

極厚3.5%Ni鋼の自動溶接

Automatic Welding of 3.5%Ni Thick Steel Plates

3.5%Ni鋼は、 $-46\sim-101^{\circ}\text{C}$ で使用される低温用鋼である。最近では、石油化学プラントだけでなく、エネルギー関連プラントの低温機器にも多く用いられる。

低温下での機器部材に対するぜい性破壊を防ぐため、母材や溶接部のじん性の確保が特に問題であり、加工技術の中で信頼性の高い自動溶接技術の開発が望まれていた。

これらのニーズに対し、日立製作所独自の発想により、新しい溶接アルゴリズムに基づいた高じん性オシレートサブマージアーク溶接法を開発した。この論文では、その方法の詳細、継手の性能及び実用結果について述べる。

石丸靖男* *Ishimaru Yasuo*

内牧陽一* *Uchimaki Yōichi*

小林浩志* *Kobayashi Hiroshi*

馬木俊明* *Umaki Toshiaki*

1 緒言

石油化学プラント、LNG(液化天然ガス)製造プラント、石炭ガス化プラントなどで、母材が $-46\sim-101^{\circ}\text{C}$ という低温で設計される機器には、低温じん性の優れた3.5%Ni鋼が一般に用いられる。また、ぜい性破壊防止のため、溶接部にも母材と同等の高いじん性が要求される。

3.5%Ni鋼の溶接については従来から種々検討されてきたが、適当な自動溶接法が見いだされず、やむなく被覆アーク溶接法だけで施工していた。しかも、まだ切欠きじん性は不安定であり、入熱量制限と注意深い施工管理が必要とされる。

しかし、近年、機器の大形化に伴い極厚の3.5%Ni鋼が使用されるに及んで、溶接継手部品質の向上と製造コスト低減の両面から、高品質、高能率な自動溶接法が求められていた。

日立製作所では、これらのニーズを満足する新溶接法の開発に取り組み、溶接熱の影響を利用する独自の「高じん性オシレートサブマージアーク溶接法」の開発¹⁾に成功した。この論文では、この新溶接法の原理、特徴及び実用化の状況について述べる。

2 新溶接法の原理と特徴

3.5%Ni鋼溶接部のじん性向上のためには、極度にじん性の低い柱状晶組織を微細組織化することが必要である。

新溶接法は、上層ビードの熱影響で下層ビードの柱状晶組織が微細組織に変化することを利用したものである²⁾。

図1に、新溶接法の概略図を示す。上層ビードの熱影響により、下層ビードの柱状晶組織をすべて微細組織とするためには、概略、余盛高さ \leq 熱影響幅を満足する必要がある³⁾。

従来の熱影響を利用しない溶接法の場合は、柱状晶組織と微細組織が混在する。新溶接法は、幅広で薄いビードを積み重ねて熱影響を有効に利用するため、最終層以外はずべて微細組織となる。したがって、新溶接法による継手部の切欠きじん性は、溶着金属のすべての部分で安定した良好な値を示す。

3 新溶接法の詳細

3.1 熱影響部の伝熱

図2に、ビード積層モデルを示す。第1ビードの熱影響部は、 h, j だけ離れた第2ビードから再度熱影響を受ける。

第1ビード熱影響部 r_1 の位置Aのピーク温度は、

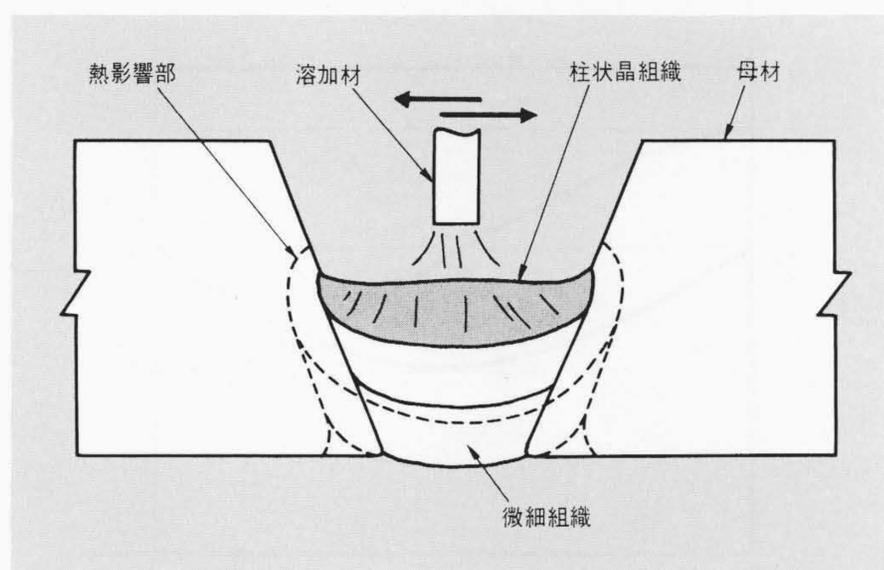
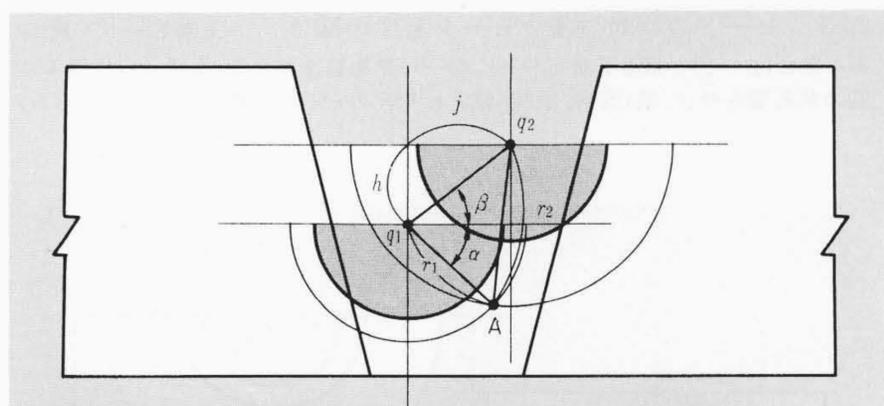


図1 新溶接法の概略図 溶加材を溶接方向に対して直角方向へ揺動させて、薄い幅広のビードを多層盛ることにより、次々と溶接熱によって再加熱される。



注：略字説明

A = 熱影響を受ける任意の点

q_1 = 第1ビードの熱源

q_2 = 第2ビードの熱源

α = ビード表面と q_1 -Aがなす角度

β = ビード表面と q_1 - q_2 がなす角度

h = 余盛高さ

j = q_1 と q_2 の間隔

r_1 = q_1 からA点までの距離

r_2 = q_2 からA点までの距離

図2 ビード積層モデル 微細組織となる温度域は狭い。このため、できるだけ有効に溶接熱を利用する必要がある。

* 日立製作所笠戸工場

$$T_{p1} = T_0 + \frac{q_1}{\pi \rho c e} \cdot \frac{1}{r_1^2} \dots\dots\dots(1)$$

また、この位置Aに与えられる第2ビードの熱影響のピーク温度は、

$$T_{p2} = T_0 + \frac{q_2}{\pi \rho c e} \cdot \frac{1}{r_2^2} \dots\dots\dots(2)$$

- ここに T_{p1}, T_{p2} : ピーク温度(°C)
 T_0 : 予熱温度(°C)
 q_1, q_2 : 入熱量(J/cm)
 r_1, r_2 : 図2に示す半径(cm)
 h, j : 図2に示す距離(cm)
 α, β : 図2に示す角度(rad)

- ρ : 密度(°C)
 c : 比熱(J/g·°C)

図3にビードの相対位置とピーク温度の関係を示す。 $\beta = \frac{\pi}{2}$ 、すなわち、上層のビードが真上にある場合が最も下層へ均一に熱影響を与えることができる。

図4に新溶接法の考え方を示す。ビード中央で考えれば、第1ビードの熱影響粗粒部よりも、第2ビードの熱影響細粒部のほうが深くなければならぬことから、ピーク温度分布からの再熱条件は(3)式のようなになる。

$$h \leq (P_2 - P_1) + (a_2 - a_1) + b_2 \dots\dots\dots(3)$$

- ここに h : 余盛高さ(cm)
 P_1, P_2 : 溶け込み深さ(cm)
 a_1, a_2 : 熱影響粗粒域の幅(cm)
 b_2 : 第2ビード熱影響細粒域の幅(cm)

図5に熱影響部の冷却速度を示す。同図から、下層に熱影響を加える場合の適正冷却速度が求められ、材料特性や目的に合った限界値内に制御しなければならない。

3.2 溶接法とビード形状

図6に各溶接法での余盛高さ、溶け込み深さ及び熱影響幅を示す。ストレートビードの場合、サブマージアーク溶接、TIG溶接(Tungsten Inert Gas Arc Welding)、更には被覆アーク溶接で、下層ビードの柱状晶組織部すべてに上層の熱影響を付与できる可能性がある。

溶加材を溶接方向に直角方向へ揺動させることにより単位

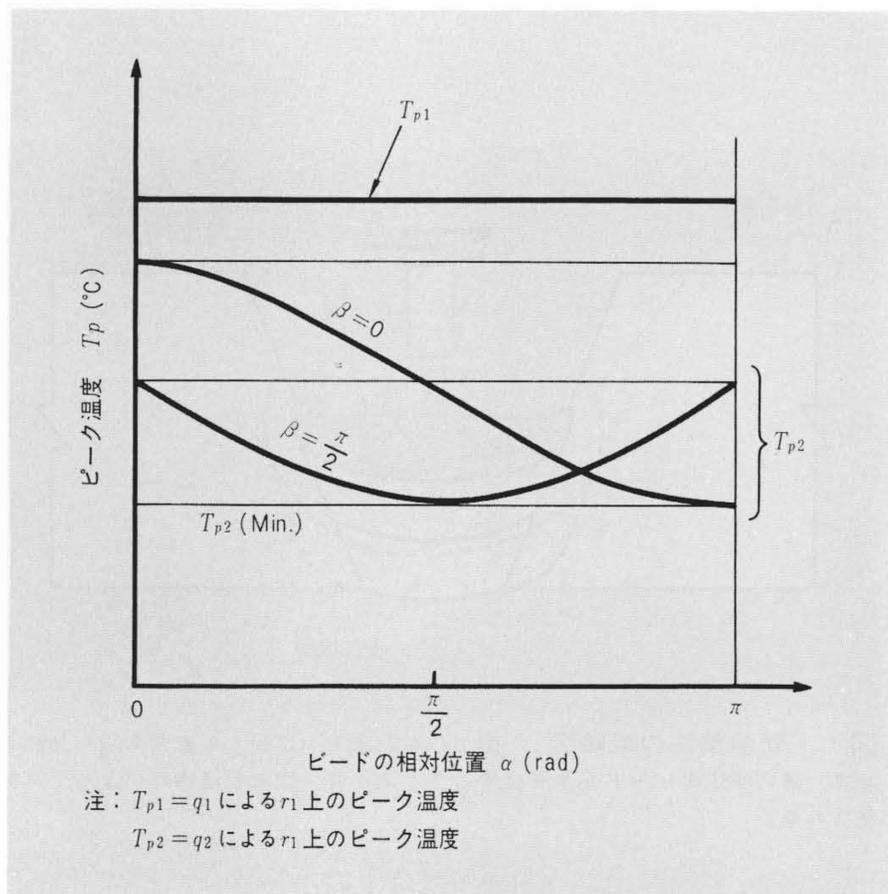


図3 ビードの相対位置とピーク温度の関係 上層ビードが真上にある場合($\beta = \frac{\pi}{2}$)が最も下層ビードに均一に熱影響を与える。半径 r_1 の位置では2回の熱影響を受け、第1回目、第2回目それぞれのピーク温度は T_{p1}, T_{p2} である。

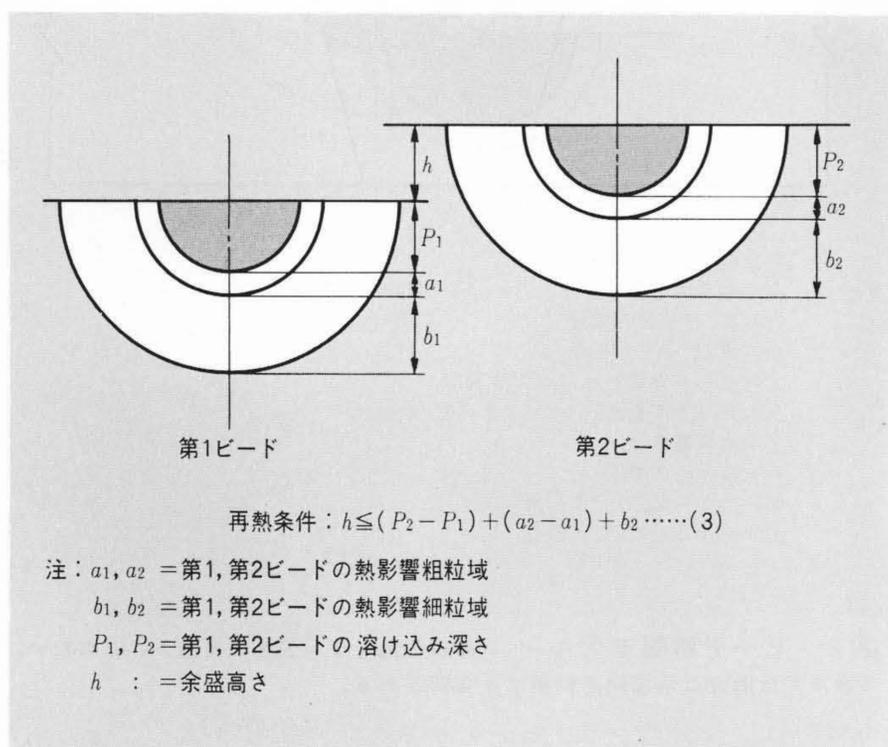


図4 新溶接法の考え方 溶接部すべてを微細化するには、熱影響幅、溶け込み深さ及び余盛高さを適切に制御する必要がある。

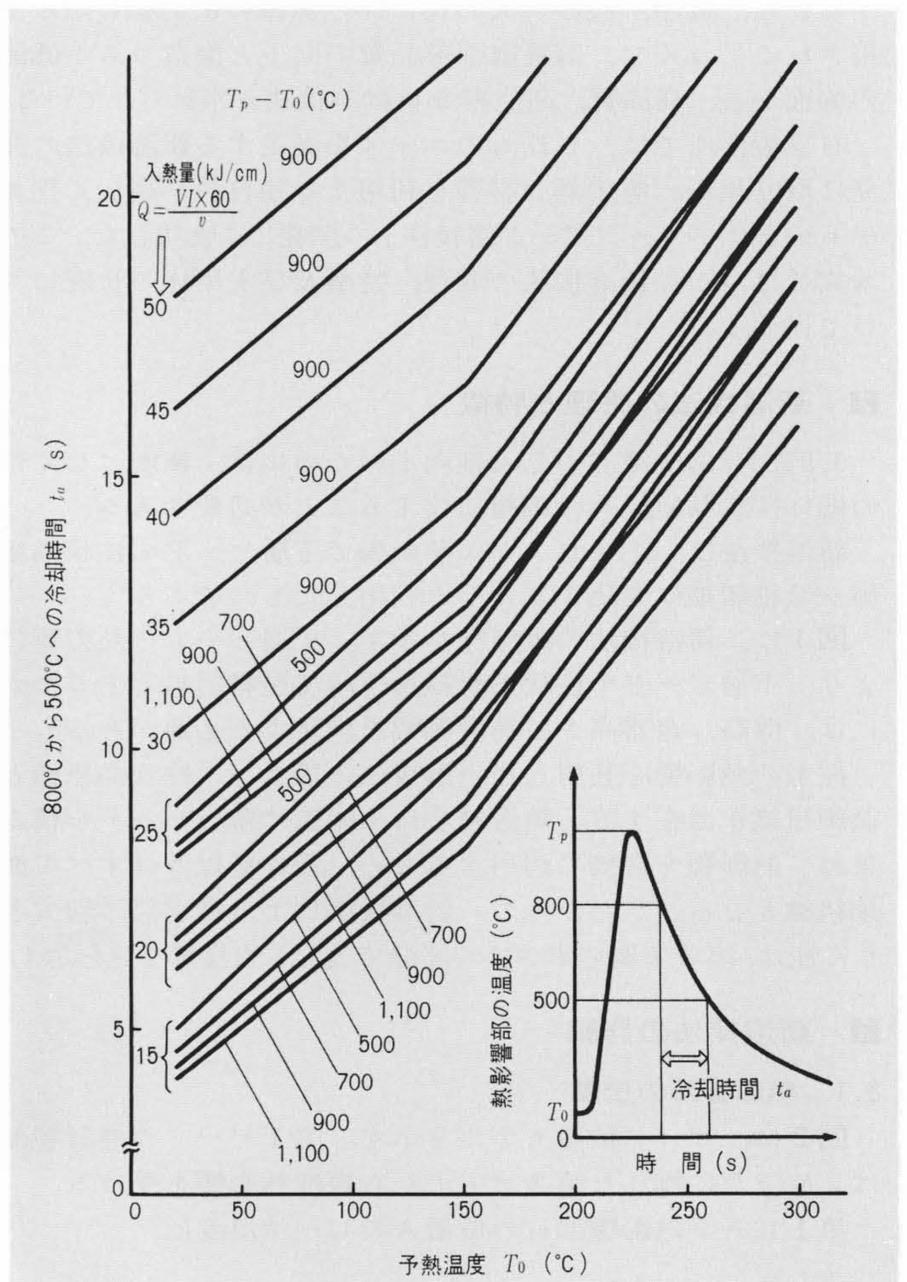


図5 熱影響部の冷却速度 熱影響部の冷却速度は、ピーク温度及び予熱温度に大きく影響される。

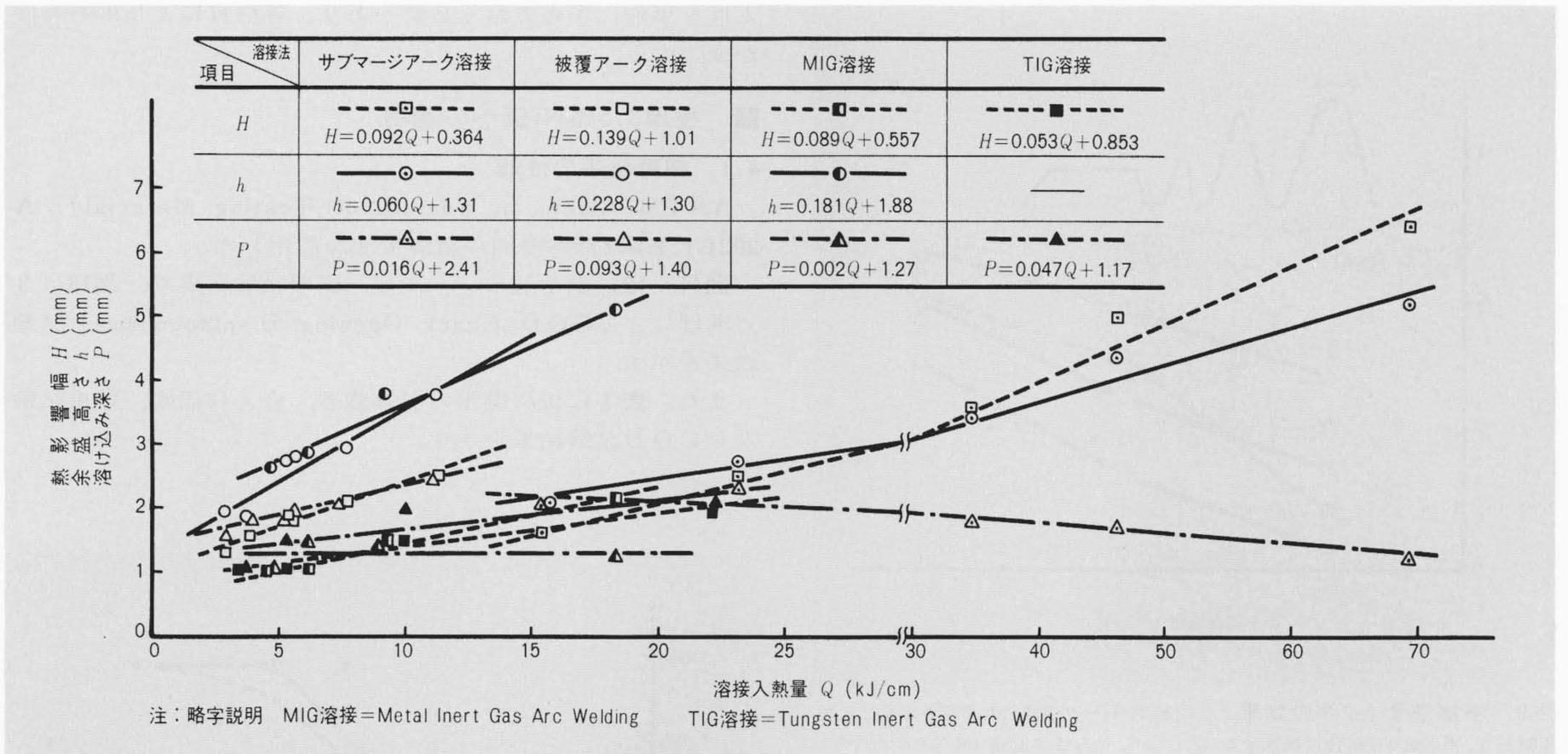


図6 ビード形状に及ぼす各溶接法の比較 TIG溶接については、溶加材の加減が可能であり、余盛高さを制御することができる。

面積当たりの入熱量は減少するが、熱効率は向上する⁴⁾。図7に溶加材を揺動した場合の効果を示す。サブマージアーク溶接、被覆アーク溶接共に余盛高さが減少し、新溶接法に適した施工法となる。

3.3 3.5%Ni鋼のピーク温度とじん性

図8に、3.5%Ni鋼の柱状晶組織に熱影響に相当する再現熱サイクルを与えた後のじん性の変化を示す。

同図から冷却速度の大きい場合が、じん性の高いことが分かる。また、およそ A_{c1} 以上のピーク温度になると、溶接のままの柱状晶組織部よりもじん性が向上する。しかし、1,300℃では、再び粗粒化し低下する。これに再度熱サイクルを付与したのが図9で、600℃以上の再々加熱で熱影響粗粒部が改善されることを示している。したがって、溶接アルゴリズム

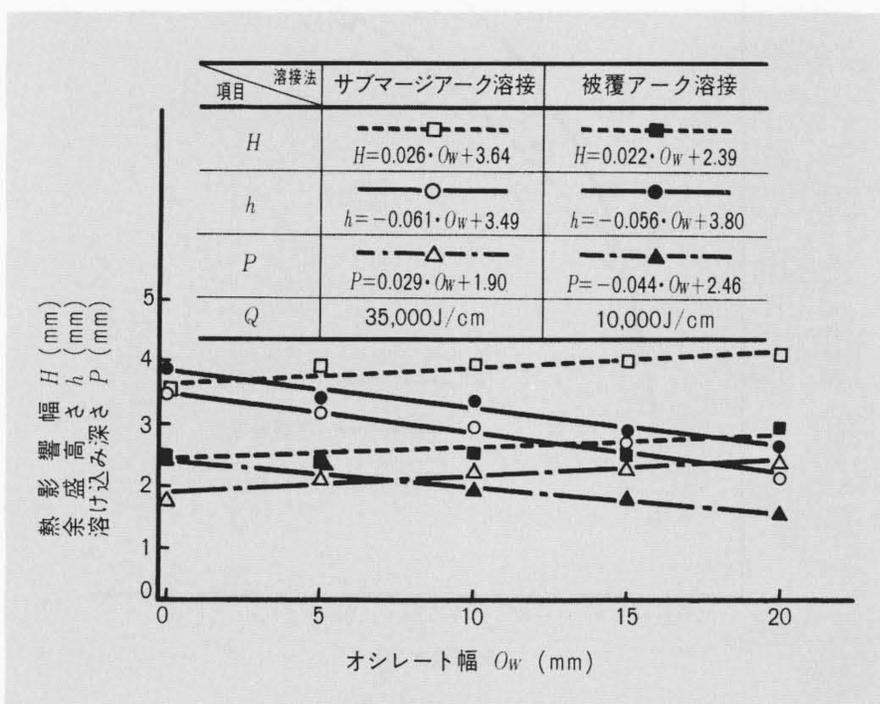


図7 ビード形状に及ぼすオシレートの影響 オシレート幅を増すことにより、熱影響幅が余盛高さより広がる。

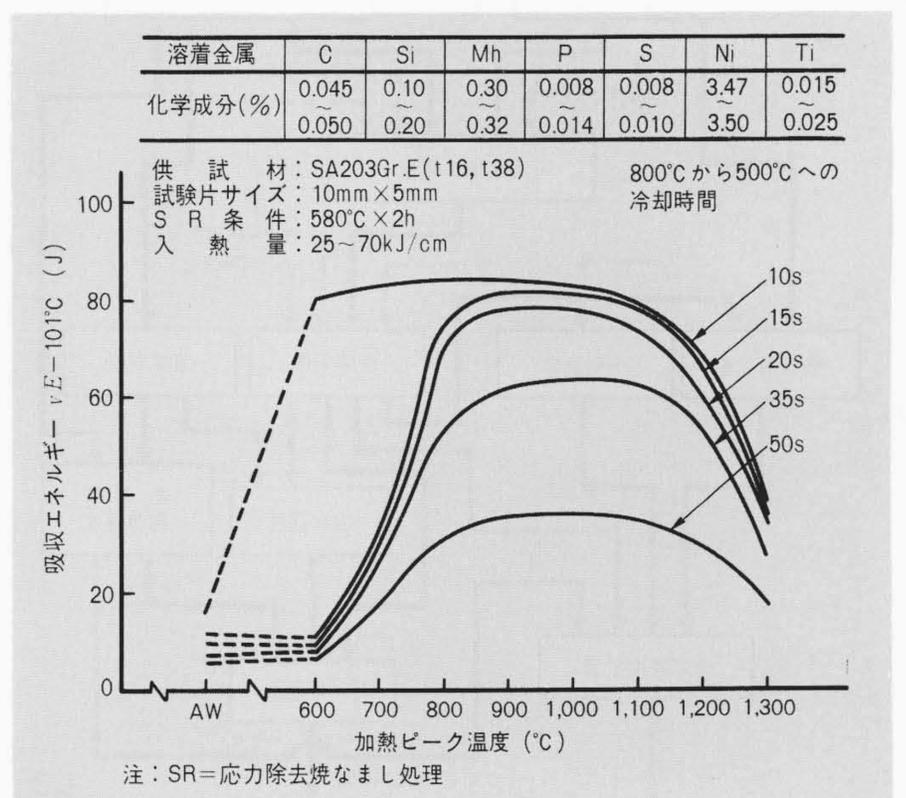


図8 柱状晶組織部の再加熱後のじん性変化 A_{c1} 以上の再加熱温度域でじん性は回復し、また、冷却速度が大きいほど回復度合が大となる。なお、1,300℃と高温になるとじん性は低下する。

の計算上は、600℃、700℃及び1,100℃がじん性の変化の上限、下限の温度であり重要な温度となる。

3.4 溶接アルゴリズムの組立て

熱影響を利用し、下層ビードの柱状晶組織をすべて微細かつ高じん性な組織とし、多層溶接するためには、厳密な溶接アルゴリズムを完成しなければならない。図10に溶接条件決定のためのフローチャートを示す。溶接アルゴリズムを求めするためには、熱伝導論に基づくピーク温度分布と冷却速度、各溶接法に関するビード形状、溶融速度の数式化と再熱条件などが必要となる。再熱条件では、再加熱、再々加熱後のじ

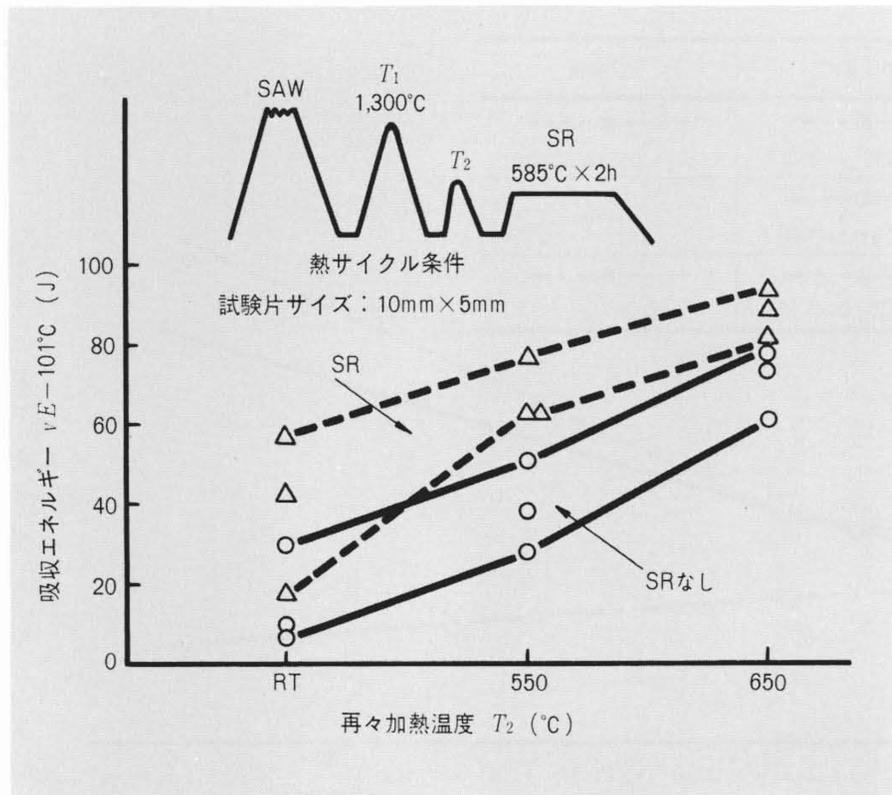


図9 多重熱サイクルの効果 1,300°Cピーク温度に加熱された低じん性粗粒部を、再度600°C前後に加熱することにより、じん性は回復することが分かる。

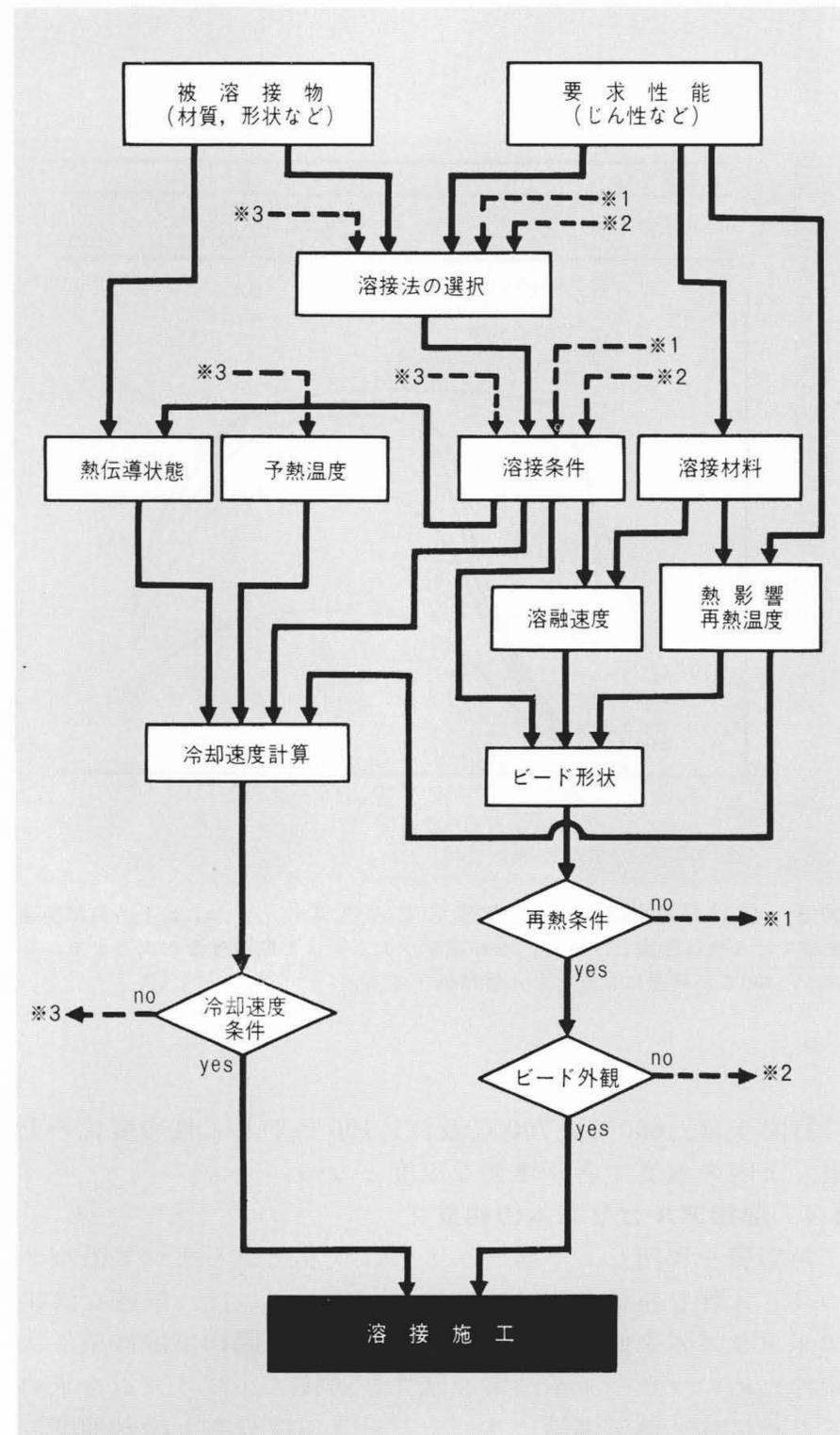


図10 溶接条件決定用フローチャート 要求性能を満足するには、被溶接物を考え合わせ、各因子を適正に制御し、溶接を施工する。

ん性を事前に求めておく必要があり、各材質により再熱条件が変化する。

4 極厚3.5%Ni鋼への適用

4.1 極厚継手の性能

ASTM (American Society of Testing Material) A 203Gr.E鋼t75へ今回の新溶接法を適用した。

図11, 12に継手部のシャルピー衝撃試験結果を、図13に3点曲げによるCOD (Crack Opening Displacements) 試験結果を示す。

また、表1に母材継手の引張強さ、せん移温度、落重試験及びCOD試験結果を示す。

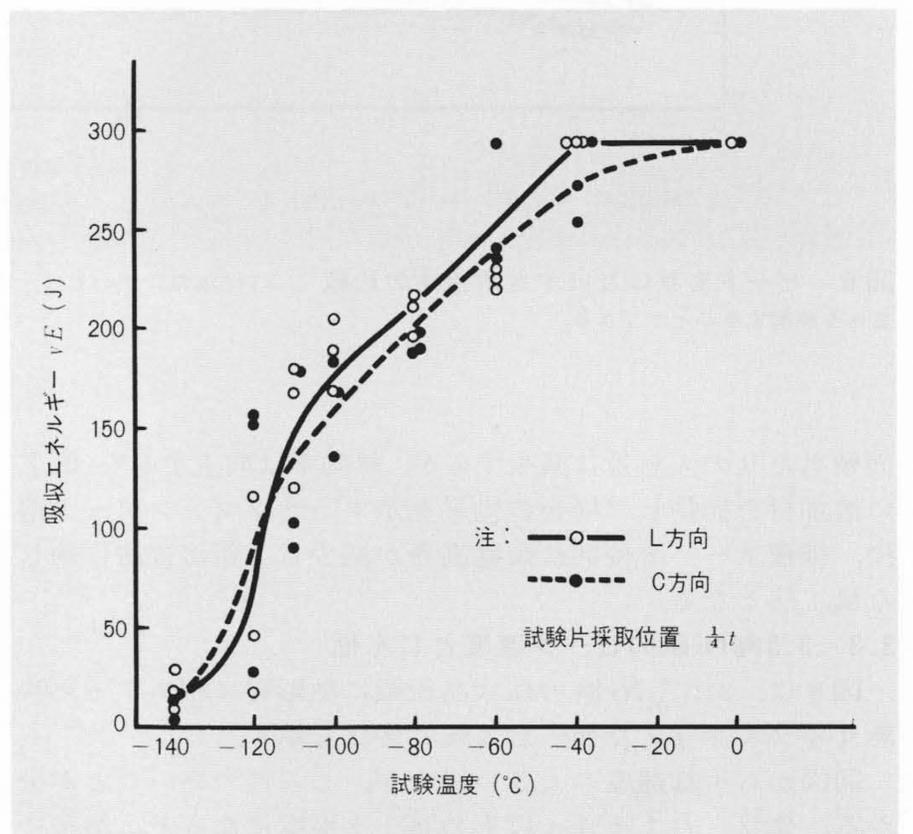


図11 母材衝撃試験結果 極厚SA203Gr.E鋼であるが、従来の母材に比べ優れたせん移曲線を示している。

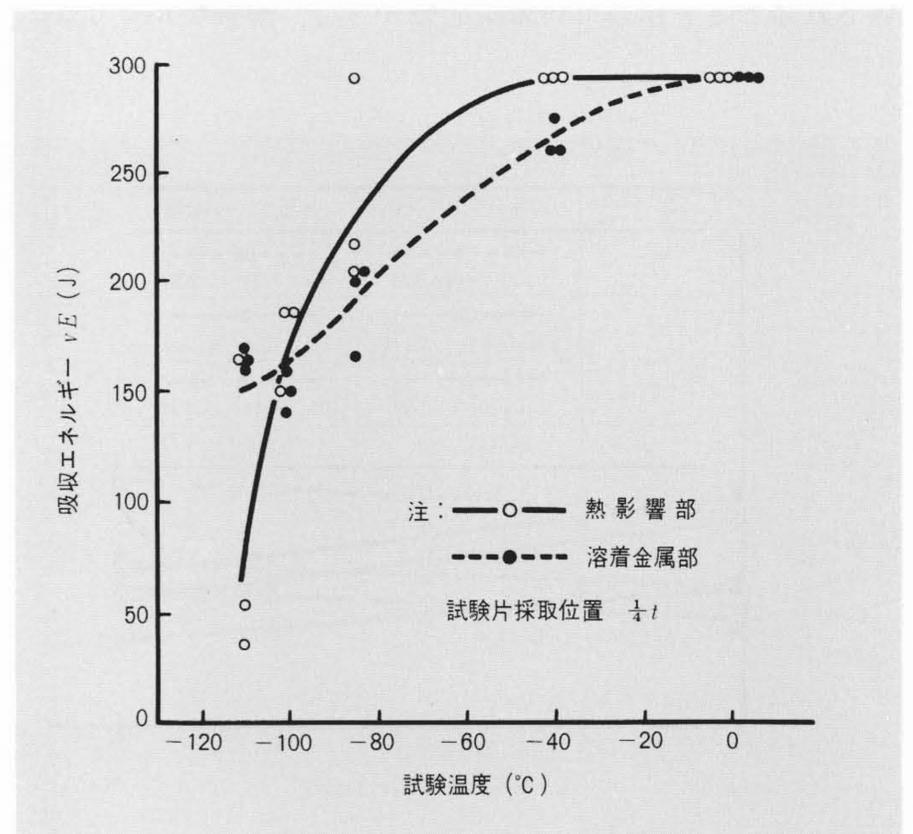


図12 継手部衝撃試験結果 オシレートサブマージアーク溶接継手は、ASME規格vE-85°C=20/16Jをはるかに上回る安定した低温じん性を示している。

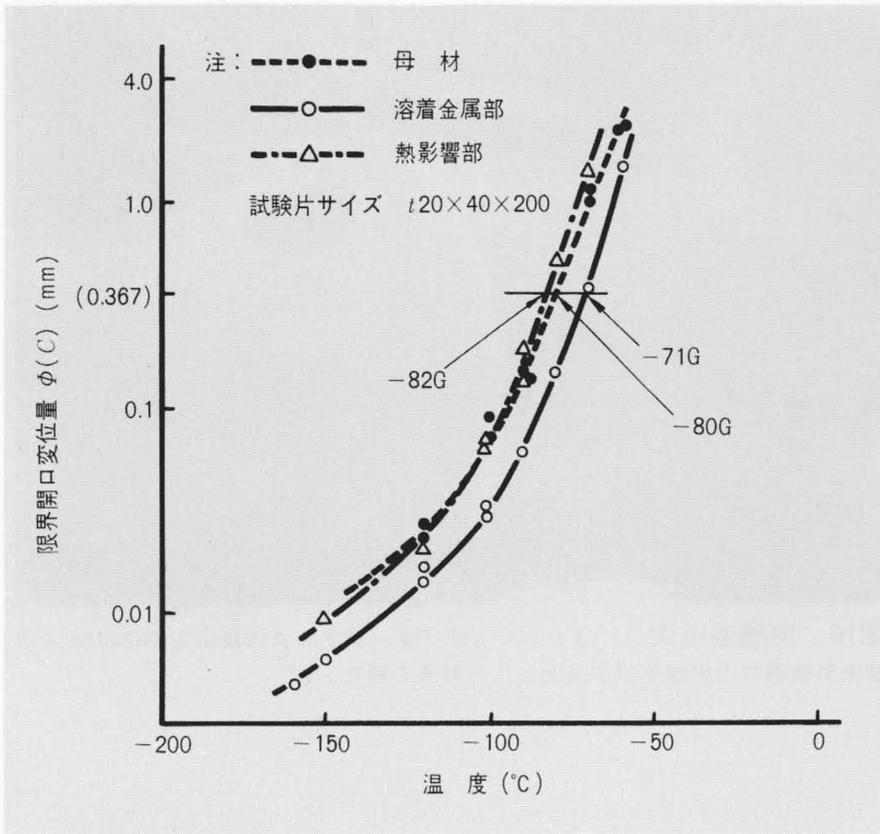
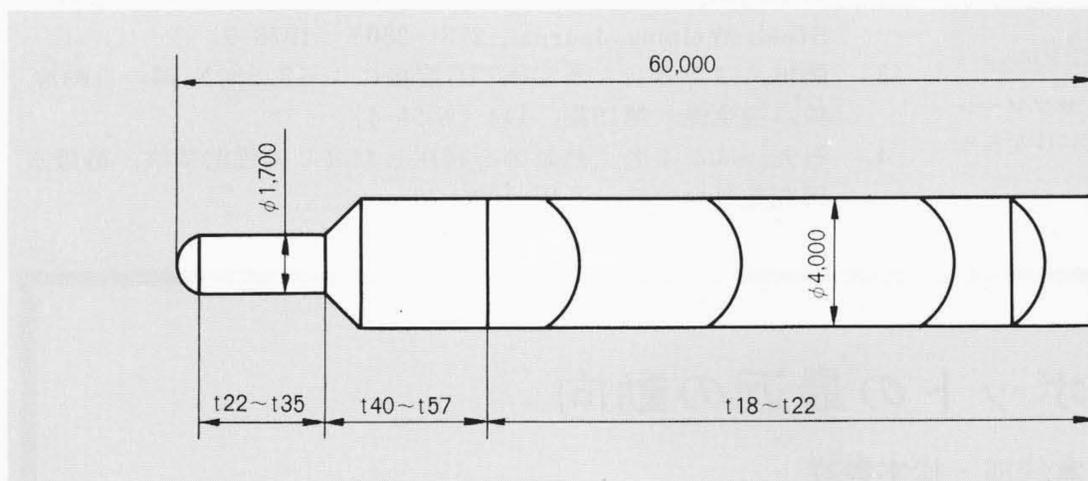


図13 COD試験結果 疲労ノッチ付きCOD試験結果から、母材、溶着金属部、熱影響部ともほぼ同等のじん性をもっていることが分かる。

表1 母材継手部の引張強さ、せん移温度、落重試験及びCOD試験結果 引張強さ及び低温じん性とも、溶接継手部は母材に近い十分な性能をもっている。

項目	母材		継手部	
	L方向	C方向	溶着金属	熱影響
引張強さ (MPa {kgf/mm ² })	523 {53.4}	522 {53.3}	537 {54.8}	
伸び (%)	33.6	34.9	52.1	
衝撃試験	vTs (°C)	-111	-72	-104
	vTE (°C)	-110	-93	-112
	G種, A種(°C)	-116G, -94A	-115G, 93A	-76G, -50A
NDT温度 (°C)	—	—	-90	-100
COD試験	G種 (°C)	-80	-71	-82
	-101°CでのΦ (C) (mm)	0.086	—	0.042
	-101°Cでの2C (mm)	30.0	—	11.23

注：採取位置 = 1/4 t



注：母材=SA203Gr.E
設計圧力=2,860kPa {29.2kgf/cm²}
設計温度=-85°C

図14 SA203Gr.E鋼製大形機器の概要 オシレートサブマージアーク溶接法を、4基合計約1,000tのSA203Gr.E鋼製大形機器に適用した。

4.2 実機への適用

図14に示す概略仕様の大型機器に新溶接法を適用した。カテゴリA, Bのすべてに適用され、それぞれの溶接線には継手試験が実施された。

表2に引張り試験、曲げ試験の結果を、図15はシャルピー衝撃試験のヒストグラムであるが、いずれも母材と同等以上の値を示していることが分かる。

図16に実機への新溶接法適用状況を示す。

5 結 言

日立製作所は、高じん性オシレートサブマージアーク溶接法を開発し、その溶接アルゴリズムを検討するとともに、実用化の状況について述べた。得られた結果を要約すると、次に記すとおりである。

- (1) 熱影響を利用した、高じん性・高能率な新しい自動溶接法を開発した。
- (2) 熱影響部のピーク温度と冷却速度を制御して、熱影響を利用する溶接アルゴリズムを完成した。
- (3) 新溶接法の継手では、最終層以外すべて高じん性な微細

表2 引張り試験、曲げ試験の結果 母材、オシレートサブマージアーク溶接継手部とも十分ASME規格値を満足している。

母材板厚 t (mm)	母材		継手部		側曲げ試験 R=2t, 180°
	引張強さ (MPa {kgf/mm ² })	伸び (%)	引張強さ (MPa {kgf/mm ² })	破断位置	
19.5	541 {55.2}	19	571 {58.3}	溶着金属	良好
29.5	545 {55.6}	28	553 {56.4}	溶着金属	良好
48.0	551 {56.2}	42	567 {57.9}	溶着金属	良好

組織となる。

(4) 板厚75mmという極厚の3.5%Ni鋼継手に適用し、良好な継手性能が得られた。

(5) 新溶接法を実機に適用し、実用性と継手性能の優秀性が確認された。

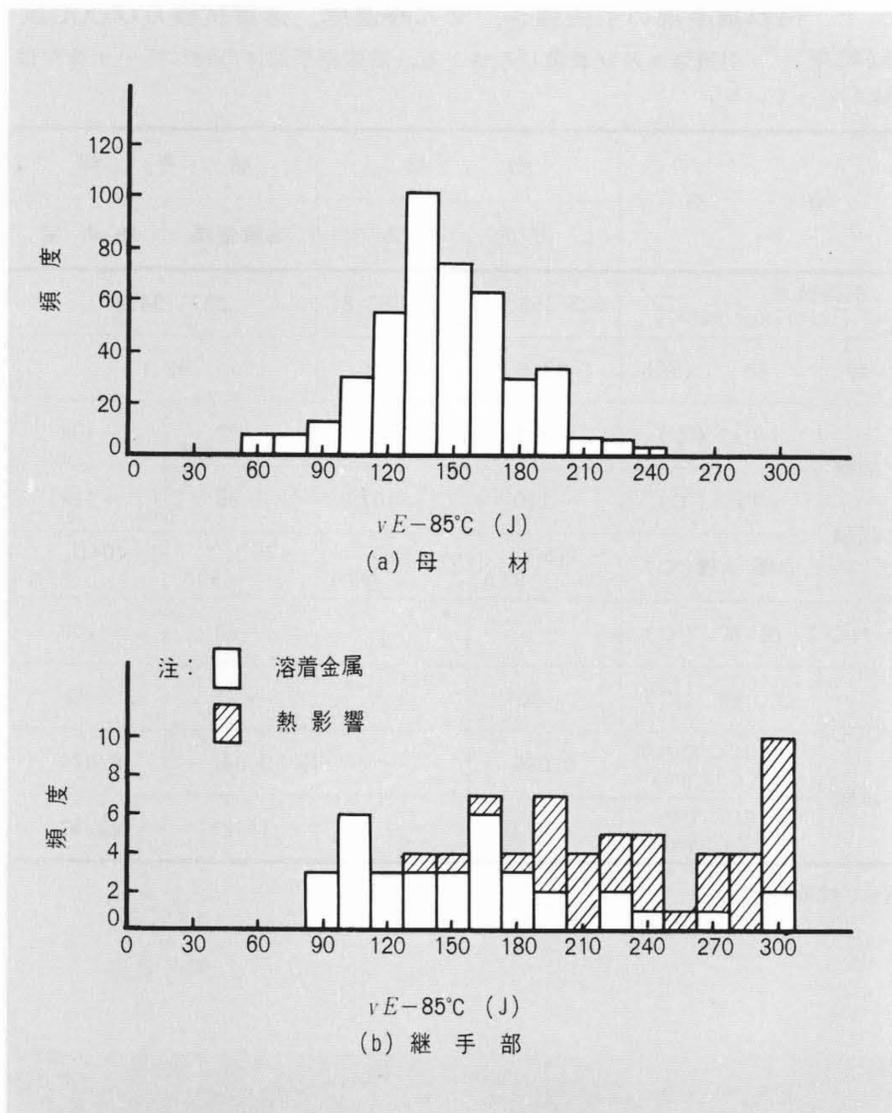


図15 シャルピー衝撃試験のヒストグラム オシレートサブマージアーク溶接継手部は、母材以上の高じん性を示しており、実機適用にはなんら問題のないことが分かる。

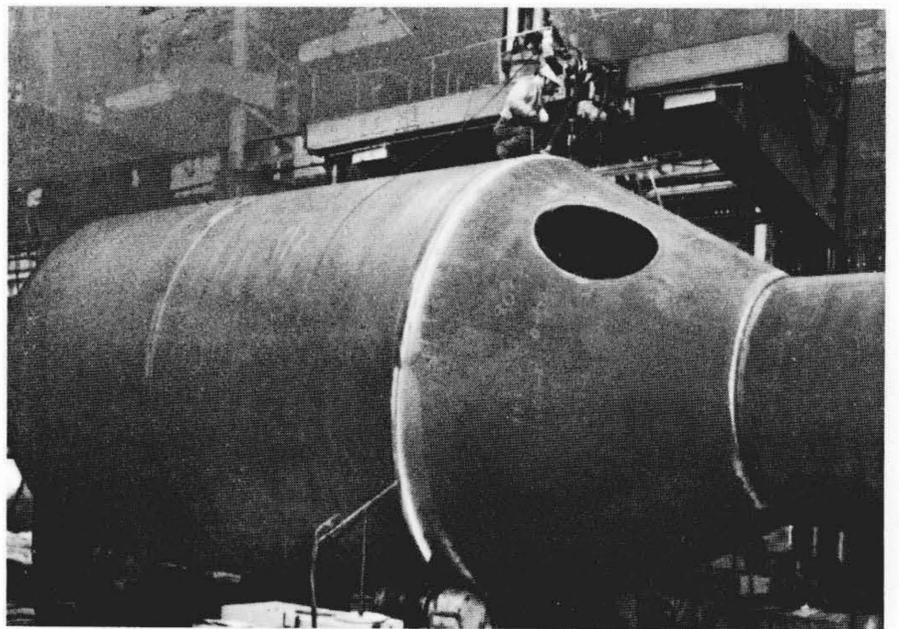


図16 実機適用例 オシレートサブマージアーク溶接法をSA203Gr.E鋼製大形機器の円周継手部に適用し、好結果を得た。

参考文献

- 1) 石丸, ほか 3 名: 3.5%Ni鋼製大形機器の自動溶接, 溶接技術, 26, 41~46 (昭53-7)
- 2) Y. Ishimaru et al.: Automatic Welding of 3.5% Nickel Steel, Welding Journal, 273~280S (1978-9)
- 3) 岡田, ほか 3 名: 多電極TIG溶接による3.5%Ni鋼の自動溶接, 溶講概, 第19集, 144 (昭51-4)
- 4) 石丸, ほか 4 名: 熱影響を利用した高じん性溶接法, 溶接法研究委員会資料, SW-1096-79



産業用ロボットの最近の動向

日立製作所 沼倉俊郎・松本義雄
計測と制御 18-1, 100~106 (昭54-1)

産業用ロボットが登場してから既に十数年経過したが、欧米先進諸国や我が国でその研究開発と実用化が進みつつある。例えば、我が国での産業用ロボットの生産額は年々増加し、昭和52年の180億円から、55年、60年ではそれぞれ870億円、2,900億円に達するものと推定される。

産業用ロボットの利用分野としては、マテリアルハンドリング用が最も多く、特にこの分野では低価格化に対する要求が強く、標準ユニットの組合せにより必要最小限の要求動作を実現するモジュール形ロボット、複数台のサーボモータを1台のアンプで順次切替駆動するロボット、リンク機構を用いたロボットなどの試みが見られる。更に、プレス機械専用のワーク着脱高速駆動ロボット、機構や制御に独特の工夫を施した重量物ハンドリング用ロボットなどもある。

高熱、騒音、塵埃などの悪環境下の作業

は産業用ロボットの重要な適用分野であり、特にスポット溶接ロボットが多数普及している。また、アーク溶接や塗装作業専用ロボットもここ数年相次いで商品化され、更に最近では、これまで自動化が遅れていた鋳ばり取りや仕上げなどの作業をも行なう多目的ロボットも実用化されている。

産業用ロボットによる自動組立は、実用例として見るべきものはほとんどないが、人間の感覚を必要とするような組立や多種中少量生産品の組立などで、ロボットは必要不可欠である。これまでに開発された組立ロボットとしては、力感覚を備え探索制御により精密なはめあいを行なうロボット、複数のアームから成る直交座標形組立ロボットなどがある。

パターン認識技術と産業用ロボットの本格的な結び付きは今後の課題であるが、既に半導体組立工程や各種製品の外観検査にパターン認識技術が利用され、人間による

目視作業の代わりに果たしている。

今後産業用ロボットを飛躍的に普及させようとするとき、多くの革新的技術開発を必要とする。例えば、感覚情報処理の分野ではより安定した、より高速な視覚認識技術、アームの駆動制御に関しては小形・軽量・高出力アクチュエータと制御モードを自在に変え得る柔軟なサーボ機構の開発などが望まれる。またこれら要素技術を集約し、一つのロボットシステムとしてまとめることが必要であり、既に実験的知能ロボットシステムなどの試みも行なわれている。

従来大量生産品を対象として発達してきた自動化技術は、今後多種中少量生産品を対象としたフレキシブルオートメーションへの対応を迫られる。そのための有力な手段として、また人間福祉向上のため産業用ロボットの使命は重く、たゆみない技術開発が望まれる。