

鋼の溶接熱影響部硬さの予測と必要予熱温度の選定方法

Prediction of HAZ Maximum Hardness and Method
to Determine Necessary Preheating Temperature for Steel Welding

糟谷 正^{*⁽¹⁾} 百合岡 信孝^{*⁽²⁾} 奥村 誠^{*⁽³⁾}
Tadashi KASUYA Nobutaka YURIOKA Makoto OKUMURA

抄 録

鋼材の溶接性とは溶接熱影響部の最高硬さや溶接低温割れ感受性を指しており、この溶接性を十分理解しないと、溶接構造物全体の信頼性に多大な影響を与える危険性がある。そのため、これらの問題は、鋼材需要家において溶接を行うとき、まず第一に検討しなければならない問題であり、これら特性の精度良い推定式の開発は、鋼材を正しく理解する上で重要である。このため、新日本製鐵においては、以前より溶接熱影響部の最高硬さ推定式、低温割れ防止に必要な予熱温度の推定式の開発に取り組んできた。本稿では、これら推定方法の基本的な考えを紹介し、その応用例についても説明した。

Abstract

Weldability of steel material takes on meanings of the maximum hardness in a weld heated-affected zone and the weld cold cracking susceptibility. These characteristics of the weldability must be properly seized, otherwise it is apprehended that the reliability of a welded structure as a whole is seriously affected. Therefore, these factors should be examined in the first place prior to welding the steel material by its users, and it is important to develop accurate prediction formulae of these characteristics in order to have a proper understanding of the steel material. Nippon Steel has been developing the prediction formulae for the maximum hardness in a weld heated-affected zone and for the necessary preheating temperature to prevent cold cracking. The present paper described the basic way of thinking on these prediction methods and application examples.

1. 緒 言

溶接は、造船、橋梁、貯蔵タンク、圧力容器、産業機械、自動車、車両等多くの分野で利用されており、溶接にかかわる諸問題は、各分野における共通の問題でもある。新日本製鐵は種々の鋼材を製造販売しているが、それら鋼材はほとんどの場合、溶接されることにより最終的な構造物に組み立てられる。従って、溶接しやすい鋼材とは、鋼材需要家の立場から使いやすい鋼材であることを意味する。

又、最終構造物の諸特性が、当初の設計通りであるかどうかは、構造物を形成している母材及び溶接部の諸特性が、十分満足なものであるかどうか大きく依存している。そして、母材の特性より溶接部の特性が問題を引き起こす場合が多く、溶接部の特性が構造物全体の性能を決定してしまう場合が多い。

以上の点を考慮すると、溶接は、鋼材を組み立て加工をして目的の構造物を製造する工程において、更には最終構造物の特性を満足させなければならないという問題において、正しくキーテクノロジーということが出来る。

鋼材がいかに溶接しやすいか、という意味で用いられる言葉として、溶接性という用語がある。溶接性という概念は、広くは、強度、

靱性等溶接部の特性すべてを指すものであるが、いわゆる狭義の溶接性とは、溶接熱影響部 (HAZ) の硬さ、及び低温割れ感受性を指す。本報告においては、各鋼材の溶接性の評価方法について述べる。

2. 鋼材の溶接性

鋼材は溶接されると熱影響を受け、母材と異なった組織となる。この部分を溶接熱影響部 (Heat Affected Zone: HAZ) と呼ぶ。通常、溶接特有の急熱急冷過程により HAZ は母材より硬い組織を有しており、これが溶接部における特性劣化の一つの要因となる。例えば、硫化水素雰囲気中に生じる応力腐食割れを防止するためには、HAZ の最高硬さをピッカース硬さ (Hv) で248以下にする必要がある。又、もう一つの溶接性である低温割れ感受性も硬い組織ほど高くなる。すなわち、HAZ が硬くなりやすい鋼材はそれだけ溶接が難しい、言い換えれば使いにくい鋼材であるということができる。

HAZ に生じる低温割れは、いわゆる水素誘起割れである。溶接過程において、雰囲気中の水蒸気や溶接材料中の水分などが、溶接アークにより分解され、溶接部に水素が発生する。低温割れを防ぐ手段として溶接前にあらかじめ予熱する方法があるが、予熱を行うこと自体、溶接施工作業の負荷が大きくなり不経済である。そのため、

*⁽¹⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員

*⁽²⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター 所長 工博

*⁽³⁾ 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究センター

主任研究員 工博

低温割れ発生防止可能な最低予熱温度が低い鋼材はそれだけ溶接しやすい、すなわち優れた溶接性を持った鋼材である、ということが出来る。HAZは母材と異なり、このような問題を抱えており、構造物全体の信頼性が溶接部でほぼ決定されてしまう場合が多い。

鋼材の溶接性は、以前より炭素当量という概念で評価されてきた。炭素当量を初めて提唱したのはDearden & O'Neill¹⁾である。この概念は、鋼材の溶接性を鋼材各成分の一次式で表す方法で、特にCの係数を1とするので炭素当量と呼ぶ。Dearden & O'Neillの炭素当量式は後に一部修正され、IIW(International Institute of Welding: 国際溶接学会)の炭素当量(CE(IIW))として採用されている。

CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5(1)
 CE(IIW)は、ロイド保険協会でも用いられている。Dearden & O'Neill以来、種々の炭素当量が発表されてきた。それは、適用可能な鋼材組成を広げたり、あるいは特定品種の鋼材によく合うようにしたり、硬さと低温割れに対し別々の炭素当量を考えてきたからである。これら炭素当量は、多くの研究者に利用され、その間、自然とうたされてきた。ここでは、現在でも利用されている炭素当量のうち、代表的なものとしてCE(IIW)と以下の二つの炭素当量^{2,3)}を示す。

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad \dots\dots(2)$$

$$CEN = C + A(C) \{ Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5 + 5B \} \quad \dots\dots(3)$$

$$A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\}$$

(1)式は、Mn等合金元素の係数が比較的大きく、(2)式は逆に小さく、(3)式は係数がCの関数となっているのが特徴的である。(3)式は、後述する低温割れ感受性評価方法に用いられる。

炭素当量は、2種以上の鋼材を比較するときには便利であるが、具体的な溶接性、すなわちHAZの硬さが具体的にどの程度なのか、割れ防止予熱温度がどの程度なのかはこれだけでは明らかにならない。そこで、次にHAZ最高硬さと割れ防止予熱温度の予測方法について述べる。

3. 溶接熱影響部の最高硬さ推定式

鋼材の溶接性を評価する一つの指標として炭素当量があることは既に述べた。この概念は、HAZの最高硬さ推定式にも用いられている。ここでは、新日本製鐵において開発されたHAZ最高硬さ推定式⁴⁾の基本的な考え方を説明する。

図1は上部が最高硬さ曲線、下部が溶接CCT(Continuous Cooling Transformation)図を示している。溶接条件によって決定される800°Cから500°Cまでの冷却時間(Δt8/5)をX軸に対数プロットし、HAZ最高硬さ測定値をY軸にプロットする。そうすると、HAZの最高硬さは、右下がりの曲線になることが経験的に知れている。溶接熱履歴をΔt8/5で代表させる理由は、鋼材の変態開始温度が800°C程度であり、終了温度が500°C程度であるためである。最高硬さ推定式を作成するという事は、この硬さ曲線を数式に表すことである。そのために、以下のように考えた。

まず、図1上部の二つの点、すなわち点Mと点Zに注目した。点Mは、HAZのマルテンサイト率が100%になる限界を示す。すなわち、冷却時間がこれより長い場合、HAZ組織にベイナイト等マルテンサイト以外の組織が導入される。点Zは、HAZにおける率がほぼ0%になる限界を示す。すなわち、冷却時間がこれより短くなれば

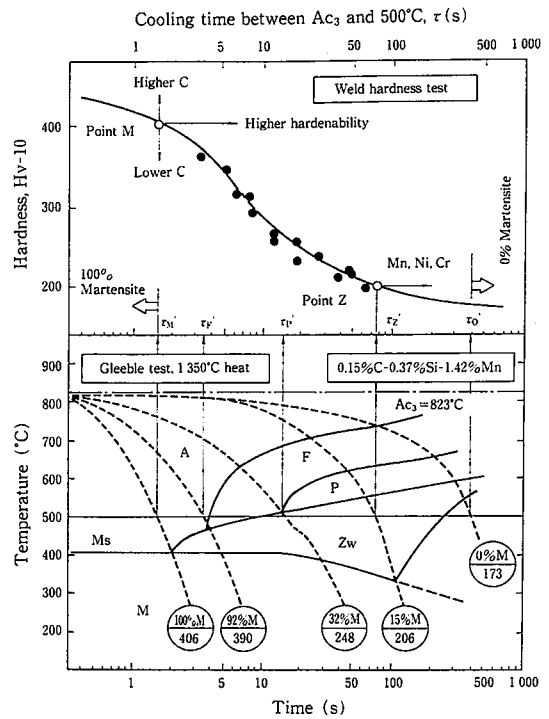


図1 溶接熱影響部最高硬さ曲線と溶接CCT図

マルテンサイト率は0より大きくなる。最高硬さ曲線は、この二つの点を通る右下がりの滑らかなカーブである必要がある。又、点Mの左側では、HAZ組織はマルテンサイトのみとなるので、硬さはあまり変化しない。点Zより右側では、HAZ組織は主としてベイナイトとなる。Δt8/5が更に長くなればフェライトパーライトが多くなる。しかし、HAZで最も硬くなる部分は最高加熱温度が1400°C以上、すなわち溶接金属に隣接している部分である。それはオーステナイト粒の粗大化により焼入性が高まっている部分なので、実際の溶接における冷却時間の範囲では、あまりフェライトパーライトを考慮する必要はない。そのため、点Zより右側で、HAZ最高硬さはベイナイトのそれとなり、硬さはほぼ一定と考えることができる。従って、最高硬さ推定に用いられるカーブは、点Mより左側及び点Zより右側で、X軸にほぼ平行になるものが望ましい。

著者らは、このような特徴を持つ曲線として逆三角関数(arctan関数)を用いることにした。すなわち、点Mの座標を(τ_M, H_M)、点Zの座標を(τ_B, H_B)とすると、以下のようにすればよい。

$$H_v = (H_M + H_B)/2 - (H_M - H_B) \arctan(X)/2.2 \quad \dots\dots(4)$$

$$X = 4 \cdot \log(\tau/\tau_M) / \log(\tau_B/\tau_M) - 2$$

これはarctan(X)関数の特徴である、X>2, X<-2でarctan(X)がほとんど一定の値になることを利用している。つまり、Δt8/5=τ_Mのとき、X=-2となり、Δt8/5=τ_Bのとき、X=+2となるようにXを定めている。そして、X=-2のときH_v=H_M、X=+2のときH_v=H_Bになるように(4)式を決定した。こうすることにより、最高硬さを精度よく推定できることが分かった。

次に、点M、Zの座標であるτ_M, H_M, τ_B, H_Bを定める必要がある。これは、鋼材の各成分に依存するため鋼材組成の関数として求める必要がある。この四つの値は、種々の鋼材に対する実験データから以下のように定めた。

$$\tau_M = \exp(10.6CEI - 4.8) \quad \dots\dots(5)$$

$$CE1 = C_p + Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/12 + Cr(1 - 0.16\sqrt{Cr})/8 + Mo/4 + \Delta H$$

$$C_p = C(C \leq 0.3), C/6 + 0.25 (C > 0.3)$$

$$\Delta H = 0 (B \leq 1 \text{ ppm}), 0.03f_N (B = 2 \text{ ppm}), 0.06f_N (B = 3 \text{ ppm}), 0.09f_N (B \geq 4 \text{ ppm})$$

$$f_N = (0.02 - N)/0.02$$

$$H_M = 884C(1 - 0.3C^2) + 297 \quad \dots\dots(6)$$

$$\tau_B = \exp(6.2CE3 + 0.74) \quad \dots\dots(7)$$

$$CE3 = C_p + Mn/3.6 + Cu/20 + Ni/9 + Cr/5 + Mo/4$$

$$H_B = 145 + 130 \tanh\{2.65CE2 - 0.69\} \quad \dots\dots(8)$$

$$CE2 = C + Si/24 + Mn/5 + Cu/10 + Ni/18 + Cr/5 + Mo/2.5 + V/5 + Nb/3$$

(5)~(8)式の適用範囲がどの程度広いかによって推定式の適用範囲が定まるが、それは実験に用いた鋼材の量に依存する。(5)~(8)式は、C≒0.8%の共析鋼から、9% Cr 鋼、9% Ni 鋼まで含まれており、現在ある推定式の中では適用範囲が最も広いものの一つと考えられる。図2は推定値と実験データの比較であるが、両者がよく一致していることが理解できる。

(5)~(8)式で特に注目されるのは、(5)式中のΔHである。これは主としてBの影響を代表しているが、極少量のB添加が大きな影響を及ぼし、例えば4ppm B添加は最高で0.09% C増に匹敵することが分かる。そして、それ以上添加してもあまり影響がなくなる。これは、HAZでは旧γ粒が粗大化しているため、少ないBで粒界全体にBが偏析してしまうためであろう。

(4)~(8)式を利用すれば、ある鋼材をある溶接条件で溶接したときのHAZ最高硬さを推定することができる。更に、HAZ最高硬さを所定の溶接条件下で、ある値以下にしたい場合は、満足させるべき鋼材組成の範囲が(4)~(8)式から逆に決定できる。そのため、鋼材需要家からこのような要求がなされたときは、この組成範囲内で他の鋼材特性が満たされるような成分設計を行えばよい。

(5)式のτ_Mは、HAZがいかにマルテンサイト組織になりやすいか、すなわちτ_MのCE1は焼入性の指数(焼入性を表す炭素当量)でもあると考えられる。焼入性の指数としては、鋼材の熱処理分野では理想臨界直径(D_i)又はそれを表す焼入性係数で議論されてきた。CE1にしろ焼入性係数にしろ同じ冶金概念を表しているため、これらは本質的に同じであるはずである。これまでこの二つの指標の相関を明らかにしていなかったが、最近、これら二つの指標が本質的に同等であることが熱伝導を用いて解明されるようになった⁹⁾。

D_iは焼入性係数を用いて以下のように表される。

$$D_i = D_{i0} \cdot f_c \cdot f_{Si} \cdot f_{Mn} \dots\dots(9)$$

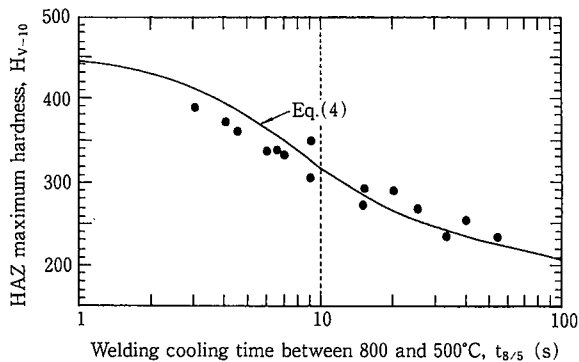


図2 HAZ最高硬さ実測値と推定値の比較

$$f_c = \sqrt{C}, f_{Si} = 1 + A_{Si} \cdot Si, f_{Mn} = 1 + A_{Mn} \cdot Mn, \dots$$

(9)式のf_c、f_{Si}等が各元素の焼入性係数であり、f_cのみCの平方根で、他は各元素の1次式(A_{Si}、A_{Mn}等は定数)となっている。

熱伝導論を利用することにより、(9)式のf_x(XはC以外の元素)から、焼入性を表す炭素当量を計算することができる。これは、炭素当量中の各元素の係数を計算することに他ならないが、その計算式は、以下のような簡単な式になることが分かった。元素Xの係数C_xは、

$$C_x = A_x/4.2 (1 + A_x \cdot X_0) \quad \dots\dots(10)$$

となる。A_xは元素Xの焼入性係数における係数、X₀はCE1を決定したときに用いられた鋼材におけるXの成分値の平均である。

A_xは、種々の文献で紹介されているが、これらを用いてCE1の各元素の係数と計算値を比較したのが表1である。表1より、CE1の妥当性が焼入性係数からも支持されていることが理解できる。

4. 低温割れ防止予熱温度の選定

鋼材を溶接すると、溶接アークによって溶接金属中に水素が導入され、この水素がHAZのような硬い組織を持つ部分へ拡散していくと、そこに割れが発生する危険性が生じる。割れ発生の危険性は、HAZの組織、水素量のみならず、溶接によって生じる残留応力又は拘束度や応力集中率などに依存し、それらが複雑に絡み合っているため、その評価は必ずしも単純でない。しかし、溶接部に割れが存在することは、構造物の信頼性確保のために許されない。そのため、鋼材の低温割れ感受性を理解することは以前から重要な研究対象であり続けてきた。

これまでの研究成果から、割れが発生するかどうかは、以下の要因に依存することが分かっている。

- 1) 鋼材組成
- 2) 溶接により導入される水素量
- 3) 溶接部の残留応力(拘束度、応力集中率)
- 4) 溶接熱履歴

1)は鋼材組成から計算される炭素当量で代表させる場合が多い。その代表的な炭素当量として(1)~(3)式の三つがある。2)は溶接材料や溶接方法、更には雰囲気中の湿度にも依存する。水素量は、通常、溶着金属100g中に存在する水素の0°C 1気圧における体積で示す。TIG溶接など溶接部をガスでシールドする場合は1ml/100g以下であるが、セルロース系の溶接棒を用いた場合では40ml/100gにもなる。3)の残留応力とは溶接特有の急熱急冷過程により熱膨張、熱収縮が局部的に生じ、その過程で塑性歪みが導入され、溶接終了後にも応力が残留することをいう。残留応力のレベルは継手の拘束度や応力集中に依存するので、残留応力の代わりに拘束度と応力集中係数で議論される場合もある。4)の溶接熱履歴は、溶接条件、予熱温度な

表1 炭素当量中の各元素の係数比較

Element	Experiment		Calculation				
	CE1	Maynier ¹⁰⁾	Hollomon ¹¹⁾	Craft ¹²⁾	Kramer ¹³⁾	Hodge ¹⁴⁾	Grossmann ¹⁵⁾
Si	1/24	—	1/9.2	1/8.8	1/10.2	1/5.9	1/7.5
Mn	1/6	1/4.1	1/5.2	1/5.1	1/7.7	—	1/5.5
Cr	1/8	1/8.5	1/3.9	1/4.0	1/4.5	—	1/3.9
Ni	1/12	1/7.9	1/18.6	1/16.2	1/20.5	1/24.5	1/22.2
Mo	1/4	1/6.5	1/3.4	1/3.8	1/4.5	1/2.9	1/3.4
Cu	1/15	—	1/17.2	—	1/11.0	—	—

実験値は、硬さ試験より決定。計算値は、文献にある焼入性係数より計算。

どに依存するが、ここでは HAZ の硬さや組織に強い影響を与える溶接入熱量のことを指す。

低温割れを防止する手段としては、低い炭素当量の鋼材を選択する(①の要因を考慮する)、水素量の少ない溶接材料、溶接方法を選択する(②の要因を考慮する)、拘束度や応力集中が低くなるような継手設計をする(③の要因を考慮する)、溶接入熱量をできるだけ高くする(④の要因を考慮する)などが考えられる。溶接継手に要求されている他の特性のため(例えば母材強度確保のため低炭素当量化にも限界がある、など)、必ずしもこれら手段を選択できるとは限らない。

このような場合に用いられる手段として、予熱がある。予熱は、鋼材中の水素の拡散係数が 100°C 以上では比較的大きくなることを利用し、溶接部中の水素が逃げやすくする。溶接部が 100°C 以下になると拡散係数が急激に小さくなり、水素は溶接部に残留し、これが低温割れを引き起こす。長期的には、 100°C 以下でも水素は拡散するため残留水素は減少していく。しかし、低温割れは溶接終了後、数時間以内に発生する可能性があるため、溶接部が 100°C 以下になっても存在している水素は、残留水素と考えることができる。すなわち、予熱温度の選定とは、溶接終了後、溶接部をどの程度の間 100°C 以上に保てば、残留水素が低温割れを発生しないレベルまで減少するかという問題でもある。

予熱温度選定方法として新日本製鐵が開発した方法は、著者らがマスターカーブ法と呼んでいるチャートを用いた方法⁹⁾で、これについて以下に説明する。

まず炭素当量として、何を選択するかであるが、これは(3)式にある CEN を採用した。CEN は、C 以外の元素の係数が C の関数として表されているのが特徴である。例えば、AWS (American Welding Society) の D1.1⁷⁾によれば、C が 0.11% 以上では(1)式の CE (IIW) を、それ以下では(2)式の Pcm を推薦している。CE (IIW) と Pcm では各合金成分の係数の大きさが異なることから、それらの影響の大きさが C 量によって異なる、すなわち各係数が C の関数であることを示唆している。

CEN は、CE (IIW) や Pcm より適用範囲が広がるように、C が高い領域 (Zone I) では CE (IIW) に近づき、C が低い領域 (Zone II) では Pcm に近づくように A (C) が定められている。図 3 は種々の鋼材における Y 型拘束割れ試験を行ったときの、割れ防止に必要な最低予熱温度と、(1)~(3)式の各炭素当量の関係を比べた図である。図 3 より CEN が三つの炭素当量のうち、一番相関が良いことが分か

り、これが CEN を採用した理由である。

次に、予熱温度の選定であるが、著者らは、まず JIS Z3158 の Y 形溶接割れ試験を行った場合の、割れ防止最低予熱温度を予測できるようにした。この理由は、Y 形割れ試験が鋼材メーカーのみならず多くの鋼材需要家により行われており、これを基に実施工の予熱温度が決定されている場合が多いためである。当然のことであるが、Y 形溶接割れ試験における割れ防止予熱温度も溶接入熱量や水素量に依存する。しかし、この選定方法では溶接入熱量 1.7kJ/mm 、水素量 $5\text{ml}/100\text{g}$ を標準条件として、この条件下における必要最低予熱温度をまず予測することとした。図 4 は、種々の鋼材を用いた実験データより定めた CEN と、Y 形溶接割れ試験における必要最低予熱温度の関係を示している。必要予熱温度が板厚により異なっているのは、試験片における拘束度が板厚により異なっているためである。図 4 は、この選定方法における基礎をなす曲線を示しており、その意味から著者らは、図 4 をマスターカーブと呼んでいる。

溶接入熱量と水素量の影響については、その影響の大きさを CEN の増減 (ΔCEN) で表すことにした。この方法は BS5135 などでも用いられている方法であるが、溶接入熱量と水素量が標準条件と異なる場合、その条件がどの標準条件に対応するかを決める方法ともいえる。図 5、6 は、それぞれ溶接入熱量と水素量が、標準条件と異なる場合における ΔCEN を決める曲線を示している。

図 5 において、溶接入熱量の影響が CE (IIW) により異なっている理由は、最高硬さ推定式より分かる。HAZ の低温割れ感受性は、その硬さや焼入性に強く依存する。焼入性が高い鋼材を溶接する場合、多少溶接入熱量が変化したとしても、HAZ 組織はほとんどマルテンサイトになってしまい、この場合あまり硬さ変化がない。このため、溶接入熱量の影響はあまりない。他方、焼入性が低い鋼材の場合、溶接入熱量によってベイナイト組織の体積率が変化するので、その影響が大きい。焼入性やベイナイト硬さを表す炭素当量は(5)、(7)の 2 式におけるそれであるが、両炭素当量とも CE (IIW) タイプの炭素当量である。そのため、図 5 のように、溶接入熱量の影響は CE (IIW) でその影響を分けて考える必要があった。

図 6 において、X 軸は対数プロットとなっている。これは、割れ感受性における水素の影響が対数的であることからくる。図 6 を作成した時点においては、この事実は実験結果を考察して決定したが、最近になって水素の拡散を考慮すると対数プロットが適切であることが証明された⁹⁾。

図 4、5、6 を用いると、Y 形溶接割れ試験における必要予熱温度

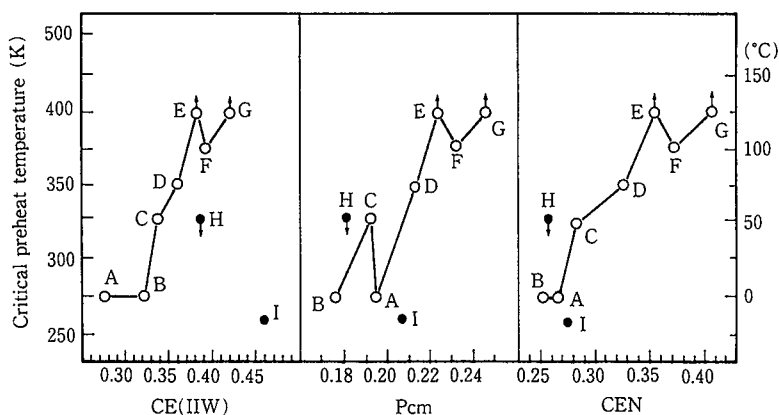


図 3 各種炭素当量と限界予熱温度の関係 (Y 形拘束割れ試験)

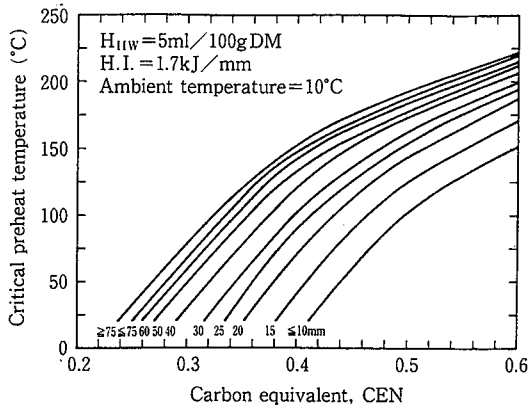


図4 予熱温度推定方法におけるマスターカーブ

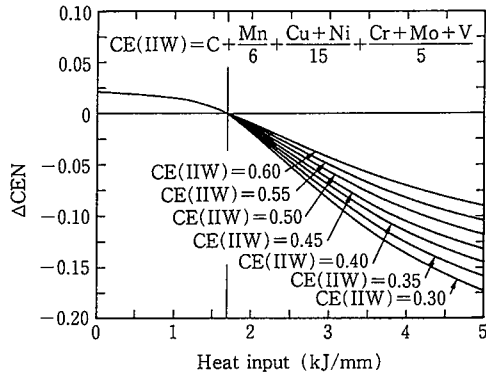


図5 入熱量とΔCENの関係

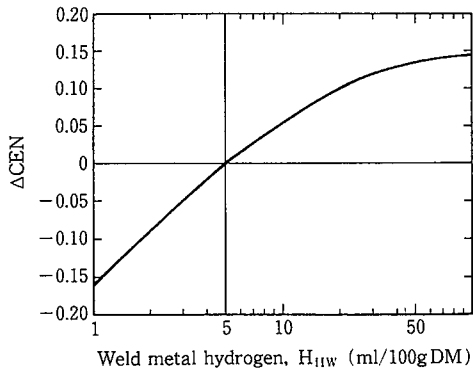


図6 溶接金属水素量とΔCENの関係

を予測することができる。ここでその一例を示す。

まず、鋼材組成から $CEN = 0.38\%$ 、 $CE(IIW) = 0.45\%$ と計算されたとして。板厚を20mm、溶接入熱量を2.5kJ/mm、水素量を10ml/100gとする。入熱量の影響による ΔCEN は、図5から $\Delta CEN = -0.03\%$ 、水素量の影響による ΔCEN は図6から $\Delta CEN = 0.05\%$ となる。このため、この条件における割れ感受性は標準条件における $CEN = 0.40$ ($0.38 - 0.03 + 0.05$) % と同等と見なすことができる。図4より、板厚20mmで $CEN = 0.40\%$ のときの必要予熱温度は70°Cであることが分かり、これが予測値となる。

このようにして予測した予熱温度は、実はかなり安全側であり、実際の溶接施工でもっと低い予熱温度を採用することができる。この理由は、Y形溶接割れ試験の拘束度、応力集中が実施の場合

より厳しくなっているため、実施工における予熱温度を予測するには、図7を更に用いる必要がある。図7は、Y形溶接割れ試験の予熱温度より何度低い予熱温度を実際には採用可能であるか、を表した図である。図7では、補修溶接などでは拘束度が比較的高く通常溶接に比べ、予熱減少量が小さいことが読みとれる。前述の例で、450MPaの溶接材料を採用した場合は、図7から、予熱減少量は補修溶接で10°C、通常溶接で60°Cであるため、補修溶接では、60°Cの予熱が必要で、通常溶接では10°C、すなわち予熱なしで溶接可能ということが分かる。

表2は、このチャート方式とY形溶接割れ実験データを比較したものである。参考のため、British Standard 5135及びAWS D1.1の推定結果も表示した。BS5135は、実施工溶接に対する推定であるため、実験結果 (T_{cr}) と比較することはできない。AWS D1.1と本方法では、明らかに本方法の方が推定精度がよい。又、BS5135は、水素量の影響が十分把握されていない (TS490MPaの例など) などの問題があり、この点からも本方法の優れた精度が確認されている。

5. 応用例

5.1 HAZ最高硬さ

HAZの最高硬さが規制される例としては、耐サワー環境中にお

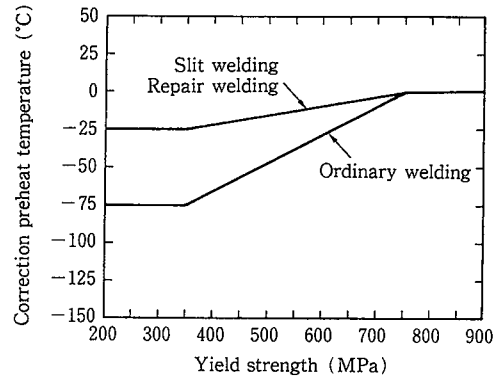


図7 Y形溶接割れ試験における予熱温度と実施工時予熱温度の関係

表2 Y形溶接割れ試験における必要予熱温度と予測値の比較

Steel	Hydrogen (ml/100g)	Heat input (kJ/mm)	T_{cr} (°C)	BS5135* (°C)	AWS D1.1 (°C)	Present model (°C)		
						y-gr.**	Ta***	
TS400MPa	5	1.7	20	20	20	20	20	
	13		20	20	85	20	20	
	40		75	20	116	61	20	
TS490MPa	1	1.7	20	20	20	20	20	
	5		100	20	116	80	22	
	13		125	20	138	132	74	
TS590MPa	40	1.7	150	20	149	153	95	
	13		100	20	138	137	87	
	40		125	20	149	155	105	
TS780MPa	1	1.7	20	125	129	20	20	
	3		100	125	149	125	114	
	5		150	125	149	156	145	
TS780MPa	13	1.7	175	175	149	184	173	
	5		3.2	100	20	149	121	110

* : BS5135は、実施工での予熱温度の推定 (Taと比較)

** : y-groove restraint cracking test

*** : Taは、本方法による実施工予熱温度推定結果

る硫化物応力割れを防ぐために設定される $H_v \leq 248$ がある。ラインパイプにおける円周溶接では、敷設期間をできるだけ短くする理由から第1ビードはスピードを上げて行われるため、HAZ 最高硬さを押さえるために、鋼材に対して厳しい溶接性が要求される。ラインパイプ鋼には、これら溶接性を確保した上で、強度靱性などの他の特性をも満足させなければならない。

最高硬さ推定式によると、HAZの硬さの上限は H_M 、すなわち(6)式の値が上限となる。従って、まず H_M を低く押さえることが重要となってくるが、 H_M はCのみの関数であるので、Cを低くするとその効果大きい。しかし、 H_M を248以下にすることは事実上不可能なので、他の元素についてもその選択に注意しなければならない。そのためには、硬い組織をできるだけ少なくし、すなわち(5)式で表される焼入性を低くして、マルテンサイト組織の低減を図る必要がある。そのためには(5)式中のCE1を小さくする必要があるが、CE1の各項のうち比較的大きいものとして ΔH にあるBが挙げられる。そこでBを低減すれば焼入性を大きく下げることができる。その他、Mn, Moなどを低減すれば焼入性は更に低くできるが、これらの値は強度靱性など他の特性確保の観点から適切な値を選定すべきである。

次に、実際のHAZの最高硬さがどの程度になるかであるが、それは溶接入熱量だけでなく板厚にも依存する。これは $\Delta t/5$ が両者によって決まるため、同じ入熱量ならば板が薄いと、それだけ取り得る成分範囲は広い。従って、このようなことを考慮しながら最終的な成分及び製造条件が決定されていく。

最終的な成分は、他の特性も考慮するので硬さのみからは決まらない。ここでは、簡単のため実際のラインパイプ鋼の硬さ曲線がどうなっているかを示してみたい。

表3は、予測に用いた2種の鋼材組成を示している。板厚は12.3mmと28mmである。円周溶接の入熱量を1.0kJ/mmから2.0kJ/mmとし、それに対応する $\Delta t/5$ を8~20秒(12.3mm)、5~10秒(28mm)とする。図8は、各鋼材の硬さ曲線と円周溶接を行ったときのHAZ最高硬さの範囲を示している。硬さ曲線は12.3mmの方が上にきているが、板が薄いため、HAZ硬さは両鋼材とも $H_v \leq 248$ を満たしている、すなわち十分な溶接性が確保されている。

5.2 低温割れ感受性

第5.1節で紹介した鋼材の割れ感受性を調べてみる。円周溶接はセルロース系溶接棒を用いて行われる場合が多い。この条件下で低温割れが発生するかどうかを調べる必要がある。各鋼材より計算されるCEN, CE(IIW)はそれぞれ以下ようになる。

X65 : CEN=0.193%, CE(IIW)=0.304%

X70 : CEN=0.242%, CE(IIW)=0.334%

セルロース系溶接棒の場合、水素量は40ml/100g程度あるので、図6より

$\Delta CEN=0.13\%$

となる。入熱量は、一番厳しい1.0kJ/mmの場合を考えて図5より $\Delta CEN=0.02\%$

となる。従って、標準条件ではX65, X70のCENは以下の値と考えればよい。

X65 : CEN=0.193+0.13+0.02=0.343

X70 : CEN=0.242+0.13+0.02=0.392

図4のマスターカーブより各板厚に対するY形溶接割れ試験における必要予熱温度は、X65で60°C, X70で40°Cとなる。これは、いずれも100°Cより低い。実施工では、図7に従って更に低い予熱温度でも十分であるため、これら鋼材は十分な溶接性を持っていることが分かった。

5.3 予熱低減型 HT780鋼

予熱は溶接施工の効率低下やコスト増の要因になるため、できるだけ低減できることが望ましい。予熱を低減する方法としては、第4章の①~④の要因を考慮すればよいが、ここで紹介するのは予熱低減型鋼材、すなわち、溶接施工条件を同じにして、低い予熱温度でも溶接できる鋼材の開発例に関するものである。予熱低減を実現する方法としては、鋼材の炭素当量を下げるという方法が考えられるが、その一方で鋼材の強度確保から炭素当量を下げることが好ましくない。このような相反する問題を解決した例として、新日本製鐵が開発した予熱低減型 HT780Cu析出鋼⁹⁾がある。

表4にその成分例を示す。まず従来HT780鋼の強度確保について検討してみる。従来HT780鋼(WT780など)では、Cを0.13%程度、Bを15~20ppm程度添加して焼入れ焼戻しを行うことにより強度を確保する、すなわち焼入性を高めることにより強度を確保する方法が採用されていた。一方、鋼材を製造する上で重要な概念である焼入性は、以前より、 D_I 値あるいは焼入性倍数で評価されてきたが、前述のようにこの焼入性倍数は炭素当量と本質的に同じものであることが分かった。このことは、従来HT780鋼に用いられる焼入性による強度確保では炭素当量が低減できず、したがって予熱を低減できないことを意味する。逆に予熱を低減させるためには、炭素当量

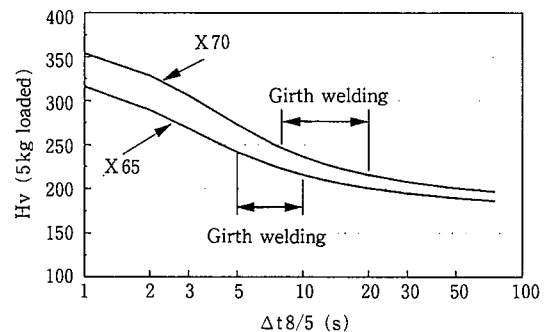


図8 ラインパイプ鋼の現地円周溶接部HAZ最高硬さ

表3 ラインパイプ鋼成分例

(wt %, * : wt ppm)

Steel	Thickness(mm)	C	Si	Mn	P	S*	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	Ca*	N*	O*	CE(IIW)	Pcm	CEN
X65	28.0	0.051	0.25	1.14	0.005	5	0.32	0.21	0.05	0.015	0.048	37	17	12	0.304	0.137	0.193
X70	12.3	0.088	0.263	1.03	0.005	5	0.35	0.256	0.013	0.016	0.051	43	39	18	0.334	0.171	0.242

表4 予熱低減型 Cu析出鋼成分

(wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	CE(IIW)	Pcm	CEN
0.06	0.26	1.34	0.007	0.002	1.05	0.94	0.46	0.31	0.009	0.041	0.572	0.249	0.339

を下げるを得ず焼入性不足となり今度は強度確保が難しくなってくる。

このような相反する現象を両立させる方法として、強度を焼入性のみならず他の冶金現象、具体的には析出を利用して強度を確保する方法を併用するということが考えられる。そのため、まずCを0.07%以下、Bを無添加にし、焼入性不足による強度低下をCuの析出により補うことを考えた。Cuの析出を利用する鋼材としては、古くはA710鋼があり、A710鋼の低温割れ感受性はCE(IIW)やPcmを用いた評価結果より優れている点が指摘されていた。析出元素としてCuに着目したのはこのような背景からであり、予熱低減型HT780鋼はCuの析出硬化をHT780鋼に適用したもので、A710鋼同様優れた溶接性を期待した。

図9は、従来鋼材と予熱低減鋼のY形溶接割れ試験結果を図に示したものであるが、予熱低減鋼(○)が従来鋼(●)より低予熱温度側に位置していること、すなわち予熱低減が実現されていることが分かる。図9で○のみ直線からずれているのは、1% Cuが炭素当量の適用範囲外であるため、この点をも考慮した炭素当量を将来開発する必要がある。

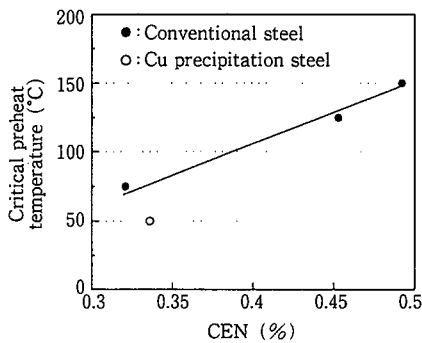


図9 CENと必要予熱温度の関係

5.4 その他

鋼材の溶接性評価は鋼材開発を行うときのみならず、鋼材を溶接施工する際の適切な溶接条件の決定などにも用いられている。予熱温度決定の方法は、複数の図を用いるチャート式であり、手順が複雑なので、誤りなく簡便に必要な予熱温度の求まるコンピュータソフトウェアを用意している¹⁶⁾。

6. 結 言

鋼材の溶接性(HAZ硬さ、低温割れ感受性)の予測方法について、新日本製鐵において開発されてきた方法を紹介した。

溶接性は鋼材の使い易さを表す指標でもあり、この理解がなければ溶接部の信頼性を確保することも不可能である。ここで紹介した方法により鋼材の溶接性への理解が深まり、鋼材溶接施工に役立てば幸いである。

参 照 文 献

- 1) Dearden, J., O'Neill, H. : Trans. Inst. Weld. 3, 203(1940)
- 2) 伊藤慶典, 別所清 : 溶接学会誌. 37(9), 983 (1968)
- 3) Yurioka, N. et al. : Welding J. 62(6), 147s(1983)
- 4) Yurioka, N. et al. : Metal. Constr. 19(4), 217R(1987)
- 5) Kasuya, T., Yurioka, N. : Welding J. 72(6), 263s(1993)
- 6) Yurioka, N. : First US-Jpn Symp. San Francisco, 1990, AWS, p.51
- 7) AWS-D1.1-90 : Appendix-XI. 1990, AWS
- 8) Yurioka, N., Kasuya, T. : IIW Doc. IX-1740-94, Beijing, 1994
- 9) 岡村義弘 ほか : 技術セッション「溶接構造物に対する新技術の挑戦」. 大阪, 1993-12, 溶接学会
- 10) Maynier, P. et al. : Hardenability concept with application to steel. M. S. of AIME, 1978, p.518
- 11) Hollomon, J.H. et al. : Trans. AIME. 167, 601(1946)
- 12) Craft, W. et al. : Trans. AIME. 158, 157(1944)
- 13) Kramer, I.R. et al. : Trans. AIME. 167, 670(1946)
- 14) Hodge, J.M. et al. : Trans. AIME. 167, 502(1946)
- 15) Grossmann, M.A. : Trans. AIME. 150, 227(1942)
- 16) Nippon Steel : Preheat(1986), PC98(MS-DOS), IBM-AT(DOS/V)