

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 愛知産業株式会社

目 次

(ページ)

第 1 章 研究開発の概要	
1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-1-1. 研究開発の背景.....	1-2
1-1-2. 研究目的及び目標.....	2
1-2. 研究体制.....	2-4
1-3. 成果概要	
1-3-1. 磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の設計・製作.....	5
1-3-2. 日本製アーク回転用永久磁石の最適化研究.....	5
1-3-3. 磁気駆動回転アーク現象の明確化研究.....	5
1-3-4. 溶接条件の最適化と裏波制御方法の明確化研究.....	5
1-3-5. 溶接品質の明確化.....	5-6
1-4. 当該プロジェクト連絡窓口.....	6
第 2 章 本論「磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の開発」	
2-1. 日本製アーク回転用永久磁石の最適化研究	
2-1-1. 永久磁石 N39SH 磁束密度解析.....	7-8
2-1-2. 最適磁気回路の解析.....	8-9
2-1-3. パイプ円周方向の磁束密度解析.....	9-10
2-1-4. 磁束密度コンター図の比較.....	10-11
2-1-5. 磁束密度の方向（角度）解析.....	11
2-1-6. 解析結果に基づく永久磁石のレイアウト図の 1 例.....	11-12
2-2. 磁気駆動回転アーク現象の明確化研究	
2-2-1. STPG410 炭素鋼パイプ 20A アーク現象の明確化.....	13-14
2-2-2. STPG410 炭素鋼パイプ 20A アーク現象の明確化.....	14-18
2-2-3. ステンレス鋼パイプ 20A アーク現象の明確化.....	18-20
2-3. 溶接条件の最適化と裏波形状制御方法の明確化.....	20-21
2-4. 溶接品質の明確化.....	22-28
2-5. 事業化計画	
2-5-1. 事業化の検討.....	29
2-5-2. 新技術の特許出願と論文投稿.....	29
2-5-3. 売上見込み.....	29
第 3 章 全体総括.....	29-30

第1章 研究開発の概要

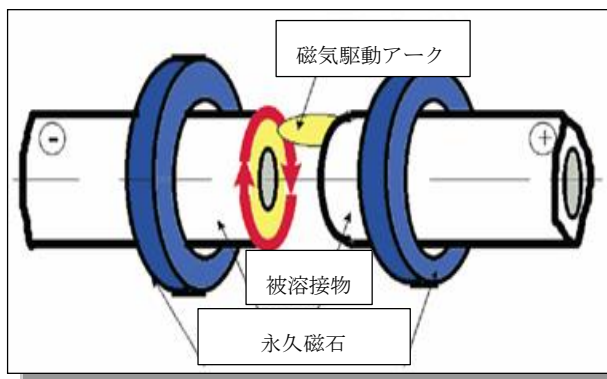
1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1. 研究開発の背景

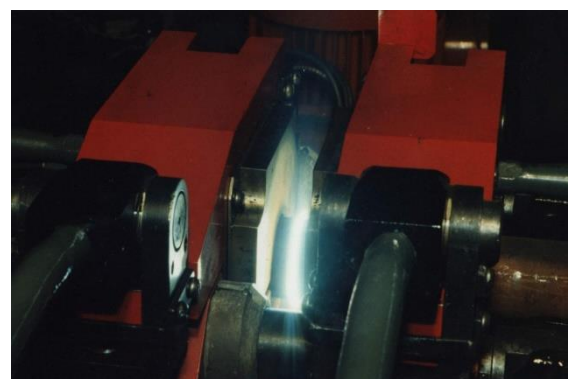
2011年に発生した東日本大震災により我が国は大幅な電力不足と電力コストの上昇に曝され、もの造りの空洞化は想像以上に進んでいる。日本のもの造り産業のこれまでも、これからも喫緊の課題は高品質で安価な製品をこれまで以上に短納期で安定して供給することができる生産方式を構築することで国際競争力を強化することにある。しかしながら日本のもの造りの基盤技術である溶接は作業者の熟練度に左右される極めて信頼性の乏しい技術であり、特に溶接の中でも固定配管の裏波溶接は技術的にも難しく、低生産性に加えて熟練オペレータの養成、高額な設備費等の理由で生産方式の高度化に歯止めがかかっている現状である。これらの背景から製品製造ラインに導入を可能とし溶接工程を短時間で然も高品質で連続溶接を可能とする自動溶接装置の開発要請が強い。

本研究開発は前述した日本のもの造り産業のニーズに基づき、溶接生産性を従来比10～50倍に飛躍的に向上させることにより圧倒的な製造コストダウンと生産工程の高度化に寄与することを可能とする革新的接合技術である磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置を開発することを目的とした。

【磁気駆動回転アーク溶接の原理】



【磁気駆動回転アーク溶接の1例】



このような新接合技術を採用した自動溶接装置が開発されると従来裏波溶接技術の弱点である低生産性が飛躍的に改善され、熟練溶接技術者を必要としなくても誰でも安定した裏波溶接が溶接材料、溶接ガスを必要とせず、簡単に短時間で完成させることが可能となり、圧倒的な生産方式の高度化が期待できる。

【革新性】

溶接時間が非常に短い	【1.5～100秒】
溶接生産性	【10～50倍以上】
溶接品質・継手性能	【優れる】
生産ライン導入	【簡単】

【導入効果】

製造コスト削減効果
省資源・省エネルギー化
溶接品質の安定化
生産方式の効率化

【将来性】

川下製造業者の国際競争力強化

しかしながら、この新接合技術の事業化を構築するためには磁気を利用したアークの回転現象を理論的に解析し、形成される裏波形状の制御方法及び溶接品質等について明確化する必要がある。そこで本研究開発は日本製永久磁石を利用したアークが回転する現象の把握と適用する磁石の特性、配列及び磁力強度がアークの回転速度に与える影響等について研究開発を開始し、研究開発初年度に磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置を開発した。翌年平成26年度の研究開発ではアーク回転現象を方法論に立脚して明確化し、溶接条件を最適化した。最終的に溶接継手品質の健全性を確認することで革新的な溶接生産プロセスを確立するべく研究開発に取り

組んだ。

1-1-2. 研究開発の目的及び目標

本研究開発の主たる目的は溶接生産性を従来比 10～50 倍に飛躍的に向上させることを可能とする日本で初めてとなる磁気駆動アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置を開発し、その接合技術を方法論に立脚した解析により明確化したうえ、溶接品質の健全性を確認することで磁気駆動アーク現象を利用した自動円周溶接装置の川下業界への拡販について事業化計画を立案することを目的とし、平成 27 年度からユーザーからの委託試験を開始する。翌平成 28 年度には各業界にテスト機の導入、平成 29 年度から本格的に事業化・製品化を開始し、平成 31 年までの 3 年間で約 3 億円の売り上げを見込んでいる。

【研究開発内容の概要】

【平成 25 年度研究開発目標】磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の設計・製作

■研究開発内容の概要

研究テーマ 1. 日本製アーク回転用永久磁石の実用化研究

研究テーマ 2. 日本製圧接スライド機構の設計・製作

研究テーマ 3. チャンバー方式溶接ヘッド回転機構部の設計・製作

研究テーマ 4. プログラムロジック（PLC）制御装置の設計・製作

【平成 26 年度研究開発目標】磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の明確化

■研究開発内容の概要

研究テーマ 1. 日本製アーク回転用永久磁石の最適化研究

研究テーマ 2. 磁気駆動回転アーク現象の明確化研究

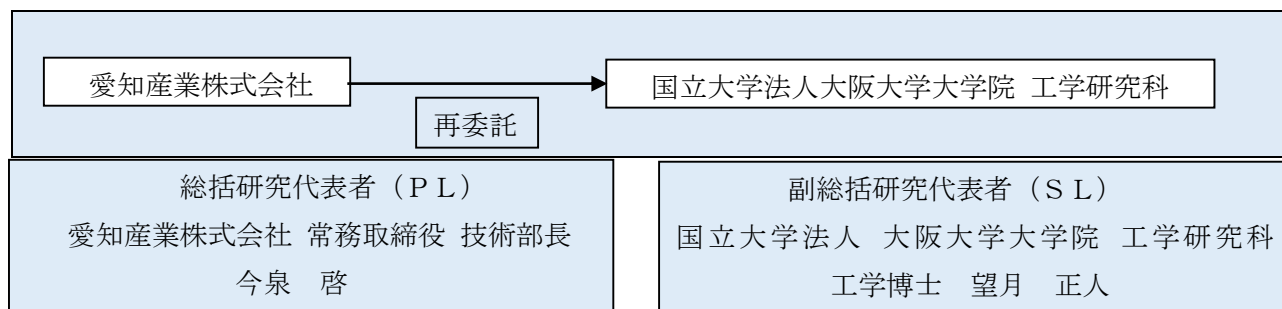
研究テーマ 3. 溶接条件及び裏波制御方法の明確化研究

研究テーマ 4. 溶接品質の明確化

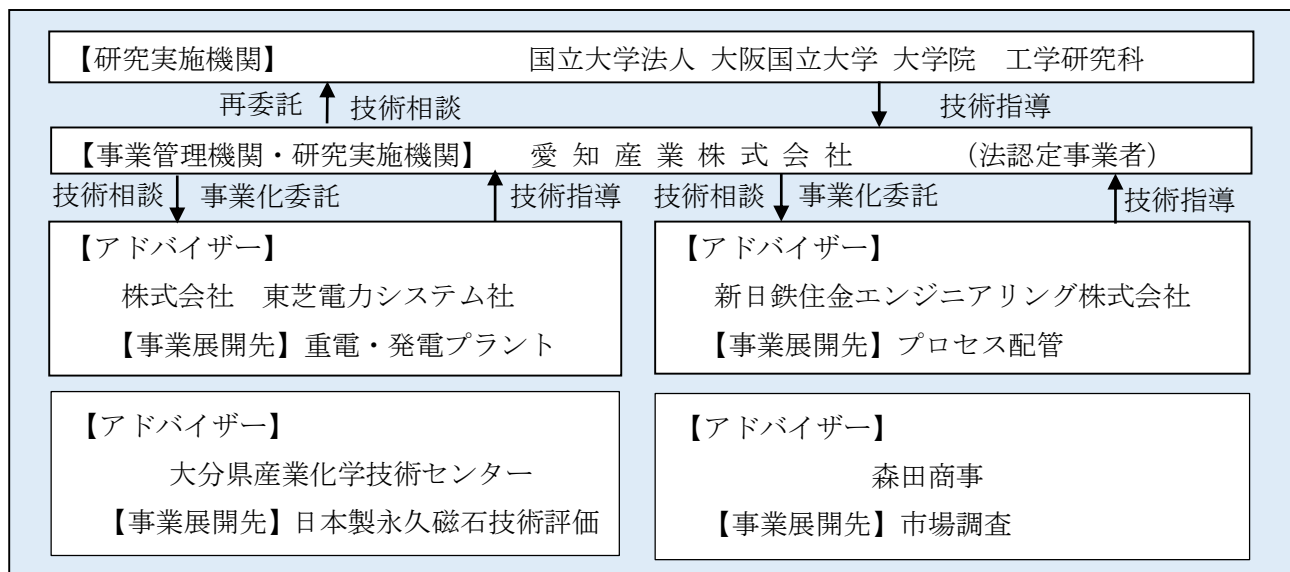
実用化・製品化に向けた事業化計画の立案

1-2. 研究体制

1) 研究組織全体

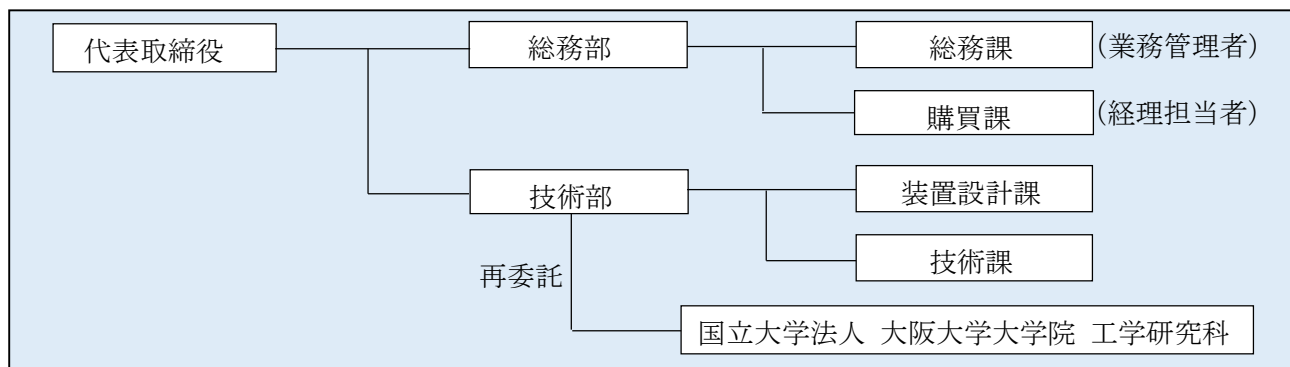


2) 研究体制

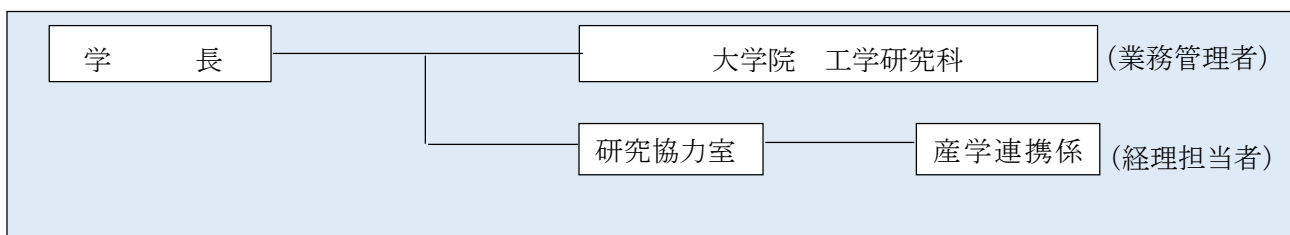


3) 管理体制

①事業管理機関「愛知産業株式会社」



②再委託先「国立大学法 大阪大学大学院 工学研究科」



4) 管理員及び研究員

①事業管理機関「愛知産業株式会社」

【管理員】

氏名	所属・役職
今泉 啓	常務取締役 技術部長
中島 秀秋	技術部 技術課 課長

【研究員】

氏名	所属・役職
今泉 啓 (再)	常務取締役 技術部長
長谷川 教嗣	技術部 次長
森田 銘徳	技術部 装置設計課 係長
榎本 雅純	技術部 装置設計課 係長

金元 慎典	技術部 装置設計課 主任
松本 好司	技術部 技術課 課長
中島 秀秋 (再)	技術部 技術課 課長
山口 剛	技術部 技術課 係長
白井 悠介	技術部 技術課 主任
岡崎 勇氣	技術部 技術課 課員
平出 興	技術部 技術課 課員

②再委託先「国立大学法人 大阪大学大学院 工学研究科」

氏名	所属・役職
望月 正人	大学院工学研究科 教授 (工学博士)
岡野 成威	大学院工学研究科 特任教授 (工学博士)

5) 業務管理者及び経理担当者

①事業管理機関「愛知産業株式会社」

【業務管理者】

氏名	所属・役職
阿部 卓實	総務部 総務課 課長

【経理担当者】

氏名	所属・役職
廣田 潔	総務部 購買課 主任

②再委託先「国立大学法人 大阪大学大学院 工学研究科」

【業務管理者】

氏名	所属・役職
望月 正人	大学院工学研究科 教授 (工学博士)

【経理担当者】

氏名	所属・役職
乾 満晴	大学院研究協力室 産学連携 係長

6) 他からの指導・協力者

【M I A B推進プロジェクト委員会】

氏名	所属・役職
今泉 啓	愛知産業株式会社 常務取締役 技術部長 (P L)
望月 正人 (工学博士)	国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 教授 (S L)
岡野 成威 (工学博士)	国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 特任教授
池田 哲 (アドバイザー)	大分県産業科技術センター 電磁力担当 総括主幹研究員
浅井 知 (アドバイザー)	株式会社東芝電力システム社 参事
谷中 幸司 (アドバイザー)	新日鉄住金エンジニアリング株式会社 技術本部 技術開発第一研究所 シニアマネージャー
森田 耕作 (アドバイザー)	森田商事

1-3. 成果概要

1-3-1. 磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の設計・製作

平成 25 年研究開発初年度に開発した磁気駆動アーク現象を利用した高能率円周溶接装置はアーク回転用として溶接装置に組み込んだ永久磁石の磁束強度不足により健全な接合状態が得られるまでには到達していなかったが、次年度平成 26 年の研究開発において永久磁石の磁束回路を電磁波による数値解析に基づいて最適化した結果、健全な溶接品質が得られる溶接継手を短時間で可能とする自動円周溶接装置を完成させた。

1-3-2. 日本製アーク回転用永久磁石の最適化研究

研究開発初年度に開発した自動円周溶接装置に組み込まれた永久磁石の磁束回路を数値解析した結果を参考として 20A（板厚 2.9mm）から 100A（板厚 6.0mm）までのパイプの接合に適応できる磁束強度と、この磁束強度を発生させるための永久磁石の形状、磁石の配置等についてシミュレーション解析し、最終的に 100～150M/秒のアーク回転速度を供給可能とする永久磁石を新規製作した。新規製作した永久磁石を開発した自動円周溶接装置に組み込み、溶接の状況を検証した結果、アーク回転用永久磁石として 20A から 100A のパイプまでの接合に適応できることを確認した。

1-3-3. 磁気駆動回転アーク現象の明確化研究

被溶接材料として STPG410 炭素鋼パイプ（磁性体材料）を使用したときの磁気駆動回転アークの挙動は、磁束強度が最も小さいパイプ断面の内側でアークが発生し、数秒間は低速で回転する。その後、アークは高速で回転しながら一筆書きのようにパイプ断面の外側に向かって移動しながらパイプ断面を均一に溶融していく。この時適正なタイミングと加圧力でパイプを加圧することで健全な接合が得られる。この原理を方法論に立脚して解析した。

一方、ステンレスパイプ（非磁性体材料）においては磁性体の場合と異なり、アークはパイプ断面の外側に発生し、数秒間は低速で回転する。その後、アークは高速で回転するが磁性体のようにパイプ断面の一方向に向かって規則的な回転移動は見られない。ステンレスパイプの接合を可能にするためには永久磁石の特性として炭素鋼パイプの磁場特性に見られるようなパイプ断面の内側と外側で磁力強度が生じるステンレスパイプに特化した永久磁石の開発を必要とすることを突き止めた。

1-3-4. 溶接条件の最適化と裏波制御方法の明確化研究

磁気駆動アーク現象を利用した接合技術は以下に示す溶接パラメータをパイプの寸法（板厚、外径）に合わせてモニタリングし、プロセス管理することで健全な接合を可能にすることを確認した。また、生産に繋がれ事業化に向いていることについても確認した。

- 溶接電流
- 磁束強度とアーク回転速度
- 圧接荷重と圧接速度

1-3-5. 溶接品質の明確化

開発した磁気駆動アーク現象を利用した自動円周溶接装置を使用して製作した溶接継手について日本工業規格「JIS Z 3143 突合せ溶接継手の試験方法」に準拠して以下に示す試験を実施した結果、異常な欠陥等は検出されなかった。

- 溶接継手の引張試験
- 溶接継手の曲げ試験（表曲げ試験／裏曲げ試験）
- マクロ試験

ミクロ試験（溶接部／熱影響部／母材）

硬度試験

成分分析試験（溶接部）

追加試験として溶着金属の中央に形成される白色状の圧接線について走査式顕微鏡を使用した成分分析を実施した結果、金属介在物等の混入は認められなかった。

1-4. 当該プロジェクト連絡窓口

愛知産業株式会社 総務部 総務課 課長 阿部卓實

〒140-0001 東京都品川区東大井 2 丁目 6 番 8 号

TEL : 03-6800-2050

FAX : 03-6800-2068

E-Mail : abe.t@aichi-sangyo-co.jp

第2章 本論「磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置の開発」

平成25年度の研究開発テーマ「磁気駆動アーク現象を利用した高能率自動円周溶接の開発」で設計・製作された高能率自動円周溶接装置の外観を【写真-1】に示す。開発した自動円周溶接装置は20A（外径27.2mm、板厚2.9mm）～100A（外径114.3mm、板厚6.0mm）までのパイプサイズの接合に適応しており、油圧サーボで駆動するパイプクランプ機構、圧接用シリンダー機構、アーク回転用永久磁石と溶接部を全体的にガス置換する機構を含む溶接ヘッド及び溶接電源とPLC制御を搭載した制御装置から構成される。



【油圧シリンダー駆動部】

【アーク回転用永久磁石装着部】

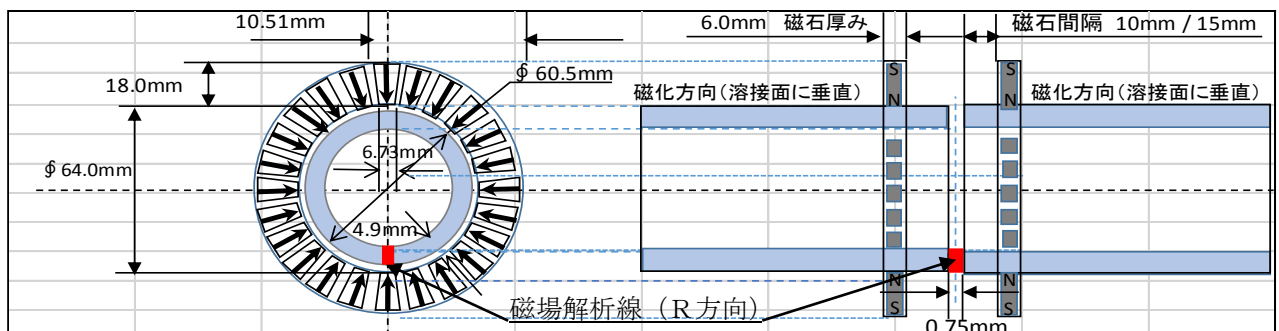
【シリンダー駆動用油圧サーボ】

【写真-1】 高能率自動円周溶接装置の外観

2-1. 日本製アーク回転用永久磁石の最適化研究

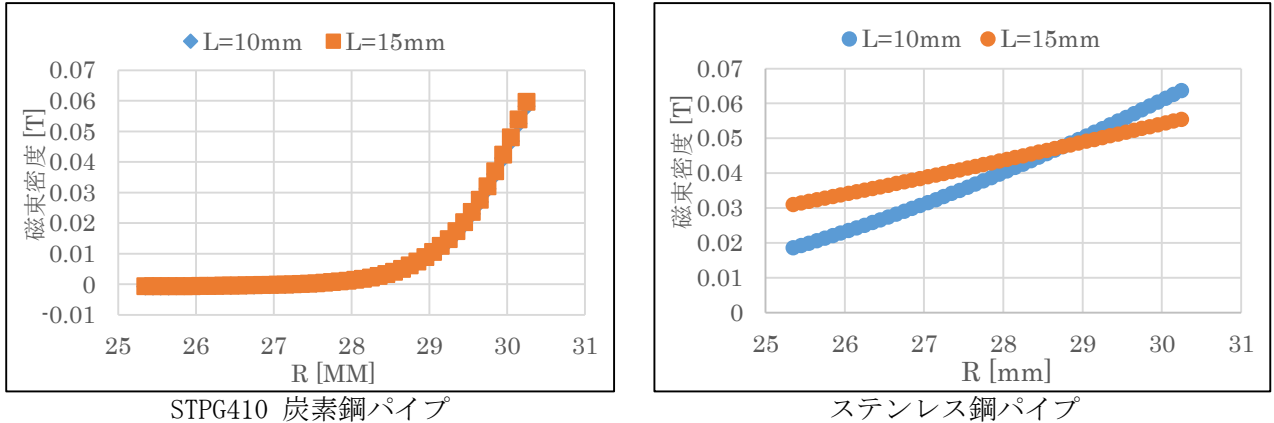
2-1-1. 永久磁石 N39SH 磁束密度解析

平成25年度に適用したN39SH永久磁石の磁束強度について【図-1】に示す方法で電磁波による磁場解析を実施した結果を【グラフ-1】に示す。解析はSTPG410炭素鋼パイプとステンレス鋼パイプのパイプサイズ50A（外径60.5mm、厚さ4.9mm）を使用した。



- 永久磁石種類：N39SH
- 寸法：6.73mm－10.51mm－18.0mm×6.0mmT
- 極数：24極
- 磁化方向：溶接面に垂直
- 磁石間隔：10mm／15mm

【図-1】 N39SH 永久磁石磁場解析実施方法



【グラフ-1】 N39SH 永久磁石磁束密度解析結果

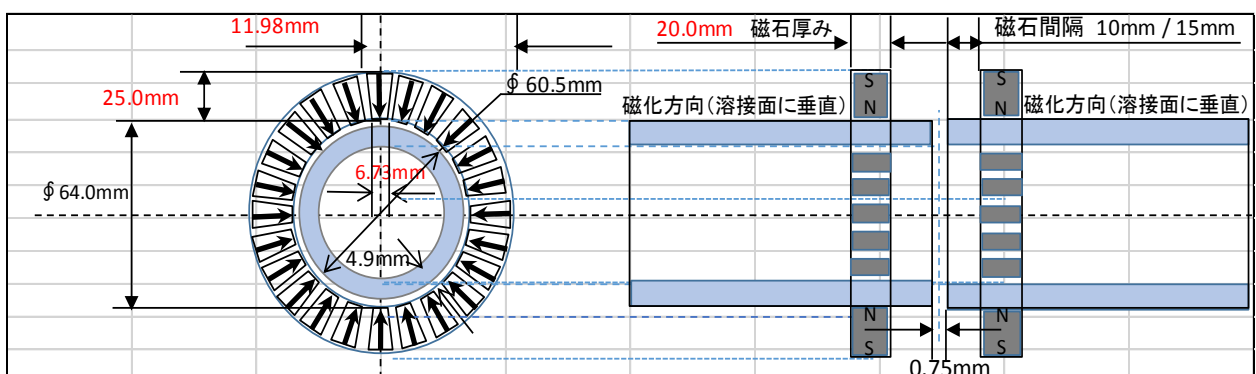
N39SH 永久磁石の磁束強度は【グラフ-1】に示すとおり鋼管断面の外側で約 0.06T 程度である。炭素鋼パイプ断面の内側の磁束は極めてゼロに等しく、パイプ断面の外側に近づいた内半径 29mm 近傍から急激に磁束が上昇する特性を示す。一方、ステンレス鋼パイプの磁束はパイプ断面の内側から外側に向かって直線的な磁束勾配を示していることを確認した。

2-1-2. 最適磁気回路の解析

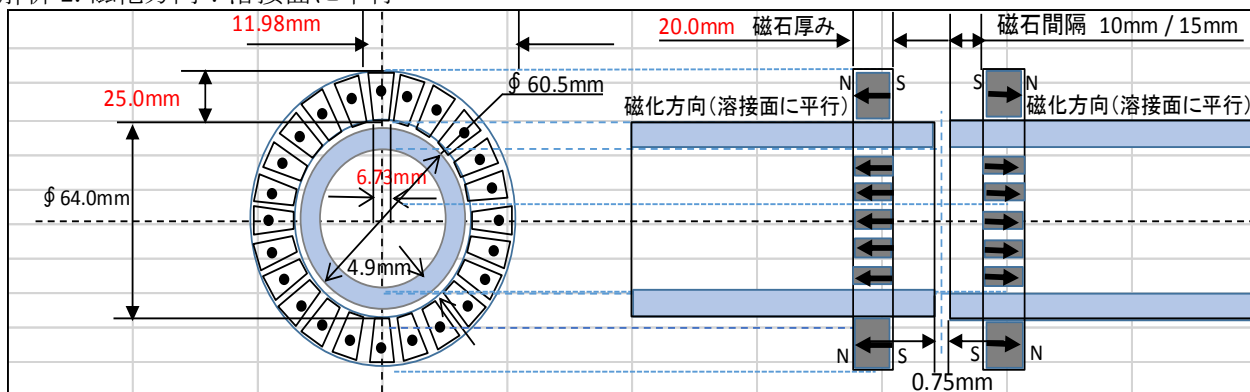
N39SH 永久磁石の磁束解析値の結果より、対象とした炭素鋼パイプ及びステンレス鋼パイプを完全に溶接するために必要とする磁束回路と磁束密度について【図-2】に示す方法で磁束の数値解析を実施し、100m/秒以上のアーク回転速度を継続するために必要とする磁石の寸法、極数、及び磁石の磁化方向等について解析した結果を【グラフ-2】に示す。

- 永久磁石種類：N48M（日本製）
- 極数：24極（寸法：6.73mm－11.98mm－25mm×20mmT）
- 磁化方向：溶接面に垂直
溶接面に平行
- 磁石間隔：10mm／15mm

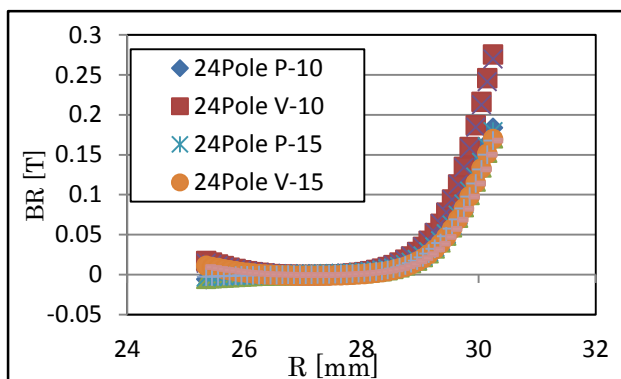
解析 1. 磁化方向：溶接面に垂直



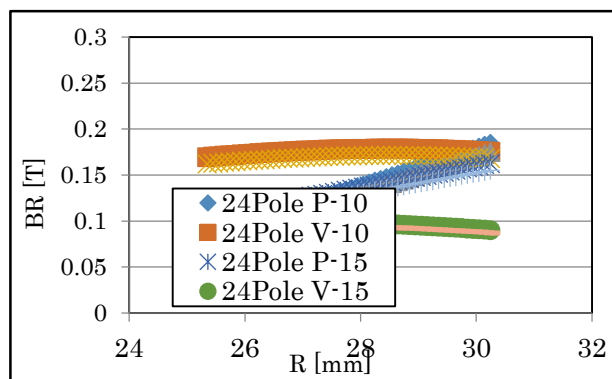
解析 2. 磁化方向：溶接面に平行



【図-2】最適磁気回路の解析方法



STPG410 炭素鋼パイプ



ステンレス鋼パイプ

【グラフ-2】最適磁気回路解析結果

N48M 日本製永久磁石の磁束回路及び磁束密度について数値解析した結果を【表-1】に示す。

【表-1】N48M 日本製永久磁石磁束密度解析結果 (T:テスラ、R:パイプ内半径)

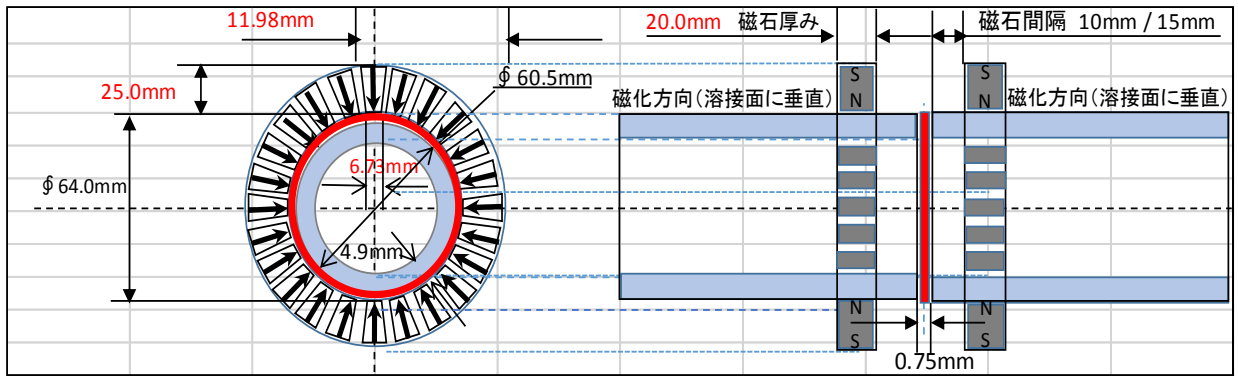
パイプ	磁化方向	最大磁束密度	磁束回路特性
STPG410 炭素鋼パイプ	垂直	0.28T at 30.2mmR	R28mm から急激な勾配
	平行	0.19T at 30.2mmR	R28mm から急激な勾配
ステンレス鋼パイプ	垂直	0.17T at 25.3-30.2mmR	勾配無し
	並行	0.18T at 30.2mmR	R25.2mm から直線勾配

【表-1】に示すとおり炭素鋼パイプの磁束密度は磁化方向が垂直の場合、パイプ内半径 28mm 近傍より急激に上昇し、パイプ断面の外側で 0.28T の磁束密度が出力され、磁化方向を平行に置いた磁石より強い磁束密度が得られる。

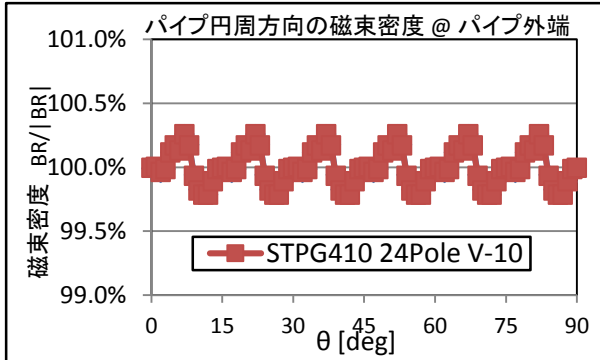
一方、ステンレスパイプにおいては磁化方向が垂直の場合、パイプ半径の内側から外側まで一定量の磁束密度が継続されているが、磁化方向を平行に置いた磁石の磁束密度はパイプ内側から外側に向かって直線的な磁束密度の勾配を示す。

2-1-3. パイプ円周方向の磁束密度解析

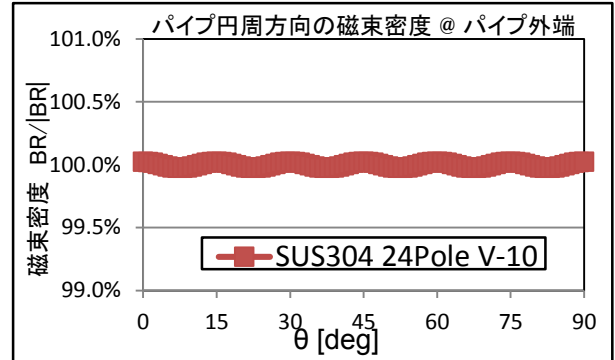
N48M 日本製永久磁石のパイプ円周方向における磁束密度の変動率について【図-3】に示す方法で解析した結果を【グラフ-3】に示す。



【図-3】円周方向における磁束密度の変動率解析方法



STPG410 炭素鋼パイプ



ステンレス鋼パイプ

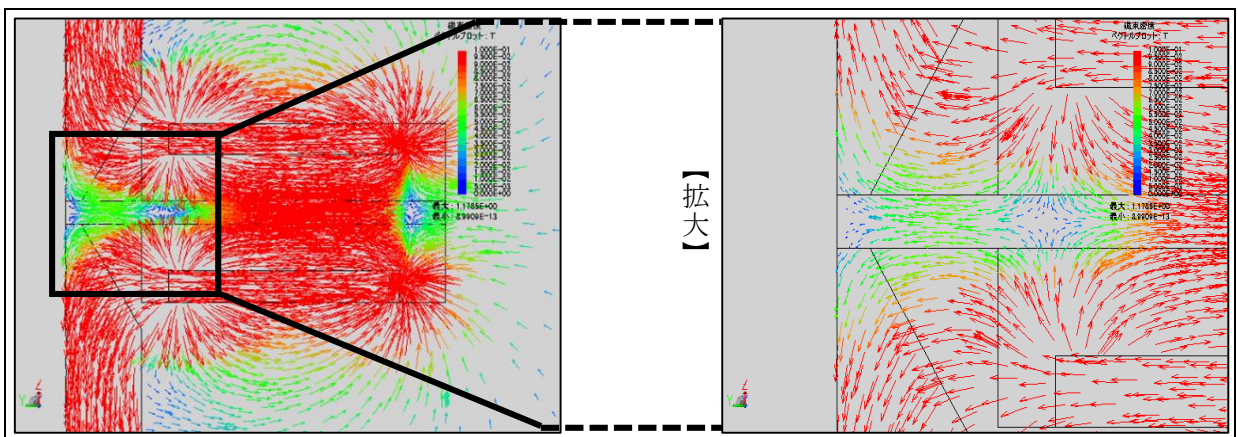
【グラフ-3】円周方向における磁束密度の変動率解析結果

【グラフ-3】に示すとおり炭素鋼パイプの円周方向磁束密度の変動率は【グラフ-2】に示す内半径方向の磁束密度に対して±0.3%程度の変動率であり、ステンレス鋼パイプについては±0.1%程度である。このことから N48M 日本製永久磁石は溶接品質に影響を与えるほどのアークの回転ムラは起こさないとはいえる。

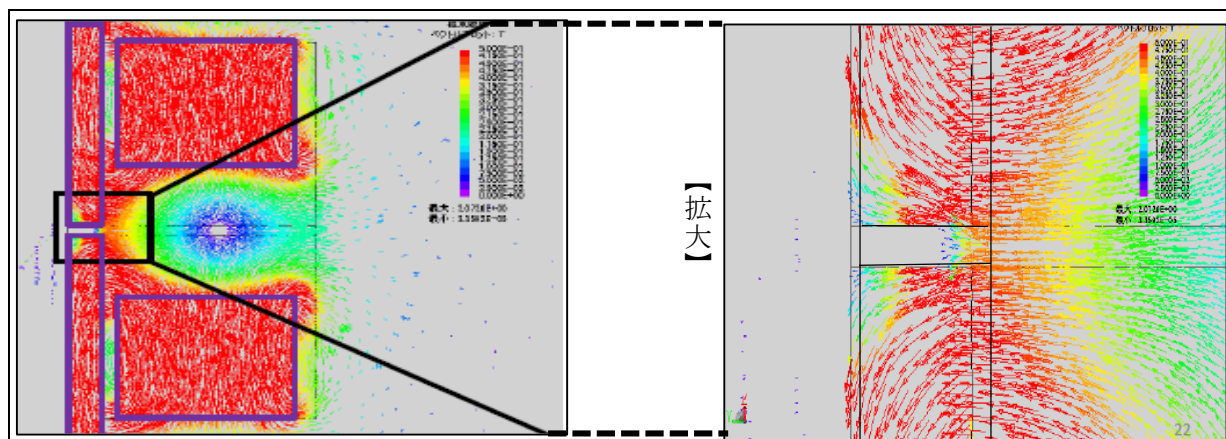
2-1-4. 磁束密度コンター図の比較

N39SH 永久磁石と N48M 日本製永久磁石の磁束密度コンター図をそれぞれ【図-4】に示す。

□N39SH 永久磁石 【磁束密度】 0T (青色) ~0.1T (赤色)



□N48M 日本製永久磁石 【磁束密度】 0T (青色) ~0.5T (赤色)

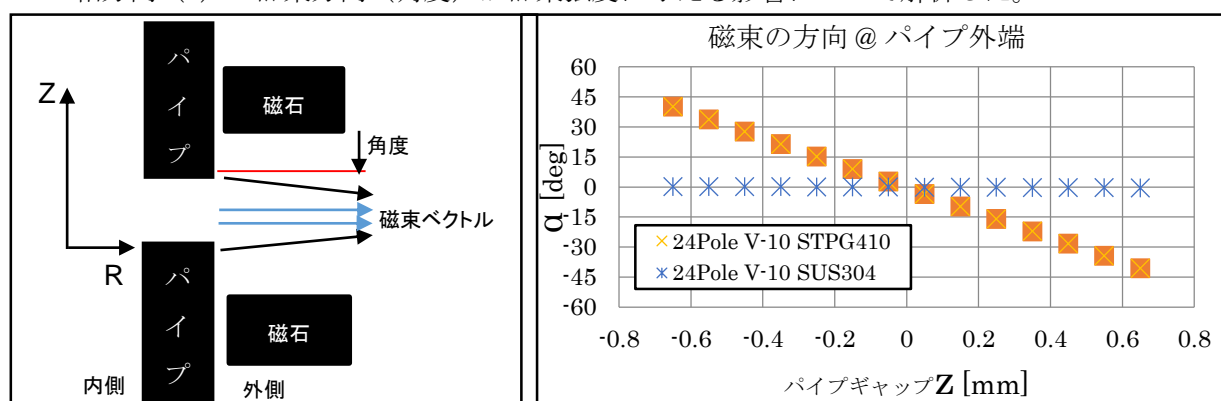


【図-4】 磁束密度のコンター図

【図-4】 に示すコンター図より N48M 日本製永久磁石は磁石直下のパイプの表面からパイプ断面半径方向の端面一帯に沿って 0.5T 程度の磁束が出力されている。N39SH 永久磁石のパイプ断面近傍の磁束密度は N48M 日本製永久磁石に比較して極めて弱いことがコンター図から証明された。

2-1-5. 磁束密度の方向 (角度) 解析

N48M 日本製永久磁石の磁束の方向 (角度) について解析した。【図-5】 に磁束ベクトルの定義を示す。パイプ半径方向に発生する磁束のベクトル (R) は無視できるほど小さいためパイプの軸方向 (Z) の磁束方向 (角度) が磁束強度に与える影響について解析した。



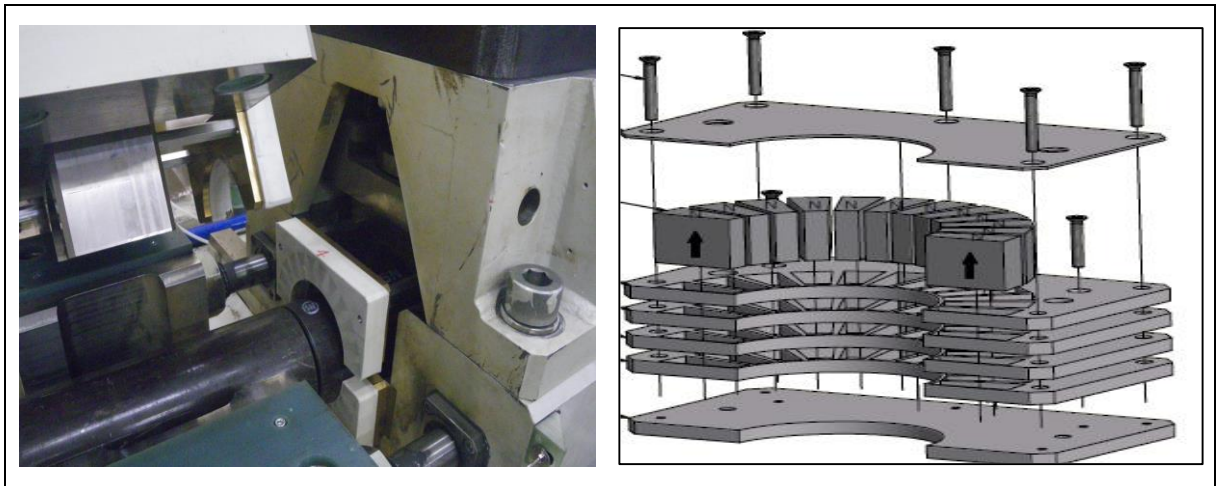
【図-5】 磁束ベクトルの角度定義

【グラフ-4】 磁束密度の方向 (角度) 解析結果

【グラフ-4】 に示すとおりステンレス鋼パイプについては Z 軸のギャップが変動しても磁束ベクトルの角度変化は生じていない。これに対して STPG 炭素鋼パイプは Z 軸のギャップ変動に対して 0~±45 度の角度変化が発生しているが磁束強度には影響を与えないことを証明している。

2-1-6. 解析結果に基づく永久磁石のレイアウト図の 1 例

解析結果に基づいて新規製作した N48M 日本製永久磁石のレイアウトの一例を【図-6】 に示す。製作した N48M 日本製永久磁石は 100~150m/秒のアーク回転速度が継続されるように設計されている。



【図-6】永久磁石のレイアウト図の一例

2-2. 磁気駆動回転アーク現象の明確化研究

磁気駆動回転アーク現象を明確化するために解析した項目を以下に示し、解析要領を【図-7】に示す。解析はSTPG410炭素鋼パイプ 20A（外径 27.2mm、板厚 2.9mm）、50A（外径 60.5mm、板厚 4.9mm）及びステンレス鋼パイプ 20A（外径 27.2mm、板厚 2.9mm）を使用した。

【解析項目】

□溶接前のパイプ断面の磁束密度測定

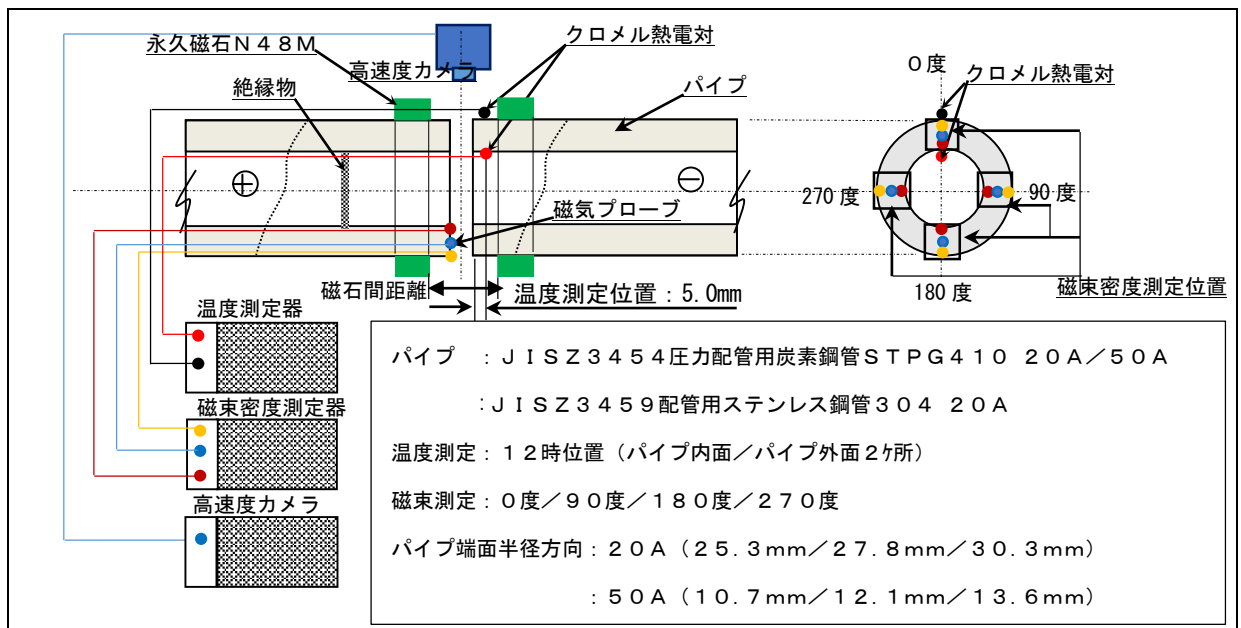
パイプ断面円周角度 0、90、180、270 度の各位置における磁束密度を測定する。

□溶接中のパイプ内外面の遷移温度測定

パイプ断面円周角度 0 度の位置でパイプ内外面の溶接中の遷移温度を測定する。

□溶接経過時間ごとのアーク回転速度測定

溶接中のアーク回転状況を高速カメラで撮影し、撮影コマ数から溶接経過時間ごとのアーク回転速度を測定する。



【図-7】磁束密度測定及び温度測定要領

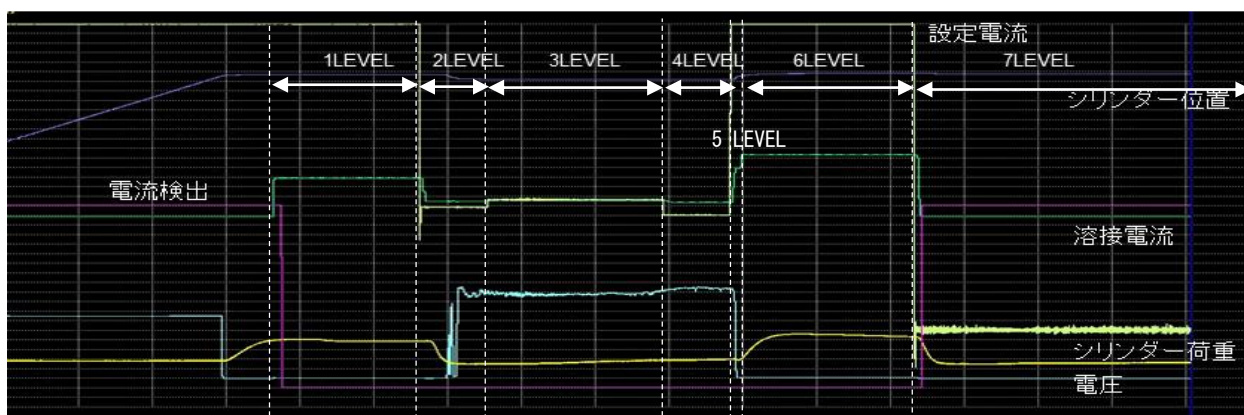
2-2-1. STPG410 炭素鋼パイプ 20A アーク現象の明確化

□適用溶接条件

STPG410 炭素鋼パイプ 20A の基本溶接条件を【表-2】に示し、溶接プログラムを【図-8】に示す。

【表-2】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A の基本溶接条件

レベル	1	2	3	4	5	6	7
時間 (秒)	3.00	1.50	3.00	2.75	0.25	1.00	0
電流 (A)	300	150	145	140	600	600	0
荷重 (KN)	18.80	-	-				
位置 (mm)	-	1.80	1.80	1.50	1.80	-3.50	0
速度 (mm/秒)	-	200	200	200	200	50	0

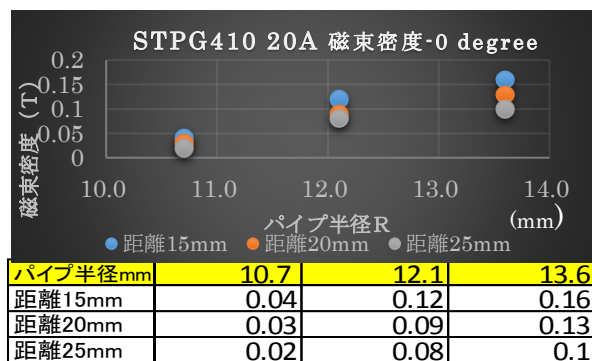


【図-8】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A 基本溶接条件のプログラム

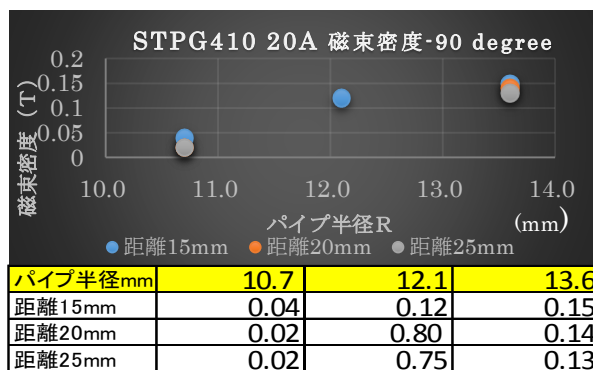
□磁束密度測定

パイプ断面円周角度 0、90、180、270 度の各位置における磁束密度を測定した結果を【グラフ 5】に示す。グラフに示すとおり N48M 日本製永久磁石の磁場解析でパイプ断面の磁束を測定した結果と同様の磁束回路が出力されている。

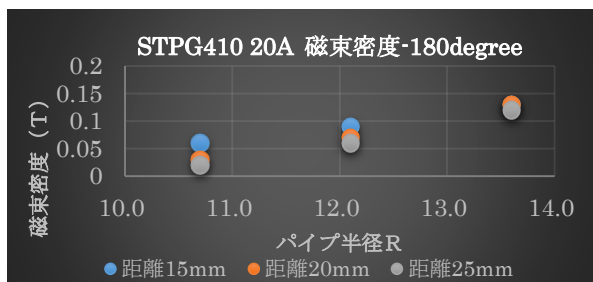
【円周角度 0 度】



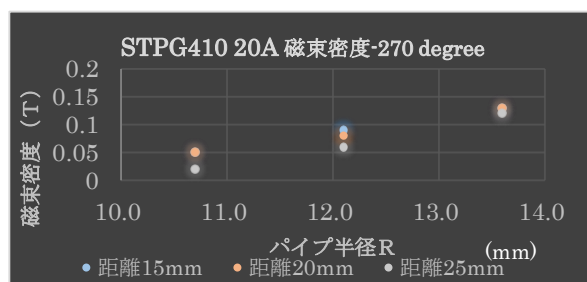
【円周角度 90 度】



【円周角度 180 度】



【円周角度 270 度】



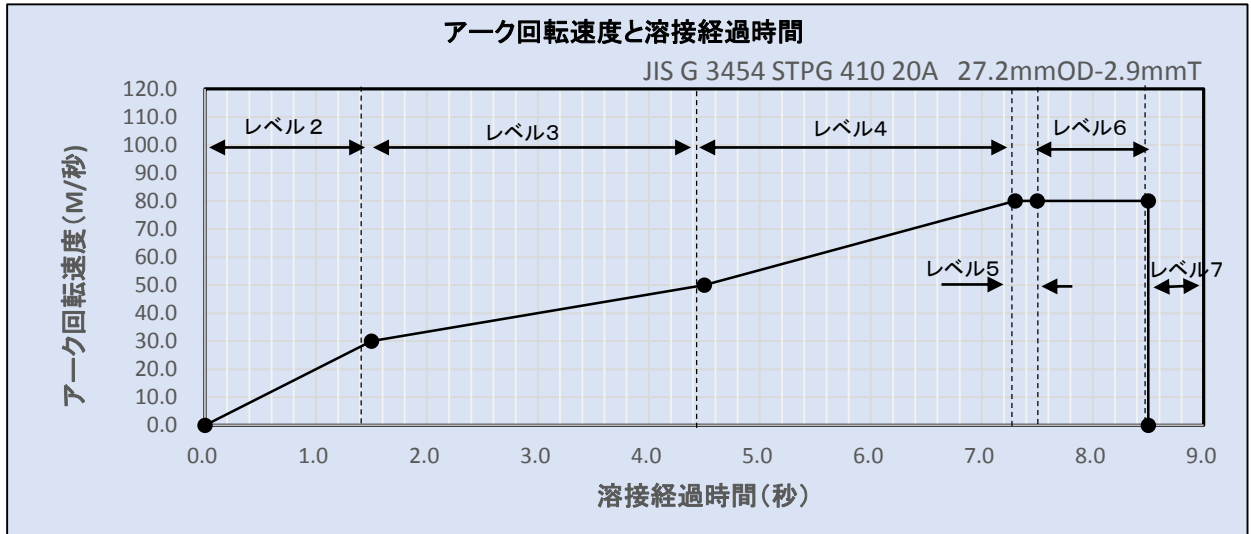
パイプ半径mm	10.7	12.1	13.6
距離15mm	0.06	0.09	0.13
距離20mm	0.03	0.07	0.13
距離25mm	0.02	0.06	0.12

パイプ半径mm	10.7	12.1	13.6
距離15mm	0.05	0.09	0.13
距離20mm	0.05	0.08	0.13
距離25mm	0.02	0.06	0.12

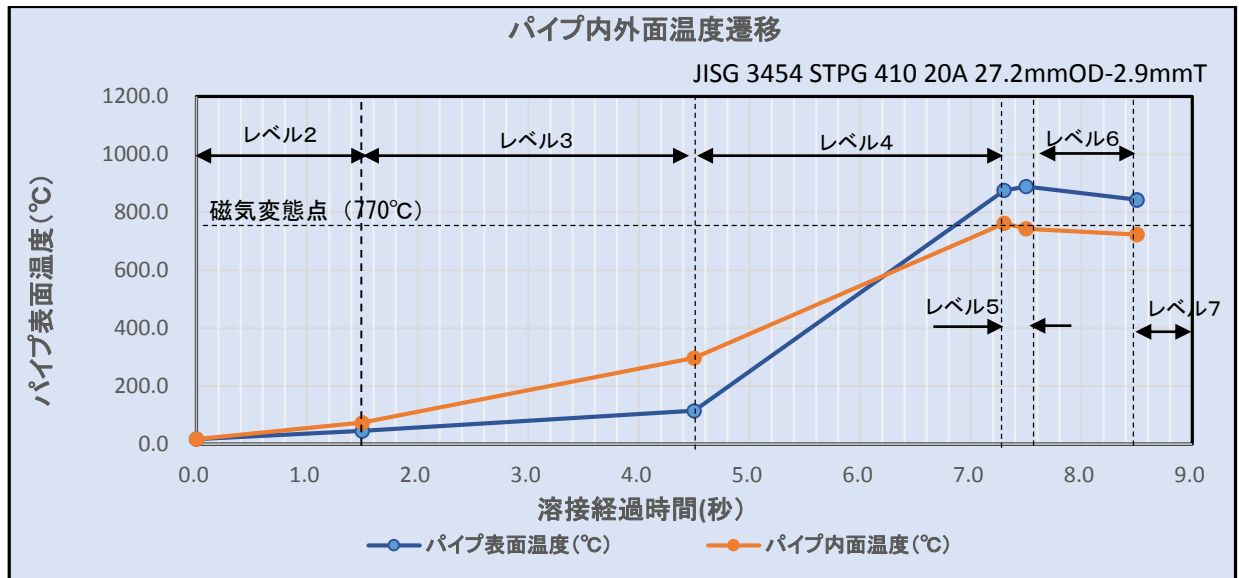
【グラフ-5】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A 磁束密度測定結果

□溶接中のアーク回転速度とパイプ内外面の遷移温度

溶接経過時間ごとのアーク回転速度を【グラフ-6】、その時のパイプ内外面の遷移温度を【グラフ-7】に示す。グラフに示すとおり磁気駆動回転アークはアークが発生してから約 2.5 秒間は 30～50m/秒の低速回転を維持しながら回転している。その後パイプの温度が約 200℃以上に上昇すると急に高速回転に移行し、この時のアーク回転速度は 80m/秒に到達する。



【グラフ-6】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A アーク回転速度と溶接経過時間



【グラフ-7】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A 溶接中のパイプ内外面遷移温度

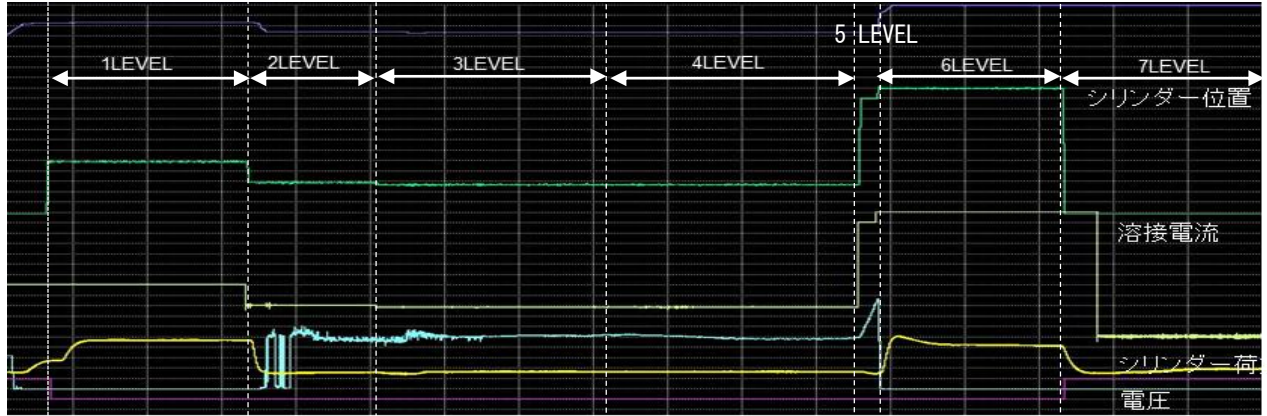
2-2-2. STPG410 炭素鋼パイプ 50A アーク現象の明確化

□適用溶接条件

STPG410 炭素鋼パイプ 50A の基本溶接条件を【表-3】に示し、溶接プログラムを【図-9】に示す。

【表-3】 STPG410 炭素鋼パイプ 50A の基本溶接条件

レベル	1	2	3	4	5	6	7
時間 (秒)	5.00	3.00	6.50	6.50	0.50	2.50	0
電流 (A)	500	270	250	250	1000	1100	0
荷重 (KN)	50.00	-	-				
位置 (mm)	-	2.50	2.50	2.40	2.40	-5.00	0
速度 (mm/秒)	-	200	200	200	200	200	0



【図-9】 STPG410 炭素鋼パイプ 50A 基本溶接条件のプログラム

□磁束密度測定

パイプ断面円周角度 0、90、180、270 度の各位置における磁束密度を測定した結果を【グラフ-8】に示す。グラフに示すとおり N48M 日本製永久磁石の磁場解析でパイプ断面の磁束を測定した結果と同様の磁束回路が出力されている。

【円周角度 0 度】



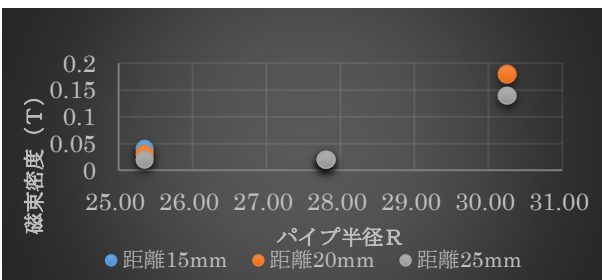
パイプ半径(mm)	25.35	27.80	30.25
距離15mm	0.04	0.02	0.25
距離20mm	0.03	0.02	0.18
距離25mm	0.02	0.02	0.14

【円周角度 90 度】



パイプ半径(mm)	25.35	27.80	30.25
距離15mm	0.04	0.02	0.25
距離20mm	0.03	0.02	0.18
距離25mm	0.02	0.02	0.14

【円周角度 180 度】



パイプ半径(mm)	25.35	27.80	30.25
距離15mm	0.04	0.02	0.25
距離20mm	0.03	0.02	0.18
距離25mm	0.02	0.02	0.14

【円周角度 270 度】

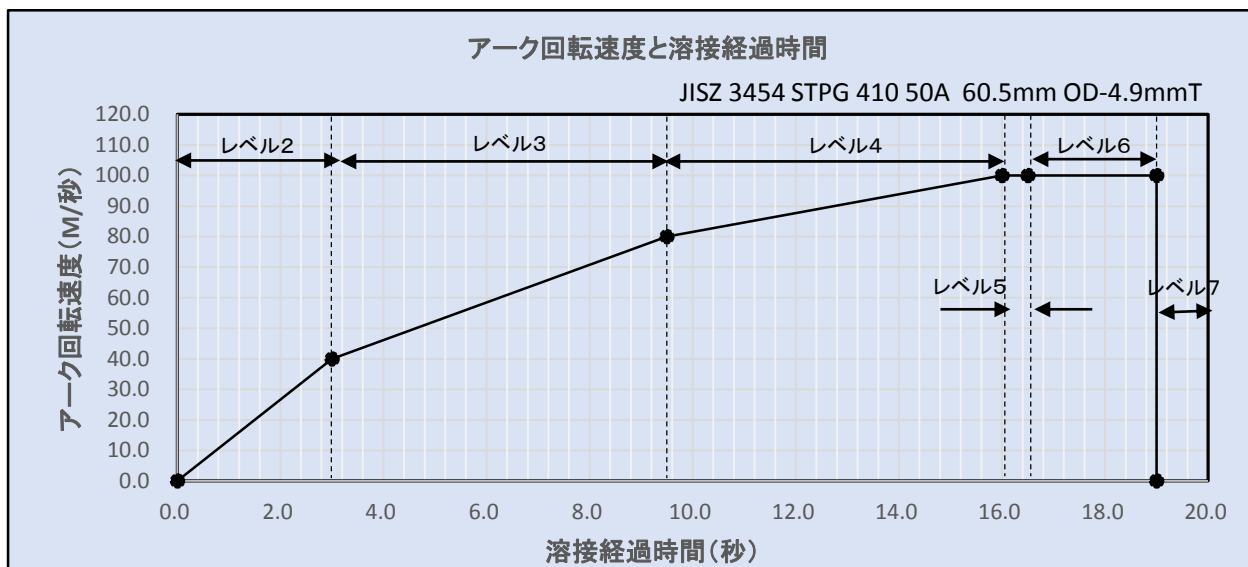


パイプ半径(mm)	25.35	27.80	30.25
距離15mm	0.04	0.02	0.25
距離20mm	0.03	0.02	0.18
距離25mm	0.02	0.02	0.14

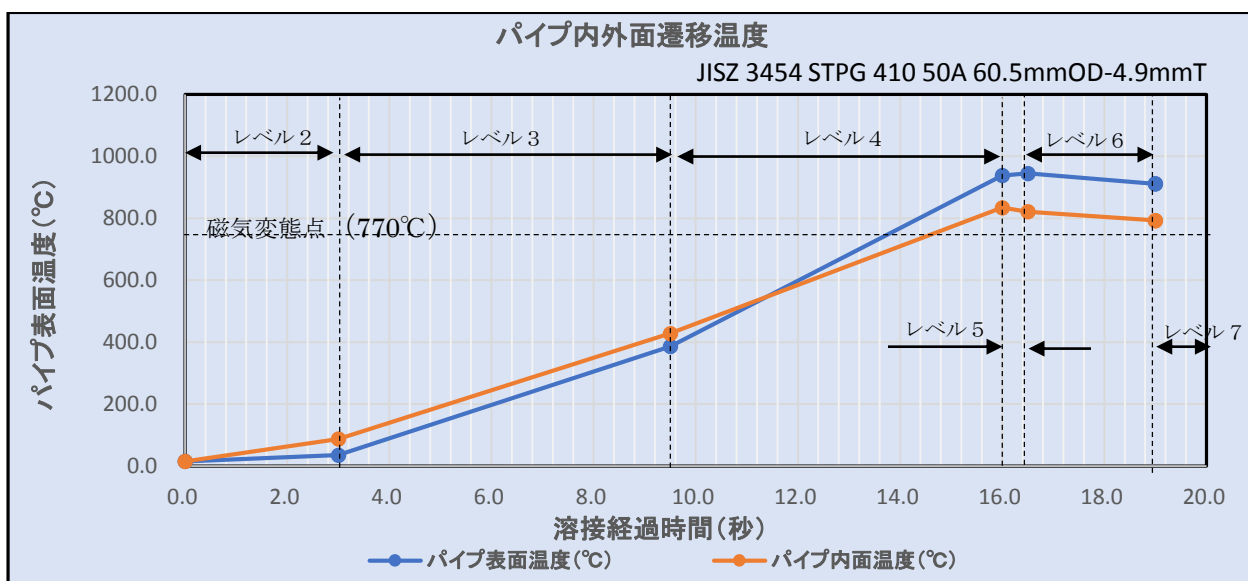
【グラフ-8】 STPG410 炭素鋼パイプ 50A 磁束密度測定結果

□溶接中のアーク回転速度とパイプ内外面の遷移温度

溶接経過時間ごとのアーク回転速度を【グラフー9】、その時のパイプ内外面の遷移温度を【グラフー10】に示す。グラフに示すとおり磁気駆動回転アークはアークが発生してから約2.5秒間は40～60m/秒の低速回転を維持しながら回転している。その後パイプの温度が約200℃以上に上昇すると急に高速回転に移行し、この時のアーク回転速度は100mm/秒に到達する。



【グラフー9】 STPG410 炭素鋼パイプ 50A アーク回転速度と溶接経過時間

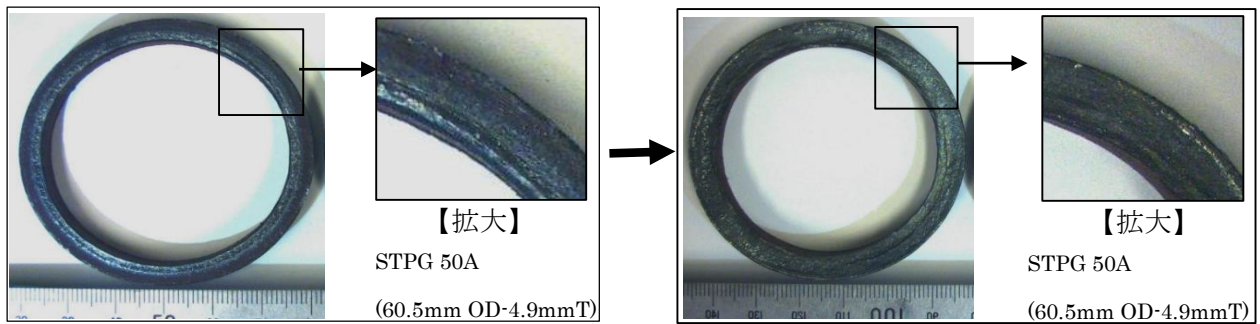


【グラフー10】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A 溶接中のパイプ内外面遷移温度

□STPG410 炭素鋼パイプ（磁性体材料）を使用した磁気駆動回転アークの挙動

STPG410 炭素鋼パイプ 20A 及び 50A のアーク現象について磁場解析、パイプ内外面の遷移温度測定及び溶接経過時間ごとのアーク回転速度の測定から明確化された磁気駆動回転アークの挙動を以下に示す。

【写真ー2】に示すパイプ断面のように磁気アークは必ず磁束密度の最も小さいパイプ断面の下側で発生し、アーク発生から数秒間は【グラフー6】及び【グラフー9】に示すように比較的低速で回転する。

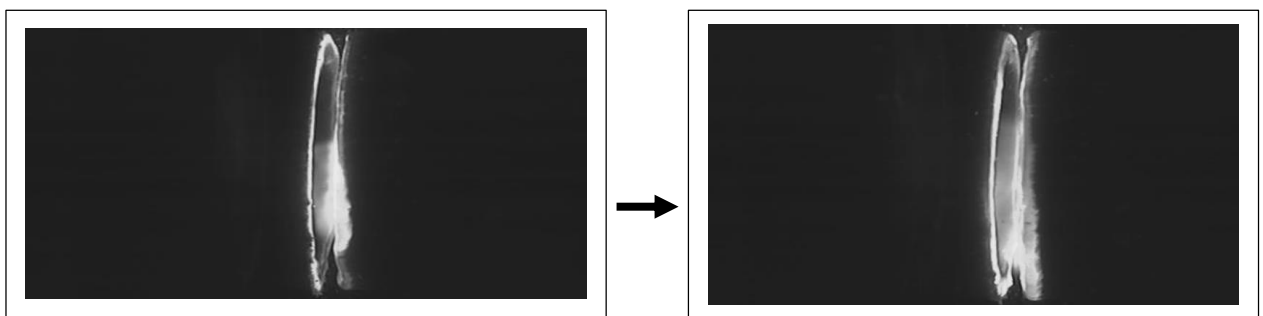


アークスタート 3 秒後のパイプ断面

アークスタート 7 秒後Mのパイプ断面

【写真-2】 磁気回転アークのアーク点の移行

その後【写真-3】の高速カメラ写真に示すとおり、パイプ断面の温度上昇に伴いアークは高速回転に移行しながらアーク点は一筆書きのような図式を描いてパイプ断面の外側へ向かって移行する。



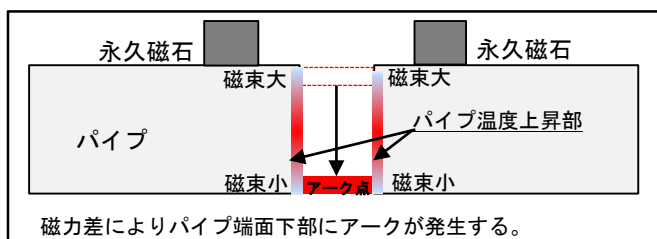
アークスタート 5 秒後

アークスタート 7 秒後

【写真-3】 高速度カメラで撮影したアーク点移行

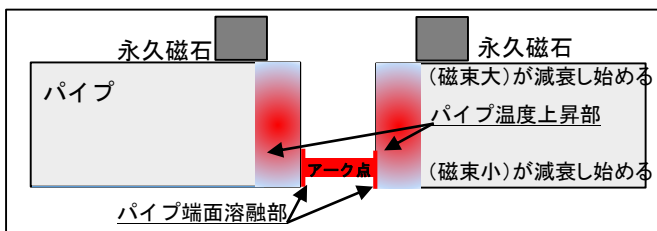
これらの可視化現象をふまえて STPG410 炭素鋼パイプ（磁性体）の磁気駆動回転アーク現象の原理を【図-10】に明確化する

【動作原理 1】アークスタート



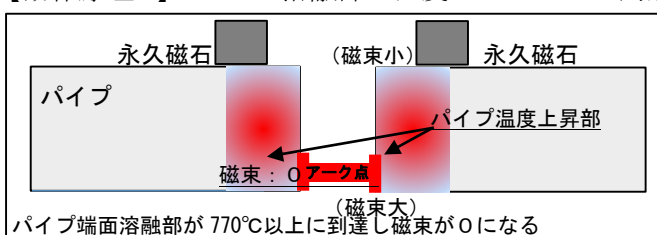
アークは磁力差によって磁力の大きいパイプ断面外側から磁力の小さいパイプ内側に押し下げられ、ここでアークが点弧する。

【動作原理 2】パイプ端面温度上昇による磁化率の低下



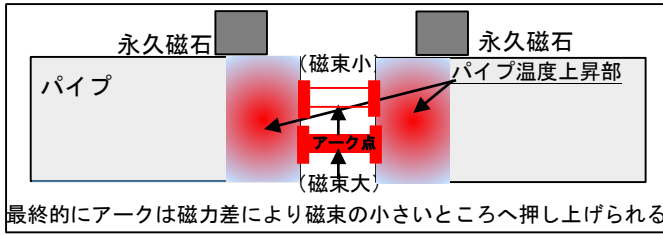
パイプ断面がアークにより加熱され温度上昇に伴い溶融されていき溶融部近傍の磁束（磁化率）が低下する。

【動作原理 3】溶融部の温度が 770℃に到達し磁力変化が発生



やがて溶融部の温度が 770℃に到達すると溶融部の磁性が消失し（磁束 0）、アーク点の下部の磁力が上昇しパイプの表面の磁力より大きくなる。

【動作原理 4】アークは磁束の大きい下部から磁束の小さいパイプ表面へ規則正しく回転しながら押し上げられる。



最終的にパイプ断面の温度上昇によって発生する磁気変態により、にアークは磁束密度の大きいパイプ下側から磁束密度の小さい外側へ向かって規則的に移動する。

【図-10】 STPG410 炭素鋼パイプ（磁性体）磁気駆動回転アーク現象の原理図

2-2-3. ステンレス鋼パイプ 20A アーク現象の明確化

□適用溶接条件

ステンレス鋼パイプ 20A の基本溶接条件を【表-4】に示す。

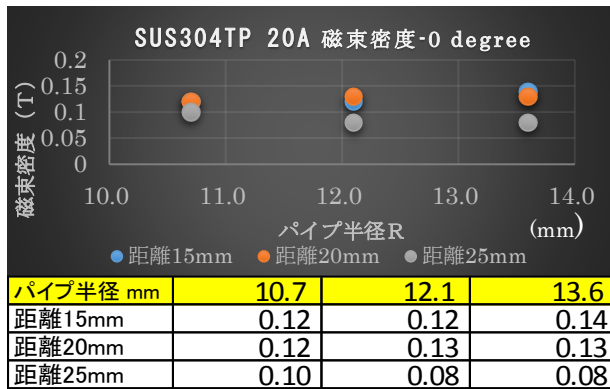
【表-4】 ステンレス鋼パイプ 20A の基本溶接条件

レベル	1	2	3	4	5	6	7
時間 (秒)	3.00	1.50	3.00	2.75	0.25	1.00	0
電流 (A)	300	150	145	140	600	600	0
荷重 (KN)	18.80	-	-				
位置 (mm)	-	1.80	1.80	1.50	1.80	-3.50	0
速度 (mm/秒)	-	200	200	200	200	50	0

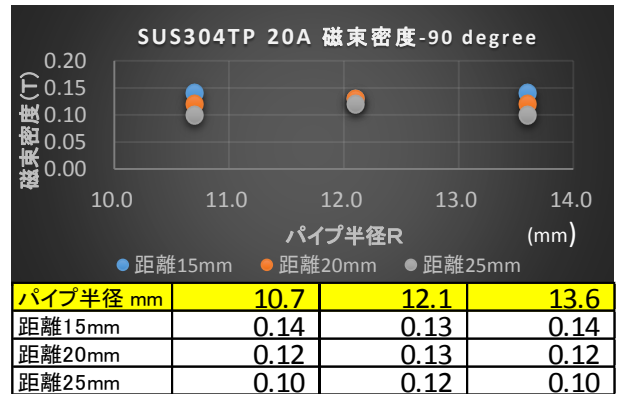
□磁束密度測定結果

パイプ断面円周角度 0、90、180、270 度の各位置における磁束密度を測定した結果を【グラフ-11】に示す。グラフに示すとおり N48M 日本製永久磁石の磁場解析でパイプ断面の磁束を測定した結果と同様の磁束回路が出力されている。

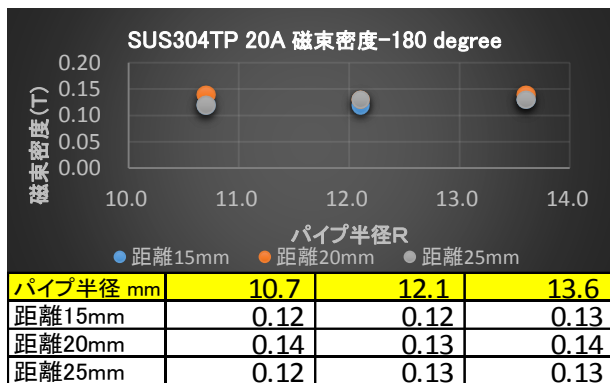
【円周角度 0 度】



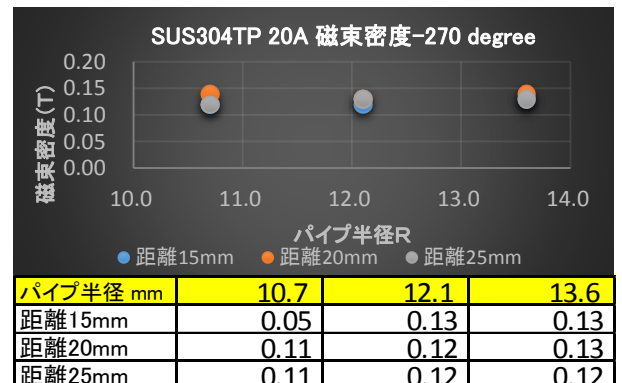
【円周角度 90 度】



【円周角度 180 度】



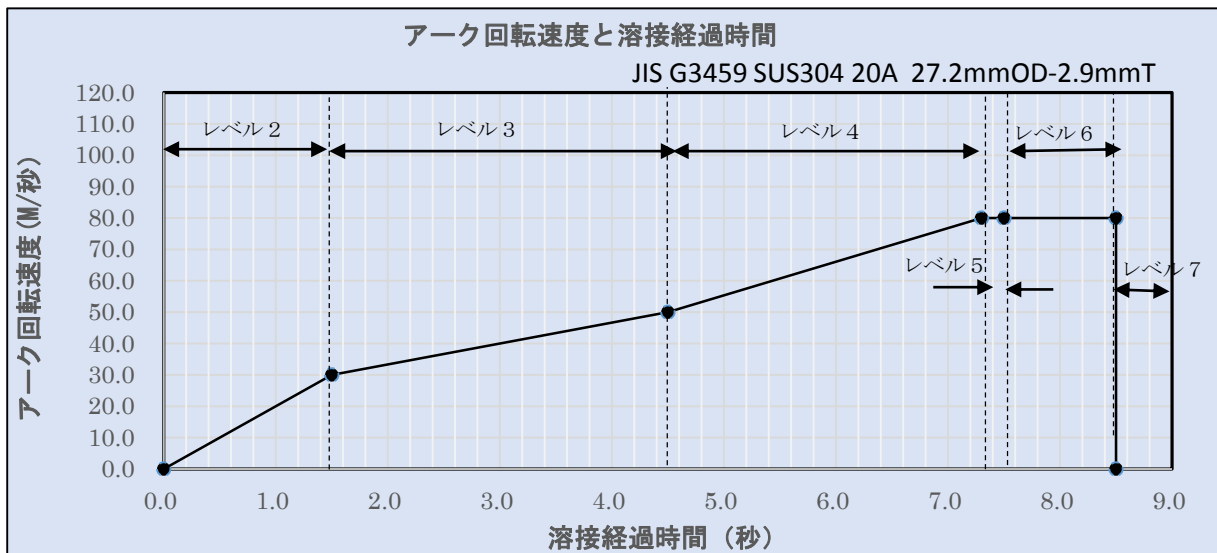
【円周角度 270 度】



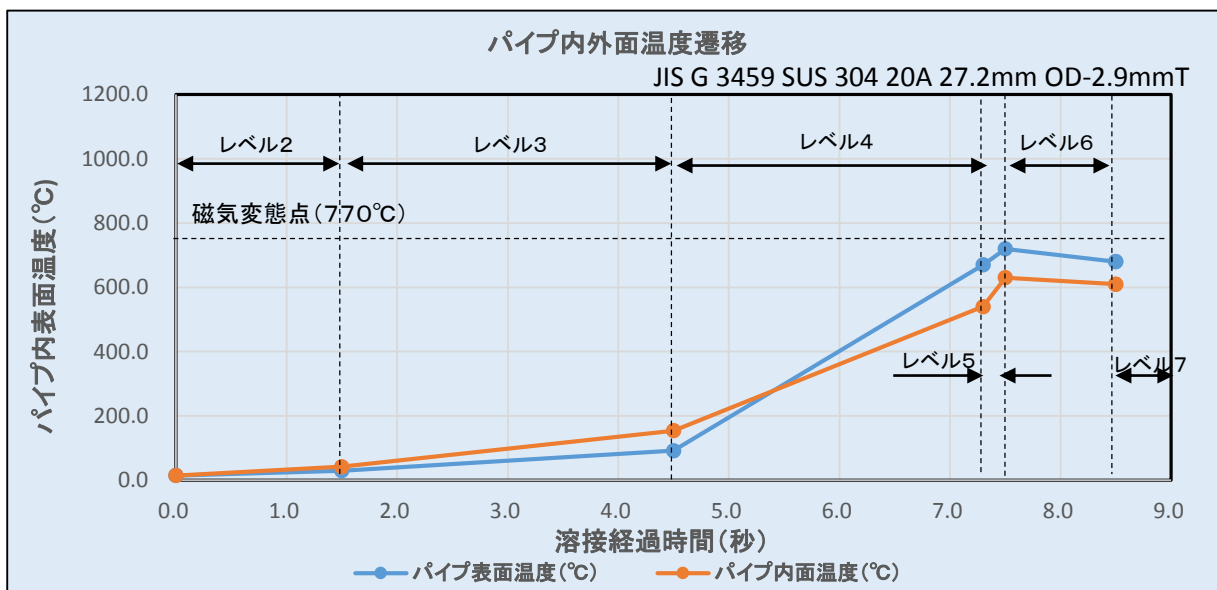
【グラフ-11】 ステンレス鋼パイプ 20A 磁束密度測定結果

□溶接中のアーク回転速度とパイプ内外面の遷移温度

溶接経過時間ごとのアーク回転速度を【グラフー12】、その時のパイプ内外面の遷移温度を【グラフー13】に示す。グラフに示すとおり磁気駆動回転アークはアークが発生してから約 3.0 秒間は 30~50m/秒の低速回転を維持しながら回転している。その後パイプの温度が約 200℃以上に上昇すると急に高速回転に移行し、この時のアーク回転速度は 80m/秒に到達する。



【グラフー12】 ステンレス鋼パイプ 20A アーク回転速度と溶接経過時間

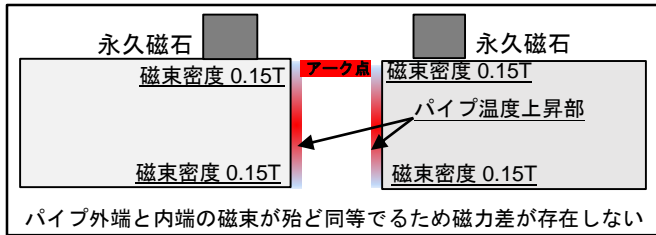


【グラフー13】 ステンレス鋼パイプ 20A 溶接中のパイプ内外面遷移温度

□ステンレス鋼パイプ（非磁性体材料）を使用した磁気駆動回転アークの挙動

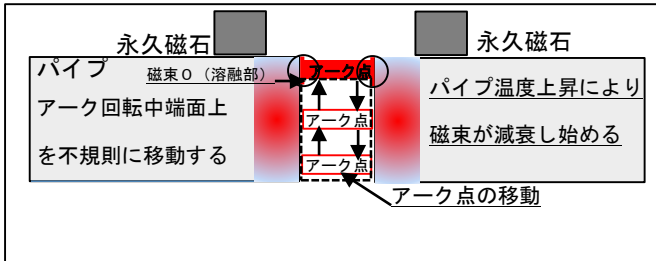
非磁性体であるステンレス鋼パイプの磁気駆動回転アークの挙動を【図ー11】に示す。磁気アークは必ず磁束密度の大きいパイプ断面の外側で発生する。アーク発生から数秒間は【グラフー12】に示すとおり比較的低速で回転し、溶接時間の経過とともにパイプ断面の温度上昇に伴いアークの回転速度が上昇する。回転中の磁気駆動アークはパイプの端面の不特定の位置を求めて回転し、規則正しい回転軌跡を描くことができないためパイプ端面を均一に溶融することはできない。

【動作原理 1】 アークスタート



パイプ端面の外端と内端の磁束密度の差が存在しないため磁気アークは永久磁石に最も近いパイプ断面の外側に発生する。

【動作原理 2】 不規則な回転の開始



アーク点近傍のパイプ断面溶融部は磁束が 0 になるが、パイプ断面の内側と外側に磁束密度の差が存在しないため磁気の吹上効果 (アークブロー) による規則的なアークの回転軌跡は得られない。

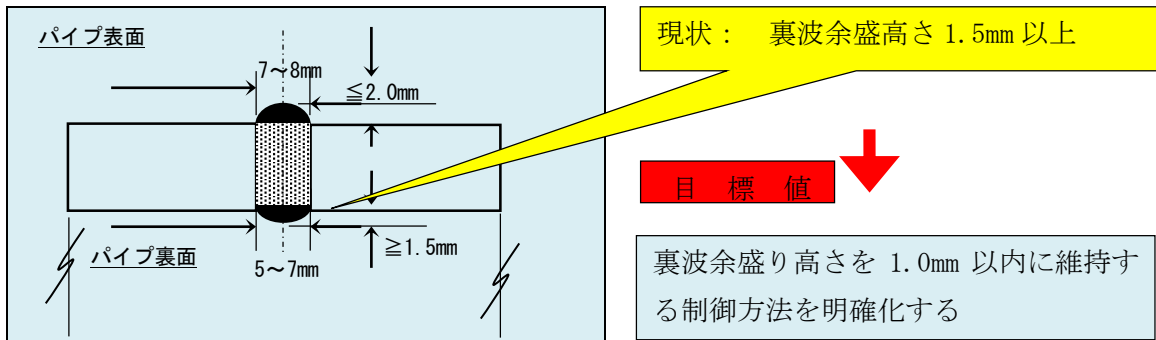
【図-11】 ステンレス鋼パイプ (磁性体) 磁気駆動回転アーク現象の原理図

2-3. 溶接条件の最適化と裏波形状制御方法の明確化

磁気駆動回転アーク現象を利用した溶接条件を最適化するために裏波形状の制御方法について検証した結果を以下に示す。

□溶接条件最適化数値目標

溶接条件を最適化する裏波形状の目標値を【図-12】に示す。



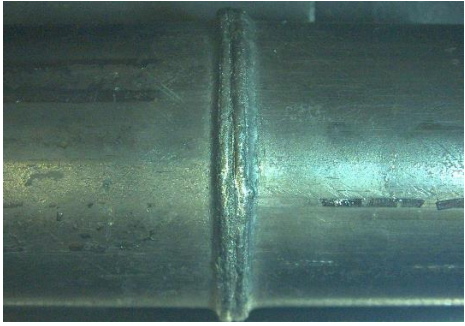
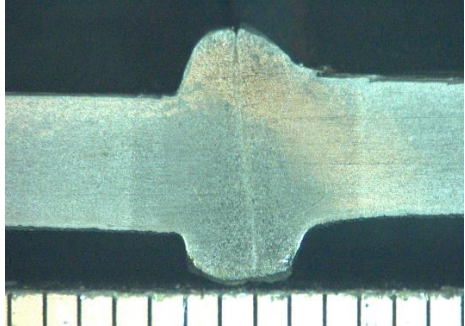
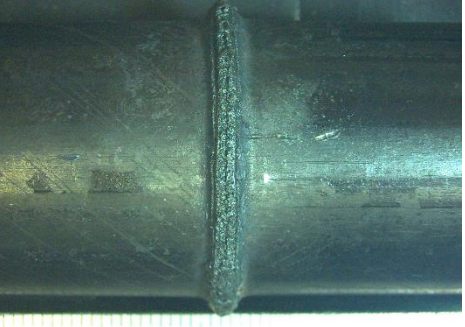
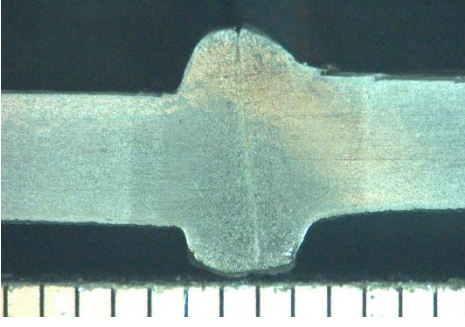
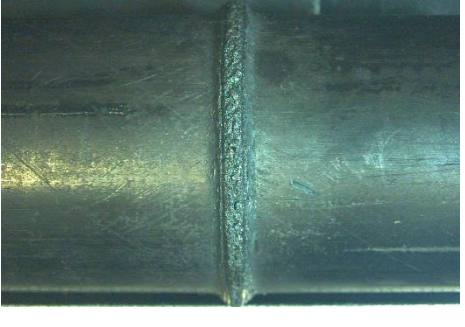
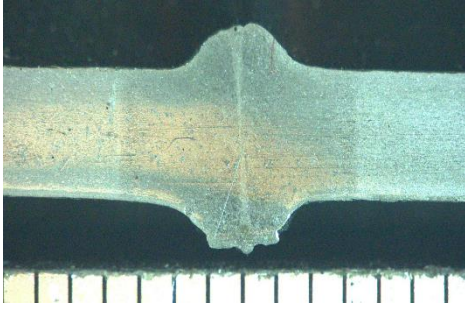
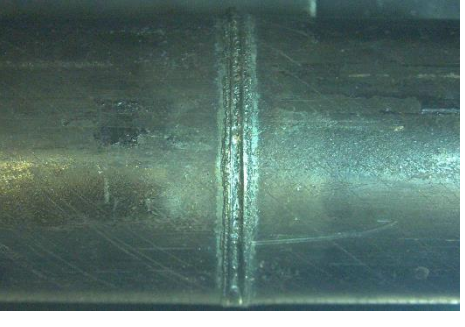
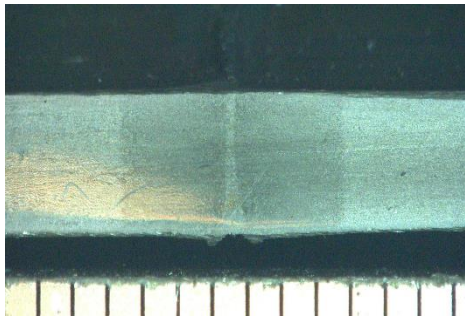
【図-12】 裏波形状の目標値

□裏波形状制御プロセス

溶接条件を最適化することを目的として裏波余盛り高さの制御方法について検証した。検証は STPG410 炭素鋼パイプを使用し、圧接荷重を変化させた時の裏波余盛り高さについて測定した。【表-5】に溶接条件を示し、圧接荷重を変化させたビード外観と断面マクロを【写真-4】に示す。

【表-5】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A 溶接条件

レベル	1	2	3	4	5	6	7
時間 (秒)	3.00	1.50	3.00	2.75	0.25	1.00	2.00
電流 (A)	300	150	145	140	600	600	1400
荷重 (KN)	18.80	-	-				
位置 (mm)	-	1.80	1.80	1.50	1.80	-3.50	-3.50
速度 (mm/秒)	-	200	200	200	200	200	100

<p>圧接荷重</p> <p>16.8KN</p>	 <p>ビード幅：1.8mm</p>	 <p>余盛高さ：1.5mm</p>
<p>圧接荷重</p> <p>18.8KN</p>	 <p>ビード幅：1.8mm</p>	 <p>余盛高さ：1.5mm</p>
<p>圧接荷重</p> <p>20.8KN</p>	 <p>ビード幅：1.8mm</p>	 <p>余盛高さ：1.5mm</p>
<p>圧接荷重</p> <p>22.8KN</p>	 <p>ビード幅：1.8mm</p>	 <p>余盛高さ：1.5mm</p>

【写真-4】 STPG410 炭素鋼パイプ 20A 圧接荷重を変化させたビード外観と余盛高さ

【写真-4】に示すとおり圧接荷重を調整することで裏波余盛高さが制御されることを確認した。磁気駆動回転アーク溶接は溶接電流、磁束強度、アーク回転速度及び圧接荷重をモニタリングし、プロセス管理することで溶接条件の最適化を可能とすることを確認した。

2-4. 溶接品質の明確化

開発した高能率自動円周溶接装置で作成した溶接継手について日本工業規格「JIS Z 3143 突合せ圧接溶接継手の試験方法」に準拠した試験を実施し溶接部の品質を確認した。以下に STPG410 炭素鋼パイプ 20A 及び 50A について品質評価試験の結果を示す。いずれの試験においても溶接継手の品質に異常な欠陥は認められなかった。

□評価溶接継手サンプル 【STPG 410 炭素鋼パイプ 20A】

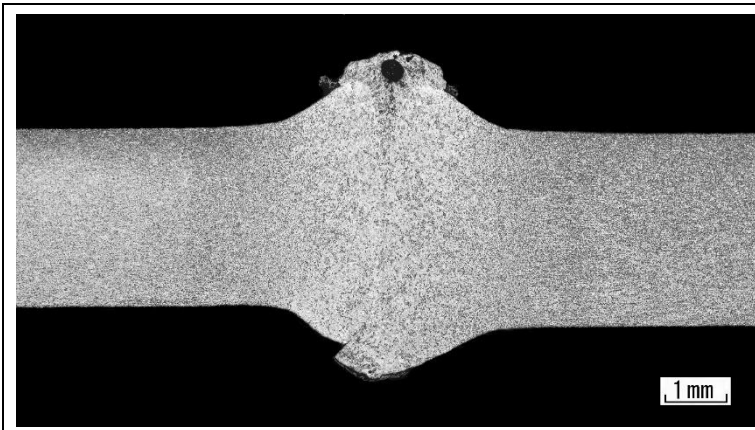
【引張試験】試験片形状 JISZ3121-2 号試験片

試験	試験片寸法		引張試験					試験結果
	径×幅 (mm)	断面積 (mm ²)	荷重 (KN)	降伏点 (N/mm ²)	荷重 (KN)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置	
(規格)				≥215		≥410		
T 1	OD =27.2 T =2.9	221.4	87.2	394	110.0	497	母材	良好
T 2	OD =27.2 T =2.9	221.4	87.2	389	110.8	500	母材	良好

【曲げ試験】試験片形状 JISZ3122-管状試験

試験	試験片寸法 (mm)	曲げ試験				試験結果
		曲げの種類	曲げ角度 (°)	内側半径 (mm)	結果	
(規格)					曲げた表面に割れ、キズ等の欠陥がないこと	
F 1	2.9×10.0	表曲げ	180	5	欠陥無し 	良好
F 2	2.9×10.0	表曲げ	180	5	欠陥無し 	良好
B 1	2.9×10.0	裏曲げ	180	5	欠陥無し 	良好
B 2	2.9×10.0	裏曲げ	180	5	欠陥無し 	良好

【マクロ試験】 判定基準：溶着金属にブローホール、溶け込み不良等の欠陥及び溶着金属と母材間に融合不良等がない事



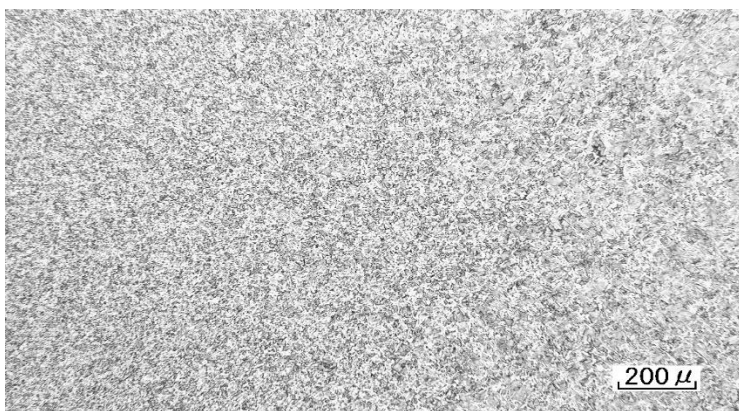
割れ	無し
アンダーカット	無し
溶け込み不良	無し
融合不良	無し
ブローホール	無し

【ミクロ試験】 判定基準：溶着金属及び熱影響部に異常な介在物及び微細な割れ等の欠陥がない事



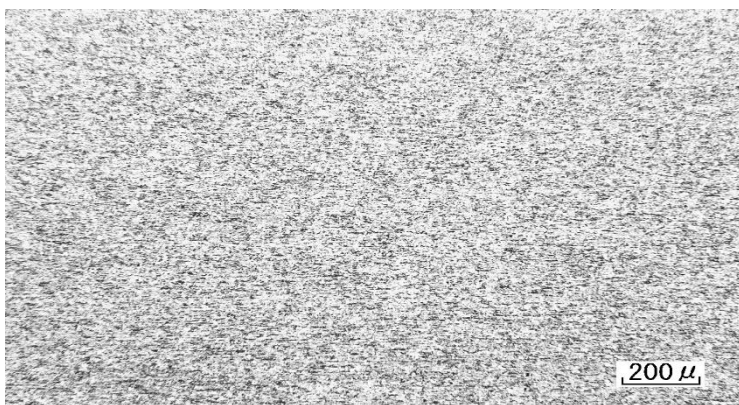
撮影位置：溶接部

試験結果：良好



撮影位置：熱影響部

試験結果：良好

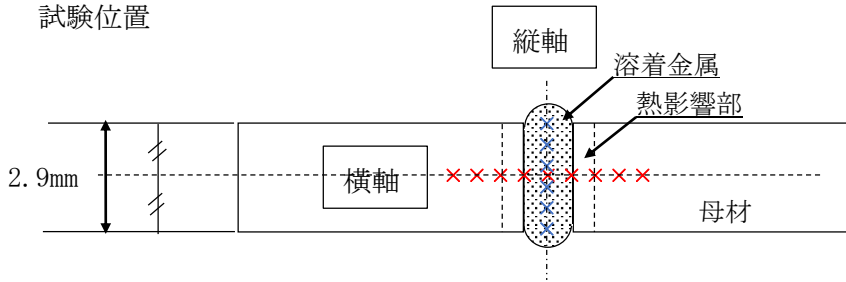


撮影位置：母材部

試験結果：良好

【硬さ試験】 判定基準：Hv ≤ 350

試験位置



試験方法.....ビッカース硬度試験

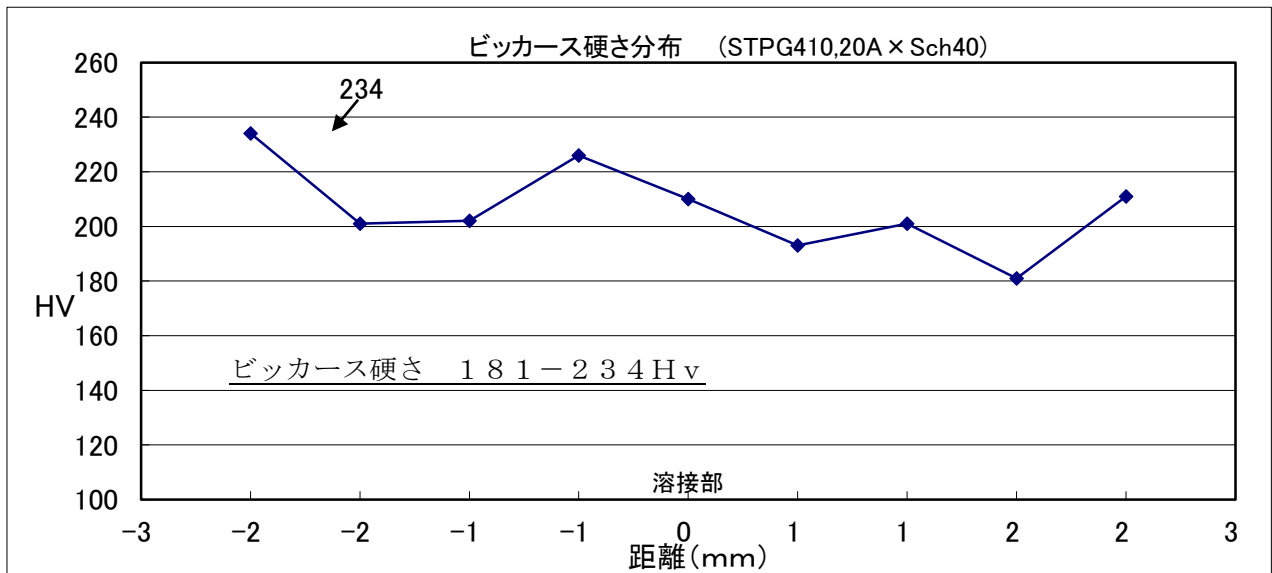
試験荷重.....1 kgf

測定位置.....縦軸方向（溶着金属の中心位置）

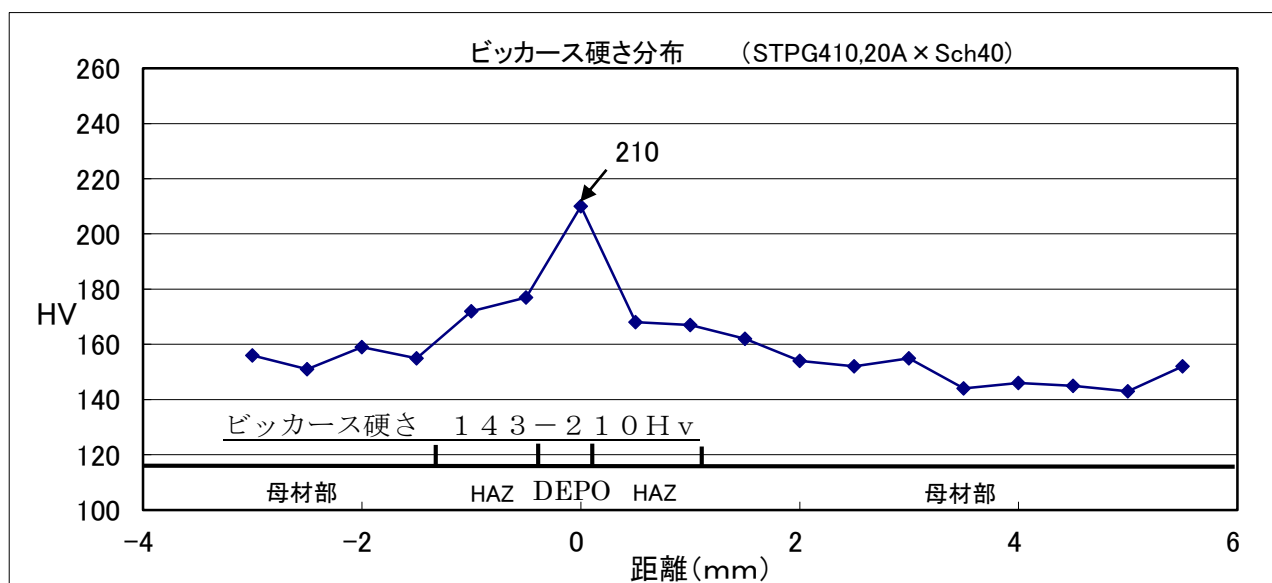
横軸方向（板厚の中心位置）

測定ピッチ.....0.5mm（溶着金属，熱影響部，母材）


(縦軸方向測定結果)



(横軸方向測定結果)



【成分分析試験】


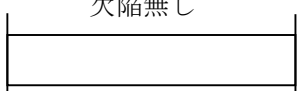
INSPECTION & TESTING REPORT												
試験検査報告書												
CHEMICAL ANALYSIS (分析試験)			Customer (顧客名)			日本溶接技術センター 殿			Verified by (立会検査員)		DATE(日付)	
Certified by (実施者)		椎山健治	Testing Material (試験材)		STPG410圧接継手溶接金属 (20A)			—		2014/12/5		
No. of Specimen (試料記号)	Chemical Composition						化学成分 (%)					
	C	Si	Mn	P	S							
20A	0.18	0.01	0.47	0.019	0.006							
以下余白												
Remarks (特記)						NS-WELDX CO.,LTD 株式会社NSウェルデックス 7-6-1 Higashi-Narashino Narashino-City, Chiba, Japan 千葉県習志野市東習志野7-6-1 TEL 047-493-2121 FAX 047-493-3400						
(1) 分析試料:パイプ圧接継手の溶接部より採取(切粉試料)												
(2) 分析方法: JIS G 1258 鉄及び鋼-誘導結合プラズマ発光分光分析方法												

□評価試験サンプル 【STPG 410 炭素鋼パイプ 50A】

【引張試験】 試験片形状 JISZ3121-3A 号試験片

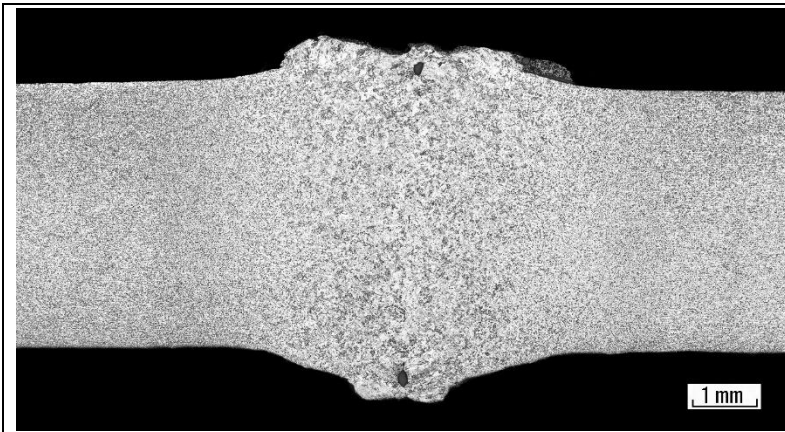
試験	試験片寸法		引張試験					試験結果
	厚×幅 (mm)	断面積 (mm ²)	荷重 (KN)	降伏点 (N/mm ²)	荷重 (KN)	引張強さ (N/mm ²)	破断位置	
(規格)				≥215		≥410		
T 1	4.5×20.0	90.0	32.5	361	41.8	464	母材	良好
T 2	4.5×20.0	90.0	32.5	350	44.0	489	溶接部	良好

【曲げ試験】 試験片形状 JISZ3122-管状試験

試験	試験片寸法 (mm)	曲げ試験			結果	試験結果
		曲げの種類	曲げ角度 (°)	内側半径 (mm)		
(規格)					曲げた表面に割れ、キズ等の欠陥がないこと	
F 1	4.6×10.0	表曲げ	180	9	欠陥無し 	良好
F 2	4.6×10.0	表曲げ	180	9	欠陥無し 	良好

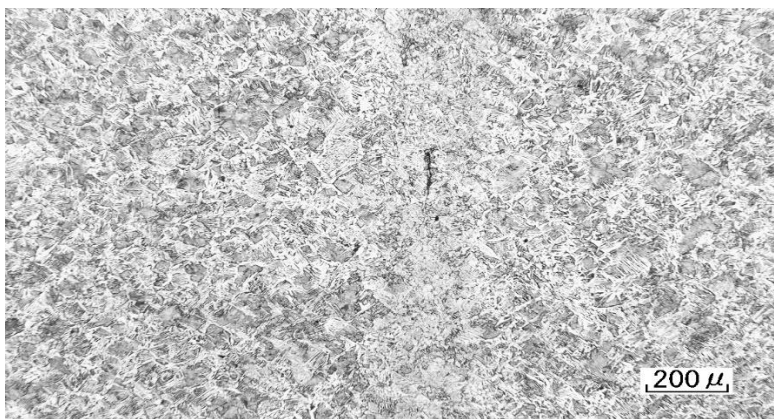
B 1	4.6×10.0	裏曲げ	180	9	欠陥無し	良 好
B 2	4.6×10.0	裏曲げ	180	9	欠陥無し	良 好

【マクロ試験】 判定基準：溶着金属にブローホール、溶け込み不良等の欠陥及び溶着金属と母材間に融合不良等がない事



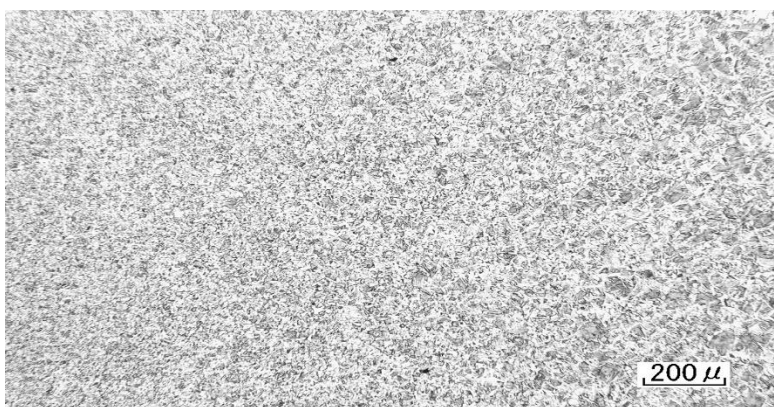
割れ _____ 無し
 アンダーカット _____ 無し
 溶け込み不良 _____ 無し
 融合不良 _____ 無し
 ブローホール _____ 無し

【ミクロ試験】 判定基準：溶着金属及び熱影響部に異常な介在物及び微細な割れ等の欠陥がない事



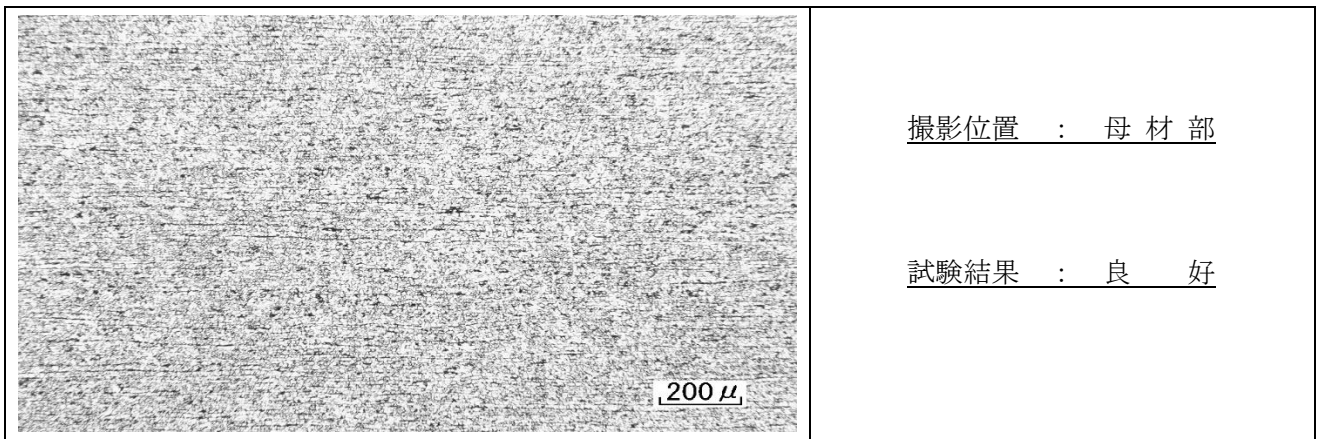
撮影位置： 溶接部

試験結果： 良 好



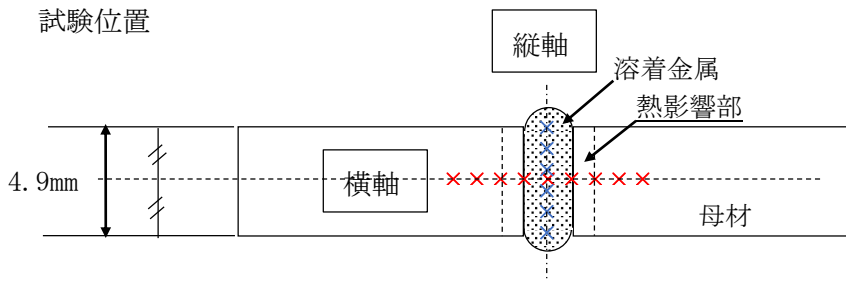
撮影位置： 熱影響部

試験結果： 良 好



【硬さ試験】 判定基準 : $Hv \leq 350$

試験位置



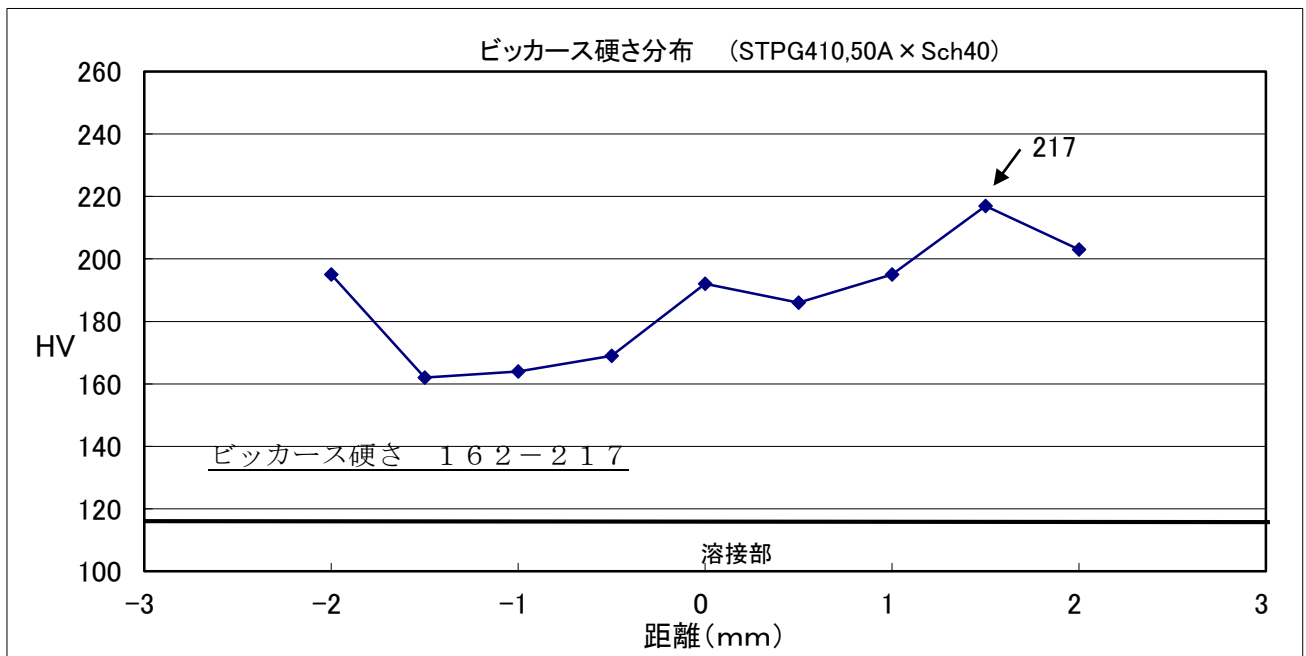
試験方法.....ビッカース硬度試験

試験荷重.....1kgf

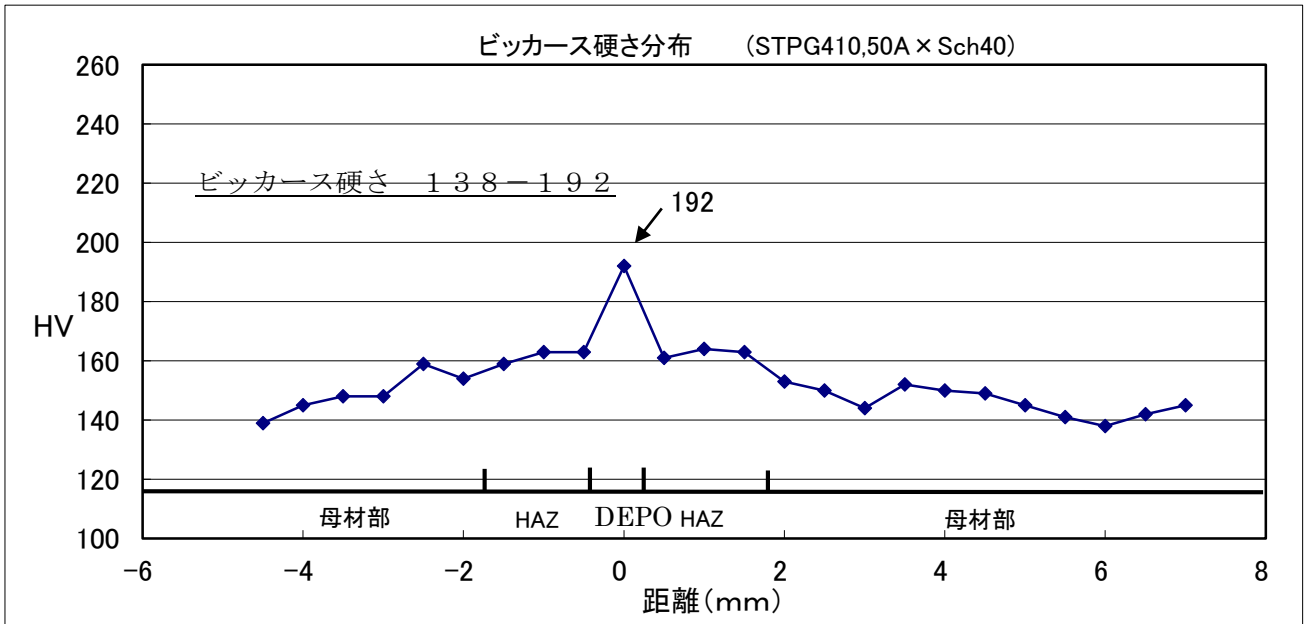
測定位置.....縦軸方向 (溶着金属の中心位置)
横軸方向 (板厚の中心位置)

測定ピッチ.....0.5mm (溶着金属, 熱影響部, 母材)

(縦軸方向測定結果)



(横軸方向測定結果)



【成分分析試験】

INSPECTION & TESTING REPORT 試験検査報告書											
CHEMICAL ANALYSIS (分析試験)		Customer (顧客名)		日本溶接技術センター 殿				Verified by (立会検査員)		DATE(日付)	
Certified by (実施者)		Testing Material (試験材)		STPG410圧接継手溶接金属 (50A)				—		2014/12/5	
No. of Specimen (試料記号)		Chemical Composition 化学成分 (%)									
		C	Si	Mn	P	S					
50A		0.18	0.01	0.45	0.018	0.004					
以下余白											
Remarks (特記) (1) 分析試料;パイプ圧接継手の溶接部より採取(切粉試料) (2) 分析方法;JIS G 1258 鉄及び鋼-誘導結合プラズマ発光分光分析方法								NS-WELDX CO.,LTD 株式会社NSウェルデックス 7-6-1 Higashi-Narashino Narashino-City, Chiba, Japan 千葉県習志野市東習志野7-6-1 TEL 047-493-2121 FAX 047-493-3100			

2-5. 事業化計画

2-5-1. 事業化の検討

固定管溶接方法は TIG、MAG、フラッシュバット、摩擦圧接溶接等の方法があるが、磁気駆動回転アーク溶接法の特徴はその生産性がずば抜けていることにあり求められる品質にもよるがやはり大量生産を求める用途に絞ることを考えている。現在調査している用途は自動車の駆動シャフト、建設機械の油圧配管、空調・下水配管、融雪配管である亜鉛メッキ鋼管の用途に向いていると考える。建設機械の油圧配管は現在開先加工をして TIG 溶接で 1~4 パスで溶接しており生産性が低くて困っているが、裏波の高さについては 0.8mm 以下を要求する。本研究でこの要求を満足させられるかがキーポイントになる。亜鉛メッキ鋼管としてはスプリンクラー、下水管、ダクト、融雪管等があり、従来の方法で溶接すると作業者の健康に多大な影響があり無人化したいと考えている。但しこの対象顧客は中小企業であり設備投資力が心配である。今後、溶接品質が向上すれば火力発電用炭素鋼管の溶接も対象にすることが可能であると考えている。そのためには引き続き装置の改善を進める必要がある。

2-5-2. 新技術の特許出願と論文投稿

最終的には永久磁石の種類を問わず、適正アークの回転数 (R.P.M) とそれを実現する磁力強度、その磁力強度を発生させるための永久磁石形状、磁石配列について平成 27 年 2 月に特許を申請した。また溶接協会誌、溶接学会秋季大会等に論文を投稿し、開発した新技術をアピールする予定にしている。

2-5-3. 売上見込み

まず自動車メーカーに溶接サンプルを見せ、興味を持ったところが試験材を持ちこみ、溶接品質評価試験体を作成し、機械試験から寿命試験などをクリアさせて初めて装置見積りが始まる。少なくともこの評価試験だけで優に 1 年は最低かかり、他の用途も同様である。平成 27 年度はこれら評価試験を実施し、平成 28 年度に各業界にテスト機を導入する。平成 29 年から本格的に事業化・製品化を開始し平成 31 年までの 3 年間で約 3 億円の売り上げを見込んでいる。

3. 全体総括

2011 年に発生した東日本大震災により我が国は大幅な電力不足と電力コストの上昇に曝され、もの造りの空洞化は想像以上に進んでいる。日本のもの造り産業のこれまでも、これからも喫緊の課題は高品質で安価な製品をこれまで以上に短納期で安定して供給することができる生産方式を構築することで国際競争力を強化することにある。しかしながら日本のもの造りの基盤技術である溶接は作業者の熟練度に左右される極めて信頼性の乏しい技術であり、特に溶接の中でも固定配管の裏波溶接は技術的にも難しく、低生産性に加えて熟練オペレータの養成、高額な設備費等の理由で生産方式の高度化に歯止めがかかっている現状である。これらの背景から製品製造ラインに導入を可能とし溶接工程を短時間で然も高品質で連続溶接を可能とする溶接装置の開発要請が強い。

本研究開発は前述した日本のもの造り産業のニーズに基づき、溶接生産性を従来比 10~50 倍に飛躍的に向上させることにより圧倒的な製造コストダウンと生産工程の高度化に寄与することを可能とする革新的溶接技術である磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置を研究開発することを目的とした。

この様な新溶接技術を採用した自動溶接装置が開発されると従来裏波溶接技術の弱点である低生産性が飛躍的に改善され、また熟練溶接技術者を必要としない誰でも安定した裏波溶接が溶接材

料、溶接ガスを必要としなくても簡単に短時間で完成させることが可能となり、圧倒的な生産方式の高度化が期待できる。

しかしながら、事業化に向けて磁気を利用したアークの回転現象を理論的に解析し、形成される裏波形状の制御方法及び溶接品質等について明確化することが必要となる。そこで本研究開発では日本製永久磁石を利用したアークが回転する現象の把握と適用する磁石の特性と配列及び磁力強度がアークに回転速度に与える影響等について研究を開始し、その結果が反映された自動円周溶接装置を開発した後に最終的に溶接継手品質の健全性を確認することで革新的な溶接生産プロセスを確立するべく研究開発に取り組んだ。

研究初年度は本溶接プロセスに必要とするアーク回転速度を満たす永久磁石の特性を磁場解析結果からシミュレーション化し、この結果に基づいて製作した永久磁石を組み込んだ高能率自動円周溶接装置を完成させた。

研究2年目に入り、初年度に完成させた自動円周溶接装置を利用して磁気駆動アーク現象について解析した結果、アークの回転挙動が理論的に明確化され、溶接条件を最適化することができた。最終的に溶接されたサンプルは日本工業規格「圧接溶接継手溶接品質評価試験」に準拠して評価試験を実施した結果、継手性能の健全性が証明された。

本研究開発で溶接条件が最適化された鋼管は炭素鋼管 20A(外径 27.2mm、板厚 2.9mm)～50A (外径 60.5mm、板厚 4.9mm) までの鋼管の溶接であるが、適用する永久磁石の磁気回路をより高い磁束密度で設計・製作することで 100A (外径 114.3mm、板厚 6.0mm) までの溶接条件の最適化は可能である。ステンレス鋼管の溶接については未だ完成はされていないが、非磁性材料に特化した永久磁石が設計できれば可能性があることまでは突き止めた。引き続き補完研究として継続して研究を推進していく予定にしている。

また、開発された磁気駆動回転アーク現象を利用した高能率自動円周溶接装置は顧客の要求仕様に合わせて溶接ヘッドの寸法、形状を自由に設計・製作することができるフレキシビリティを持っている。開発された技術は自動車、建設機械、都市ガス、造船、火力発電設備等適用用途は広いが、弊社が現在調査している用途は自動車の駆動シャフト、建設機械に油圧配管空調、下水配管、融雪配管で使用されている亜鉛メッキ配管の用途に向いていると考える。建設機械の油圧配管の溶接では裏波高さが 0.8mm 以下に規定されており、この要求が満足されられるかがキーポイントになる。その為には引き続き装置の改善を進めていく必要がある。

平成 25 年度から 26 年度の 2 年間の委託研究活動では定期的にこの事業に特化した社内会議を開催し、研究者の研究内容の共有化と研究推進に努めた。加えて外部アドバイザーを招集したプロジェクト会議を計 6 回開催し、研究の計画、内容、方法、結果及び評価等について直接指導を受け、研究開発を飛躍的に推進することができた。

特に大阪大学大学院工学研究科の望月正人教授には研究開発結果の理論的な解析と評価をご指導して頂き、事業化へ向けた多くの要素技術を構築することができたことについて謝辞を申し上げたい。