

平成26年度ものづくり中小企業・小規模事業者等連携事業創造促進事業
(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「低コスト・短納期を実現する高精度板厚内部残留応力計測システムの開発」

研究開発成果報告書

平成27年3月

委託者 中国経済産業局
委託先 公益財団法人岡山県産業振興財団

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	5
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8

第2章 本論

2-1 大型かつ複雑形状の試験体への穴あけ加工およびトレパニング加工をする技術の開発	9
2-2 大型かつ複雑形状の試験体への穴径および円筒伸び、円筒倒れを計測する技術の開発	9
2-3 多種多様な試験体に対応するため、三次元応力状態・応力分布の影響を考慮した評価式を導出	10
2-4 実測データサンプルを拡大し、データ蓄積を図るとともに、他測定法と比較した信頼性評価を実施	12

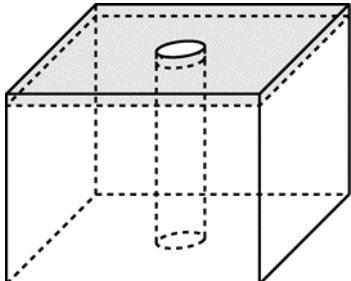
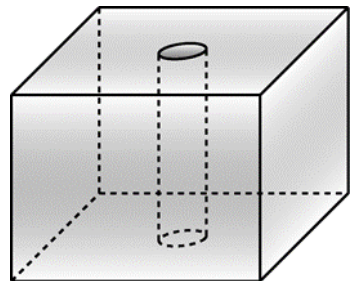
第3章 全体総括

3-1 研究開発成果	17
3-2 研究開発後の課題	17
3-3 事業化展開	17

第1章 研究開発の概要

原子力発電プラントに使用されている構造部材には、溶接をはじめ、溶断・熱加工・研削・機械加工などのあらゆる加工がされている。重要部位では後熱処理により残留応力の低減が図られてはいるものの、異材接合部などでは完全な除去はできていない。さらに、その後の現地施工で新たな残留応力が発生することもあり、これらの構造物は残留応力が発生した状態で供用されている（ヒアリングユーザー：(株)日立製作所・(株)東芝など）。

残留応力は疲労破壊や応力腐食割れ、脆性破壊等の部材損傷を引き起こし、大事故につながる可能性がある。そのため、部材の健全性評価・余寿命診断を行う上で板厚内部の残留応力分布を詳細に把握することが必要不可欠となる。そこで、1. 大型かつ複雑形状の試験体へ穴あけ加工及びトレパニング加工をする技術の開発。2. 大型かつ複雑形状の試験体の穴径および円筒伸び、円筒倒れを計測する技術の開発。3. 多種多様な試験体に対応するため、三次元応力状態・応力分布の影響を考慮した評価式の開発。4. 実測データサンプルを拡大し、データ蓄積を図るとともに、他測定法と比較した信頼性評価を実施することで、実用化レベルの大型複雑形状の試験体に対し、±5MPaの計測精度を実現する。

	従来手法 (DHD/iDHD 法)	開発法
評価式導出のための 応力状態の仮定	 <p>評価対象短部のような表裏面の拘束が無い状態</p>	 <p>実現象と同様の三次元応力状態</p>
板厚内での位置による板厚方向の拘束の変化の影響	×	○
板厚内の残留分布の影響	×	○
DHD プロセス中に生じる塑性変形の影響	△	○
残留応力評価精度	△	◎

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発は、「特定ものづくり基盤技術高度化指針」のうち、以下の項目に対応している。

(十八) 溶接に係る技術に関する事項

1 溶接に係る技術において達成すべき高度化目標

(4) 川下分野特有の事項

3) 発電、工業用等プラントに関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

イ. 長期供用性の確保及び向上

②高度化目標

イ. 溶接部の経年変化評価技術及び寿命予測技術の向上（非破壊検査技術等を含む）

●川下製造業者等の特有の課題及びニーズ

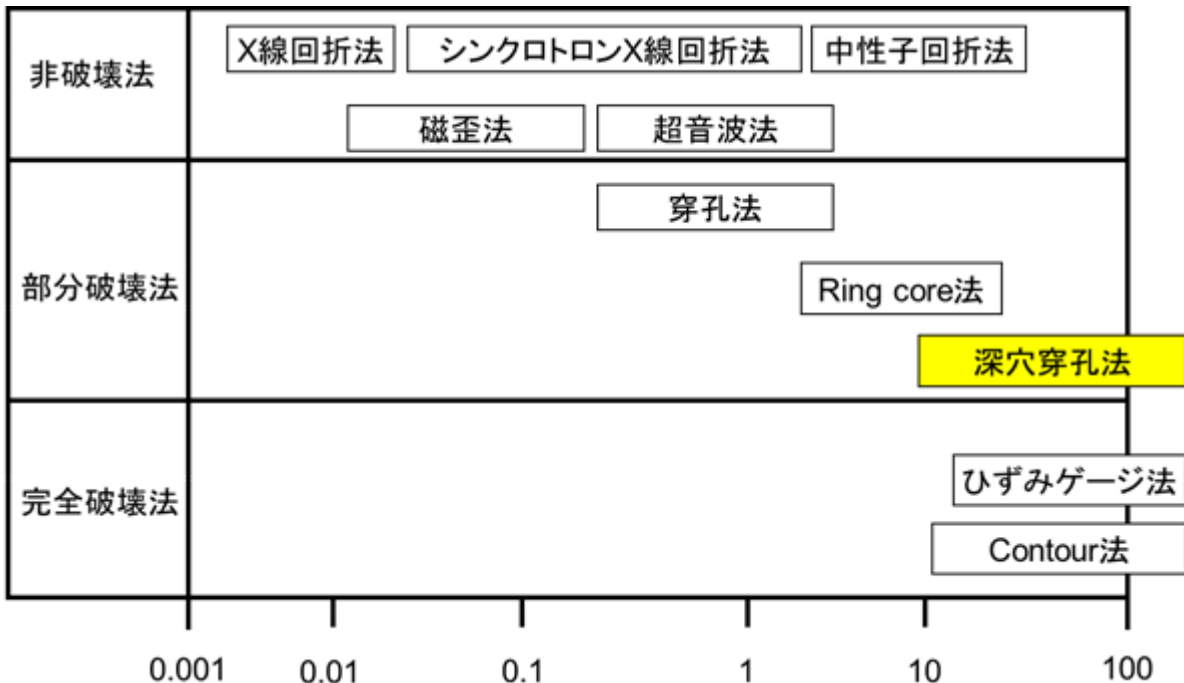
東日本大震災及び福島原子力発電所事故の影響により、日本のエネルギー政策は大きく見直されることが想定される。今後、原子力発電の安全確保が益々重要な課題となる中で、日本は事故の教訓を踏まえ、安全規制の国際標準の策定、安全技術の移転、人材育成を通して世界レベルでの安全確保に積極的に貢献することが求められる。ここで、原子力発電プラントに使用されている構造部材には、溶接をはじめ、溶断・熱加工・研削・機械加工などのあらゆる加工がされている。重要部位では後熱処理により残留応力の低減が図られてはいるものの、異材接合部などでは完全な除去はできていない。さらに、その後の現地施工で新たな残留応力が発生することもあり、これらの構造物は残留応力が発生した状態で供用されている（ヒアリングユーザー：日立製作所・東芝など）。

残留応力は疲労破壊や応力腐食割れ、脆性破壊等の部材損傷を引き起こし、大事故につながる可能性がある。そのため、部材の健全性評価・余寿命診断を行う上で板厚内部の残留応力分布を詳細に把握することが必要不可欠となる。

また、原子力発電以外の産業分野でも、航空機や自動車、船舶、化学プラント業界などのヒアリング結果から、現状では板厚内部の残留応力を定量的に把握できていないことから、故に過度に安全側の設計や頻度の高い点検を要求せざるを得ず、また今後、高精度に板厚内部残留応力が評価できるようになれば、より合理的な設計・保守が可能となることから、実製品に適用可能な板厚内部残留応力評価技術への潜在的ニーズは大きく、その実現が期待されていることが判明している。

●世界の動向

健全性評価・余寿命診断をする上で、板厚方向に対して 200mm 程度までの残留応力分布を 10MPa 程度の誤差範囲で把握する必要があると言われている。残留応力は下表にある各種方法で計測が可能である。しかしながら、必要とされる板厚内部（200mm）の残留応力を計測できる手法としては、現時点では DHD（Deep Hole Drilling）法に限られる。



X線回折法やひずみゲージ法では、表面層の計測に限定されるため、板厚内部の残留応力計測は不可である。また、中性子回折法ではある程度の板厚内部計測が可能となるが、30mm程度の板厚にしか対応できず、大型の試験体には対応できない。そこで、板厚内部残留応力の計測方法として、現時点では世界で唯一イギリスのVEQTER社が実施しているDHD法が使われ、日本、米国、フランス、ドイツ、スペインなどで広く採用されつつある。

●DHD法による応力解析方法と課題

DHD法の測定手順を以下に示す。

①ガンドリルによる穴あけ加工を実施。②エアプローブにより0.2mmピッチで円周方向に18箇所直径を計測。③放電加工にて円筒をくり抜き、応力を解放。④手順②と同様に直径を計測。

これは応力解放前後の直径差から変位解析により残留応力を解析する手法である。



しかしながら、精度、価格、納期、信頼性に課題がある（ただし、DHD法以外に板厚内部残留応力測定方法がないため、測定依頼を実施しているのが現状）。

- ・ 精度面の課題
…穴加工精度・計測精度が低く、せん断応力を無視しているため、 $\pm 50\text{MPa}$ 程度の計測精度しかない。
- ・ 価格・納期面の課題
…海外企業への依頼のため、輸送費として価格・納期がかかる。価格は1ヶ所300万円程である。納期に関しては、測定物を輸送する場合と測定者が派遣される場合で異なり、前者が6ヶ月程度、後者が3ヶ月程度である。
- ・ 信頼性の課題
…検証方法がない。DHD法は板厚内部の残留応力を計測できる唯一の手法であり、残留応力結果の報告データのみが開示され、計測過程の穴径データ等は開示されないことが要因である。

●新たな提案の前提条件

発電プラント、航空機、自動車、船舶、工業用プラント用部材の残留応力評価を事業化するに当たり、大型かつ複雑形状に対応する必要がある。

大型の試験体に対応するためには以下のいずれかの対応が必要となる。

- I. 試験体より更に大型の加工機・計測装置を用いる。
- II. ハンドドリルのようなフレキシブルな装置を用いる。

さらに、複雑形状に対応するためには装置の干渉を考慮する必要がある。しかし、大型の試験体の場合には、干渉による制限を受ける可能性が高いため、上記IIの対応が適していると考えられる。

なお、高精度残留応力計測の事業化を実現するためには、フレキシブルな装置でありながら、加工精度・計測精度を維持する必要がある。また、大型かつ複雑形状の溶接により、初期応力状態を3次元状態で仮定する必要がある。更に、実測データを充実させ、データベース化するとともに他の評価法による検証も必要となる。



実機大型試験体のイメージ図

複雑形状測定例のイメージ図

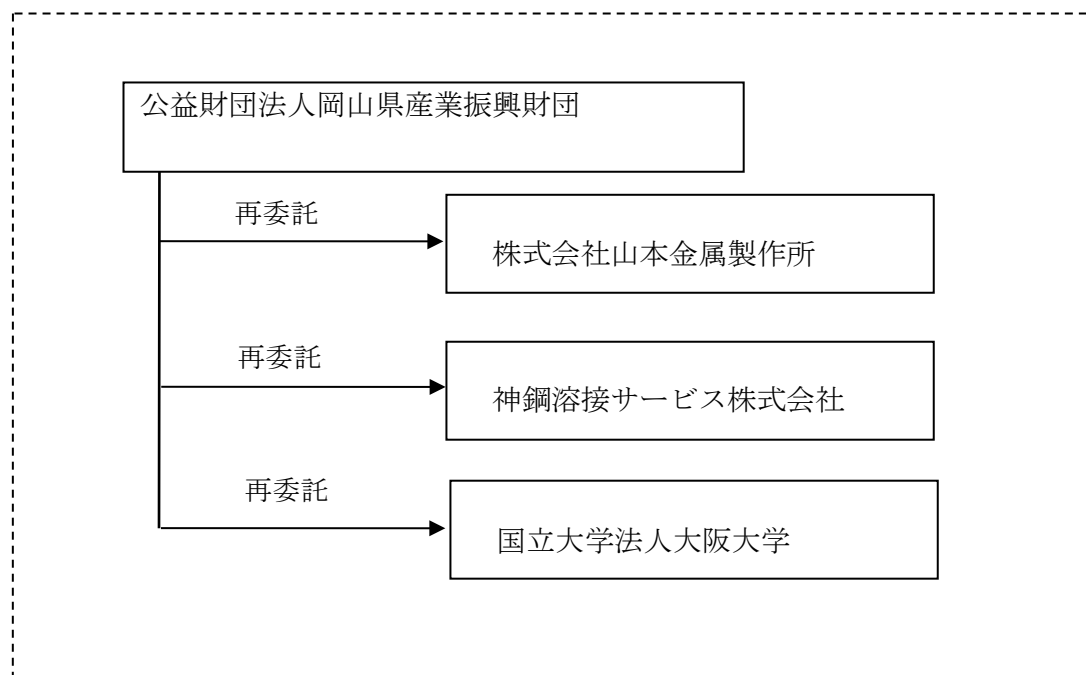
<http://sem-proceedings.com/rss4/sem.org-4th-Residual-Stress-Summit-Csontos-PWR-Dissimilar-Metal-Butt-Weld-Residual-Stress-Finite.pdf>より抜粋

本研究開発期間で得られる最終目標及び実施結果は次の通りである。

研究テーマ	目標値	実施結果
【1】 大型かつ複雑形状の試験体への穴あけ加工およびトレパニング加工をする技術の開発		
1-1: フレキシブルな加工装置の設計製作	$\phi 5 \times 200\text{mm}$ の穴あけ加工を可能とする	$\phi 5 \times 200\text{mm}$ の穴あけ加工を実現した。
1-2: 切削条件・研磨条件の最適化による高精度加工の実現	切削条件の最適化および研磨加工を用いて、最終仕上げ面の面粗度 $0.1 \mu\text{m}$ 以下とする	電解砥粒研磨加工によりステンレス材の仕上げ面精度 $0.08 \mu\text{mRa}$ を実現した
1-3: フレキシブルな加工装置のためのトレパニング加工の実現	深さ 200mm (直径 $\phi 15 \sim 35\text{mm}$) のトレパニング加工を可能とする	放電加工により深さ 200mm (直径 $\phi 24.5\text{mm}$) を実現。ただし、フレキシブル装置では機械加工により深さ 35mm まで実現
【2】 大型かつ複雑形状の試験体への穴径および円筒伸び、円筒倒れを計測する技術の開発		
2-1: フレキシブルな穴径計測装置の設計・製作	測定分解能 $0.5 \mu\text{m}$ を持ち、 $\phi 5 \times 200\text{mm}$ の穴径計測を 3 方向以上かつ 0.5mm ピッチで計測可能	空気マイクロメータによる測定で、分解能 $0.5 \mu\text{m}$ 、深さ 200mm 、6 方向、 0.5mm ピッチで計測実現
2-2: フレキシブルな高さ・傾き計測装置の設計製作	測定分解能 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の装置を製作する	繰り返し精度 $0.1 \mu\text{m}$ のレーザー変位計による測定により実施
【3】 多種多様な試験体に対応するため、三次元応力状態・応力分布を考慮した新しい評価式を導出	三次元応力状態・応力分布を考慮した上で新しい評価式を提案し、測定誤差 $\pm 5\text{MPa}$ とする	二次元弾性体と三次元弾性体、二次元弾塑性体の厳密解より三次元弾塑性体の近似解を得る手法にて評価式を導出。残留応力測定誤差 $\pm 5\text{MPa}$ を達成
【4】 実測データサンプルを拡大し、データ蓄積を図るとともに、他測定法と比較した信頼性評価を実施		
4-1: 多種多様な溶接試験体のデータベース化	円筒突合せ溶接、T 型突合せ溶接、平板突合せ溶接等、3 種類以上のデータベース化を実現する	ビードオンプレート溶接、平板突合せ溶接 2 種、円筒突合せ溶接、T 型突き合わせ溶接の 5 種のデータベース化を実施
4-2: ひずみゲージ (切断法) による検証	4-1 と同条件での溶接試験体を準備し、部材表面での残留応力データを計測し、新たに研究開発した新技術の妥当性を検証する	4-1 の 5 種の試験体の製作およびひずみゲージでの残留応力データを取得し、新技術での測定データと同等であることを検証した

1-2 研究体制

【研究組織】



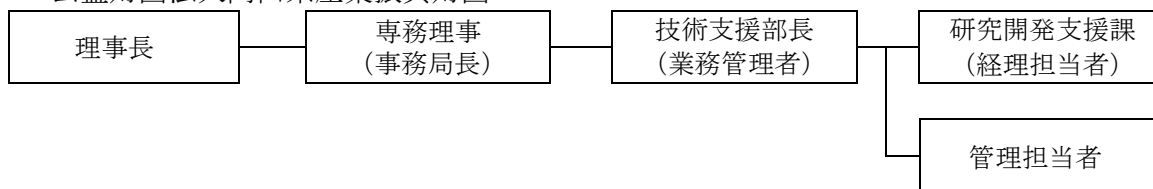
総括研究代表者（P L）
株式会社山本金属製作所
山本 憲吾

副総括研究代表者（S L）
国立大学法人大阪大学
望月 正人

【管理体制】

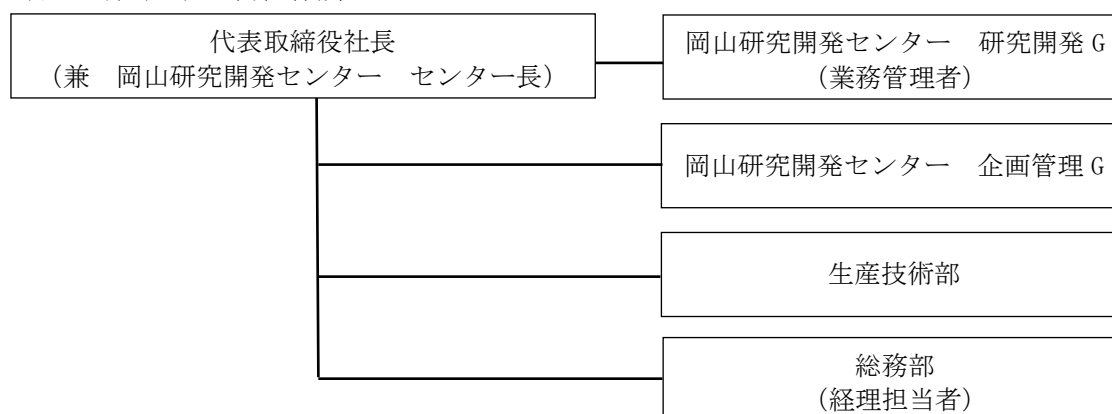
①事業管理機関

公益財団法人岡山県産業振興財団

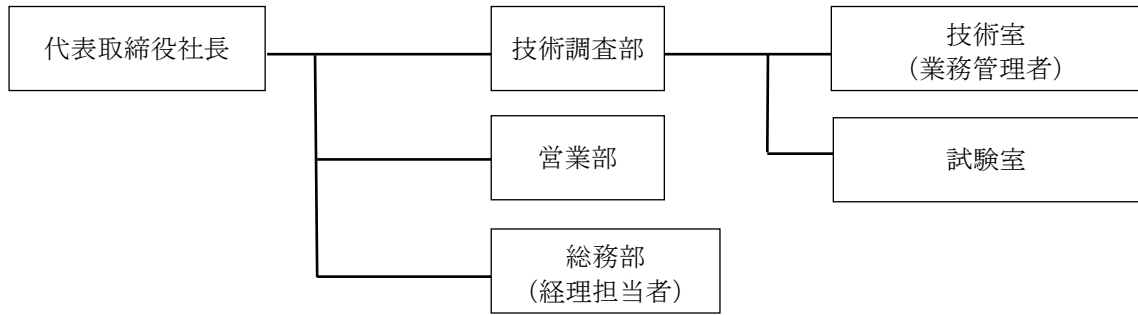


②再委託先

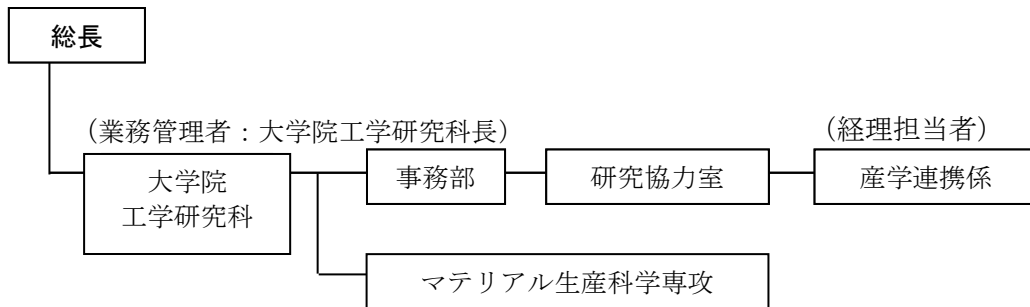
株式会社山本金属製作所



神鋼溶接サービス株式会社



国立大学法人大阪大学



【協力者】

氏名	所属	備考
齋藤 利之	株式会社東芝 電力システム社 原子力システム設計部	推進委員会アドバイザー
宮崎 克雅	株式会社日立製作所 日立研究所 材料研究センター 材料応用研究部	推進委員会アドバイザー
山本 和司	三菱自動車工業株式会社 開発本部 パワートレイン設計部	推進委員会アドバイザー
長谷 和邦	JFE スチール株式会社 スチール研究所 鋼材研究部	推進委員会アドバイザー
窪田 真一郎	岡山県工業技術センター 研究開発部	推進委員会アドバイザー
菅 哲男	大阪大学 接合科学研究所	推進委員会アドバイザー

1-3 成果概要

① 大型かつ複雑形状の試験体への穴あけ加工およびトレパニング加工をする技術の開発

①-1 フレキシブルな加工装置の設計製作

(実施機関) 株式会社山本金属製作所

【実施内容】

先端工具の交換により、内部残留応力計測における一連の評価プロセスを実施できる装置を開発することができた。本装置は水平・垂直・斜め方向へ対応ができ、フレキシブルな対応が可能である。

①-2 切削条件・研磨条件の最適化による高精度加工の実現

(実施機関) 株式会社山本金属製作所

【実施内容】

電解砥粒研磨を実施し、その際の電流密度、回転数、電解液種類・濃度、電極種類および研磨材等の条件を最適化することで仕上面粗さ $0.07\mu\text{m}$ を達成した。

①-3 フレキシブルな加工装置のためのトレパニング加工の実現

(実施機関) 株式会社山本金属製作所

【実施内容】

放電加工により深さ 200mm のトレパニング加工を実現した。型彫放電加工機に取り付ける電極は加工深さの延長を図るためのエクステンション用ジグ (SUS410) の先端部のみ銅電極となっている。フレキシブル装置ではトレパニング用ドリルを装着して行い、深さ 35mm まで実施できている。

② 大型かつ複雑形状の試験体への穴径および円筒伸び、円筒倒れを計測する技術の開発

②-1 フレキシブルな穴径計測装置の設計・製作

(実施機関) 株式会社山本金属製作所

【実施内容】

フレキシブル装置の先端工具を空気マイクロメータに付け替えて穴径の計測をする。空気マイクロメータの測定精度は $0.5\mu\text{m}$ となっている。深さ 200mm まで計測するため、測定部をパイプ延長することで対応した。穴計測方向はサーボモータ制御により無段階で設定ができる。計測ピッチは最小 0.01mm も設定可能となっており、目標を達成した。

②-2 フレキシブルな高さ・傾き計測装置の設計製作

(実施機関) 株式会社山本金属製作所

【実施内容】

フレキシブル装置の先端工具をレーザー変位計に付け替えて円筒表面 4ヶ所の高さ変位を計測する。レーザー変位計の繰り返し精度は $0.1\mu\text{m}$ となっている。4ヶ所の測定データより高さおよび傾きを算出することができ、目標を達成した。

③ 三次元応力状態・応力分布の影響を考慮した評価式を導出する

(実施機関) 国立大学法人大阪大学

【実施内容】

二次元弾性体と三次元弾性体、二次元弾塑性体の厳密解より三次元弾塑性体の近似解を得る手法にて評価式を導出した。従来式では十分考慮されていなかった塑性変形やせん断応力の影響や三次元応力状態・応力分布の影響を考慮した評価式が導出できた。残留応力評価誤差を数値シミュレーション上で確認し $\pm 5\text{MPa}$ 以下を達成した。

④ データ蓄積を図るとともに他測定法と比較した信頼性評価を実施

④-1 多種多様な溶接試験体のデータベース化

(実施機関) 国立大学法人大阪大学、株式会社山本金属製作所

【実施内容】

ビードオンプレート溶接試験体、平板突合せ溶接試験体、狭開先平板溶接試験体、円筒突合せ溶接試験体、T型溶接試験体の5種のデータベース化を実施

④-2 ひずみゲージ（切断法）による検証

（実施機関） 神鋼溶接サービス株式会社

【実施内容】

④-1 項の5種の試験体の作製およびひずみゲージでの残留応力データを取得し、開発法との測定データと同等であることを検証し、開発法の有用性を示した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

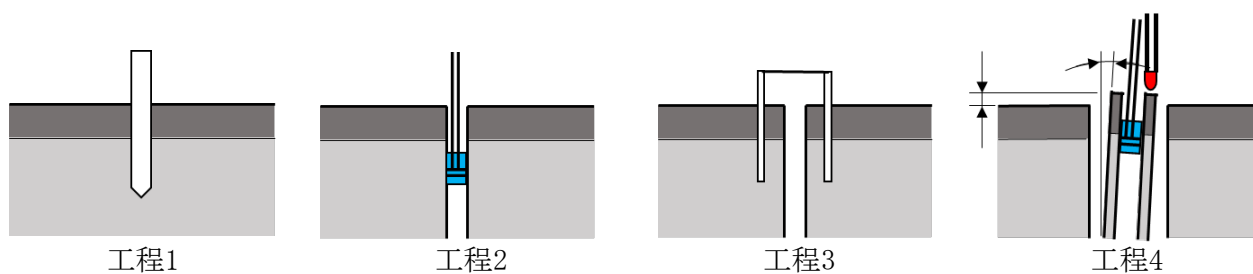
管理法人： 公益財団法人岡山県産業振興財団
〒701-1221 岡山県岡山市北区芳賀 5301 テクノサポート岡山 3F
連絡担当者名： 技術支援部 次長 横田尚之
TEL：086-286-9651 FAX：086-286-9676 E-mail：nyokota@optic.or.jp

第2章 本論

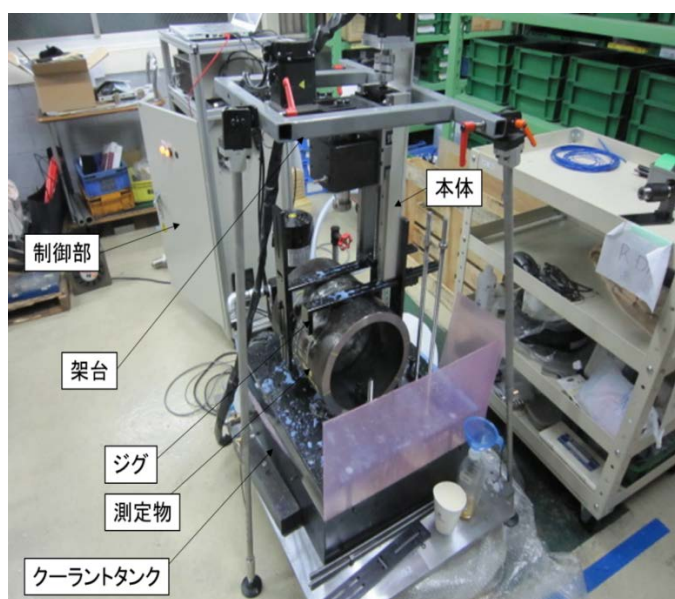
2-1 大型かつ複雑形状の試験体への穴あけ加工およびトレパニング加工をする技術の開発

2-2 大型かつ複雑形状の試験体への穴径および円筒伸び、円筒倒れを計測する技術の開発

三次元応力状態・応力分布の影響を考慮した評価式では次のプロセスによって得られた測定データが必要となる。①ドリルによる穴あけ加工を実施。②空気マイクロメータにより0.5mmピッチで円周方向に6箇所直径を計測。③トレパニング加工にて円筒をくり抜き、応力を解放。④手順②と同様に直径および円筒の伸び・倒れを計測。以降③と④を逐次繰り返す。



これらのプロセスを大型試験体で実施するため、フレキシブルに対応可能な装置開発を行った。開発した装置全景及び各プロセスの実施状況を下図に示す。装置本体は各工程で共用しており、先端工具を付け替えることで各プロセスに対応できる。本体と測定物はジグにより強固に固定し、架台は本体を支持する目的で使用する。又、本体、架台、制御部、クーラントタンク等は分解・再組み付けが簡便にでき現地での測定にも適している。



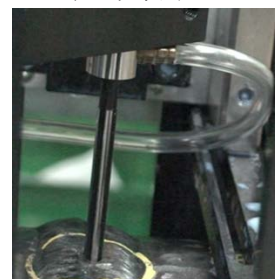
装置全景



穴あけ加工



トレパニング加工



穴径計測

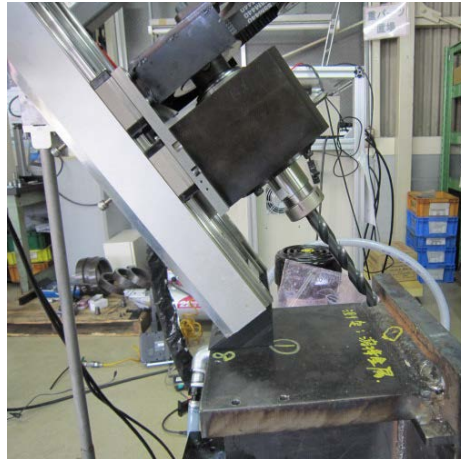


円筒伸び・傾き計測

加工方向も水平・垂直はもちろん斜め方向からのアプローチも可能であり、測定方向に制限はない。測定物への固定および架台取付向きと架台脚長の調整により測定方向を調整する。各方向での装置外観を次頁に示す。



(a) 垂直方向



(b) 斜め方向



(c) 水平方向

本加工装置の開発により下記残留応力評価プロセスが可能となった。

工程1：φ5mm×200mmまでの穴あけ加工

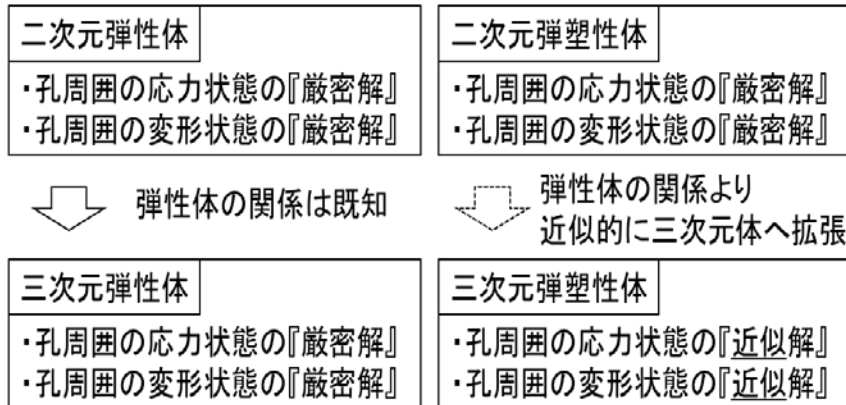
工程2：円周方向6箇所、測定ピッチ最小0.01mmにて深さ200mmまでの穴径計測

工程3：コア内径φ10.2、コア外径φ18の深さ35mmまでのトレパニング加工

工程4：円筒部4ヶ所の変位計測

2-3 多種多様な試験体に対応するため、三次元応力状態・応力分布の影響を考慮した評価式を導出

評価理論式導出過程の概念図を下図に示す。応力・変形状態は常に弾性状態であると過程すると二次元体および三次元体において厳密解が導出可能である。二次元体における塑性変形を考慮した厳密解も導出可能である。弾性体の二次元性と三次元性の関係を各種補正により拡張することで、三次元弾性体の近似解を導出している。



第一に二次元弾性体における評価式は次式となる。

$$\frac{d - d_0}{d_0} = -\frac{1}{E} [(1 + 2\cos 2\theta)\sigma_x + (1 - \cos 2\theta)\sigma_y + 4\sin 2\theta\sigma_x]$$

第二に三次元弾性体における評価式は次式となる。

$$U_{multi}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_z, z, \theta) = U_{single}(\sigma_x, z, \theta) + U_{single}\left(\sigma_y, z, \theta - \frac{\pi}{2}\right) + \left[U_{single}(\sigma_{xy}, z, \theta) - \frac{\pi}{4} + U_{single}\left(\sigma_{xy}, z, \theta + \frac{\pi}{4}\right)\right]$$

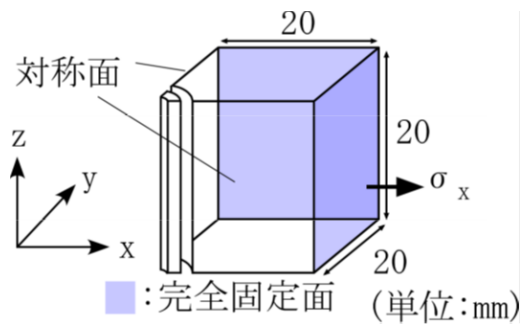
第三に二次元弾塑性体における評価式は次式となる。

$$2Gu_r = -\left[2Br + \frac{c}{R_0} + \sum \left[2mD_{1m}R_0^{2m-1} + (2m+2)D_{2m}R_0^{2m+1} - 2m\frac{D_{3m}}{R_0^{2m+1}} - (2m-2)\frac{D_{4m}}{R_0^{2m}}\right] \cos 2m\theta + \frac{R_0}{1+\nu} \left[4B + \sum \left[4C_{2m}R_0^{2m} + \frac{6m-2}{2m-1} \frac{D_{4m}}{R_0^{2m}}\right] \cos 2m\theta\right]$$

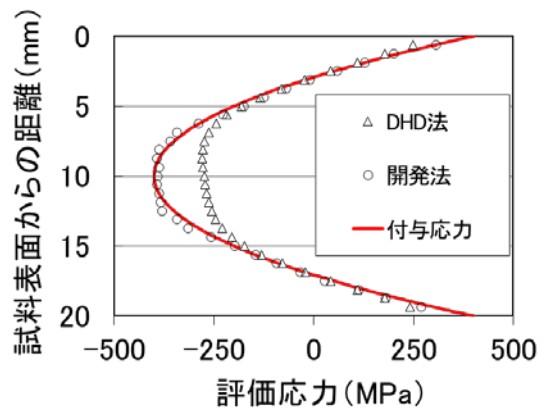
最後に二次元弾塑性体の場合の残留応力評価法を三次元弾塑性体の場合の残留応力評価式に拡張する。二次元体と三次元体の相違点を以下に挙げる。a) 弾性体における孔径変化量、b) 応力集中係数について板厚中央ではほぼ3となるが表面付近では3より小さい、c) 例え板厚に渡って残留応力が等しい場合でも応力成分は板厚内の位置によって異なる、d) トレパニングによる残留応力の解放により、残留応力未解放領域に新たな応力が付加される、e) トレパニングによる板厚残留応力の解放により円筒伸びが生じる、f) トレパニングによる板厚方向せん断応力の解放により円筒倒れが生じる。

a) については前述の評価式にて考慮可能であり、b) c) については二次元体と三次元体での応力集中係数の比、最大板厚方向応力の比で補正が可能。d) e) f) については部分的なトレパニングによる円孔変化量、円筒伸び量、円筒倒れ量を計測し評価することが可能である。

本評価方法によって有限要素シミュレーション上で既知の残留応力場を評価することで、精度確認を行った。数値解析により得られる寸法変化により、従来法および開発法を用いて残留応力評価し、負荷応力（真値）と比較した。モデルを下図に示す。1/4モデルで残留応力評価位置（穿孔位置）も合わせて示している。残留応力は同図中の加熱領域を1秒間2000℃に加熱し、その後モデル全体を室温まで冷却することで、溶接残留応力を模擬した分布を生成している。材料物性には一般的な炭素鋼を想定した温度依存性を考慮したものを入力した。ただし、密度、熱膨張率、ポアソン比は温度に関らず一定とした。また、穴あけ・トレパニングは要素の消去により表現する。従来法に比べ開発法の方が、シミュレーション上で与えた残留応力場を正確に評価できていることが分かる。



FEM モデル



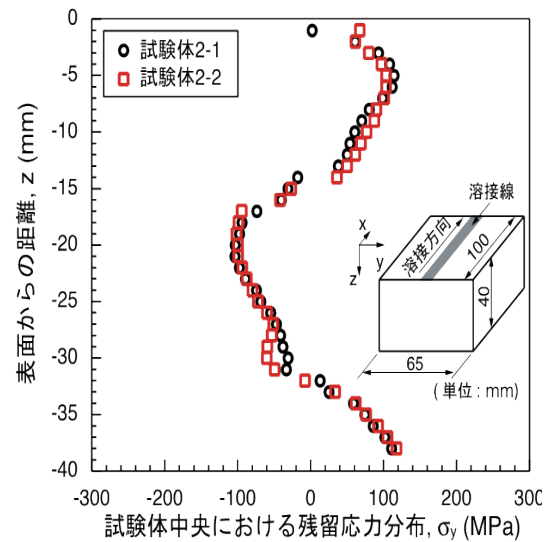
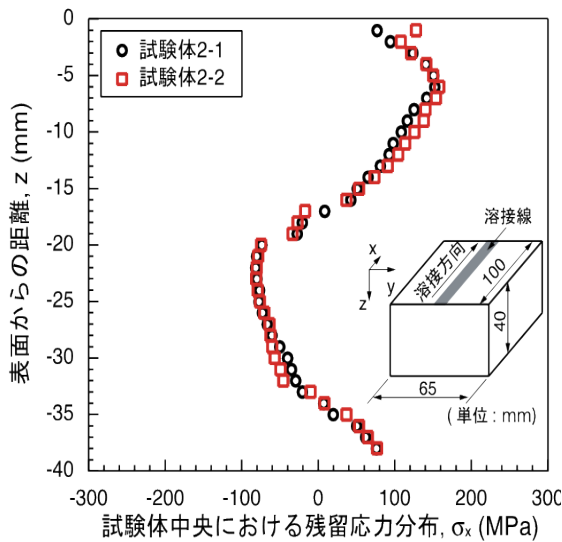
解析結果

2-4 実測データサンプルを拡大し、データ蓄積を図るとともに、他測定法と比較した信頼性評価を実施

実測データサンプルを蓄積するため、溶接試験体の作製および開発法によるデータ取得とひずみゲージ切断法によるデータ取得を行った。

■ビードオンプレート溶接試験体

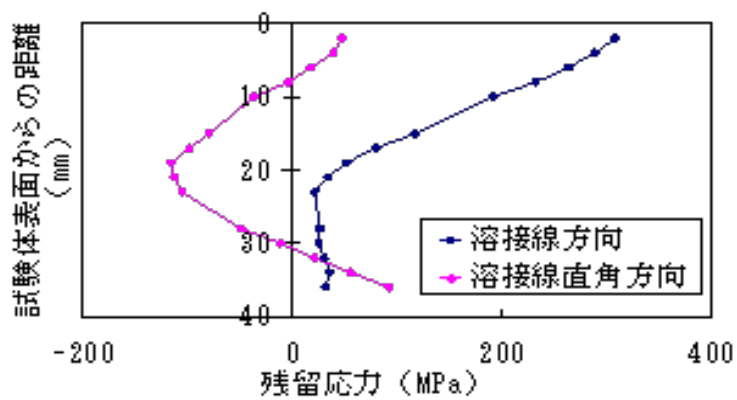
母材	SUS304		
溶接電流	200 (A)		
アーク電圧	13 (V)		
溶接速度	12 (cm/min)		
アーク長	3 (mm)		
シールドガス	Ar		
シールドガス流量	15 (L/min)	単位：mm	



溶接線方向の残留応力分布

溶接線垂直方向の残留応力分布

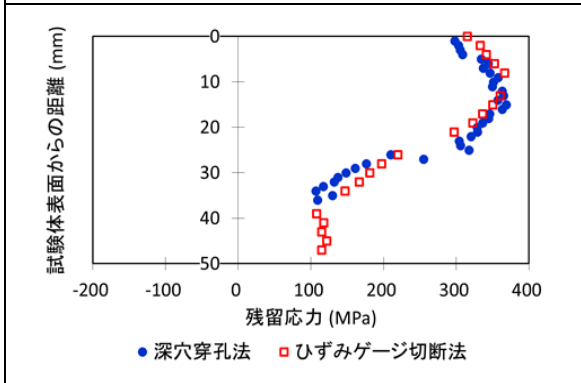
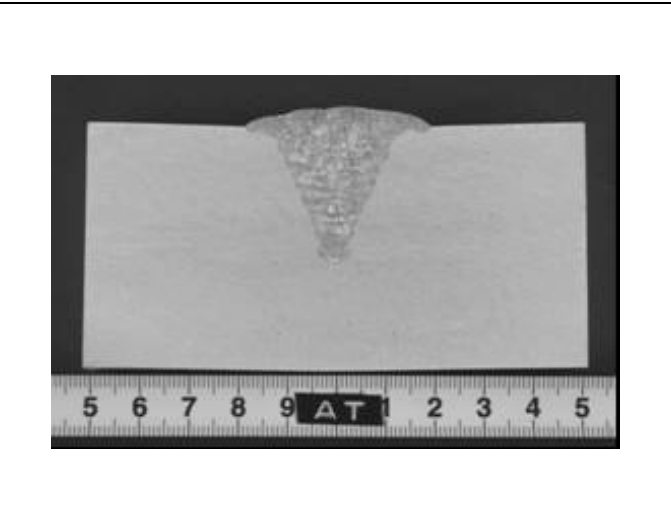
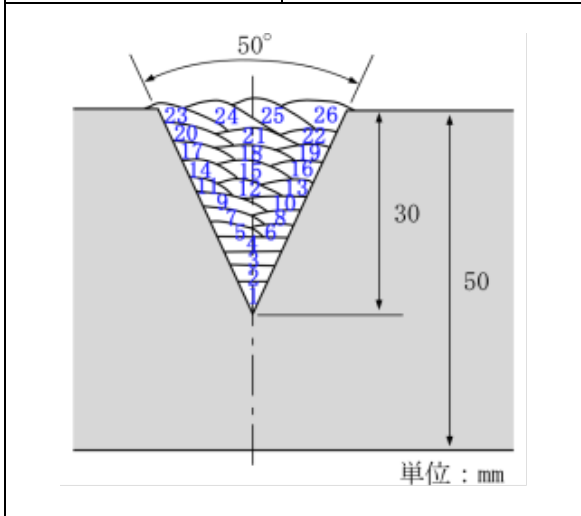
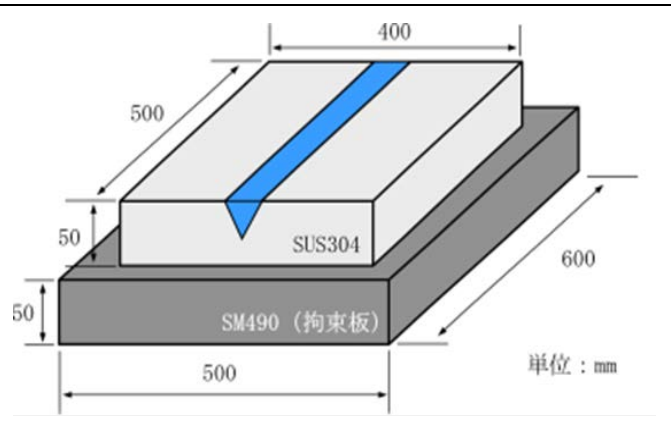
BOP 溶接試験体の残留応力測定結果 (DHD)



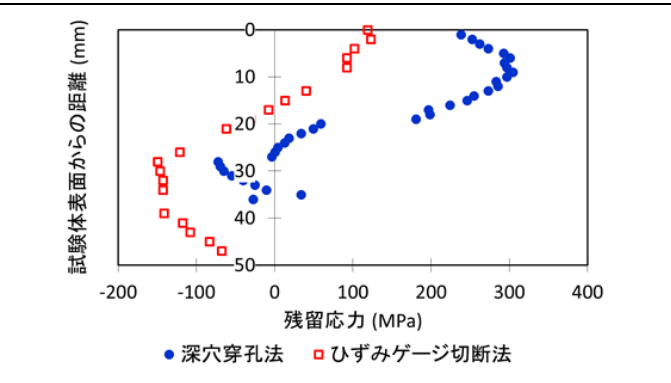
BOP溶接試験体の残留応力測定結果 (ひずみゲージ切断法)

■平板溶接試験体

母材	SUS304
拘束板	SM490
溶接材料	JIS Z 3321 YS308 (1.2mm φ)
溶接電流	180-200 (A)
アーク電圧	11-12 (V)
溶接速度	8 (cm/min)
積層方法	12層 26パス
シールドガス	Ar
シールドガス流量	15 (L/min)
パス間温度	150 (°C以下)



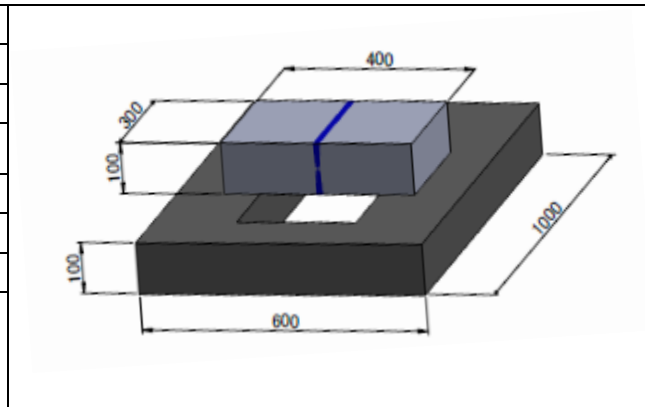
溶接線方向残留応力

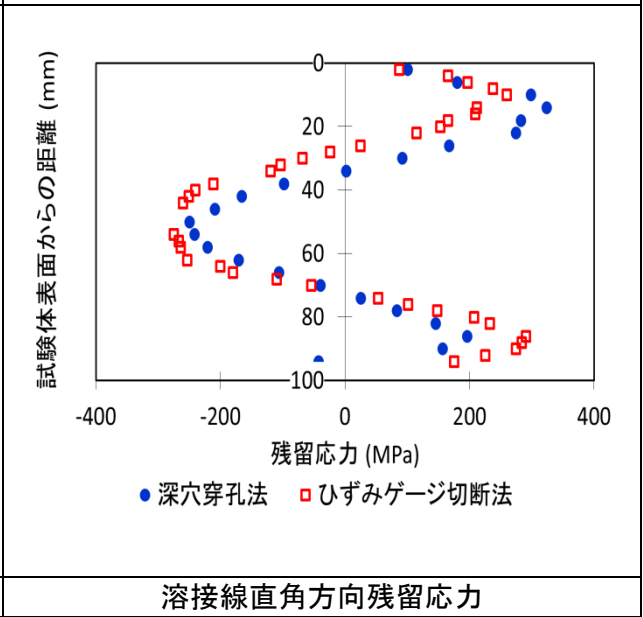
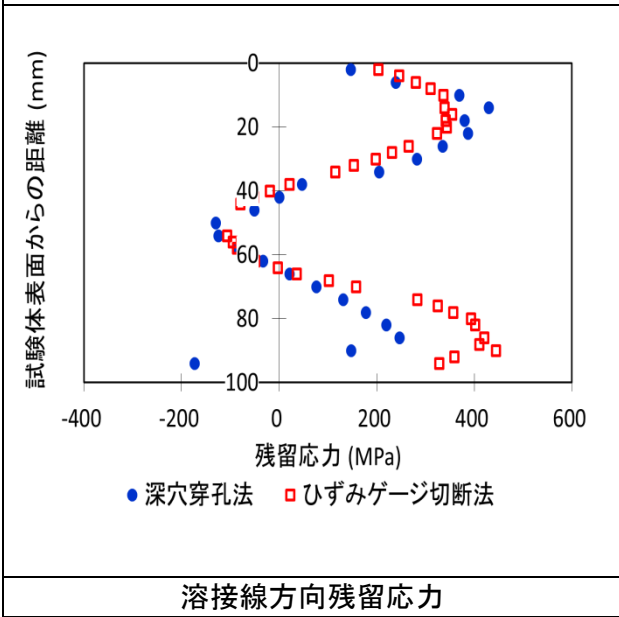
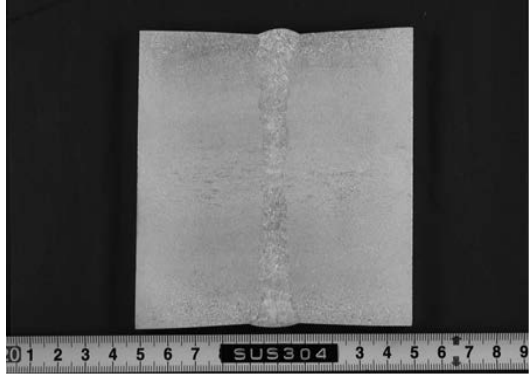
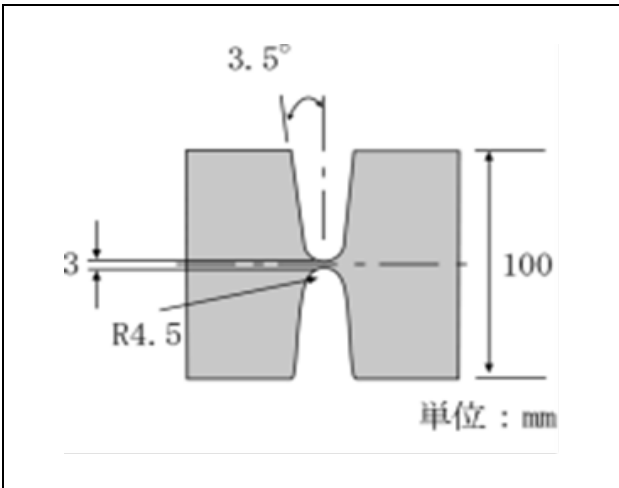


溶接線直角方向残留応力

■狭開先平板溶接試験体

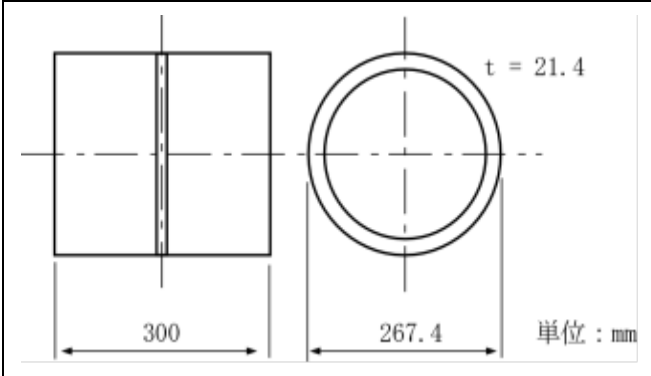
母材	SUS304
拘束板	SM490
溶接材料	JIS Z 3321 YS308 (1.2mm φ)
溶接電流	約 250-300 (A)
アーク電圧	約 10-12 (V)
溶接速度	5.5-8.0 (cm/min)
積層方法	35層 35パス
パス間温度	150°C以下

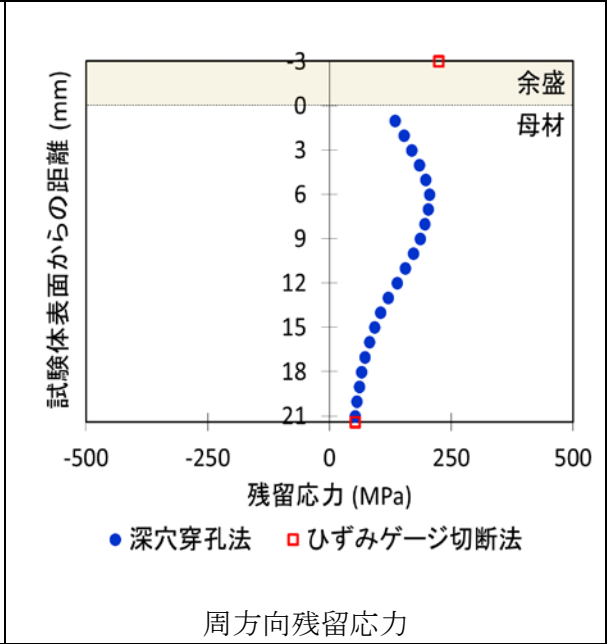
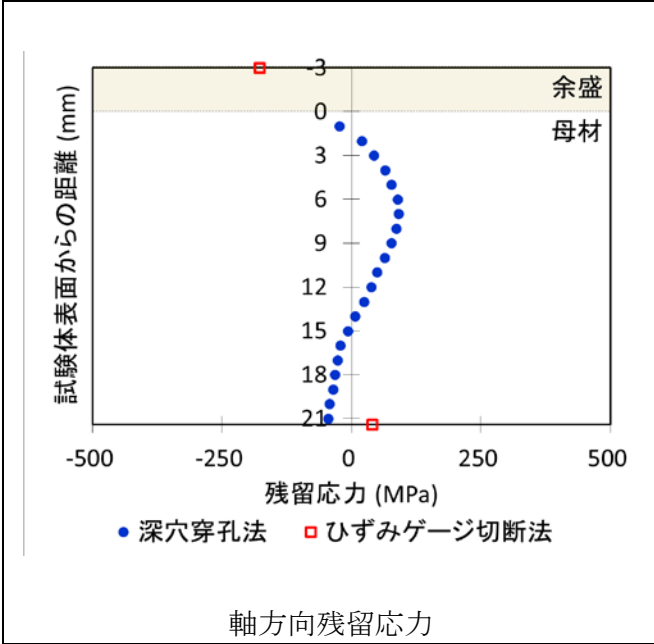
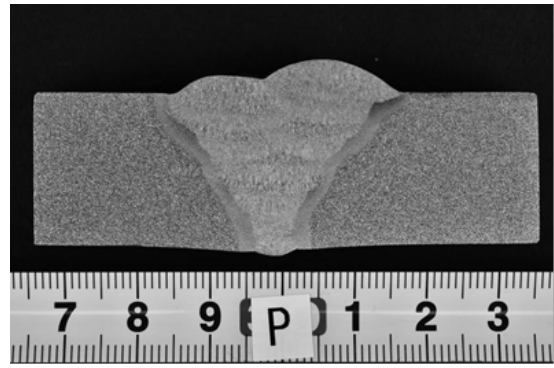
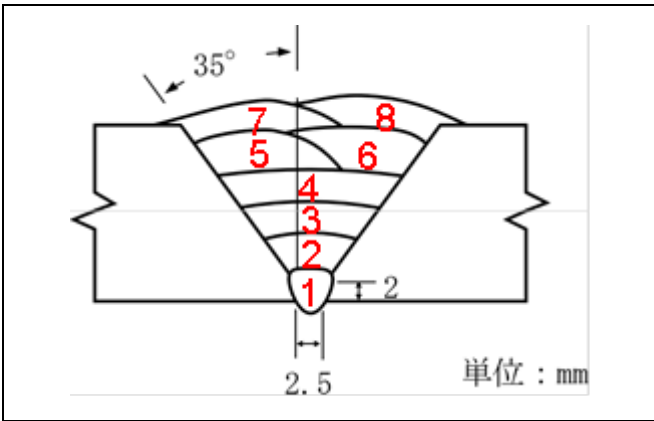




■ 円筒突合せ溶接試験体

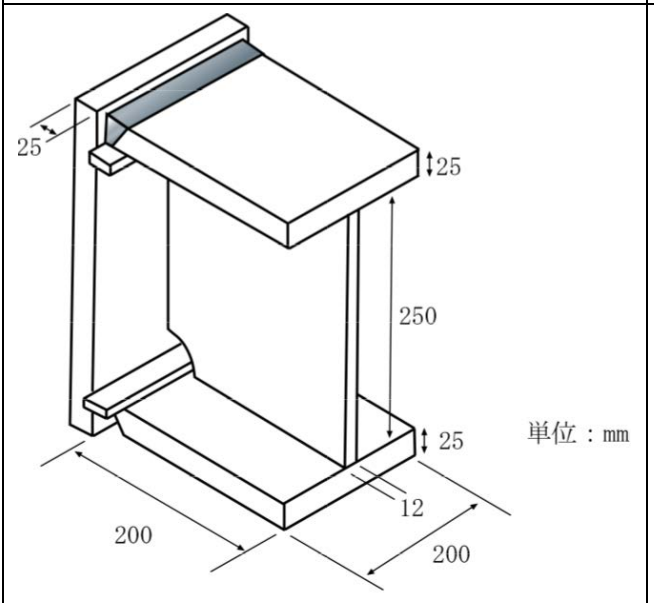
母材	STPT370
溶接材料 (初層)	JIS Z 3211 E4316 (3.2mm φ)
溶接材料 (2層)	JIS Z 3211 E4316 (3.2mm φ)
溶接材料 (3-6層)	JIS Z 3211 E4316 (4.0mm φ)
溶接電流	100-170 (A)
アーク電圧	22-24 (V)
溶接速度	4.0-5.9 (cm/min)

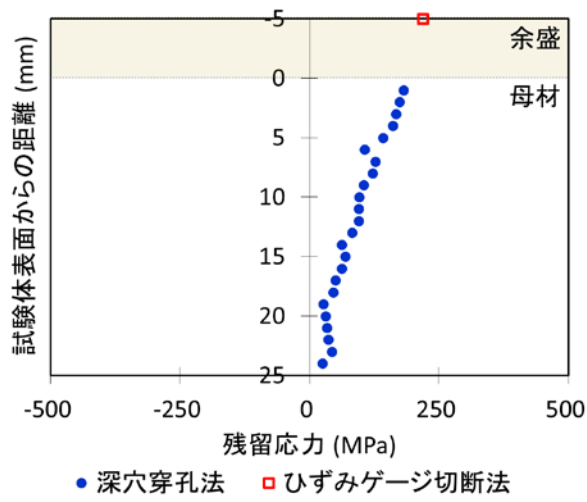
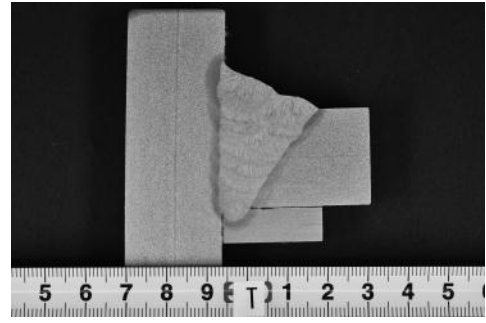
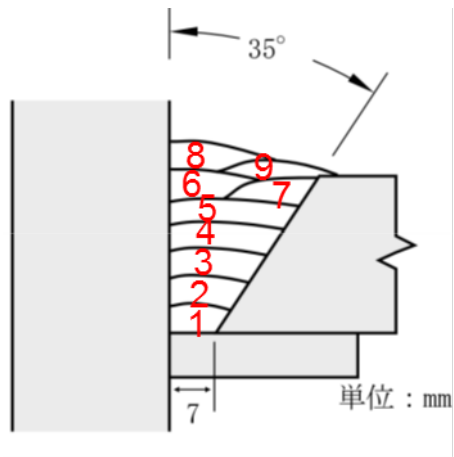




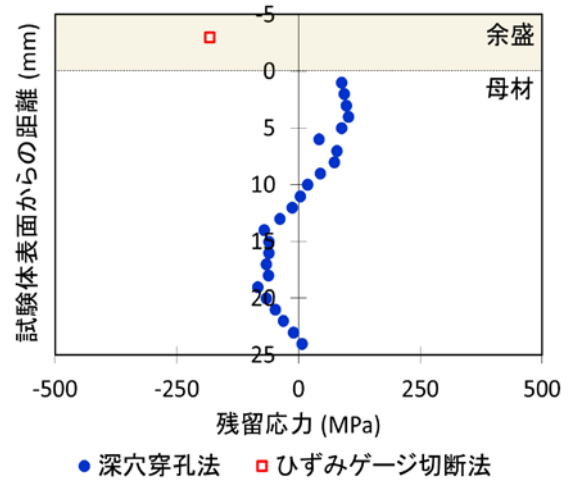
■ T型突合せ溶接試験体（鉄骨溶接試験体）

母材	SM490A
溶接材料	JIS Z 3312 YGW11 (1.2mm φ)
溶接電流	270 (A)
アーク電圧	32 (V)
溶接速度	18-26 (cm/min)





溶接線方向



溶接線直角方向

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

本研究では、三次元応力状態・応力分布を考慮した高精度な評価式を確立した。応力・変形状態は常に弾性状態であると過程すると二次元弾性体および三次元弾性体において厳密解が導出可能である。又、二次元体における塑性変形を考慮した厳密解も導出可能である。弾性体の二次元と三次元の関係性を考慮して、弾塑性体の二次元性と三次元性の関係を各種補正により拡張することで三次元弾塑性体の近似解を得ている。本評価式を用いた改良型深穴穿孔法（以下、開発法という。）で算出した残留応力値と理論値との応力測定誤差が±5MPa以内であることを数値解析上で検証した。

開発法は穴あけ・孔径計測・トレパニング・孔径/円筒伸び/円筒傾きの加工・計測から得られた情報より残留応力を算出する。これらの加工・計測を可能とする可搬性・迅速性を有するフレキシブル装置を開発した。フレキシブル装置にて穴あけ加工、孔径計測、トレパニング加工、円筒伸び・傾き計測が実際に可能であることを検証した。

開発法で得られた残留応力値とひずみゲージ切断法で得られた残留応力値が十分一致したデータであることを溶接試験体（ビードオンプレート溶接試験体・平板突合せ溶接試験体・狭開先溶接試験体・円筒溶接試験体・鉄骨溶接試験体）で検証した。

3-2 研究開発後の課題

フレキシブルな加工装置において、トレパニング加工深さが現状 35mm まで検証しかできていない。そのため、現地測定での制約がある。放電加工をフレキシブル装置に取り入れる等の対応が必要である。また、ヒアリングにより穴あけ加工時等の機械加工により新たな残留応力が付与されているのではないかとの質問を受けることがある。影響は無視できるほど小さいと考えるが、明確に根拠を示せていない。塑性ひずみ範囲をもとに FEM 解析で応力への影響確認を実施予定である。

3-3 事業化展開

株式会社山本金属製作所と神鋼溶接サービス株式会社との間で販売代理店契約を締結しており、両社での協力体制のもと営業活動を実施していく。内部残留応力の計測サービスを基本としながら、表面の残留応力計測や応力計測機器の開発・製造・販売、応力検査を必要とする素材や部品、施工方法等残留応力に関するソリューションサービスを展開していく予定である。