

溶接熱源・熱輸送第1部門



荒田吉明*

昭和47年5月、全国共同利用施設として溶接工学研究所が4研究部門でスタートし、現在8研究部門で総合的かつ組織的な溶接研究が進められている。その第1部門である荒田研究室の研究テーマは

- I, 超高エネルギー密度熱源の探究とその特性
- II, エネルギービームの供給と制御
- III, 高エネルギー密度溶接法の開発と適用
- IV, 自動制御溶接法の開発

であり具体的な研究内容は次の通りである。

- 1) 電子ビーム—
 - 超高出力電子ビーム装置の開発と溶接への適用
 - タンデム電子ビーム溶接法の開発
- 2) レーザビーム—高出力CO₂レーザビームの発生と制御技術の開発および溶接、切断熱処理への適用
- 3) ガス絶縁プラズマ—
 - 超高出力定常マイクロ波高温プラズマの造出
 - ボルテックスガストンネルの開発とその中での高温プラズマの造出

以下これらについて簡単に紹介します。

1) 超高出力電子ビーム溶接

電子ビーム溶接の歩みの歴史を見れば1948年 K. H. Steigerwald が深度の深い電子銃を開発し金属の穿孔および切断加工に採用したことに刺激を受け、1957年 J. A. Stohr はパリで開かれた“Technical Symposium on Fuel Elements”の席上で最初の電子ビーム溶接機とこれを用いて得た溶接結果について報告を行

った。その後世界各国で新しい電子ビーム溶接技術についての研究、開発の報告が数多くなされた。このような新しい電子ビーム熱源がアークなど他の熱源と比較して本質的に相違し、すぐれている点は、エネルギー密度が高く（アークの10万倍程度あるいはそれ以上）、その上これを自由に制御できることである。これらの利点を生かし電子ビーム溶接を行えば、ビーム照射面で瞬間に熔融・沸騰・飛散の過程すなわち穿孔現象が進行し、深くて細いビーム孔を作るが、それはビームとともに移動し、その周囲の熔融層によって、ビーム孔の移動領域が埋められる。これがいわゆる“深溶込み溶接”といわれるものである。

荒田研究室では工学部溶接工学教室に在籍中の1963年に本格的に電子ビーム溶接法の開発研究に取り組みだした。当時世界で行われていた電子ビーム溶接は高真空中（ $\approx 10^{-4}$ Torr）のみで、ビーム出力も10kw以下であり、したがって溶接できる鋼材の板厚も10mm以下であった。そこで我々の研究目標はアーク熱源では数百パスを必要とする超厚板材でも1パスで溶接可能な高出力電子ビームの発生と、全気圧型（高真空から大気圧中まで）電子ビーム溶接機の開発であった。それ以後の研究成果の内より2, 3述べると、1967年に我が国で始めて溶接熱源としては小出力（ ≈ 2 kw）であるが大気中電子ビームの発生に成功し、その特性を調べるとともに大容量のビーム発生を検討した。1973年に溶接工学研究所の発足とともに研究所に移籍したが、その前年に当時世界最大のビーム加速電圧100 kv、連続100 kw級（最大120 kw）電子ビーム銃を開発し、高出力・高密度電子ビーム溶接機を試作した。1975年にはさらに新しい多段加速法に基づいて300 kv、100 kw級の全真空型電子ビーム溶接機を試作を行った。溶接施

* 荒田吉明 (Yoshiaki ARATA), 大阪大学溶接工学研究所, 溶接熱源・熱輸送第1部門, 教授, 所長, 工学博士, 溶接工学, プラズマ工学

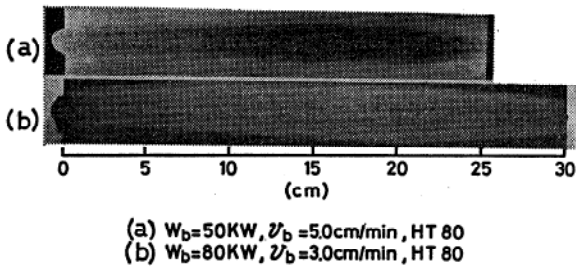


写真1 超厚板鋼材（高張力鋼）の1パス電子ビーム溶接の1例

行の結果は写真1に示すように厚さ300mmの超厚板鋼材を始め各種金属の厚板材の貫通溶接を行うとともにその性能を検討し超高出力電子ビーム熱源の有用性を実証した。これらのビーム熱源の利用法は今後溶接、切断のみならずガウジング、熱処理、蒸着あるいは新しい合金化などの加工熱源として役立ち、従来の熱源では果し得なかった新しい材料加工分野の開拓を可能にするものと考えられる。

2) 双頭電子銃によるタンデム電子ビーム溶接

電子ビーム溶接法はアーク溶接等に比較してエネルギー密度の極めて高い熱源であるため、高速度で深溶込み溶接を高効率にできる等優れた利点を持つが、その反面溶融金属中に電子ビームの作るビームホール形態に帰因する特有な各種の欠陥が発生し溶接部の機械的性質を低下させる欠点がある。従来これ等の防止にはビームを発散あるいは振動させて見掛け上のエネルギー密度を低下させるとかあるいは接合部に異種材を挿入して溶接するなど高能率で深溶込み溶接できる電子ビーム法の利点を損う手段が選ばれてきた。本研究室では電子ビーム法の利点を損わずに、欠陥の発生を防止して溶接適応範囲を拡げるために2本のビームを用いた“タンデム電子ビーム溶接法”を開発している。この方法によると、従来法では毎分約2メートル以上の溶接速度になるとハンピングやアンダーカット等の表面欠陥が現われて溶接速度限界をあたえるが、溶融金属の流れ方をタンデム電子ビームの2番目のビームホールで制御することによって毎分10メートル以上の超高速溶接の実現に成功している。他方深溶込みほど、溶融金属の

動的、挙動は著しく、その冷却速度も非常に速くなるためポロシティ、コールドシャット、スパイクなど内部欠陥が現われ溶接速度限界をあたえるが、タンデム電子ビームの2番目のビームホールによって溶融金属の挙動を安定にかつその冷却速度を遅くするなどの制御により、無欠陥の深溶込み溶接を実現させた。現在X線透過法と光学的手法によりこれ等の溶接中の加工機構について詳しい解析が進められている。

3) マイクロ波プラズマ

プラズマを用いた溶接熱源の温度は、通常1~2万度程度であり、単に電気入力を増大させても、それ以上の温度上昇は仲々達成できないとされている。本研究室では、このような温度の限界を破って、実用熱源としては、最高温度とみなせる、10万度あるいはそれ以上をもった、高温完全電離プラズマビームを、大気圧近傍の気体中で得るべく、基礎的研究を続けている。これはいわゆる「ガス絶縁プラズマ」といわれているものであり、実用熱源としての全く新しい多くの利用分野を持つと共に、核融合プラズマ研究において、非常に大きな問題となっている「プラズマ・壁相互作用」を抑止する重要な特性を持っている。したがって、物理的にも工学的にも極めて興味ある研究課題と考えている。

具体的には、大気圧気体流中で、大電力マイクロ波 ($P=100\text{ kw}$, $f=910\text{ MHz}$, CW) を用いてプラズマを生成し、それに大電流を重じようとしたジュール加熱実験を行い、多くの基礎的データをj得ている。またその温度も短時間ながら5万度以上に達している。現在20KG程度の強磁場中でのプラズマ加熱実験を行い、その安定性と加熱効率の関係を明らかにしつつあり、それらの結果を基礎にして準定常で、10万度以上のプラズマ熱源を造出しその特性の解明と各分野への適用を考えている。

4) ガストンネルの造出とその中でのプラズマビーム

大気圧中のアーク・プラズマの安定化には種々の方法が用いられているが、その中では回転気体流によるものが最も簡便であり、一般的に

使用されている。これは単なる回転流であるが、当研究室では強力な「台風の目」に相当する超低圧状態を超高回転気流の中心軸上に吸い込みと特殊なダイバータを作ることによって激しい圧力勾配をもつ Vortex gas tunnel を造出することに成功している。現在この方法によって、容器壁面の圧力 1,000 torr に対して中心軸上の圧力は 50 torr 以下の低圧力になっている。

このような Vortex gas tunnel の中にプラズマを発生させそのプラズマの諸特性を研究するための実験を現在進行中である。次にこれまでに得られたプラズマについて簡単に述べる。電極は陰極—トリウム入りタングステン、陽極—銅であり、双方とも水冷しているが、プラズマに及ぼす電極の影響を避け、均一なプラズマを作る目的で電極間隔は 10 cm 以上としている。プラズマの作動ガスとしてはアルゴンを用い、直径 20 mm ϕ の容器中に gas tunnel を作り、高周波によってアークプラズマを点火する。流量 330 l/min の Ar gas tunnel 中のプラズマビームは入力 30kw に対して直径 4 mm 以下で極めて細く、非常に安定である。このプラズマは、分光器によって測定した結果、 $n_e \geq 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の高電子密度を持ち、中心温度は約 14,000 $^{\circ}\text{K}$ であることがわかっている。このプラズマは通常の回転流中のプラズマと比較して、10kw 以上の入力では中心温度が高くなり、温度の入力依存性が大きいので大入力において非常に効率が良い。したがって今後はさらに、エネルギーを注入し Vortex gas tunnel 中で完全電離のプラズマビームを生成し、その特性を調べるとともに実用への適用について検討して行く予定である。

5) レーザ加工

レーザービームは、電子ビームと同様、集束することにより、従来のアーク熱源に比べて非常に高いエネルギー密度を得ることができる。電子ビームに対する最大の強みは、大気中で加工ができること、被加工材までの距離の制限がなく、方向制御が容易なことである。当研究室では、1967年、当時としては世界最大の出力 1

kw 級の CO₂ レーザの試作に成功し、その後の高出力レーザー装置の開発研究で我国最大の 3 kw を達成するとともに、このような高出力 CO₂ レーザによる材料加工法——溶接、切断、表面処理——に関する研究を行ってきた。ここでは、後者について簡単に紹介したい。

1. セラミックスのレーザー溶接

近年、高温技術の発達とともに、より高温に耐える耐熱構造物が求められている。セラミックスの融接は、従来困難ないしは不可能とされていたが、当研究室では最近、CO₂ レーザ溶接においてこれらの健全な溶接部を得ることを明らかにした。1 kw 出力のもと、材料として Al₂O₃-SiO₂ 系セラミックスを用いたビードオンプレート実験により設定温度、送付速度等の溶接パラメータと、溶接欠陥の発生、機械強度の関係等について検討を進めるとともに、欠陥発生の抑制策についても検討を加えている。また、一般的な深溶込み溶接現象の解析のため、ガラス溶接を行い、その直接観察により、湯流れなど動的挙動について検討を行っている。

2. レーザ切断

高いエネルギー密度を有する集光レーザービームは、材料の溶融・蒸発機能を持ち切断を可能とするが、これに O₂, Ar 等適当なジェット噴流を併用すると切断性能を著しく高めることができる。この方法は、1967年当研究室で初めて開発された方法で「レーザーガス切断」と呼ばれ、現在世界に普及している。本法の特徴は、集光ビーム径程度の狭い平行カーブを実現できること、従来の火炎切断では不可能とされていた、ステンレス、アルミニウム等の精密切断が容易に行えることである。すでに実用化の域にあるにもかかわらず、切断諸条件と切断品質の関係あるいは、切断機構に関する系統的な研究はほとんどない状況である。そこで現在、これらに関する基礎的な観察を行うとともに、特に、高い切断品質を得る立場からドロス付着の低減化について探究している。

3. レーザ表面処理

レーザー焼入れの原理は、デフォーカスした高出力レーザービームで鋼材表面をオーステナイトに加熱し、熱伝導による自己冷却によって変

生産と技術

態硬化させるものである。表面の薄い層を選択的にかつ殆んど歪なしに硬化できるなど、従来の油焼入れ法に比べて優れた特徴を有している。すでに、実用化されているものもあるが理論解析に関しては皆無に近い。また、表面皮膜を必要とするがこれに関する報告もないのが現状である。

そこで、当研究室では、1~1.5kw出力のもと、焼入れ部の冶金学的観察と熱伝導論的解析を用いることにより、ビーム吸収率、速度、スポット径など焼入れパラメータと、焼入れ寸法、軟化域、焼入れ効率等の関係を明らかにすることにより、焼入れ機構を調べている。