

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420731

研究課題名(和文) 高強度鋼アーク溶接金属の極低酸素化による機械的諸特性の飛躍的向上

研究課題名(英文) Improvement in toughness of arc weld metal in high strength steels by reducing oxygen content

研究代表者

小原 昌弘 (OHARA, MASAHIRO)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：10374000

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、構造物の大型化にともない、より強度の高い鋼材の適用化が求められている。構造物を作成するには材料同士の溶接が不可欠であるが、高強度鋼板の溶接では溶接部の靱性確保が課題となる。本研究では溶接金属の清浄度を高めることで高靱性を得る技術の開発に取り組んだ。高清浄の溶接部を得るには極低酸素雰囲気でのアーク放電の安定化と、溶接金属のミクロ組織の微細化が課題であったが、局所的な酸化性ガスの添加技術や溶接電流の脈動化によってアーク現象の安定化が図れること、また、ミクロ組織の微細化は形成される酸化物の組成をある範囲に適正化することで達成可能であることを見出し、高靱化を可能とした。

研究成果の概要(英文)：The increase in size and weight of recent structures has been demanding application of higher tensile strength steels. In such cases, difficulties have been encountered in obtaining adequate fracture toughness in arc weld metal and, therefore, a method to improve the toughness has been highly required. In this study, an attempt was made to improve the toughness by reducing oxide inclusions since the inclusions have been known to become initiation sites for fracture and so to deteriorate the toughness. In order to achieve this, it was necessary to establish a method to stabilize arc discharge in an atmosphere with less oxygen and to promote a fine acicular ferrite microstructure in weld metal. In contrast to the accepted understanding, it was found that stabilization of arc discharge was achieved by local oxidized gas addition together with pulsation of welding current and that a predominant fine acicular ferrite microstructure was obtained provided that adequate inclusions were formed.

研究分野：溶接・接合

キーワード：アーク溶接 靱性向上 高強度鋼板 ミクロ組織微細化 清浄度 溶接金属 シールドガス組成 介在物

1. 研究開始当初の背景

近年の構造物の大型化に伴い、より高強度の鋼材の適用化が強く望まれている。構造物の製造には溶接が必要不可欠であるが、高強度鋼板の適用時の大きな課題は溶接部の靱性確保である。鋼構造物の溶接では、アーク放電を利用したアーク溶接が最も広く用いられているが、現状技術では溶接のアーク放電を安定化させるためにシールドガス中に酸化性のガスを添加せざるを得ず、そのために溶接金属中には数百 ppm にも及ぶ酸素が含有され、著しく多量の酸化物系介在物が内在している。この介在物には功罪の両面があり、溶接金属の相変態時に不均質核生成サイトとなって金属組織を微細化することには寄与しているが、溶接部の機械的特性に対しては破壊の起点となるため、本来得られる筈の延性ならびに破壊靱性を大きく損なう原因となっている。特に、高強度化に伴い切欠き感受性は高くなることからその影響は更に甚大となる。

しかし、これまでにアーク溶接金属の極低酸素化に向けた技術開発は殆ど取りこまれてこなかった。その理由は、先に述べた低酸素雰囲気中でのアーク放電の不安定現象と、低酸素含有量の溶接金属でのミクロ組織の粗大化である。溶接金属は冷却途上でオーステナイト(γ)からフェライト(α)へ相変態して最終の金属組織となる。これまでの知見では、酸素含有量が多い時には γ 粒内に存在する介在物を変態サイトとして微細なアキュラーフェライト主体のミクロ組織となるが、酸素量が少なくなると γ 粒界からのベイト変態が主体となり組織単位が粗くなり、逆に靱性が低下すると報告されている^[1]。この様に溶接プロセスならびに溶接金属の組織の面からも、これまではアーク溶接金属の極低酸素化による更なる靱性向上は不可能であると思われていた。

2. 研究の目的

本研究では、溶接金属の酸素含有量を大幅に低減し、形成される介在物量を減少させることによってその機械的特性を飛躍的に向上させることを目的とした。そのためには第一に極低酸素雰囲気中でのアーク放電の安定化技術を確立すること、第二に極低酸素含有量の溶接金属において従来の介在物を多く含む溶接金属部で得られていたと同等な微細なミクロ組織を得ることが課題となる。これらの技術課題を解決し、高強度鋼板の溶接部の靱性向上技術を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 極低酸素雰囲気中でのアーク放電の安定化

鋼は熱電子放出能が低いことから、アーク放電の陰極側では電子放出しやすい場所を求めて鋼材表面を陰極点が走り回るため、アーク放電が不安定となる。そのため、現状技術ではシールドガス中に酸化性のガスを混合し、アーク直下の熔融金属表面に薄い酸化被膜を形成することによって電子放出能を向上させ、アーク

放電を安定化している。一般には、経済性も含めて不活性の Ar ガス 80% に対して酸化性の CO₂ ガス 20% を混合させて実用に供せられており、溶接金属中の酸素含有量は数百 ppm にも達する。これまでアーク溶接の低酸素化に向けた技術開発が十分になされてこなかったことから、アーク現象の安定化のためにどの程度の酸化性ガスの添加が必要であるのか、また、その時に溶接金属中の酸素含有量がどの程度になるのかといった系統的で詳細な知見は得られていないのが現状であり、本研究では、まず、これらの点について詳細な検討を行った。次に新たな着想として、高速電磁弁を用いて、パルス状に酸化性のガスを必要な個所に必要な時間、必要な量を噴射してアーク放電を安定化することを試みた。また、出力制御応答性に優れた新世代の溶接電源を導入し、電源出力の変調によるアーク現象の安定化に向けた制御の可能性も検討した。

(2) 極低酸素溶接金属でのミクロ組織の微細化

アーク溶接金属のミクロ組織を微細化するには、 γ から α への相変態時の核生成サイトとして γ 粒内に十分な数の介在物が存在し、かつ、それらの介在物の核生成サイトとしての能力が γ 粒界のそれと大差ないことが必要になってくる。つまり、最初は γ 粒界から変態が始まるが、粒界からの変態生成物が成長し、 γ 粒内を埋め尽くしてしまう前に、 γ 粒内の介在物から変態が始まり、 γ 粒界からの変態生成物の成長を物理的にブロックし、それ以上成長を抑制することが必要になる。この介在物の核生成サイトとしての能力は溶接金属中で形成される介在物の種類ならびに大きさによって決まると考えられる。前出の酸素含有量の低減によりミクロ組織が劣化した従来知見^[1]を、この様な観点から見直してみると、酸素含有量の低減により、介在物個数ならびに介在物サイズは当然減少したと思われるが、それと同時に形成された介在物の種類も変化したことが想定される。つまり、溶接金属中に含まれていた脱酸成分である Al、Si、Mn 量に対して酸素含有量が減少した訳で、形成する酸化物は、それら脱酸成分の含有量から推定すると、Al-Si-Mn 系の複合酸化物から Al 主体の酸化物へと変化したと想定される。このことから、従来知見のミクロ組織変化は、必ずしも介在物個数の不足が原因ではなく、介在物の種類が不適切であった可能性も考えられる。

以上の事前検討から、本研究では、溶接金属の酸素含有量と強脱酸元素である Al の含有量を系統的に変化させ、形成される介在物の種類とミクロ組織との関係について調べていくこととした。

4. 研究成果

(1) 極低酸素雰囲気中でのアーク放電の安定化

① 雰囲気ガス組成とアーク現象ならびに溶接金属中の酸素含有量の関係

雰囲気ガス組成を変化させアーク溶接を行った結果、Ar100%の雰囲気中では陰極点が不安定に走り回るのに対して、1.5%CO₂を添加すれば、不安定な陰極点の挙動は抑制されることが判った。ただし、この程度の添加量では、図1(a)に示した高速度ビデオ画像の様に溶接ワイヤ先端の溶融状態は長く伸びた液柱状になりアーク直下の溶融地とこの液柱が短絡を起こしてアーク放電は非常に不安定なものになること、また、この不安定性はCO₂を5%程度添加しないと抑制できないことが判った。一方、図2に示す溶接金属中の酸素含有量は、陰極点の不安定な形成を抑制するCO₂添加範囲では大きく増加しないのに対して、液柱形成によるアークの不安定を抑制するに必要な5%添加では急激に増加してしまう結果が得られた。従って、シールドガス組成の適正化だけでは安定したアーク溶接による低酸素溶接金属は得ることができないことが再確認された。

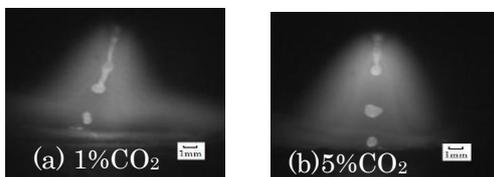


図1 シールドガス雰囲気と溶接ワイヤの溶融状態

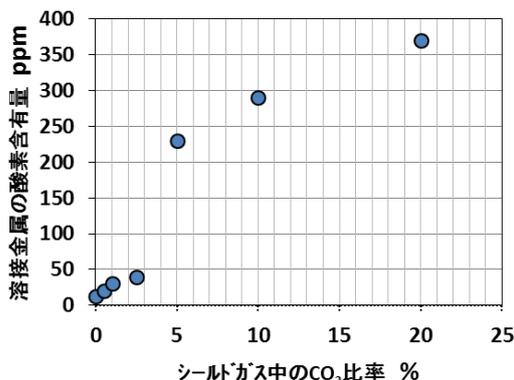


図2 シールドガス雰囲気と溶接金属酸素含有量

② 電源出力変調によるワイヤ溶融の改善

以上の知見から、陰極点の不安定挙動がなく、かつ、溶接金属の酸素含有量が急増しない範囲の微量CO₂添加の条件において、溶接ワイヤの溶融移行状況さえ改善してやれば、低酸素雰囲気中で安定したアーク溶接が可能になることが想定された。そこで、出力制御応答性の高い溶接電源を用いて溶接電流をパルス化することで、高い電磁ピンチ力によって溶融金属を分断し、長い液柱の形成を抑制する



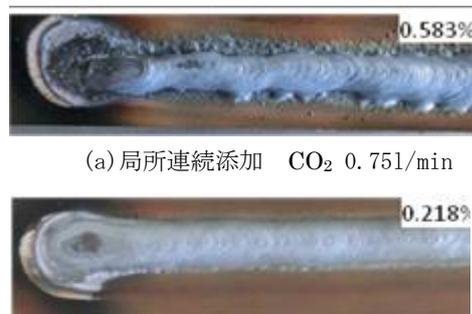
図3 電流パルス化の溶滴移行への効果
(ピーク電流 500A
周波数 500Hz
平均電流 250A)

ことを見出した。

ことを試みた。結果を図3に示す。高速度ビデオ画像から、周波数500Hzではピーク電流周期に対応して溶融金属が液滴状に離脱する様子が観察された。この溶滴移行状況は溶接電流のパルス周波数に依存し、200Hz以下の周波数では1パルス期間中での溶接ワイヤの溶融量が多くなり過ぎるため複数個の溶滴が移行する様になり、ベース電流期間で液柱が形成されることが判った。したがって、平均電流で決まるワイヤ溶融速度に対応して1パルスで1溶滴となる周波数のパルスを設定することが肝要であること、また、これによって低酸素雰囲気中でも短絡のない安定した溶接が可能となることを見出した。

③ 酸化ガスの局所パルス添加によるアーク放電の安定化検討

次に、シールドガス全体に酸化性ガスを添加するのではなく、アーク発生点に局所的に添加し、最小限のガス添加量として、溶接金属の酸素含有量を低減する方法について検討を行った。局所ガス添加はシールドガスノズルに改良を加え、アーク発生点に向けて上方70°から高速電磁弁を介してパルス状にガスを添加するものである。図4にその効果を示す。(a)の連続添加では陰極点の不安定性から安定した溶接が行えていないのに対して、(b)の局所パルス添加では、連続添加に比較してシールドガス中の平均化したCO₂濃度は0.22%と微量であるが、アーク放電ならびに溶接ビード形成の安定化に非常に効果があることが判った。この条件で、溶接金属中の酸素含有量は30ppmと母材と同等レベルの非常に低い値にすることができた。



(a) 局所連続添加 CO₂ 0.75l/min

(b) 局所パルス添加 CO₂ 0.75l/min
20Hz, duty50%

図4 酸化性ガスの局所パルス添加効果
(主シールドガス: Ar25l/min, 右上の数値はシールドガス中の平均CO₂濃度 [%])

以上の様に、本研究の成果として極低酸素雰囲気中においても雰囲気ガス組成の適正化と電源出力変調の組み合わせ、局所パルスガス添加によって、アーク溶接を安定に行うことができる技術的な目途が得られた。また、この成果によって、酸素含有量を鋼材レベルにまで減少させた極低酸素溶接金属を得ることが可能となった。

(2) 極低酸素溶接金属でのマイクロ組織の微細化の検討

図5にシールドガス中のCO₂ガス濃度を変化させた時のアーク溶接金属中に形成される介在物の粒径分布を示す。図2と図5から溶接金属中の酸素含有量が減少すると形成する介在物個数ならびに平均粒径が共に減少していることが判る。ただし、CO₂ガス添加の無い高純度 Ar100%雰囲気中の溶接金属においても、観察した断面における平均的な粒子間距離を求めてみると10μm弱程度であり、代表的な粒内変態アキチュアフェライトの長辺と同レベルであることが判った。このことは、すべての介在物が粒内変態サイトとして機能するとすれば、極低酸素含有量であっても必ずしもアキチュアフェライト主体の組織の形成に対して介在物個数が不足する訳ではないことを意味している。つまり、形成される介在物の種類が非常に重要な意味を持つということになる。

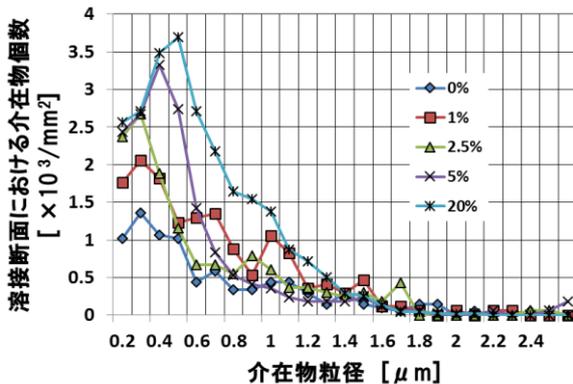


図5 アーク溶接金属中の介在物の粒径分布 (溶接条件: 300A、30V)

そこで溶接金属中に形成される酸化系介在物の種類を系統的に変化させ、溶接金属のマイクロ組織への影響を調べるために、溶接金属中の強脱酸元素であるAlの含有量と酸素含有量の比 (Al/O) に着目し、これを系統的に変化させる実験を行った。Alは0.0023~0.0140wt%、酸素は19~307ppmの範囲で変化させた。

実験の結果、Al/O比ならびに酸素含有量によって溶接金属のマイクロ組織が大きく変化することが判った。得られた代表的なアキチュアフェライト主体の組織を図6に示す。この様なγ粒内変態主体の組織は、Al/O比が0.4~1.1の間で、しかも酸素含有量が50ppm程度以下の低酸素含有量の条件においてのみ得

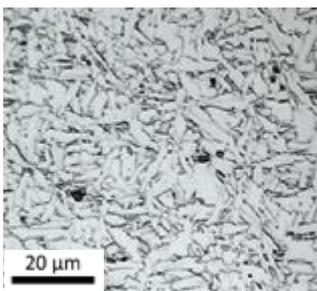


図6 極低酸素溶接金属 (25ppm) で得られた微細なアキチュアフェライト組織

られた (図7参照)。Al/Oがこの範囲を

超えるとγ粒界からのベキ付が主体の粗い組織となった。また、酸素含有量が増加するとγ粒界からの変態組織の比率が増大した。

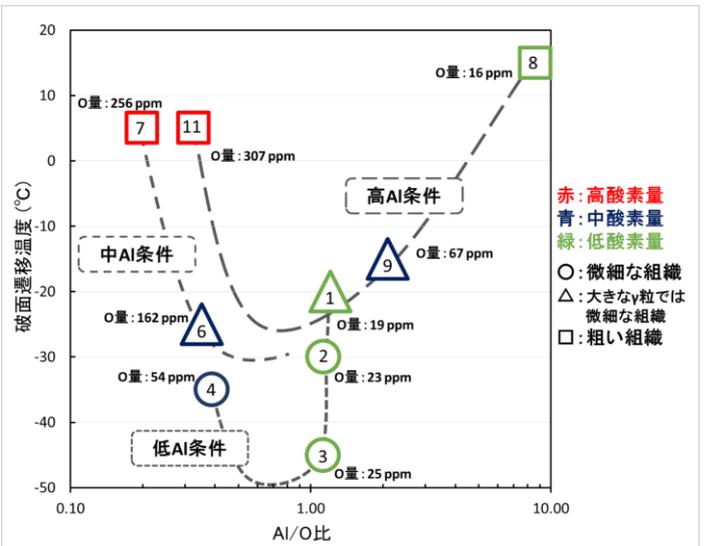


図7 溶接金属のAl/O比と溶接金属のマイクロ組織、ならびにシャルピ-衝撃試験結果 (記号の中の数字は試験片番号)

図7に溶接金属のマイクロ組織ならびにシャルピ-衝撃試験結果を示す。シャルピ-衝撃試験片は5mm厚のサブサイズとし、溶接金属中央部にVノッチ加工を施した。溶接金属のAl含有量が低く少ない酸素含有量でAl/O比が適正範囲となる条件で最も優れた靱性を示した (図中の3、酸素含有量25ppm)。

図8に最も優れた靱性を示した極低酸素溶接金属中の介在物のSEM-EDXによる組成分析結果を示す。0.7μm以下の比較的小さな介在物はAl (橙)-Si (赤)-Mn (青)系の酸化物、それ以上でMnS (青と緑)が主に形成されてい

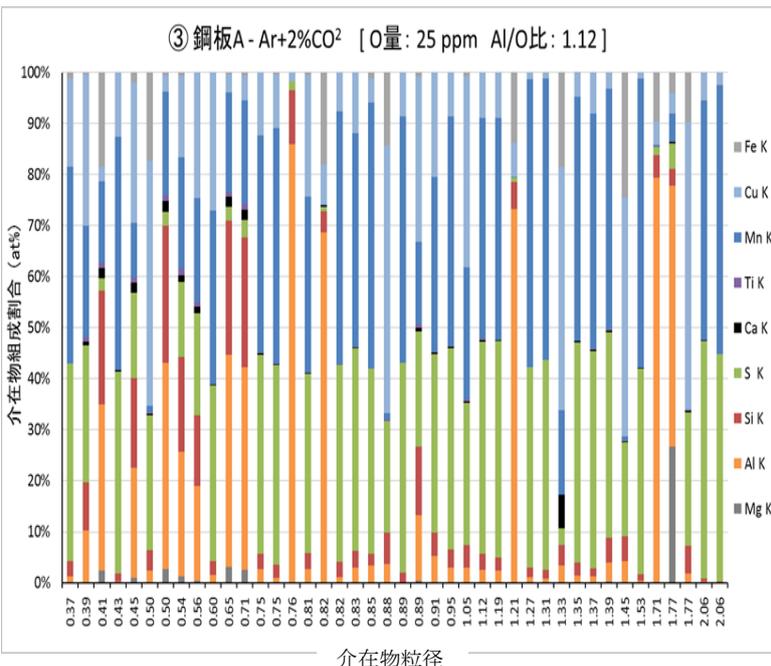


図8 介在物の成分分析結果

ることが判る。また、 $0.7\mu\text{m}$ 以上の比較的大きな介在物においても Al、Si が少量見られることから、恐らく酸化物系の介在物の上に MnS が析出して、介在物の粒径が大きくなったものと考えられる。一方、Al 含有量の多い溶接金属においては形成した介在物は Al 主体の酸化物と MnS であった。

本研究において溶接途中で溶接ナブルを水中に投入し、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態の途中過程を凍結して観察した結果によれば、最も早く変態が開始するのは γ 粒界からであるが、その直後から粒径の大きな MnS を変態サイトとして粒内変態が始まり、その後、引き続いて粒径の小さな Al-Si-Mn 系の酸化物を変態サイトとして粒内変態が生じていることが判った。一方、Al 含有量が多く、形成する酸化物が Al 主体のものになった時には後期の粒内変態が生じず、 α 相のベイトへと変態していた。

従来のアーク溶接の常識からすると微細組織が得られない極低酸素含有量であるにも関わらず今回、溶接金属のミクロ組織が粒内変態主体の微細な組織となったのは、極低酸素量に見合った (Al/O) 比とすることで形成される酸化物系介在物を変態サイトとして適切なものとしたこと、ならびにこれらの酸化物が小粒径のものばかりではなく、その上に MnS が析出することによって、粒径が比較的大きな変態サイトとしての能力が高い介在物も形成されたという条件が整ったからであると考えられる。つまり、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態は、 γ 粒界から始まるが、その変態開始直後から粒径の大きな MnS を変態サイトとして γ 粒内からもアキュレションが変態を開始するため、 γ 粒界からの変態生成物の粒内への成長が止められ、 γ 粒内に未変態の γ が残り、過冷却の進行とともに (本来変態サイトとして機能できない) 粒径の小さな介在物からも粒内変態が生じたためであると考えられる。従来は、溶接金属の酸素含有量が減少しても、それに応じて溶接金属の成分設計として強脱酸素元素である Al は減らされていなかったため、形成される酸化物は変態サイトとして働かない Al 主体の酸化物となり、仮に MnS が初期に変態サイトとして機能しても後期の粒内変態が生じなかったものと推定される。

このメカニズムによれば、MnS が非常に重要な働きをしているが、S は意図的に添加する必要はなく、鋼材中、溶接リヤ中に通常含まれているレベルで十分であった。今回の溶接金属の分析結果では $0.010\text{wt}\%$ であり、十分に低 S のレベルであった。

また、溶接電流を 150A から 450A まで変化させ溶接入熱の影響を調べた結果では、この入熱範囲では形成される介在物の平均粒径は殆んど変化しない結果が得られており、本研究で得られた結果はガスアーク (GMA) 溶接の広い溶接条件範囲において適用可能である。

これまでアーク溶接金属の低酸素化・介在物

の低減化による靱性向上化技術は、従来知見の範囲ではアーク溶接の不安定性ならびにミクロ組織の粗大化から、適用化が不可能であると信じられてきたが、本研究によってそれが可能であるということを明確に示すことができた。今後、靱性向上化技術として広い産業分野で実用化検討が進んでいくものと考えられる。

参考文献

[1]都島ら、「AC-MIG 溶接法における Ti-B 系溶接金属の靱性に及ぼす酸素の影響」溶接学会論文集 10 巻 (1992) 第 2 号 p 264-271

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 10 件)

- ①阿部駿弥、是川顕宏、小原昌弘 「極低酸素アーク溶接金属のミクロ組織と靱性」平成 29 年溶接学会秋季全国大会 (九州工業大学福岡県北九州市) 2017 年 9 月 11 日~13 日
- ②阿部駿弥、是川顕宏、小原昌弘 「極低酸素アーク溶接金属のミクロ組織と靱性」溶接学会四国支部 (溶接協会四国地区溶接技術検定委員会 愛媛県新居浜市) 2017 年 3 月 9 日
- ③小原昌弘、佐藤正啓、山田伸太郎 「低酸素高電流 GMA 溶接での溶け込み形状制御」平成 28 年溶接学会春季全国大会 (アジア太平洋トレードセンター 大阪市住之江区) 2016 年 4 月 12 日~14 日
- ④小原昌弘、千葉剛太、是川顕宏 「低酸素アーク溶接金属のミクロ組織」平成 28 年溶接学会春季全国大会 (アジア太平洋トレードセンター 大阪市住之江区) 2016 年 4 月 12 日~14 日
- ⑤米村崇志、佐藤正啓、小原昌弘 「純 Ar 雰囲気中での GMA 溶接におけるアーク溶接現象の安定化」溶接学会四国支部 (溶接協会四国地区溶接技術検定委員会 愛媛県新居浜市) 2015 年 3 月 10 日
- ⑥是川顕宏、千葉剛太、小原昌弘 「溶接金属ミクロ組織の変態過程の観察方法の検討」溶接学会四国支部 (溶接協会四国地区溶接技術検定委員会 愛媛県新居浜市) 2015 年 3 月 10 日
- ⑦原田雄也、小原昌弘、本山輝明 「局所ヘルガス添加による極低酸素 GMA 溶接の安定化」平成 27 年度溶接学会春季全国大会 (学術総合センター 東京都千代田区) 2015 年 4 月 22 日~24 日
- ⑧佐藤正啓、小原昌弘、忽那太裕 「極低酸素雰囲気 GMA 溶接におけるアーク現象の安定化 (第 2 報)」平成 27 年度溶接学会春季全国大会 (学術総合センター 東京都千代田区) 2015 年 4 月 22 日~24 日
- ⑨小原昌弘、佐藤正啓、村岡典之 「極低酸素雰囲気 GMA 溶接におけるアーク現象の安定化」平成 26 年度溶接学会春季全国大会 (東京ビッグサイト 東京都江東区) 2014 年 4 月 22 日~24 日
- ⑩小原昌弘、千葉剛太、松本孝昭 「極低酸素含有量の低合金鋼アーク溶接のミクロ組織と

その変態過程」平成 26 年度溶接学会春季
全国大会（東京ビッグサイト 東京都江東区）
2014 年 4 月 22 日～24 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小原 昌弘 (OHARA Masahiro)
愛媛大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：10374000