

# 厚鋼板のオンライン制御冷却時の座屈解析

吉原直武\*

## Analysis on Buckling of Steel Plates in a Process of On-line Controlled Cooling

Naotake YOSHIHARA

### Synopsis :

During on-line controlled cooling of continuous motion type, steel plates are subjected to successive water cooling from the top to the bottom. Therefore thermal gradients in the longitudinal direction necessarily arise. Especially in the cooling which requires a large temperature drop like direct quenching, the plates will buckle by thermal stress generated from the longitudinal temperature gradient and shape problems will occur.

Those plates are flattened by hot leveler, but afterward the buckling may occur during air-cooling, if the temperature in the plates is not uniform just after the leveling.

We carried out the finite element method analysis on buckling caused by thermal stress which arose from the longitudinal temperature distribution during and after the controlled cooling.

The following terms were examined quantitatively.

(1) Effect of the zone length of controlled cooling, the plate thickness and the plate width on the buckling behavior during and after the controlled cooling.

(2) Arrangement condition of pinch rolls for avoiding the buckling under the controlled cooling.

The knowledge obtained from the analysis contributed to the development of the controlled cooling equipment in the plate factory of NKK's Keihin Works. Now it is useful for the guide in the actual operation.

**Key words :** controlled cooling ; steel plates ; buckling ; finite element method ; pinch roll.

## 1. 緒 言

近年、制御圧延と制御冷却を組み合わせたオンライン熱処理により、強度、靱性、溶接性の優れた厚鋼板が熱エネルギー効率、生産効率良く製造されている。その冶金学的意義や材質向上のための研究<sup>1)~4)</sup>や実用化のためのプロセス技術の研究<sup>5)~9)</sup>が多く行われてきた。特に制御冷却設備の実用化の重要なポイントは、大きな厚鋼板を均一に冷却してフラットな形状の製品を得る技術であった。そして、現在実用化されて使用されている厚板のオンライン制御冷却方式は、同時一斉冷却と通過冷却の2種類である。

同時一斉冷却方式では、長い冷却帯の中に厚板を入れてから水冷を行うので、比較的全面が均一に冷却されると思われる。しかし、神尾ら<sup>8)</sup>が言うように、水をノズルから直接衝突させて冷却する一次冷却作用以外に、厚

板の上面に落下した冷却水の水平方向の流れ(横流れと呼ぶ)による2次冷却効果が存在するため、必ずしも均一な冷却を行うことは容易ではない。実際、板幅および板長さの端部の温度不均一が生じやすく、このために厚板の熱変形が問題になる。一般には、制御冷却後、直ちに熱間レベラー矯正が行われるので、もし、ここで完全に平坦にされるとすれば、熱間レベラー矯正後の厚板の温度不均一が室温までの冷却中に座屈を起こすほどの大きな熱応力を発生しなければよいと考えられる。このような観点から、厚板の熱間レベラー通過後の数種類の代表的な板幅温度分布に関して、座屈を引き起こす温度不均一条件の検討が大江ら<sup>10)11)</sup>の熱弾性座屈解析によって行われている。

一方、通過冷却方式では同時一斉冷却方式に比べて短い冷却帯を通過させて厚板を冷却するので、設備がコンパクトになり、かつ冷却水量を集中できるので大きな水

平成元年11月8日受付 (Received Nov. 8, 1989)

\* NKK 中央研究所 (Advanced Technology Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

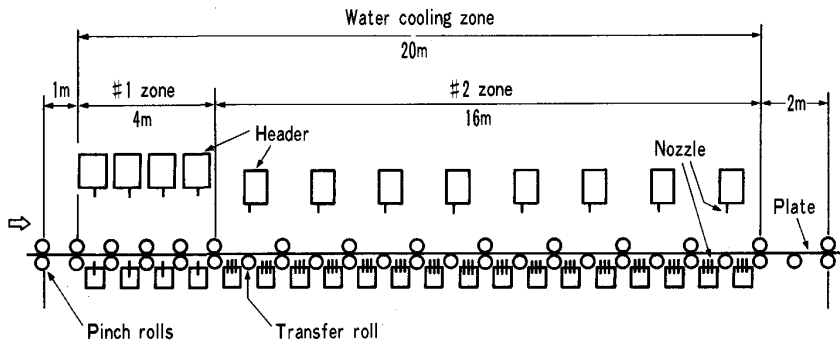


Fig. 1. Outline of on-line controlled cooling equipment at NKK's Keihin Works.

量密度で強冷却が可能になるという利点がある。

これらの反面、高温の厚板が冷却帯の中を先端から順次、水冷されていくので必然的に長手方向温度勾配が生じ、熱応力が発生する。この熱応力が大きいと座屈が起こり、形状不良となり、特に厚板の上面の横流れ状態が乱され、時間的、空間的に不均一な冷却を引き起こし、さらに形状不良を増長させる傾向が懸念される。

そのために、通過冷却方式の場合、冷却中の厚鋼板の上下面の冷却アンバランスによって生じる反りの抑制以外に、長手方向温度勾配に起因する座屈を防止する目的のピンチロールが必要である。

制御冷却後にピンチロールの拘束がなくなった時、大きな面内の温度分布があると、たとえ熱間レベラー矯正を受けて平坦形状になっていても、その後の空冷中に発生する熱応力によって座屈が発生し、形状不良になる危険がある。これは、同時一斉冷却方式と通過冷却方式に共通した問題である。特に、板の長手方向端部と板幅方向端部に温度不均一が生じやすく、これに起因する座屈の防止が重要であるが、この熱座屈に及ぼす板厚、板幅、温度分布の影響が今までの研究においてはあまり明確にされていない。厚板の制御冷却における形状制御の実操業指針としては十分な知識が得られていない。

本報告では、通過方式の制御冷却における厚鋼板の座屈挙動および防止のための拘束用ピンチロール配列条件について検討した。また、制御冷却後の不均一な面内温度分布に起因する座屈発生条件を種々の操業条件に対して明確にし、実操業の指針に役立つために、シェル要素を用いた有限要素法による熱弾性座屈解析を行った。

## 2. 通過方式の制御冷却過程の座屈防止の検討

通過冷却方式では制御冷却過程で生じる長手方向温度不均一に起因する熱応力が必ず発生する。この熱応力による座屈条件およびその防止方法について検討する。

### 2.1 オンライン制御冷却時の温度履歴

#### 2.1.1 制御冷却設備

制御冷却設備は仕上げ圧延機と熱間矯正レベラーの間に配置されている。熱間圧延された厚板は10数秒後に直ちに制御冷却可能であり、制御圧延、制御冷却過程で発生した形状不良は熱間レベラーで矯正される。NKK京浜の制御冷却設備の概略図をFig. 1に示す。この装置は第1冷却帯では上部スリットラミナー、下部スリット噴水冷却が使用されている。第2冷却帯では上部スリットラミナー冷却、下部円管スプレー冷却が使用されている。冷却中の厚板の熱変形を抑制するため、ピンチロールが第1冷却帯では1mピッチで、第2冷却帯では2mピッチで配置されている。冷却帯の冷却能力の違いによって加速冷却(On-Line Accelerated Cooling, 以下OLACと略す)と直接焼入れ(Direct Quenching, 以下DQと略す)に大きく分けられる。加速冷却は主として造船、ラインパイプ用の高強度、高靱性、優れた溶接性を有する引張強さ50 kgf/mm<sup>2</sup>級の鋼材の製造に使用されている。また直接焼入れはさらに高強度の引張強さ60~80 kgf/mm<sup>2</sup>の鋼材の製造に使用されている。

#### 2.1.2 冷却曲線の計算

加速冷却時と直接焼入れ時の厚鋼板の長手方向温度分布を次に述べる伝熱解析により求めた。制御冷却時の熱伝達係数として文献12)を参考にし、Fig. 2に示すデータを使用した。板厚30mmの鋼板がOLACおよびDQ条件で冷却される場合の温度変化を板厚方向一次元の非定常伝熱解析によって計算した。文献12)で用いられた熱伝導率、比熱と同じ値を計算に使用した。これらを変換温度と含熱量に変換し、前進差分法を用いた非定常伝熱解析を行った。

計算に用いたOLAC冷却条件は初期温度750°C一様な状態から板厚中心で560°Cまで水冷され、熱伝達係数10 kcal/m<sup>2</sup>h°C相当で室温まで放冷されるものとした。また、DQ冷却条件は初期温度900°C一様から200°Cまで水冷されるものとした。

OLACとDQ冷却時の温度計算結果をそれぞれFig. 3とFig. 4に示す。板厚方向の温度差は冷却中にかな

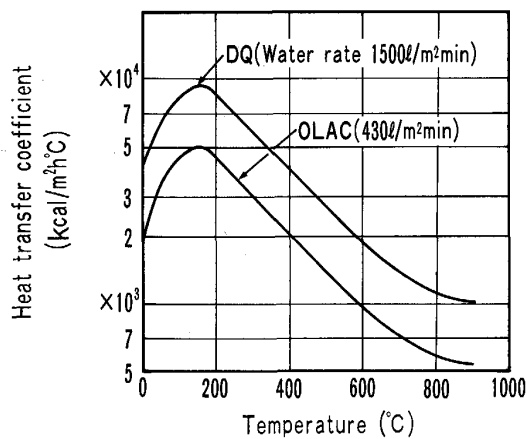


Fig. 2. Heat transfer coefficient in water cooling zone under direct quenching or on-line accelerated cooling.

り大きく、大きな板厚方向温度分布が発生する。大江ら<sup>11)</sup>はこの板厚方向温度分布に起因する座屈挙動について、表裏面の温度差として0~50°Cを板厚方向に直線的に分布させた時に板厚方向温度分布の臨界座屈温度降下量(2.2.1項)への影響を調べた。その結果、板厚方向温度分布の影響はほとんどなかった。したがって、長手方向や板幅方向の温度分布の座屈への影響を検討する際、板厚方向温度分布を考慮しなくてもよいと思われる。そこで、板厚方向の温度の平均値を板面内の温度の代表値として面内応力による座屈解析に用いた。この板厚方向の温度の平均値は制御冷却帯において時間に対してほぼ直線的に変化しているので、厚板はFig. 5に示すような3直線で示される長手方向温度分布を有するものと考え、2.2節に述べるような座屈解析を行った。

## 2.2 熱応力による座屈解析の方法

### 2.2.1 温度条件と臨界座屈温度降下量

2.1節で示したように制御冷却時の厚板の各面内位置の板厚方向平均温度はほぼFig. 5に示す直線的な温度履歴を経て冷却されると仮定すれば、その空間的な各位置の熱応力は通板中に、その位置以前の時間的な応力、歪み履歴を受けて変化する。しかし、その応力が弾性であれば、それまでの温度履歴に依存せず、Fig. 5のような空間座標で示される温度分布で厚板の応力は決定される。したがって、均一な初期温度状態からFig. 5に示すような温度分布を板面内に与えた時に発生する熱応力によって座屈する場合の解析を行うことにする。発生する熱応力はFig. 5に示す温度降下量 $\Delta T$ に比例するので、座屈発生の難易度を示す尺度として、座屈発生時の $\Delta T = \Delta T_{cr}$ (臨界座屈温度差と呼ぶ)を用いることにする。

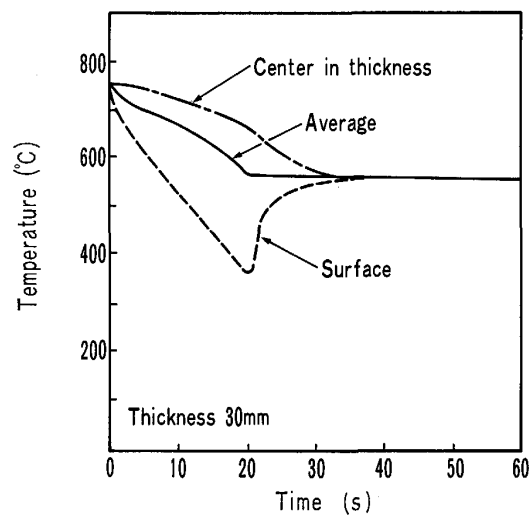


Fig. 3. Calculated cooling curves during on-line accelerated cooling.

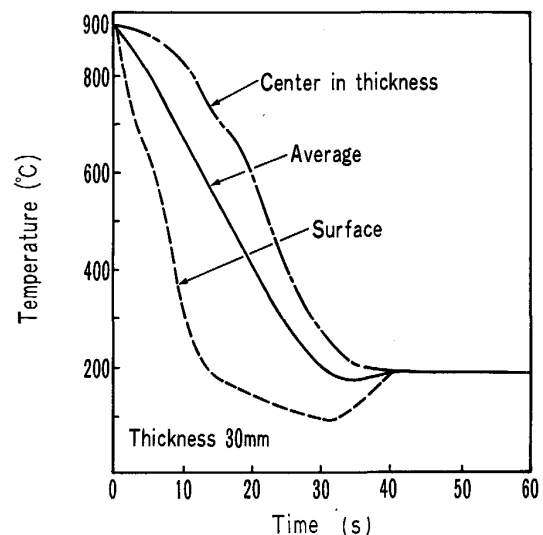


Fig. 4. Calculated cooling curves during direct quenching.

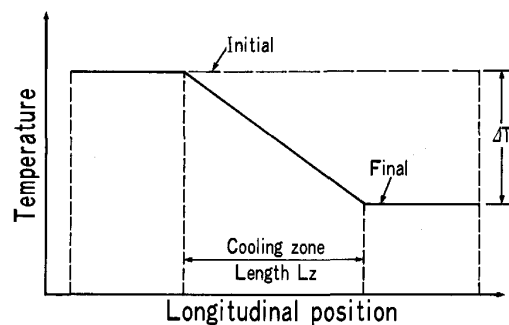


Fig. 5. Longitudinal temperature condition of plate used for calculation of buckling during controlled cooling.

2.2.2 有限要素法による計算

板幅の半分を熱応力計算の対称領域とした。Fig. 6 に有限要素法に用いる要素分割を示す。9 節点シェル要素で板幅方向に板幅の半分を 2 等分割、板長さ 26 m 方向に 13 等分割した。X 軸回りの回転は対称条件によって拘束した。汎用構造解析プログラム ADINA を用いて熱応力による線形座屈解析<sup>13)</sup>を行い、臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  を求めた。

2.3 熱応力座屈の解析結果と考察

2.3.1 無拘束条件下の座屈挙動

Fig. 5 のように制御冷却帯長さよりも長い厚板の中央部が急冷されて温度勾配が生じている場合に、ピンチロールによる拘束が存在しない時の臨界座屈温度差に及ぼす種々の要因の影響を検討した。線膨張係数の温度依存性は考慮せず、 $1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  一定とした。

(1) 冷却帯長さの影響

冷却帯長さ  $L_z = 5 \text{ m}$ ,  $10 \text{ m}$ ,  $20 \text{ m}$  の 3 種類について熱応力による座屈の波形の計算を行った。その結果を Fig. 7 に示す。いずれの冷却帯長さの場合にも幅方向の

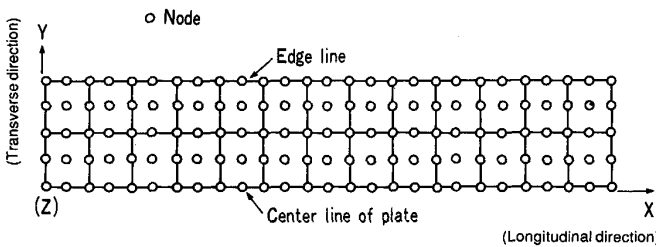


Fig. 6. Mesh divisions and nodes for FEM calculation.

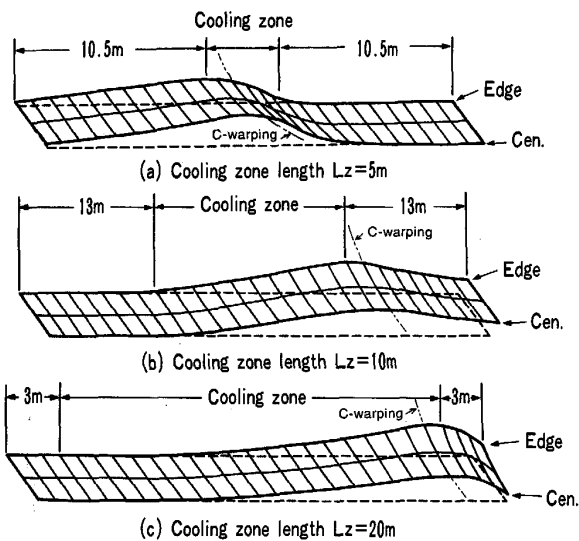


Plate size : 10 mm T × 5 m W

Fig. 7. Influence of cooling zone length on buckling modes.

反りと長さ方向の反り変形の両方が存在する。冷却帯の出側 (低温側) 付近において最も変位置の大きい座屈波形となっている。2.2.1 項で定義した臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  と冷却帯の長さ  $L_z$  の比  $\Delta T_{cr}/L_z$ 、と冷却帯長さを板幅  $W$  で割って無次元化した  $L_z/W$  との関係を図. 8 に示す。冷却帯長さ板幅比  $L_z/W$  が小さいほど  $\Delta T_{cr}/L_z$  は大きくなる傾向を示す。しかし、 $L_z/W$  が 1 より大きい範囲では  $\Delta T_{cr}/L_z$  は一定になる。すなわち、冷却帯長さが厚板の幅より大きい条件下では臨界座屈条件  $\Delta T_{cr}/L_z$  は一定であることがわかる。その理由を次に述べる。冷却帯長さ  $L_z = 10 \text{ m}$  の条件で  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$  の場合に面外変形を拘束した板幅 5 m の板に発生する面内の熱応力を計算した結果を図. 9 に示す。熱応力が発生するのは冷却開始付近と冷却終了付近の 2 箇所に限定され、また  $L_z \geq W$  の場合は 2 箇所の熱応力が相互に影響を与えないため、発生する熱応力は  $L_z$  によらない<sup>14)</sup> と考えられる。もし、冷却帯が短くなって  $L_z < W$  になると、これら 2 箇所の熱応力が相互に

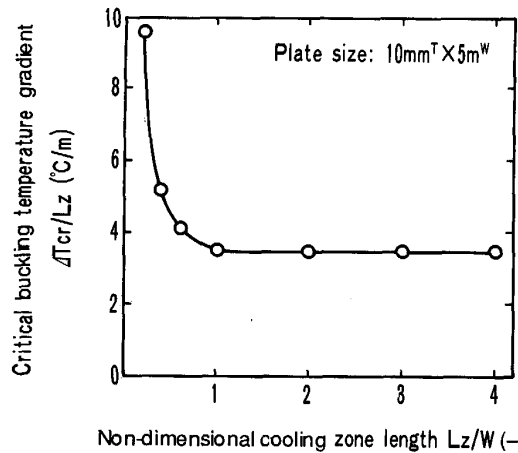


Fig. 8. Influence of non-dimensional cooling zone length on critical buckling temperature gradient.

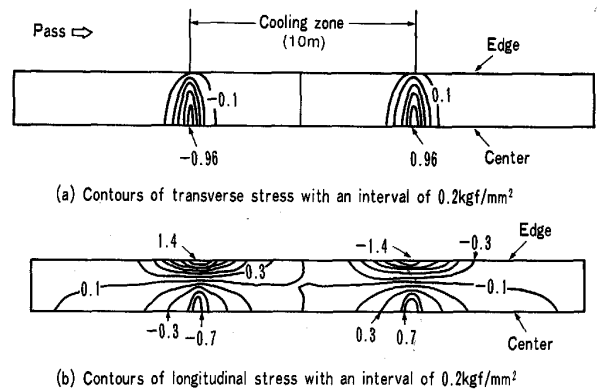


Plate size : 10 mm T × 5 m W  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$

Fig. 9. Stress distribution in plate during controlled cooling under constrained buckling.

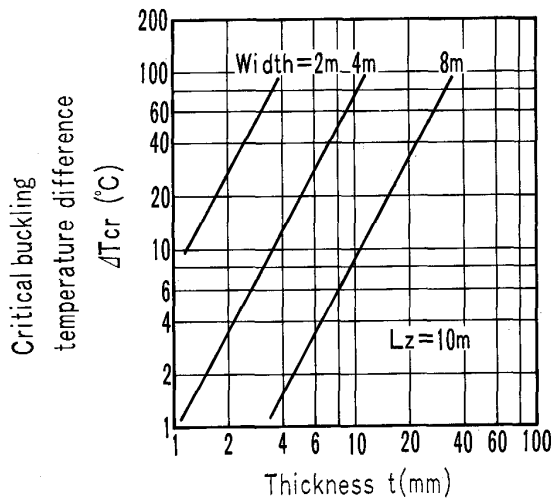


Fig. 10. Influence of thickness on critical buckling temperature difference in the middle of plate during controlled cooling.

影響し、その応力は互いに符号が逆であるので相殺し合い、小さくなると考えられる。これは  $Lz \geq W$  の場合に発生する熱応力状態にくらべると、座屈しにくい応力状態であると考えられる。

(2) 板厚、板幅の影響

冷却帯長さ  $Lz = 10\text{ m}$  で板幅  $W = 2\text{ m}, 4\text{ m}, 8\text{ m}$  の3種類について  $1 \sim 40\text{ mm}$  各種の板厚に対して座屈計算を行った。板厚と臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  の関係を両対数目盛りで表した図 Fig. 10 に示す。この図より、 $\Delta T_{cr}$  と板厚  $t$  は各板幅に対して同じ勾配 1.9 の直線関係になっていることがわかる。また、どの板厚に対しても  $\Delta T_{cr}$  は板幅の3乗に反比例する関係が得られる。したがって、 $\Delta T_{cr}$  は次のような回帰式で表現できる。

$$\Delta T_{cr} = 56.0 \cdot t^{1.9} \cdot W^{-3.0} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $t$ : 板厚 (mm),  $W$ : 板幅 (m)

式(3)の右辺の指数の大きさから判断すると、板厚の変化よりも板幅の変化の方が  $\Delta T_{cr}$  に与える影響は大きいことがわかる。非常に生産量の多い部類に属する厚板寸法  $25\text{ mm}T \times 4\text{ m}W$  の冷却に対して  $\Delta T_{cr} = 400^\circ\text{C}$  であるが、 $15\text{ mm}T \times 4\text{ m}W$  寸法に対しては  $\Delta T_{cr} = 150^\circ\text{C}$  になる。したがって、冷却温度降下  $\Delta T = 200^\circ\text{C}$  である標準的な OLAC 冷却条件では、厚さ  $15\text{ mm}$  程度の薄物広幅  $5\text{ m}$  の厚板に対しては座屈防止のために拘束用ピンチロールが必要になってくる。厚板寸法 (a)  $1\text{ mm}T \times 2\text{ m}W$ , (b)  $10\text{ mm}T \times 4\text{ m}W$ , (c)  $40\text{ mm}T \times 8\text{ m}W$  の場合の座屈波形を Fig. 11 に示す。いずれの場合もC反りとL反り両方が存在する。しかし板厚が大きくなるほどC反り成分が小さく、L反り主体の変形モー

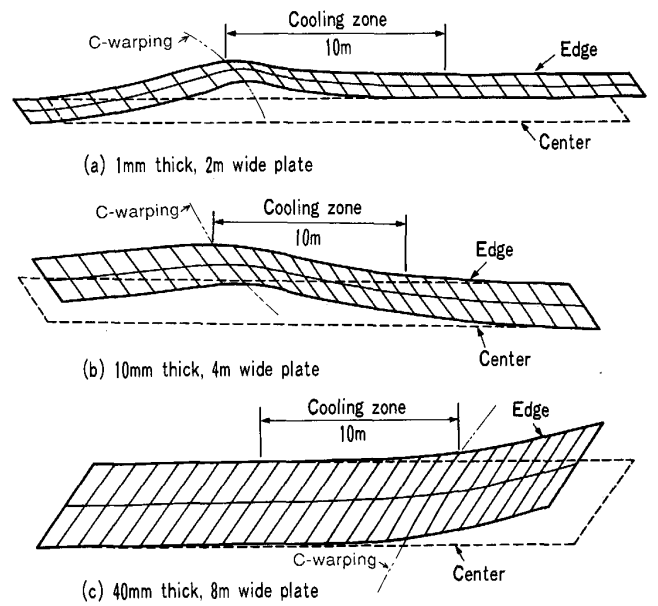


Fig. 11. Buckling modes of plate of different sizes.

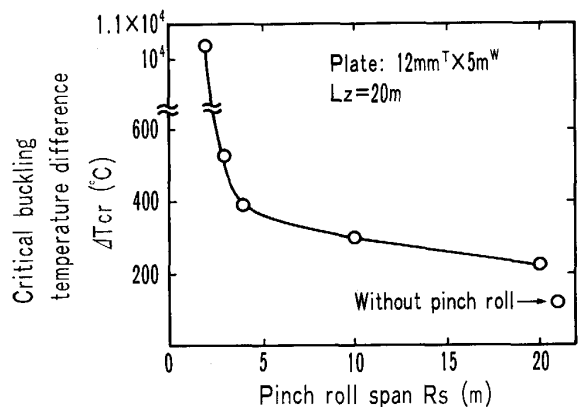


Fig. 12. Influence of pinch roll on critical buckling temperature difference in the water cooling zone.

ドになってくる。

2.3.2 ピンチロール拘束による座屈防止条件

薄い広幅の板ほど座屈しやすいと考えられるので、冷却帯長さ  $Lz = 20\text{ m}$  を有するある厚板生産設備の製造範囲のうちで最も座屈危険性の高い  $12\text{ mm}$  厚  $\times 5\text{ m}$  幅長さ  $26\text{ m}$  の厚板を冷却する場合について座屈防止へのピンチロール配列の影響を検討する。

(1) ピンチロール配列間隔の影響

Fig. 6 に示す要素分割においてピンチロール位置に相当する節点の Z 方向変位を拘束することによってピンチロールの拘束作用を座屈解析に考慮した。座屈解析結果の座屈波形のうちで冷却帯の内部で座屈する場合の臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  とピンチロール間隔との関係を

Fig. 12 に示す. ピンチロールなしの場合  $\Delta T_{cr} = 94^\circ\text{C}$  であるが, 冷却帯の入り口と出口位置にピンチロールを配置することによって  $\Delta T_{cr} = 221^\circ\text{C}$  まで上昇する. 通常, 制御冷却帯の入り口と出口には, 水が冷却帯の外へ流出しないように冷却長さを正確に確保するため, 水切り用ピンチロールが配置されている. したがって, このピンチロールに大きな拘束力があれば, 標準的な OLAC 冷却条件において座屈を防止できると考えられる. しかし, より温度降下量を必要とする DQ 冷却条件の場合, 冷却帯長さ  $L_z = 20\text{ m}$  に対して座屈防止のために  $\Delta T_{cr} > 700^\circ\text{C}$  でなければならないから, 拘束用ピンチロールを  $2\text{ m}$  ピッチに配置する必要がある.

(2) 冷却帯外部のピンチロール配置条件

Fig. 9 に示したように冷却帯の入側と出側付近にしかも, 冷却帯の外部にも急冷によって発生する熱応力が存在するので, たとえ冷却帯内の厚板の座屈を抑制できたとしても冷却帯外部において座屈の生じる可能性がある. 冷却帯の入り口前方  $1\text{ m}$  位置にピンチロールがある場合と無い場合について, 厚板の冷却帯入側部分が座屈する場合に対して臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  を計算した. Fig. 13(a) に  $\Delta T_{cr}$  を示すように, ピンチロールを入り口前方に配置することによって  $\Delta T_{cr} > 700^\circ\text{C}$  になり, DQ 冷却条件下でも座屈の発生を防止できる. 一方, 冷却帯の出口後方  $1\text{ m}$  または  $2\text{ m}$  位置にピンチロールを

配置した場合と配置しない場合について厚板の冷却帯出側部分が座屈する場合に対して, 臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  を計算した.

Fig. 13(b) に示すように, ピンチロールを冷却帯出口後方  $2\text{ m}$  位置にピンチロールを配置することによって  $\Delta T_{cr} > 700^\circ\text{C}$  になり, DQ 条件下でも座屈の発生を防止できる.

(3) 厚板の前後端部の座屈防止

厚板の先端が冷却帯のピンチロールの間を通過中には厚板の最先端にピンチロールによる面外変形拘束が作用しない. Fig. 14 に示すピンチロール配列を有する装置の制御冷却過程全体において座屈防止条件を検討するために, 冷却帯中の厚板端部  $2\text{ m}$  が最も座屈しやすいと思われる通過位置 (3 ケース) における臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  を計算した. Fig. 14 にはその通過位置と  $\Delta T_{cr}$  の関係を示す. 厚板が, 冷却帯に先端  $2\text{ m}$  だけ入ったとき (a) および後端  $2\text{ m}$  だけ入って冷却帯を抜け出ようとしている時 (c) には, それぞれ  $\Delta T_{cr} = 2036^\circ\text{C}$ ,  $847^\circ\text{C}$  になる. しかし, もし冷却帯外部の #1 や #13 のピンチロールが存在しない場合にはいずれも  $200^\circ\text{C} < \Delta T_{cr} < 700^\circ\text{C}$  の計算結果になった. 普通の OLAC 冷却条件では座屈しないが, 標準的な DQ 冷却条件では座屈してしまう. DQ 時に厚板が冷却帯通過の初期に座屈を防止するには #1 ピンチロールが, また通過終了時の座屈防止には #13 ピンチロールが必要である. Fig. 14(b) の場合は  $\Delta T_{cr} = 2557^\circ\text{C}$  であり, 冷却帯内のピンチロールが  $2\text{ m}$  間隔であれば DQ 時においても厚板後端  $1\text{ m}$  部の座屈は生じないと考えられる.

(4) 実機制御冷却設備への適用

2.3.2 節の (1)~(3) で得られた知見から, 最小板厚  $12\text{ mm}$ , 最大板幅  $5\text{ m}$ , 冷却帯長さ  $20\text{ m}$  の場合の通過方式制御冷却設備において上下面および板幅方向に均一に冷却が行われた時, 座屈防止のためのピンチロール

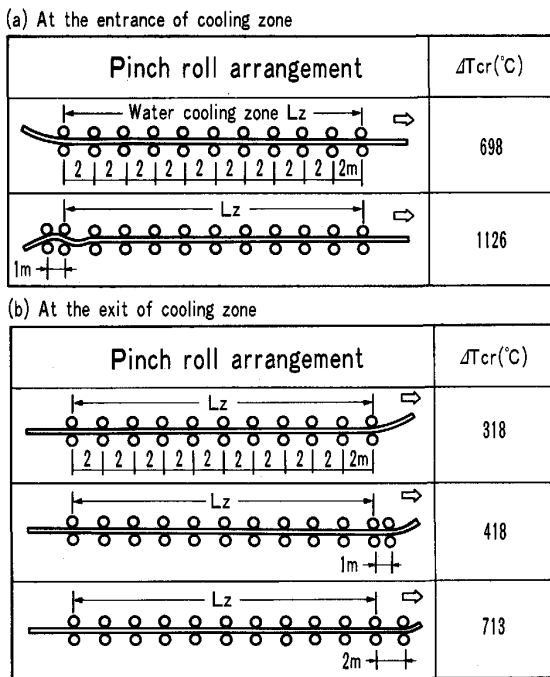


Fig. 13. Effect of pinch rolls in outside of water cooling zone on critical buckling temperature difference  $\Delta T_{cr}$ .

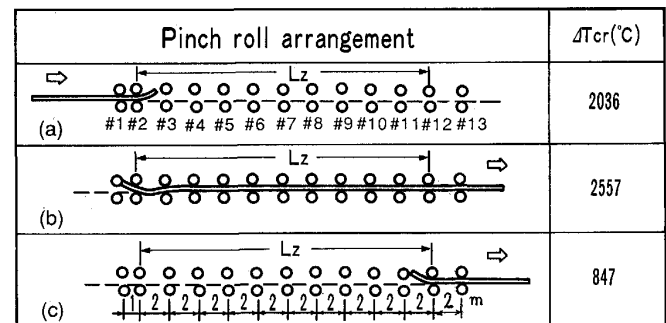


Fig. 14. Effect of pinch rolls on critical buckling temperature difference  $\Delta T_{cr}$  in the top and in the end of the moving plates within the cooling zone.

配置条件は次のようになると考えられる。

(a) 加速冷却のように温度降下  $200^{\circ}\text{C}$  程度の冷却の場合、制御冷却帯の入り口と出口に配置される水切り用ピンチロールに大きな拘束力を持たせればよい。

(b) 直接焼入れのように温度降下  $700^{\circ}\text{C}$  程度の冷却の場合、制御冷却帯の内部に  $2\text{m}$  ピッチの拘束用ピンチロールと、制御冷却帯の入り口前方  $1\text{m}$  と出口後方  $2\text{m}$  位置に拘束用ピンチロールを配置する必要がある。

### 3. 制御冷却後の温度不均一に起因する座屈防止の検討

OLAC 冷却のように比較的高温で冷却が停止される場合、制御冷却帯を出た後に生じている厚板の温度分布は、その後の放冷過程に均一化され、それに伴って新たな熱応力を発生する。特に板幅方向と長手方向温度不均一は放冷中に熱応力による座屈を生じるので、できるだけ制御冷却帯で均一な冷却を行い、冷却後に均一な温度分布にするような装置の設置や操業中の工夫がされている。制御冷却後の板面温度不均一による座屈発生条件のうちで、長手方向温度分布の起因する場合の検討は現在までにほとんど行われていない。また、長手方向端部の変形はレベラーで矯正しにくいので、このような変形を防止することが重要である。そこで制御冷却後に生じた厚板の長手方向端部の温度分布と、その後の放冷過程で生じる熱応力による座屈発生、防止との関係を次に検討する。

#### 3.1 解析方法

実際の OLAC 冷却において冷却直後に長手方向不均一温度分布の生じる部分は前後端部約  $2\text{m}$  の範囲に限られていることが多い。

そこで、Fig. 15 のような直線的な長手方向温度分布を有する厚板が室温まで冷えて均一になる場合について臨界座屈温度  $\Delta T_{cr}$  を 2.2 節と同様に弾性座屈解析に

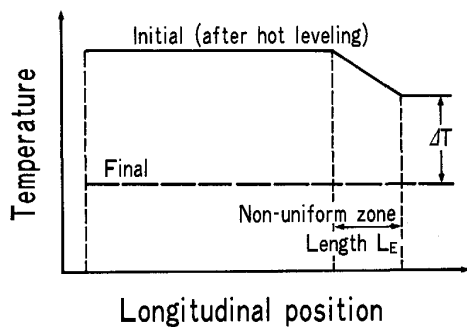


Fig. 15. Longitudinal temperature condition of plate used for calculation of buckling after controlled cooling.

よって求めた。計算に使用した有限要素分割は Fig. 6 に示すメッシュと同じである。

#### 3.2 解析結果

##### (1) 冷却帯長さの影響

板厚  $10\text{mm}$ 、板幅  $4\text{m}$  の時、端部不均一温度部の長さ  $L_E$  の  $\Delta T_{cr}$  への影響を調べた。 $L_E = 1\text{m}$ 、 $2\text{m}$ 、 $10\text{m}$  いずれの場合の座屈波形にも板幅方向の反りと長さ方向の反り変形の両方が存在する結果となった。 $\Delta T_{cr}/L_E$  と  $L_E/W$  の関係を Fig. 16 に示す。 $L_E/W < 0.5$  では、 $L_E/W$  が小さいほど  $\Delta T_{cr}/L_E$  は大きくなるが、 $L_E/W > 0.5$  においては  $\Delta T_{cr}/L_E = \text{const.}$  になる。その理由を次のように考える。不均一温度部の長さ  $L_E = 2\text{m}$  で  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$  の場合、面外変形を拘束した板幅  $4\text{m}$  の板に発生する面内の熱応力を計算した結果を Fig. 17 に示す。板幅方向応力と長手方向応力とも不均一温度部  $L_E$  の両端部から長さ  $W/4$  の範囲に存在す

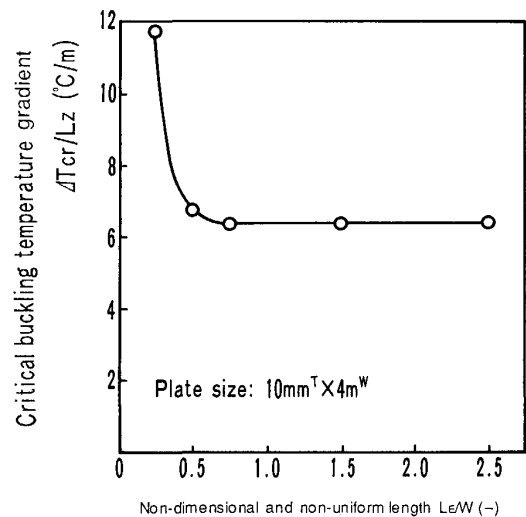


Fig. 16. Influence of non-dimensional and non-uniform zone length on critical buckling temperature gradient in the longitudinal edge of plate.

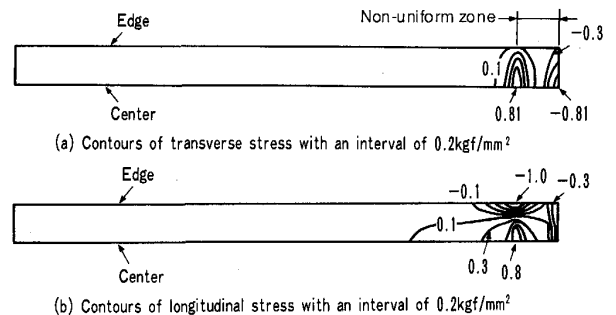


Plate size :  $10\text{mm T} \times 4\text{m W}$   $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$

Fig. 17. Stress distribution in plate caused by temperature distribution in the longitudinal edge just after controlled cooling.

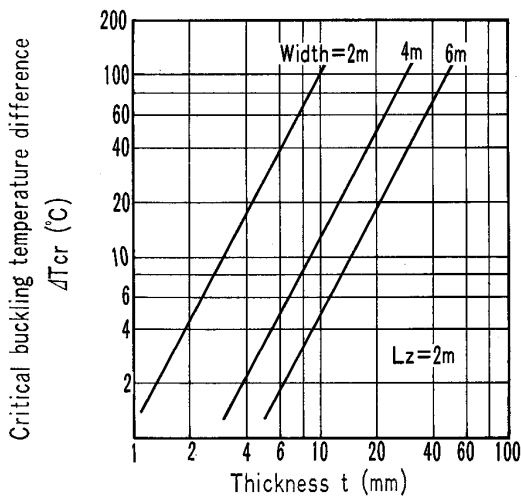


Fig. 18. Influence of thickness and width on critical buckling temperature difference in the longitudinal edge of plate after controlled cooling.

る。2・3・1 項 (1) に述べたように、Fig. 19 に示す等応力線の山と谷の干渉効果が表れてくるので、 $L_E/W < 0.5$  では  $\Delta T_{cr}$  は  $L_E$  の影響を受けるが、 $L_E/W > 0.5$  では  $L_E$  の影響を受けないと考えられる。

#### (2) 板厚板幅の影響

温度不均一部長さ  $L_E = 2$  m で、板幅  $W = 2$  m, 4 m, 6 m の 3 種類について、1~40 mm の各種の板厚に対して座屈計算を行った。板厚と臨界座屈温度差  $\Delta T_{cr}$  の関係を両対数目盛りで表した図 Fig. 18 に示す。この図より、 $\Delta T_{cr}$  と板厚  $t$  の関係は各板厚に対して同じ勾配 2.0 の直線になっている。また、どの板厚に対しても  $\Delta T_{cr}$  は板厚の 2.9 乗に反比例する関係が得られる。したがって、 $\Delta T_{cr}$  は次のような回帰式で表現できる。

$$\Delta T_{cr} = 8.0 \cdot t^{2.0} \cdot W^{-2.9} (\text{°C}) \dots\dots\dots (2)$$

不均一温度部の長さ  $L_E = 2$  m の時典型的な厚板寸法 25 mm 厚 × 4 m 幅の場合  $\Delta T_{cr} = 80^\circ\text{C}$  であるが、薄物広幅材 12 mm 厚 × 5 mm 幅の場合には  $\Delta T_{cr} = 11^\circ\text{C}$  であるので座屈防止のためには  $\Delta T < 11^\circ\text{C}$  と非常にきびしい温度条件にする必要がある。

## 4. 結 論

厚板の通過方式制御冷却では、冷却中に長手方向温度勾配が生じる。この長手方向温度勾配に起因する熱応力によって生じる座屈の解析を行い、以下の知見を得た。

(1) 冷却帯長さ 20 m, 最小板厚 12 mm, 最大板幅 5 m 仕様の厚板製造用オンライン制御冷却設備においては制御冷却中の座屈を防止するためのピンチロール条件は次のとおりである。

(a) 加速冷却のように温度降下  $200^\circ\text{C}$  程度の冷却の場合、制御冷却帯の入り口と出口に配置される水切り用ピンチロールに大きな拘束力を持たせればよい。

(b) 直接焼入れのように温度降下  $700^\circ\text{C}$  程度の冷却の場合、制御冷却帯の内部に 2 m ピッチの拘束用ピンチロールと、制御冷却帯の入り口前方 1 m と出口後方 2 m 位置に拘束用ピンチロールを配置する必要がある。

(2) 制御冷却後の熱間矯正レベラー通過後温度不均一によって発生する長手方向端部の座屈を防止するには、長手方向温度不均一部の長さ 2 m の場合最も厳しい 12 mm 厚 × 5 m 幅に対して  $11^\circ\text{C}$  以下に温度不均一を抑えねばならない。この臨界座屈温度差は温度不均一の発生している端部の長さ、板厚の 2 乗、板幅の -2.9 乗に比例する。

以上の知見は当社 NKK 京浜製鉄所厚板工場の加速冷却と直接焼入れ兼用の制御冷却設備の開発に生かされ、現在実操業の指針に役立っている。

## 文 献

- 1) 勝亦正昭, 町田正弘, 川田昭二, 秋山憲昭: 神戸製鋼技報 R & D, **33** (1983) 4, p. 24
- 2) 高田 寿, 芦田喜郎, 勝亦正昭, 板山克広, 鋪田昇功: 神戸製鋼技報 R & D, **33** (1983) 4, p. 28
- 3) 東田幸四郎, 大北智良, 大内千秋, 長嶺多加志, 平部謙二, 八子一了: 日本鋼管技報, (1981) 89, p. 1
- 4) 尾上泰光, 梅野正紀, 萬谷興亜, 十河泰雄, 酒井和夫, 岩永 健, 森川博文: 製鉄研究, (1982) 309, p. 18
- 5) 平井信恒, 江端貞夫, 手塚 栄, 田中康浩, 志賀千晃, 垂井 稔: 鉄と鋼, **70** (1984), S 373
- 6) 国岡計夫, 上野 康, 神尾 寛, 滝川信敬, 平部謙二, 有方和義: 鉄と鋼, **68** (1982), S 511
- 7) 大友郎紀, 高塚公郎, 高橋出雲男, 秋山憲昭, 大番屋嘉一: 鉄と鋼, **70** (1984), A 193
- 8) 神尾 寛, 上野 康, 吉原直武, 平部謙二, 大尾和彦, 滝川信敬: 鉄と鋼, **70** (1984), A 197
- 9) 中村秀夫, 柳原英矩, 檜崎誠治, 加藤正夫, 有吉敏彦: 鉄と鋼, **70** (1984), A 201
- 10) 大江憲一, 松岡雅典, 高塚公郎: 鉄と鋼, **67** (1983), S 1272
- 11) 大江憲一, 松岡雅典, 高塚公郎, 中尾正和, 山口喜弘: 鉄と鋼, **69** (1983), S 1273
- 12) 吉原直武, 神尾 寛: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 1316
- 13) K. J. BATHE and E. N. DVORKIN: Computers & Structures, **17** (1983), p. 871
- 14) 吉原直武, 福田修三, 上野 康: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 839