

# 溶接継手の特性予測

新日本製鐵 株式会社

鉄鋼研究所 接合研究センター

糟谷 正

# 溶接継手の特性予測

新日鐵(株) 糟谷正

## 0. 緒言

(社)日本溶接協会に溶接データシステム研究委員会(WDS委員会)が設立されたのは1976年、すでに28年前となる。著者も、途中からではあるが、委員としてその活動に参加させてもらった。ここで、これまでの活動を、簡単に振り返ってみたい。

WDS委員会は、コンピュータを溶接技術分野に適用・応用するために設立されたもので、著者は、溶接継手特性の推定をコンピュータで行うためのアルゴリズム調査からスタートした。これは、コンピュータを利用して溶接継手の特性を効率よく推定しようというのが目的であった。調査した継手特性としては、硬さ、割れ、破面遷移温度、シャルピー吸収エネルギーなどである。これら特性の推定方法は、いわゆる実験式の形をとっていて、コンピュータに取り入れるのはそれほど難しいことではなかった。むしろ、この活動と通じて感じたことは、継手特性の予測で重要な点はコンピュータに取り入れやすい形になっているかどうかという点だけでなく、その推定方法がどれだけ信頼性があるかが重要である、という点であった。あたりまえのようなことであるが、継手特性の決定過程は複雑で、それを全て推定式の中に反映させることは簡単なことではない。コンピュータを有効利用するためには、信頼性のある推定方法を確認するための地道な研究が必要なのである。

その後、1995年の阪神大震災をきっかけに日本溶接協会に溶接部の性能評価法調査特別委員会が発足、WDS委員会の協力のもと、著者がこの特別委員会の委員も兼ねる形で活動が始まった。この活動は確かに溶接継手特性の予測にかかわるものであったが、その手法はそれまでの方法と大きく異なっていた。それまでの継手特性推定といえば、推定するための基本データ、例えば、溶接条件、用いた鋼材および溶接材料に関する情報が充分あるという前提があり、実際これまでの推定式もこの前提のもとで成り立っている。この特別委員会では、これら情報がないという条件で実際目の前にある継手に対してどうすればその特性を推定できるか、ということを検討した。もちろん、そのために必要な試験片採取(シャルピー試験片や引っ張り試験片等)ができないという条件下での推定である。このため、継手に大きな損傷を与えない程度で採取可能なデータがどれだけあるか、またそれらデータと機械的特性が良い相関があるかどうか、などを調査した。この手法は、厳密な意味での非破壊方法ではないため、セミ非破壊方法と呼んでいる。

WDS委員会における著者の活動は、大きく上記2つに分けることができる。それらはいわゆるコンピュータ利用という観点からは若干ずれている感がないわけではないが、このような状況になってしまったのは、継手特性の予測は確立されていない部分が多い、ということが原因であろう。ここでは、上記活動の成果を紹介すると共に、今後どのような発展をするのか、期待するところを述べてみたい。

## 1. 継手特性推定式

溶接部の継手予測がいつから始まったかと問われれば、著者はまず1940年のDearden & O'Niellの論文<sup>1)</sup>を思い浮かべる。この年初めて炭素当量が提案され、これにより鋼材成分が与えられるとHAZの最高硬さが推定できるようになった。このときには、まだ冷却時間が

考慮されておらず、現在の推定式と比べると信頼性は劣るものの、それ以前は鋼材が与えられても硬さ推定ができなかったことを考えると大きな進歩であった。特に炭素当量という便利な指標は、その後の推定式にも大いに利用されている。

炭素当量とは、継手特性、例えば硬さを各成分の冪級数にしたときの1次の項と考えられる。二次の項以降の影響は小さいとしたとき、この特性は(少なくとも成分の影響に関しては)炭素当量で表される。継手特性なるものが鋼材成分の影響を受ける以上、それは成分の関数と見なすことができ、したがって冪級数に展開することが可能である。炭素当量で表されるかどうかは、冪級数の二次項以降が大きいのか、小さいかという問題に帰着される。

WDS委員会では継手特性推定用として利用できる式の調査を行ってきた。その一部は平成3年の第2回セミナーで発表されている。ここで、その一例を紹介する。

まず、シャルピー吸収エネルギーでは、佐藤らが1971年に以下の式を報告した<sup>2)</sup>。

$$BvE_0 = -106Ceq(BvE_0) + 1.15R + 34.1 \quad (1)$$

$$Ceq(BvE_0) = C + \frac{Si}{17} + \frac{10Mn}{85} + \frac{Ni}{36} - \frac{Cr}{210} + \frac{Mo}{17} - \frac{2V}{3} + \frac{10Al}{43} + 5.1B$$

$$BvE_{-40} = -42.9Ceq(BvE_{-40}) + 0.807R + 9.31 \quad (2)$$

$$Ceq(BvE_{-40}) = C - \frac{10Si}{71} + \frac{10Mn}{92} - \frac{Ni}{174} + \frac{Cr}{109} - \frac{Mo}{118} - \frac{10V}{14} + \frac{2Al}{15} + 1.7B$$

$$HvE_0 = -115Ceq(HvE_0) + 1.05R + 47.0 \quad (3)$$

$$Ceq(HvE_0) = C - \frac{10Si}{51} + \frac{10Mn}{65} + \frac{Ni}{35} + \frac{Cr}{55} + \frac{10Mo}{62} - \frac{2V}{3} + \frac{10Al}{49} + 2.9B$$

$$HvE_{-40} = -77.3Ceq(HvE_{-40}) + 1.14R + 21.5 \quad (4)$$

$$Ceq(HvE_{-40}) = C - \frac{Si}{3} + \frac{Mn}{10} - \frac{Ni}{138} + \frac{Cr}{28} + \frac{10Mo}{52} - \frac{10V}{36} + \frac{Al}{12} + 3.2B$$

ここに、BvEはボンドの吸収エネルギー、HvEは熱影響部中央での吸収エネルギーをさし、単位はkg・mである。適用範囲はHT60~100鋼材で、Rは540℃での冷却時間[℃/s]であり、かつ、Rの範囲は0.6~8.3である。

1978年には、川口らが<sup>3)</sup>、破面遷移温度の推定式として、

$$vTs = 645C + 115Si + 106Mn + 66Ni + 108Cr + 162Mo + 3700B - 2910N - 244 \quad (5)$$

を報告した。これは板厚が30mmで入熱量が130kJ/cmという条件での60キロ鋼材のボンド部シャルピー試験結果を用いている。

1974年には、梶本らが<sup>4)</sup>、Rが10°C/sと2°C/sの場合における破面遷移温度の推定式を報告した。

$$vTs_{10} = -23 - 81C + 41Si + 5Mn - 29Cu - 6Ni + 29Mo + 202V + 178Nb + 1103Ti + 830N \quad (6)$$

$$vTs_2 = -16 + 127C + 42Si - 7Mn - 39Cu + 2Ni + 3Cr + 15Mo + 488V + 762Nb + 1600P \quad (7)$$

梶本らは、上記2式の推定誤差は18°Cあるため、二次の項も含めた式も報告している。

$$vTs_{10} = -148 + 1138C + 29Si + 20Mn - 48Cu + 28Ni + 33Cr + 329Mo + 502V + 1678Nb + 885Ti + 1189N - 259C \times Mn - 367C \times Cr - 2584C \times Mo - 50Cr \times Mo + 14Cu^2 - 24Ni^2 - 187Mo^2 \quad (8)$$

$$vTs_2 = -141 + 818C + 50Si + 70Mn - 5Cu + 20Ni + 115Cr + 175Mo + 524V + 601Nb + 1785P - 728N - 299C \times Mn - 624C \times Cr - 35Mn \times Cr - 52Mn \times Mo - 59Cr \times Mo - 9Mn^2 - 16Cr^2 - 20Cu^2 - 16Ni^2 - 75Mo^2 \quad (9)$$

上記2式は、(6)式、(7)式と比べ、かなり複雑になってはいるが、推定誤差は15°Cと、それほど改善されていないようである。その原因として、式で考慮した以外の要因でマイクロ組織に与える影響が大きい元素がある、などの考察を行っている。

式(8)、(9)を除くと、上記推定式は各成分の一次式であるため、炭素当量を利用した推定式である、ということができる。

次に、これまでの推定式より形式が複雑であるが、やはり、炭素当量の概念を利用している例として、HAZの最高硬さ推定式を紹介する<sup>5)</sup>。

$$H_V = H_M \cdot V_M + H_B \cdot (1 - V_M) \quad (10)$$

ここに

$$V_M = 0.5 - 0.455 \cdot \arctan \left\{ 4 \frac{\log(\Delta t_{8/5} / \Delta t_M)}{\log(\Delta t_B / \Delta t_M)} - 2 \right\}$$

$$H_M = 884C(1 - 0.3C^2) + 294, \quad H_B = 197CE_{II} + 117$$

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3}$$

$$\ln(\Delta t_M) = 10.6CE_M - 4.8$$

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

$$\Delta H = \begin{cases} 0, & B \leq 0.0001 \\ 0.03f_N, & B = 0.0002 \\ 0.06f_N, & B = 0.0003 \\ 0.09f_N, & B \geq 0.0004 \end{cases}, \quad f_N = \frac{0.02 - N}{0.02}$$

$$\ln(\Delta t_B) = 6.2CE_B + 0.87, \quad CE_B = C + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}$$

式(10)を計算するために、それ以降の各パラメーターを計算する必要があるが、それぞれのパラメーター ( $\Delta t_M$  など) には、炭素当量の概念が利用されている。最高硬さ推定式は、これ以外のも多くの研究報告があるが、ここでの紹介は省略させてもらい、参考文献に載せる程度にとどめたい<sup>9-11)</sup>。

WDS 委員会活動で扱った継手特性予測方法として最後に紹介するのは、溶接低温割れ、すなわち割れ防止予熱温度の推定である。まず、伊藤らの有名な式<sup>6)</sup>を紹介する。

$$T_0 = 1440P_w - 392 \quad (11)$$

$$P_w = Pcm + \frac{H_{JIS}}{60} + \frac{h}{600}$$

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{5} + 5B$$

(11)式は、y 形溶接割れ試験における限界予熱温度を推定する式で、 $H_{JIS}$  はグリセリン法で測定した拡散性水素量、 $h$  は板厚である。この式の特徴は、Mn 等の合金元素の係数が小さい炭素当量  $Pcm$  を用いている (本来は、この式により  $Pcm$  が定義された)、水素量の影響が線形である、などがある。水素量の影響が線形か対数的か、鋼材組成の影響が  $Pcm$  で表現すべきか  $CE(IIW)$  で表現すべきか、などの割れ感受性の議論がこれまで行われてきた。なお、著者が現在最も精度がよいと考えている方法は、以下の CEN チャート方式<sup>7)</sup>である。

これは、炭素当量として CEN を採用しているが、これは高炭素領域で IIW の炭素当量に、低炭素領域で  $Pcm$  になるような関数を採用している。また、限界予熱温度は、式化されているわけではなく、グラフを用いて決定するようになっている。

$$CEN = C + A(C) \times \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5B \right\} \quad (12)$$

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

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (13)$$

図 2.1 は基本的なグラフで、板厚毎に、CEN と割れ防止予熱温度の関係を示したグラフである。板厚毎に関係を決定しているのは、(11)式中  $P_w$  の第 3 項に対応する、すなわち拘束度の影響を考慮してのことである。図 2.2 は、実際の水素量が図 2.1 における水素量 5ml/100g からずれたときの影響、図 2.3 は入熱量が 1.7kJ/mm からずれたときの影響を CEN の増減に換算したものである。図 2.2、図 2.3 の CEN 増減を鋼材組成から計算される CEN に加えたものを用いて図 2.1 を利用すればよい。

これまで紹介した推定は研究の歴史が古く、

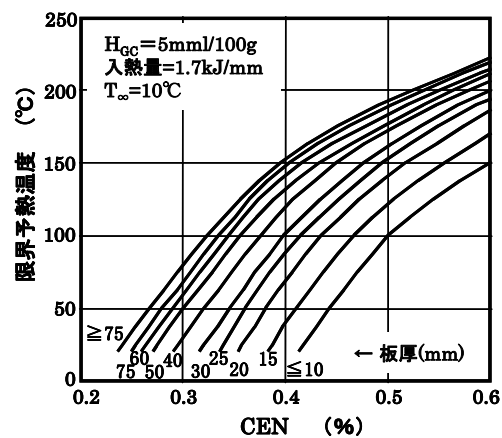


図 2.1 CEN と割れ防止限界予熱温度

最新の推定方法も、過去の研究者が得た知見の上に成り立っているとと言っても過言ではない。

このことを硬さ推定式の歴史で見てみよう。

既に述べたが、Dearden&O’Niell の論文では、硬さは炭素当量で表現されるのみで、冷却時間等溶接条件の影響は考慮されていない。しかし、現在の硬さ推定式でも、例えばペイナイト100%組織の硬さは成分の一次関数で与えている。そういう意味では、Dearden&O’Niell の考えを利用しているといえる。冷却時間が影響するのは、マイクロ組織率が影響され、結果として硬さも冷却時間に影響するためである。

マイクロ組織率を決めるのに重要な100%マルテンサイトが得られる限界冷却時間 ( $\Delta t_M$  : 鋼材組成の関数、冷却速度を用いる場合もある) という概念は、1970年の Bastien らの論文<sup>8)</sup>で発表された。この論文では、硬さ推定を行うまでには至っていない。

一方、1973年に Beckert らが  $\Delta t_{8/5}$  (800°C から 500°C までの冷却時間) を用いた硬さ推定式を発表した<sup>9)</sup>。このとき初めて、溶接条件の影響が推定式に反映されることとなった。しかし、Beckert らの推定式は、Bastien らの概念が反映されていない。すなわち、Beckert らの式では100%マルテンサイトをj得るためには  $\Delta t_{8/5}=0$  でなければならない、0でない有限の値で100%マルテンサイトになることはない。ただ、溶接条件の影響を  $\Delta t_{8/5}$  におきかえ、推定式に取り込んだのは大きな進歩であった。その後、Blondeau ら<sup>10)</sup>は、 $\Delta t_M$  以外の、100%フェライトーパーライト限界冷却時間などの推定式を提案している。

このような知見を取り入れた推定式は、1979年、Arata らによって発表された<sup>11)</sup>。この推定式では、溶接条件の影響は  $\Delta t_{8/5}$  で考慮し、かつ、限界冷却時間  $\Delta t_M$  も式中に考慮されている ( $\Delta t_M$  以下の  $\Delta t_{8/5}$  の場合、マルテンサイト100%になるため同じ硬さとなる)。ここまでくるのに、1940年の Dearden&O’Niell の論文から約40年もの歳月が必要であった。実用的な推定式はそれ以降の1980年代に発表され、現在に至っている。

このように、推定式と一口に言っても、多くの研究者の成果が背景にある。そして、それぞれの推定式はコンピュータに取り入れやすい形にはなっていた。ただ、プログラム化され積極的に利用されてきたのは1980年代以降ではなかろうか。これは、コンピュータ技術の進歩というよりも、1980年代以降に実用的推定式が発表されたため、というのが本当のことであろう。コンピュータの有効利用には、まず信頼性のある推定式の確立が必要と著者が感じたのは、このような文献調査結果から来たものである。

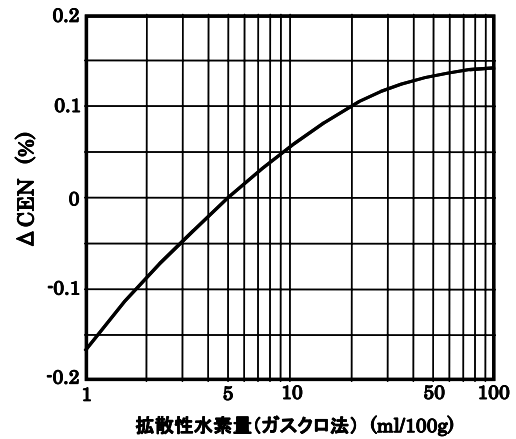


図 2.2 水素量と  $\Delta CEN$  の関係

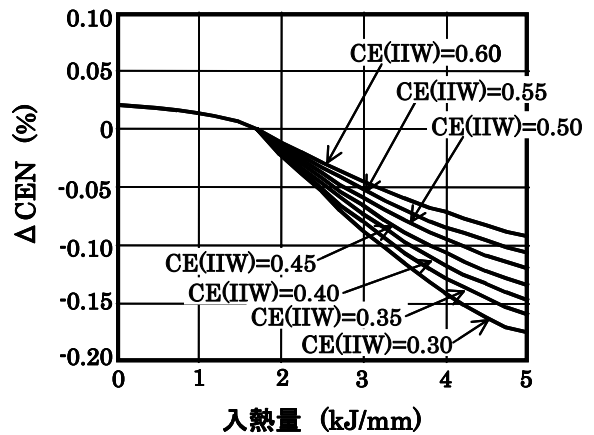


図 2.3 入熱量と  $\Delta CEN$  の関係

## 2. 継手特性のセミ非破壊検査方法

これまでの推定式は、ここに示した方法以外のものも、推定に必要な情報がある、という前提に立っている。しかしながら、溶接継手特性を推定したい、と考える場合、必ずしもこのような事前情報が充分そろっているという保障はない。継手特性を推定するための情報がない場合推定可能なのか、という指摘は充分ありえる。しかし、例えば、目の前に溶接条件、鋼材、溶接材料が不明な溶接継手があり、その特性を知りたい、という場合はどうなるであろうか。しかも、試験片採取ができない、という場合である。問題となる継手が実構造物の場合は、このような状況は充分ありえるであろう。

このような要求は、著者の経験では、1995年の阪神大震災以降、顕著になってきたように思える。実際、その後、溶接協会に特別委員会が発足し、実継手の機械的特性の推定方法を検討してきた。この方法は、継手に有害な傷をつけない程度の範囲でデータを採取し、それをもとに継手特性を推定しようというものである。vEやTSのデータを直接採取するわけではないが、採取可能な間接データを用いて推定する方法であり、しかも、厳密には非破壊方法というわけではないため、セミ非破壊方法と呼び、広い意味での継手特性推定の一種として扱ってきた。

この特別委員会が設立された背景としては、阪神大震災以降、建築鉄骨の柱-梁溶接部の機械的特性が注目されるようになったことが挙げられる。この溶接部は、溶接熱伝導的な観点から、他の継手とは異なる状況下にある。それは、溶接ビードが短く、かつ連続往復溶接される、という2点が挙げられる。このため、入熱量は通常のレベルであってもパス間温度が非常に高くなり、熱影響という意味では入熱量以上の影響がある。

図3.1は、入熱量2.5kJ/mmで連続往復溶接した場合の溶接部温度曲線の一例である<sup>12)</sup>。図から最終溶接終了後の $\Delta t_{8/5}$ は約150秒であることがわかる。もし、 $\Delta t_{8/5}$ を一パス溶接で150秒にするとすれば、入熱量を15kJ/mmにしなければならない。すなわち、 $\Delta t_{8/5}$ をパラメーターとすると、入熱量が大幅に増加した場合と同じ影響を受けると考えなければならない。つまり、継手特性という観点からはきわめて厳しい条件下での施工といえることができる。

熱影響のどの程度かを見るには、断面マクロ観察すればいいが、図3.2はその一例である。右は、連続往復溶接、左はパス間温度を管理した溶接を施工した場合の写真で、入熱量が同じでもマクロ形状は大きく異なる。右のマクロのほうが、熱影響度が大きいことが理解できる。また、同一材料を用いたとしても、継手特性は大きく異なるであろうことは容易に想像できることである。すなわち、同一入熱量、同一材料でも継手特性が異なる可能性が出てくるわけである。特別委員会が設立されたのは、このような背景による。

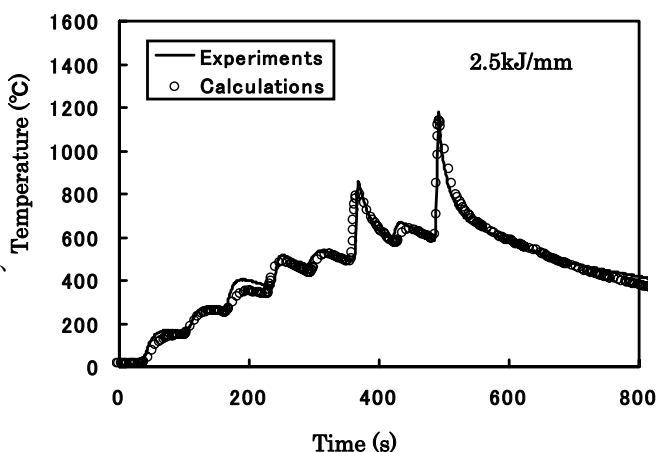


図 3.1 連続往復溶接時の温度曲線

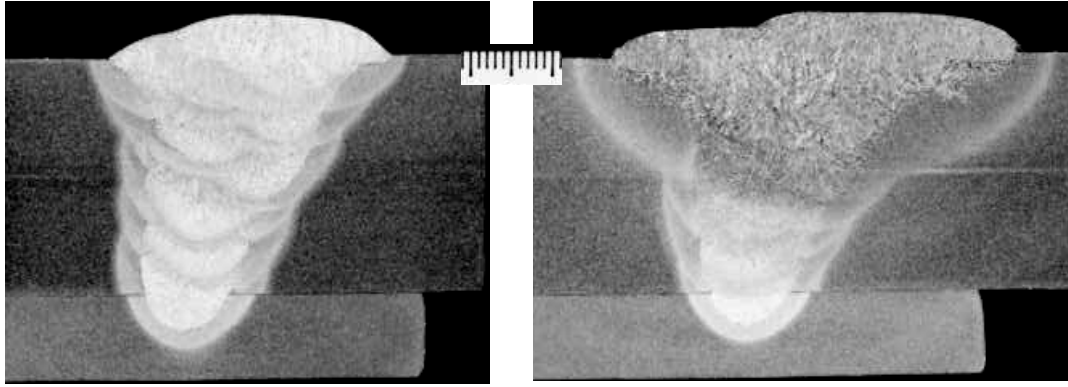


図 3.2 連続往復溶接とパス間温度管理溶接の断面マクロ

特別委員会でまず実施したのは文献調査であった。これは、どのような技術が現状存在して、セミ非破壊的に採取可能なデータは何か、を調べるだけでなく、継手特性推定に必要な最低限のデータは何か、を調べるためである。例えば、シャルピー吸収エネルギー（ $vE0$ ）を推定しようとする場合、(1)式や(3)式などを考えると鋼材組成と冷却速度(あるいは冷却時間)が必要となる。鋼材組成は非破壊的にデータ採取できることがわかったが、冷却速度はデータ採取が不可能である。そこで考えたのが硬さであった。(10)式によると、硬さは鋼材組成と冷却時間の関数であるため、逆に硬さと組成を決めれば冷却時間も決まるはずと考えた。しかし、(10)式を用いて硬さ、組成から  $\Delta t_{8/5}$  を逆算することはせずに、組成、硬さを入力データとしたときの  $vE0$  との関係調べ、実験式化することにした。入力データが組成と硬さでも、その背景として(1)式や(3)式のような冷却時間(速度)を考えている。溶接部の硬さは表面に衝撃を与える形で簡易的に測定できるので、この方法は採用可能と判断した。さらに、継手表面を研磨してマイクロ組織観察もセミ非破壊的に測定できるので、このデータも推定に用いることとした。マイクロ組織を入力データにすることで測定精度の向上を期待した。

次に推定式を作成するために、特別委員会では、入熱量、パス間温度を変化させた溶接継手を作製し、蒸気データを採取、および溶接金属引張り強度、シャルピー衝撃試験を実施した。そして、引張り、衝撃試験結果と組成、硬さ、マイクロ組織率の関係を調べた<sup>13)</sup>。

まず、引張り強度であるが、これは、硬さ測定結果との相関を調べた。文献などにある、硬さと引張り強度が良い相関があるという知見を利用したものである。その結果、

$$TS = 2.06Hv + 177 \quad (14)$$

を得た(相関係数=0.95)。図 3.3 は、硬さと継手引張り強度の関係である。一般に、ビッカース硬さを3倍すると ( $kg/mm^2$  の単位では3で割る) 大体引張り強度になるのがこれまでの知見であるが(14)式はそうになっていない。これは、引張り試験片が、溶接まみや再熱部などが混在し、それらの平均として引張り強さが決まるのに対し、硬さデータは表面からのみの採取に限定されているためと考えられる。

次に、 $0^\circ C$ シャルピー吸収エネルギーであるが、(1)式、(3)式からすると、冷却時間と組成だけでよいことになるが、特別委員会でさらに文献調査を進めると、マイクロ組織や引張り強度もパラメーターにしている論文もあることがわかった。強度については硬さで代用できると考え、最終的に、組成、硬さ、マイクロ組織の3パラメーターを検討した。その結果、以下の3式をパラメーターとした。

$$P_1 = 7.94 + 107AF \quad (15)$$



$$P_2 = -106 + 57.9AF + 0.855Hv \quad (16)$$

$$P_3 = -191 + 44.0AF + 0.934Hv + 90.2C + 169Si \quad (17)$$

ここに、 $AF$  はアシキュラーフェライト率である。マイクロ組織率としては、その他の組織も分類し、回帰分析を行ったが、それほど相関の向上は見られなかったので、この組織のみパラメーターとして採用した。

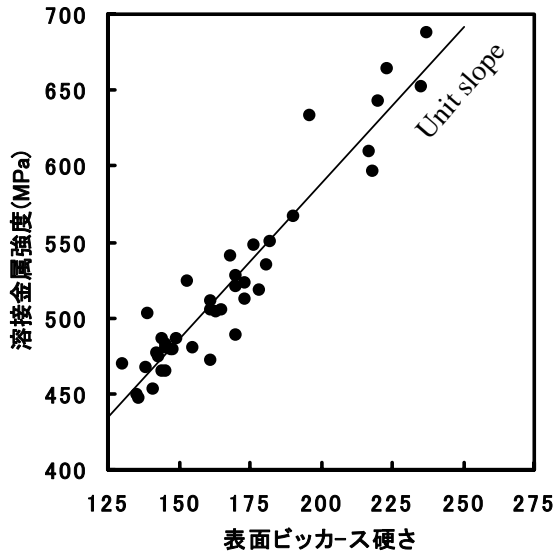


図 3.3 表面硬さと溶接金属強度の関係

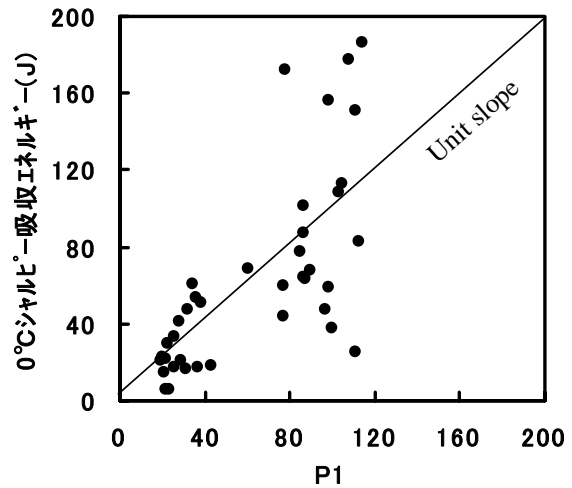


図 3.4 P1 と 0°Cシャルピー吸収エネルギー

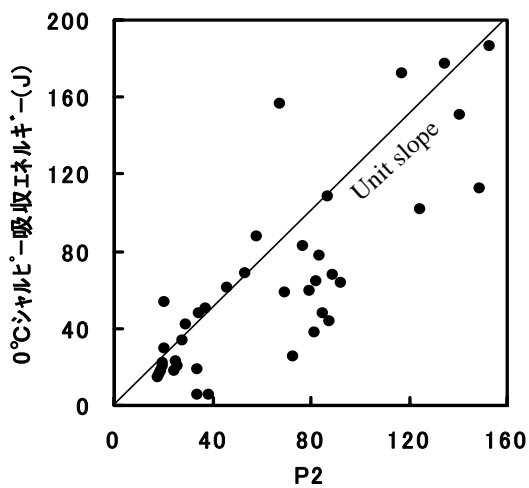


図 3.5 P2 と 0°Cシャルピー吸収エネルギー

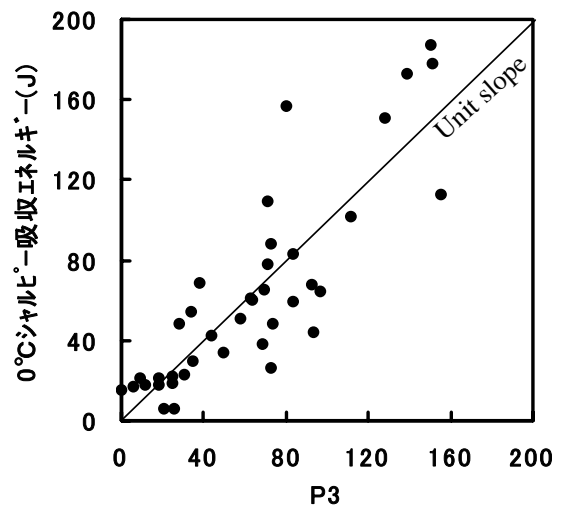


図 3.6 P3 と 0°Cシャルピー吸収エネルギー

図 3.4、3.5、3.6 は、(15)~(17)式の値と 0°Cシャルピー吸収エネルギーとの関係である。それぞれの相関係数は、0.71、0.82、0.86 であった。

以上のような検討を重ね、引張り強度、0°Cシャルピー値がある程度の精度で推定できることを示した。この方法は、適用できるのは、鋼材、溶接材料が 400~490MPa 級に限

られる。しかし、本方法では、パス間温度が450℃以下に管理されていたかどうかの判別も可能となり、それなりの意義がある知見と考えられる。

### 3. 今後への期待

これまで、継手特性の推定といえ、硬さやシャルピー値など、溶接冶金的側面をさしている場合が多かった。しかし、著者は、溶接現象という意味では、

アーク現象

⇒ 継手の冶金特性（相変態、ミクロ組織 etc）

⇒ 継手全体としての特性（残留応力、溶接変形等を含む）

という流れがあり、そのうちの一面を取り上げていた、という感覚を持っている。これは、溶接現象の複雑さを考えるとしかたがない面があった。そのため、今後の方向としては、これら現象を1つのシステムに統合されていくことが考えられる。統合する場合、単にシステムが使いやすくなる以上の効果を期待したい。

例えば、溶接変形に関しては、これまで鋼材、溶接材料の特性を利用した変形低減が試みられてきた例は少ない。これは、溶接変形低減が、鋼材、溶接材料以上に溶接方法、溶接順序、溶接構造などの影響の方が大きい、というのが主な理由であろう。しかし、それ以外にも、アーク現象から冶金現象を経由した最終的な継手の力学特性までの溶接現象そのものを一人の専門家が理解することの難しさも一つの理由であろう。

著者は、溶接変形低減の試みとして、鋼材、溶接材料の特性をコントロールする方法を以前提案した<sup>14)</sup>が、上記のような一連の溶接現象を理解しきった上での提案ではなく、まだまだ気がつかない方法があるかもしれない。このような場合の事前検討には、システム統合はきわめて有用である。溶接変形以外では、溶接金属の変態膨張を利用して溶接部に圧縮残留応力を導入することで疲労強度を向上させる技術があるが<sup>15)</sup>、このような場合でも、システムが統合されていれば評価検討もしやすいはずである。

### 4. おわりに

コンピュータを溶接技術に積極的に利用しようという趣旨で設立された溶接データシステム研究委員会活動も28年を超え、著者も長らくこの活動の参加させていただいた。この活動を通して学んだことは、溶接という複雑な現象を解析するためのコンピュータ技術の利用という方向性は間違いがないものの、それを有効利用するためにはより基礎的理解を深める必要がある、という点である。

将来の溶接技術を考えるとき、コンピュータ利用は避けて通れない。著者としては、そのとき溶接現象の理解不足のためにせつかくのコンピュータ技術が生かしきれていない、と言われないよう努力する必要がある、と思いを新たにす次第である。

### 参考文献

- 1) J.Dearden and H.O'Neill: Trans. Inst. Weld., Vol.3(1940),p203.
- 2) 佐藤他；溶接学会誌、Vol.40(1971)、p619.
- 3) 川口他；溶接学会誌、Vol.47(1978)、p173.
- 4) 榎本他；溶接学会講演概要集、Vol.15(1974)、p84.

- 5) N.Yurioka et al; Metal Constr., Vol.19(1987),p217R.
- 6) 伊藤、別所 ; 溶接学会誌、Vol.37(1968)、p983.
- 7) N.Yurioka and T.Kasuya;溶接学会論文集、Vol.13(1995)、p347.
- 8) P.G.Bastien et al; Metal Constr. And British Weld. J., 1970, p9.
- 9) M.Beckert and R.Holz; Schweißtechnik, Vol.23(1973), p344.
- 10) R.Blondeau et al; Heat Treatment, '76, Metal Soc. London(1976), p189.
- 11) Y.Arata et al; Trans. of JWRI, Vol.8(1979), p43.
- 12) T.Kasuya et al; Sci. Tech. Weld. Joining, Vol.5(2000), p215.
- 13) 糟谷他 ; 鋼構造論文集、Vol.7(2000)、p9.
- 14) 糟谷 ; (財) 溶接接合工学振興会、第 14 回セミナー資料、2003、東京.
- 15) 平成 15 年度溶接学会春季全国大会フォーラム、疲労強度改善スマートマテリアル「低変態温度溶接材料」の効果と適用性、2003、東京.