

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360358

研究課題名（和文）新構造消耗電極式ワイヤの開発とワイヤ設計指針の確立

研究課題名（英文）Development of coaxial hybrid solid wire and design of new structure wire

研究代表者

中村 照美（NAKAMURA TERUMI）

独立行政法人・物質・材料研究機構・新構造材料センター・主幹研究員

研究者番号：20354277

研究成果の概要：通常の消耗電極式溶接では使用されない純 Ar 雰囲気中で、安定な溶接を可能とする新構造ワイヤ（ハイブリッドワイヤ）について、適切な組成と構造を設計するための、シミュレーションモデルを開発した。シミュレーションに必要なアークの入熱範囲を推定するために、高速度カメラを使用した電子密度計測法を開発した。シミュレーションモデルを用いて、適切な組成と構造を持つハイブリッドワイヤを提案し、ワイヤ試作により実証を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2007年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：溶接、MIG 溶接、Ar、ワイヤ溶融挙動、シミュレーション、ハイブリッドワイヤ、溶融金属液柱、安定化

1. 研究開始当初の背景

9%Ni 鋼、ステンレス鋼など高級鋼を使用する低温用構造物、原子力用構造物、化学プラントなどでは、無欠陥で靱性や延性に優れた溶接金属の形成が不可欠である。これらの構造物に対して純 Ar ガス雰囲気中での非消耗電極式ティグ（TIG）溶接が行われているが、溶接能率が低く、消耗電極（溶接ワイヤ）式のミグ（MIG）溶接など生産能率に優れたアーク溶接が求められている。しかしながら、純 Ar ガス雰囲気中での MIG 溶接は不可能とされ、実用化はされていない。

高速度ビデオカメラを用いて純 Ar ガス中での MIG アーク溶接挙動を詳細に検討した結果、溶接ワイヤ先端には長く伸びる溶融金属液柱が存在し、これが不安定に動き回ることがわかった。さらに、この液柱は溶融池との短絡を誘発し、溶接ワイヤ先端のアーク発生点を大きく変動させ溶接を不安定にすることがわかった。

そこで、ワイヤの全体組成を従来使用されるソリッドワイヤと同等に保ちながらワイヤ中心部ほど溶融し易い組成分布を持つ新構造ワイヤ（ハイブリッドワイヤ 図 1）によ



図1 新構造ワイヤ (ハイブリッドワイヤ)
材料A: 芯線、材料B: フープ

ってワイヤ溶融形態を制御し、溶融金属液柱を短縮化することを提案した。

ハイブリッドワイヤでは芯線 (内側の材料、材料A) と、フープ (外側の材料、材料B) の組み合わせにより溶融挙動が変化する。ハイブリッドワイヤは、材料の組み合わせや構造により溶融金属液柱を短くして安定な溶接が得られるが、適切な材料の組み合わせや構造を選択することが必須となる。溶融挙動を左右する材料物性値として、熱伝導率、比熱、融点があるが、これらの物性値は溶融挙動に複雑に影響し合うので、影響を評価し、適切な組成設計を行うためにはシミュレーションシステムが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、ハイブリッドワイヤを構成する芯線とフープの材料物性値の影響を明らかにするために、ワイヤ溶融挙動に対して材料物性値の影響を評価できるワイヤ溶融挙動シミュレーションシステムを開発する。これにより最適な材料を組み合わせたハイブリッドワイヤの合理的な設計を可能とする指針を提案する。さらに、本シミュレーションシステムの高精度化を図るために、溶接時のワイヤに対するアークの入熱範囲を求める。ここではアークからワイヤに電流が流れる経路を、赤外領域の波長を使用したアークの電子密度計測により推定する。この結果をシミュレーションシステムに反映させる。最後に、ワイヤの溶融挙動の観察により本指針とシミュレーションシステムの妥当性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 複数組成から成るハイブリッドワイヤの溶融挙動をシミュレーションするためのソフトウェアを開発する。既開発の一次元熱伝導モデルにワイヤ内の電流分布を求めるためのプログラムを新たに追加する。さらに、芯線とフープの物性値 (熱伝導率、比熱、融点) を変え、温度依存性を持たせる。シミュレーションモデルにより芯線とフープの物性値とワイヤ溶融挙動の関係を求め、溶接不安定の原因となる溶融金属液柱を短くするためのワイヤ設計指針を提案する。

(2) 赤外領域の波長を用いたアークの電子密度温度計測装置を開発し、溶接アーク内の電流経路とワイヤに対するアーク入熱範囲を

推定する。

(3) 提案指針により適正なハイブリッドワイヤを設計する。高速度カメラでワイヤ溶融挙動を観察し、提案指針とシミュレーションモデルの検証を行う。

4. 研究成果

(1)シミュレーションの結果、ハイブリッドワイヤの溶融挙動に関しては、融点、比熱、熱伝導率の順に影響が大きい。

図2は内側と外側の材料の融点差を変えた場合である。以下の計算では計算の組み合わせを少なくするために芯線 (内側の材料) の物性値のみを変えた。芯線の融点が高ければ、ワイヤの先端は長くなり (図2(a))、長く伸びた液柱が生じる。融点が低ければ凹状になり、液柱は短くなる (図2(c))。

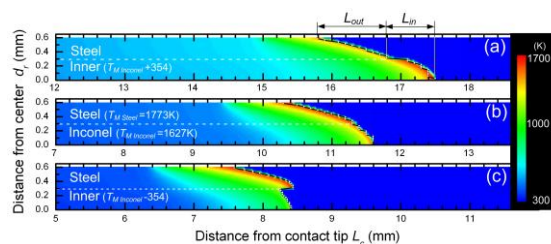


図2 融点の影響

図3は比熱を変えた場合である。芯線の比熱が大きければ、ワイヤの先端は長くなり (図3(a))、長く伸びた液柱が生じる。比熱が小さい場合には凹状 (平坦) になり (図3(c))、長く伸びた液柱は生じない。

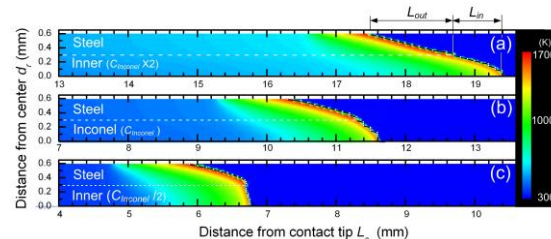


図3 比熱の影響

図4は熱伝導率を変えた場合である。芯線の熱伝導率が大きければ、ワイヤの先端は平坦状となり (図4(a))、長く伸びた液柱が生じない。これに対し、熱伝導率が小さい場合は先端が長くなり (図4(c))、長く伸びた液柱が生じる。

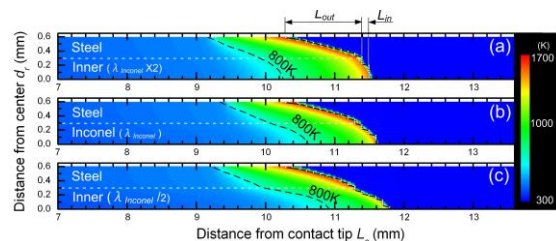


図4 熱伝導率の影響

以上の結果をまとめると、純 Ar 中で安定な MIG 溶接を行うために溶融金属液柱を短くする材料の組み合わせ指針として以下が挙げられる。

- ① 芯線(中心の材料)の融点をフープ(外側の材料)よりも低くする。
- ② 芯線(中心の材料)の比熱がより小さい材料を選択する。
- ③ 芯線(中心の材料)の熱伝導率がより大きい材料を選択する。

これらを満足した芯線とフープを選択することが有効である。実用ワイヤ組成では材料物性値は容易に変えられないが、これらを指針として材料の選択を行えば、安定な溶接を可能とするハイブリッドワイヤを設計することができる。

- (2) 赤外領域の波長を用いたアークの電子密度計測装置を用いて、MIG 溶接アーク内の電子密度を推定した結果を図 5 に示す。

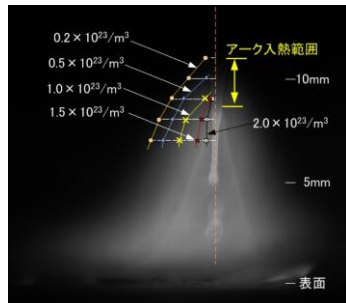


図 5 ワイヤ付近の電子密度の推定結果

電子密度が高くワイヤに電流が流れる範囲は、 $2.0 \times 10^{23} \sim 0.2 \times 10^{23} (1/m^3)$ であり、その範囲は図 5 中の矢印で示される。280-300A の範囲では、2.0~3.0 の範囲である。この値を用いてシミュレーションを行う。

- (3)(1)で提案した指針に従って鋼、Cu、Ti から適切な材料を選択してハイブリッドワイヤを設計した。芯線(中心の材料)には Cu を、フープ(外側の材料)には鋼を使用すると、溶融金属液柱を短くすることができる。この構造を持つハイブリッドワイヤについてシミュレーションを行った結果を図 6 に示す。中心部は凹状になり液柱は形成されない。

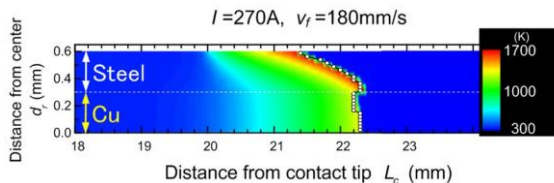


図 6 Cu-鋼ハイブリッドワイヤ

芯線が銅、フープが鋼のハイブリッドワイヤを試作した。純 Ar 中で溶接を行った結果を図 7 に示す。高速度カメラで観察した結果、ワイヤ先端には溶融金属液柱はほとんど認



図 7 溶接挙動と溶接後のワイヤ断面

められず安定な溶接が可能になった。また、ワイヤ断面写真から、芯線の Cu の溶融が進んでいることがわかる。このように、(1)で提案した指針により、溶融金属液柱を短くしたハイブリッドワイヤを設計することができ、溶融挙動のシミュレーションが可能になった。

本シミュレーションシステムではワイヤ溶融現象の基本的な物理現象に注目し、ワイヤの溶融挙動(固-液界面位置や形状)は内側と外側の材料の物性値により変化し、ワイヤ端の形状に対して融点、比熱、熱伝導率の順に溶融挙動に対して効果が大きいことを明らかにした。本シミュレーションモデルはワイヤ溶融現象を網羅できるものではなく、VOF 法など自由界面を解析する手法を使用しなければ、実用溶接の溶融金属の形状をシミュレーションすることはできない。しかしながら、ワイヤ溶融挙動に対する物性値の影響を明確に把握し、ハイブリッドワイヤに関して基本的な設計指針を提案する上で、本シミュレーションモデルは極めて有効である。このような解析例は、今までにないものである。ハイブリッドワイヤの提案に続き、ハイブリッドワイヤ設計に関しても世界に先駆けて合理的な手法を確立できた。

平成 19 年度から NEDO で「クリーン MIG 溶接プロセス技術」の研究が始まり、純 Ar 中での MIG 溶接の実用化研究が行われている。ここで、本研究で提案した設計指針を適用して、低温用鋼用ハイブリッドワイヤと、Cr-Ni 系の高強度鋼用ワイヤの設計に適用することができ有効性を証明した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① T. Nakamura and K. Hiraoka, Wire melting behavior of coaxial hybrid solid wire in pure Ar shielding gas, Welding in the World, (印刷中)、査読あり
- ② T. Nakamura and K. Hiraoka, Wire

melting behavior of coaxial hybrid solid wire in pure Ar shielding gas, Proc. the 8th International Symposium of Japan Welding Society, November, 330, 2008, 査読有り

- ② T. Nakamura, K. Hiraoka and S. Zenitani, Improvement of MIG welding stability in pure Ar shielding gas using a small amount of oxygen and a coaxial hybrid solid wire, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 13(1), 25-32, 2008, 査読有り
- ④ 銭谷哲、中村照美、平岡和雄、篠崎賢二：超微量酸素軸流局部添加による Ar-MIG アーク溶接特性、溶接学会論文集、Vol. 25(1)、187-195、2007年、査読有り

[学会発表] (計 9件)

- ① 中村照美、平岡和雄、Wire melting behavior of coaxial hybrid solid wire in pure Ar Shielding gas、溶接学会溶接アーク物理研究委員会、2009年1月27日、埼玉大学ステーションカレッジ
- ② T. Nakamura and K. Hiraoka, Wire melting behavior of coaxial hybrid solid wire in pure Ar shielding gas, IIW Doc. 212-118-08, International Institute of Welding, 2008, July, 8, Graz (Austria)
- ③ 中村照美、平岡和雄、同軸複層ハイブリッドワイヤの溶融挙動、溶接学会溶接アーク物理研究委員会、2008年5月9日、東京仕事センター
- ④ 中村照美、平岡和雄、同軸複層ハイブリッドワイヤの溶融挙動、溶接学会全国大会講演、2008年4月9日、ハイヤット・リージェンシー・オーサカ
- ⑤ 中村照美、平岡和雄、同軸複層ハイブリッドワイヤの構造と溶滴移行特性、同軸複層ハイブリッドワイヤの溶融挙動、溶接学会全国大会講演、2007年9月19日、大阪大学接合科学研究所
- ⑥ 中村照美、平岡和雄、同軸複層ハイブリッドワイヤの構造と溶滴移行特性、溶接学会溶接アーク物理研究委員会、2007年7月31日、大阪大学接合科学研究所
- ⑦ T. Nakamura, K. Hiraoka, T. Ito, T. Saito, and M. Yoshida, Influence of hybrid solid wire structure on droplet transfer - Arc behavior of Hybrid solid wire -, IIW Doc. 212-1105-07, International Institute of Welding, 2007, July, 3 Dubrovnik (Croatia)
- ⑧ T. Nakamura, K. Hiraoka, and S. Zenitani, Development of stable MIG welding in pure Ar gas using hybrid solid wire, The 5th Asian Pacific IIW

International Congress, 2007, March, 7, Sydney (Australia)

- ⑨ T. Nakamura, K. Hiraoka, and S. Zenitani, MIG Arc behavior in addition to small amount of oxygen into shielding gas, IIW Doc. 212-1095-06, International Institute of Welding, 2006, August, 28, Quebec (Canada)

[図書] (計 3件)

- ① 中村照美：黒木出版、溶接ワイヤの動的溶融特性のモデル化とアーク溶接プロセスの最適化、溶接法ガイドブック6 溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開 (アーク溶接はどこまで進むか)、溶接学会溶接法研究委員会編、2008、7、I-81～I-87
- ② 中村照美、銭谷哲、平岡和雄：黒木出版、軸流局部添加による極低酸素MIG溶接、黒木出版、溶接法ガイドブック6 溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開 (アーク溶接はどこまで進むか)、溶接学会溶接法研究委員会編、2008、5、II-91～II-95
- ③ 中村照美、平岡和雄：黒木出版、同軸複層ハイブリッドワイヤによる Ar-MIG 溶接、溶接法ガイドブック6 溶接プロセスの高機能化にむけた新しい展開 (アーク溶接はどこまで進むか)、溶接学会溶接法研究委員会編、2008、5、II-53～II-57

[その他]

受賞：平成20年8月(2008) 溶接プロセス技術奨励賞 ((社)溶接学会 溶接法研究委員会)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 照美 (NAKAMURA TERUMI)
独立行政法人物質・材料研究機構・新構造材料センター・主幹研究員
研究者番号：20354277

(2) 研究分担者

平岡 和雄 (HIRAOKA KAZUO)
独立行政法人物質・材料研究機構・新構造材料センター・グループリーダー
研究者番号：30354278
平田好則 (HIRATA YOSHINORI)
国立大学法人大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：00116089

(3) 連携研究者

なし