとし、 $\alpha$ 相の比熱を900°Cからある温度Tまで積分して求めたエンタルピー変化と、オーステナイト相の900°Cから温度Tまでのエンタルピー変化の差から、相変態潜熱 $L_t$ を決定する。得られた値 $L_t$ をFig. 2に示す。

B材では冷却速度の相変態への影響が非常に小さく、相変態は冷却速度の影響を受けないものと近似する。Fischer

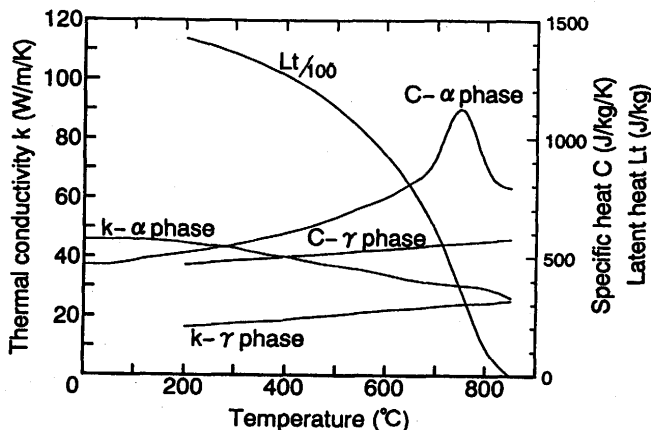


Fig. 2. Thermal properties for calculation.

ら<sup>9)</sup>と同様に、相変態潜熱(32Kcal/kg)を相変態温度範囲で割った値を比熱に加算し、見かけ比熱として熱伝導計算に考慮する。B材、C材共にFig. 1の線図の傾きから得られる、Table 1に示す線膨張率を計算に使用する。

相変態の冷却速度依存性の高いA材については、当社で開発したTTT線図を基にして相変態進行を計算する<sup>7-9)</sup>機能を有する2次元のFEM熱伝導解析プログラムHEAT2Dによって温度と相変態を計算する。制御冷却される厚鋼板の組織としてオーステナイト、フェライト、パーライト、ベーナイト、マルテンサイトの5種類を相変態において考慮する。オーステナイト組織以外の熱物性値は同一とみなし、Fig. 2に示す2種類の熱伝導率<sup>13)</sup>と比熱<sup>13)</sup>を計算に使用する。混合組織の熱物性値は各組織の熱物性値の体積分率との積の和で表せると仮定する。

水スプレー冷却中の熱伝達係数は文献<sup>9)</sup>を参照してTable 2に示す値を計算に使用する。制御冷却開始の温度分布は、900°C均一から放冷計算をして表面温度が750°Cに達した時点とする。放冷時の対流熱伝達係数を12W/m<sup>2</sup>/K、放射率を0.8として対流と放射による冷却曲線を計算する。

### 2.2 相変態の計算方法

#### 2.2.1 フェライト、パーライト、ベーナイト

ここでは、材料Aの相変態の計算方法を述べる。フェライト、パーライト、ベーナイトの相変態は拡散型相変態として扱う。連続冷却曲線を階段状の温度・時間線図に近似する。ある時間ステップ*i*における相変態の進行は、温度 $T_i$ で時間 $\Delta t_i$ の間に進行する等温変態とみなしてTTT線図を利用して相変態の進行を計算する。各組織の相変態の体積率(以後、相変態率と呼ぶ) $V_p$  ( $p=1\sim 3$ )は等温変態率を表すAvramiの式<sup>14,15)</sup>、すなわち式(1)によって計算する。

$$V_p = 1 - \exp(-a(T) \cdot t^n) \dots\dots\dots (1)$$

Table 1. Coefficient of thermal expansion used for calculation of material A.

Microstructure	Coefficient of thermal expansion	Expansion in transformation
Austenite	0.0000254	0
Ferrite	0.0000140	0.00217 (at 750°C)
Pearlite	0.0000140	0.00217 (at 750°C)
Bainite	0.0000146	0.00431 (at 575°C)
Martensite	0.0000147	0.00738 (at 447°C)

Table 2. Heat transfer coefficient used for calculation. (W/m<sup>2</sup>/K)

Temperature $T_s$ (°C)	Water flow rate $W$ (ℓ/m <sup>2</sup> /min)	
	488	349
25	14332	11520
50	14332	11520
100	12897	10414
200~500	$10^{2.760+0.595 \cdot \text{LOG}(W) - 0.00179 \cdot T_s}$	
500~800	$10^{2.424+0.663 \cdot \text{LOG}(W) - 0.00147 \cdot T_s}$	

ここに、添字pは相の種類を示し、順にフェライト、パーライト、ベーナイトである。定数a(T)とnに関しては式が煩雑になるので添字pを省略する。すなわち、温度T<sub>i</sub>において、TTT線図における相変態開始線上の相変態率と時間および相変態終了線上の相変態率と時間の2組のデータから式(1)によってa(T)とnを決定して相変態中の任意の時間tにおけるV<sub>p</sub>を求める。

相変態開始後、時間ステップiにおける相変態率V<sub>i-1</sub>から、温度T<sub>i</sub>におけるTTT線図上の時刻τ<sub>i</sub>を式(2)によって求める<sup>7,16)</sup>。

$$\tau_i = - \left[ \frac{\ln(1 - V_{i-1})}{a(T)} \right]^{1/n} \dots \dots \dots (2)$$

次に時間Δt<sub>i</sub>後の相変態率V<sub>i</sub>を式(3)によって求める。

$$V_i = 1 - \exp(-a(T) \cdot (\tau_i + \Delta t_i)^n) \dots \dots \dots (3)$$

相の種類が3以上であり、p以外の変態した相kが存在する場合には、以上で述べた相変態率V<sub>p</sub>を次のV<sub>p</sub>に書き直す。

$$V_p = (1 - \sum_k V_k) \cdot V_p \dots \dots \dots (4)$$

2.2.2 マルテンサイトの相変態

マルテンサイト相変態は非拡散型相変態、すなわち温度のみに依存するとして扱い、式(5)、すなわちKoistineとMarburgerの実験式<sup>17)</sup>を使用して相変態率V<sub>p</sub>(p=4)を計算する。

$$V_p = 1 - \exp(-0.011 \cdot (M_s - T)) \dots \dots \dots (5)$$

上式(5)の定数M<sub>s</sub>はマルテンサイト変態点であり、化学成分に関する実験データの回帰式<sup>17)</sup>から447°Cとする。

2.3 熱応力, 歪, 反りの計算方法

熱伝導解析から得られる温度履歴に対して、長手方向応力のみを考慮し、反りは円弧形状、断面の平面保持を仮定する梁モデルにより、完全弾塑性材料として熱応力解析を行い、反りを計算する。

Fig. 3に反り計算のフローを示す。時間ステップiの温度分布に対して、反り曲率の増分をΔρ, 平均伸び歪増分をΔε<sup>0</sup>とすると、各要素jの歪増分Δε<sub>j</sub>を式(6)によって計算する。

$$\Delta \epsilon_j = \Delta \rho_{k+1} X_j + \Delta \epsilon_j^t - \Delta \epsilon^0 \dots \dots \dots (6)$$

ここにX<sub>j</sub>は板厚方向の座標、Δε<sub>j</sub><sup>t</sup>は熱膨張歪であり、相変態の膨張歪をb<sub>j</sub>とすると次式で計算される。

$$\Delta \epsilon_j^t = a_j \Delta T_j + \sum_{p=1}^4 (b_j \cdot V_p)$$

次に、歪増分Δε<sub>j</sub><sup>t</sup>から応力σ<sub>i,j</sub>と塑性歪増分Δε<sup>p</sup>を次のように計算する。ここで、応力σ<sub>i,j</sub>の添字iは時間ステップ、

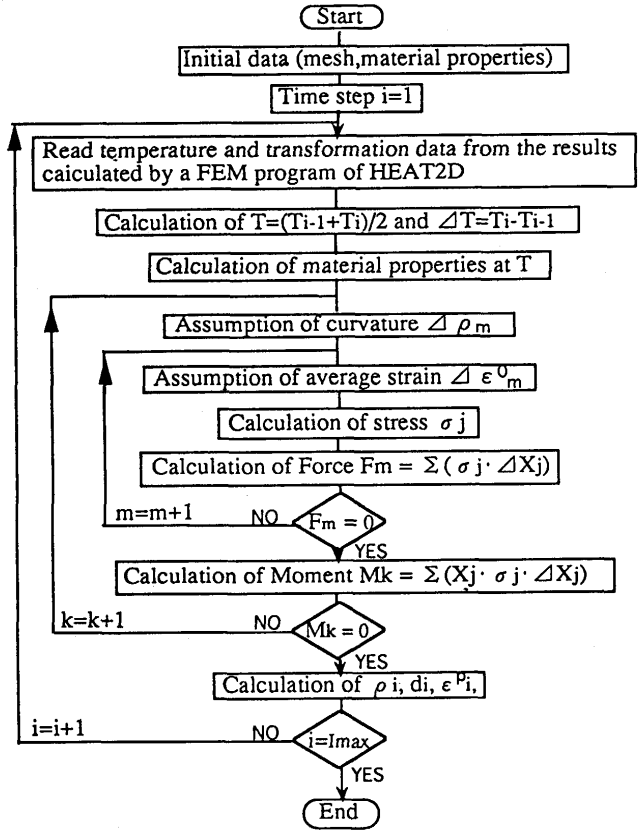


Fig. 3. Calculation flow for warping of plates during water cooling.

添字jは要素番号を表す。

|σ<sub>j</sub>| ≤ σ<sub>y,j</sub> の場合には  $\sigma_{i,j} = \sigma_{i-1,j} - E_j \cdot \Delta \epsilon_j$ ,

|σ<sub>j</sub>| > σ<sub>y,j</sub> の場合には

σ<sub>i,j</sub><sup>e</sup> = σ<sub>i-1,j</sub> - E<sub>j</sub> · Δε<sub>j</sub> とおき、

① σ<sub>i,j</sub> > 0の時

σ<sub>i,j</sub> = σ<sub>y,j</sub>, Δε<sub>p,j</sub> = (σ<sub>i,j</sub><sup>e</sup> - σ<sub>y,j</sub>)/E<sub>j</sub>

② σ<sub>i,j</sub> < 0の時

σ<sub>i,j</sub> = -σ<sub>y,j</sub>, Δε<sub>p,j</sub> = (σ<sub>i,j</sub><sup>e</sup> + σ<sub>y,j</sub>)/E<sub>j</sub>

各要素の応力σ<sub>i,j</sub>を用いて軸力F<sub>m</sub>および曲げモーメントM<sub>k</sub>を計算して、それらの値が零に収束するまで、先に仮定したΔε<sup>0</sup>およびΔρの修正を繰り返して応力、塑性歪, 反りを最終ステップまで計算する。

反りd<sub>i</sub>は式(7)によって計算する。

$$d_i = \Delta \rho \cdot L^2 / 8 \quad (L = 800\text{mm}) \dots \dots \dots (7)$$

ここにρは弱冷(左)側表面の位置における曲率。

2.4 計算に使用した物性値

Fig. 4に示すA材のTTT線図においてノーズ付近の相変態開始時間は1秒未満であるので実験から直接A材の相変態開始線を求めることは難しい。そこで、実験から得たFig. 1に示す温度・膨張線図を利用して次のようにしてA材のTTT線図を決定する。

まず、TTT線図の文献<sup>18)</sup>を参照して、A材のTTT線図を

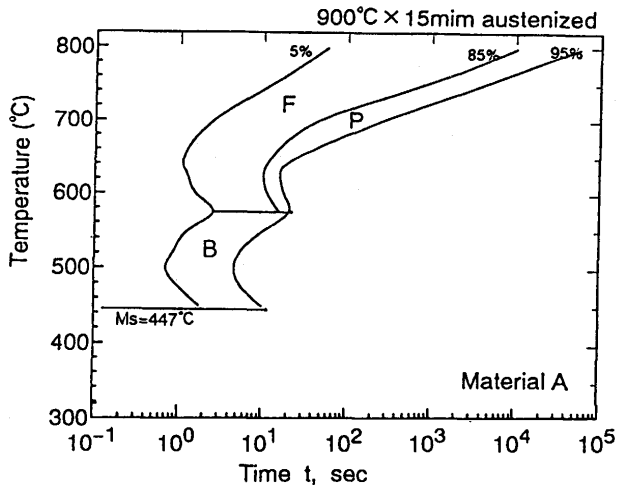


Fig. 4. Time temperature transformation diagram used for calculation of SM490.

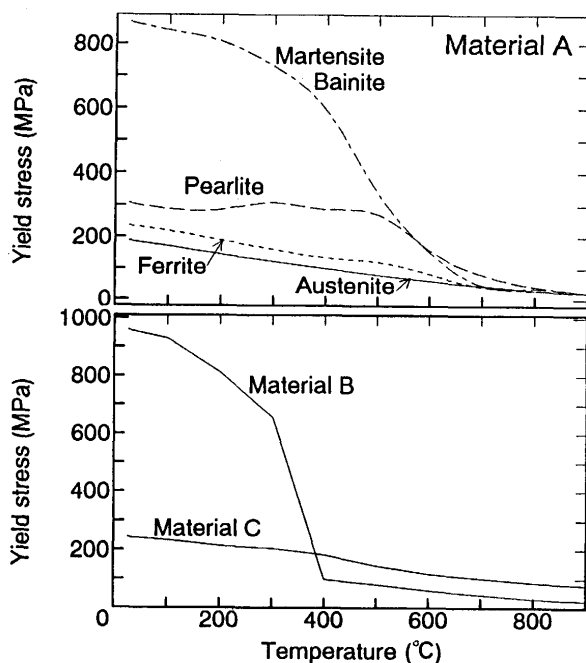


Fig. 5. Relation of yield stress to temperature.

設定し、寸法 $\phi 3 \times 10$ について実験条件と同じ種々の冷却速度で冷却した場合の温度と長さ変化(Dilatation)を計算する。実験から得られた線図と一致するまでTTT線図の修正とDilatationの計算を繰り返して反り計算に使用するTTT線図、Fig. 4を決定した。

熱伝導率、比熱と相変態潜熱を、Fig. 2に示す。弾性係数は文献<sup>19)</sup>から引用した。降伏応力をFig. 5に示す。厚鋼板製品の一部を試料 $\phi 8 \times 12$ に加工し、 $900^\circ\text{C}$ に3分で急速加熱、5分保持、各試験温度まで $30^\circ\text{C}/\text{s}$ で急速冷却してから、圧縮加工を行う。その圧縮時に得られた応力歪線図から降伏応力を求める。混合組織の物性値は相変態率との積の総和によって計算する。

Table 3. Chemical composition of materials. (Mass%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	P	S	Sol.Al	T.N
A	0.12	0.23	1.34	0.1	0.14	0.11	0.046	0.007	0.005	0.026	0.003
B	0.06	0.28	0.06	0.02	9.23	tr	tr	0.010	0.003	0.039	0.002
C	0.056	0.62	1.25	18.62	8.60	0.015	0.015	0.003	0.003	0.02	0.006

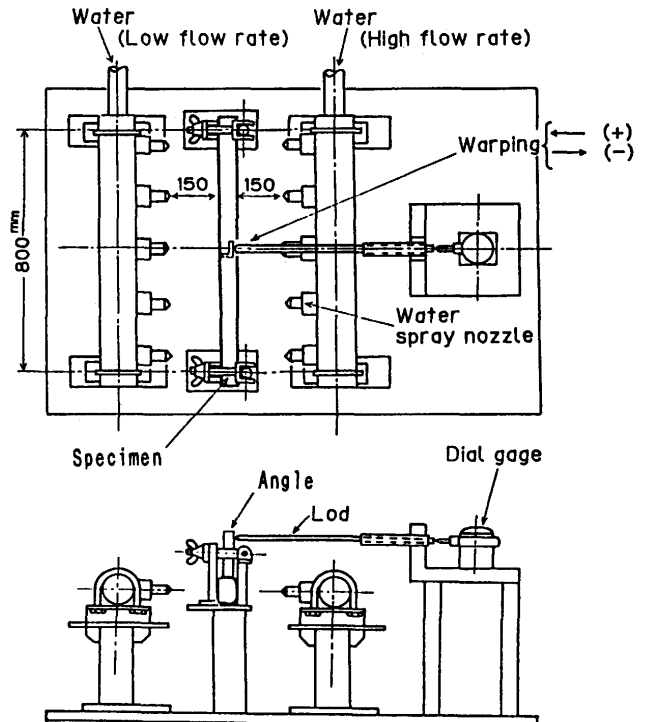


Fig. 6. Experimental apparatus for measuring warping of plates during water cooling.

### 3. 冷却時の反り実験方法

#### 3.1 供試材

試験片は3種類の厚鋼板製品から採取して寸法 $25 \times 100 \times 900$ (mm)に加工する。Table 3に化学成分を示す。A材はSM490、B材は9%Ni鋼、C材はSUS304である。

#### 3.2 実験方法

Fig. 6に冷却反り実験装置を示す。まず、試験片を加熱炉で温度 $900^\circ\text{C}$ 均一に加熱後、試験片の両端を左右の冷却面(幅 $100\text{mm} \times$ 長さ $900\text{mm}$ )から挟んでスパン $800\text{mm}$ の固定治具に固定する。温度が $750^\circ\text{C}$ になった時点で対向する一対のヘッダーにある各5個のスプレーノズルから水を噴射して水冷を開始し、水温まで厚板の制御冷却条件の水量密度で冷却する。反りを発生させるために強冷側(図の右側ヘッダー)  $490 \text{ l}/(\text{m}^2\text{min})$ 、弱冷側(図の左側ヘッダー)  $350 \text{ l}/(\text{m}^2\text{min})$ の水量密度で冷却する。予め試験片に取り付けてあるアングル位置の変位を、ロッドを介してダイヤルゲージで計測して冷却中の試験片の反りを検出する。試験片に取り付けたCAシース熱電対により、板厚内3点の温度を測定する。

## 4. 計算結果と実験結果および考察

### 4.1 温度変化

Fig. 7 に板厚内 3 点(両表面から各 4 mm 位置と中心位置)での温度変化に関して実験結果と計算結果を示す。実験結果と計算結果は比較的良く一致する。

①冷却開始から 400°C までの温度領域における冷却速度は、B材 > C材 > A材の順に速くなる。相変態潜熱の影響が大きいため A材の冷却速度が最も低い。B材、C材ともに A材よりも冷却速度が高いが、B材は 400°C までは相変態がないので、熱伝導率の低い C材より少し冷却速度が高い。② 400°C 以下の温度領域においては熱伝導率の影響が支配的となり、C材の冷却速度が最も低い。いずれの材料も中心温度と表面温度の差は冷却初期において非常に大きく、200°C 以上にも達する。

### 4.2 反り挙動

Fig. 8 に (1) 反りの時間的な変化の計算結果と実験結果の比較、(2) 応力の時間的な変化の計算結果、(3) 塑性歪の時間的な変化の計算結果を示す。応力、塑性歪の反りの符号は、弱冷却側(左側)に試験片中央部が変位する方向、すなわち強冷却側が収縮する変形をプラスとする。冷却過程全体を通じて反りの計算結果は実験結果に比較的良く一致する。

相変態のない C材の反りの極値は一つだけである。この反り最大値(プラス)は、高温域で降伏応力が高く、かつ熱伝導率が低いので板厚内温度勾配が高い C材が最も大きい。一方、A材、B材では反りの極値は 3 つ存在し、2 番目の極値(極小)は先行する強冷却側の相変態膨張によって発生する。Fig. 8-(2) は両表層と中心位置の応力の変化を示す。強冷却側および弱冷却側表層の応力パターンは反りパターンに非常に良く似ており、弱冷却側の応力パターンは強冷却側よりも数秒遅れて生じる。これらの応力の大きさと両者の時間的なずれは、相変態膨張の時期のずれに対応すると考えられ、相変態膨張の大きな低温変態(開始温度 400°C)の材料 B 材では大きい。B材の反りの第一の支配因子は相変態である。A材の場合、相変態温度は冷却速度の影響を大きく受けて冷却速度の高い表層では低く、冷却速度の低い中央では高いので、板厚内全体で相変態の起こる時期の差は小さい。その結果、相変態膨張の板厚内の時間的なずれによる反り発生は小さくなる。

残留反りの大きさは初期温度分布と冷却過程で発生した塑性歪の板厚内分布によって支配される。本ケースでは初期温度分布は対称であるので残留反りと関係するのは塑性歪である。Fig. 8-(3) は両表層部と中央部の塑性歪の時間的な変化を示す。強冷却側部分と弱冷却側部分における塑性歪の差の変化は冷却開始から 10 秒ないし 20 秒までの間に現れる。この冷却初期に残留反りが決まる。A材では板厚中心には塑性ひずみが発生せず、残留塑性歪の板厚内分布が小さい。

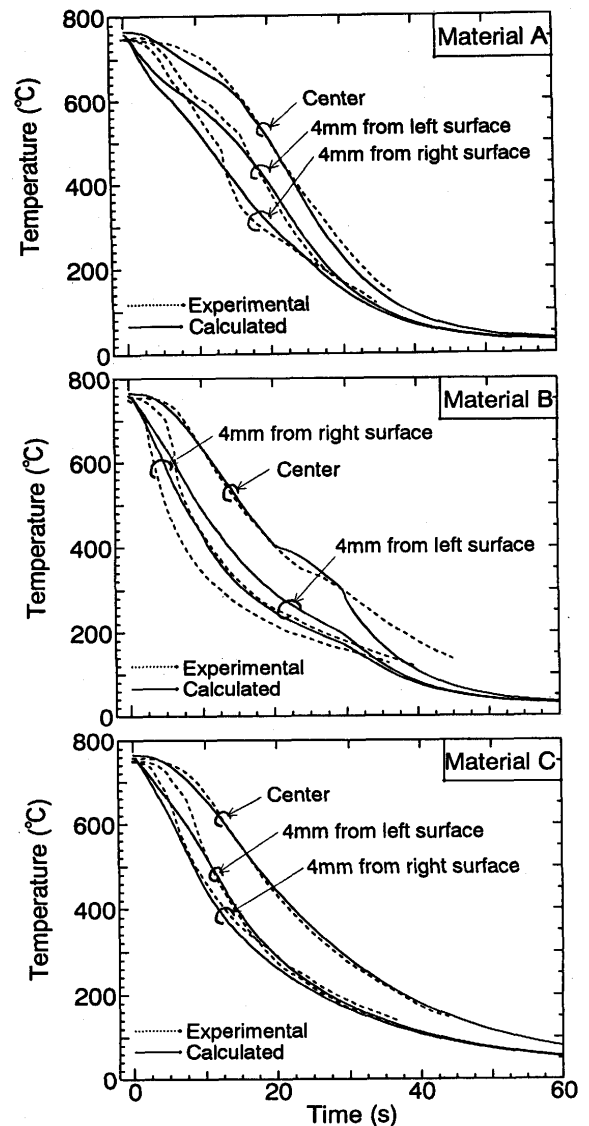


Fig. 7. Variation in temperature during water cooling.

また、B材では強冷却側部分と弱冷却側部分における塑性歪の差が最も大きい。これらのことは、残留反りが B材 > C材 > A材の順に大きいことと対応している。

## 5. 結論

厚鋼板の制御冷却中の温度と反りを解析するための熱弾塑性モデルを作成し、このモデルの妥当性を検討した。

(1) SM490, 9%Ni鋼, SUS304に関する実験結果と計算結果との比較検討を行い、計算手法の定量的な妥当性を確認することができた。本計算手法は厚鋼板や形鋼の制御冷却過程における反り制御への応用が期待できる。

(2) 本解析によって得た材質に関する反り要因は相変態、降伏応力と熱伝導率である。① SM490の場合、相変態温度は冷却速度が高いほど低くなるため、板厚内全体で相変態時期の差および相変態膨張が小さく、9%Ni鋼に比べ

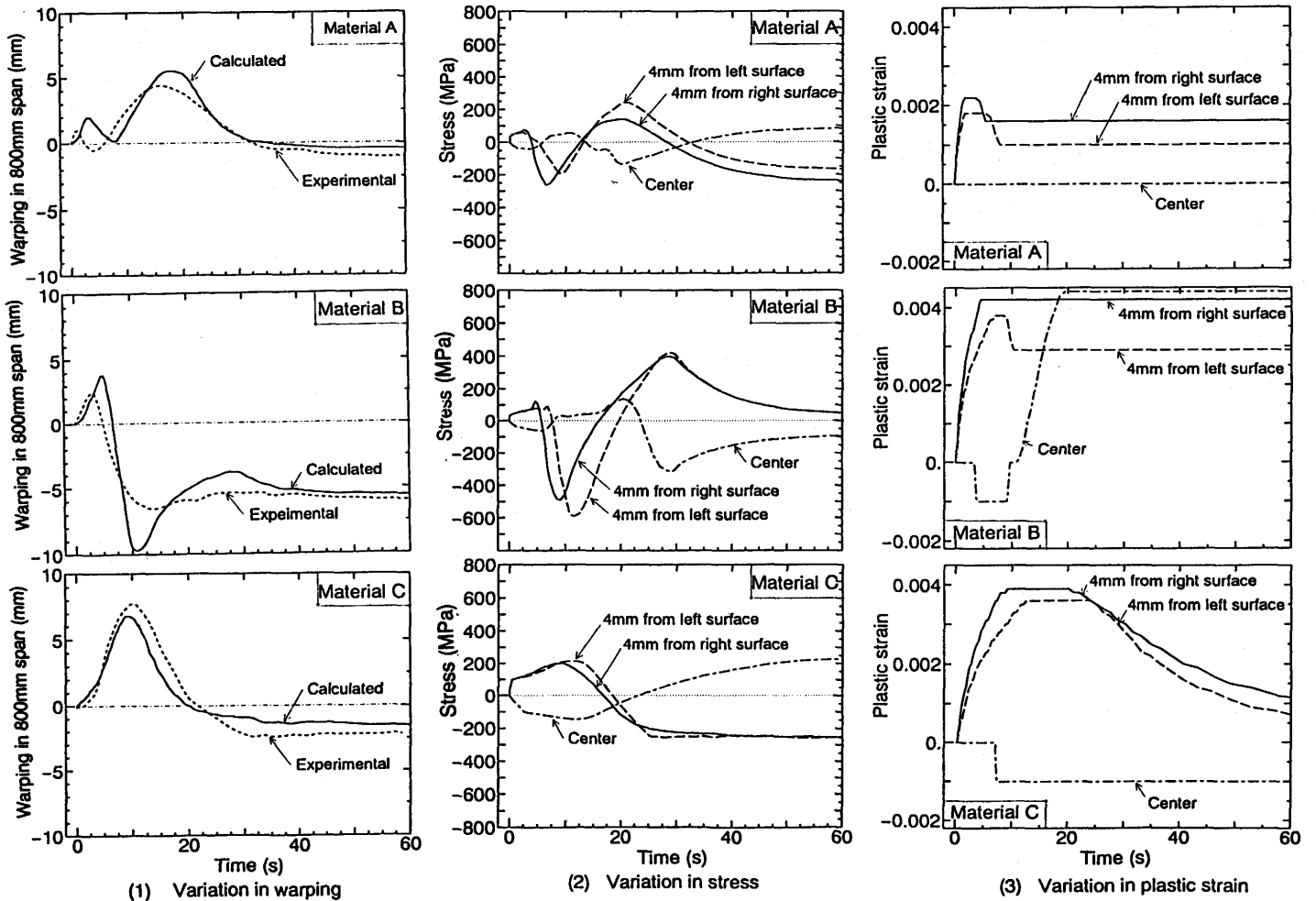


Fig. 8. Variation in warping, stress and plastic strain during water cooling.

て反りは小さい。9%Ni鋼では、弱冷側表層と強冷側表層における相変態時期のずれおよび相変態膨張が大きく、しかも降伏応力が高いので、反りは大きい。②SUS304は、高温域で降伏応力が高いため冷却中の反り極大(最大)値はSM490、9%Ni鋼よりも大きい。③SUS304は熱伝導が低いため板厚内の温度勾配が高くなり、高い応力を発生して反りを大きくする。

## 文 献

- 1) 鋼材の強制冷却, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1978), 100.
- 2) 玉野敏隆, 有吉敏彦, 重藤博司, 長田元宏: 鉄と鋼, 71(1985), 398.
- 3) 玉野敏隆, 有吉敏彦, 重藤博司, 長田元宏: 鉄と鋼, 71(1985), 399.
- 4) 有吉敏隆, 福田 敏, 矢田 浩, 末広正芳: 材料, 37-421(1988), 1146.
- 5) 有吉敏隆, 重藤博司: 材料, 37-421 (1988), 1153.
- 6) F.D.Fischer, E.Hinteregger and F.G.Rammerstorfer: ASME AMD, 36(1988), 37.
- 7) 吉田 博, 片岡健二, 佐々木徹, 田中智夫: 塑性と加工, 24(1983), 715.
- 8) F.M.B.Fernandes, S.Denis and A.Simon: Mat. Sci. and Tech., 1(1985), 838.
- 9) 岸野孝信, 長岐 滋, 井上達雄: 材料, 28(1979), 861.
- 10) 鉄鋼便覧(基礎), 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1975), 305.
- 11) F.Henger, B.Strassle and P.Brem: Stahl und Eisen, 89(1969), 641.
- 12) 田島 守, 牧 忠, 片山功蔵: 日本機械学会論文集(B編), 50(1984), 3033.
- 13) Physical constants of Some Commercial Steels at Elevated Temperature, British Iron and Steel Research Association, Butterworths Scientific Publications, London, (1953), 4.
- 14) M.Avrami: J.Chem. Phys., 7(1939), 1103.
- 15) M.Avrami: J.Chem. Phys., 8(1940), 212.
- 16) E.A.Gautier, A.Simon, G.Beck: Int. Conf. Strength of Metals & Alloys, 2(1979), 867.
- 17) D.P.Koistinen, R.E.Marburger: Acta Metall., 7(1959), 59.
- 18) 金属データブック: 日本金属学会編, 丸善, 東京, (1993), 427.
- 19) 金属材料の弾性係数, 日本機械学会編, 東京, (1980), 88.