

## 重ねすみ肉溶接部の疲労強度に係る検討について

### 1 検討手法の概要

旧法タンクの底板は主に板厚 6mm～9mm の炭素鋼（SS400）で構成されており、底板相互の溶接構造は重ねすみ肉溶接が適用されている場合が多い。近年、旧法タンクの底部からの危険物流出事故においては、底板の重ねすみ肉溶接の低サイクル疲労によるき裂がその原因となるケースが多く見受けられる。また、当該流出事故事例を分析した結果、タンク製作時の溶接施工の影響や経年劣化等によるのど厚の減少がき裂部分に確認されていることから、これらの影響が疲労強度に及ぼす影響について調査する必要があることから、試験片を用いた 4 点曲げ疲労き裂進展試験及び有限要素法を用いた疲労き裂進展解析を実施することとする。

### 2 事前検討

#### (1) 事前検討の目的

底板重ね継ぎ手溶接部に所定のルート部の欠陥や有害な隙間を導入した試験片等を用いるき裂進展性試験を実施するため、多量な試験ケースが想定される。試験を実施する前に、有限要素法による応力解析を用いて、設定されたルート部の有害な隙間、溶接部ののど厚不足及び板厚をパラメータとした場合の溶接部の疲労強度に対する影響（変化傾向）を調べることによって、試験ケースの絞りこみに役に立つ情報を提供する。

(2) 事前検討としての解析

ア 解析ケース

板厚、有害な隙間及びのど厚の 3 つのパラメータの影響を確認するため、表 2.1 に示す合計 12 個の解析ケースを実施した。

表 2.1 解析ケース

解析ケース No.	板厚 (mm)	有害な隙間 (mm)	のど厚 (mm)
1-1	6	1	4.24
1-2		3	
1-3		5	
1-4		1	2.12
1-5		3	
1-6		5	
解析ケース No.	板厚 (mm)	有害な隙間 (mm)	のど厚 (mm)
2-1	9	1	6.36
2-2		3	
2-3		5	
2-4		1	3.18
2-5		3	
2-6		5	

イ 解析モデル

- 1) 板厚 6mm の底板重ね継ぎ手 (のど厚の 2 種類、有害な隙間の 3 種類) の合計 6 つの解析モデルを以下の図 2.1~図 2.3 に示す。溶接部形状を 45 度モデル (図 1.1 参照) と設定し、溶接部ののど厚が  $t\sqrt{2}/2=4.24\text{mm}$  と  $t\sqrt{2}/4=2.12\text{mm}$  の 2 種類を設定した。図に赤色で示す A と B 点を発生応力の注目点とする。
- 2) 同様に板厚 9mm の合計 6 つの解析モデルを作成した。溶接部形状は 45 度モデルと設定し、溶接部ののど厚は  $t\sqrt{2}/2=6.36\text{mm}$ ,  $t\sqrt{2}/4=3.18\text{mm}$  の 2 種類を検討した。板厚 9mm のモデル図の記載は省略する。

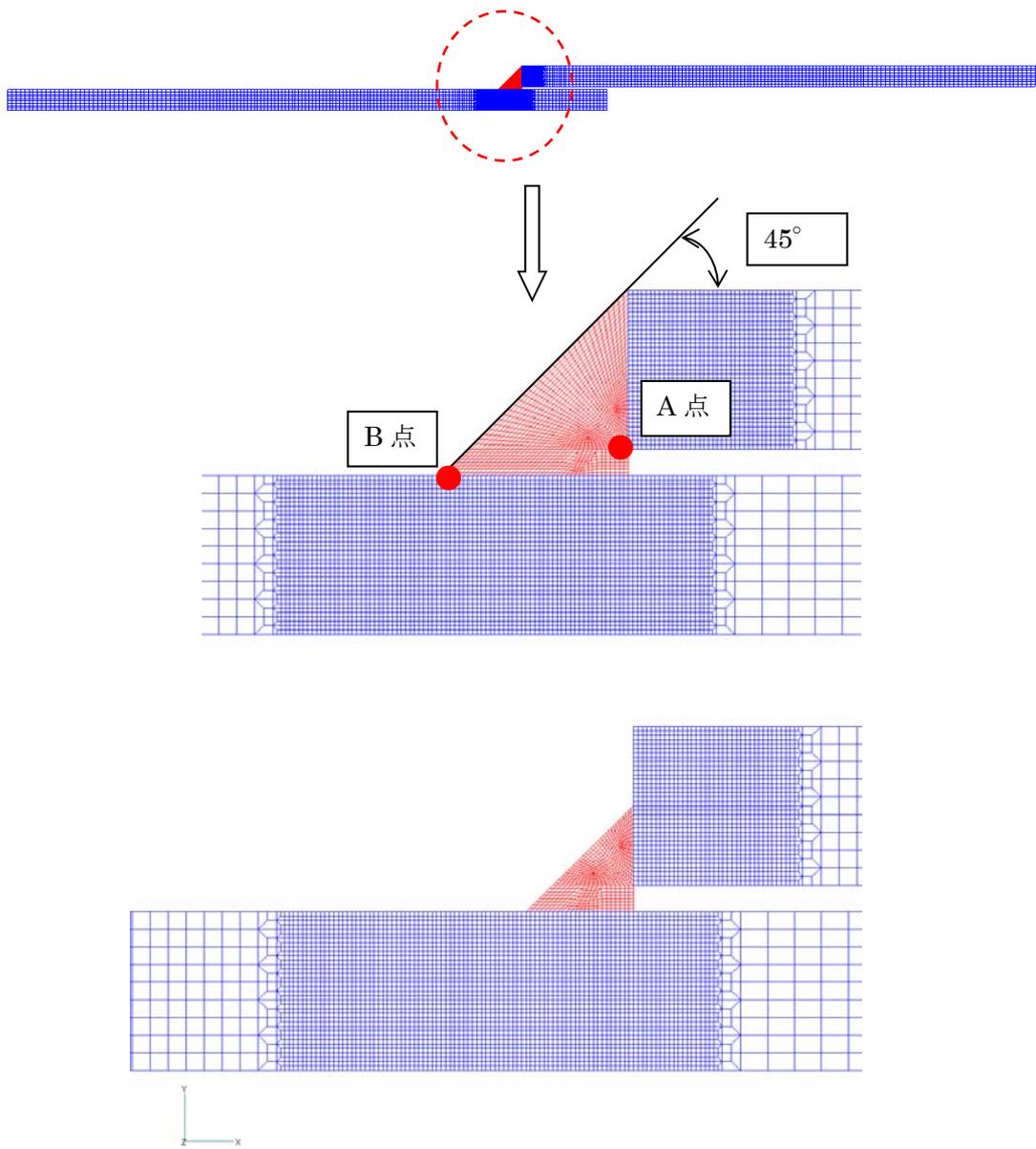


図 2.1 板厚 6mm、有害な隙間 1 mm、のど厚 4.24mm 及び 2.12mm の解析モデル

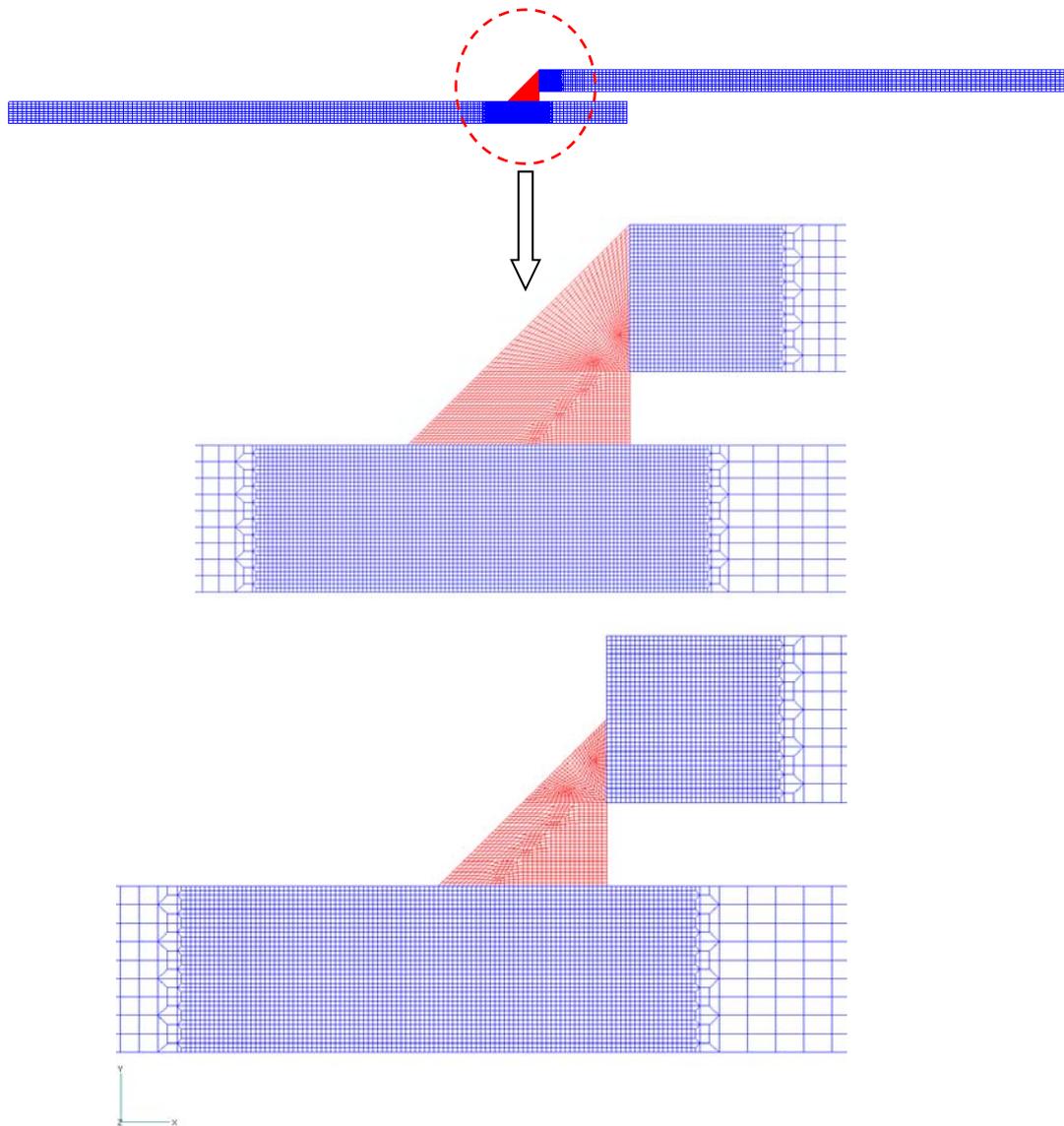


図 2.2 板厚 6mm、有害な隙間 3mm、のど厚 4.24mm 及び 2.12mm の解析モデル

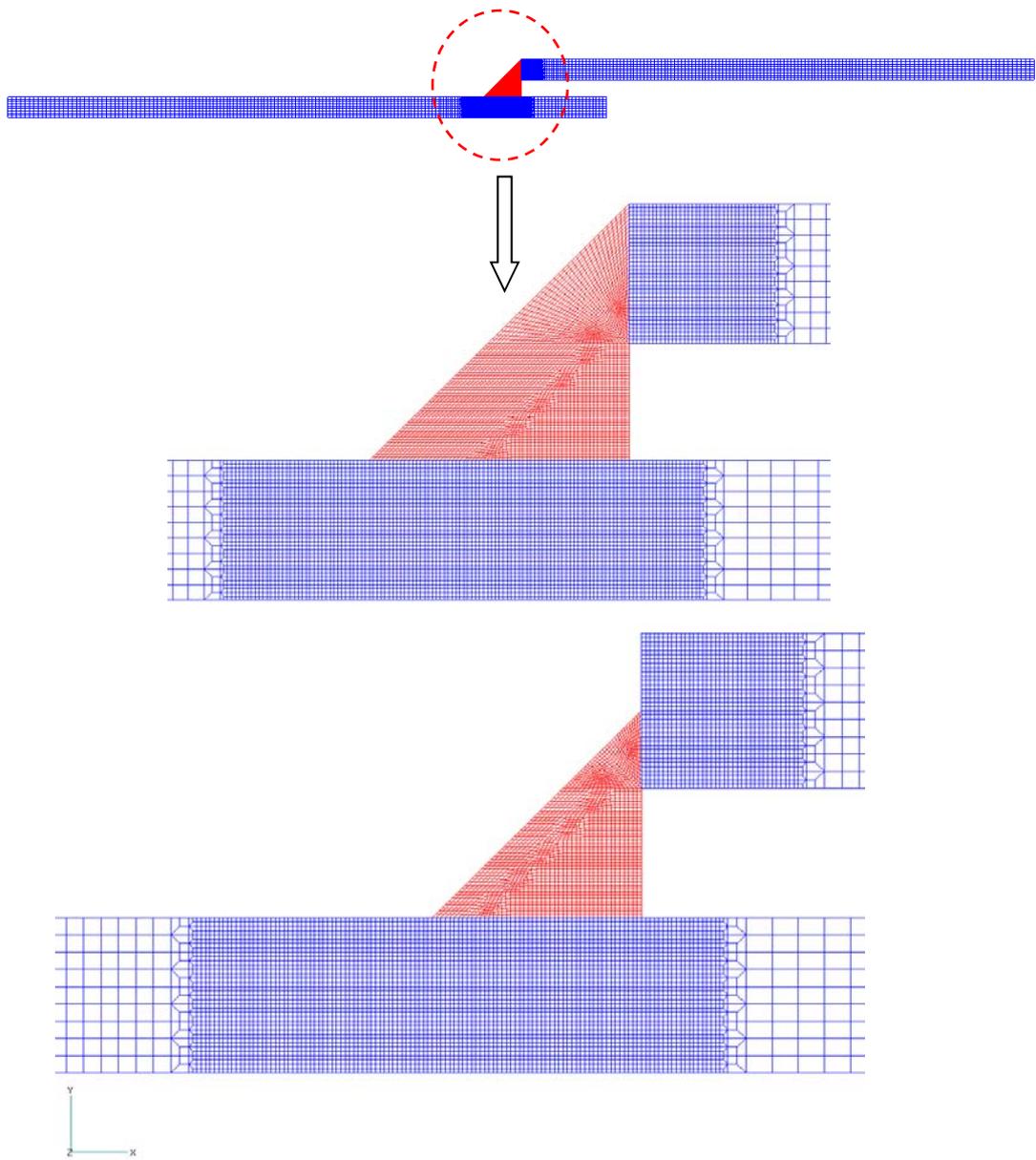


図 2.3 板厚 6mm、有害な隙間 5mm、のど厚 4.24mm 及び 2.12mm の解析モデル

#### ウ 解析条件

- ・荷重条件：以下の図に示すように荷重Fを2点の鉛直方向に作用させる（図2.4）
- ・境界条件：一端：ピン支持、もう一端：ローラ支持（図2.4）
- ・材料(SS400)の物性値：ヤング率E：210000MPa
- ・解析方法：弾性、大変形考慮

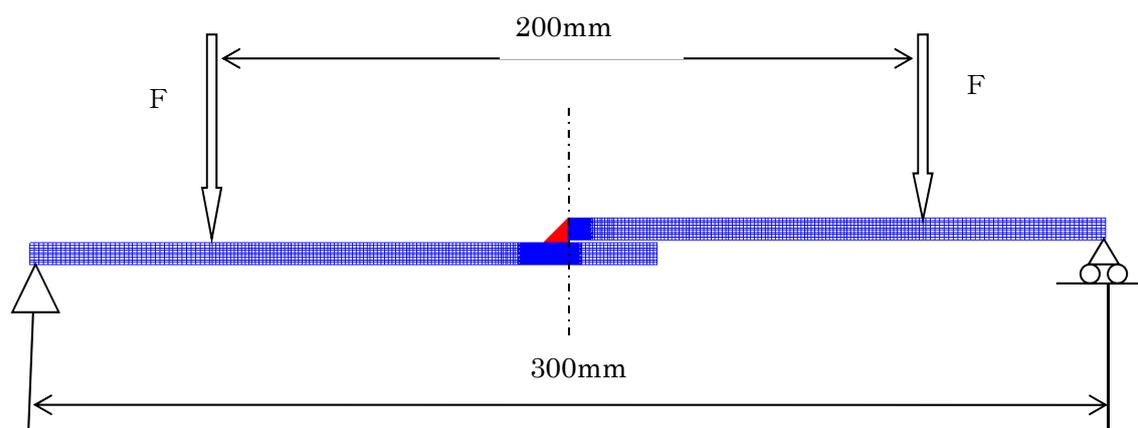


図 2.4 荷重条件と境界条件

#### エ 解析結果

底板重ね継ぎ手に発生応力分布の代表的な出力を図 2.5 及び図 2.6 に示す。本解析からは以下のことが観察された。

- 1) 最大応力値が A 点（溶接部の裏）に発生した。
- 2) 次の最大値は溶接部の表面（最小のど厚部）に発生する。
- 3) 溶接部のど厚が不足する場合溶接部表面（最小のど厚部）に大きな応力が発生する。

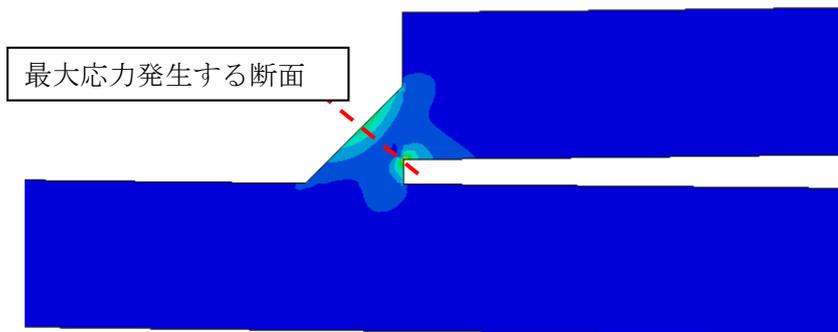
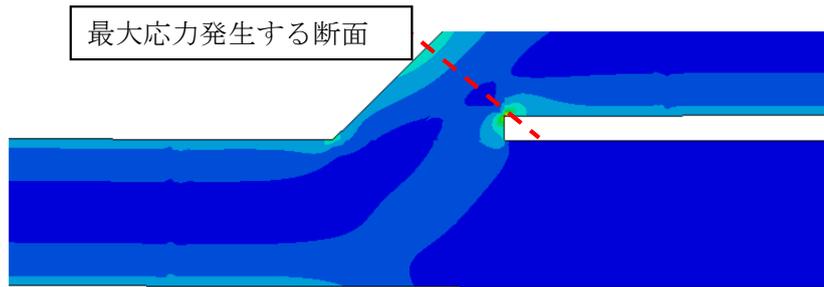


図 2.5 板厚 6mm、有害な隙間 1mm、のど厚健全とのど厚半分の 2 モデルの相当応力分布

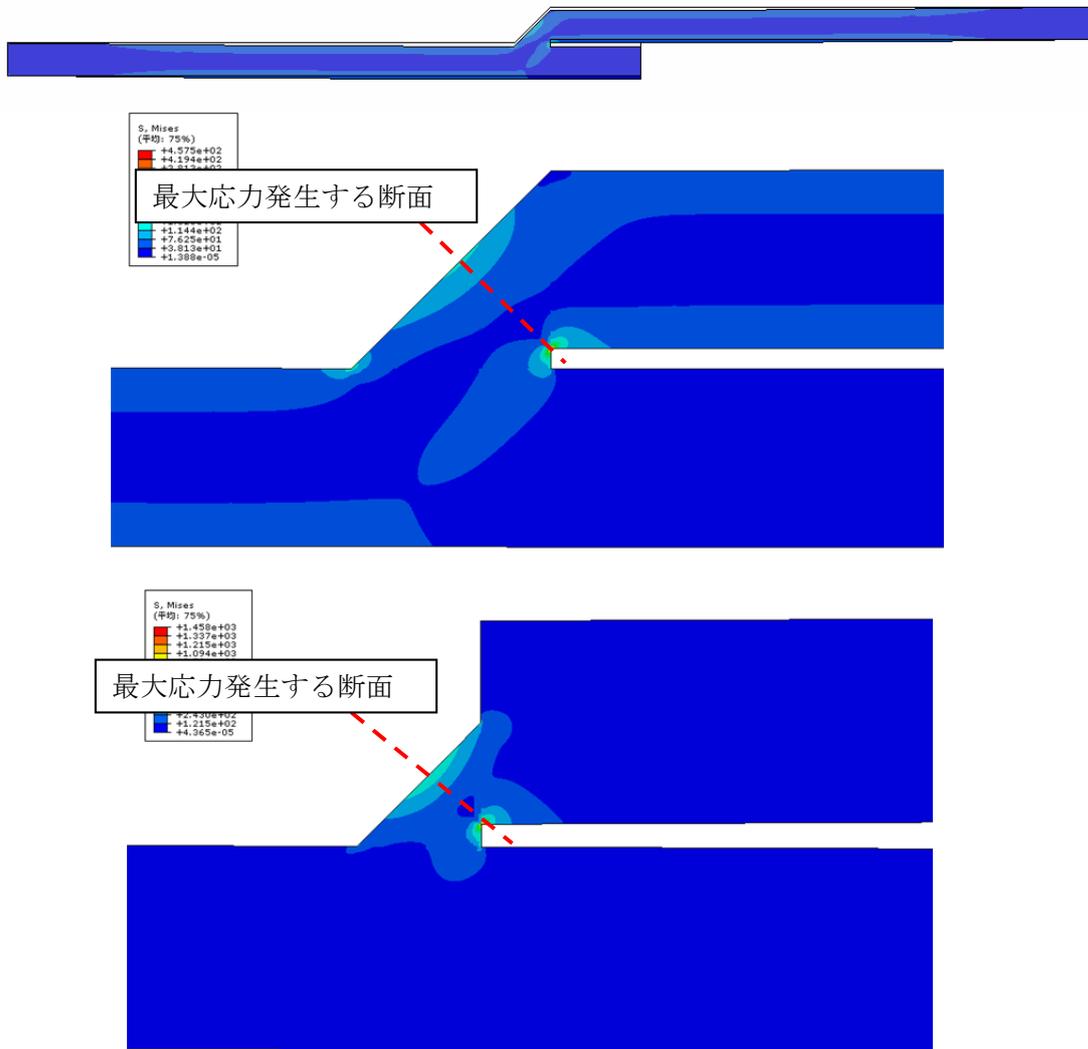


図 2.6 板厚 9mm、有害な隙間 1mm、のど厚健全とのど厚半分の 2 モデルの相当応力分布

2つの板厚モデルの各有害な隙間の大きさを変化した場合におけるA点に発生した最大応力( $A_i$ ,  $i=1,2,3$ )及びB点に発生した最大応力( $B_i$ ,  $i=1,2,3$ )を記録し、有害な隙間の変化による応力比の変化を調査した結果を表2.2(板厚6mmモデル)と表2.3(板厚9mmモデル)を示す。板厚6mmモデルにおける有害な隙間と応力比の関係線図を図2.7に示す。

表 2.2 板厚 6mm の溶接部に発生した応力比の変化 (有害な隙間の影響度調査)

板厚 6mm 有害な隙間	のど厚健全 応力比( $A_i/B_i$ )	のど厚半分 応力比( $A_i/B_i$ )	のど厚健全 応力比( $A_i/A_1$ )	のど厚半分 応力比( $A_i/A_1$ )
1	2.3	4.5	1	1
3	2.5	6.3	1	1
5	2.5	7	1	1

表 2.3 板厚 9mm の溶接部に発生した応力比の変化 (有害な隙間の影響度調査)

板厚 9mm 有害な隙間	のど厚健全 応力比( $A_i/B_i$ )	のど厚半分 応力比( $A_i/B_i$ )	のど厚健全 応力比( $A_i/A_1$ )	のど厚半分 応力比( $A_i/A_1$ )
1	2.4	4.4	1	1
3	2.6	6	1	1
5	2.6	6.9	1	1

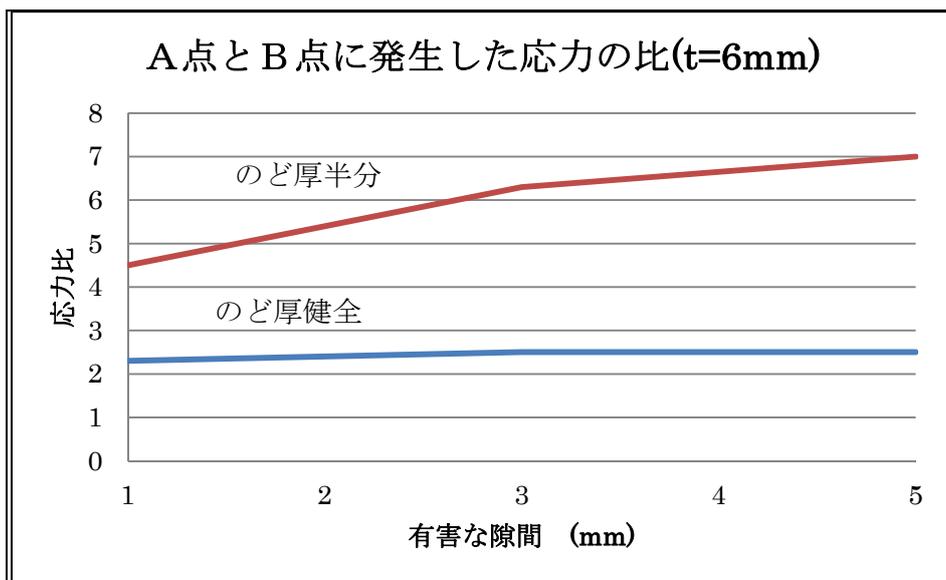


図 2.7 有害な隙間と応力比の関係 (板厚 6mm モデル)

以上の調査結果より、以下のことが観察された：

- 1) 溶接部ののど厚健全の場合、A点とB点に発生した応力の比(=A<sub>i</sub>/B<sub>i</sub>, i=1,2,3)は有害な隙間の大きさと関係なく一定となっている。またA点に発生した応力(A<sub>i</sub>, i=1,2,3)と有害な隙間1mmの場合に発生した応力A<sub>1</sub>との比(=A<sub>i</sub>/A<sub>1</sub>)も一定となっている。これら傾向は、板厚(6mm、9mm)によらず同様である。
- 2) 溶接部ののど厚半分の場合、A点とB点に発生した応力の比(=A<sub>i</sub>/B<sub>i</sub>, i=1,2,3)は有害な隙間の大きさの変化にともなって増加している(A点に発生する応力は大きくなり、B点の応力は小さくなる)。A点に発生した応力(A<sub>i</sub>, i=1,2,3)と有害な隙間1mmの場合に発生した応力A<sub>1</sub>との比(=A<sub>i</sub>/A<sub>1</sub>)は一定となっている。これらの傾向は、板厚(6mm、9mm)によらず同様である。

### (3) 試験ケースの設定

以上のパラメータの影響検討により、注目する溶接部のA点に発生する応力に対する有害な隙間の変化による影響は小さいことが確認された。そこで、有害な隙間1mm場合の試験を重点的に実施することにし、表2.4に示す試験の基本ケース(最低ケース)を設定した。

表 2.4 底板重ね継ぎ手の疲労亀裂進展試験の基本ケース

ケース番号	板厚 (mm)	有害な隙間 (mm)	のど厚 (mm)	欠陥
1	6	1	4.24	なし
2	6	1	2.12	なし
3	6	1	4.24	あり
4	6	1	2.12	あり
5	6	5	4.24	なし
6	6	5	2.12	なし

(4) 底板の重ね継ぎ手に発生する塑性ひずみの調査

試験片の溶接部の B 点付近にひずみゲージを貼って、発生するひずみを記録する予定がされている。しかし、B 点の発生ひずみに対応して、A 点にどのぐらいのひずみが発生するかよくわからない。これを把握するため、事前検討用の解析モデルを使用して、強制変位を作用する場合の注目点(A 点、B 点及び C 点、図 2.8 参照)に発生した相当塑性ひずみの大きさを調査した。材料の弾塑性特性（応力とひずみの関係）を 2007ASME B&PV Code に提供される炭素鋼の応力とひずみのカーブを使用した。その解析結果を以下の図 2.9 及び図 2.10 に示す。

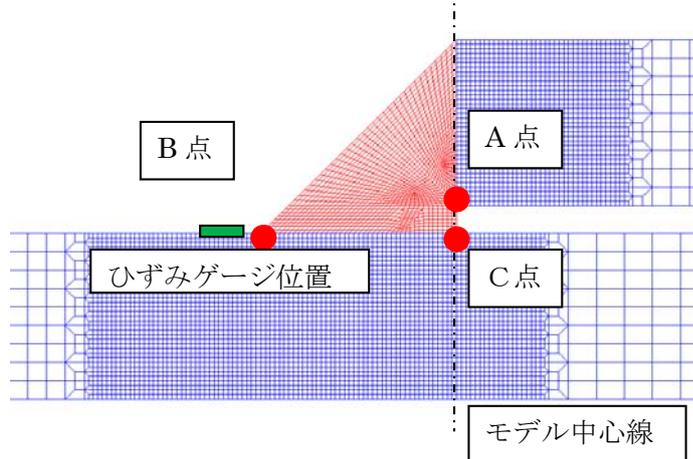


図 2.8 注目点の位置

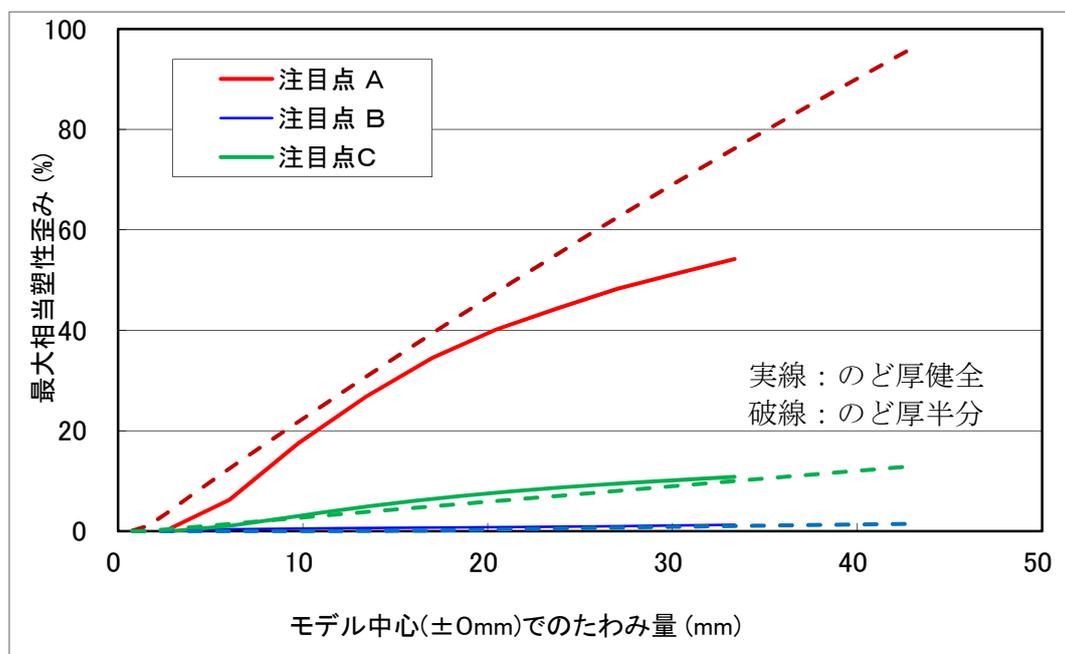


図 2.9 注目点に発生した相当塑性ひずみと重ね溶接継手のたわみの関係  
(板厚 6mm, 有害な隙間 1mm、のど厚健全とのど厚半分の 2 ケース)

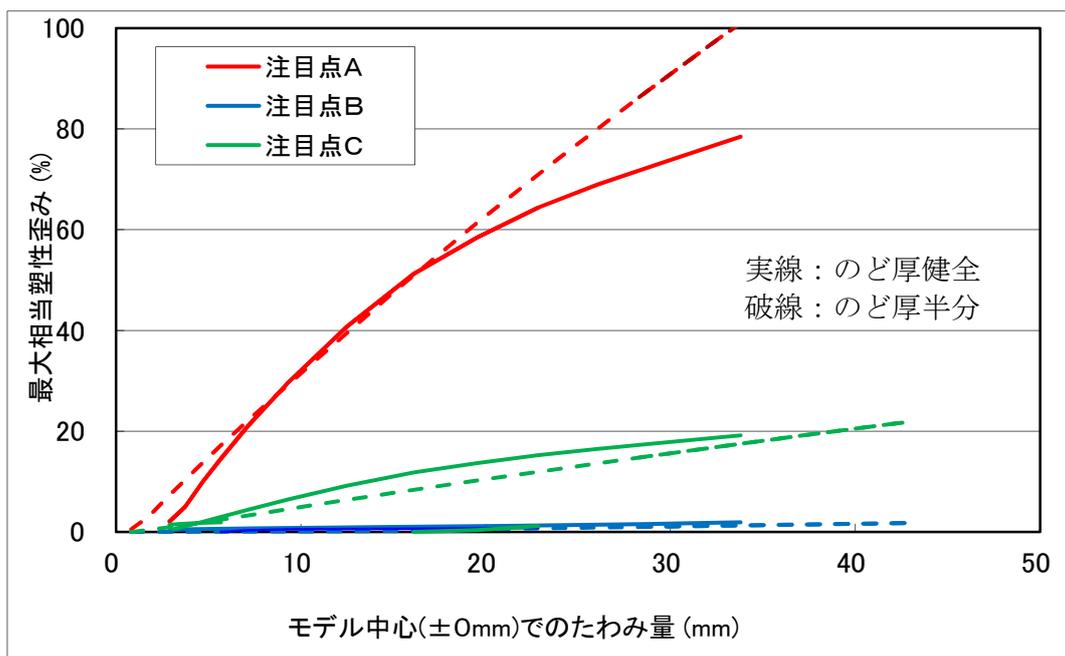


図 2.10 注目点に発生した相当塑性ひずみと重ね溶接継手のたわみの関係  
(板厚 9mm, 有害な隙間 1mm、のど厚健全と半分の 2 ケース)

以上の調査結果より、以下のことが確認できた。

- 1) B 点の発生塑性ひずみより、A 点の発生塑性ひずみははるかに大きい。
- 2) のど厚健全のモデルより、のど厚半分のモデルの A 点に発生する塑性ひずみは大きい。
- 3) 同じたわみでの比較の場合、板厚 6mm のモデルより、板厚 9mm のモデルの A 点に発生する塑性ひずみは大きい。

#### (5) まとめ

事前検討結果から分かったことは以下のとおりである。

- 1) 有害な隙間の変化による溶接部の疲労強度に対する影響は小さい。
- 2) のど厚が溶接部の疲労強度に対する影響が大きいため、重要なパラメータである。
- 3) 板厚 6mm と 9mm の 2 つのモデルでの調査結果は同じ傾向を示す。
- 4) 調査結果に基づき試験ケースを設定した。対応する試験片の制作を実施中。

今後の検討として、以下の項目を実施する。

- 1) 文献調査と情報収集により、き裂進展解析の方法を選定する。なお、既往のすみ肉溶接に関する疲労解析の研究としては、発電設備における小口径配管のソケット溶接継手に関する高サイクル疲労解析や、石油タンクの浮き屋根におけるデッキ板の重ねすみ肉溶接継手に関する低サイクル疲労解析の例がある。
- 2) 2次元平面ひずみ解析モデル作成し、解析を実施する。

### 3 重ねすみ肉溶接に係る 4 点曲げ疲労亀裂進展試験

#### (1) 溶接素材製作 (図 3.1)

素材：SS400

板厚：6mm の 1 種類

幅方向（溶接長）：500mm

長手方向（溶接直角方向）500mm

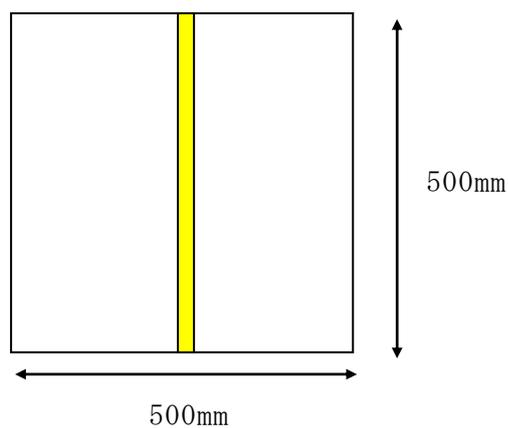


図 3.1 溶接素材イメージ

	無欠陥	ブローホールあり
隙間1mm	のど厚2ケース 各3枚 計6枚	のど厚2ケース 各1枚 計2枚
隙間5mm	のど厚2ケース 各3枚 計6枚	のど厚2ケース 各1枚 計2枚

隙間 (図 3.2 参照) 2 ケース：1mm、5mm

のど厚 (図 2.3 参照) 2 ケース： $6/\sqrt{2}$ mm、 $3/\sqrt{2}$ mm

無欠陥材の各 1 枚は予備

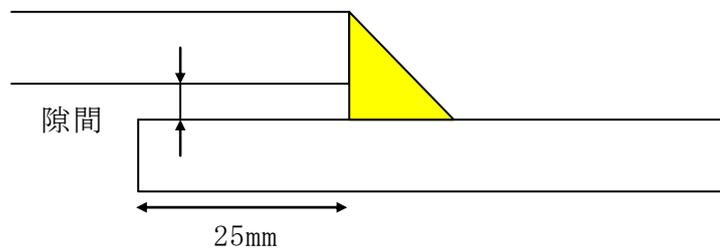


図 3.2 隙間イメージ

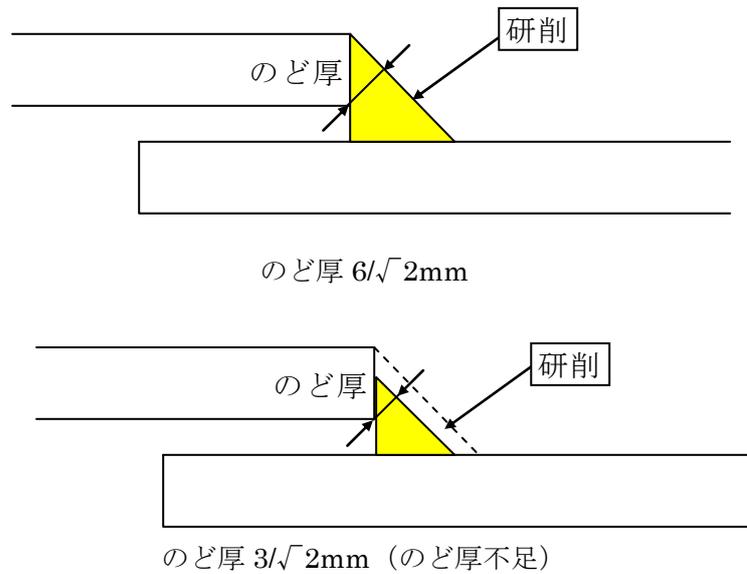


図 3.3 のど厚イメージ

ルート部の欠陥はブローホールで作成する（図 2.4）。欠陥の大きさは出来たなりとするが、板内になるべく多く発生させる。

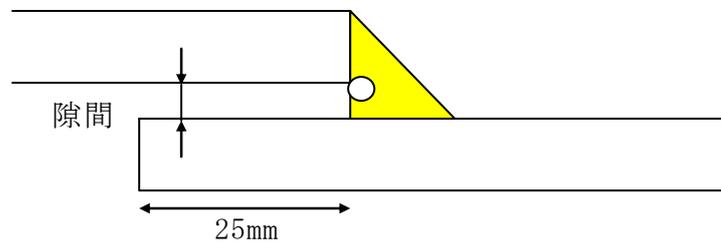


図 3.4 溶接部欠陥イメージ

(2) 溶接部欠陥確認（X線透過試験）

- ・無欠陥材：欠陥がないことを確認する。
- ・ルート部欠陥材：欠陥位置を把握し、試験片を採取する。

(3) 試験片加工

- ・製作した継手素材より図 3.5 に示す曲げ試験サンプルを加工する。
- ・1枚の溶接素材より4本加工する。
- ・1ケースにつき無欠陥材8本（各1本予備）、欠陥材4本（各1本予備）加工する。
- ・のど厚管理のため、のど厚2ケースはいずれも研削することとする。

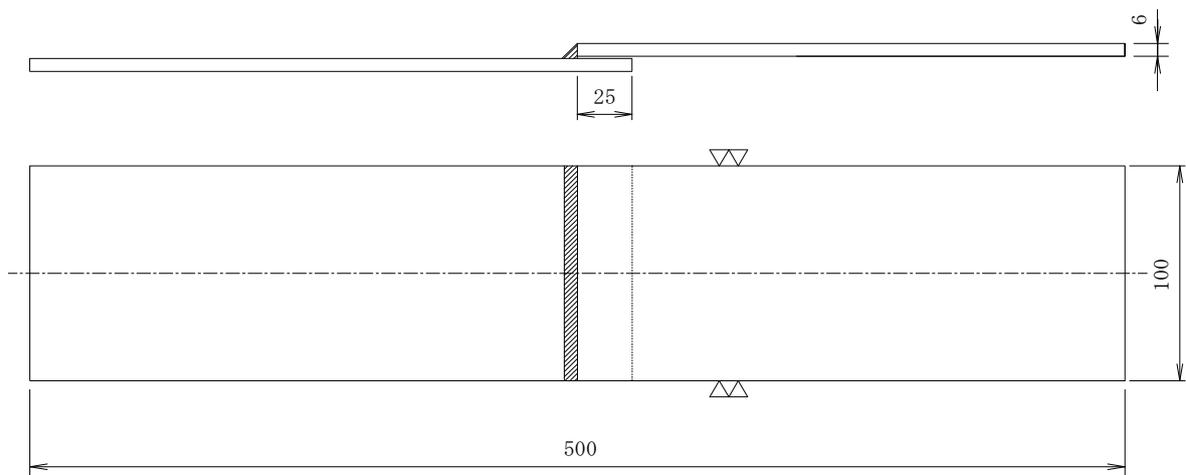


図 3.5 曲げ疲労試験片形状

(4) 負荷方法

図 3.6 に示すように、負荷は下スパン 300mm、上スパン 200mm の 4 点曲げで実施する。重ねすみ肉により発生する段差は治具で高さを調整することとする。

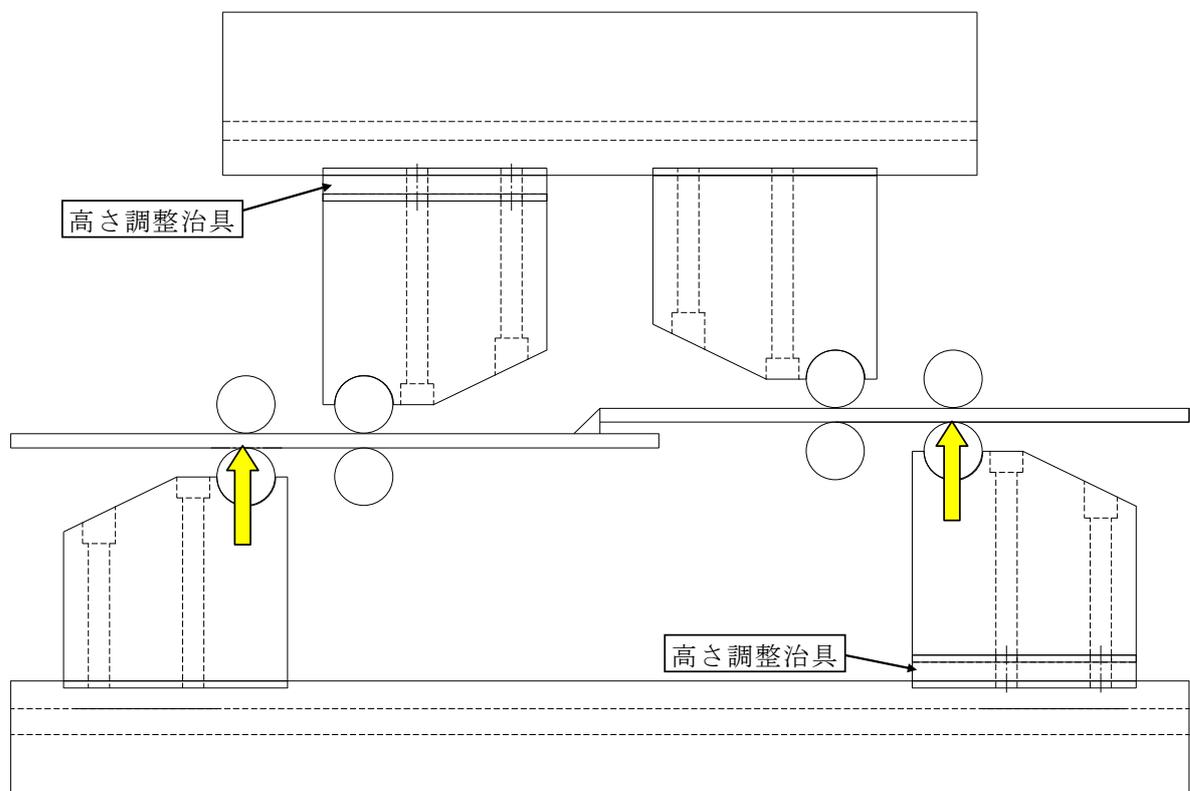


図 3.6 4 点曲げ試験イメージ

(5) 静的負荷試験（無欠陥材）

強度を把握するため、4点曲げ負荷にて最大荷重を求める。静的負荷の際には、試験片に塑性域ひずみゲージを貼り付けて試験を実施し、荷重、ひずみ及び試験機変位のデータを採取する。

試験本数は8本（隙間2ケース×のど厚2ケース×各2本）とする。

(6) 疲労試験

ア 疲労寿命把握（無欠陥材）

静的負荷試験の結果で得られたひずみと変位の関係から、目標とするひずみの時の変位値で試験を実施する。

例：試験ひずみ  $5000 \mu \epsilon$ （低サイクルで破断すると予想されるひずみ値：解析から想定）  
静的試験でひずみが  $5000 \mu \epsilon$  になった時点での変位が  $5\text{mm}$  であったとする。  
この場合、試験は  $0\sim 5\text{mm}$  の変位制御での疲労試験をする。

疲労寿命把握試験の際は、静的負荷試験の際と同じ位置に弾性域ひずみゲージを貼り付け、任意のサイクルで荷重、ひずみ及び試験機変位のデジタルデータを採取する（1回の採取でサイン波2波程度）。

き裂の発生に伴い最大荷重は下がってくるため、当初最大荷重の25%まで最大荷重が落ちてきた時点で破断と判断して試験を終了する。

試験本数は4本（隙間2ケース×のど厚2ケース×各1本）とする。

イ 途中止め試験（無欠陥材）

アで実際に得られた回数の10、20、40、60%（仮）の回数で試験を中断し、液体窒素冷却後に破断させて破面を現出させ、疲労き裂の進展状況を確認する。

ウ 途中止め試験（欠陥材）

アで実際に得られた回数の10、20、40%（仮）の回数で試験を中断し、液体窒素冷却後に破断させて破面を現出させ、疲労き裂の進展状況を確認する。