

TIG 溶接部の冷却特性に関する研究(1)

下 山 仁 一* ・ 石 井 智 之**

Study on Cooling Characteristics of TIG Welds (Report 1)

Toshikazu SHIMOYAMA ・ Tomoyuki ISHII

Hardability in a weld heat affected zone is one of the most important parameters on weldability of steels for welded structures.

It is said that hardability of weldments is affected by cooling characteristics of TIG welds.

From this view point, we have investigated cooling characteristics of TIG welds.

The results are as follows.

In this study, we have obtained the experimental formula to estimate cooling characteristics from TIG welding conditions.

1 緒言

溶融溶接では、局所的に高温まで急速に加熱され、高温から急速に冷却される現象が生じている。その現象により溶融凝固する溶接金属部と溶接熱影響部が生じ、硬化・軟化現象、延性の低下、脆化及び溶接割れが発生する。溶接熱影響部の硬化及び脆化は、鋼の化学組成と冷却条件によって異なる。冷却条件による溶接熱影響部の硬化・軟化現象、金属組織の変化は、800℃から500℃までの冷却時間(sec)、800℃から300℃までの冷却時間(sec)、540℃に於ける冷却速度(℃/sec)に関係する。このように溶接熱サイクルの冷却特性は溶接部の性能に関係する重要な要因である。

一方、最近では引張強さ 100kgf/mm²(981MPa) 級以上高張力鋼及び超高張力鋼や高靱性高張力鋼では、溶接部の靱性を確保するためにアークの周囲を不活性ガス(Arガス)で遮断するTIG溶接が行われている。このため溶接金属に空気中のO₂、N₂が混入する事がなく純度の高い溶接金属が得られ、高級材料の溶接に適しているTIG溶接の適用が拡大しつつある。しかし、TIG溶接に関する800℃から500℃までの冷却時間(sec)を溶接入力熱量Q(J/cm)、板厚t(mm)から求める実験式は、まだ確立されていないのが実状であり、

* 機械工学科 ** 大学院生

実際に溶接施工する場合の溶接諸条件、即ち溶接電流 (A)、アーク電圧 (V)、溶接速度 (cm/min) が冷却特性から求められないのが実状である。

本研究では最近適用が拡大しつつあり、まだ実験式が確立されていない T I G 溶接について溶接熱サイクルを測定し、溶接入熱量 Q (kJ/cm)、板厚 t (mm) から 800℃ から 500℃ までの冷却時間 (sec) を求める実験式を確立し、合わせてこの 800℃ から 500℃ までの冷却時間 (sec) と溶接割れに関する 800℃ から 300℃ までの冷却時間 (sec) の関係、及び硬化性及び金属組織関係する 540℃ に於ける冷却速度 (℃/sec) との関係も明らかにした。

2. 実験方法

2-1 供試鋼板及び試験板寸法

T I G 溶接部の冷却特性を調べるために、供試鋼板として溶接構造用高張力鋼及び高靱性高張力鋼等と物理的常数 (比熱、密度、熱伝導度) が類似し、冷却特性に大きな相違がないと考えられる軟鋼 S M 4 1 を使用した。その試験板寸法を図 1 に示す。冷却特性に及ぼす板厚の影響を同一溶接入熱量の条件で測定するために、板厚 5, 10, 15, 20, 25mm 及び 30mm の段付試験板で板幅は 150mm 以上は、冷却特性にはほとんど影響しないことから 150mm、また各板厚の長さは 50mm 以上は影響しないことから 60mm とし、全長を 360mm とする段付試験板を使用した。

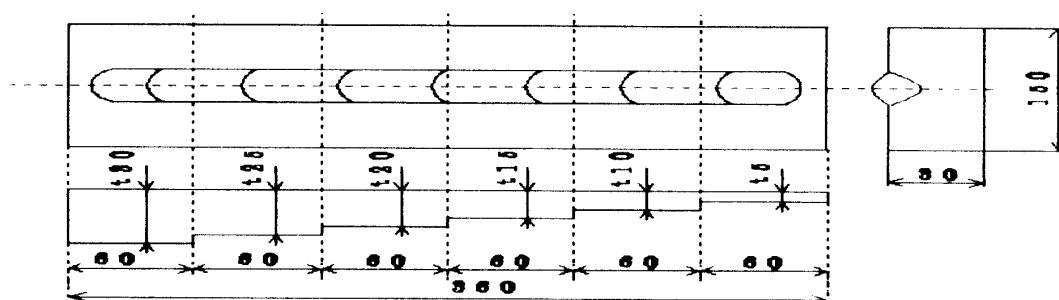


図 1 段付試験板寸法

2-2 溶接条件

本研究では試験板の初期温度を室温 (26℃~27℃) とし、T I G 溶接では直流正極性 (D CSP) で、溶接速度 13cm/min 一定で板厚 (5mm~30mm)、溶接電流 (50A~290A)、溶接入熱量 (2.3kJ/cm ~17.3kJ/cm) を変化させ溶接熱サイクルを測定した。

2-3 実験内容

測定した溶接熱サイクルから 800℃ から 500℃ までの冷却時間 ($CT_{800-500}$)、800℃ から 300℃ までの冷却時間 ($CT_{800-300}$) 及び 540℃ における冷却速度 (CR_{540}) をそれぞれ求めた。

3. 実験結果及び考察

溶接熱サイクルの測定結果の1例として、溶接入熱量 10.2 kJ/cm の時ににおける、冷却特性を図2に示した。800℃を基準(0秒)として縦軸に温度(℃)を横軸に時間(sec)を対数目盛りに取ったものである。

図2からわかるように板厚が薄くなるにつれて、特に板厚が20mm以下になると、冷却曲線がゆるやかになることがわかる。

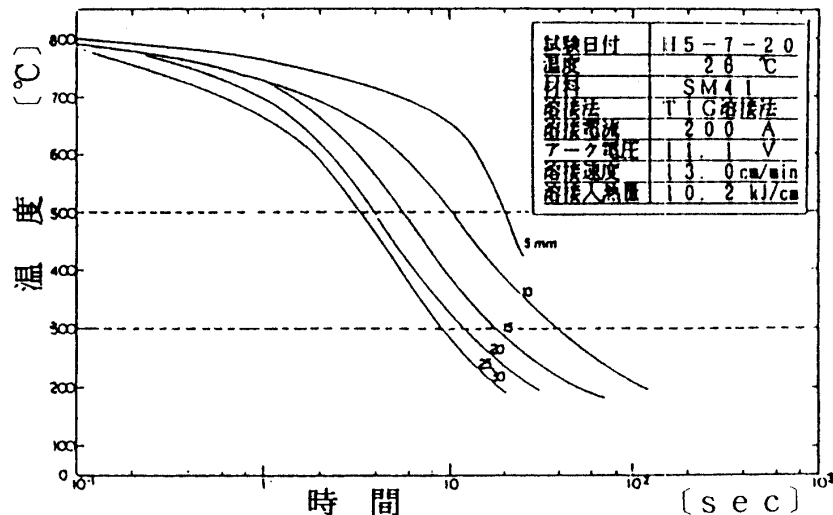


図2 板厚変化による冷却特性への影響

このようにして測定したTIG溶接の溶接熱サイクルの冷却特性について考察する。

HAZの最高加熱温度は fusion lineから遠ざかるに従って低くなるが、 A_3 変態点又は 800℃から 500℃までの冷却時間は、ほぼ一定である。従って、溶接諸条件が決まれば fusion line 付近の冷却時間 $CT_{800-500}$ を決定することが出来き、更に $CT_{800-500}$ から溶接割れに関する $CT_{800-300}$ 及び硬化性や金属組織に関する CR_{540} も求めることが出来る。以上のことから本研究では、 $CT_{800-500}$ を基準にデータの解析を行った。

図3に溶接諸条件(以下、溶接諸条件とは、溶接入熱量 Q と板厚 t のことを示す)と $CT_{800-500}$ の関係を求める手順を示した。

図3に示すように、第1ステップとして、まず溶接入熱量 Q と $CT_{800-500}$ の関係を、第2ステップとして、板厚 t と $CT_{800-500}$ の関係を求め、最終的にこれらの2つの関係を統合して、溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係を求めた。

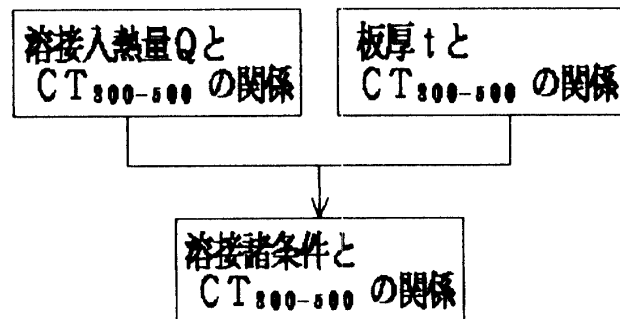


図3 溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係を求める手順

3-1 溶接入熱量QとCT₈₀₀₋₅₀₀の関係

図4に溶接入熱量QとCT₈₀₀₋₅₀₀の関係を示した。溶接入熱量QとCT₈₀₀₋₅₀₀の関係は両対数上で直線関係にあり溶接入熱量Qが大きくなるに従って、CT₈₀₀₋₅₀₀も大きくなっていることがわかる。また、板厚が30mmから5mmへと薄くなるに従ってグラフの傾きが急になっていることがわかる。この現象は、板厚が薄くなるに従って溶接入熱の影響を大きく受けることを意味している。

図4に示されるこれらの直線関係式は一般に、 $CT_{800-500} = a Q^n$ の形で表され、それぞれ板厚ごとに実験関係式を求め、その結果を式(1)に示した。また図5には、板厚tとQの乗数nの関係を示した。

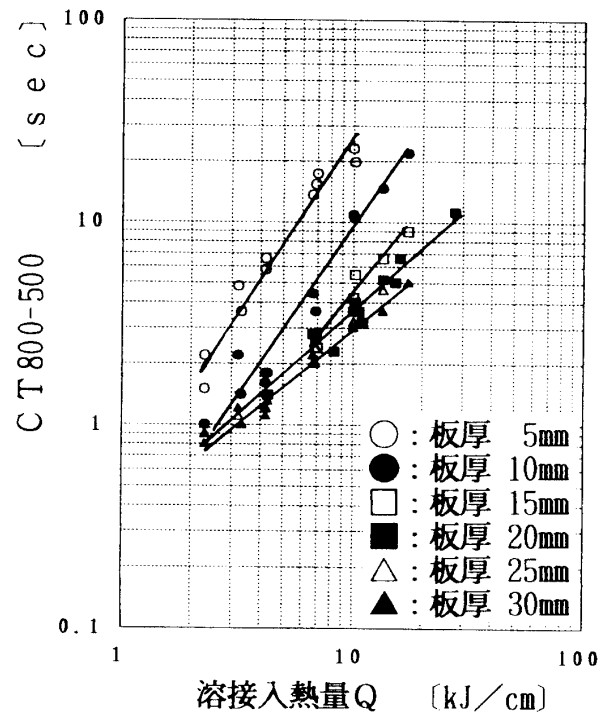


図4 溶接入熱量QとCT₈₀₀₋₅₀₀の関係

	$CT_{800-500} = a Q^n$
板厚 5mm	$CT_{800-500} = 0.495 Q^{1.737}$
板厚 10mm	$CT_{800-500} = 0.202 Q^{1.648}$
板厚 15mm	$CT_{800-500} = 0.240 Q^{1.280}$
板厚 20mm	$CT_{800-500} = 0.254 Q^{1.151}$
板厚 25mm	$CT_{800-500} = 0.361 Q^{0.956}$
板厚 30mm	$CT_{800-500} = 0.367 Q^{0.912}$
	----- (1)

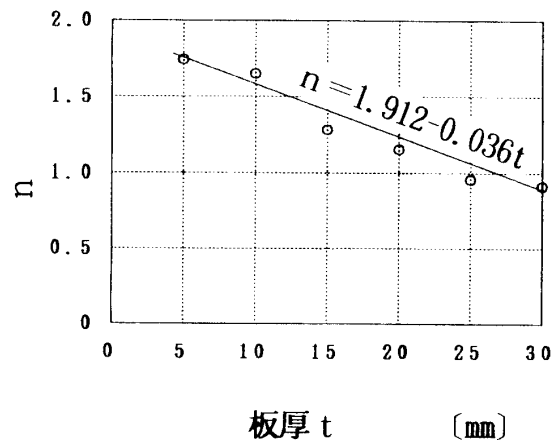


図5 板厚tとQの乗数nの関係

図5からわかるように板厚が10mm 5mmと薄くなり熱の流れが2次元熱流になるとQの乗数nは2に近づき、また板厚が20mm 25mmと厚くなり熱の流れが3次元熱流になるとQの乗数nは1に近づく傾向が見られた。従って図5より溶接入熱量QとCT₈₀₀₋₅₀₀の関係は、板厚 5mmから30mmの範囲において、(2)式のごとくなった。

$$CT_{800-500} = a Q^{1.912-0.036t} \quad \text{----- (2)}$$

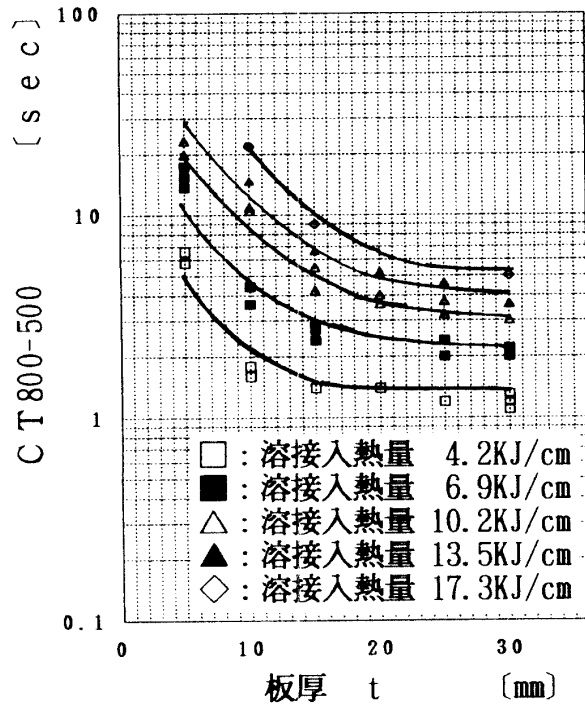
但し、板厚の範囲 5mm~30mm

3-2 板厚 t と $CT_{800-500}$ の関係

図5に板厚 t と $CT_{800-500}$ の関係を示した。板厚が厚くなるほど、また溶接入力熱量 Q が小さくなるほど、冷却特性はほぼ一定の冷却時間 ($CT_{800-500}$) で安定する傾向が見られる。この現象は、熱の流れが、2次元熱流から完全な3次元熱流へと変化していったためだと考えられる。

図5より板厚 t と $CT_{800-500}$ の関係は、溶接入力熱量 $4.2\text{kJ/cm} \sim 17.3\text{kJ/cm}$ の範囲において(3)式のごとくになった。

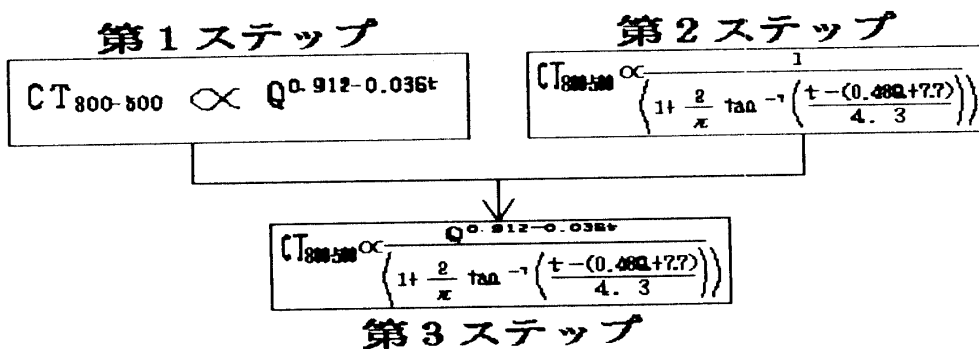
(3)式の \tan^{-1} は、2次元熱流から3次元熱流への変化を表現しており、また \tan^{-1} の中の溶接入力熱量 Q が小さい時には、板厚 t が薄くても3次元熱流になることを示している。

図6 板厚 t と $CT_{800-500}$ の関係

$$CT_{800-500} = \frac{k_2}{1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - (0.48Q + 7.7)}{4.3} \right)} \quad (3)$$

3-3 溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係

第1ステップより求めた溶接入力熱量 Q と $CT_{800-500}$ の関係及び、第2ステップより求めた板厚 t と $CT_{800-500}$ の関係をそれぞれ統合することにより溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係を導き出すことが出来る。その手順を図7に示した。

図7 溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係を求める手順

3-4 $CT_{800-500}$ と溶接割れに関する $CT_{800-300}$ の関係及び

$CT_{800-500}$ と硬化性及び金属組織に関する CR_{540} の関係

$CT_{800-500}$ と $CT_{800-300}$ の関係を図10に示した。図10より、 $CT_{800-500}$ と $CT_{800-300}$ の関係は、(7)式のごとくなり $CT_{800-500}$ の約3倍で $CT_{800-300}$ が求まることを示す。

$$CT_{800-300} = 2.9 CT_{800-500} \quad \text{--- (7)}$$

更に、 $CT_{800-500}$ と CR_{540} の関係を図11に示した。 $CT_{800-500}$ と CR_{540} の関係は、両対数グラフ上で右下がりの直線関係にあり、(8)式が求まった。(8)式から221を $CT_{800-500}$ で割ることにより、 CR_{540} を求めることができる。

$$CR_{540} = 221 / CT_{800-500} \quad \text{--- (8)}$$

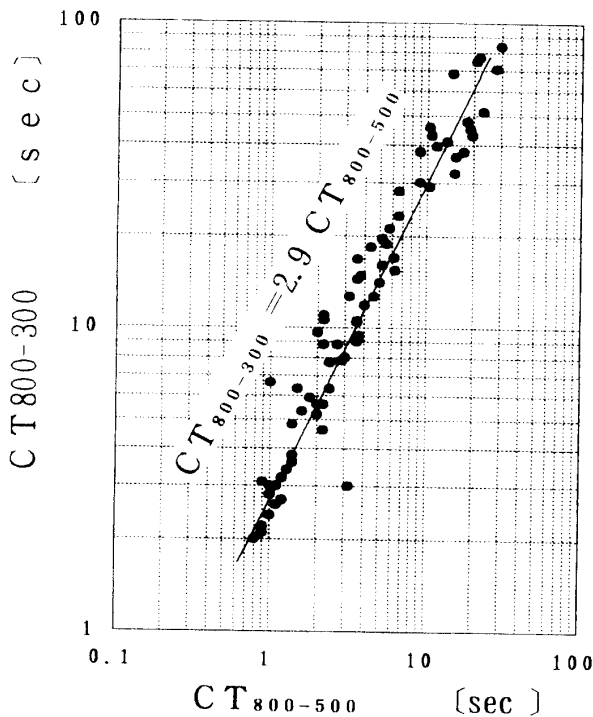


図10 $CT_{800-500}$ と $CT_{800-300}$ の関係

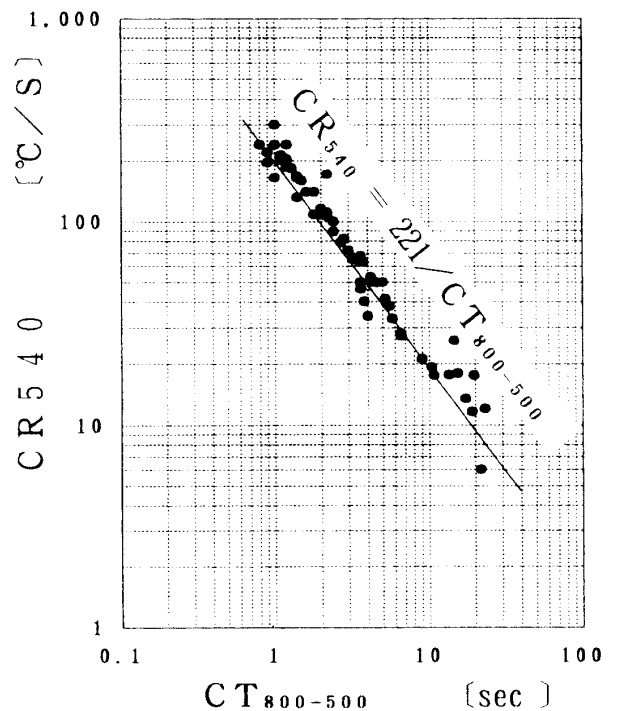


図11 $CT_{800-500}$ と CR_{540} の関係

4. 結言

局所的な急熱、急冷による溶接部の変質で溶接性を評価する最も基本的な要素の1つは鋼の溶接部の硬化現象である。溶接部の硬化性は溶接時の冷却特性により大きく影響を受けることが言われている。本研究では、TIG溶接において溶接入熱量 Q と板厚 t から冷却特性を求める以下のような実験関係式を得た。

図7より、第3ステップで導き出される溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係は、比例関係で導き出される。そこで、この式の左辺と右辺に等号関係を成立させるために係数を与える必要があり、(4)式を提案した。

$$CT_{800-500} = \frac{Q^{1.912-0.036t}}{A \left(1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - (0.48Q + 7.7)}{4.3} \right) \right)} \quad (4)$$

$$A = \frac{Q^{1.912-0.036t}}{CT_{800-500} \left(1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - (0.48Q + 7.7)}{4.3} \right) \right)} \quad (5)$$

(4)式の係数Aは、(5)式のように変形し測定より得た $CT_{800-500}$ とその時の溶接諸条件である溶接入熱量Q及び板厚tを代入することによって求められる。従って、

(4)式の係数Aは、計算により $A = 4.67 \times 10^{0.044Q - (0.0016Q + 0.0186)t}$ で求められた。以上のことから溶接諸条件と $CT_{800-500}$ の関係は、(6)式のごとくになった。

そこで(6)式と測定点とを図8、図9にて比較してみた。図8及び図9から(6)式と測定点とが比較的良好一致していることが確認できた。

$$CT_{800-500} = \frac{Q^{1.912-0.036t}}{4.67 \times 10^{0.044Q - (0.0016Q + 0.0186)t} \left(1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - (0.48Q + 7.7)}{4.3} \right) \right)} \quad (6)$$

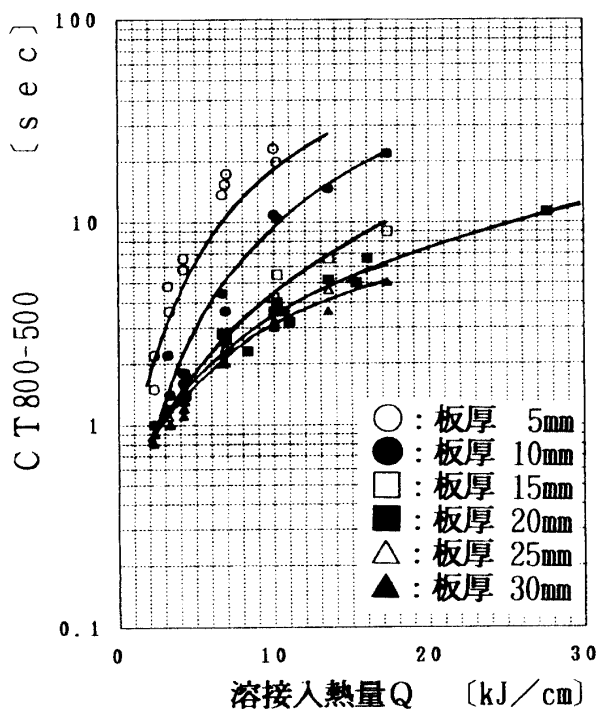


図8 溶接入熱量Qと $CT_{800-500}$ の関係

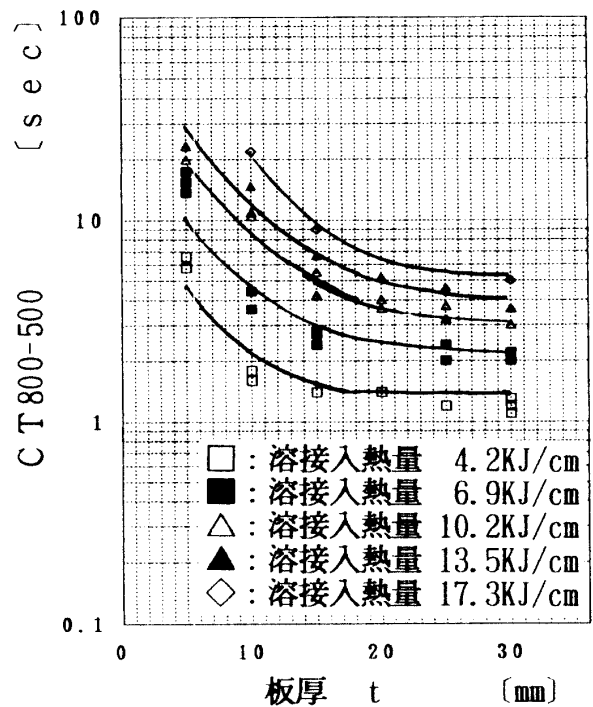


図9 板厚tと $CT_{800-500}$ の関係

(1) 溶接諸条件と $CT_{800-500}$ との間に次の実験関係式を得た。

$$CT_{800-500} = \frac{Q^{0.912-0.036t}}{4.67 \times 10^{0.0444-(0.0016Q+0.0186)t} \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t-(0.48Q-7.7)}{4.3} \right) \right\}}$$

$CT_{800-500}$: 800℃から500℃の冷却時間(sec)
 Q : 溶接入力熱量(kJ/cm)
 t : 板厚(mm)

(2) $CT_{800-500}$ と $CT_{800-300}$ との間に次の実験関係式を得た。

$$CT_{800-300} = 2.9 CT_{800-500}$$

$CT_{800-500}$: 800℃から500℃の冷却時間(sec)
 $CT_{800-300}$: 800℃から300℃の冷却時間(sec)

(3) $CT_{800-500}$ と CR_{540} との間に次の実験関係式を得た。

$$CR_{540} = 221 / CT_{800-500}$$

$CT_{800-500}$: 800℃から500℃の冷却時間(sec)
 CR_{540} : 540℃における冷却速度(℃/sec)

本研究では、TIG溶接について溶接入力熱量・板厚から冷却特性を求めたが、今後さらに予熱パス間温度の影響も考慮した初期温度の影響について研究する。

参考文献

- (1) 稲垣道夫 "構造用鋼材溶接部の変質について" 金属材料技術研究所研究報告 第3巻 第1号 p. 152 ~ p. 176 (1960)
- (2) 石井智之、北川善光、矢尾昌宏 "TIG溶接部の冷却特性" (第1報) 福井工業大学機械工学科卒業研究論文 (1993)
- (3) 下山仁一、石井智之、北川善光、矢尾昌宏 "TIG溶接部の冷却特性に関する研究" 日本機会学会 北陸信越学生会 第23回学生員卒業研究発表講演会 講演前刷集 p. 143 (1994-3)
- (4) 下山仁一、石井智之、高野元太 "TIG溶接部の冷却特性" (第1報) 溶接学会全国大会講演概要 第55集 p. 268 ~ p. 269 (1994-9)

(平成6年12月15日受理)