

論 文

UDC 621.785.084.063.3 : 669.14-418-156.33 : 620.191.35

冷延ストリップの水焼入技術の開発*

中岡 一秀**・荒木 健治***・久保寺治朗****

Development of Water Quenching Technique for Cold Rolled Steel Strip

Kazuhide NAKAOKA, Kenji ARAKI, and Haruo KUBOTERA

Synopsis:

The cause of deterioration in strip shape in the course of water quenching has been made clear, and the water quenching technique for steel strip has been developed. The deterioration of strip shape results from the uneven disappearing (particularly from the edge of strip) of vapour film on strip surface. In order to improve the shape, it is necessary to quench the strip under such a condition that vapour film is not formed. This condition can be realized by spraying water to the strip uniformly with the impinging pressure of over 15 cm aq. until the strip is cooled below the transition temperature from film boiling to nucleate boiling. This condition of jet stream of water can be industrialized by means of an appropriate arrangement of slit nozzles and the suitable control of water pressure in headers. The most important point in the nozzle arrangement is to make the intervals between nozzles less than those between nozzle plates and strip. The shape of quenched sheet can be improved to the same level as that of shipped cold rolled sheet through the appropriate control of quenching conditions.

1. 緒 言

連続焼鈍法によるプレス加工用軟質鋼板を製造するためには、この連続焼鈍法は過時効処理を含むものである必要がある。しかし、単に、従来のぶりき用連続焼鈍に過時効処理を付加したのでは、焼鈍時間が非常に長くなるので、工業的には望ましくない。筆者らは全焼鈍時間を従来のぶりき用連続焼鈍法と大差のないものとするを目標に、過時効処理の短時間化について検討を行なった結果、この目標を達成するには、過時効処理前にストリップを $200^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 以上の冷却速度で急冷する必要があることを知った。これを熱伝導率で見れば、 0.8 mm 厚のストリップの場合で、約 $300\text{ kcal}/(\text{m}^2\text{C hr})$ 以上が必要ということになる。この条件を満足する冷却法はいろいろと考えられるが、工業化の確実性、安価性、安定性を考慮した場合、もつともてつとり早い急冷方法は

水焼入法である。しかし、水焼入法は、焼入れることにより、ストリップの形状がきわめて悪くなるという欠点を有する。この形状の一例を Photo. 1 (a) に示す。この試料は 0.8 mm 厚 $\times 900\text{ mm}$ 幅 $\times 2000\text{ mm}$ 長の矩形冷延鋼板を、 700°C に加熱し、ついで、 20°C の静水中に焼入れたものである。この水焼入板には、大きくて不規則なピッチの耳波とともに、板面全体にかなりの凹凸が存在しており、その程度は、工場内を通常流れているストリップよりはるかに悪い。したがって、製品形状上はもちろん、連続焼鈍の操業上においても、この形状の悪影響が現われるものと予想される。

冷延ストリップの水焼入技術に関しては、*H. L. TAYLOR*³⁾、*C. P. BRITAIN* ら²⁾ の硬質鋼帯を製造することを目的とした技術はあるが、過時効処理を含む連続焼鈍法が目的とする形状、表面に対する要求の非常に厳しいプレス加工用軟質冷延鋼板の製造への適用を考えた場合

* 昭和49年11月本会講演大会にて発表 昭和50年7月31日受付 (Received July, 31, 1975)

** 日本鋼管(株)技術研究所 工博 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

*** 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., Minamiatarida-cho Kawasaki 210)

**** 日本鋼管(株)技術研究所 (現在 京浜製鉄所) 工博

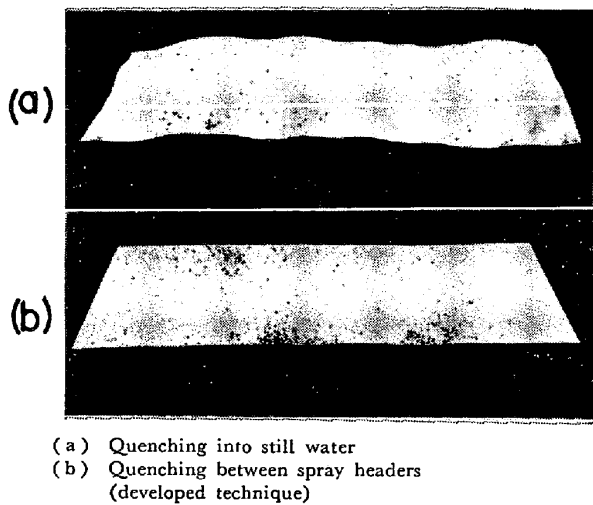


Photo. 1. Shape of water quenched sheets.

には、それらの技術は十分とはいえない。

そこで、水焼入れした際の形状不良の原因を根本的に解明し、ついで、この調査により得られた知見にもとづき、ストリップを形状よく水焼れする技術を開発することを試みた。

2. 基礎的検討

2.1 形状不良の発生原因の解明

形状不良の原因は、不均一冷却に起因する熱応力によるものであることは容易に推察される。他方、高温の物体を水中に焼入れた場合、よく知られているように、物体表面に蒸気膜の発生、消滅現象が起こる。そこで、「不均一冷却と蒸気膜の発生、消滅過程との間に、何らかの関係があるはずである」と考え、この考えを確かめるため、700°Cに加熱した矩形冷延鋼板を透明水槽に満たした水あるいはエタノール中に焼入れし、鋼板表面における蒸気膜の発生、消滅状況と、板面内に発生する温度の不均一性の関係を調査した。試料の寸法は0.8mm厚×300mm幅×400mm長であつた。また、測温のための熱電対の取付位置は、試料のエッジ部とセンター部であつた。エタノール焼入れを追加した理由はエタノールの方が水より蒸気圧が高いので蒸気膜を発生しやすく、さらに冷却能も弱いので現象が緩慢に推移するので、現象を観察しやすいと考えたからである。

Fig. 1 に水中に、Fig. 2 にエタノール中に焼入れた場合の、鋼板温度およびエッジ部とセンター部に生ずる温度差の推移を、蒸気膜の発生消滅過程と対比させて示す。両者の挙動はだいたい同じであるが、細部は異なる。水中に焼入れた場合につき、観察結果をまとめれば次のようになる。

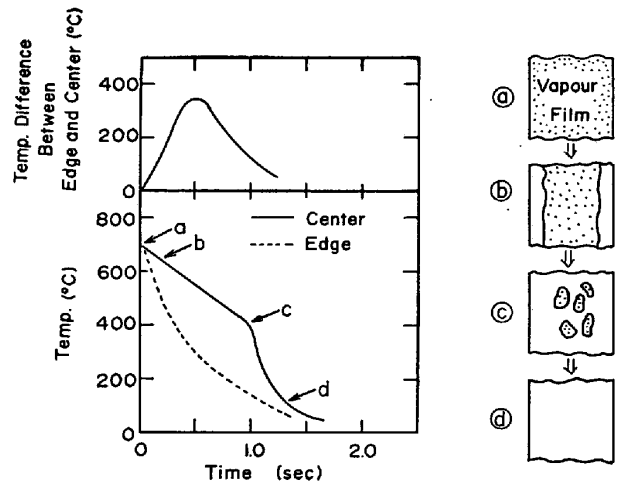


Fig. 1. Cooling curves of water quenched sheet and the temperature difference between the center and the edge of the strip in course of cooling. Procedure of vapour film disappearing is shown also schematically in relation to cooling curve. (water temp. 50°C)

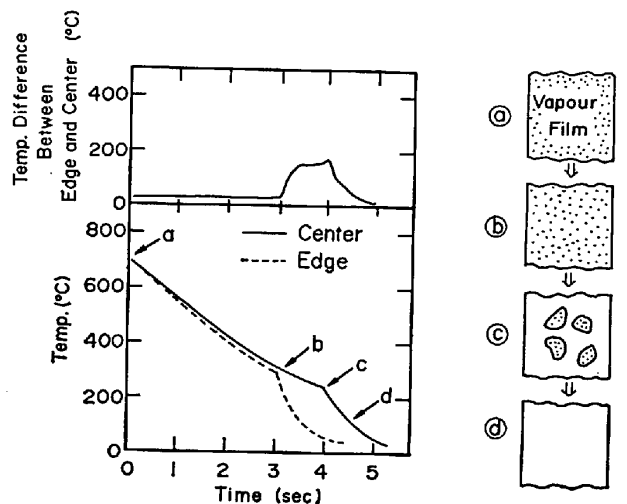


Fig. 2. Cooling curves of ethanol-quenched sheet and the temperature difference between the center and the edge of the strip in course of cooling. Procedure of vapour film disappearing is shown also schematically in relation to cooling curve. (ethanol temp. 20°C)

(a) 焼入れの瞬間、板は全面、蒸気膜で覆われるが
(b) 次の瞬間、エッジ部での蒸気膜の発生が停止し同時に、エッジ部は急速に冷却が進み、センター部との間に約 350°C の温度差が生じる。

(c) 冷却の進行にともない、蒸気膜の発生していない領域が、エッジ部からセンター部へと拡がるとともに、センター部でも蒸気膜がまだらに消滅しはじめる。

(d) やがて、板幅全体にわたり濡れた状態になり、冷却が急速に進行する。

水中に焼入れた場合と、エタノール中に焼入れた場合の現象の差異は次の点である。

(イ) ④より⑤への遷移が、水焼入れではほとんど瞬間的であるのに対し、エタノール焼入れではかなりの時間遅れがある。(約 3sec)。結果として、エッジ部とセンター部の間の温度差のピーク値が両者では異なり、前者では 350°C であるのに対し、後者では 120°C である。

(ロ) センター部の蒸気膜が消滅しはじめる温度⑥は水焼入れでは 400°C であるのに対し、エタノール焼入れではそれより低く 225°C である。

(ハ) ③から④までの所要時間は、水焼入れで約 1.5 sec、エタノール焼入れで約 5 sec である。

焼入板の形状に関しては、水焼入れ板は全体が大きく歪んでいるのに対し、エタノール焼入れ板では形状不良はほとんどみとめられない。

一方、一般に高温の物体を水中に焼入れた場合の伝熱は、よく知られているように、Fig. 3 のような形をとる⁴⁾。AB が強制核沸騰の領域、CD が膜沸騰の領域、BC が遷移領域である。冷却が進むにつれ伝熱量は DCBA のように変化するのであるが、注目すべき点は、膜沸騰状態より核沸騰状態に移ると伝熱量が急激に増加し、しかも、その遷移がせまい温度範囲 (CB) 内で起こるという点である。したがって、冷却の過程で、膜沸騰より核沸騰への遷移が、鋼板の表面で同時に起こらず、位置により時間差があると、先に遷移した部分と後で遷移した部分との間にかなりの温度差が生じることになる。

この沸騰伝熱に関するよく知られている事実にもとづ

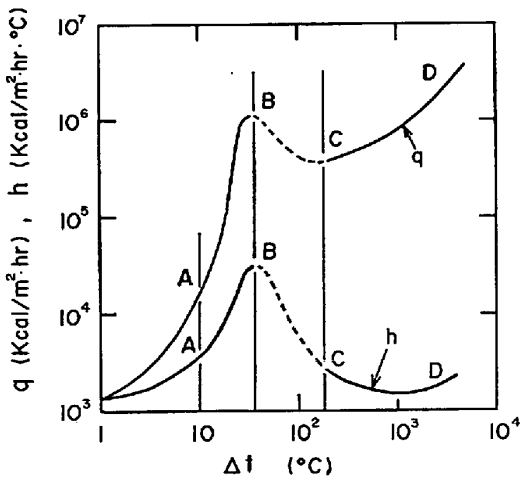


Fig. 3. Typical curve of boiling heat-transfer⁴⁾.

- AB; nucleate boiling
- BC; partial film boiling
- CD; film boiling
- Δt ; temperature difference between quenchant and material

けば、Fig. 1, Fig. 2 の実験結果は容易に説明がつく。すなわち、水焼入れでエッジ部がセンター部に比べ冷却がはるかに速く進むのは、エッジ部の方が早々と膜沸騰状態から核沸騰状態への遷移が起こり、高い熱伝達率のもとで冷却されるからであると考えればよい。また、エタノール焼入れで、エッジ部とセンター部の間の冷却速度の差が、冷却がかなり進むまで認められないのは、この場合には、かなり低温 (約 300°C) までエッジ部が膜沸騰状態におかれるからである。

水焼入れ板の耳波の生因は⑤→⑥の段階で、エッジ部とセンター部の間に約 350°C もの温度差を生ずることによると考えればよい。このことは上記の温度差にもとづく熱応力の点からも、この熱応力を打消そうとして生ずる熱歪の点からも証明できる。次にこの点に触れてみる。

もし拘束がないなら、温度差 350°C に相当する分だけ、エッジ部の方がセンター部より多く熱収縮するはずであるが、実際にはセンター部の拘束があるため、その収縮が抑えられ、一時的にエッジ部に引張りの熱応力が発生する。この応力は、耳波となるエッジ部の幅が全板幅に比べ十分にせまいので次式で近似される⁶⁾。

$$\sigma = \alpha E \Delta T \dots\dots\dots (1)$$

ここで σ : 熱応力

α : 熱膨張率

E : ヤング率

ΔT : エッジ部とセンター部間に発生する温度差

(1)式によれば、水焼入れ板のエッジ部に温度差のピーク時に生じる熱応力 (σ) は、 $\alpha = 13.6 \times 10^{-6}$ (20~400°C の平均値)、 $E = 1.8 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ (200°C での値)、 $\Delta T = 350^\circ\text{C}$ とすると、 86 kg/mm^2 にもなる。これは軟鋼の降伏応力 (例えば、200°C では 17 kg/mm^2 程度と推定される) をはるかに越える値である。したがってこの熱応力を緩和するため、エッジ部に伸びの塑性変形が導入されるのである。

耳波となる熱歪量 (ϵ_p) (エッジ部の塑性伸び歪量) はセンター部とエッジ部の熱収縮量の差 ϵ_t から弾性変形分 (ϵ_e) を引いたものになる ($\epsilon_p = \epsilon_t - \epsilon_e$)。 $\epsilon_t = \alpha \Delta T$ で与えられるので、 α , ΔT については、前記の値を用いると、 $\epsilon_t = 4.76 \times 10^{-3}$ となる。また、 $\epsilon_e = \sigma_{yp} / E (\sigma_{yp}$: 降伏応力) で与えられるので、 σ_{yp} として、前述の 200°C での推定値 17 kg/mm^2 を用いれば、 $\epsilon_e = 0.94 \times 10^{-3}$ となる。したがって、 $\epsilon_p = 3.82 \times 10^{-3}$ となる。この値は大きな耳波を発生させるのに十分な大きさであるとともに水焼入れ板の耳波の実測値、 ϵ_p で約 3×10^{-3} (形状指数で約 3000 μ) と非常によい一致を示す (付記 1 参

照).

板面全体に発生する凹凸の原因は、㊸の段階で蒸気膜がまだらに消滅することによると考えられる。つまり、蒸気膜が残っている領域と、消滅した領域とで、伝熱量が異なるため、一時的にそれら間で温度差が生じ、熱応力が発生するからである。

エタノール焼入板の方が、水焼入板より形状がはるかによいのは、温度差のピーク値が小さいこと、および、ピーク点での板温が低いので、板の変形抵抗が水焼入の場合より高くなっていることによると考えればよい。

2.2 形状改善のための基本的考え方

耳波が生じないようにするには、エッジ部とセンター部間に生ずる温度差 (ΔT) を小さくし、それによる熱応力が鋼板の降伏応力 (σ_{yp}) を超えないようにすればよい。この条件を満足する ΔT は、(1)式より、 $\sigma_{yp}=17 \text{ kg/mm}^2$ の場合で、 $\Delta T < 70^\circ\text{C}$ と算出される。いいかえれば、 $\Delta T < 70^\circ\text{C}$ なら、耳波はまったく発生しないことになる。しかし、エタノール焼入の場合において、 ΔT のピークが 120°C であるにもかかわらず、形状が良好なことを考慮すれば、 $\Delta T < 100^\circ\text{C}$ が保証できれば実質的には支障はないと思われる。

水焼入板の形状不良は、既述のように、耳波のほかに中央部の凹凸があるが、耳波の原因となる温度不均一の方が、凹凸の原因となるそれより大きいことが、2.1での観察から容易に推測できる。したがって、耳波が発生しない程度にまで、エッジ部とセンター部間に生ずる温度差を小さくするようにすれば、必然的に凹凸も生じなくなると考えることができる。そこで、形状改善の主眼を大筋においては、耳波改善におくことにした。

2.1で述べたように、不均一冷却の原因は、蒸気膜が不均一に消滅するからである。したがって、水焼入板の形状を改善するための対策としては、

(イ) エタノール焼入の場合のように、板全体を一様に蒸気膜が覆う状況(膜沸騰)下で冷却する。

(ロ) 蒸気膜を強制的に除去し、板全体が一様に濡れに近い状態(対流伝熱ないし核沸騰)になるようにして冷却する。

の二つが考えられる。これらについて検討したところ、噴流を板に衝突させることにより、(ロ)を実現することが可能なことを見出した。

そこで、蒸気膜を除去するために必要な噴流の衝突圧(以後、噴流圧と略称する)に関して、より定量的なデータを得るため、熱電対をスポット溶接した 0.8 mm 厚(板面表面に溶接し、その上を耐火物ペーストで覆ったので実質的には 1.6 mm 厚となる) $\times 150 \text{ mm}$ 幅の鋼板

を 700°C より噴流中に焼入れし、板面内に発生する温度の不均一性が、噴流圧とどのような関係にあるかを調査した。Fig. 4に実験装置の略図を示す。熱電対の溶接位置は、センター部、幅方向 $1/4$ の位置、エッジ部より 15 mm の位置の3点であるが、センター部のみ実際の温度を測定し、他の2点はセンター部との温度差で検出した。噴流圧は板面に垂直な 3 mm 径の穴より取出し、水柱単管方式で測定した。Fig. 5に生データの一部分を、Fig. 6に噴流圧と板面内温度の不均一性との関係を示す。噴流圧の増加とともに、温度の不均一性が急激に減少し、 15 cmAq. (水柱)以上では不均一量は 100°C 以下になることがわかる。したがって、蒸気膜が発生しないような温度、つまり、約 400°C (Fig. 1) 以下に冷却されるまで、常に 15 cmAq. 以上の噴流圧が確保できるよ

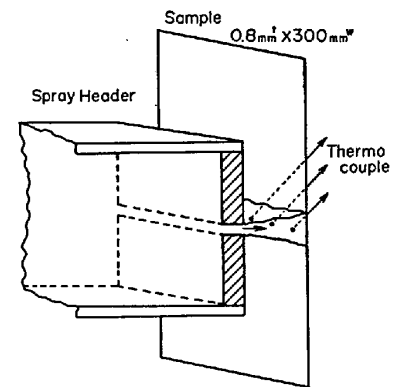


Fig. 4. Experimental apparatus for measurement of relationship between the impact pressure of sprayed water and uniformity in temperature across sheet width.

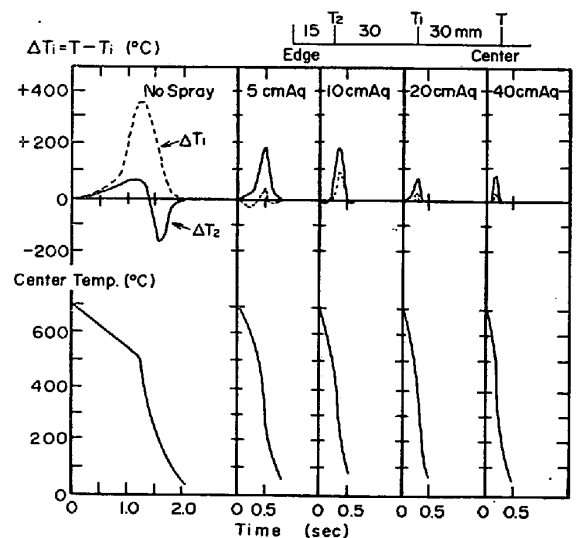


Fig. 5. A part of directly observed data on the effect of impact pressure of sprayed water on the temperature difference along the width of the strip and the cooling curve. (water temp. 50°C)

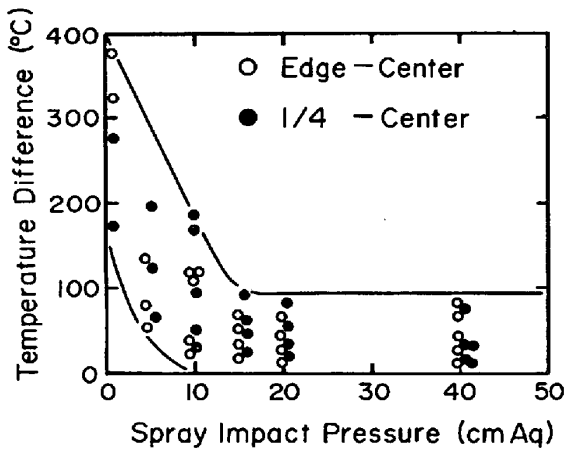


Fig. 6. Effect of impact pressure of sprayed water on the decrease in temperature difference between edge and center and between 1/4 part and center.

うな条件の噴流中で焼入を行なえば、板面内の温度の不均一性も 100°C 以下に納まり、良好な形状の水焼入板が得られると推察される。

3. 形状改善スプレー技術の具体化

2.2 で述べた噴流条件を確保するためには、当然、ストリップの両面に対して、冷却水を噴射することになるのであるが、ここでは、要求される噴流条件をいかにして具体化したかを述べる。重点的に検討を行なった条件はノズル配列とスプレー条件である。ノズル形状としてはストリップの幅方向にのびたスリットノズルを採用することを前提としたが、幅方向に均一な冷却を計ることが至上であるので、この前提は当然といえる。

3.1 噴流圧分布測定によるノズル配列に関する検討

好ましい噴流とは、15 cm Aq. 以上の噴流圧が、ストリップの進行方向に間断なく得られる噴流のことである。スリットのオリフィス形状、スリット間隔、スリットとストリップ間の間隔が噴流圧分布に影響をおよぼすわけであるが、スリットのオリフィス形状に関しては、分布とは別の因子により決定される。それは噴流形状の安定性と噴流の有効性の点からである。諸調査の結果、オリフィス形状としては、スリットの間隙 (d) 2 mm, 奥行 (h) 10 mm の矩形を採用した。これ以下の d は、噴流が水中を走行する間の減衰がきわめて大きくなるので、好ましくない。これ以上では、噴射水量がふえるので、水の有効利用の点から好ましくない。噴流の形状は板状であるが、 h が小さくなると (したがって、 h/d が小さくなると)、形状が安定しなくなる。

噴流圧分布の測定装置の略図を Fig. 7 に示す。試料

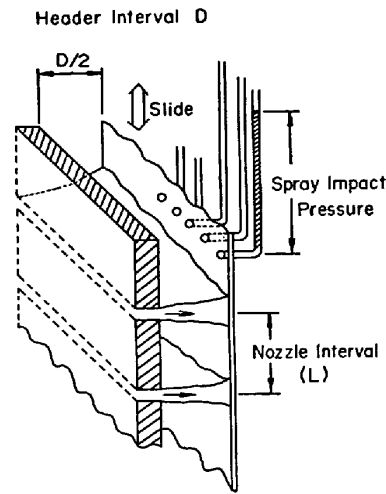


Fig. 7. Apparatus for measuring the distribution of impact pressure of sprayed water.

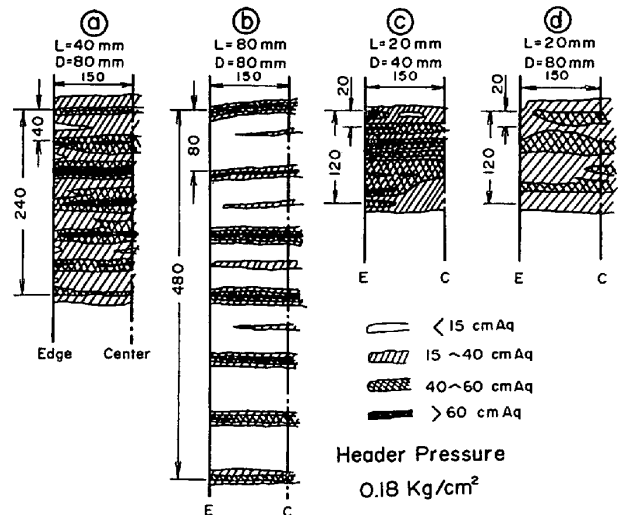


Fig. 8. Distribution of impact pressure for the four typical combinations of header interval (D) and nozzle interval (L).

を上下に移動させながら、試料の幅方向に配した 2 mmφ の孔から噴流圧を取出し、単管式水柱計でそれを測定する仕組である。Fig. 8 に種々のスリット間隔 (L)、ヘッダー間隔 (D) (ノズル板とストリップ間の間隔の 2 倍) に対する噴流圧分布を、Fig. 9 にそれらの分布状態を整理して示す。Fig. 8 の各図より、全般的傾向としては、上下端の噴流の噴流圧が中央部の噴流の影響により弱められることがわかる。細部については、 L , D の値により、分布は複雑に変化する。傾向をまとめれば次のようである。

(イ) L が大きく、 D が小さくなれば (Fig. 9 で A 線の左上側)、噴流間に噴流圧が、15 cm Aq. 以下になる領域、つまり、噴流の谷間が現われる。Fig. 8 ⑥はこの領域内の噴流圧分布の一例であり、条件は⑥点に対応す

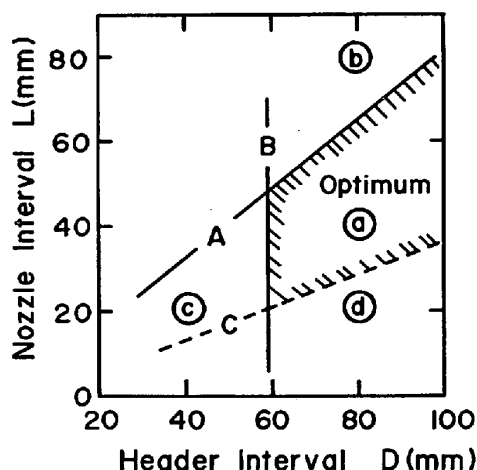


Fig. 9. Optimum combination of header interval (D) and nozzle interval (L).

る。

(ロ) D が 60 mm 以下 (Fig. 9 で B 線の左側) になると、上端部および下端部の噴流圧が、中央部の噴流の影響により、幅方向に均一でなくなり、エッジ部の噴流圧がセンター部よりかなり強くなる。このことは、幅方向を均一に冷却するという目的にとつては好ましくない。

Fig. 8 ㉔はこの領域の㉔点での噴流圧分布である。

(ハ) L が小さくなれば (Fig. 9 で C 線より下側)、個々の噴流が極度に干渉し合い、お互いに噴流圧を弱め合う。このことは、形状に対しては悪影響はないだろうが噴流の有効利用の点からは好ましくない。Fig. 8 ㉕はこの領域の㉕点での噴流圧分布である。

結局、適正な条件とは、噴流圧分布的には、A 線の右下側で、かつ、B 線の右側の領域ということになる。さらに、噴流の有効利用を考えれば、その中でも C 線の上側の領域が望ましいということになる。Fig. 8 ㉖がこの領域内の㉖点での噴流圧分布である。全スプレゾンにわたり、噴流圧が 15 cmAq. 以下の部分がなく、幅方向に対しても、比較的均一な噴流圧分布が得られている。

D の上限に関しては、噴流圧分布測定上は、特にこれを決定するような調査は行なわなかつた。この理由は、水中でスプレーを行なつた場合には、噴流の勢いの水中を走行する間の減衰が大きいので、前記の 3 条件を満足する範囲内であるなら、噴流の有効利用の点から、工業的には、 D をできるだけ小さくするのが望ましいからである。

以上のノズル配置に関する検討は、一定のスプレーヘッダー内水圧のもとで行なつた。しかし、調査結果をスムーズに実操業に適用するためには、噴流圧分布におよぼすヘッダー内水圧の影響も把握しておく必要がある。

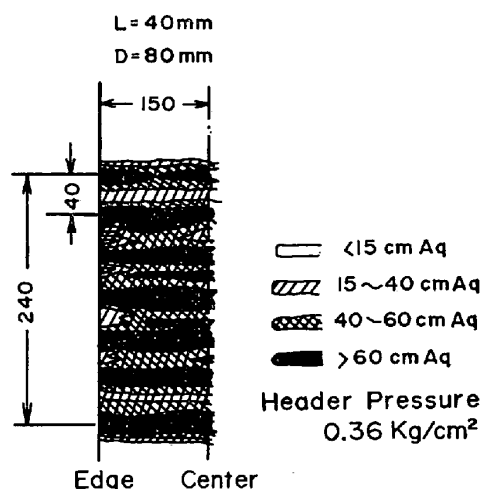


Fig. 10. Distribution of impact pressure under higher header pressure for the same combination of D and L as that of Fig. 8 ㉖.

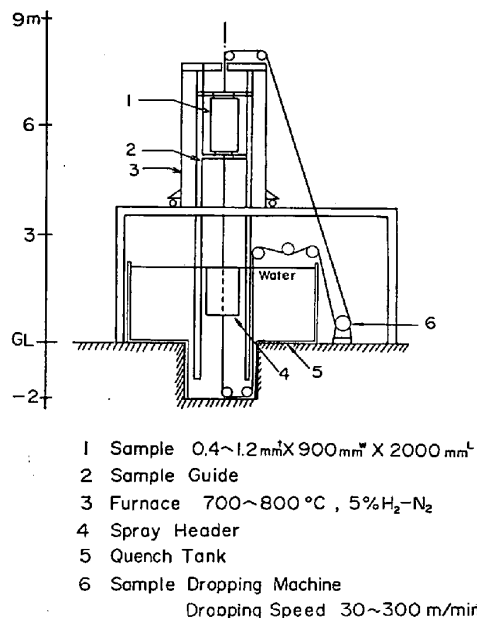


Fig. 11. Experimental plant simulating the water quenching of wide steel strip.

というのは、実操業では、適正スプレー条件の決定は、 D の決定、 L の決定、ついでヘッダー内水圧の調節の手順で行なわれるからである。

Fig. 10 に、Fig. 8 ㉖と同じノズル条件 ($L = 40$ mm, $D = 80$ mm) で、ヘッダー内水圧を 2 倍にした場合の噴流圧分布図を示す。ヘッダー内水圧は圧の分布には影響をおよぼさず、その全体的レベルを変えるだけであることがわかる。

3-2 水焼入実験設備を用いてのスプレー条件と形状の直接的対応づけ

水焼入技術の工業化を円滑に進めるためには、噴流圧分布に関する検討だけでは不十分である。スプレー条件

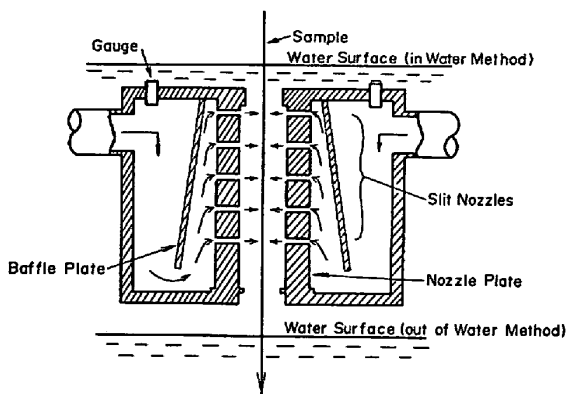


Fig. 12. Cross sectional representation of water-spraying headers.

と形状の直接的対応づけがやはり必要である。

この目的を果すため、Fig. 11 に示すような水焼入実験設備を建造した。

試料1は試料枠に固定されており、電熱炉3で約700°Cに加熱された後、試料昇降機6により所定速度で、クエンチタンク内に設けられているスプレーヘッダー4の間に焼入れられる。また、試料寸法は0.8mm厚×900幅×2000mm長を基本とした。Fig. 12 にスプレーヘッダーの断面図を示す。ヘッダー内に導入された冷却水はそらせ板により矢印のように迂回を強制された後、スリットノズル群より、焼入板の幅方向に均一な流れとして噴射される。ノズル板は複数枚に分割されており、必要に応じ、スリット間隔、方向を任意に選択できるようになっている。タンク内に満される水量を変えれば、水面の位置が変わる。水面をスプレーヘッダーより上にすれば水中スプレーとなり、下にすれば空中スプレーとなる。調査の主体は水中スプレーにおいたが、この空中スプレーによる実験も、参考までに一部行なった。噴流圧分布上は、両スプレー方法間に大差のないことが一応確認されている。

板の形状とスプレー条件の関係を的確に把握するためには形状を定量化する必要がある。そこで、エッジ部の平坦度を表示する尺度として、付記1に述べるような形状指数(SI)を導入した。エッジ部の平坦度(耳波)にのみ着目し、センター部の凹凸を測定から除外したの

は、2.2 で述べたように、耳波の方が凹凸よりコントロールが難しく、したがって、耳波をなくすれば必然的に凹凸もなくなるからである。SIは工場検査の耳波等級と非常によく対応を示す(Table 1)。したがって、SIが100 μ 以下のものが得られれば、A級であるので、実用上まず支障はないと考えてよい。なお、700°Cに加熱した鋼板を噴流のない水中に焼入れた場合(Photo. 1(a))のSIは約3000 μ である。

最上噴流が板面に対し垂直だと、板面で所定の噴流圧を得るためヘッダー内の水圧を上げると、噴流が板面に衝突した後、上方に大きく反跳するようになる。この反跳噴流は、冷却初期における幅方向不均一冷却を招くので好ましくない。そこで、最上スリットを45°下向きにしそのスリットから噴射される噴流により、下方から反跳してくる水流を強制的に抑えることを考えた(Fig. 13)。下向の角度として45°を選んだ理由は、簡単な実験により、噴流が板面に衝突した後、一方向へのみ進行するようにするには、噴流と板との角度を45°以下にする必要があることがわかったからである。Fig. 14 にこの対策の効果を示す。最上スリットが水平スリットの場合には、反跳が大きく、SIを目標値100 μ 以下にすることができないばかりでなく、ヘッダー内水圧が0.18 kg/cm²を超えると、実験すら不可能になる。下向45°スリットを使用することにより、形状は明らかに改善され、100 μ

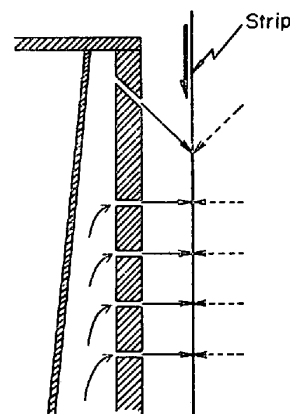


Fig. 13. Nozzle arrangement with top slit inclined downwards by 45 degree.

Table 1. Relation between shape index (SI) and the rank of edge wave.

		The rank of edge wave			
		A	B	C	D
SI(μ)	Measurement	—	252, 406	686, 1473	1945, 2900
	Range	<100	200~500	600~1500	1900~3000

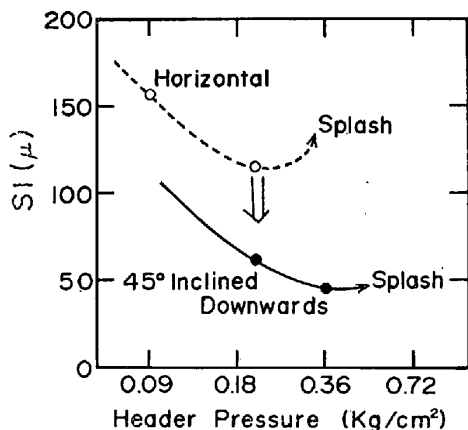


Fig. 14. Advantageous effect of inclining the top slit downwards by 45 degree on the improvement in the shape of quenched sheets. (sample dropping speed; 100m/min, nozzle arrangement; (2) 20 (2) 20(2) 20(2) 20(2) 20(2) 20(2) and (5) 80(2) 20(2) 20 (2) 20 (2) 20(2) 20(2) 20(2), header interval D ; 80 mm, water temp.; 50°C, spraying method; in water)

Symbolizing of nozzle arrangement $\langle a \rangle b(c)d(c)$ means that top slit is inclined downwards by 45 degree and its opening is a mm. 2nd and 3rd slits are horizontal and their openings are c mm, the interval between top and 2nd slit is b mm, and the interval between 2nd and 3rd slit is d mm.

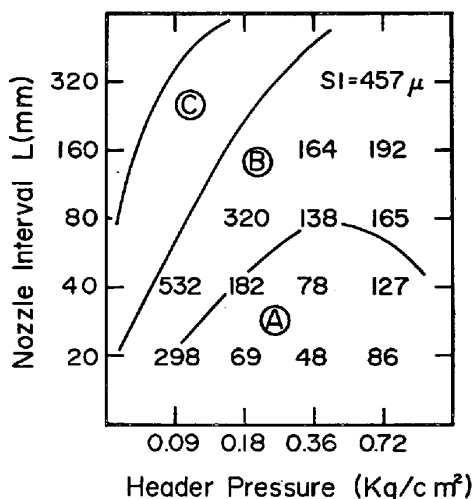


Fig. 15. Effect of nozzle interval L and water pressure in spray headers on the shape of quenched sheets (SI).

A, B, C; rank of edge wave on table 1. (sample dropping speed; 100m/min, nozzle arrangement; $\langle 5 \rangle 80(2) \times (2) \times (2) \dots (2) \times (2)$ nozzle intervals (\times) and number of nozzles are variable, header interval D ; 80 mm, water temp.; 50°C, spraying method; in water)

以下の SI が余裕をもって達成できるようになる。(Fig. 14 および以後の実験結果において、簡略化のため、ノズル配置を記号で表わすが、この意味は付記 2 で示されている。)

Fig. 15 に形状におよぼすヘッダー内水圧とスリット間隔 (L) の影響を示す。図中の数字は SI である。また、A, B, C は耳波等級である。この実験では、ヘッダー間隔 (D) が 80 mm であるので、スリット間隔 (L) が 40 mm と 20 mm の場合が、3.1 の噴流圧分布の測定より、蒸気膜除去に対して好ましいと推察された条件下に対応する。予想どおり、この条件下では、適正なヘッダー内水圧を選ぶことにより、耳波等級 A 級 ($SI < 100 \mu$) の形状が得られるようになる。低水圧側で形状が悪くなるのは、15 cm Aq. 以上の噴流圧が確実に得られなくなるからである。高水圧側で悪くなるのは、最上スリットを下向 45° にしているとはいえ、やはり噴流の反跳が大きくなるからである。各噴流が強くと干渉し合い、噴流圧の谷間が全く消えている $L = 20$ mm の方が、谷間の残っている $L = 40$ mm の場合の方より (Fig. 8), 形状が良好なのは興味深い。このことは、噴流圧分布の測定では、 L を 40 mm にすれば、谷間でも蒸気膜の除去に必要な噴流圧は確保できるという結果になっているが、実際には、蒸気膜が完全に除去されない谷間が一部に (特に上部で) 残っていることによると思われる。形状的には、確かに $L = 40$ mm より $L = 20$ mm の方がよいが、40 mm の場合でも、100 μ 以下の SI が得られるので、3.1 でも述べたように、スプレーの効率を考えた場合には、工業的には、 $L = 40$ mm の方を選ぶべきと思われる。Fig. 15 は水中スプレーの場合の結果であるが、空中スプレーの場合でも同様の結果となる。

Fig. 16 に形状におよぼす噴流水温の影響を示す。水温が 50°C を超えると形状が急激に悪くなる。これは 50°C を超えると板表面に蒸気膜が非常に発生しやすい状態になり、噴流程度では蒸気膜が完全には除去できなくなるためと思われる。

Fig. 17 に形状におよぼす試料の降下速度 (実ラインではライン速度) の影響を示す。水中式、空中式をとわず、降下速度が速くなるにつれ、形状は単調によくなることがわかる。これは、高速になるにつれ、反跳噴流の悪影響が少なくなること、および、冷却されるまで多数の噴流間を通過するようになるので、幅方向の冷却がより均一になることによると考えられる。

Photo. 1 (b) は以上の調査結果にもとづき調節された噴流中に焼入れられた焼入板の形状である。 SI は 38 μ であるが、目視では耳波はほとんど認められなく、また

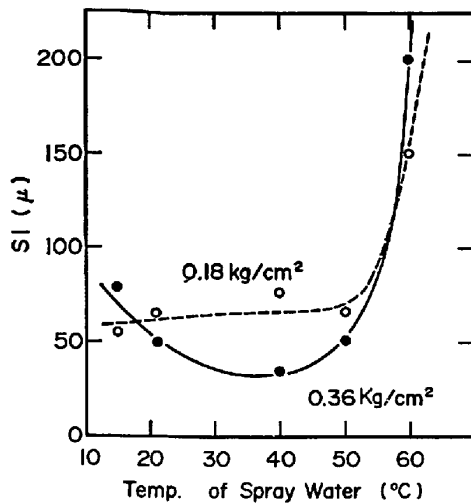


Fig. 16. Effect of temperature of spraying water on the shape of quenched sheets (SI). (sample dropping speed; 100m/min, nozzle arrangement; <5> 80 (2) 20(2) 20(2) 20(2) 20(2) 20(2) 20(2), header interval D ; 80 mm, spraying method; out of water).

センター部の凹凸もまったく認められない。全体的にみて、この焼入板の形状は出荷冷延鋼板と同水準であると考えることができる。(a)の未対策条件下での焼入板の形状と比べれば、噴流中冷却の形状改善に対する効果の大きいことが一層明確になる。なお、この焼入れでの冷却条件は、試料寸法: 0.8 mm厚×900 mm幅×2000 mm長、加熱温度: 約 700°C、試料降下速度: 200m/min、ノズル配置: <5>80(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2)、ヘッダー間隔: 80 mm、ヘッダー内水圧: 0.36 kg/cm²、水温: 50°C、スプレー方式: 水中式である。

4. 結 言

薄鋼ストリップを高温より水中に焼入れた際に生ずる形状不良の生因を解明し、形状よく焼入れるための水焼入技術の開発を試みた。得られた結論は次のとおりである。

(1) 形状不良の生因は、水焼入直後に鋼板表面に発生した蒸気膜が不均一に(特にエッジ部から)消滅するからである。

(2) 形状を改善するには、15 cm Aq. 以上の衝突圧をもつ噴流をストリップに均一に噴射し、蒸気膜が発生しないような状態でストリップを冷却することが必要である。

(3) この噴流条件は、ストリップの幅方向にのびたスリットノズルを適正な配置で、ストリップの進行方向に多数配し、かつ、適正なスプレーヘッダー内水圧を選ぶことにより実現しうる。

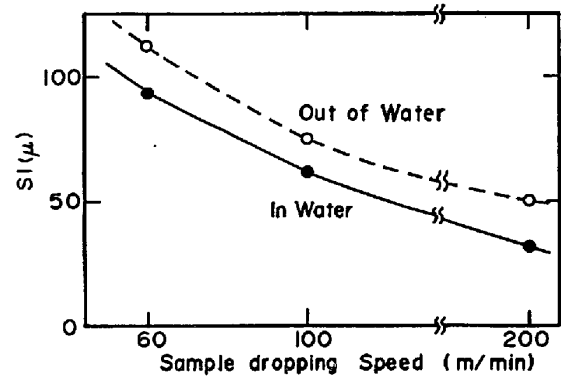


Fig. 17. Effect of sample dropping speed on the shape of quenched sheets (SI). (nozzle arrangement; <5>80(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2)40(2), header interval D ; 80mm, water pressure in headers; 0.36 kg/cm², water temp.; 50°C)

(4) スリットノズルの配置で肝要な点は、スリット間の間隔を、ノズル板とストリップの間隔と同程度にすることである。

(5) 適正な冷却条件を設定することにより、水焼入板の形状は、出荷冷延鋼板と同程度にまで改善される。

なお、福山製鉄所の連続焼鈍炉の水焼入設備は、以上の知見にもとづき設計されたものである。本報告の調査結果は板厚 0.3 mm 程度の薄物ストリップに対しても、実ラインでそのまま再現されている。

本研究は軟質薄鋼板用連続焼鈍技術の開発の一環として行なわれたものである。研究をすすめるに際し終始御鞭撻いただき、また研究内容の公表を許可された日本鋼管技術研究所、堀川一男 所長、天明玄之輔部長、さらにこの研究開発に尽力され、研究遂行にあたって助言と協力をいただいた海外技術協力部、河底良明部長、栗原孝雄次長をはじめ関係者の方々に深く感謝いたします。

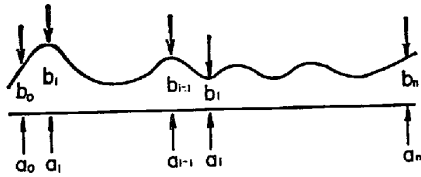
付記1 形状指数 (Shape Index: SI) の導入

工場検査では、通常、(耳波の高さ)/(耳波のピッチ)で耳波量を数値化しているが、焼入板の場合には、耳波が複雑なうねり方を示し、ピッチが一定でないので、上記の表示は適切ではない。そこで、耳波量を表示する方法として次式で与えられる形状指数 (SI) を考えた。

$$SI = \sum_{i=1}^n \left\{ \sqrt{(a_i - a_{i-1})^2 + (b_i - b_{i-1})^2} - (a_i - a_{i-1}) \right\}$$

ただし、 $a_n - a_0 = \text{約 } 1000 \text{ mm}$

ここに、 a_i 、 b_i は Fig. 18 に示すように、それぞれ板の長手方向に測った座標、および定盤からの変位である。SI の物理的意味は、約 1000 mm の間における、凹凸があり、断面が蛇行している場合の板の長さ、平坦



$$\text{Shape Index (SI)} = \sum_{i=1}^n \{ \sqrt{(a_i - a_{i-1})^2 + (b_i - b_{i-1})^2} - (a_i - a_{i-1}) \}$$

Fig. 18. a_i and b_i .

な場合の板の長さの差である。

付記2 スリットノズル配置の記号化

$\langle a \rangle b (c) d (c)$ において、 $\langle a \rangle$ は最上スリットが間隙 a mm の下向 45° スリットであることを、 (c) は 2 本目、3 本目が、間隙 c mm の水平スリットであること

を、 b は最上スリットと 2 本目スリット間の間隔が b mm であることを、そして、 d は 2 本目スリットと 3 本目スリット間の間隔が d mmであることを示す。

文 献

- 1) 久保寺, 中岡, 荒木, 渡辺, 西本, 岩瀬: 鉄と銅, 62 (1976) 6, p. 624
- 2) C. P. BRITAIN and J. H. WILSON: Australian Patent 5115/66 (Nov. 9, 1967)
- 3) H. L. TAYLOR: U. S. Patent 3410734 (Nov. 12, 1968)
- 4) 抜山: 機械学会誌, 37 (1934) 206, p. 367
- 5) 平: 熱応力と熱疲労 (1973), p. 21 [日刊工業新聞社]