

# T I G 溶接部の冷却特性に関する研究 (第3報)

— 鋼溶接部の冷却特性に及ぼす溶接入力熱量、板厚及び初期温度の影響 —

下山 仁一\*

## Study on Cooling Characteristics of TIG Welds

— Effect of weld heat input, plate thickness and preheating temperature on Cooling Characteristics of steel welds —

Toshikazu Shimoyama

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 point of view, we have investigated cooling characteristics of TIG welds by experimental analysis.

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

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た溶接部（溶接金属部、溶接熱影響部）では、母材と異なる金属組織となり、それに伴って硬化・軟化現象が生じ、延性の低下、脆化及び溶接割れが発生する。このことは、溶接部における冷却特性が溶接接合部の諸性能に直接影響することを意味している。一方最近では、アークの周囲を不活性ガス（Arガス）で遮断することより溶接金属に空気中の $O_2$ 、 $N_2$ が混入することなく純度の高い溶接金属を得ることができるTIG溶接の適用が拡大しつつある。そこで本研究では、TIG溶接部の冷却特性について実験的解析を行った。

第3報では、第1報及び第2報に引き続き初期温度の影響について検討し、第1報及び第2報の解析結果と合わせ、TIG溶接部の冷却特性に及ぼす溶接入力熱量、板厚及び初期温度の影響について実験的解析を行った。即ち、溶接入力熱量 $Q$ 、板厚 $t$ 及び初期温度 $\theta_0$ から、 $800^\circ\text{C}$ から $500^\circ\text{C}$ までの冷却時間を求める実験関係式を確立し、 $800^\circ\text{C}$ から $500^\circ\text{C}$ までの冷却時間と溶接割れに関する $800^\circ\text{C}$ から $300^\circ\text{C}$ までの冷却時間との関係及び、硬化性及び金属組織に関する $540^\circ\text{C}$ における冷却速度との関係を明らかにした。

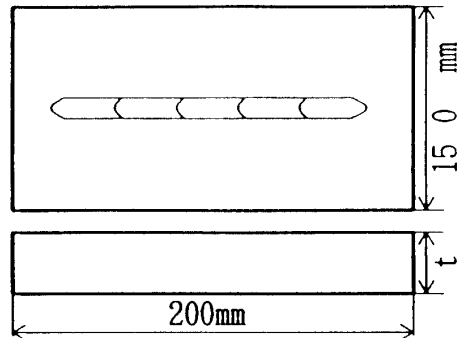
---

\* 機械工学科

## 2. 実験方法

### 2-1 供試鋼板及び試験板寸法

TIG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定数(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SM41を使用した。冷却特性に及ぼす初期温度(予熱温度)の影響を調べるために、板長を200mm 板幅を150mm とし、板厚が10mm、15mm、20mm及び30mmの試験板をそれぞれ用意した。その試験板寸法を図1に示した。



但し、 $t = 10\text{mm}$ 、 $15\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 及び $30\text{mm}$

図1 試験板寸法

### 2-2 溶接条件

試験板の初期温度を $27^\circ\text{C}$ から $300^\circ\text{C}$ としTIG溶接では直流正極性(DCSP)で溶接電流を150Aから290A、溶接速度を5cm/minから13cm/minとし、溶接入熱量 $6.7\text{kJ/cm}$ から $26.4\text{kJ/cm}$ へと変化させ溶接熱サイクルを測定した。

### 2-3 実験内容

予熱ヒーターにより試験板を $100^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$ 及び $300^\circ\text{C}$ まで予熱し、測定した溶接熱サイクルから $800^\circ\text{C}$ から $500^\circ\text{C}$ までの冷却時間( $CT_{800-500}$ )、 $800^\circ\text{C}$ から $300^\circ\text{C}$ までの冷却時間( $CT_{800-300}$ )及び $540^\circ\text{C}$ 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 $17.0\text{kJ/cm}$ 、板厚30mmの一定とし、初期温度を $30^\circ\text{C}$ から $285^\circ\text{C}$ へと変化させた時の冷却特性を図2に示した。 $800^\circ\text{C}$ を基準(0秒)として横軸に時間(sec)を対数目盛りに縦軸に温度( $^\circ\text{C}$ )を等目盛りに取ったものである。図2から分かるように初期温度が $30^\circ\text{C}$ から $285^\circ\text{C}$ へと大きくなるに従って、冷却曲線が緩やかになり $800^\circ\text{C}$ から $500^\circ\text{C}$ までの冷却時間が長くなっていることが分かる。

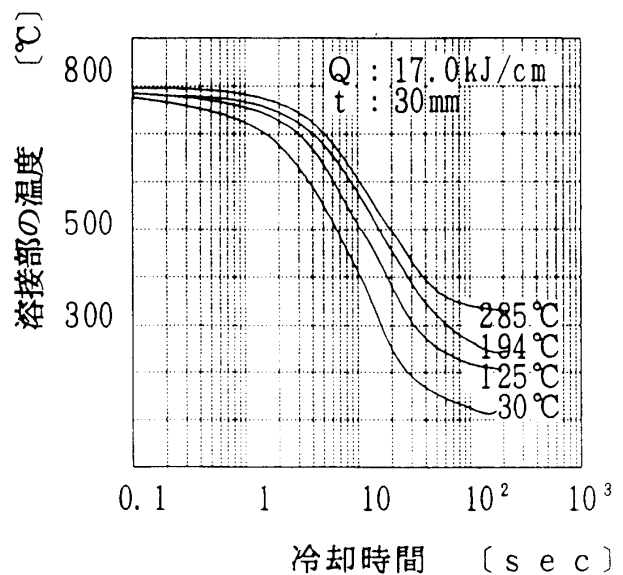


図2 冷却特性に及ぼす初期温度 $\theta_0$ の影響

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。  
 図3に溶接諸条件からCT<sub>800-500</sub>を求める実験関係式を導く手順を示した。

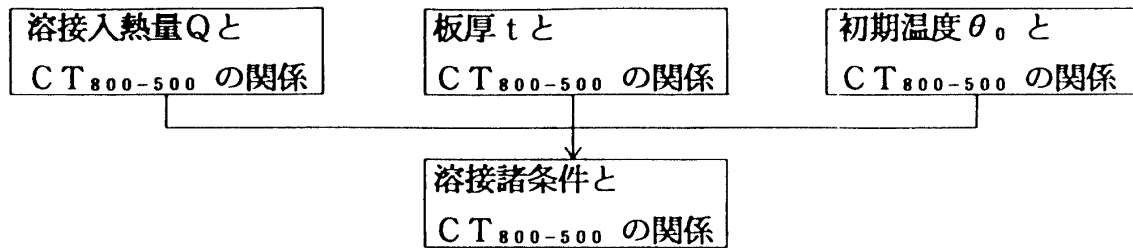


図3 溶接諸条件とCT<sub>800-500</sub>の関係を求める手順

図3に示すように、第1ステップとして溶接入力熱量QとCT<sub>800-500</sub>の関係を、第2ステップとして板厚tとCT<sub>800-500</sub>の関係を、第3ステップとして初期温度θ<sub>0</sub>とCT<sub>800-500</sub>の関係を求め、最終的にこれらの3つの関係を統合して、溶接諸条件とCT<sub>800-500</sub>の関係を求めた。

### 3-1 溶接入力熱量QとCT<sub>800-500</sub>の関係

図4に第1報及び第2報の解析結果を用いて溶接入力熱量QとCT<sub>800-500</sub>の関係を示した。これらの直線関係式は一般にCT<sub>800-500</sub> = aQ<sup>n</sup>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には式(1)から板厚tとQの指数nの関係を示し、式(2)に溶接入力熱量QとCT<sub>800-500</sub>の実験関係式を一括して示した。

$$CT_{800-500} = a Q^n$$

板厚 3mm	$CT_{800-500} = 0.456 Q^{1.890}$
板厚 5mm	$CT_{800-500} = 0.414 Q^{1.757}$
板厚 10mm	$CT_{800-500} = 0.239 Q^{1.550}$
板厚 15mm	$CT_{800-500} = 0.195 Q^{1.357}$
板厚 20mm	$CT_{800-500} = 0.274 Q^{1.120}$
板厚 25mm	$CT_{800-500} = 0.333 Q^{1.000}$
板厚 30mm	$CT_{800-500} = 0.374 Q^{0.904}$

板厚 3mm~30mm

$$CT_{800-500} = a Q^{1.975-0.041t} \quad (2)$$

但し、板厚 t = 26mm以上は、n = 0.904

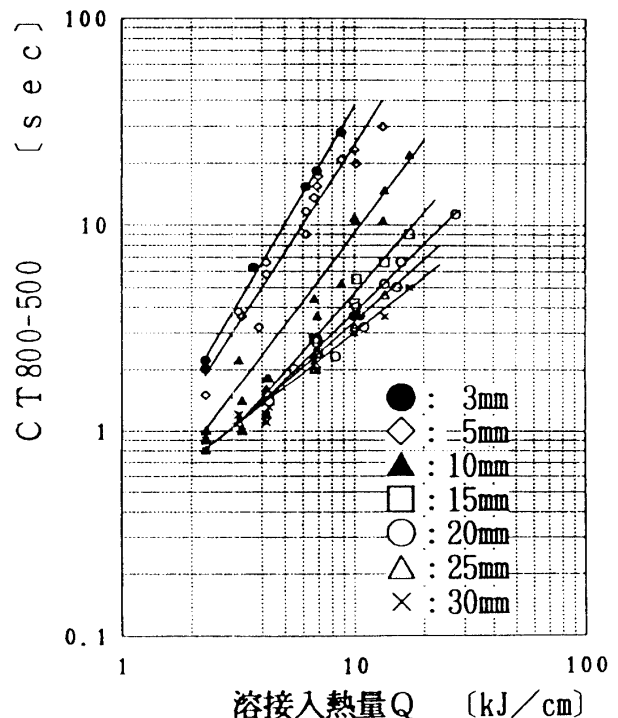


図4 溶接入力熱量QとCT<sub>800-500</sub>の関係

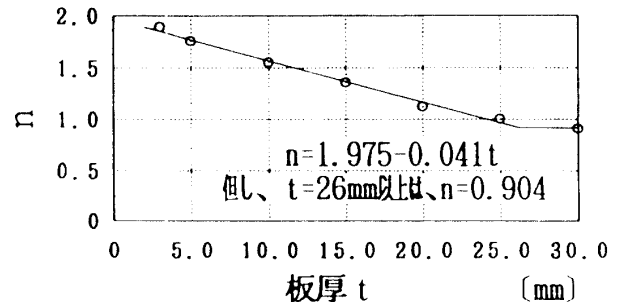


図5 板厚 t と Q の乗数 n の関係

### 3-2 板厚 $t$ と $CT_{800-500}$ の関係

図6に第1報及び第2報の解析結果を用いて板厚  $t$  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6より板厚  $t$  と  $CT_{800-500}$  の関係は溶接入熱量  $3.7\text{kJ/cm} \sim 17.3\text{kJ/cm}$  の範囲において式(3)のごとくになった。式(3)の  $\tan^{-1}$  は、2次元熱流から3次元熱流への変化を表しておりまた  $\tan^{-1}$  の中の溶接入熱量  $Q$  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。

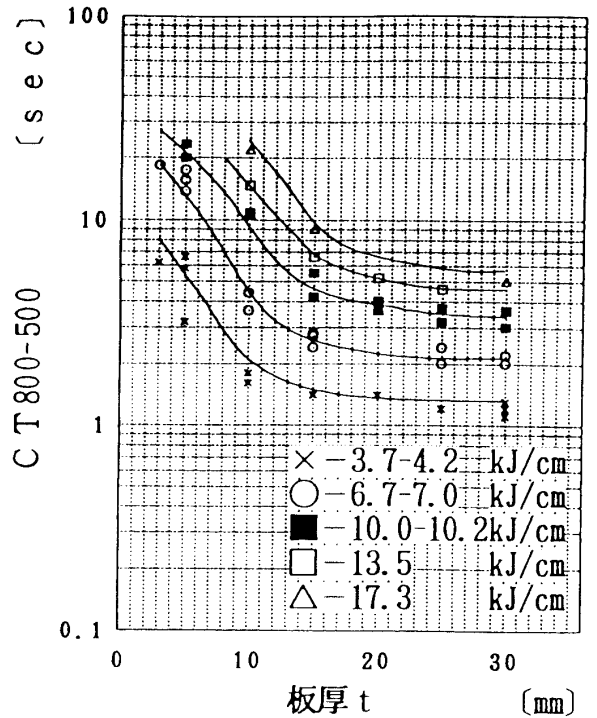


図6 板厚  $t$  と  $CT_{800-500}$  の関係

$$CT_{800-500} = \frac{k_2}{1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{t - \log_{1.31} Q/0.42}{3.2} \right)} \quad (3)$$

### 3-3 初期温度 $\theta_0$ と $CT_{800-500}$ の関係

図7に一例として、板厚20mmの時ににおける初期温度  $\theta_0$  と  $CT_{800-500}$  の関係を示した。両対数グラフの横軸に  $(600 - \theta_0)$  を縦軸に  $CT_{800-500}$  を取ると式(4)に示す、右下がりの直線式が得られた。

$$CT_{800-500} = \frac{b}{(600 - \theta_0)^{2.12}} \quad (4)$$

図7から初期温度  $\theta_0$  が大きくなるに従って  $CT_{800-500}$  も大きくなっているのが分かる。また板厚10mm、15mm及び30mmについても同様に初期温度  $\theta_0$  と  $CT_{800-500}$  の関係を示す実験関係式を求め、一括して式(5)に示した。また更に式(5)を平均したものを式(6)に示した。

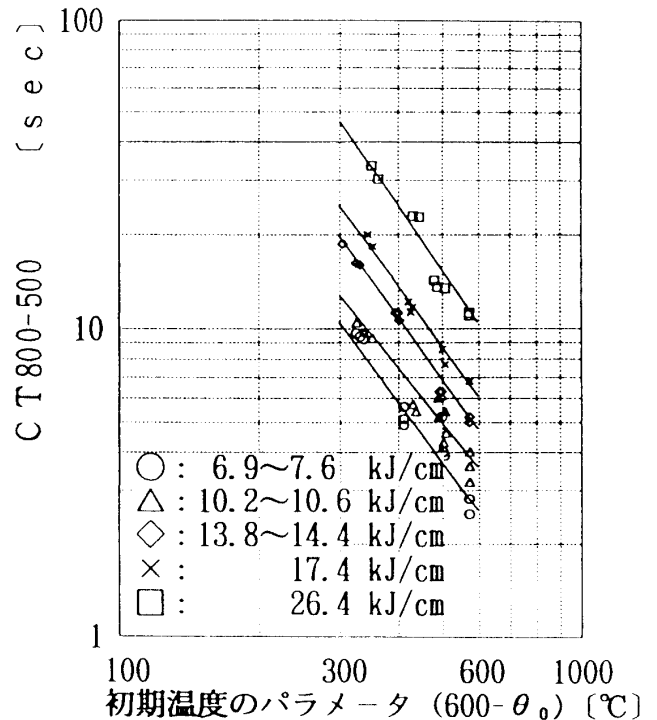


図7 初期温度  $\theta_0$  と  $CT_{800-500}$  の関係

$$\begin{aligned}
 \text{板厚10mm} \quad C T_{800-500} &= \frac{b}{(600-\theta_0)^{2.25}} & \text{板厚15mm} \quad C T_{800-500} &= \frac{b}{(600-\theta_0)^{2.21}} \\
 \text{板厚20mm} \quad C T_{800-500} &= \frac{b}{(600-\theta_0)^{2.12}} & \text{板厚30mm} \quad C T_{800-500} &= \frac{b}{(600-\theta_0)^{1.99}} \dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

板厚10mm~30mm、溶接入熱量6.9kJ/cm~27.6kJ/cm、初期温度30℃~300℃

$$C T_{800-500} = \frac{b}{(600-\theta_0)^2} \dots\dots (6)$$

### 3-4 溶接諸条件と $C T_{800-500}$ の関係

図3に示す手順に従って、式(2)の溶接入熱量  $Q$  と  $C T_{800-500}$  の関係、式(3)の板厚  $t$  と  $C T_{800-500}$  の関係及び式(6)の初期温度  $\theta_0$  と  $C T_{800-500}$  の関係を示すパラメーターをそれぞれ統合することにより式(7)の溶接諸条件と  $C T_{800-500}$  の関係を示すパラメーターを導き出すことができる。

$$C T_{800-500} \propto \frac{Q^{1.975-0.041t}}{(600-\theta_0)^2 \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{t - \log_{1.31} Q / 0.42}{3.2} \right) \right\}} \dots\dots (7)$$

式(7)より導き出されたパラメーターは、溶接諸条件と  $C T_{800-500}$  の関係が、比例関係で示されるので、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  $\kappa$  を与える必要があり、式(8)を提案した。

$$C T_{800-500} = \frac{Q^{1.975-0.041t}}{\kappa (600-\theta_0)^2 \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{t - \log_{1.31} Q / 0.42}{3.2} \right) \right\}} \quad (8)$$

式(8)の係数  $\kappa$  は、式(9)のように変形し、測定より得た  $C T_{800-500}$  とその時の溶接諸条件である溶接入熱量  $Q$  及、板厚  $t$  及び初期温度  $\theta_0$  を代入することによって求められる。

$$\kappa = \frac{Q^{1.975-0.041t}}{C T_{800-500} (600-\theta_0)^2 \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{t - \log_{1.31} Q / 0.42}{3.2} \right) \right\}} \quad (9)$$

従って、係数  $\kappa$  は、計算により  $\kappa = 4.2Q \times 10^{-6} \times (-0.003Q + 0.95)^t$  で求められた。但し、板厚26mm以上は  $\kappa = 4.2 \times 10^{-6}$  の一定とする。以上のことから溶接諸条件と  $C T_{800-500}$  の関係は、式(10)のごとくなった。

$$C T_{800-500} = \frac{Q^{1.975-0.041t}}{\kappa (600-\theta_0)^2 \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{t - \log_{1.31} Q / 0.42}{3.2} \right) \right\}}$$

$$\kappa = 4.2Q \times 10^{-6} \times (-0.003Q + 0.95)^t$$

但し、板厚26mm以上では  $\kappa = 4.2 \times 10^{-6}$ 、 $Q$  の乗数は 0.904

$$\dots\dots (10)$$

そこで式(10)と測定点とを図8、図9及び図10にて比較した。

図8及び図9は、一例として初期温度 200℃における溶接入熱量 $Q$ 及び板厚 $t$ の冷却時間 $CT_{800-500}$  に対する影響を示した。図10は、一例として板厚20mmにおいて初期温度(予熱温度) $\theta_0$ が冷却時間 $CT_{800-500}$  に対し、どの程度影響を及ぼすのかを示した。図8、図9及び図10から溶接入熱量 $Q$ が大きくなるほど、また板厚 $t$ が薄くなるほど、また更に初期温度(予熱温度) $\theta_0$ が高くなるほど、800℃から500℃までの冷却時間 $CT_{800-500}$  が長くなっていることが分かる。また実線で示した実験関係式(10)と測定点の関係は、多少のばらつきがあるものの、溶接部の冷却特性を考えるうえで実用的には比較的よく一致していると考えられる。

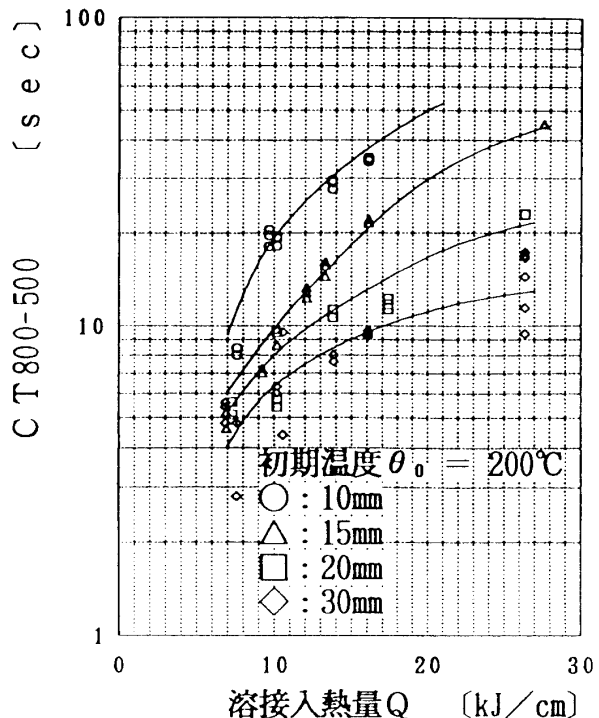


図8 溶接入熱量 $Q$ と $CT_{800-500}$ の関係

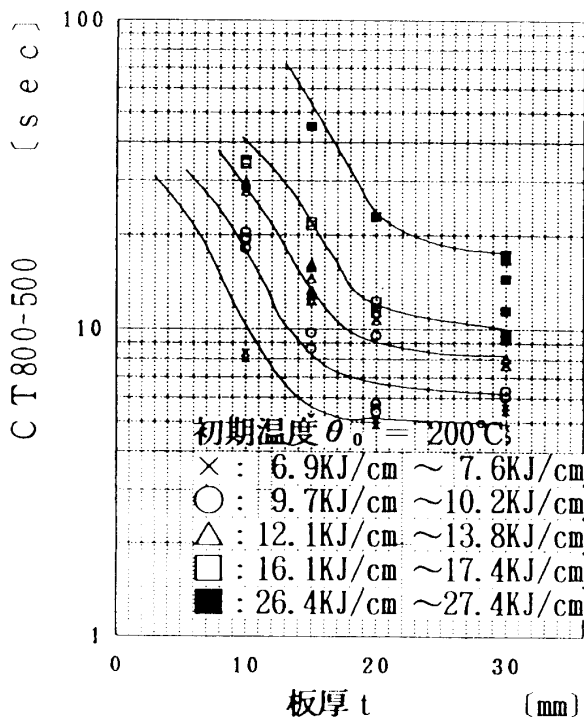


図9 板厚 $t$ と $CT_{800-500}$ の関係

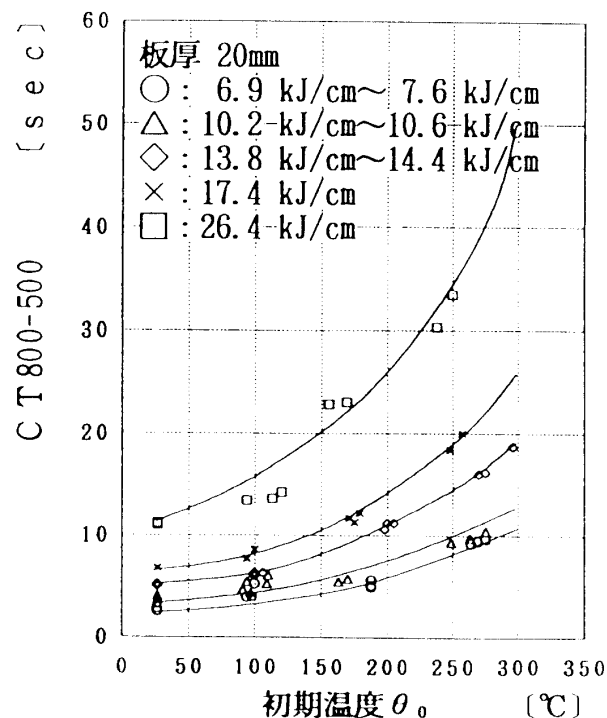


図10 初期温度 $\theta_0$ と $CT_{800-500}$ の関係

### 3-4 CT<sub>800-500</sub> と溶接割れに関するCT<sub>800-300</sub> の関係及び

#### CT<sub>800-500</sub> と硬化性及び金属組織に関するCR<sub>540</sub> の関係

CT<sub>800-500</sub> とCT<sub>800-300</sub> の関係を図11に示した。図11より、CT<sub>800-500</sub> とCT<sub>800-300</sub> の関係は、式(11)のごとくなりCT<sub>800-500</sub> の3倍でCT<sub>800-300</sub> が求まることを示している。

$$CT_{800-300} = 2.8 \times CT_{800-500}^{1.2} \quad \dots (11)$$

更に、CT<sub>800-500</sub> とCR<sub>540</sub> の関係を図12に示した。CT<sub>800-500</sub> とCR<sub>540</sub> の関係は、両対数グラフ上で右下がりの直線関係にあり、式(12)が求まった。式(12)から約220をCT<sub>800-500</sub> で割ることにより、CR<sub>540</sub> を求めることができる。

$$CR_{540} = 215 / CT_{800-500} \quad \dots (12)$$

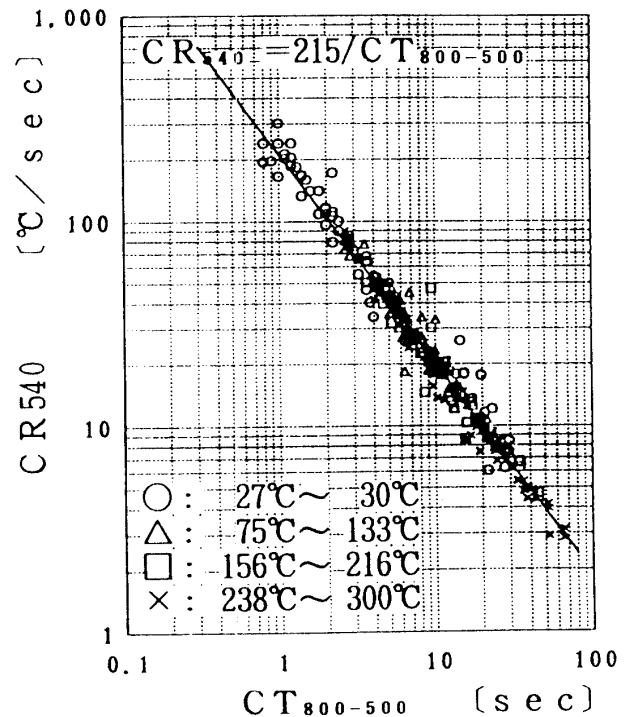
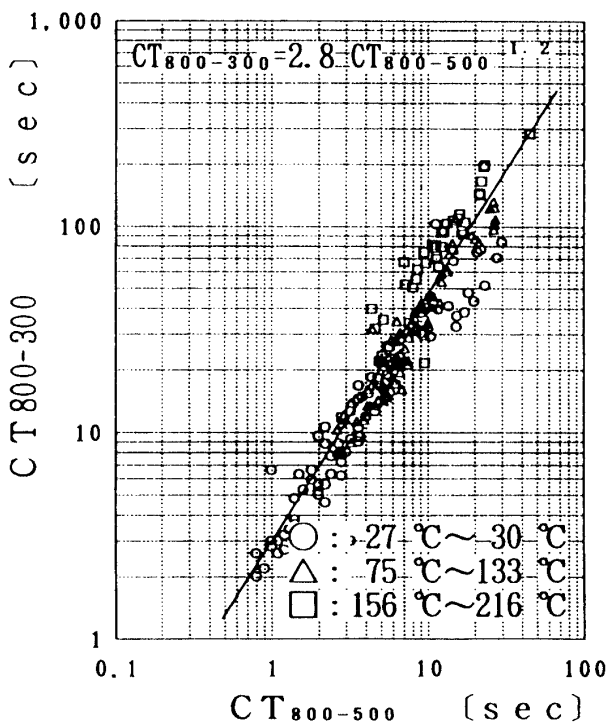


図11 CT<sub>800-500</sub> とCT<sub>800-300</sub> の関係

図12 CT<sub>800-500</sub> とCR<sub>540</sub> 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、板厚t及び初期温度θ<sub>0</sub> から冷却特性を求める以下のような実験関係式を得た。

(1) 溶接諸条件とCT<sub>800-500</sub>との間に次の実験関係式を得た。

適用条件 初期温度30℃～300℃ 溶接入力熱量2.3kJ/cm～27.6kJ/cm 板厚3mm～30mm  
 $Q^{1.975-0.041t}$

$$CT_{800-500} = \frac{\kappa (600 - \theta_0)^2 \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{t - \log_{1.31} Q / 0.42}{3.2} \right) \right\}}{\kappa = 4.2Q \times 10^{-6} \times (-0.003Q + 0.95)^4}$$

但し、板厚 t = 26mm以上では  $\kappa = 4.2 \times 10^{-6}$ 、Qの乗数は0.904とする。

CT<sub>800-500</sub> : 800℃から500℃の冷却時間(sec)

$\theta_0$  : 初期温度(℃)

Q : 溶接入力熱量(kJ/cm)

t : 板厚(mm)

(2) CT<sub>800-500</sub>とCT<sub>800-300</sub>との間に次の実験関係式を得た。

$$CT_{800-300} = 2.8 \times CT_{800-500}^{1.2}$$

CT<sub>800-500</sub> : 800℃から500℃の冷却時間(sec)

CT<sub>800-300</sub> : 800℃から300℃の冷却時間(sec)

(3) CT<sub>800-500</sub>とCR<sub>540</sub>との間に次の実験関係式を得た。

$$CR_{540} = 215 / CT_{800-500}$$

CT<sub>800-500</sub> : 800℃から500℃の冷却時間(sec)

CR<sub>540</sub> : 540℃における冷却速度(℃/sec)

〔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) 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)
- (3) 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)
- (4) 下山仁一、石井智之、"TIG溶接部の冷却特性に関する研究(第1報)" 福井工業大学研究紀要投稿論文 p. 97～p. 104 (1994-11)
- (5) 下山仁一、石井智之、"TIG溶接部の冷却特性に関する研究(第2報)" 福井工業大学研究紀要投稿論文 p. 97～p. 104 (1995-11)

(平成10年12月1日受理)