

卒業論文

「簡易形状溶接部の残留応力に対する
有限要素法解析の精度検証」

1 P ~ 46P 完

平成18年2月3日提出

指導教員 酒井 信介 教授

40185 川口 展宏

目次

図目次	4
表目次	6
第 1 章 序論	7
1 - 1 研究背景	8
1-1-1 原子力施設における配管機器損傷報告	
1-1-2 有限要素法による残留応力評価手法	
1-1-3 解析による評価手法の現状と本研究の目的	
1 - 2 本論文の構成	10
第 2 章 解析対象と測定・解析手順	11
2 - 1 ビードオンプレート試験体	12
2-1-1 試験体・測定手順	
2-1-2 残留応力の発生	
2 - 2 解析手順	16
第 3 章 二次元モデルでの解析	17
3 - 1 モデリング	18
3 - 2 伝熱解析条件	20
3-2-1 伝熱解析用物性値	
3-2-2 入熱条件	
3 - 3 伝熱解析結果	22
3 - 4 構造解析条件	24
3-4-1 構造解析用物性値	
3-4-2 拘束条件・応力場近似条件	
3 - 5 構造解析結果	26
3 - 6 結言	31
第 4 章 三次元モデルでの解析	32
4 - 1 モデリング	33
4 - 2 モデル形状の変更が二次元解析結果に与える影響	34

4 - 3	伝熱解析.....	35
4-3-1	解析条件	
4-3-2	解析結果	
4 - 4	構造解析.....	37
4-4-1	解析条件	
4-4-2	解析結果	
4 - 5	結言.....	42
第 5 章	考察.....	43
謝辞		45
参考文献		46

図目次

図番号	図名	頁
1 - 1	米国ドレスデン原発の配管ひび割れ発生部の拡大説明図	8
2 - 1	入熱モデル	1 2
2 - 2	伝熱計測	1 2
2 - 3	切断片	1 3
2 - 4	四角柱片	1 3
2 - 5	残留応力発生原理説明図	1 5
2 - 6	応力ひずみ曲線	1 5
3 - 1	B O Pモデル	1 8
3 - 2	B O Pモデル入熱部付近拡大図	1 8
3 - 3	メッシュ図	1 8
3 - 4	入熱部付近の要素拡大図	1 9
3 - 5	入熱曲線	2 1
3 - 6	溶接止端部	2 2
3 - 7	入熱効率による最高到達温度比較	2 2
3 - 8	プレート表面での節点ごとの温度履歴	2 3
3 - 9	応力ひずみ曲線	2 4
3 - 1 0	温度に依存した降伏応力値	2 5
3 - 1 1	拘束条件	2 5
3 - 1 2	平面ひずみモデルでの 溶接線方向残留応力分布コンター図	2 6
3 - 1 3	一般化平面ひずみモデルでの 溶接線方向残留応力分布コンター図	2 6
3 - 1 4	プレート表面での溶接線方向応力の比較	2 7
3 - 1 5	平面ひずみモデルでの 溶接線直交方向残留応力分布コンター図	2 8
3 - 1 6	一般化平面ひずみモデルでの 溶接線直交方向残留応力分布コンター図	2 8
3 - 1 7	平面応力モデルでの 溶接線直交方向残留応力分布コンター図	2 9
3 - 1 8	プレート表面での溶接線直交方向応力の比較	2 9
3 - 1 9	各時刻における溶接線直交方向応力の分布コンター図	3 0

4 - 1	三次元モデルメッシュ図	3 3
4 - 2	三次元モデルメッシュ拡大図	3 3
4 - 3	モデル変更にもなうプレート表面での 溶接線方向残留応力の変化	3 4
4 - 4	発熱領域	3 5
4 - 5	発熱量の設定	3 6
4 - 6	測定と解析での最高到達温度分布の比較	3 6
4 - 7	拘束条件	3 7
4 - 8	溶接線方向残留応力分布コンター図	3 7
4 - 9	溶接線直交方向残留応力分布コンター図	3 8
4 - 1 0	溶接開始位置付近での 溶接線方向残留応力分布コンター図	3 8
4 - 1 1	溶接開始位置付近での 溶接線直交方向残留応力分布コンター図	3 9
4 - 1 2	溶接方向中間位置付近での 溶接線方向残留応力分布コンター図	4 0
4 - 1 3	溶接方向中間位置付近での 溶接線直交方向残留応力分布コンター図	4 0
4 - 1 4	プレート表面での溶接線方向応力の比較	4 1
4 - 1 5	プレート表面での溶接線直交方向応力の比較	4 1

表目次

表番号	表名	頁
3 - 1	伝熱解析用材料物性値	2 0
3 - 2	熱伝達係数による最高到達温度比較	2 3
3 - 3	弾塑性解析用材料物性値	2 5

第 1 章 序論

1 - 1 研究背景

1 - 1 - 1 原子力施設における配管機器損傷報告

一九七四年、米国ドレスデン原発2号機で再循環系のバイパス配管にひび割れが発生、その後、米国や国内で、再循環系配管など一次冷却系配管でもひび割れが次々と見つかった。図1-1はドレスデン原発での配管内のひび割れ部の図である。原子炉の再循環系は炉心への冷却水の供給量を調節し原子炉全体の出力の加減を司るアキレス腱である。報告例によると多くの配管ひび割れの原因となっていたのが応力による腐食であった。当時国内では応力腐食割れが発生すると電子顕微鏡写真で原因を究明しなければ配管の取り替え作業も行えず原子炉の停止期間も長くなり稼働率も下がった。そのため多くの偽装が行われたのである。

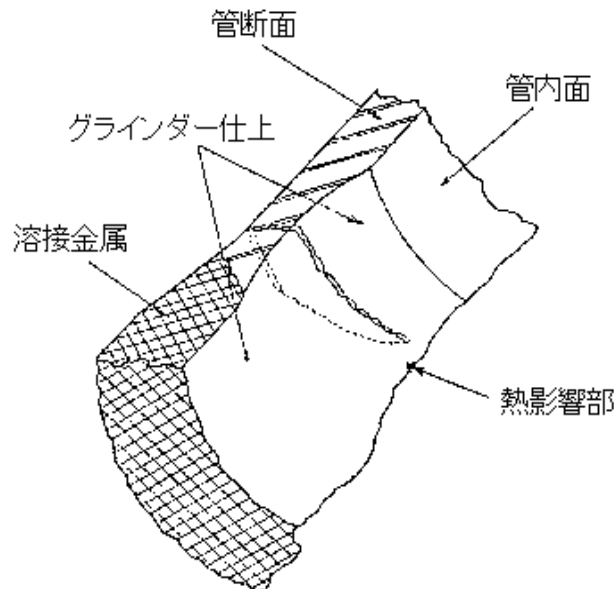


図 1-1 米国ドレスデン原発の配管ひび割れ発生部の拡大説明図[1]

腐食の多くは応力によって起こっているがその中でも最も影響が大きいと考えられるものの一つが溶接時に発生する残留応力である。溶接で2本の配管をつなぎ合わせる例だと溶接部の内側に引っ張りの残留応力が発生しこれが配管内部を流れる物質の影響と相重なって亀裂の進展を誘発する。疲労損傷には溶接継ぎ手形状や機械的性質、金属組成などの影響も大きい。溶接後の表面処理や焼き鈍し処理をしていない場合は溶接残留応力による影響が特に大きくなる。すなわち溶接時に発生する残留応力をしっかりと評価しておくことが疲労強度の評価の上で非常に重要だと言え、残留応力を正確に評価できる技術が望まれている。

1 - 1 - 2 有限要素法による残留応力評価手法[2]

有限要素法による溶接残留応力評価手法について述べる前にその他の評価手法について述べる。溶接残留応力は作業者や環境によってその都度異なったものとなるので実機溶接構造物の残留応力測定技術は重要なものとなる。実機ということでX線や中性子線、超音波を用いた非破壊計測は非常に有用であるが、実際には計測装置の移動や使用条件、計測対象部へのアクセス性を考慮すれば実際には計測不可能な箇所も多くある。また計測精度の面でもまだまだ成熟途中の技術である。たとえばX線による応力測定では表面近傍の残留応力は計測できても透過力が小さいので内部の応力は計測できない、といった問題がある。

そこで残留応力の解析的評価手法として、熱と応力の弾塑性挙動をシミュレートする熱弾塑性解析(非破壊的)と残留応力の発生源である固有ひずみを用いた弾性計算で残留応力を求める固有ひずみ法(破壊的)の適用が考えられる。このうち本論文では主に前者を扱った。

1 - 1 - 3 解析による評価手法の現状と本研究の目的

熱弾塑性解析、固有ひずみ解析のいずれにおいても基本的な二次元モデルでの残留応力の解析結果ですら定量的に実測値と良く一致した例は少なく、複雑な形状の実機構造物への適用は困難であるというのが現在の状況である。熱弾塑性解析においては二次元的なモデル化を出来るものならまだしも、単純な三次元的なモデルの解析においても最高の処理能力を持ったコンピュータを持ってしても計算に非常に時間がかかり、それが複雑な実機構造物となると計算時間とデータ量は膨大なものとなる。また、多くの企業や研究機関で実際の構造物に即したモデルでの有限要素法による残留応力解析の精度向上に関する研究が行われている反面、平板や配管の突き合わせといった基本的な形状については実機構造にはほとんど存在しないか、存在しても疲労損傷が比較的起こりにくい場所であるがゆえ研究自体があまり行われていない。そこで、複雑形状部においての有限要素法による溶接残留応力解析の精度向上を目指すための基礎研究として、簡易形状溶接部における溶接残留応力解析の精度検証を本研究の目的とした。

1 - 2 本論文の構成

本論文では第1章で溶接残留応力の有限要素法による解析が行われる背景と現状、本研究の目的を述べた。第2章では解析対象となるビードオンプレートの試験体についての測定手順と溶接残留応力の発生原理、解析の手順、モデルを説明する。第3章では二次元モデルでの解析条件、解析結果をあげ第4章では三次元モデルでの解析条件、解析結果をあげて評価をする。最後に第5章で結論とこれからの課題を述べる。

第 2 章 解析対象と測定・解析手順

2 - 1 ビードオンプレート試験体

2 - 1 - 1 試験体・測定手順

まず基本的な形状部ということで図 2 - 1 のように平板の上に溶接線を一本のせたビードオンプレートモデル(以下 B O P モデル)での精度検証を行う。はじめにこの実験は(財)発電設備技術検査協会が平成 1 5 年度に行った実験[3]であることを断っておく。

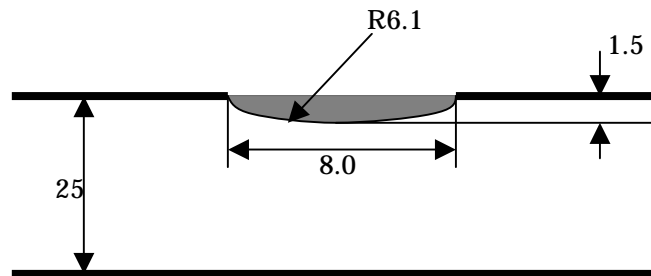


図 2-1 入熱モデル

溶接条件としては G T A W (gas tungsten arc welding) を高速・高電流でおこなった。電流は 2 2 3 ~ 2 2 5 [A] 電圧は 1 1 . 0 ~ 1 1 . 1 [V] である。また、母材はオーステナイト系ステンレス鋼 S U S 3 0 4 で溶接金属は Y 3 0 8 L である。

G T A W はティグ(tungsten inert gas)溶接とも呼ばれ、アルゴンやヘリウムのような不活性ガス中でタングステン電極と母材の間にアークを発生させ溶接する方法で最もポピュラーな溶接方法の一つである[4]。G T A W の特徴としては不活性ガスを用いて溶接部をシールドするのでアルミニウムやチタンなどの非鉄金属をはじめ様々な金属の溶接に適用でき高品質な溶接が可能だが、作業能率(溶接速度)が比較的低いという欠点もある。その理由としてはタングステンの融点が非常に高く非消耗性の電極のため溶着金属を必要とする場合には溶加棒を利用して溶融池に溶着金属を添加しなければならないからである。このことは溶加材の供給速度によって母材への入熱とは独立に溶着金属量を制御できることも意味している。

温度の測定はプレート表面上で溶接開始位置から 120mm 付近と 300mm 付近で熱電対を取り付けて行った。

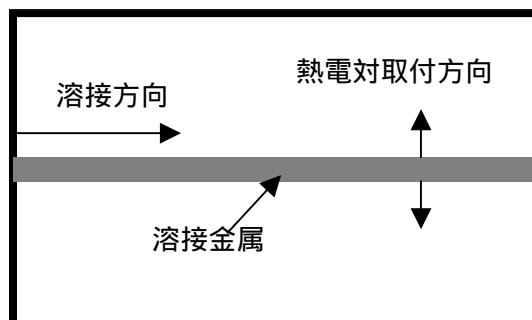


図 2-2 伝熱計測

また、残留応力についてはひずみゲージを用いて計測した。主な計測手順は次の通りである [5]。

ひずみゲージの貼り付け

試験体に溶接を行い十分に温度が下がるのを待ってから、ひずみゲージの貼り付け面を平滑な面にした後にひずみゲージを貼り付けた。ゲージの保護のためにゴム系溶剤型のコーティングを塗布した。

基準となるひずみを測定

ゲージ貼り付け後結線しひずみゲージの上をわずかに押しつけ断線、剥離がないことを確認してからひずみゲージの零点を測定した。

試験体の切断とひずみの測定

結線をはずした後にまず図 2 - 3 のように溶接進行方向に中間付近で溶接線と垂直方向に切断し 10 ~ 15 ミリ程度の厚さの切断片を得た。さらに図 2 - 4 のように溶接線と平行な方向に切断し 10 ~ 15 ミリ角の四角柱片を切り出した。この切断片は切断前には上下面に 2 軸ひずみゲージを張っておいた。

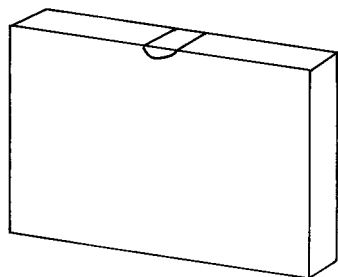


図 2-3 切断片

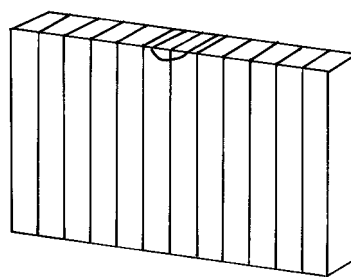


図 2-4 四角柱片

ここで溶接線方向を x 方向、溶接線直交方向を y 方向、板厚方向を z 方向とする。図 2 - 3 のような切断をした時ひずみゲージを張った位置では x 方向の残留応力が解放され、さらに図 2 - 4 のように切断すれば y 方向の残留応力も解放される。応力を解放した測定表面で平面応力状態が成り立っているとすると、これらの残留応力が x 、 y 方向に関して無応力状態になることで解放されたひずみを x 、 y 、 z と表せばこれらは次のような式で表される。

$$\varepsilon_x = -\left(\frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E}\right) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_y = -\left(\frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E}\right) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_z = -\left(-\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E}\right) \quad (2.3)$$

ここでは2軸ゲージによって x , y は計測されるので (2.1) (2.2) から次のように x , y 方向の残留応力が求められる。

$$\sigma_x = -E(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)/(1-\nu^2) \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = -E(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)/(1-\nu^2) \quad (2.5)$$

ただし E はヤング率で ν はポアソン比で、
 $E=1.985(\text{GPa})$
 $\nu=0.294$
 とした。

2 - 1 - 2 溶接残留応力の発生[6]

溶接過程は金属が非常に高温になるので大きな熱応力が発生し残留応力が生じるが、熱応力が発生すれば必ず残留応力が生じる訳ではない。例えば金属を熱湯に入れたり、金属に熱湯をかけた程度では残留応力は生じない。これらの場合では金属の内部と外表面で大きな温度差が生まれ外表面は大きく膨張しようとし圧縮応力が発生する。しかし時間がたてば次第に温度は内外で均一となっていく熱応力は小さくなり最終的には零となる。ただ、これは熱応力によって塑性ひずみが発生していないことが条件となる。

ではここで溶接時のように熱応力から塑性ひずみが発生し残留応力が生じる原理を簡単なモデルを用いて説明する。次の図2 - 5 は両端が剛壁に固定されている棒が熱応力を受けるモデルである。簡単のため棒全体に均一に加熱され、棒は両端が完全に剛壁に固定されているために温度を変えても長さが変わらないものとする。

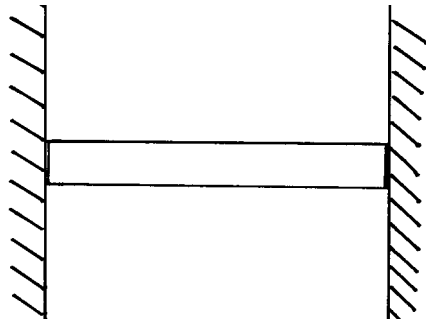


図 2-5 残留応力発生原理説明図

まず棒に加熱をしていくことを考える。棒は温度が上がるので膨張しようとするが両端を剛壁によって固定されているためにその長さは変わらない。つまり拘束がなければ本来加熱によって伸びていた分だけ棒は圧縮方向に熱ひずみを受ける。このとき棒が受ける圧縮応力が降伏応力を越えていなければ（Aに達していなければ）変化は弾性変化のみとなり加熱を止め温度がはじめの状態に戻ったときに応力は残らないが、圧縮応力が降伏応力を越える域にまで達した場合は圧縮塑性ひずみを生じ（A B）温度がはじめの状態に戻って熱ひずみが全てなくなったとき棒には引っ張りの応力が残る（B D）

ここで十分に高温にまで加熱すると冷却時には降伏応力と同じ程度の残留応力が生じる（B C D）

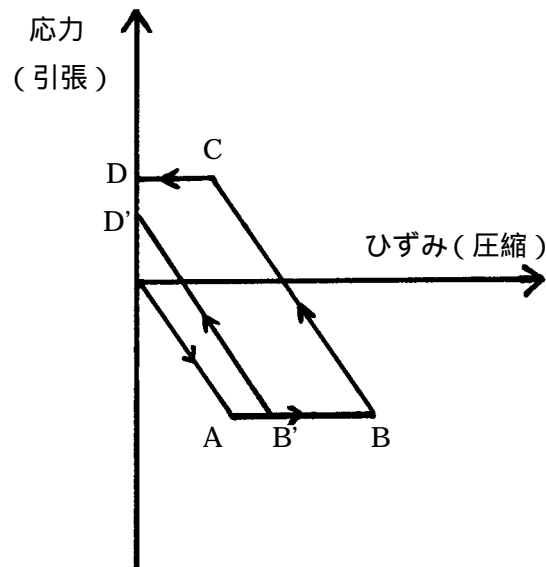


図 2-6 応力ひずみ曲線

実際の溶接時の挙動では剛壁は存在しないが、入熱部に近いほど高温となりその温度は1000以上にもなるため非常に大きな温度勾配が生じ、それにもなって発生する熱ひずみも大きなものになるので熱応力が降伏領域にまで達し残留応力を生み出すと考えられる。

2 - 2 解析手順

解析は汎用有限要素法解析ソフトANSYS 9.0を用いて熱弾塑性解析を行った。熱弾塑性解析とは溶接による温度変化などに起因して残留応力が発生する挙動を有限要素法を用いて逐一解析していく手法である。溶接過程を模擬した時刻歴の伝熱解析を行い、得られた温度履歴を構造解析の熱荷重として与えて各時刻での材料の非線形性を考慮した熱応力解析を行い、その応力履歴の最終分布である残留応力分布を得る、というのが主な流れである。具体的にANSYS上での熱弾塑性解析の手順をまとめると次のようになる。

非定常伝熱解析

- ・モデルの作成
- ・伝熱用物性値の入力
- ・要素タイプの選択
- ・メッシング
- ・境界条件（熱伝達・発熱等）の設定
- ・時刻歴解析 接点解を保存

非定常構造解析

- ・要素タイプの変更
- ・構造用物性値の入力
- ・境界条件（伝熱の境界条件の消去、変位と回転の拘束、熱荷重の付加）
- ・時刻歴解析（最終ステップ）残留応力

一般に伝熱 構造、流体 構造、電磁場 伝熱などといった連成解析を行うときはひとつの場（ここでは伝熱）がもう一方の場（ここでは構造）に大きく影響を与えるが逆方向の影響はあまり大きくないときはそれを無視して一方向連成解析を行う。また、両方の場がそれぞれに大きく影響を与え合うときは双方向連成解析を行う必要があり計算処理に要する時間も一方向の解析に比較して大きくなる。今回の解析では応力場が伝熱場に与える影響が小さいもので無視できるとし、非定常伝熱解析から非定常構造解析への一方向の連成解析を行った。

第 3 章 二次元モデルでの解析

3 - 1 モデリング

まず解析を行うにあたって図3 - 1のような溶接線直交断面にあたる二次元モデルを作成した。図左上のオレンジ色のエリアを溶接金属部、その周りの黄色のエリアを熱影響部、その他の緑色のエリアを母材金属部とした。ここで熱影響部の大きさはだいたい材料が融解する温度に近い1000 に達する領域をあらかじめおおよその見当で決めたものである(実際に後の解析結果を見るとおおよそではあるが領域の広さは合っている)。また、BOPモデルは溶接線直下の断面について対称なモデルであるから解析に用いるのは1 / 2モデルとした。

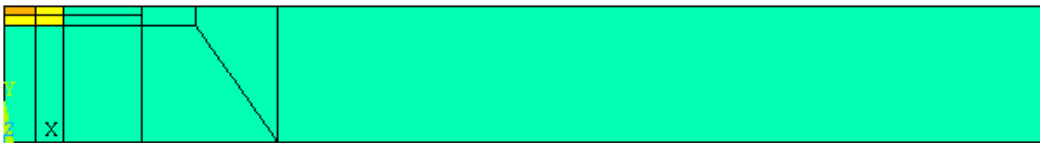


図 3-1 BOP モデル

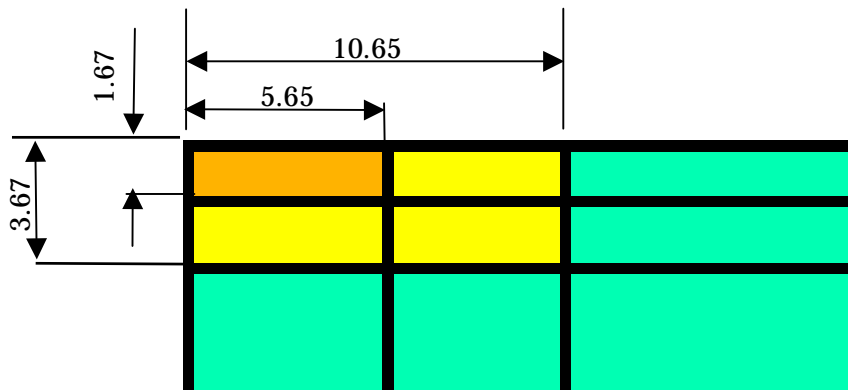


図 3-2 BOP モデル入熱部付近拡大図

次に要素タイプを二次元八節点伝熱要素の P L A N E 7 7 に決定し全て四角形で図3 - 3のようにメッシュを切った。図3 - 4は入熱部付近の要素拡大図である。

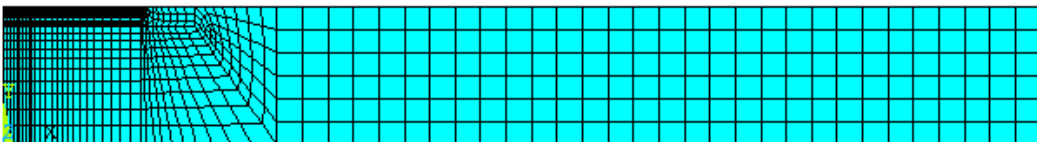


図 3-3 メッシュ図 (1020Elements,3229Nodes)

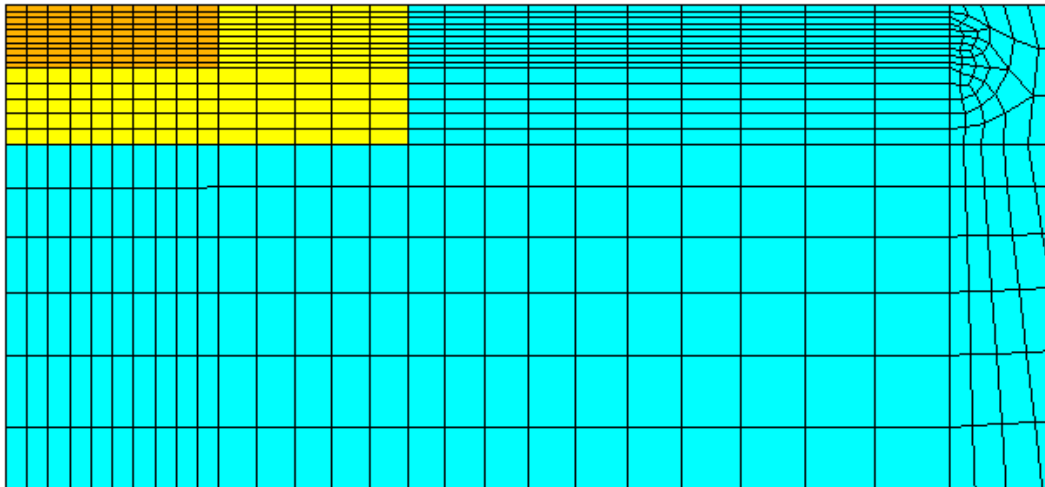


図 3-4 入熱部付近の要素拡大図

3 - 2 伝熱解析条件

3 - 2 - 1 伝熱解析用物性値

伝熱解析で重要なのは実際に即した温度履歴を得ることである。各節点の温度履歴が実験値から大きく違わなければよいので、今回は入熱部・熱影響部・母材金属部において単一の物性値 (S U S 3 0 4) を用いて解析を行った。また伝熱・構造解析ともに温度依存性の物性値が必要となるが今回これは望月正人の論文集[2]の値を用いた。伝熱解析において必要とされる物性値は熱伝導率、比熱、密度である。表 3 - 1 が実際に計算に用いた値である。

表 3-1 伝熱解析用材料物性値

temp[]	kxx[W/mk]	c[J/kgK]	dens[kg/m_3]
20	14.6	452	7860
100	15.6	493	7820
300	18	543	7750
600	22.4	578	7630
800	25.1	599	7570
1000	27.6	620	7500
1100	28.8	630	7500
2000	41.2	730	7500

また熱源は入熱部が発熱すると模擬し、プレートの外表面には一様の熱伝達係数を設定した。今回のモデルは 1 / 2 対称モデルなので対称面には断熱条件を与えた。これは対称面の両側においては温度が等しいためフーリエの法則から熱流束が零となると考えられるからである。

3 - 2 - 2 入熱条件

温度計測の結果に合うように入熱条件を検討した。入熱は 1 パス (複数回に分けて入熱しない) で行い参照温度は 2 5 とした。

立ち上り時間

溶接棒が通り始めてから発熱が始まり、溶接棒の中心が通るときに発熱が最大になるよう模擬した。すなわち溶接棒の速度が 2.33mm/s で半径が 5.65mm なので発熱のピークは 2.42 秒とした。(図 3 - 5) 減熱時間は温度計測結果に合うよう調整した。

入熱量

平均電流が 224A、平均電圧が 11.1V で溶接棒速度が 2.33mm/s なので単位厚さあたりの入熱量は 1067J/mm である。実際には入熱時に 30 ~ 60 % 程度の熱損失が生じているので入熱効率 を乗じたものを単位厚さあたりの発熱量とした。解析結果が実験結果に良く合うように を選択した。

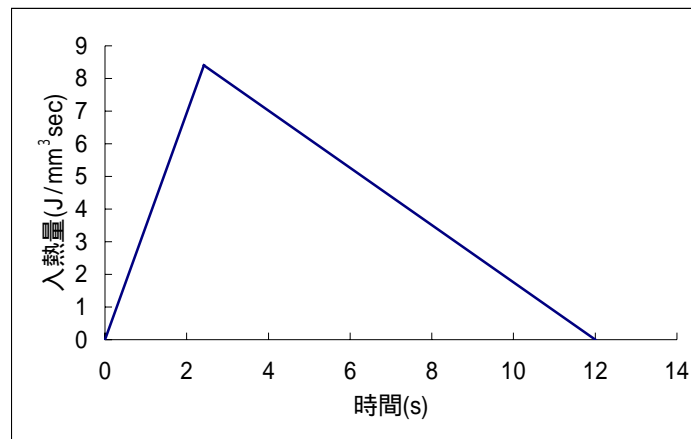


図 3-5 入熱曲線

3 - 3 伝熱解析結果

入熱効率を変えて熱伝達係数 $5.0[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ としプレート表面上で溶接止端部（図 3 - 6）からの距離ごとに最高到達温度を実験値と比較したのが図 3 - 7 である。また熱伝達係数が $5.0[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ と $7.5[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ の二つの場合で解析を行った。表 3 - 2 は各熱伝達係数を設定したときの止端部からの距離ごとの最高到達温度の表である。この表からもわかるように熱伝達係数の最高到達温度への感度は非常に小さかった。入熱効率の最高到達温度への感度は大きかった。最終的には熱伝達係数を $5.0[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ で、 $\eta=0.44$ とした時の伝熱解析結果を用いて構造解析を行った。比較する実験値は（財）発電設備技術検査協会の平成 15 年度の「複雑形状部機器配管健全性実証事業に関する報告書」[3]より用いている。図 3 - 8 は熱伝達係数 $5.0[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ で $\eta=0.44$ での伝熱解析を行ったときの各節点温度の時刻歴データである。

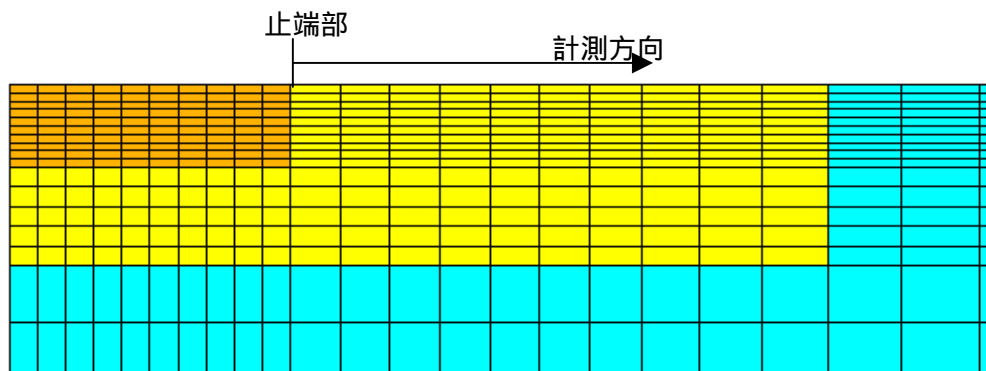


図 3-6 溶接止端部

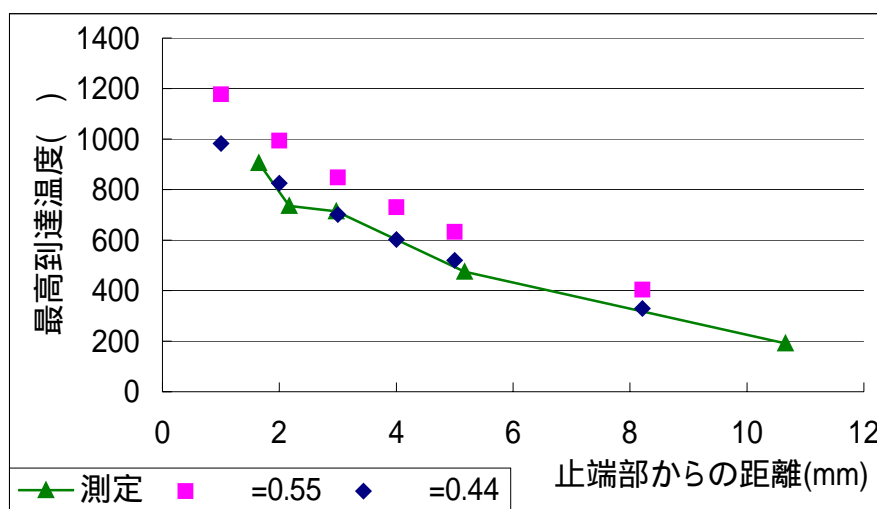


図 3-7 入熱効率による最高到達温度比較

表 3-2 熱伝達係数による最高到達温度比較

距離(mm)	case1 最高 到達温度 ()	case2 最高 到達温度 ()
1	981.7	981.2
2	824.8	824.2
3	701.8	701.2
4	602.2	601.7
5	519.9	519.4
8.21	329.4	329

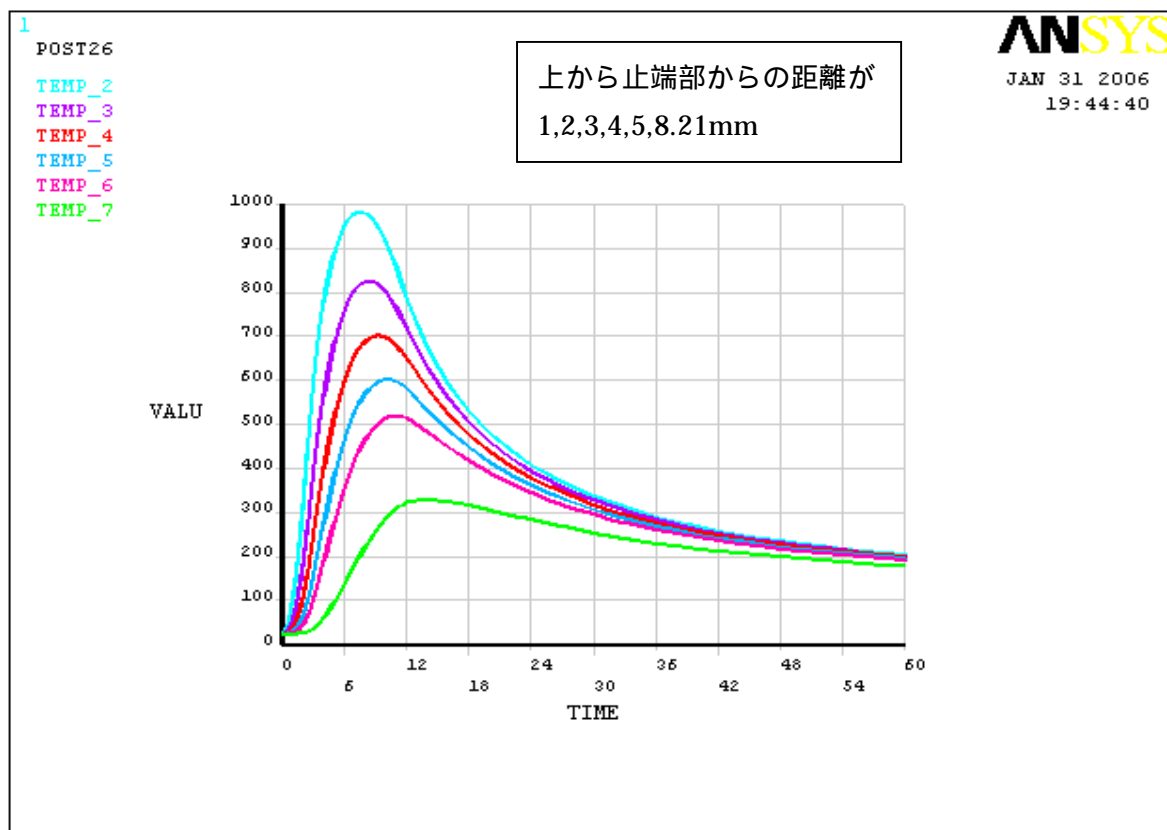


図 3-8 プレート表面での節点ごとの温度履歴

3 - 4 構造解析条件

3 - 4 - 1 構造解析用物性値

伝熱解析で得た全節点の各時刻での温度データを熱荷重としてランプ荷重で与え、熱弾塑性解析を行った。弾塑性解析を行うにあたって材料の降伏はミーゼスの降伏条件に従うとし硬化則については移動硬化則を用いた。応力ひずみ曲線については材料降伏後のひずみ硬化係数をもちいて図3 - 9のように二直線近似とした。図3 - 9は溶接金属部の20の時の応力ひずみ曲線である。また、降伏応力については溶接の熱影響による組織変化を考慮して図3 - 10のように入熱部、熱影響部、母材金属部によって異なる値を用いた。溶接時の挙動を模擬するために、力学的に強度を持たなくなると考えられる温度を溶融温度とし溶融温度以上でのヤング率、降伏応力に関しては0に近い値を用いた。今回の解析では溶融温度を1000と考えたが1000からごくわずかな温度変化の間にヤング率と降伏応力とひずみ硬化係数を0に近い値に落とすと計算が収束しなくなったので1000から1100の間で若干緩やかにヤング率、降伏応力、ひずみ硬化係数を落とした。ちなみに1100での物性値を収束する範囲内である程度振ってみたが高温物性値は最終的な結果にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。実際に解析に用いた物性値は表3 - 3に示した。ポアソン比は温度非依存で0.3としたので表からは割愛した。また要素タイプを平面ひずみ、平面応力モデルでは二次元八節点構造要素PLANE82に、一般化平面ひずみモデルではPLANE183に変更した。

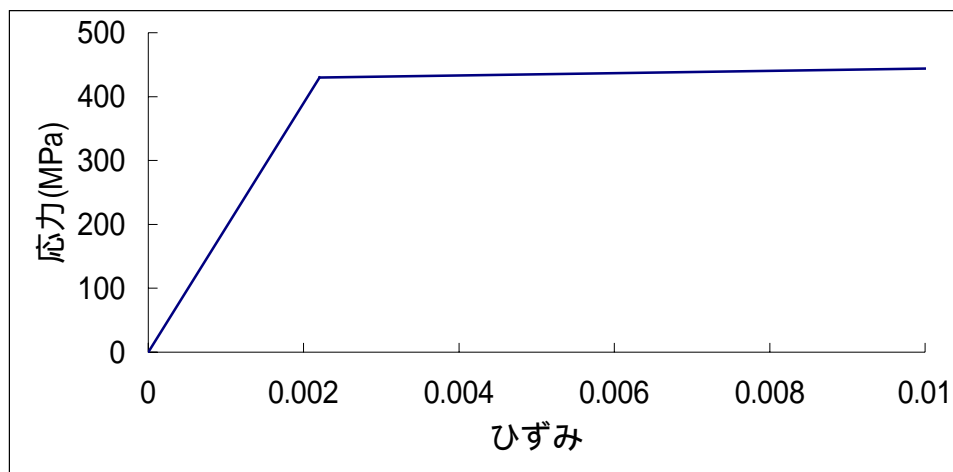


図 3-9 応力ひずみ線図

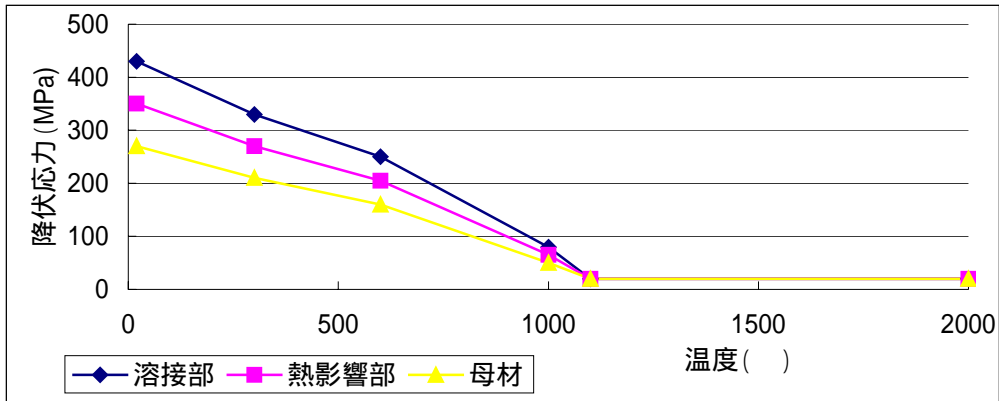


図 3-10 温度に依存した降伏応力値

表 3-3 弾塑性解析用材料物性値

温度 (°C)	ヤング率 (Mpa)	溶接金属 降伏応力 (MPa)	熱影響部 降伏応力 (Mpa)	母材金属 降伏応力 (Mpa)	ひずみ硬化係数 (Mpa)	線膨張係数 (10 ⁻⁵ /°C)
20	195000	430	350	270	1800	1.52
100	190000					1.59
300	176000	330	270	210	1710	1.71
600	152000	250	205	160	1600	1.86
800	97000					1.94
1000	48000	80	65	50	1440	2
1100	1000	20	20	20	100	2.04
2000	1000	20	20	20	100	2.36

3 - 4 - 2 拘束条件・応力場近似条件

今回のモデルは 1 / 2 対称モデルなので境界条件として図 3 - 1 1 のように対称面上の節点を全て対称面垂直方向 (溶接線直交方向) に拘束し、対称面の下端の節点を板厚方向に拘束した。また、三次元モデルで解析した場合と比較するために平面ひずみ場近似だけでなく平面応力場近似、一般化平面ひずみ場近似でも解析を行った。

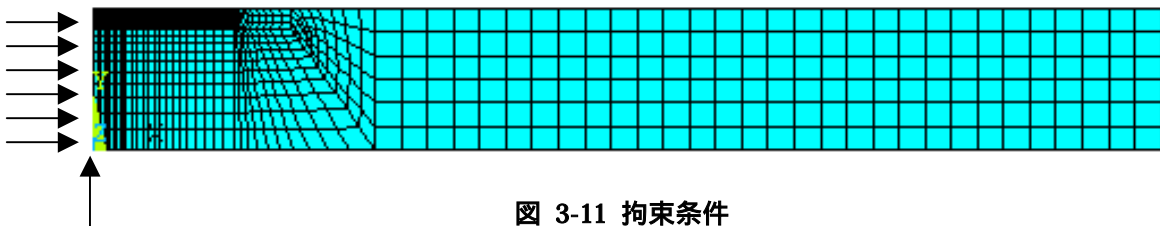


図 3-11 拘束条件

3 - 5 構造解析結果

次の2つの図は順に平面ひずみ、一般化平面ひずみモデルでの溶接線方向応力の分布拡大図である。平面応力場では溶接線方向の応力は全て零となるので図は割愛した。

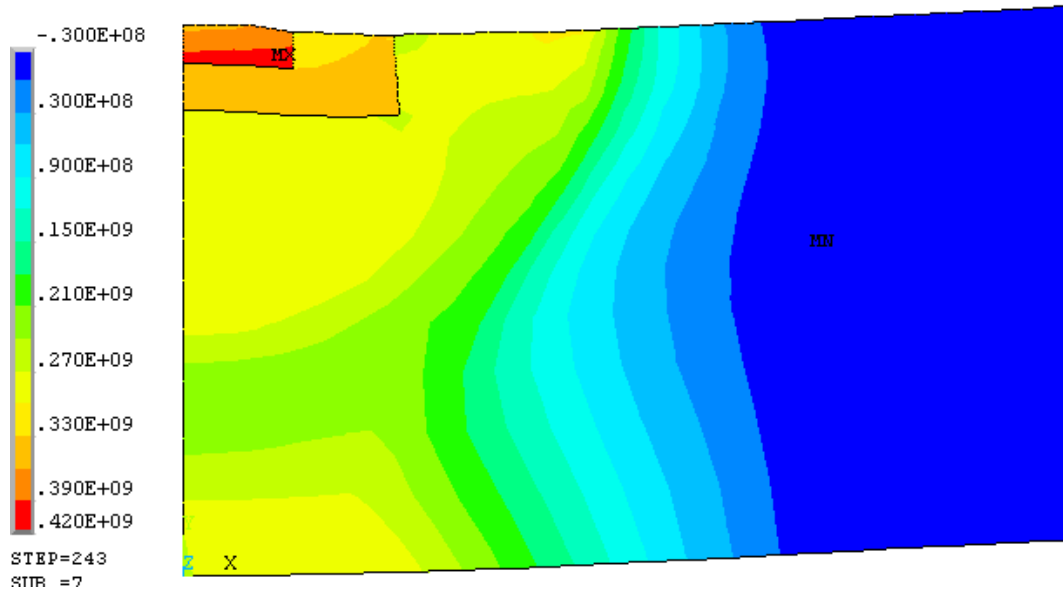


図 3-12 平面ひずみモデルでの溶接線方向残留応力分布コンター図

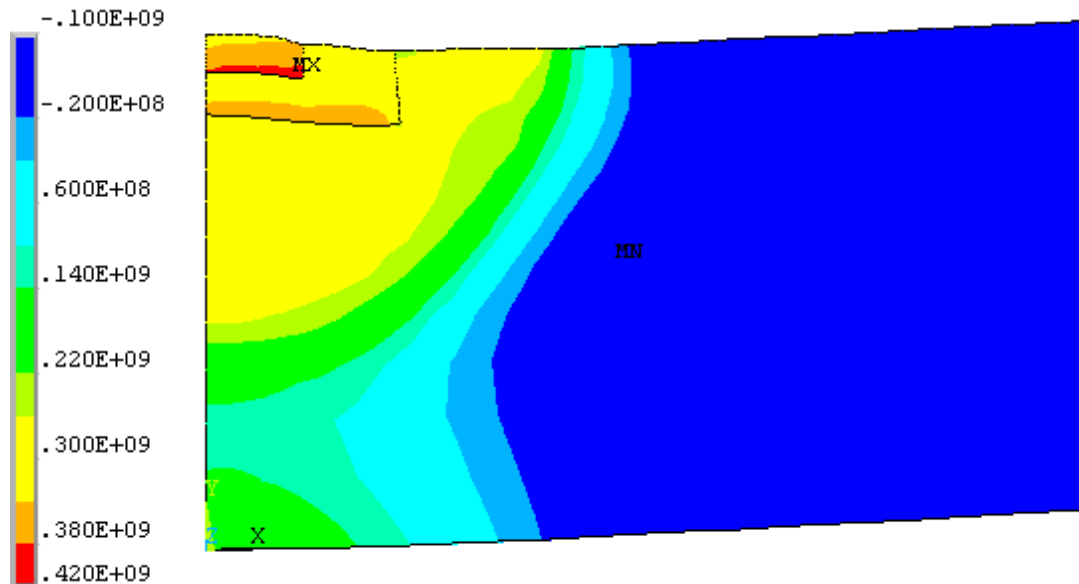


図 3-13 一般化平面ひずみモデルでの溶接線方向残留応力分布コンター図

解析と実験の結果とも溶接線方向には入熱部付近に非常に大きな残留応力が発生した。コンター図や下の図3 - 14からもわかるように平面ひずみモデルと一般化平面ひずみモデルでは残留応力の分布傾向は全体として非常に似たようなものとなったが若干異なる点も見受けられた。図3 - 14はプレート表面での溶接線方向応力の分布図である。大きく目につくところでは溶接部から離れたところでの圧縮残留応力の大きさに差が見られた。平面ひずみモデルでは最大でも30 Mpa程度とあまり大きな応力は発生しなかったが一般化平面ひずみモデルでは最大100 Mpa程度の圧縮応力が発生した。これは一般化平面ひずみモデルでは溶接線方向への均一な変位が許されるので溶接線方向に関しては圧縮側のひずみが生じ平面ひずみモデルのときより大きな圧縮応力が発生するものと考えられる。同じことから引っ張り残留応力の最大値も一般化平面ひずみモデルの方が全体が圧縮側にひずむ傾向にあるので小さくなっていると考えることが出来る。また解析上では入熱部と熱影響部（HAZ：heat affected zone）、熱影響部と母材金属部の境では物性値が異なるため残留応力の値が急激に変化しているのが見受けられる。

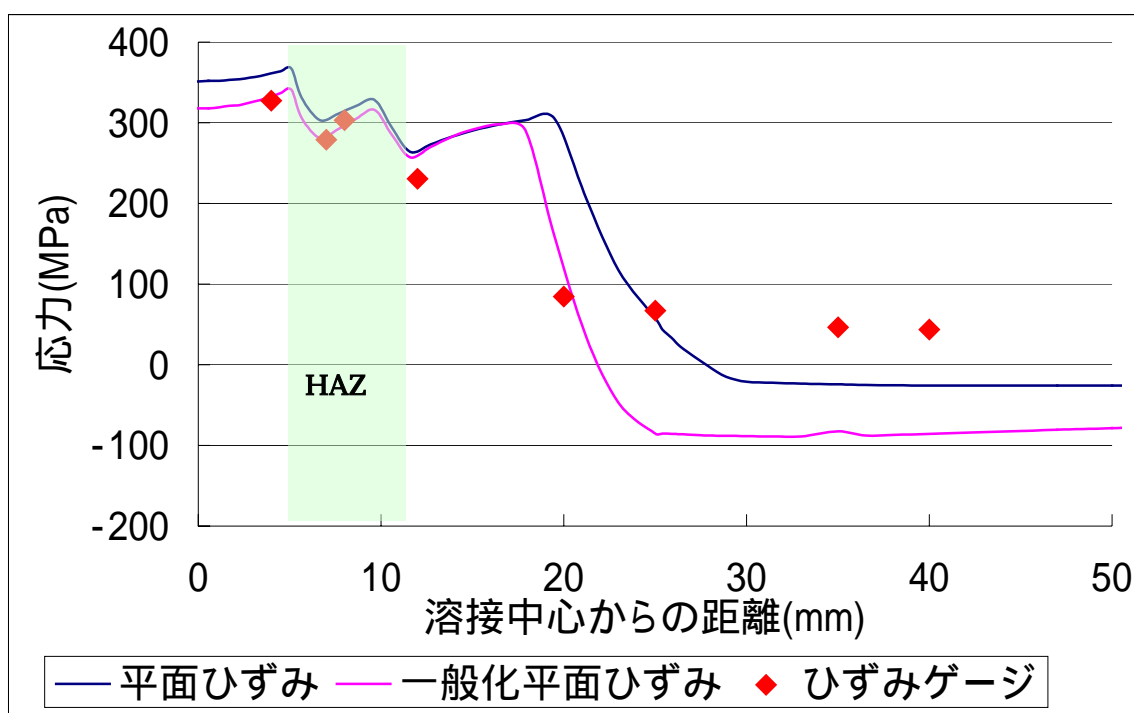


図 3-14 プレート表面での溶接線方向応力の比較

次に溶接線直交方向の残留応力を比較検討する。順に平面ひずみ、一般化平面ひずみ、平面応力モデルでの溶接線方向応力の分布拡大図である。

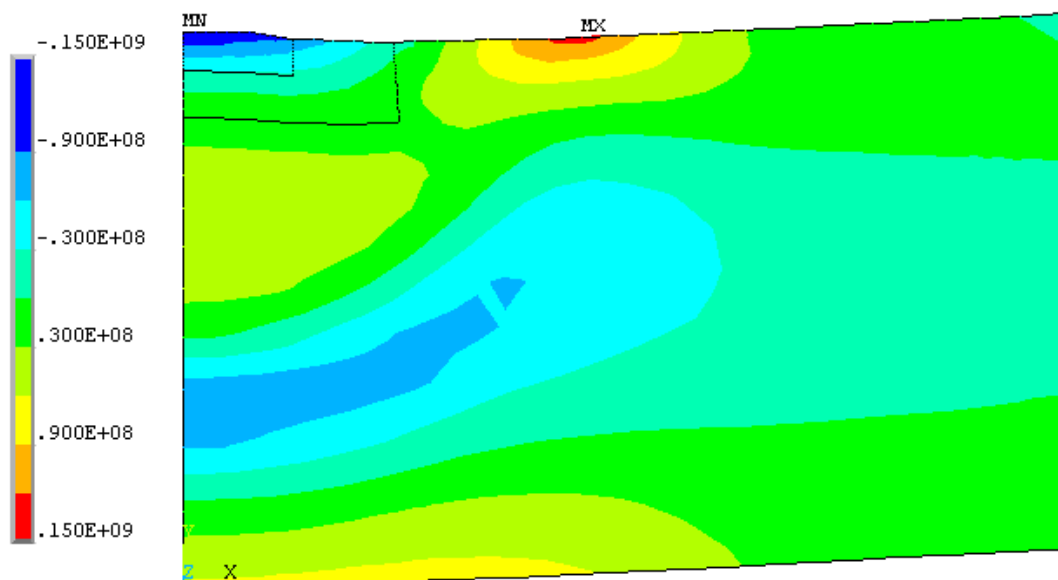


図 3-15 平面ひずみモデルでの溶接線直交方向残留応力分布コンター図

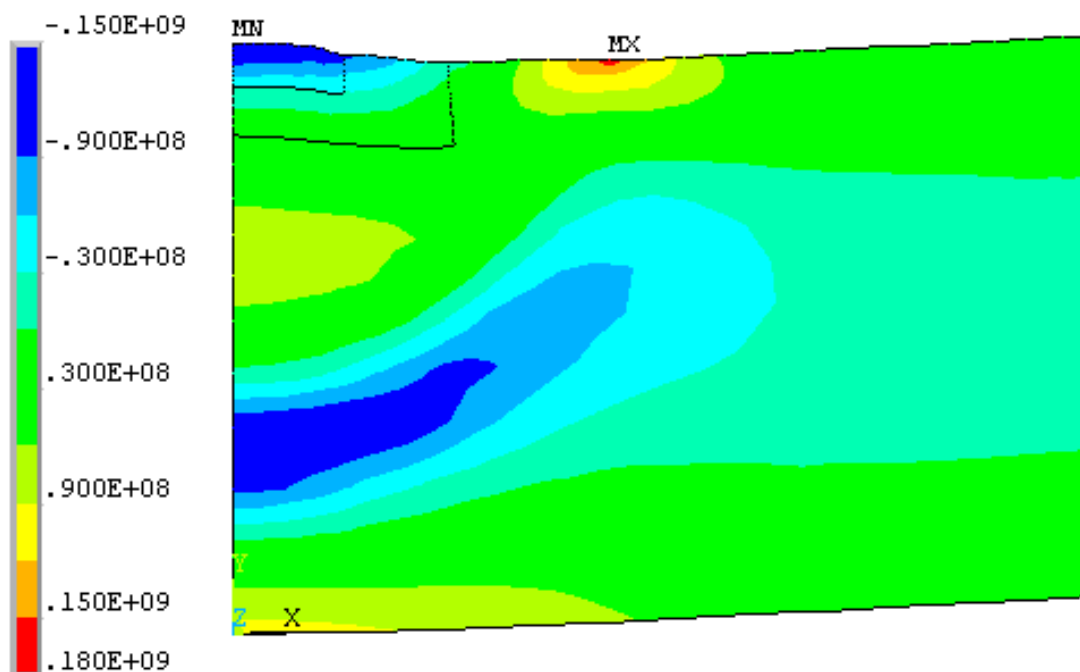


図 3-16 一般化平面ひずみモデルでの溶接線直交方向残留応力分布コンター図

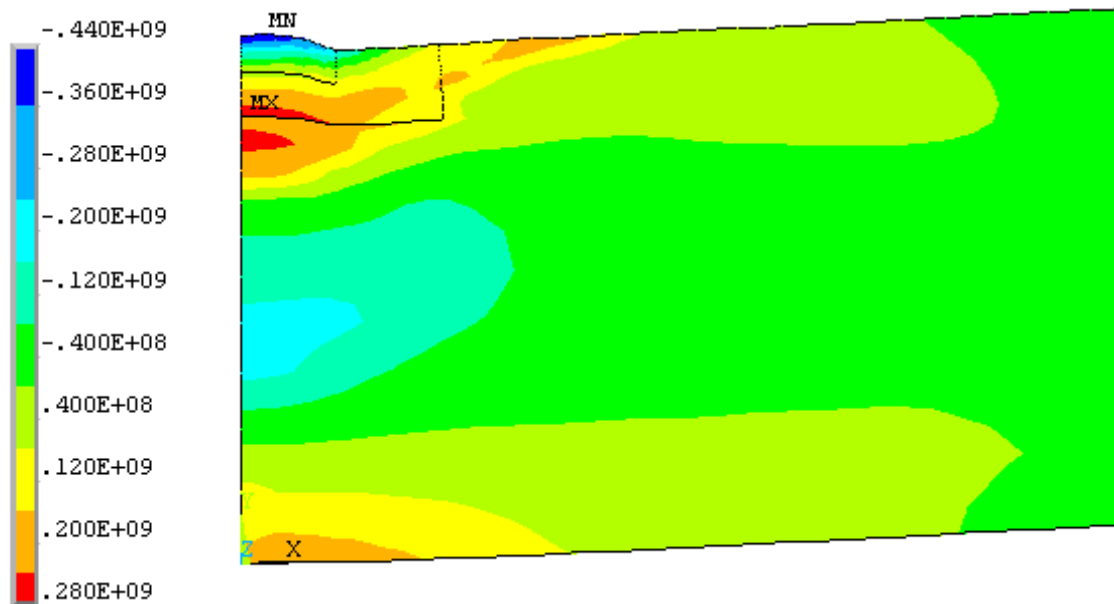


図 3-17 平面応力モデルでの溶接線直交方向残留応力分布コンター図

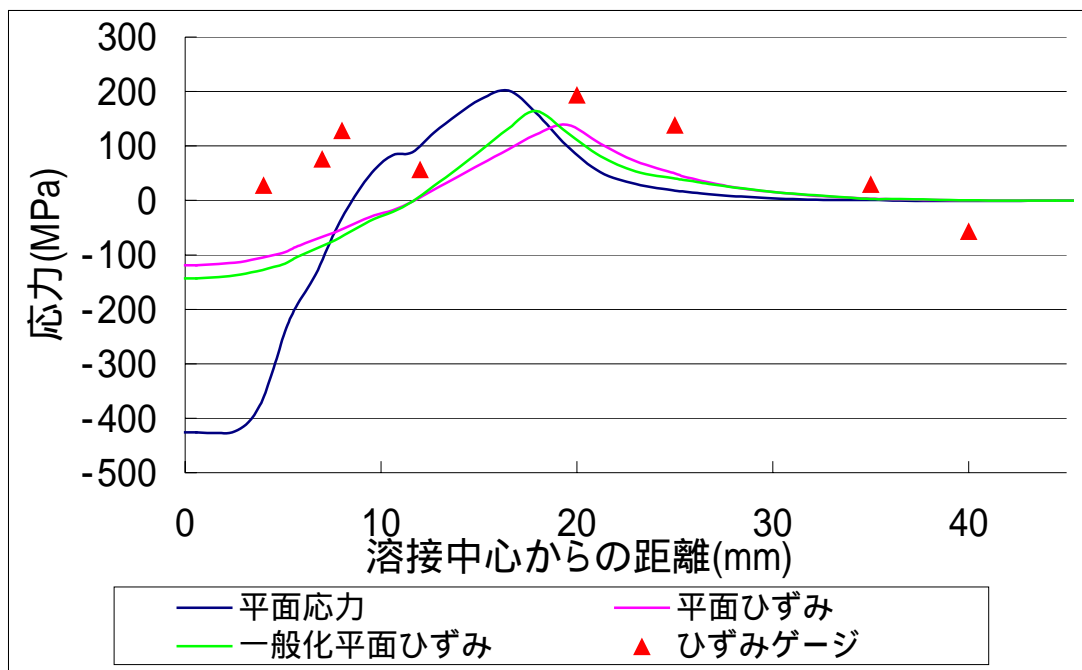


図 3-18 プレート表面での溶接線直交方向応力の比較

溶接線直交方向に関しても溶接線方向と同様平面ひずみモデルと一般化平面ひずみモデルでは同じような残留応力の分布傾向となった。平面応力モデルは3次元モデルとの比較とのために解析したのでここでは問題としないが、平面ひずみモデルと一般化平

面ひずみモデルにおいては溶接中心付近で引っ張りと圧縮が実験値と逆に出るなどの差が見受けられた。平面ひずみモデルと一般化平面ひずみモデルの主な差は溶接線方向への均一な変位を許すかどうかなので溶接線直交方向の残留応力にはさほど大きな違いが出なかった。そのためここでは平面ひずみモデルのみについて解析でどのような挙動を示していたかを見る。下の6枚の図は各時刻における溶接線直交方向の応力分布コンター図である。

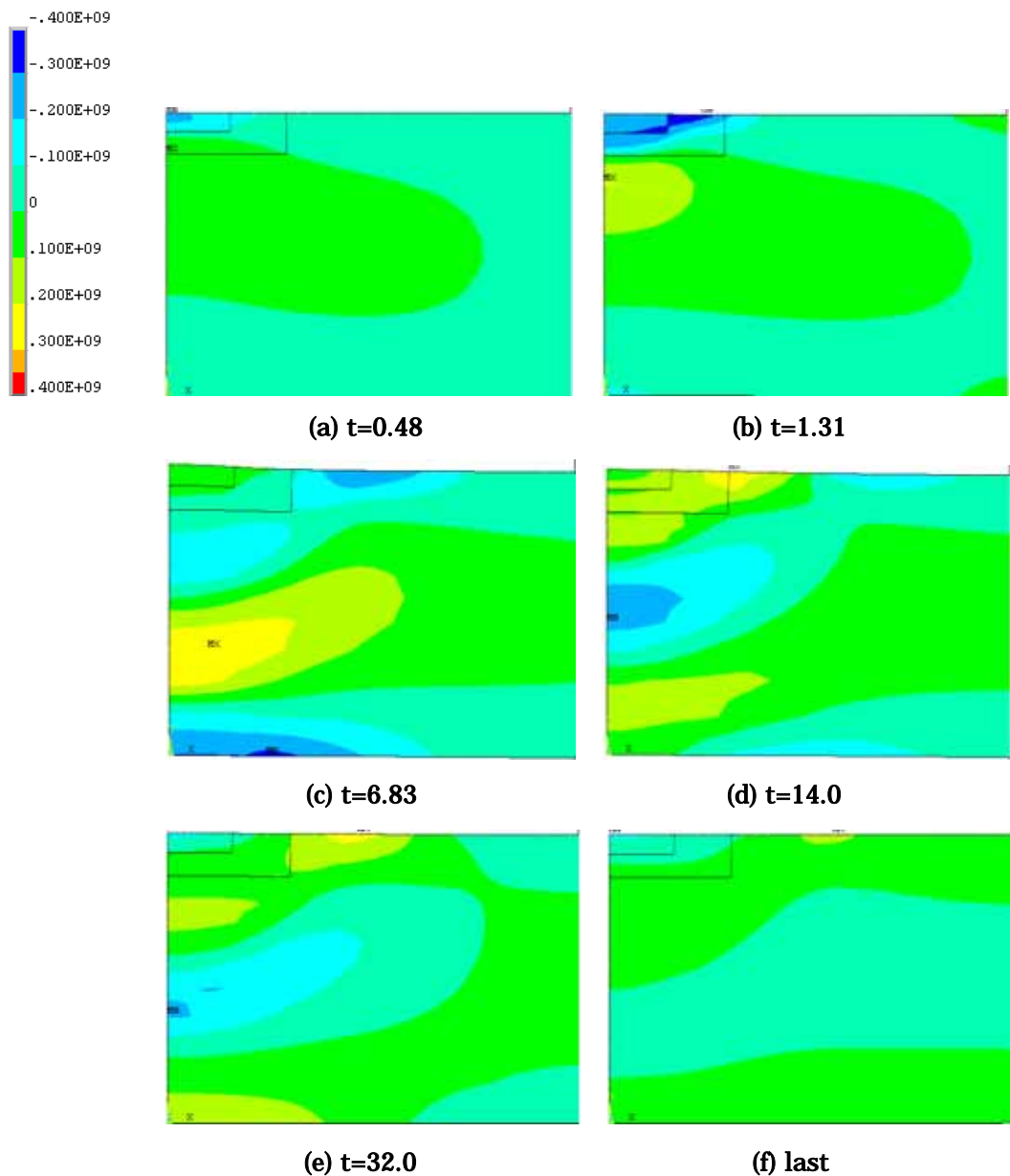


図 3-19 各時刻における溶接線直交方向応力の分布コンター図

図3 - 19 (a)を見ると溶接開始直後入熱部付近の温度上昇にともなう体積増加で圧縮応力が発生しているのが見受けられる。またそれに伴うせん断力で板内部では引っ張り応力が発生している。加熱が続く次の図では圧縮応力の発生している領域が溶接中心から離れていくとともに引っ張り、圧縮応力の値も大きくなっているのがわかる。さらに加熱を続けると入熱部付近が1100度を超えヤング率と降伏応力が非常に小さい値にまで落ち、入熱部から離れた圧縮応力を受けている部分に引っ張られ引っ張り応力が発生し始める(c)。入熱部付近の引っ張り応力が発生している部分は次第にその領域を広げ、最終的にはプレート表面では入熱部から離れた領域で広く溶接線直交方向に引っ張り残留応力が発生した。

3 - 6 結言

プレート表面では溶接線方向応力に関しては一般化平面ひずみモデルを導入することで二次元の解析でも比較的精度の良い解析を行えた。溶接中心から離れた領域では平面ひずみモデルで解析を行った方が測定値に近い値を得られたが、どちらのモデルにせよ解析では弱い圧縮応力が残留し測定では弱い引っ張り応力が残留するという差が現れた。また溶接線直交方向応力に関しては平面ひずみモデルや一般化平面ひずみモデルを導入して解析を行った場合、溶接部から離れた領域での分布傾向は測定値と大きくは変わらなかったが熱影響部付近での残留応力は解析で圧縮、測定では引っ張りとなつた。また、入熱部と熱影響部と母材部で材料物性値を変えたことで途中の応力分布やひずみ分布が不連続なものとなった。

第 4 章 三次元モデルでの解析

4 - 1 モデリング

次に三次元でモデルを作って解析を行った。但し試験体の溶接線方向長さは 500mm で溶接線直交方向長さは 380mm (1 / 2 対称モデルで 190mm) であるのに対し、今回三次元の解析で用いたモデルは溶接線方向長さを 100mm 溶接線直交方向長さを 200mm(1 / 2 対称モデルで 100mm)とした。これはモデルを三次元化することで節点数が大きく増え解析に要する時間が膨大なものとなるからである。これにともない概に実験結果との単純比較はできなくなる。そこで今回の三次元モデルの断面と同じサイズの二次元モデルを作り解析を再度おこない第三章で得た結果と比較することで形状の違いによる分布傾向の変化に大まかな見当をつけてから三次元モデルの結果を実験値と比較することにする。

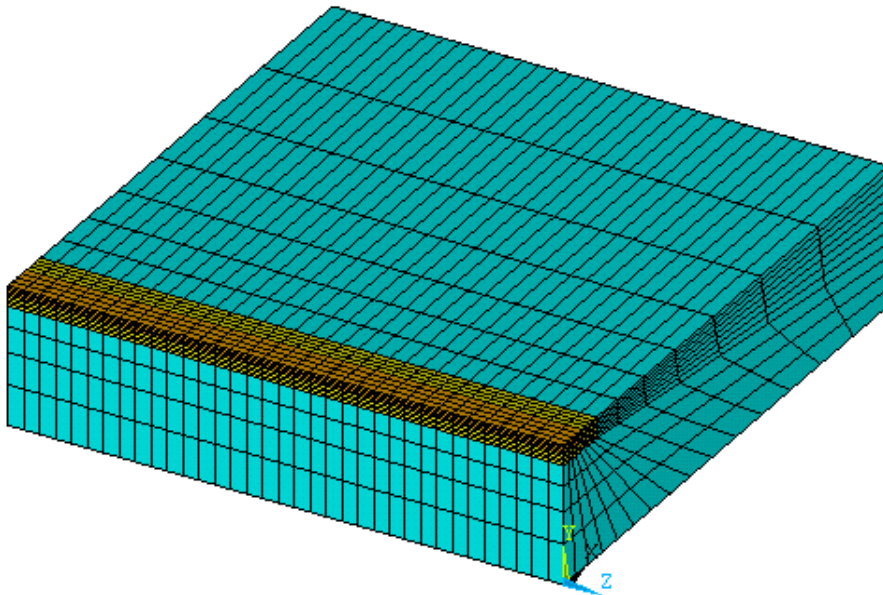


図 4-1 三次元モデルメッシュ図(6300elements,28700nodes)

図 4 - 1 で手前面が対称面でありオレンジ色の要素が入熱部、黄色の要素を熱影響部、残りの緑色の要素を母材金属部とした。次の図 4 - 2 は溶接開始部付近の要素拡大図である。要素は三次元二十節点伝熱要素の SOLID 9 0 を用いた。

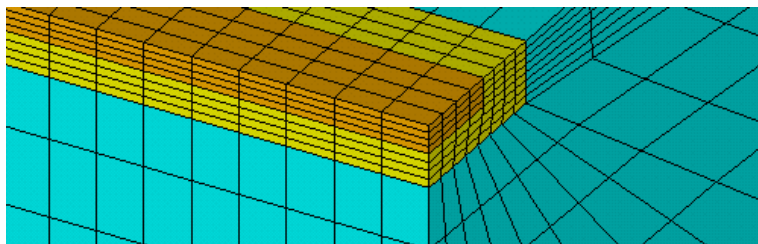


図 4-2 三次元モデルメッシュ拡大図

4 - 2 モデル形状の変更が二次元解析結果に与える影響

三次元モデルと同じ寸法の二次元モデルを作り第三章と同一条件の元で解析結果を行った。伝熱解析の結果はほぼ第三章のモデルと同じとなったので割愛する。また残留応力の分布傾向もほぼ同じであった。次の図4 - 3は二つのモデルにおけるプレート表面での溶接線方向の残留応力の比較図である。あまり大きな違いは見受けられなかったが一般化平面ひずみモデルでは引っ張り残留応力を受けるエリアが狭くなりグラフ全体が左側へ移動した。モデル形状の変更にともなう溶接線直交方向の残留応力分布の変化は溶接線方向の変化に比べより一層小さかった。

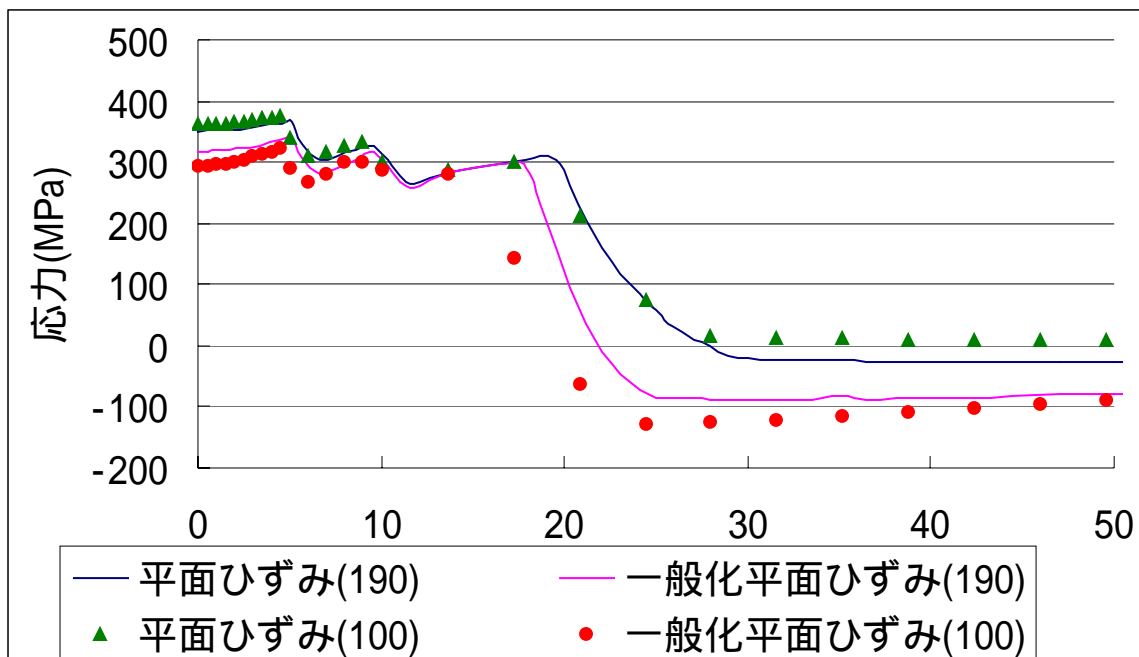


図 4-3 モデル変更にともなうプレート表面での溶接線方向残留応力の変化

もちろん三次元モデルでは溶接線方向の長さが試験体より短縮されたことによる影響は大きく考えられるが、溶接線直交方向断面形状の変化による影響は溶接中心付近ではほとんどないものとして考えることにした。但し三次元モデルでも溶接中心から離れた領域ではモデル断面形状変更による残留応力への影響は大きいと考えられる。

4 - 3 伝熱解析

4 - 3 - 1 解析条件

溶接による移動熱源を再現するため1ステップごとに溶接線方向の選択範囲を移動させながら発熱をステップ荷重で与えた。溶接線方向のメッシュ幅を溶接棒の直径の1/4に切っておき溶接棒直下の部分が発熱するとした。溶接棒が溶接線方向のメッシュ幅分を移動するのに要する時間を1ステップとして、1ステップごとに発熱領域をメッシュ幅分ずつ溶接線方向に移動させた。

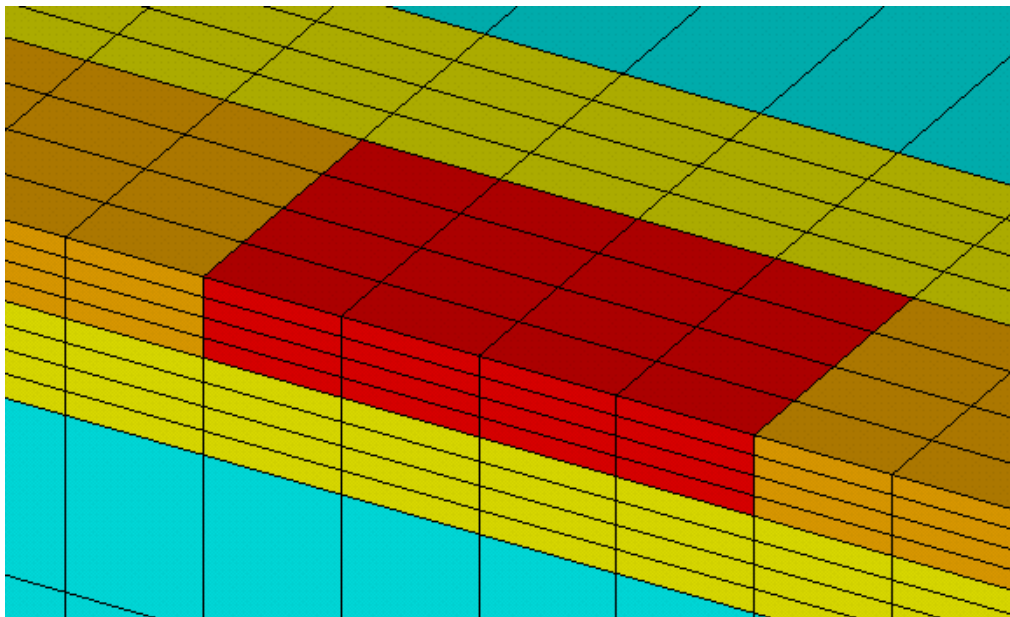


図 4-4 発熱領域

また実際には溶接棒の中心直下に近い要素の方が多くの熱量を受けていると考えられるので発熱量に分布を与えた。図4 - 5は上から見た発熱している要素の概略図である。溶接線直交方向に関しては図の溶接線に近い方から(D C B Aの順に)基準発熱量に1.6,1.2,0.8,0.4の比重をかけ、溶接線方向に関してはE Fでそれぞれ0.6,1.4の比重をかけて発熱を与えた。基準発熱量は解析結果が実験結果に合うように調節した。熱伝達係数、材料物性値は二次元モデルでの解析を行ったときと同じ値を用いた。また、熱伝達係数は対称面以外の全ての外境界に設定した。

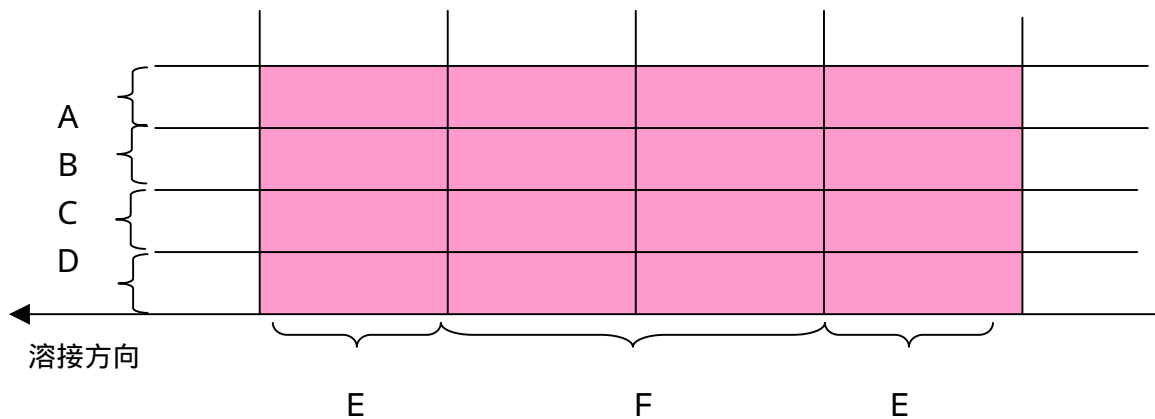


図 4-5 発熱量の設定

4 - 3 - 2 解析結果

伝熱解析を行い溶接進行方向中間地点付近でプレート表面上での溶接線直交方向の最高到達温度の分布をとった。

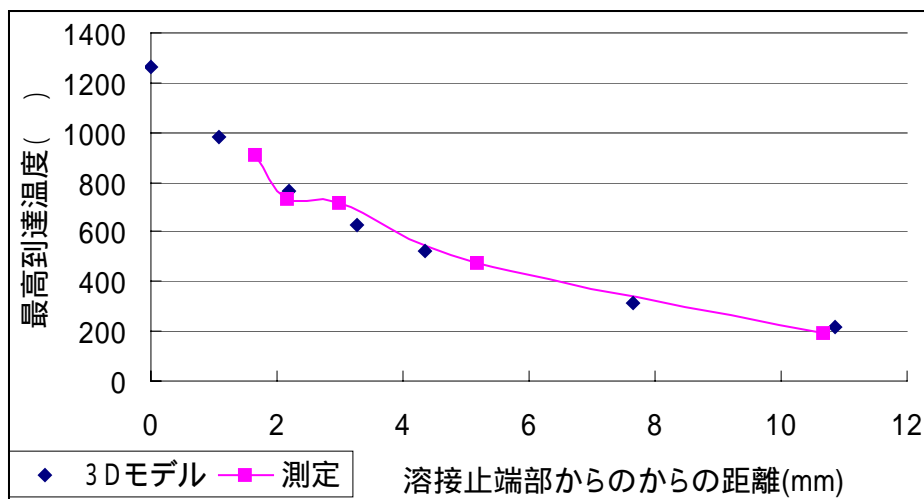


図 4-6 測定と解析での最高到達温度分布の比較

二次元モデルに比べ側面からの冷却もある分若干ではあるけれども最高到達温度が下がったが良い結果を得られたのでこの伝熱解析の結果を用いて熱弾塑性解析を行った。

4 - 4 構造解析

4 - 4 - 1 解析条件

熱弾塑性解析を行うにあたって材料物性値は二次元モデルの時と同じ値を用いた。拘束条件に関しては図4 - 7のように1 / 2 対称モデルであることから対称面を溶接線直交方向に固定し、モデルの移動を防ぐため溶接開始部の下端を完全固定、モデルの回転を防ぐため溶接終了部の下端を板厚方向に固定とした。

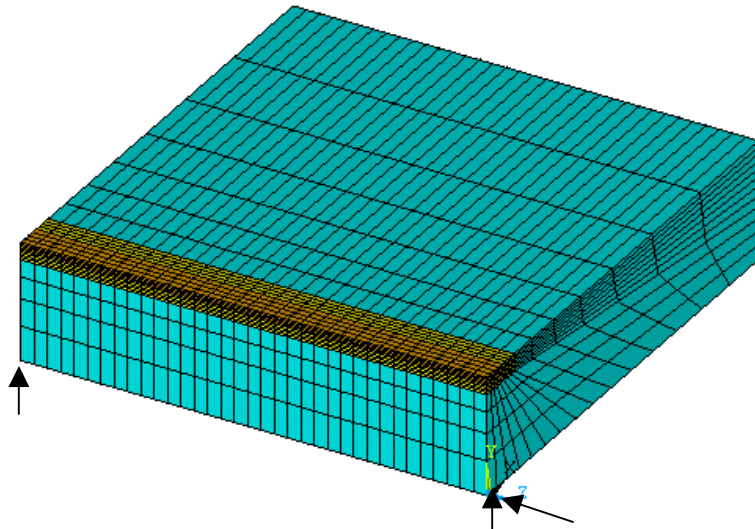


図 4-7 拘束条件

4 - 4 - 2 解析結果

次の二図は溶接線方向と溶接線直交方向の残留応力の分布コンター図である。

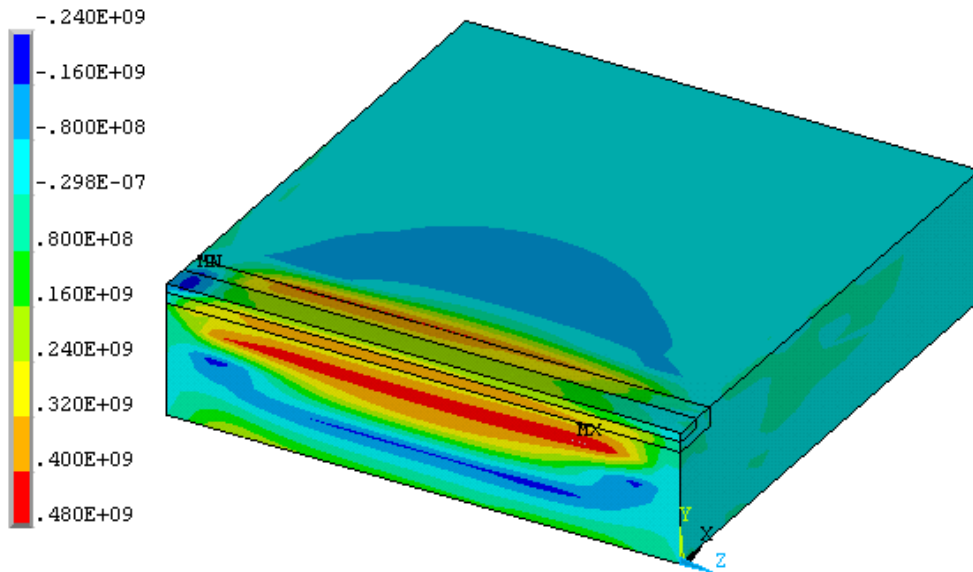


図 4-8 溶接線方向残留応力分布コンター図

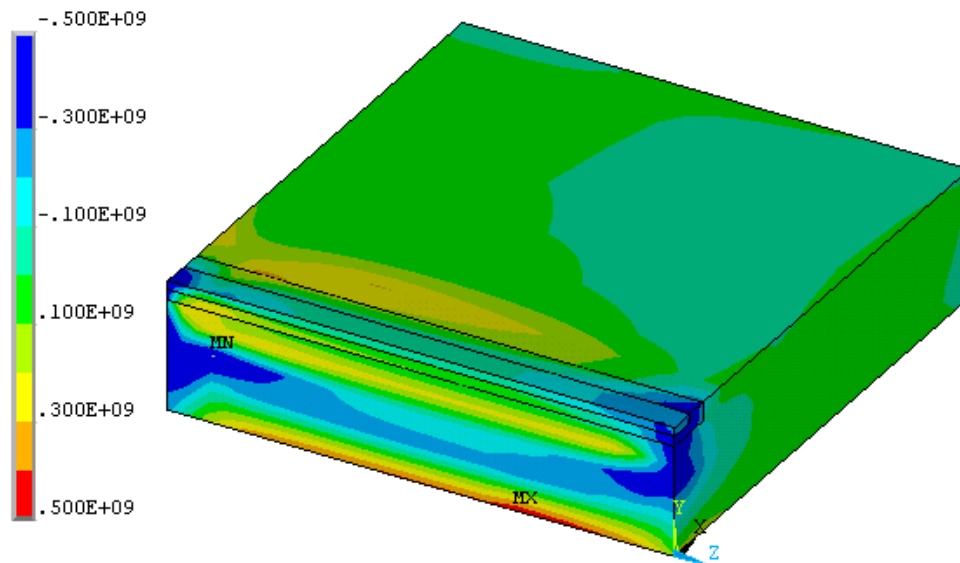


図 4-9 溶接線直交方向残留応力分布コンター図

溶接線方向の残留応力は溶接方向中間地点付近では非常に強い引っ張り側に現れていることがわかる。プレート表面上で見ても対称面で見てもそのピークは溶接中心から少し離れたところに現れ、さらに離れたところでは圧縮応力が残留しているのも見受けられる。溶接開始位置付近では溶接線方向の残留応力はあまり大きい値でない。次の図4-10と図4-11は溶接開始位置付近に断面をとったときの溶接線方向と溶接線直交方向の残留応力の分布図である。



図 4-10 溶接開始位置付近での溶接線方向残留応力分布コンター図

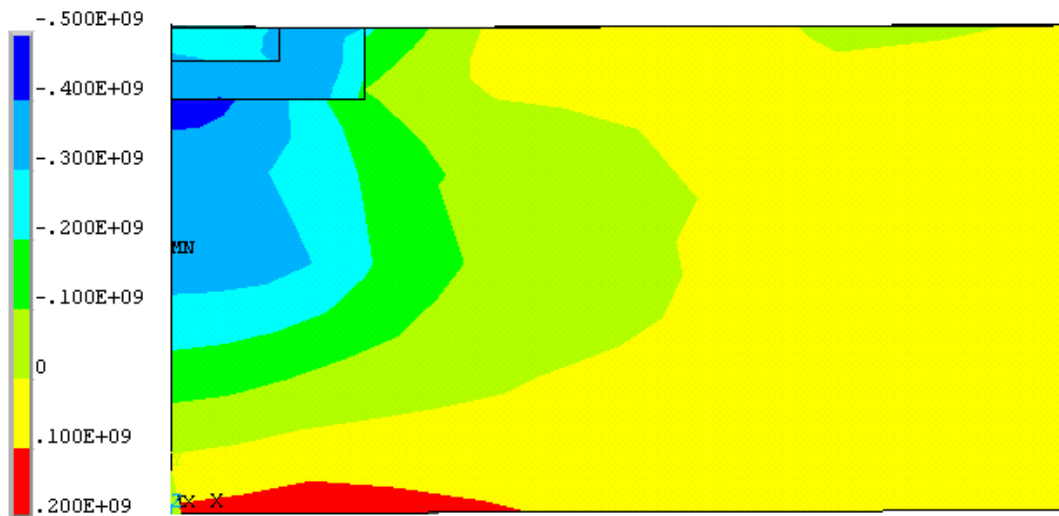


図 4-11 溶接開始位置付近での溶接線直交方向残留応力分布コンター図

二次元モデルでは平面応力モデルで溶接線方向の応力は全て零であるが図 4 - 1 0 を見ると三次元モデルの場合も溶接開始位置付近では溶接線方向の応力がほぼ零に近い値であることがわかる。溶接開始位置付近では溶接方向中間地点に比べて溶接線方向への拘束が弱いため比較的自由に溶接線方向に変形でき溶接線方向のひずみが解放されるので応力が緩和され平面ひずみモデルに近い挙動を示すと考えることができる。溶接線直交方向の応力についても平面応力モデルの場合と比較すると(図 3 - 1 7 参照)プレート表面入熱部付近で圧縮応力が発生し裏側では引っ張り応力が発生しているなどの基本的な特徴は同じである。ただし平面応力モデルでは溶接線直下の板厚内で引っ張り応力が発生しているが三次元モデルでは圧縮応力が発生している、などの違いも見受けられる。これは板厚方向に中間地点付近ではプレート表面に比べて周りからの拘束が強くなるために生じた差だと考えることができる。

次に溶接線方向中間地点付近に断面をとったときの溶接線方向と溶接線直交方向の残留応力の分布図をあげる。図 4 - 1 2 が溶接線方向残留応力、図 4 - 1 3 が溶接線直交方向の残留応力のコンター図である。

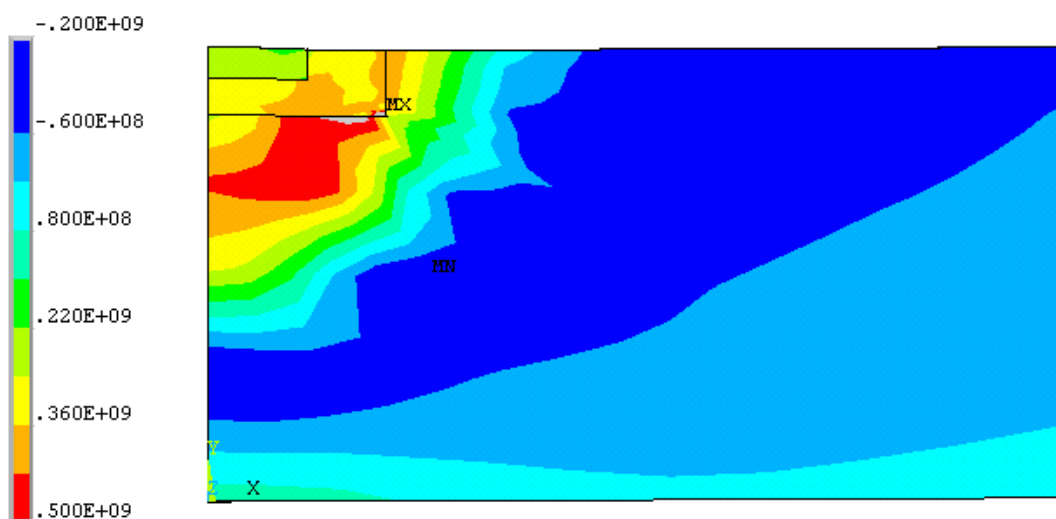


図 4-12 溶接方向中間位置付近での溶接線方向残留応力分布コンター図

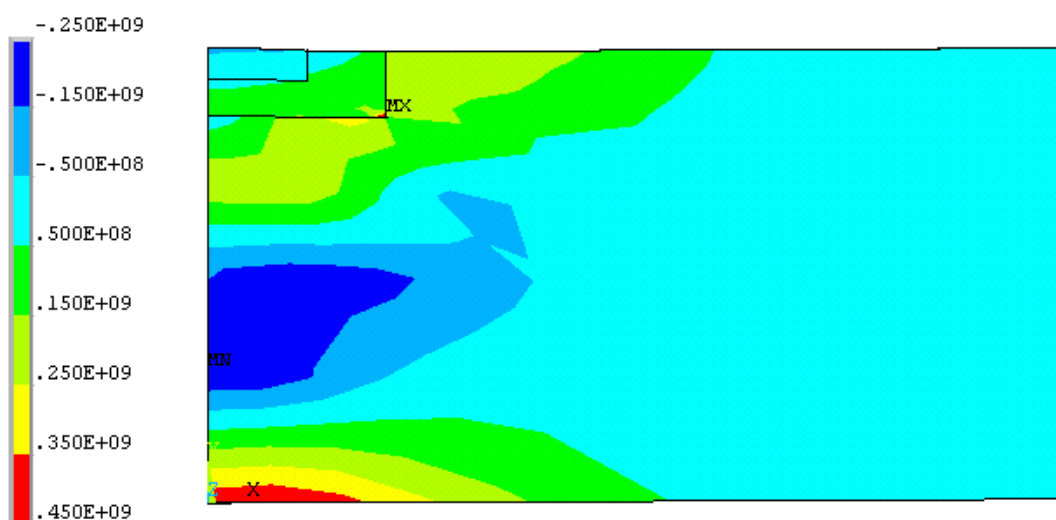


図 4-13 溶接方向中間位置付近での溶接線直交方向残留応力分布コンター図

今回の三次元のモデルでは節点数と解析時間の関係で溶接線方向の長さを 1 / 5 にして計算をしているのでモデルが溶接線方向に十分に長いとは考えられず、溶接線方向に中間地点付近では理想的な平面ひずみ場や一般化平面ひずみ場を形成しているとは考えにくい。どの程度まで一般化平面ひずみモデルで解析した場合と近いかは図 3 - 13 , 図 3 - 16 と図 4 - 12 , 図 4 - 13 とで比較できる。今後溶接線方向にさらに長いモデルを三次元で解析した場合多少は一般化平面ひずみモデルで解析した場合の結果に近づくと思われるが、現段階でも一般化平面ひずみモデルで解析することが三次元モデル溶接線中間地点付近の応力場の分布傾向を出すにはある程度有効だと言えることが出来ると思われる。

次に溶接方向中間地点付近でのプレート表面での残留応力分布を測定値、一般化平面ひずみモデルの解析値と比較した。図4 - 14 が溶接線方向、図4 - 15 が溶接線直交方向の残留応力分布を比較したグラフである。

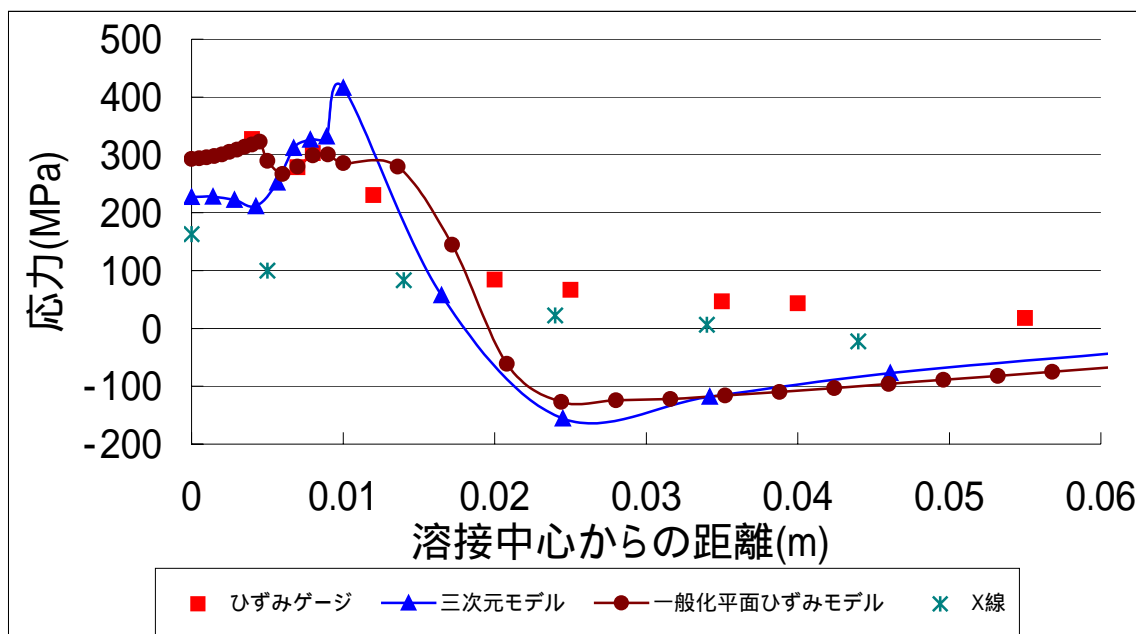


図 4-14 プレート表面での溶接線方向応力の比較

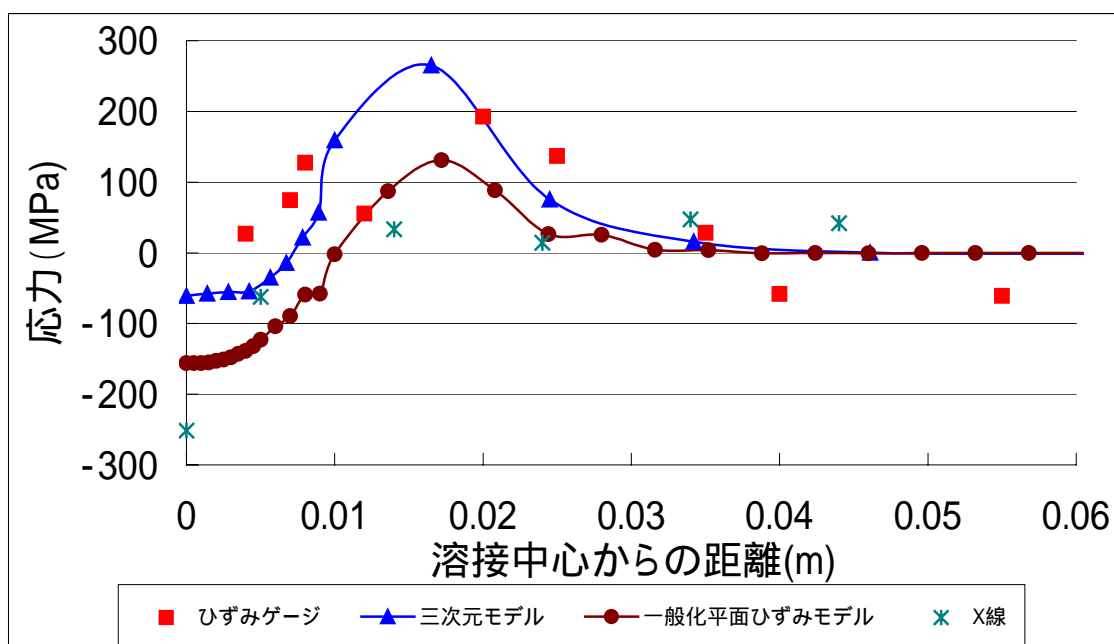


図 4-15 プレート表面での溶接線直交方向応力の比較

両グラフ中の一般化平面ひずみモデルの値は三次元モデルと同じ形状で解析しなおしたものである。

プレート表面では溶接線方向応力に関してはモデルを三次元化しても一般化平面ひずみモデルを用いたときとあまり結果が変わらなかったが引っ張りと圧縮残留応力の最大値は大きくなる、引っ張り残留応力のピーク位置が溶接中心からさらに離れたところになるなどの差も見られた。解析では溶接中心から 20mm 以上離れると圧縮応力が残留している点も測定結果とは異なる。4 - 2 節の内容から考えられるように、三次元のモデルでも溶接中心から離れた領域では最終的な残留応力分布に断面形状の変化による影響が及ぶであろう、ということからある程度説明出来る。

溶接線直交方向の残留応力に関しては溶接中心に近い領域ではモデルを三次元化することで一般化平面ひずみモデルで解析したときより測定値に近い結果が得られたといえる。

4 - 5 結言

モデルを三次元化して解析を行うことで溶接線直交方向の残留応力に関しては二次元解析結果より測定値に近い結果が得られた。溶接線方向の残留応力はモデルの溶接線方向長さが不十分なため三次元化による精度向上があまり見られなかったが、今後メッシュサイズの再検討などをして溶接線方向に十分長いモデルでの解析を行ってみる必要がある。

第 5 章 考察

考察

ビードオンプレートでは二次元モデルで一般化平面ひずみ場近似をして解析することで、溶接中心に近い領域では引っ張りと圧縮の傾向を見ることは可能であったが応力値自体は非常に信頼性の低いレベルであった。三次元化することで多少は精度も向上したところもあったが、例えば他の基本的な溶接形状である配管突き合わせモデルの場合に比べれば非常に応力値の解析精度は低いと言わざるを得ない。このような結果となった原因として考えられることとしてまず、入熱方法・溶融の考え方が挙げられる。実際の溶接過程では溶接金属は液体になっているが今回の解析ではヤング率・降伏応力を高温で0に近い値にすることで融解を表現しようとした。つまり固体のまままで近似をしている。液化した溶接金属は溶接中心から離れた方から固まり始めるが、固液混合であれば固体同士接している場合に比べ固体と接している部分から受けるせん断力も大きく異なったものになると考えられる。これについては今後粘塑性モデルなどを導入して液相を扱うことも検討する必要がある。また今回はじめから熱影響部の範囲を決めていたが伝熱解析で一定温度に達した要素のみを熱影響部として変更するといった手法も考えられる。溶接金属の母材へのとけ込みも考慮すべき点である。その他には材料物性値を領域ごとに変えたため、実際にはあり得ないような不連続な残留応力の分布が出た。高温材料物性値については実験困難な溶融点以上の値は外挿値を用いているので今後修正を加えることも検討する。また、今回(財)発電設備技術検査協会からいただいた測定データは測定点数が少なく、測定方法によってもばらつきが出ていたのでこれも測定結果と解析値との差を大きくした要因の一つと考えられる。

伝熱解析の面而言えば高温での熱伝達係数を低温でより高くする、融解潜熱を考慮するなどの考え方もあるが伝熱解析の結果としての各節点の温度履歴が測定結果に合っていれば伝熱解析の条件は最終的な残留応力の分布にはあまり影響がないと考えられる。

謝辞

本論文を書くにあたって多くの方にお世話になったのでこの場を借りてお礼の言葉を申し上げます。特に直接何度も指導していただいた酒井教授と泉助教授、実験データを頂いたり進行状況を見て頂いたりしたJNESの小川様と日立の柳田様には大変感謝をしております。ありがとうございました。

参考文献

- [1]株式会社総合技術センター編、プラント損傷事例と経年劣化・寿命予測法
- [2]望月 正人、学位論文、溶接構造物の残留応力解析手法の開発とその強度評価への応用に関する研究（1997）
- [3]（財）発電設備技術検査協会、複雑形状部機器配管健全性実証事業に関する報告書（2003）
- [4]黄地 尚義、溶接・接合プロセスの基礎、産報出版（1996）
- [5]株式会社三菱重工、太田高裕、固有ひずみ法による残留応力評価とき裂進展シミュレーション、（社）日本機械学会関西支部第279回講習会教材（2005）
- [6]小林 垣彦、レーザーを用いた残留応力制御による金属疲労防止技術の開発（1997）