

階段冷却法に関する研究*

三 塚 正 志**・福 田 敬 爾**

Study on Intermitted Cooling of Steel Products

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

Synopsis:

The "step cooling method" was studied. In this method, the "water cooling" and the "natural cooling" were repeated alternately. The results obtained are as follows:

1. The method can prevent the bending of steel products caused by the forced water cooling.
2. With this method, one can control the cooling effect.
3. And the nozzle troubles by interruption are decreased.
4. Other conditions being the same, the total amount of the cooling water, necessary to cool the steel products for a definite temperature difference, is proportional to its flow rate.
5. With equal duration of "water cooling" and "natural cooling" the total time to cool the steel products for a definite temperature difference, depends on their repeating period.

(Received July 15, 1969)

1. 結 言

近年、鋼材が大型化し、生産量が増大するにつれて、冷却能力の不足が顕著になりつつある。これを解決するため、冷却床における鋼材の強制水冷が広く行なわれている。この水冷に際して重要なことは、鋼材の冷却速度の制御と冷却後の鋼材を変形させないことである。前者は、噴射水量の制御によつて、後者は、鋼材の相対する面の冷却効果を均一化することによつて、達成できる。前者は比較的容易だが、後者はかなりむずかしい。すなわち、鋼材の多くは、スキッドやグリッド上に、水平に置かれているから、両面（上下面）を均一に冷却することは、非常にむずかしい。とくに、広い鋼材のときには、上面に噴射された冷却水は、鋼材上に長時間滞在するが、下面のそれは、噴射直後に落下するため、噴射水量が同じでも、上面の冷却効果が大きくなる。また、鋼材が曲つていると、上面の冷却水が局部的に集まり、冷却むらを加速度的に増大する。

このような問題は、“階段冷却法”，すなわち、水冷と空冷を交互に繰り返しながら冷却する方法によつて、ある程度まで解決することができる。この冷却法の目的は、水冷期間に生じた鋼材内温度分布の乱れを、空冷期間に均一化し、鋼材に生ずる塑性変形を軽減することである。

一方、この冷却法は、“冷却効果の制御”や“スプレノズルの閉塞防止”にも役立つ。すなわち、前者は、空冷期間の長さを制御することによつて、平均的冷却効果の制御ができ、後者は、空冷期間を長くすることによつ

て、より大きな孔を有するノズル、すなわち、閉塞確率の小さいノズルの使用が可能になる。以下、計算と実験結果を用いて、階段冷却法を説明する。

2. 計算および実験方法

階段冷却の計算に際しては、水冷と空冷を交互に繰り返す、その熱伝達率は、Fig. 1 のように、時間と表面温度との関数にした。しかし、水冷期間の終了と同時に、鋼材から冷却水が完全に除去されるわけではないから、空冷初期の熱伝達率は、破線のようにになる。水冷の熱伝達率には、前報¹⁾の値※を、空冷のそれには文献²⁾³⁾の式

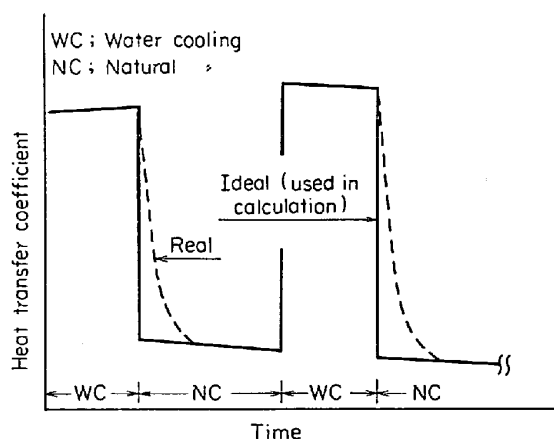


Fig. 1. Model for heat transfer coefficient in the step cooling calculation.

* 昭和44年3月本会講演大会にて発表

昭和44年7月15日受付

** 八幡製鉄(株)技術研究所

※ 前報の熱伝達率は、データの追加と電子計算機による詳細な計算の結果、若干修正する必要がある。

の対流項を若干修正し、ふく射率を 0.75 とした次式を用いた。

$S \leq 400^\circ\text{C}$ のとき

$$\alpha = 5.83 \times 10^{-5} + 1.14 \times 10^{-6} S - 3.81 \times 10^{-9} \times S^2 \\ + 4.50 \times 10^{-12} \times S^3 + 0.75 \times 1.355 \times 10^{-12} \\ \times \{(273+S)^2 + 9.0 \times 10^4\} \times (573+S) \dots (1-1)$$

$S > 400^\circ\text{C}$ のとき

$$\alpha = 1.945 \times 10^{-4} \\ + 0.75 \times 1.355 \times 10^{-12} \\ \times \{(273+S)^2 + 9.0 \times 10^4\} \times (573+S) \dots (1-2)$$

α : 熱伝達率 (cal/cm²·sec·deg)

S : 表面温度 (°C)

周囲温度: 27°C

鋼材の比熱と熱伝導率には、Fig. 2 に示す値を温度

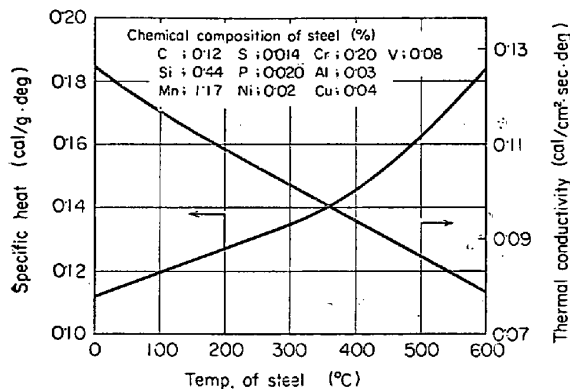


Fig. 2. Thermal properties of steel.

の関数として、密度には、7.7 g/cm³ を一定値として、用いた。計算は、Tosbac 3400 (東芝製) で行なった。

実験は、25.4×550×1000 mm の低炭素鋼板をグリッド上に水平に置き、下面をスプレ冷却し (上面は空冷)、水冷と空冷は、シャッタの開閉で行なった。グリッドは、25×133×2620 mm の鉄鋼板を 92 mm ピッチで配列した構造である。鋼板の曲がり、長さ 950 mm の中央部のそりである。

3. 計算および実験結果

Fig. 3 は、グリッド上の鋼材を上下面から、均等に水冷したときの 2 次元温度分布計算結果の一例で、左側は連続冷却、右側は階段冷却 (水冷: 30 sec, 空冷: 30 sec) したときの分布である。Fig. 4 は、鋼材の片面を階段冷却 (水冷: 20 sec, 空冷: 40 sec)、他面を連続空冷したときの冷却曲線と鋼材内温度差の計算結果の一例である (1 次元計算)。Fig. 5 は、Fig. 4 とほぼ同じ条件の実測値の一例で、実線はグリッド間 (水滴が直接衝突する部分)、破線はグリッド上 (水滴が直接衝突しない部分) の冷却曲線である。

4. 考 察

4.1 鋼材の曲がり防止

冷却の不均一な例として、グリッド上の鋼材を冷却する場合を例にして検討する。Fig. 3 に示すように、グ

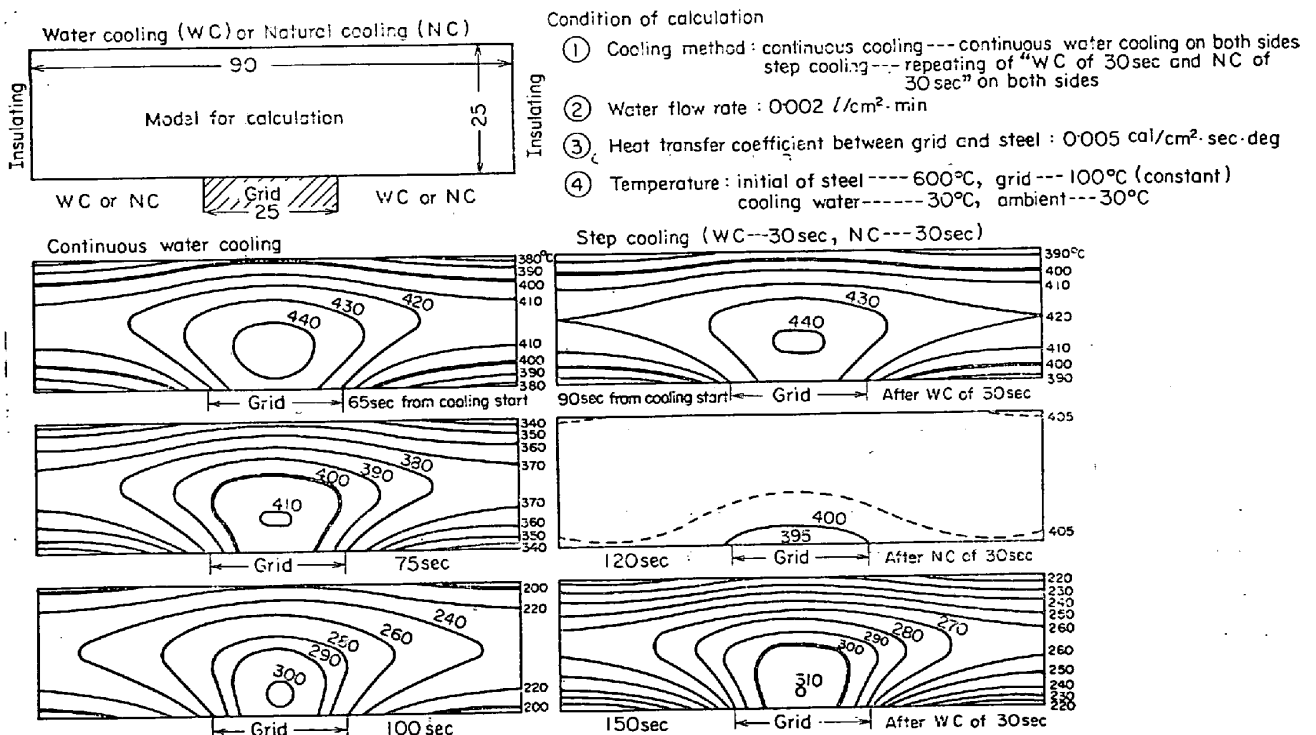


Fig. 3. Temperature distribution of steel plate on grid (two-dimensional calculation).

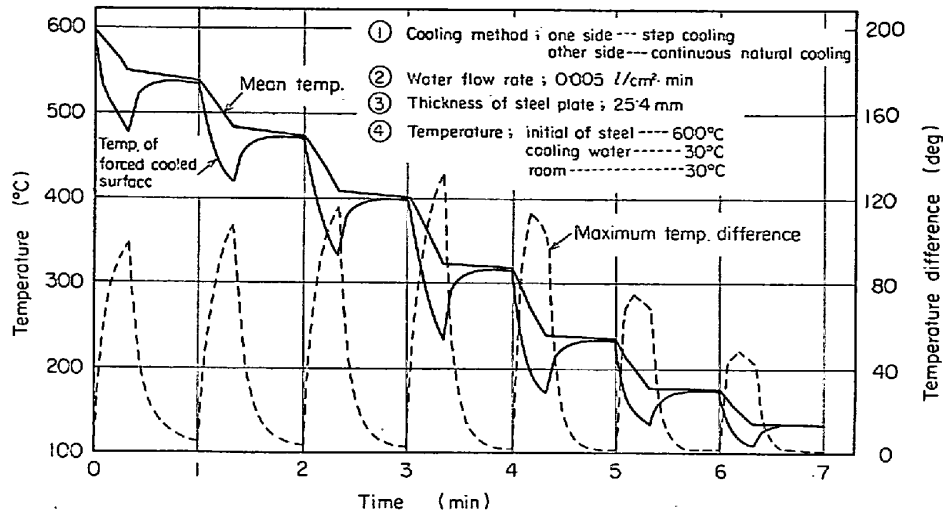


Fig. 4. Temperature of steel plate in step cooling (one dimensional calculation).

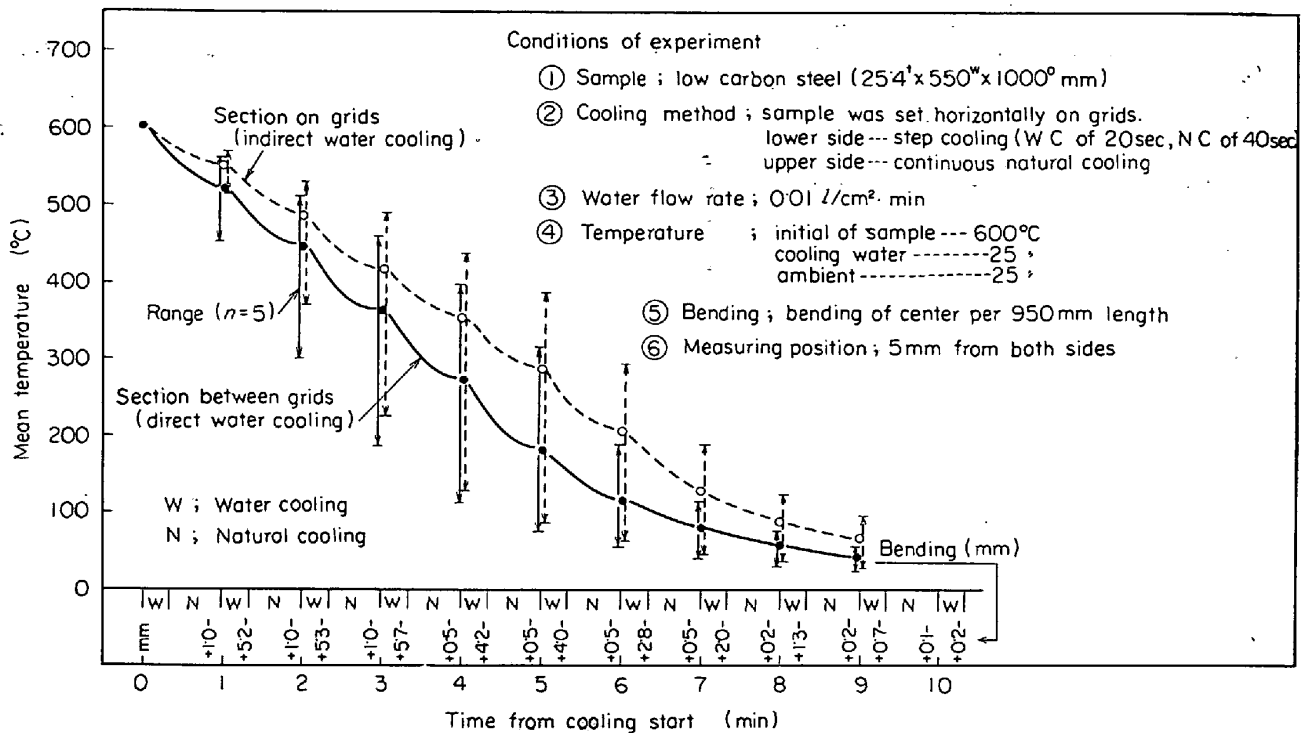


Fig. 5: Experimental result of step cooling.

リッドの部分は冷却効果が小さいから、鋼材内の温度分布が乱れ、鋼材は熱応力で歪む。この歪みが、弾性限界を越すと、塑性変形が生じ、永久歪みとなる。ところが、階段冷却を行なうと、温度差それ自体が小さいうえに（水冷期間の長さにも依存するが）、水冷期間に生じた温度分布の乱れが、空冷期間にはほぼ回復するため、熱応力による歪みが軽減され、塑性変形を起こす確率が減少する。Fig. 4 の温度差と Fig. 5 の曲がりがよく対応していることは、熱応力による歪みが、温度分布の均一化に応じて減少することを実証するものと考えられる。

4.2 冷却効果の制御

水冷の効果を制御するには、噴射水量を制御するのが簡単かつ確実である。しかし、熱処理以外の単純冷却（温度降下が主目的）の場合には、短期間の微分的冷却効果より、むしろ、長期間の平均的冷却効果が重要である。この平均的冷却効果を制御する方法の一つに、階段冷却法がある。すなわち、Fig. 6 に示すように、空冷期間の長さを適当に選ぶことによって、平均的冷却効果の制御が可能になる。

4.3 ノズルの閉塞防止

鋼材を均一に冷却するには、水量の少ないノズルを干

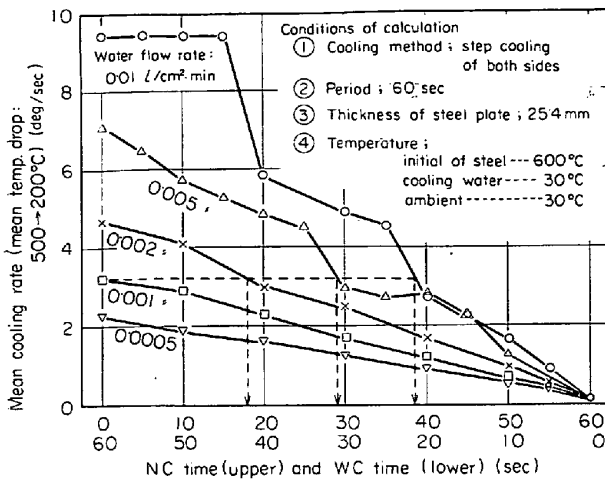


Fig. 6. Effect of natural cooling interval during step cooling on cooling rates (one dimensional calculation).

鳥に配置するのが望ましい。しかし、小水量ノズルは、噴出孔が小さいため、冷却水中の混入物によって閉塞する確率が高い。ノズルが閉塞すると、冷却効果が不均一になる。閉塞の確率は、噴出孔の大きさに逆比例するから、現場装置としては、閉塞防止の観点から、噴出孔を大きくしたいわけである。ところが、このようにすると、噴出水量が多くなってしまう。この問題の解決法の一つとして、階段冷却法がある。たとえば、Fig. 6 から、平均的冷却度 3.2 deg/sec を得るには、

噴射水量	空冷期間	水冷期間
0.001 l / cm ² min	0 sec	60 sec
0.002 "	18 "	42 "
0.005 "	29 "	31 "
0.01 "	39 "	21 "

の階段冷却法を採用すればよい(ただし、週期は 60 sec)。噴出圧力が等しければ、噴射水量 0.001 と 0.01 l / cm² · min の場合、ノズル孔断面積の比は、約 1 : 10 になる。すなわち、階段冷却法を用いると、閉塞確率のより小さいノズルの使用が可能になるわけである。

4.4 噴射水量と所要水量

階段冷却によって、鋼材を一定温度降下させるに要する所要水量と単位時間当たりの噴射水量(以下噴射水量と記す)との関係を調べた。Fig. 7 に示すように、噴射水量が一定の場合、空冷期間が長くなるにつれて、所要水量は減少する。これは、空冷期間に放熱する分だけ、水冷時間が短縮されるためである。

次に、空冷期間の長さが同じ場合、鋼材を一定温度降下させるに要する所要水量は、噴射水量に比例して増大する。これは、噴射水量 W と熱伝達率 α の間に、

$$\alpha \propto W^{0.6 \sim 0.9} \quad (2)$$

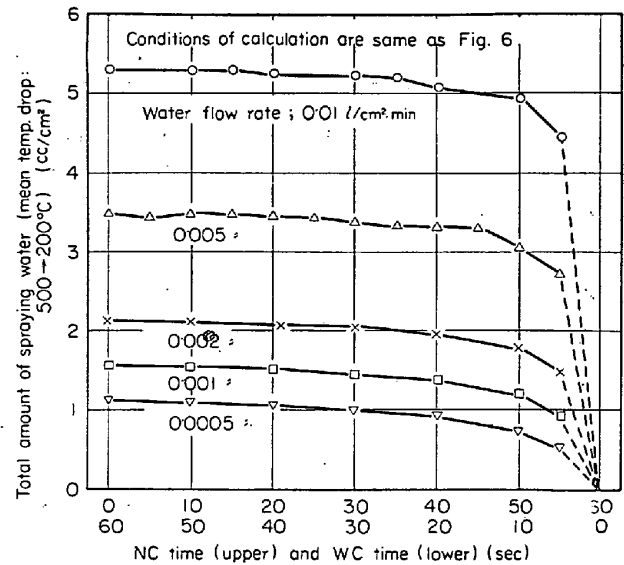


Fig. 7. Relation between natural cooling interval during step cooling and total amount of spraying water.

の関係があり、しかも、 α が 2 倍になつても、鋼材からの放熱量は 2 倍以下だから、結局、噴射水量が 2 倍になつても、温度降下量は 2 倍にはならないわけである。以上のように、鋼材を一定温度降下させるとき、噴射水量を多くすることは、所要時間の短縮にはなるが、所要水量は増大する。

4.5 週期と所要時間

階段冷却によって、鋼材を一定温度降下させる場合について、週期と所要時間の関係を調べた。水冷と空冷期間が等しいときの計算結果を Fig. 8 に示す。この図から、所要時間は、週期が長くなるにつれて振動し、ついに、連続水冷の値に一致することがわかる。振動の理由を、噴射水量 0.002 l / cm² · min の場合について検討す

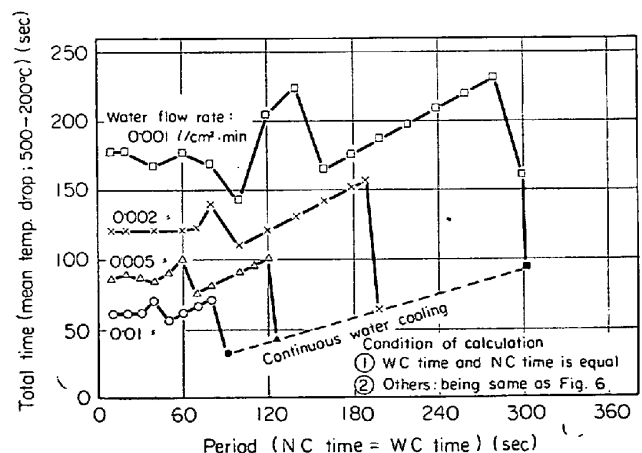


Fig. 8. Relation between period of step cooling and total time for constant temperature drop of steel plate.

る。平均温度が、初期温度 (600°C) から 500 および 200°C まで降下するに要する所要時間と繰り返し数は、

週期	500°C	200°C
10 sec	62.2 sec (7 回目水冷)	183.8 sec (19 回目水冷)
60 "	62.7 " (2 " ")	184.6 " (4 " ")
80 "	35.5 " (1 " ")	175.5 " (3 " ")
100 "	35.5 " (1 " ")	146.2 " (2 " ")
190 "	35.5 " (1 " ")	193.2 " (2 " ")
199 "	35.5 " (1 " ")	99.3 " (1 " ")

である。週期 80 sec の所要時間が長いのは、1 回目の水冷で 500°C に達するが、200°C には 3 回目の水冷で達するためである。週期 100 sec の所要時間が短いのは、2 回目の水冷で 200°C に達するからである。また、週期 100~198 sec の間では、1 回目の水冷で 500°C、2 回目の水冷で 200°C に達するから、週期すなわち空冷期間が長くなるにつれて、所要時間も長くなる。週期が 199 sec 以上になると、1 回目の水冷で 200°C に達するから、所要時間は、連続水冷の値に一致する。

5. 結 言

単純化した計算と実験によつて、水冷と空冷を繰り返す階段冷却法について調べた結果、

(1) 本冷却法によつて、水冷による鋼材の曲がりや

歪みを、ある程度まで防止できること、

(2) 本冷却法によつて、平均的冷却効果を、ある程度まで制御できること、

(3) 本冷却法によつて、スプレノズルの閉塞を、ある程度まで防止できること、

(4) 他の条件が等しい場合、鋼材を一定温度降下させるに要する所要水量は、単位時間当たりの噴射水量に比例すること、

(5) 水冷と空冷期間が等しい場合、鋼材を一定温度降下させるに要する所要時間は、週期の長さによつて相違すること、

などがわかつた。

おわりに、本研究を遂行するにあたり、有益な助言をいただいた八幡製鉄所技術研究所吉田秋登、島田道彦、関野昌蔵氏および発表を許可された八幡製鉄(株)に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 三塚: 鉄と鋼, 54 (1968) 14, p. 1457
- 2) WARREN, H. GIEDT (横堀, 久我訳): 基礎伝熱工学, (1960), p. 190 (丸善)
- 3) M. MIKHEYEV (内田, 鎌田訳): 基礎伝熱工学, (1966), p. 63 (東京図書)