

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「2.5次元シミュレーション技術を活用した、耐圧・薄肉製品製作用
リングプロジェクション溶接の高度化技術開発」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 九州経済産業局

委託先 公益財団法人宮崎県産業振興機構

目次

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
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	4
1-4	当該研究開発の連絡窓口	4

第2章 本論

2-1	溶接歪極小化のための電極技術開発	5
2-1-1	最適受圧電極の設計	5
2-2	2.5次元シミュレーション技術の開発	6
2-2-1	材料特性データベースの構築	6
2-2-2	シミュレーション技術の開発	8
	① 2.5次元シミュレーションソフト開発	8
	② 実績のある小口径部品のシミュレーション解析	11
2-3	大口径・高耐圧気密配管部品の最適溶接条件の開発	15
2-3-1	大口径部品の最適溶接条件の開発	15
2-3-2	溶接状態の機械的強度評価	20
2-3-3	溶接状態の金属組織的評価	21

最終章 全体総括

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) 研究背景

油圧システムのシリンダーやポンプのフランジ等の溶接は、従来、アークガス溶接で行われているが、曲面同志の溶接や薄肉部品の溶接等は精度上から自動溶接は難しく、熟練技能者が施工しても熱による歪が大きくなり、所定の真円度、同軸度および平面度を確保するために、溶接後の熱歪の修正加工等が必要である。その結果、全加工時間が長くなるので、納期が長くなる。また焼きなましによる強度低下部分（溶接二番）が発生し易く、ステンレスに於いては鋭敏化が発生し耐食性が悪化するおそれがある。対策として電気抵抗による発熱を利用したリングプロジェクション溶接が期待されているが、最適溶接条件を試行錯誤で求めているので、開発時間が長く掛っており、実用化のためには開発時間を短縮する手段が求められている。



(アークガス溶接例)



(リングプロジェクション溶接例)

(2) 研究目的及び目標

(株)清水製作所宮崎が開発したリングプロジェクション溶接は部品同志をプレスで圧接した状態で高電流を流し、接触面の電気抵抗による発熱で接触部を瞬間に溶融させて一体化する方法で約0.3秒で溶接が完了するため、熱影響が極めて少なく、ステンレスに於いても鋭敏化は確認されない。また熟練技能者も必要無い。しかし、溶着現象が瞬間的なので目視で最適溶着条件を見つけることは難しい。そこで、溶着部の温度分布や変形等の経時変化を可視化し、溶接条件の最適化に利用するための、現場で利用できるシミュレーションの開発が目的である。

このシミュレーションを利用して、作業性を考慮した最適電極を開発し、各製品が目標の真円度、同軸度、平面度および引張強度、耐圧、耐久性を満足する最適溶接条件を見出す。

具体的な目標値を下記に示す。

1) 油圧シリンダー用チューブ<口径54mm>

目標真円度< $\phi 0.05\text{mm}$ >および同軸度<0.2>

目標引張強度：30 および300KN 目標トルク強度：125 および500N・m

目標耐圧：50MPa 目標耐久性：41MPa・10万回

2) 薄肉相フランジ< $\phi 96\text{mm}$ 、厚み3mm>

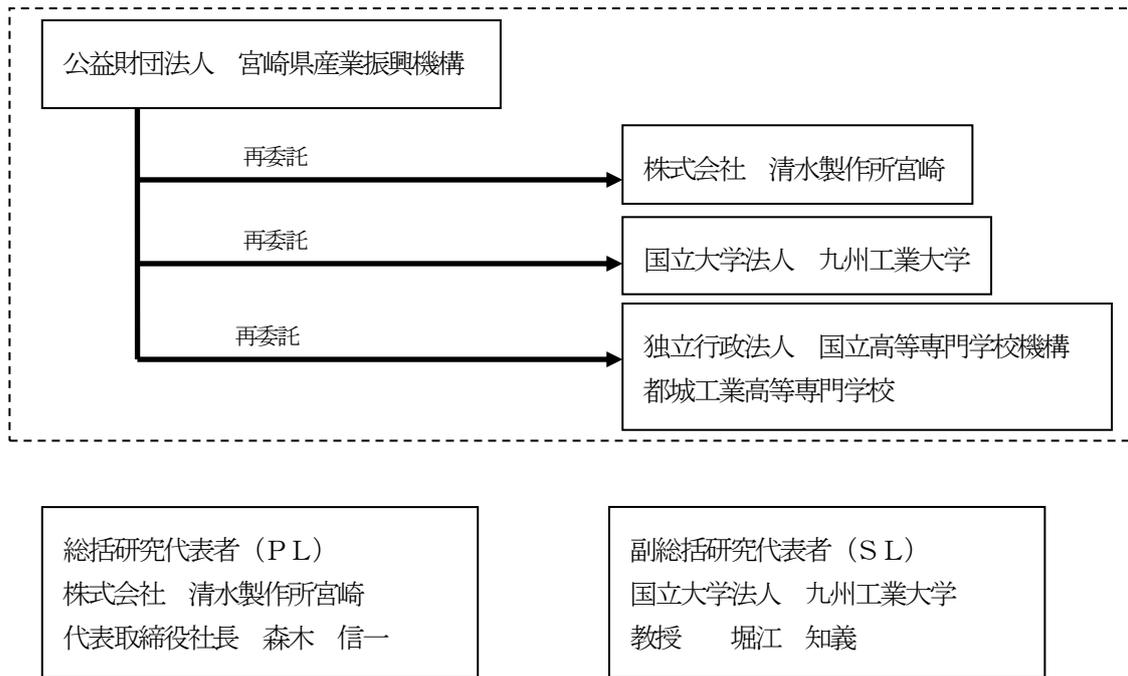
目標真円度< $\phi 0.15\text{mm}$ >および平面度<0.5>

目標引張強度：41KN

目標耐圧：1.75MPa 目標耐久性：0.9MPa・10万回

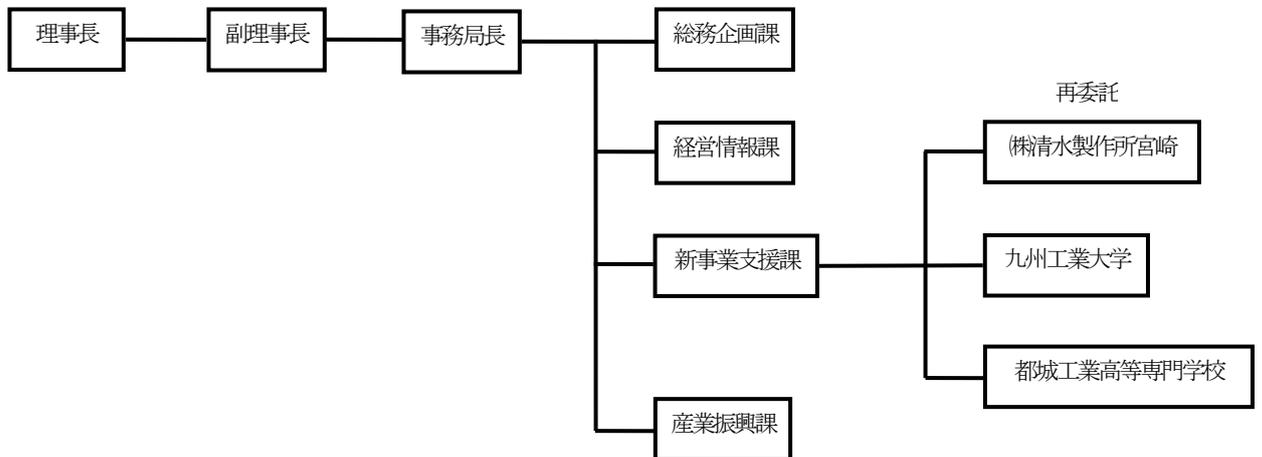
1-2 研究体制

(1) 研究組織 (全体)



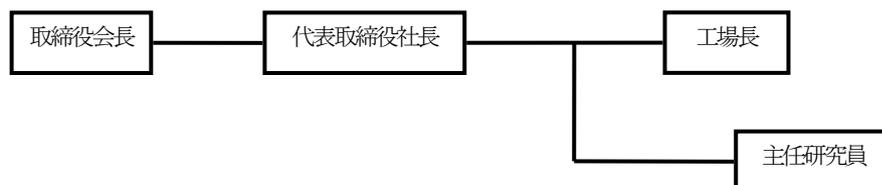
(2) 管理体制

① 事業管理機関 [公益財団法人 宮崎県産業振興機構]

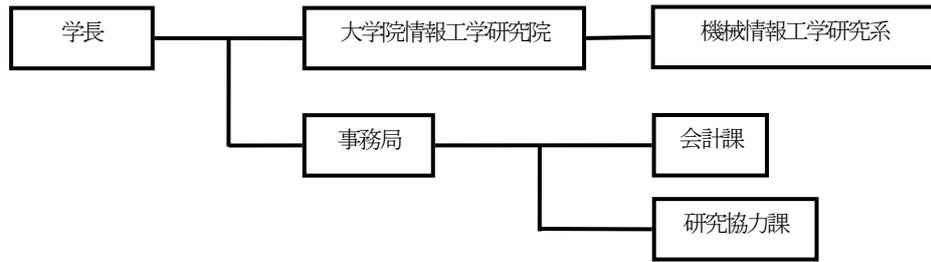


② (再委託先)

株式会社清水製作所宮崎

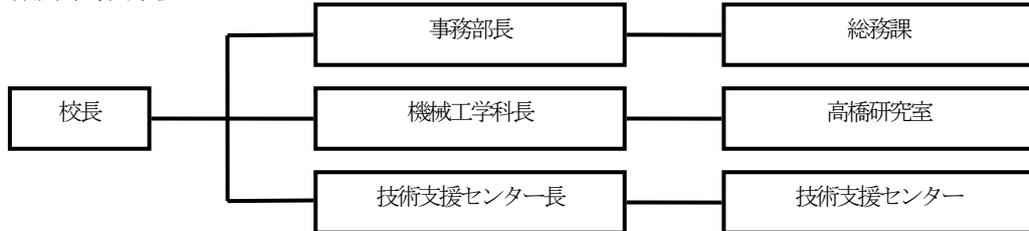


国立大学法人 九州工業大学



独立行政法人 国立高等専門学校機構

都城工業高等専門学校



③研究開発委員会委員

氏名	所属・役職	備考
清水 徹	株式会社清水製作所宮崎 取締役会長	(愛知県在住)
森木 信一	株式会社清水製作所宮崎 代表取締役社長	
北原 実	株式会社清水製作所宮崎 主任研究員	
堀江 知義	国立大学法人 九州工業大学 教授	
二保 知也	国立大学法人 九州工業大学 助教	
二尾 浩樹	国立大学法人 九州工業大学 技術専門職員	
山元 直行	独立行政法人 国立高等専門学校機構 都城工業高等専門学校 技術支援センター 技術専門職員	
高橋 明宏	独立行政法人 国立高等専門学校機構 都城工業高等専門学校 機械工学科准教授	
満留 芳文	公益財団法人 宮崎県産業振興機構 新事業支援課長	
谷迫 守男	公益財団法人 宮崎県産業振興機構 新事業支援課 主幹	
鹿嶋 晋	公益財団法人 宮崎県産業振興機構 新事業支援課 主幹	
日岡 一也	公益財団法人 宮崎県産業振興機構 新事業支援課 主任技師	
高橋 保雄	公益財団法人 宮崎県産業振興機構 プロジェクトディレクター	

1-3 成果概要

平成 24 年度に小口径フランジを用いて溶着時に溶着部が冷却する際に収縮して歪む量をキャンセルできる受圧電極の開発に成功し、この結果を用いて平成 25 年度には大口径フランジ用の電極を開発したが、作業性に問題があったことから平成 26 年度まで継続し、最適電極を開発した。

シミュレーションに必要な物性値については、平成 24 年度と平成 25 年度に研究実施機関での測定に加え、外部機関からもデータを入手した結果、データベースの構築に成功した。また、2.5 次元シミュレーションの開発は、平成 24 年度に 3 次元電流・熱伝導 2 連成解析ソフトの開発および構造解析ソフトとのデータ通信を行うためのインターフェイスを開発し、単純モデルの解析を行うことにより問題ないことを確認した。平成 25 年度には、このシミュレーションソフトを用いて、小口径フランジの溶着時のシミュレーション解析を行い、解析結果と現場のデータの表面温度および溶着部変形形状等が一致していることを確認し、実用的なシミュレーション技術の開発に成功した。

大口径部品の最適溶接条件の開発については、平成 26 年度に大口径フランジの接合部の開先形状の最適化をシミュレーション解析結果および溶着部断面観察結果を参考に開発し、目標の耐圧、耐久及び引張強度を満たすことを確認した。一方、大口径シリンダーチューブのチューブとソケットの溶接においては、目標の耐圧、耐久及び引張強度を満たすことを確認したが、チューブとチューブの溶接においては、目標の耐久性を満たすことができなかった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人宮崎県産業振興機構 新事業支援課 主任技師 日岡一也

TEL:0985-74-3850

FAX:0985-74-3950

E-mail:k-hioka@i-port.or.jp

第2章 本論

2-1 溶接歪極小化のための電極技術開発

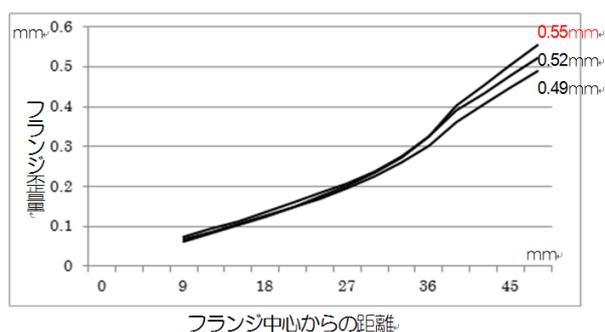
2-1-1 最適受圧電極の設計

①小口径フランジ用電極の開発

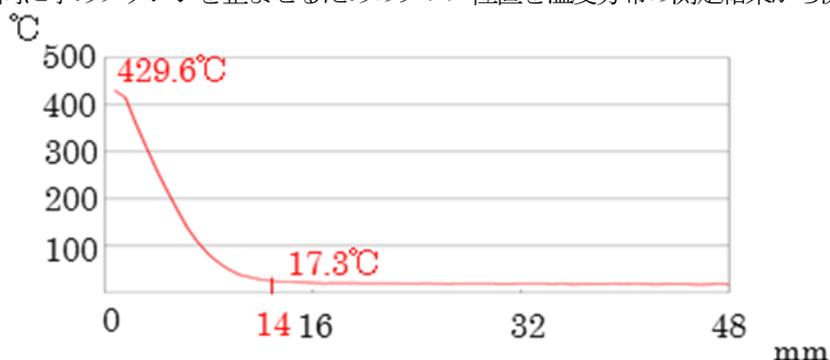
〈フランジ径：96mm フランジ厚み：3mm〉

溶接時に、溶着部が冷却する際に収縮して歪む量を見込んで、反対方向に予め歪ませておく構造の電極を開発した。

まず、従来の電極を用いて冷却時の歪み量を輪郭研形状測定装置（ミットヨ製）にて測定した。条件によっては、目標値を超えてしまうことが判った。



一方、反対方向に予めフランジを歪ませるためのプレス位置を温度分布の測定結果から決めた。



そこで、0.55mm変形させるために必要なプレス力を測定して歪修正型電極を試し溶接実験を行った結果、いずれの条件でも目標真円度〈 $\phi 0.15\text{mm}$ 〉および平面度〈0.5〉を満足することを確認した。

②大口径フランジ用電極の開発

〈フランジ径：96mm フランジ厚み：3mm ソケット内面テーパネジ加工〉

①の成果をベースに設計して溶着実験を行った結果、ソケットの末端部の変形が発生した。

色々な検討を行った結果、目標真円度〈 $\phi 0.15\text{mm}$ 〉および平面度〈0.5〉を満足することができた。

③油圧シリンダー用チューブ用電極の開発

できるだけ溶接部近くから電流が流れるような電極構造を開発した結果、目標の真円度〈 $\phi 0.05\text{mm}$ 〉および同軸度〈0.2〉を満足することができた。

2-2 2.5次元シミュレーション技術の開発

2-2-1 材料特性データベースの構築

今回用いた部品は、クロム銅（電極）、SUS304（部品A）および機械構造用炭素鋼（S25C）であった。シミュレーションに必要な材料特性データは、応力ひずみ線図、ヤング率・ポアソン比、線膨張係数、電気抵抗率、比熱、密度、潜熱類の温度特性、およびSUS304とSUS304、S25CとS25C、SUS304とクロム銅、S25Cとクロム銅の4ケースの組み合わせで温度および加圧力を変化させた時の接触電気抵抗値、および接触熱抵抗値が必要であり、これらの物性値は、研究実施機関にて測定したり、非営利一般財団法人ファインセラミックセンターで測定したデータおよび技術資料からの調査等により、シミュレーションに必要なデータバンクを構築することができた。

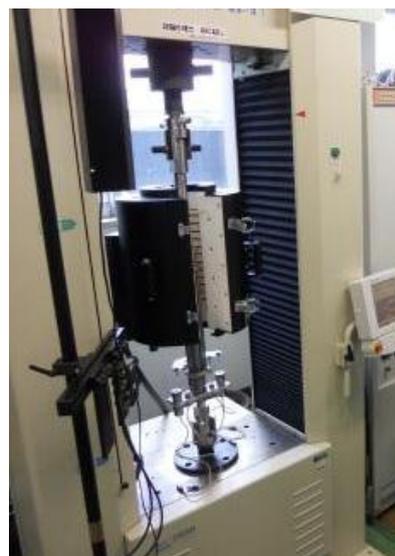
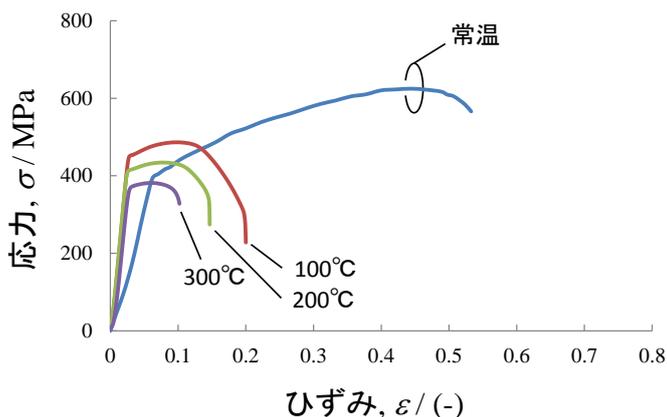
① 応力ひずみ線図、ヤング率・ポアソン比、線膨張係数、電気抵抗率、比熱、密度、潜熱類の温度特性

各種物性データの測定方法を以下の表に示す。

物性値	測定方法
応力ひずみ曲線	ブランクテストを採用した高精度圧縮試験法
密度	アルキメデス法
弾性率	動的共振法
ポアソン比	動的共振法
平均線膨張係数	Thermomechanical Analysis法
比熱	Differential Scanning Calorimetry法（特殊断熱型）
電気抵抗	四端子法（Ag端子を用いたサーマルキープ管理による測定）
融解潜熱	Drop Method

高温時の応力ひずみ線図は特殊加熱炉を用いて測定した。

例として、クロム銅の測定データを以下に示す。

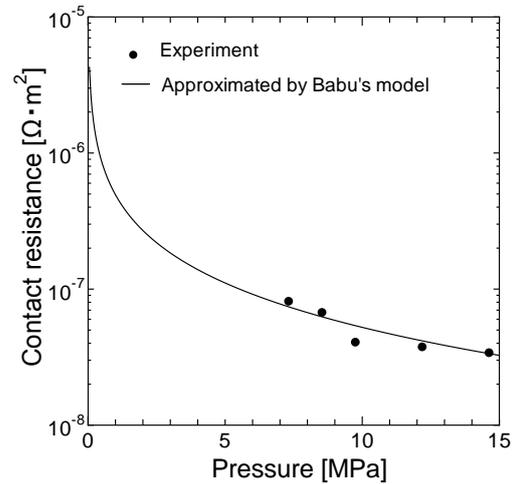
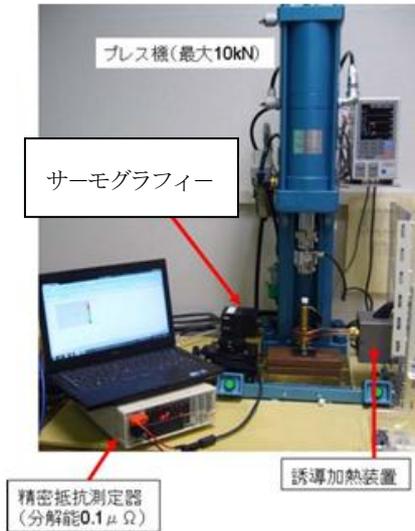


ヒートロス低減型高能率式特殊加熱炉

②接触電気抵抗値

SUS304 と SUS304、機械構造用炭素鋼と機械構造用炭素鋼、SUS304 とクロム銅、機械構造用炭素鋼とクロム銅の 4 ケースの組み合わせで、温度および加圧力を変化させた条件の接触電気抵抗を、加熱装置、サーモグラフィー、熱電対、プレス機および熱電対等より構成された下図の実験装置を用いて測定した。

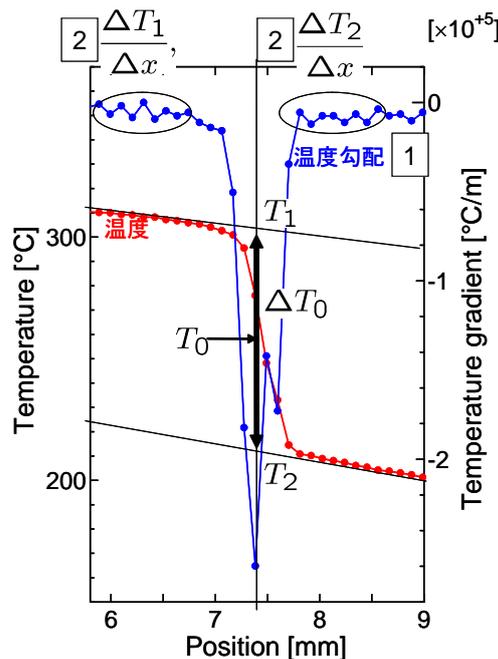
測定結果の一例として、SUS304/SUS304 間の接触電気抵抗値の接触圧力依存性を示す。



③接触熱抵抗値

SUS304 と SUS304、機械構造用炭素鋼と機械構造用炭素鋼、SUS304 とクロム銅、機械構造用炭素鋼とクロム銅の 4 ケースの組み合わせで、温度および加圧力を変化させた条件の接触電気抵抗を、加熱装置、サーモグラフィー、熱電対、プレス機および熱電対等より構成された実験装置を用いて測定した。

以下に接触熱抵抗値の導出手順を示す。



1. 温度測定結果から温度勾配
 2. 下試験片接触面および上試験片接触面の温度勾配

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta x}, \frac{\Delta T_2}{\Delta x}$$
 3. 接触面の温度勾配

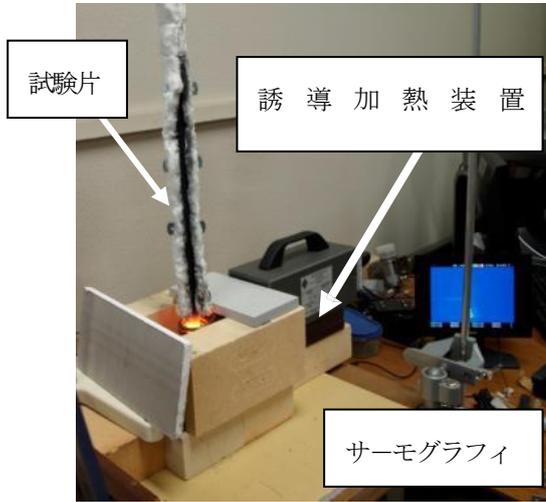
$$\frac{\Delta T_0}{\Delta x} = \frac{\frac{\Delta T_1}{\Delta x} + \frac{\Delta T_2}{\Delta x}}{2}$$
 4. 接触面の温度差 $\Delta T_0 = (T_1 - T_2)$
 5. 接触面温度

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2}$$
 6. 接触面温度の熱伝導率を熱伝導率測定結果から $\lambda(T_0)$
 7. 接触熱抵抗

$$R_C = \frac{\Delta T_0}{q} = \frac{\Delta T_0}{-\lambda(T_0) \frac{\Delta T_0}{\Delta x}}$$
- 熱伝導率 λ は本研究の測定値を使用

④熱伝導率

クロム銅、SUS304、機械構造用炭素鋼の熱伝導率を、誘導加熱装置およびサーモグラフィーより構成された下図の実験装置を用いて測定した。



以下に、熱伝導率の導出手順を示す。

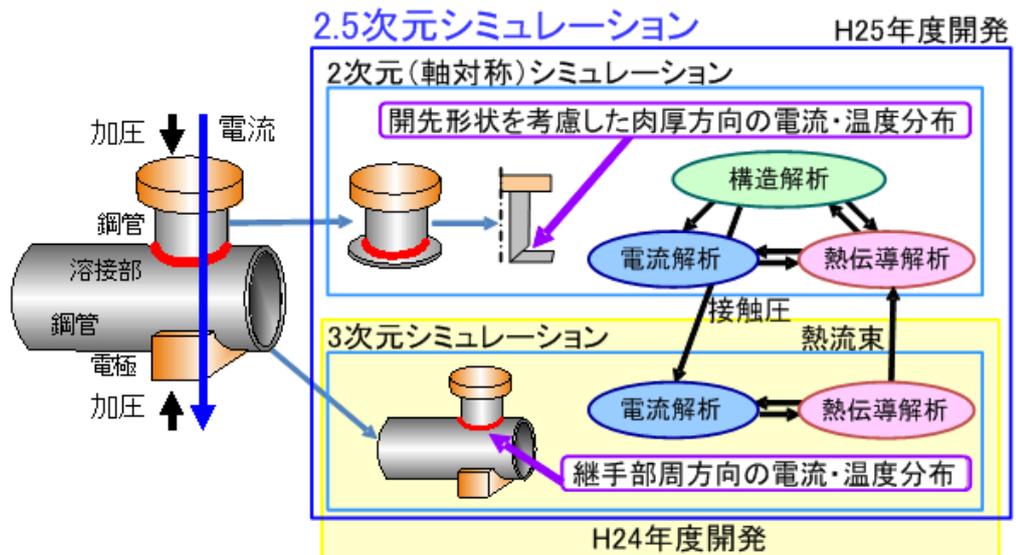
温度分布測定結果より位置 x 、時刻 t の温度 $T_{x,t}$ を求め、差分近似した熱伝導の支配方程式に代入して熱伝導率 λ を導出した。

$$\lambda \cong \frac{(\Delta x)^2}{\Delta t} \frac{T_{x,t+\Delta t} - T_{x,t-\Delta t}}{2(T_{x+\Delta x,t} - 2T_{x,t} + T_{x-\Delta x,t})} c_p \rho$$

2-2-2 シミュレーション技術の開発

① 2.5次元シミュレーションソフト開発

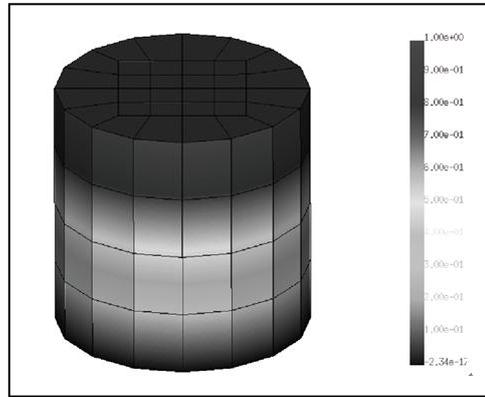
3次元シミュレーション結果に基づいて2次元軸対称シミュレーションの解析条件を変更する機能と、2次元シミュレーション結果に基づいて3次元シミュレーションの解析条件を変更する機能を追加するとともに、これら2次元シミュレーションと3次元シミュレーションを同時に実行する2.5次元シミュレーションソフトを開発した。



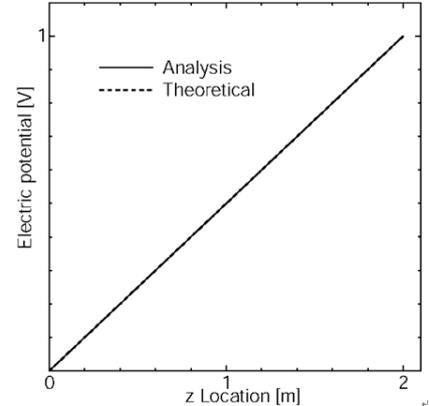
○3次元電流・熱伝導 2連成解析ソフトの開発

電流解析の有限要素式および熱伝導解析の有限要素式を用いて、電流解析で得られた電流密度を用いて計算したジュール発熱を熱伝導解析に考慮する一方、温度変化に伴う電気抵抗率の変化を電流解析に考慮する連成解析方法を開発した。

まず、3次元電流解析の妥当性について、単純モデルにて検討した。

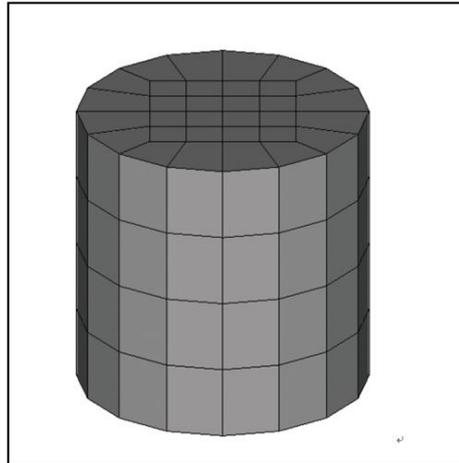


<静電ポテンシャル等高線図>

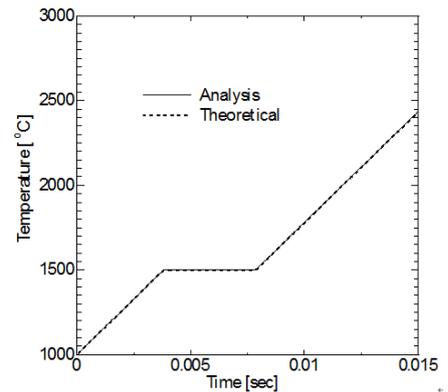


<静電ポテンシャル分布>

次に3次元熱伝導解析の妥当性について、単純モデルにて検討した。



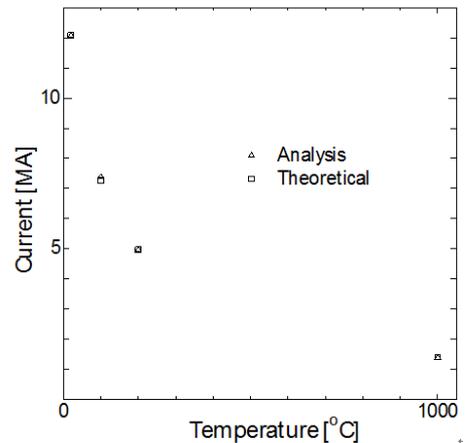
<温度分布図>



<温度時刻歴>

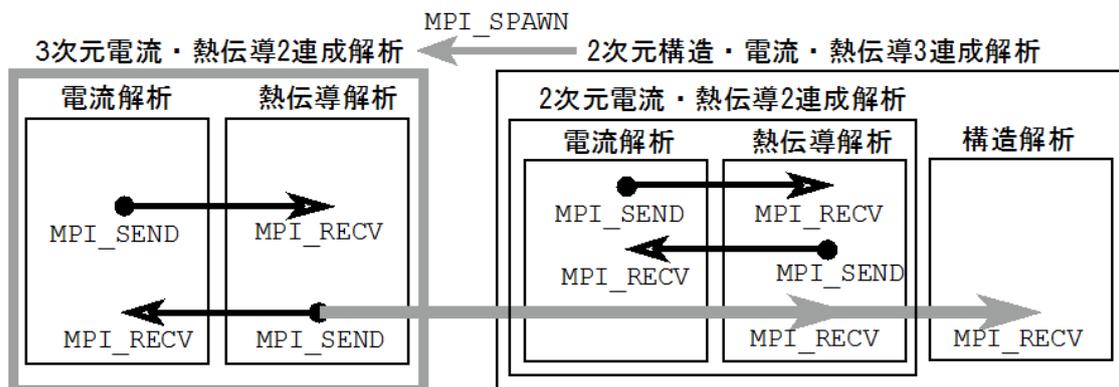
更に3次元電流・熱伝導連成解析の妥当性について、単純モデルにて検討した。

数値解析解と理論値は十分に一致していることがわかる。



<電流値の温度依存性>

○3次元電流・熱伝導2連成解析ソフトと構造解析ソフトがデータ通信を行うためのインターフェイス開発



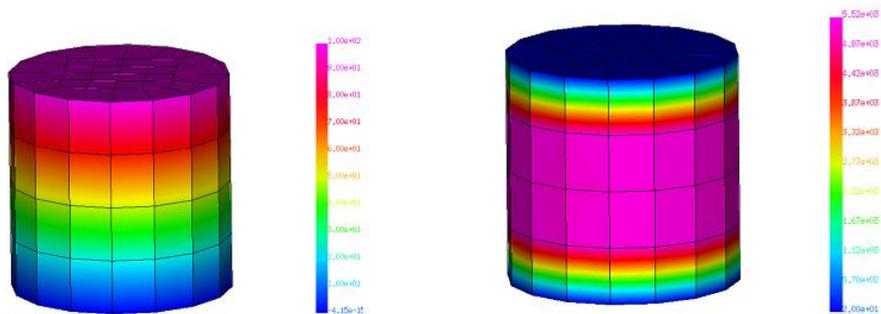
<通信インターフェイスの概要>

単純モデル（円柱問題）で検討した。

・動作確認

円柱に電流が流れていることを確認した。

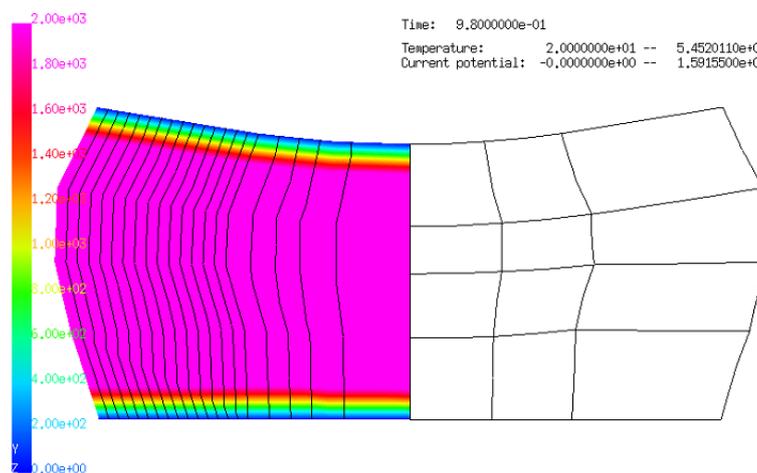
電流が流れることによって、円柱の温度が変化していることを確認した。



<静電ポテンシャル分布>

<温度分布>

さらに、温度が変化することによって、円柱が変形していることを確認した。



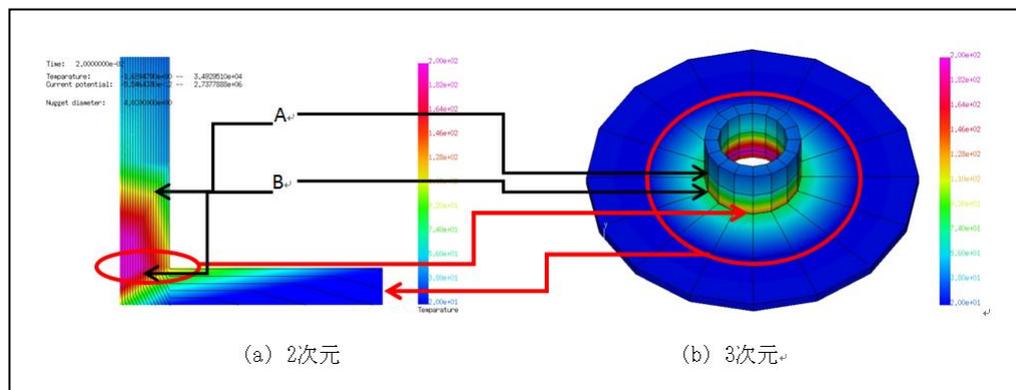
<3次元電流・熱伝導解析から得られた温度（左図）

を考慮した2次元構造解析の変位（右図）>

○完成型

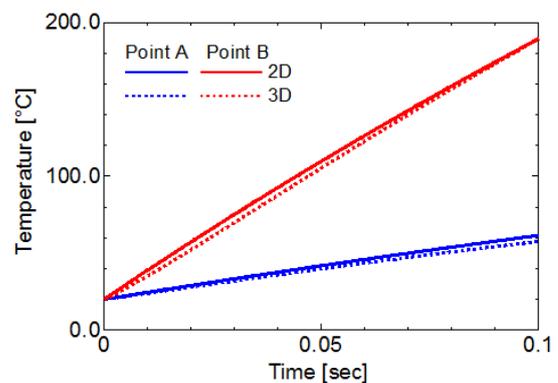
- 2次元シミュレーション：ヤング率、降伏応力、応力-ひずみ関係の温度依存性、電気抵抗率の温度依存性、接触電気抵抗の接触圧力および温度依存性、電気抵抗と電流によるジュール発熱、接触域変化に伴う熱伝導経路変化、熱伝導率および比熱の温度依存性、接触熱抵抗を考慮
- 3次元シミュレーション：電気抵抗率の温度依存性、電気抵抗と電流によるジュール発熱、熱伝導率および比熱の温度依存性を考慮
- 2.5次元シミュレーション
2次元シミュレーションソフトと3次元シミュレーションソフトを同時起動
2次元シミュレーションの接触電気抵抗によるジュール発熱を3次元シミュレーションに考慮
3次元シミュレーションの熱流束を2次元シミュレーションに考慮

<温度分布>



○温度による解析精度比較

2次元解析結果と3次元解析結果は良く一致している。



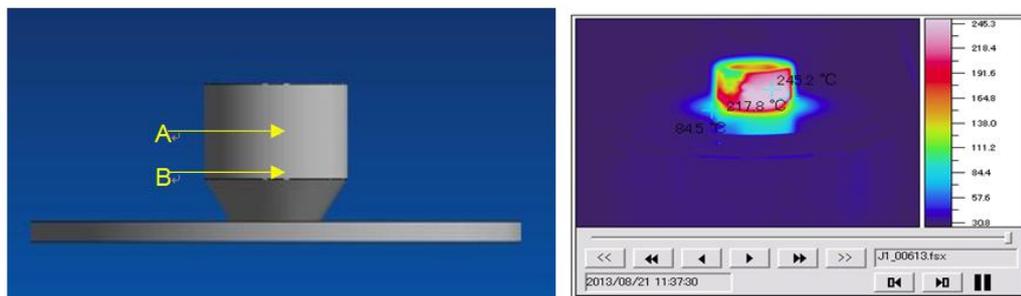
○解析時間：3次元シミュレーション 1438 sec に対し、2.5次元シミュレーション 204 se となり3次元解析と比較すると 86 %の解析時間を削減することができた。

② 実績のある小口径部品のシミュレーション解析

実績のある小口径フランジの部品を用いた代表的な条件での溶着実験のシミュレーション解析を行い、その結果である温度分布及び溶着部断面形状と、現場で測定した温度分布および溶着部断面形状を比較した。

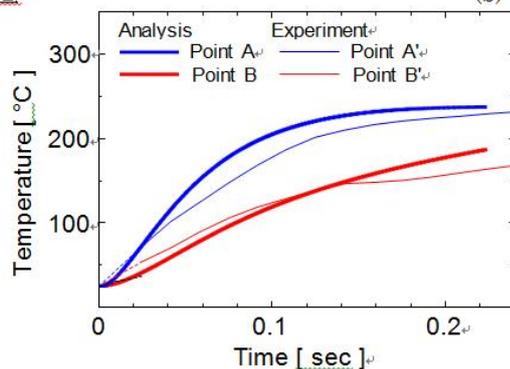
その結果、開発したシミュレーションソフトは、十分、現場で利用できることを確認した。

○温度比較：通電終了時の解析結果と実測値の誤差はA点が1.3%、B点が7.5%

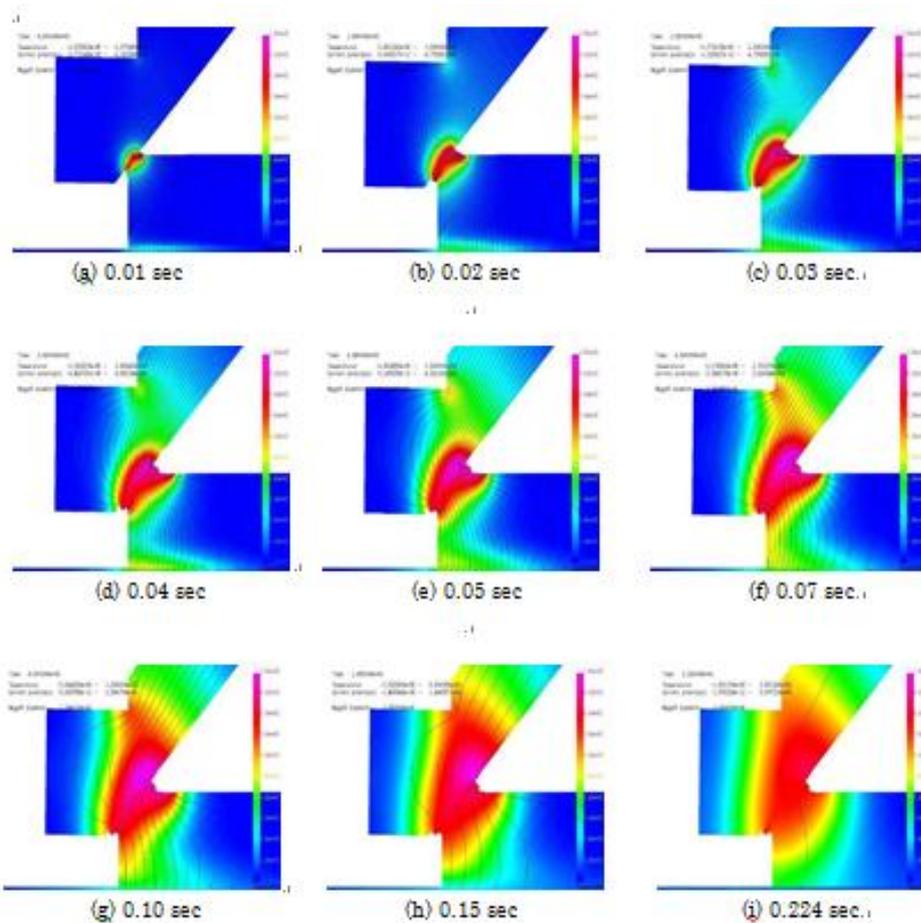


(a) 比較位置

(b) 温度測定結果

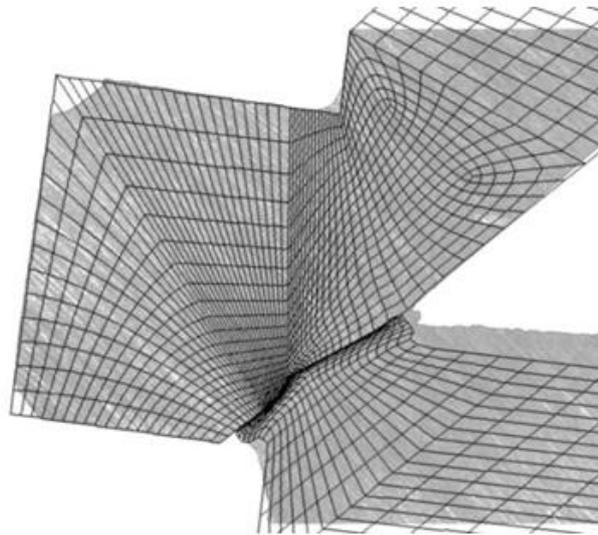


○温度変化 (解析結果)



○断面形状の比較

解析結果と観察結果（着色部）は良く一致していた。

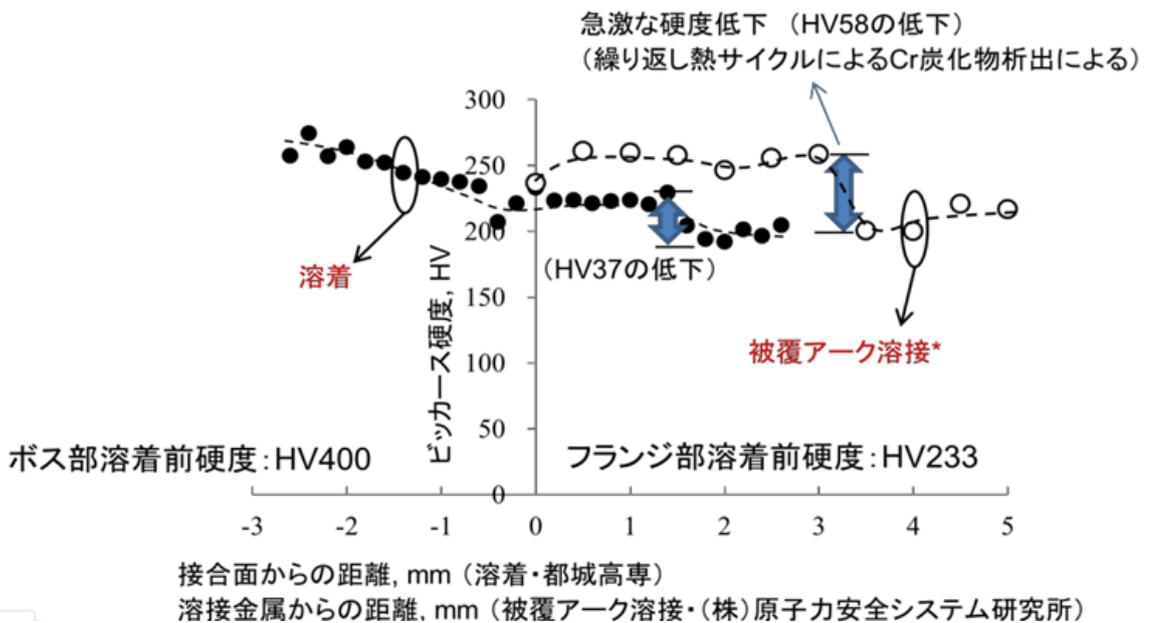


○その他の現場での測定結果<硬度分布>

溶着部位の硬度分布を測定した。

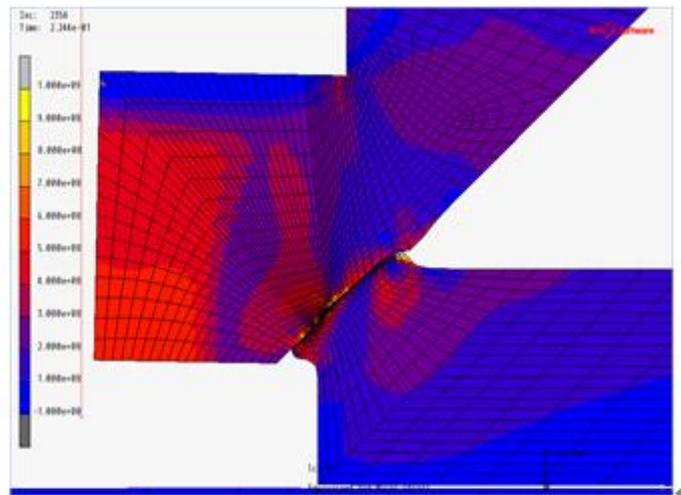
比較のため被覆アーク溶接を施したS25Cの溶着部位の硬度分布を測定した。

その結果、被覆アーク溶接法では硬度がHV58低下する部位が現れるのに対して、本研究の溶着法でのそれはHV37であった。すなわち、溶着法では被覆アーク溶接法に比べ、40%の硬度低下を抑えられることがわかった。

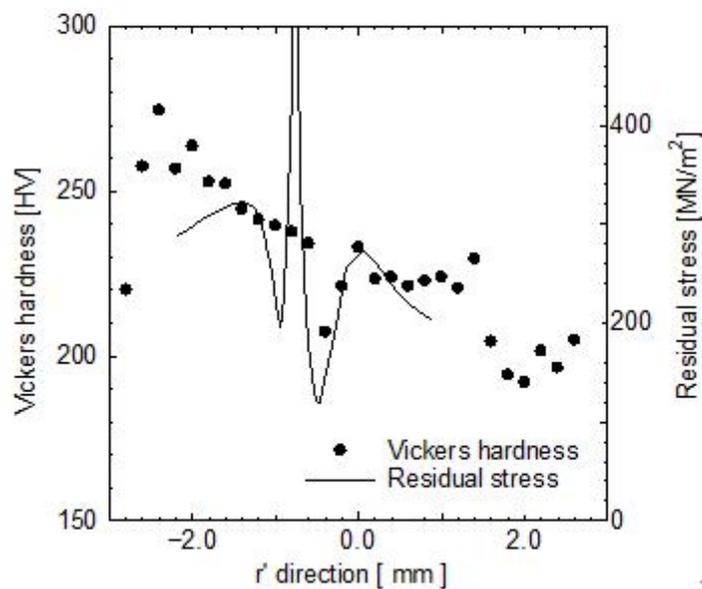


○硬度と残留応力（シミュレーション解析結果）との比較

- 硬度、残留応力のいずれもボス部が高く、フランジ部が低く、また、接合部から離れるほどその傾向は強い
- 接合部では硬度、残留応力ともに小さくなっている
- 相関係数は0.498であり、硬度と残留応力に相関が認められる
- シミュレーションの残留応力分布は、相対的ではあるが硬度分布に対応
- 硬度分布変化は強度低下の原因になる
- シミュレーションにより硬度分布変化を評価することができるため、シミュレーションは強度評価へ応用が可能



残留応力分布（シミュレーション解析結果）



残留応力と表面硬度との比較

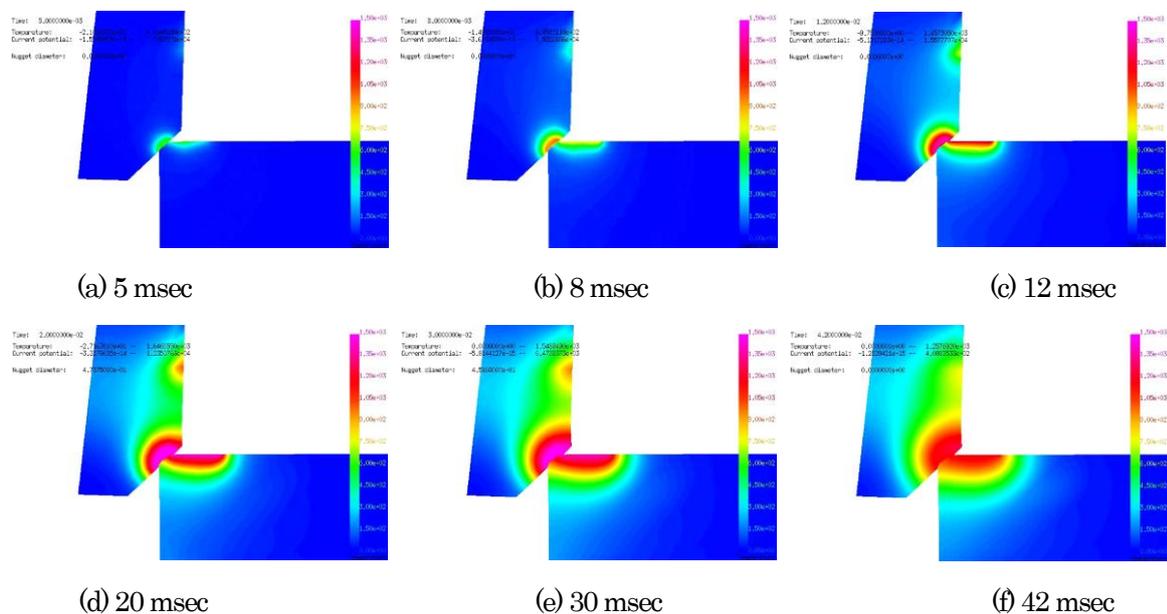
2-3 大口径・高耐圧気密配管部品の最適溶接条件の開発

2-3-1 大口径部品の最適溶接条件の開発

(1) 大口径フランジ

最適溶接条件を開発するため条件を変化させてシミュレーション解析を行った。解析結果の一例を以下に示す。

<温度変化>

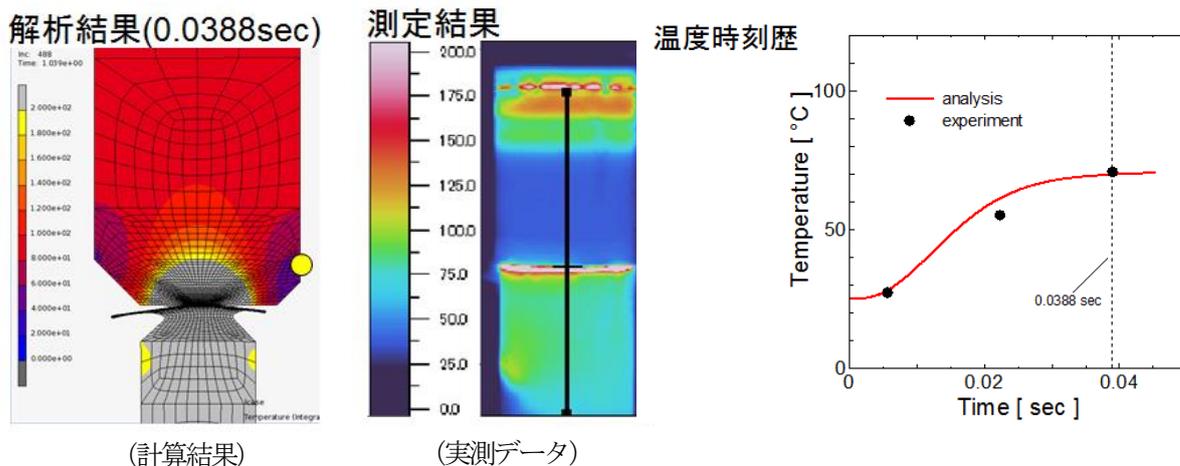


(2) 大口径シリンダー

① チューブとチューブの溶接

最適溶接条件を開発するため条件を変化させてシミュレーション解析を行った。解析結果の一例を以下に示す。また、温度の実測値との比較結果も示す。

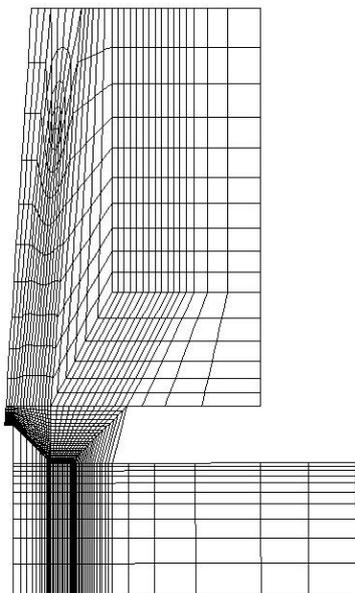
<表面温度比較>



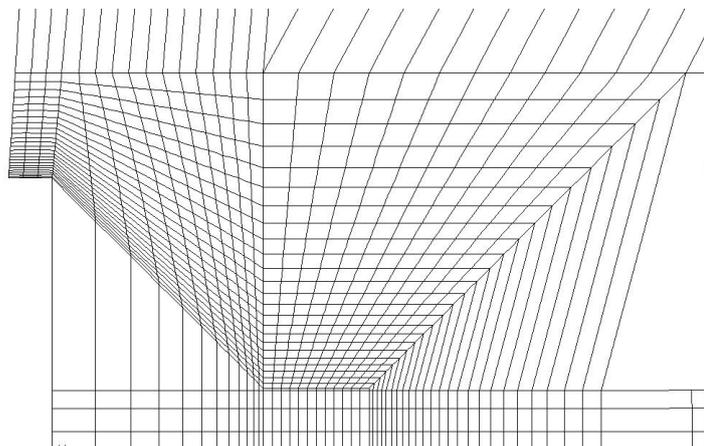
②チューブとソケットの溶接

(解析条件)

要素分割図

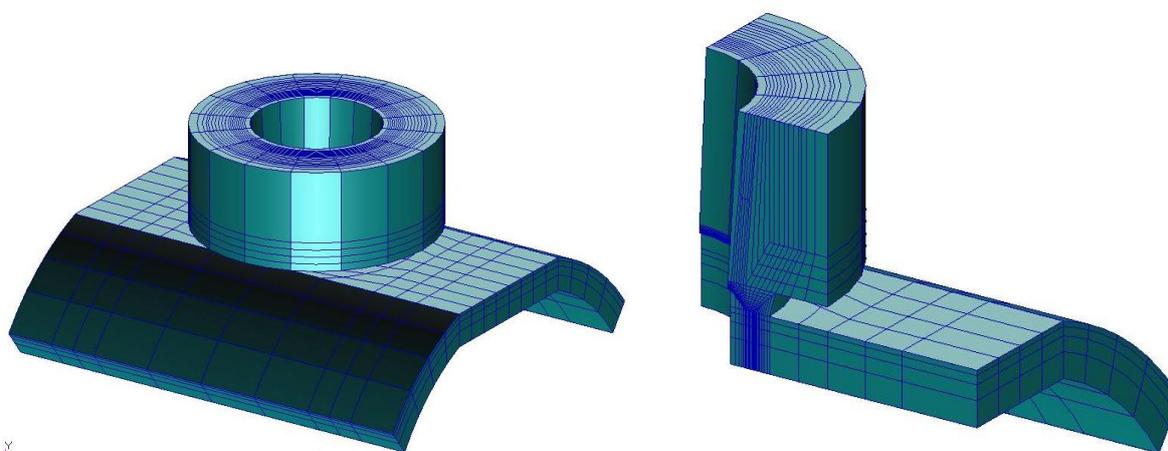


(a) 全体図



(b) 接合部拡大図

(2次元軸対称解析の要素分割)



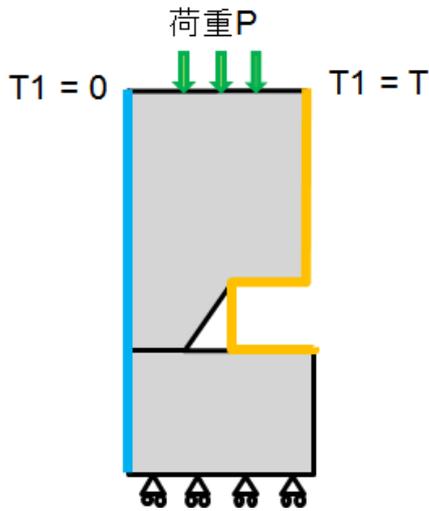
(a) 全体図

(b) 断面図

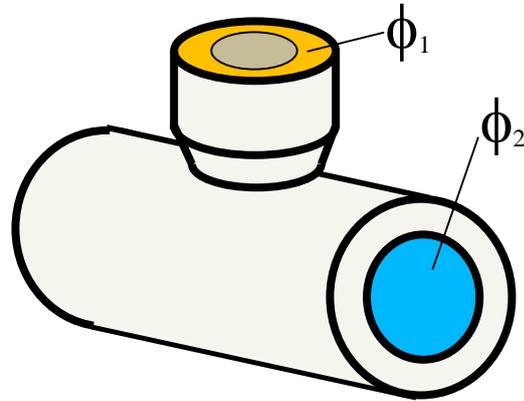
(3次元解析の要素分割)

- 軸対称解析の境界条件
 - 解析領域：ソケット全体およびチューブ接合部近傍
 - ソケット上面に30kNの荷重
 - 拘束条件：①チューブ内面をローラ支持
 - 電流条件： T_1 に0, T_2 に電流値を設定
 - 温度：初期温度25℃, チューブ断面を除く外周は断熱条件を設定
- 3次元解析の境界条件

- ・ 解析領域：ソケット全体およびチューブの温度が変化する領域
- ・ 電流条件： Φ_1 に Φ_2 に電位差を設定
- ・ 温度：初期温度25°C，外周は断熱条件を設定

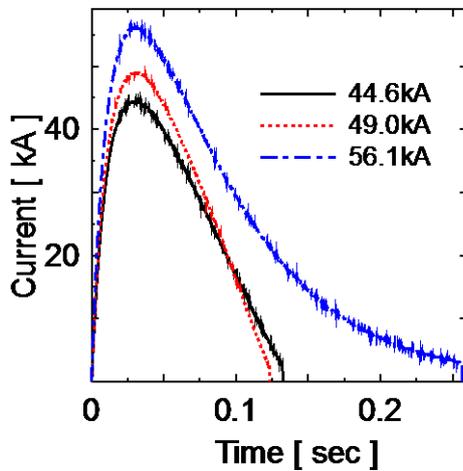


(軸対称解析の境界条件)

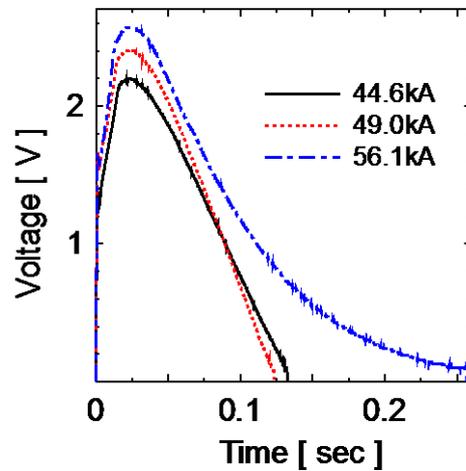


(3次元解析の境界条件)

- 電流履歴，電圧履歴：3ケースの電流履歴により電流値最適条件を検討



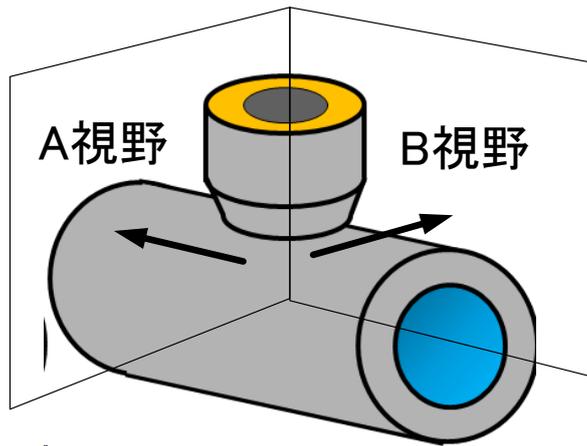
(電流履歴)



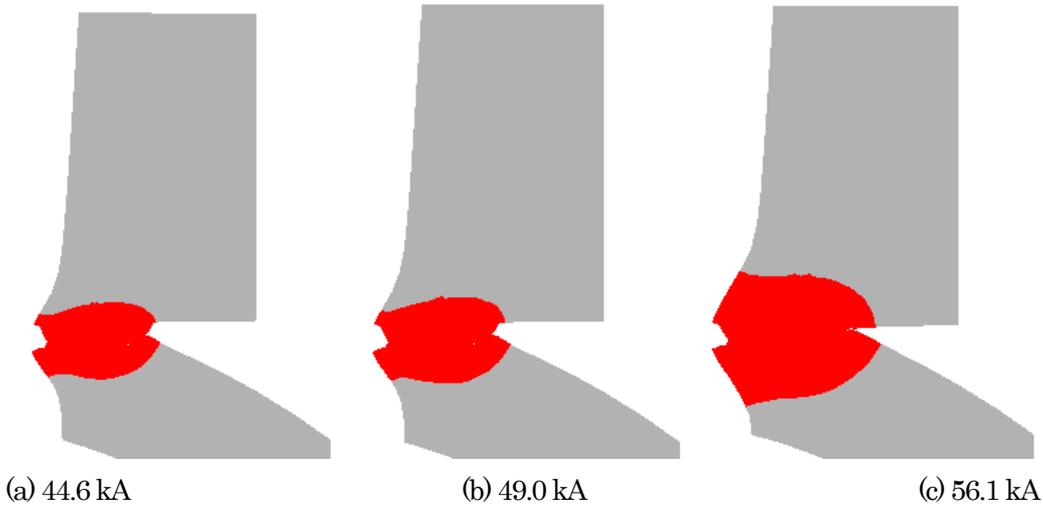
(電圧履歴)

(解析結果)

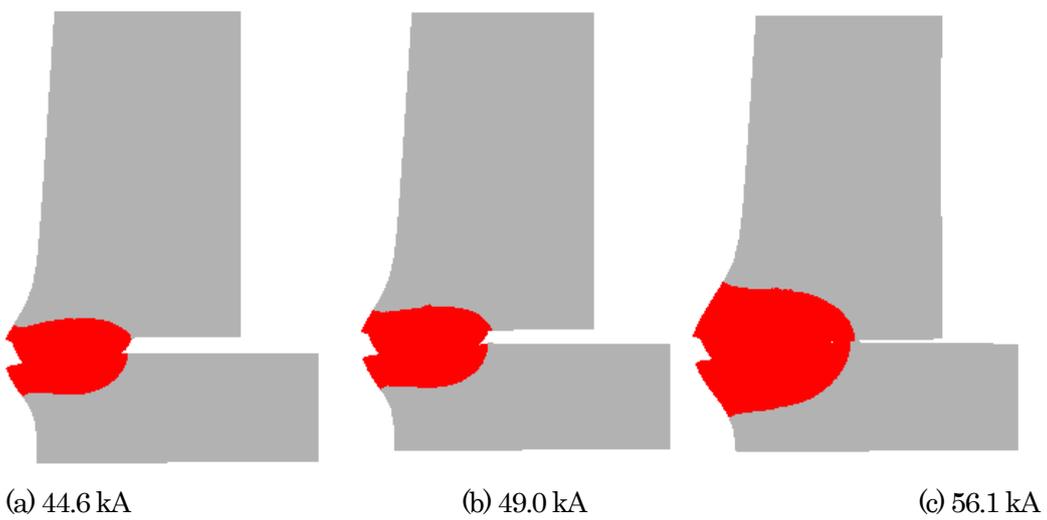
- 評価：A視野およびB視野からの溶融域により最適条件を検討
- 通電終了時の溶融域
 - ・ 電流が大きいと溶融域が広い
 - ・ B視野の方が溶融域が大きい
- 実験結果との比較
 - ・ 解析結果は実験結果と良く一致
 - ・ 電流が大きくなるとB視野に誤差が見られる
 - ・ 電流値が大きいと接合長さが大きくなるため強度も高いと考えられる



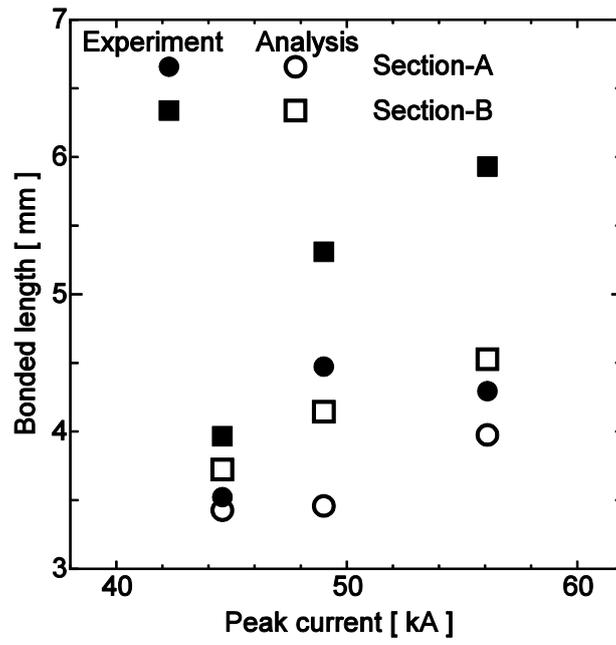
(A視野とB視野)



(A視野の溶融域)



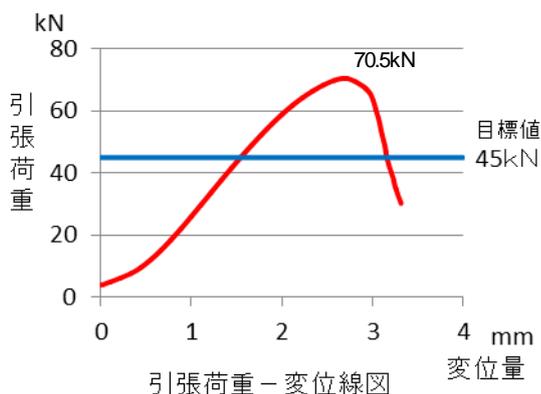
(B視野の溶融域)



(接合長さの実験結果との比較)

2-3-2 溶接状態の機械的強度評価

(1) 大口径フランジ



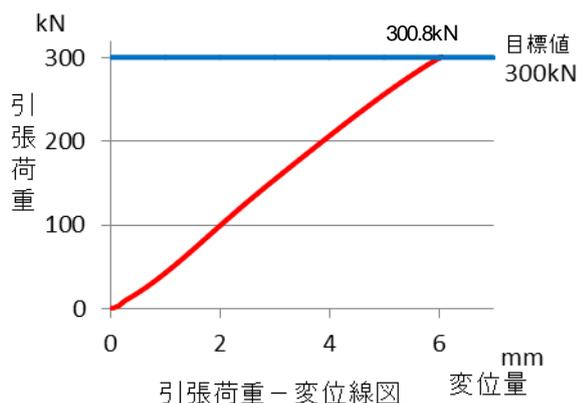
フュージョン溶着機(本体)及び大容量コンデンサー装置

引張荷重は 70.5kN であり、目標値 (45kN) を十分満足した。

耐久試験は、0.9MPa で 100,000 回 (目標値) を行った結果、異常は見られなかった。

(2) 大口径シリンダー

① チューブとチューブの溶接

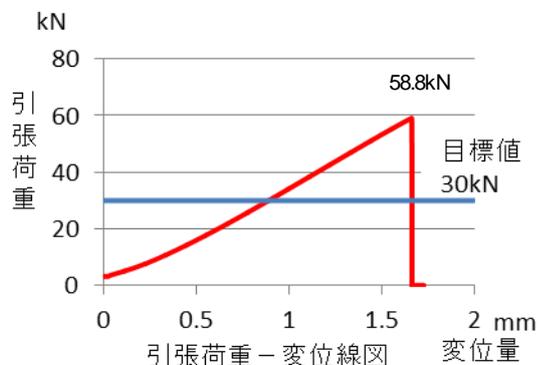


高速応答高精度可変式専用引張およびせん断負荷試験装置

引張荷重は 300kN であり、目標値 (300kN) を満足しているが、インパルス試験の目標値 (41MPa で 100,000 回) を満たさなかった。

さらに高電流が流れるように電極構造の開発が必要である。

② チューブとソケットの溶接



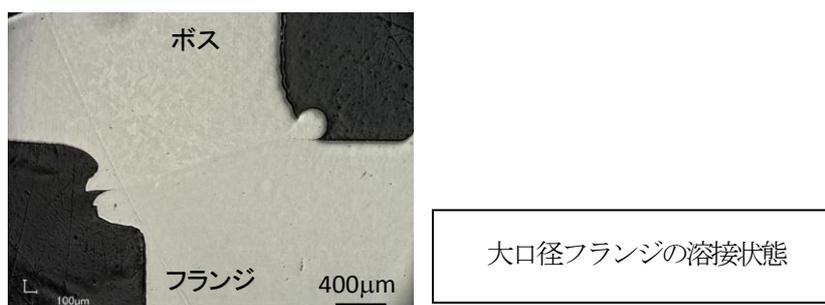
クイックレスポンス式インパルス試験装置

引張荷重は、58.8kN であり、目標値 (30kN) を十分満足した。

耐久性は、41MPa で 100,000 回 (目標値)、耐圧試験は、50MPa (目標値) をそれぞれ達成した。

2-3-3 溶接状態の金属組織的評価

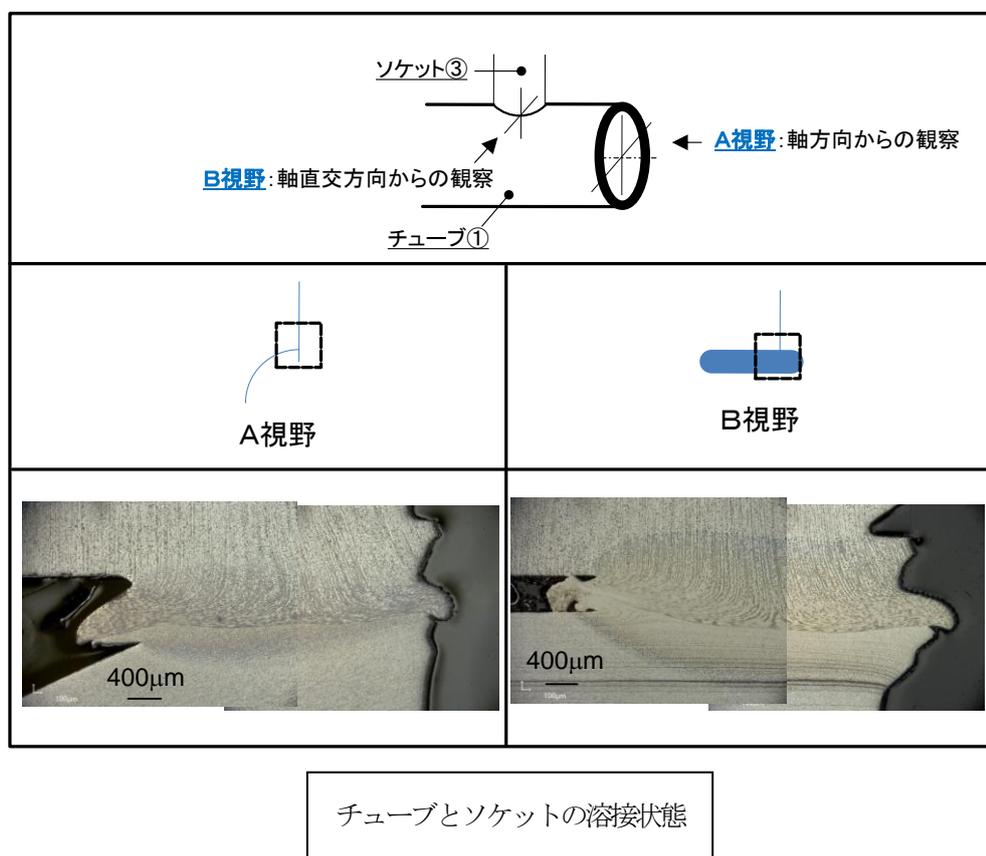
(1) 大口径フランジ



大口径フランジの接合では、鋭敏化やウエルドディケイなどの脆性域は観察されなかった。溶着部の接合長さは、シミュレーション結果とよく一致した。

(2) 大口径シリンダー

<チューブとソケットの溶接>



チューブとソケットの接合は、ナゲット組織を形成していた。また金属組織観察および硬度分布から、熱影響部内での脆性域が認められなかった。溶着部の接合長さとナゲット面積はシミュレーションとよく一致した。

最終章 全体総括

(1) 大口径フランジ

溶着部の近くから電流を投入する電極構造を開発した。この電極を用いて、小口径部品で開発した溶着時のシミュレーション解析技術を利用しながら、大口径フランジの溶着部分の開先形状の最適化および最適溶着条件を検討した。

得られた製品は

- 真円度 . . . 0.06mm < 0.15mm (目標値)
- 平面度 . . . 0.32mm < 0.5 mm (目標値)
- 引張試験 . . . 70.5kN > 45kN (目標値)
- 耐久試験 . . . 0.9MPa で 100,000 回 (目標値)
- 耐圧試験 . . . 1.8MPa (目標値)



溶着部分の熱の影響によるフランジ面の歪は、電極構造で抑制することができる。しかし、管が薄い場合は、溶着部の熱による歪対策が必要である。

(2) 大口径シリンダー

① チューブとチューブの溶接

溶着部の近くから電流を投入する電極を開発した。この電極を用いて、溶着時のシミュレーション解析技術を利用しながら、フュージョン溶着機で最大電流にて溶接した結果、目標の引張強度は得られたが、耐久試験を満足することはできなかった。この原因は、電流が電極内を流れる際に、電流通路面積が小さく、電極内部で消費されることが推定される。目標の強度を得るには、電流通路面積の大きな電極を開発する必要があり、引き続き補完研究で検討したい。

得られた製品は

- 同軸度 . . . 0.135mm < Φ 0.2mm (目標値)
- 引張試験 . . . 300kN 以上 > 300kN (目標値)
- 耐久試験 . . . 41MPa で 74,000 回 < 100,000 (目標値)
- 耐圧試験 . . . 50MPa (目標値)



② チューブとソケットの溶接

溶着部の近くから電流を投入する電極を開発した。

この電極を用いて、溶着部のシミュレーション解析技術を利用しながら最適溶着条件を検討した。

得られた製品は

- 真円度 . . . 0.028mm < 0.05mm (目標値)
- 引張試験 . . . 58.8kN > 30kN (目標値)
- 耐久試験 . . . 41MPa で 100,000 回 (目標値)
- 耐圧試験 . . . 50MPa (目標値)