
HFMI処理溶接継手に生じた表面き裂の破壊力学特性

大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学部門

武内崇晃



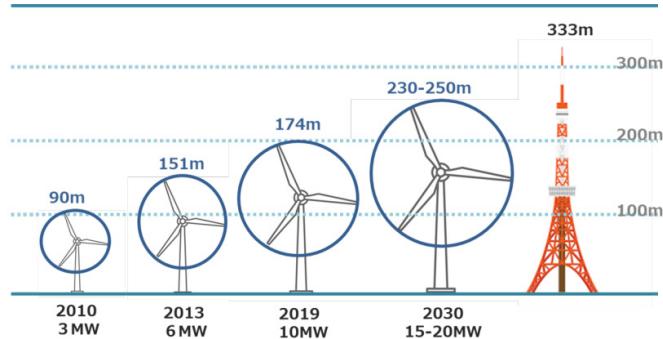
洋上風車・船舶の大型化

2020年10月、菅前総理より「2050年カーボンニュートラル（CN）」宣言

- 再生可能エネルギーへの期待、風力エネルギーは風速の3乗と受風面積に比例

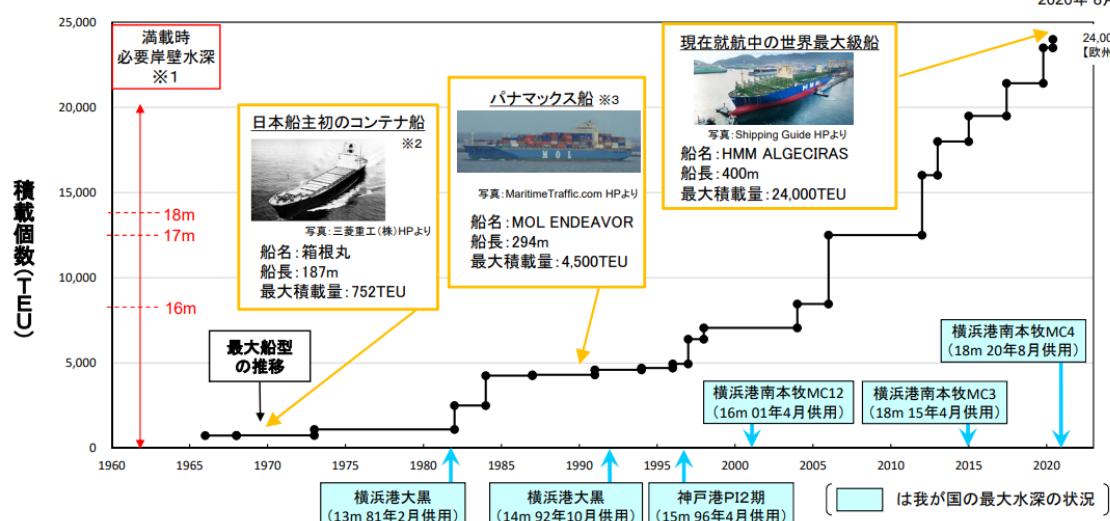


(出所：五島フローティングウインドファーム合同会社)



(出典：経済産業省「2050年カーボンニュートラルに向けた
洋上風力発電政策の現状について」)

- 規模の経済性を狙った船型の大型化



(出典：国土交通省「コンテナ船の大型化と
我が国港湾の最大水深岸壁の推移」)

板厚影響による疲労強度低下

溶接構造物の大型化により鋼板の厚板化 ($>100\text{ mm}$) . しかし、**板厚影響により疲労設計が成立しないおそれ**

要因：応力集中，応力勾配，残留応力，溶接変形等の差異

例えば…

JSSC疲労設計指針では、継手形式および等級毎に設定される基本疲労強度に対して、板厚 t に応じて次式を乗じて補正する。

$$C_t = \left(\frac{25}{t}\right)^{0.25}$$

- 板厚影響を考慮すると、厚板化がさらに進む
- JSSC基準線と疲労試験結果を比較した右図では、板厚80 mmの高応力側で非安全側

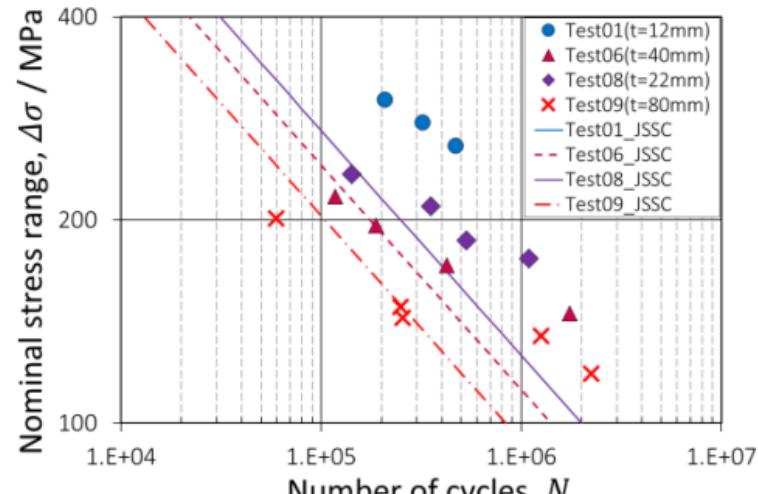
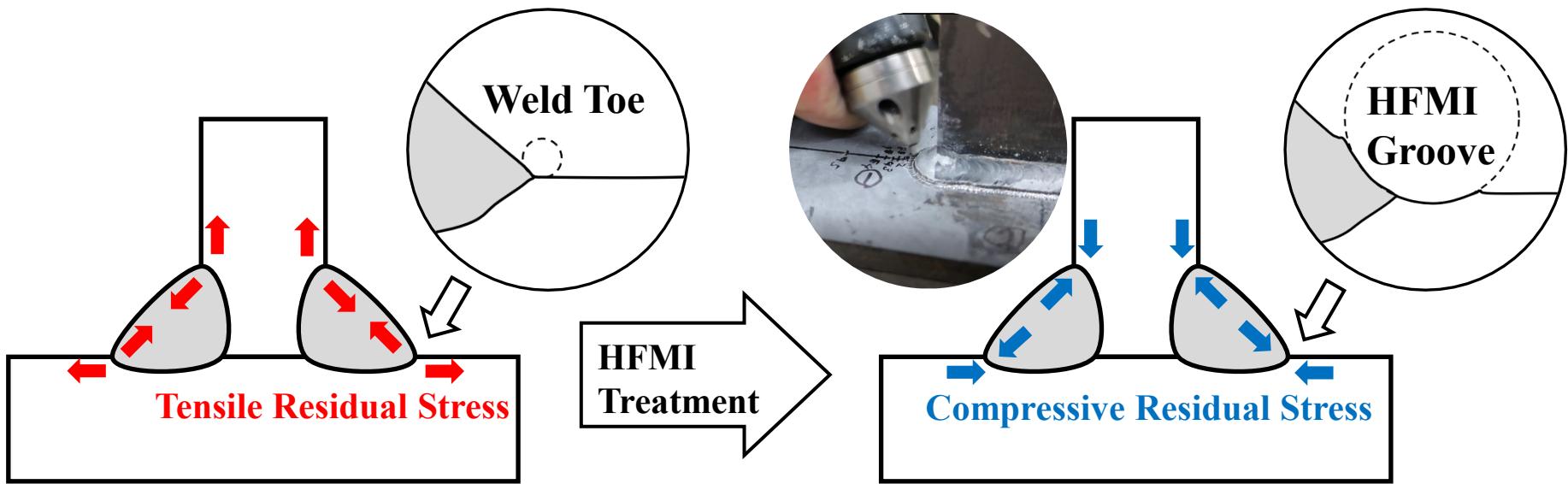


図-1 S-N関係 (疲労試験結果)

(出典：堤ら, 継手疲労寿命に対する板厚効果に関する検討, 応用力学論文集, 2020)

High Frequency Mechanical Impact (HFMI)

打撃ピン (HFMIツール) により高周波数で溶接止端を繰返し打撃 ($f > 90\text{Hz}$)

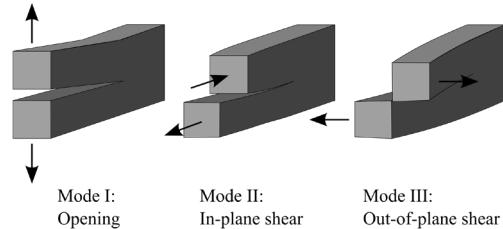


HFMIの疲労強度改善メカニズム

1. 圧縮残留応力 (RS)
2. 止端半径の増大 ($r > 1.5 \text{ mm}$)

本研究の目的

- 不規則な波浪荷重による**圧縮RSの緩和**は、HFMIの疲労強度改善効果を減退させる可能性があり、ランダム荷重下での安定性を合理的に推定する必要がある
- 先行研究（例えば，Leitner, M.[2017]）では、HFMIグループ内のRS分布を単純な一軸応力分布で近似し、モードI応力拡大係数（SIF）のみ評価
- 高精度な疲労き裂伝播解析には、HFMI処理で導入される不均一な多軸RS場下での表面き裂の混合モード応力拡大係数(MM-SIF)の評価が必要



HFMIによる圧縮RSの数値解析とMM-SIFの評価

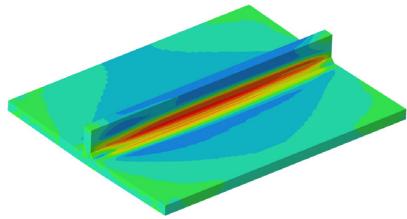
- 熱弾塑性解析による溶接シミュレーション
- 対象溶接継手の試験片形状を模擬した切断シミュレーション
- 動的陽解法有限要素解析によるHFMI処理シミュレーション
- HFMIグループに発生した表面き裂の破壊力学特性（MM-SIF分布）を評価

Kyaw, P. M., Osawa, N., Gadallah, R., Tanaka, S., Accurate and Efficient Method for Analyzing Mixed-Mode SIFs for Inclined Surface Cracks in Semi-Infinite Bodies by Using Numerical Influence Function Method, *Theor. Appl. Fract. Theor. Appl. Fract. Mech.*, 2020, pp.106.

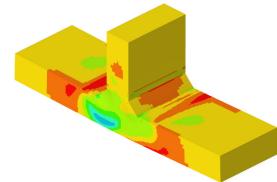
陽解法動的有限要素解析による T継手HFMI処理シミュレーション

解析概要

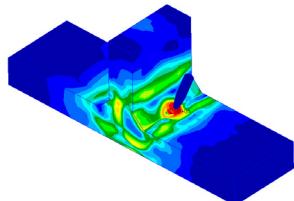
- T型すみ肉溶接継手試験体：板厚 19 mm



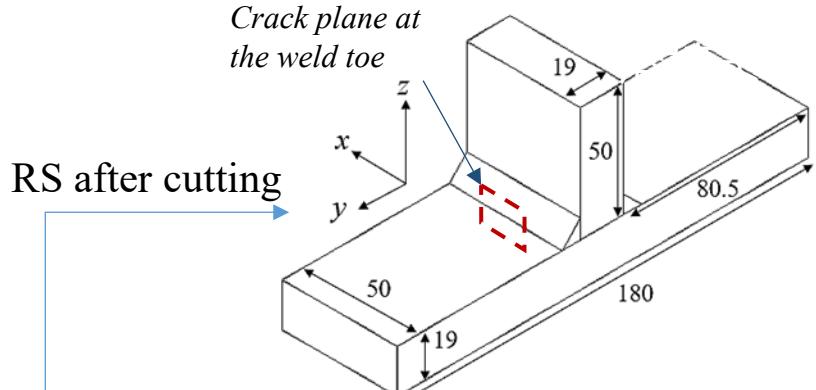
Welding analysis
(in-house code JWRIAN)
- Thermal analysis
- Mechanical analysis



Cutting analysis
(in-house code JWRIAN)
- Mechanical analysis



HFMI simulation
(Altair Radioss)
- Explicit elastic-plastic analysis

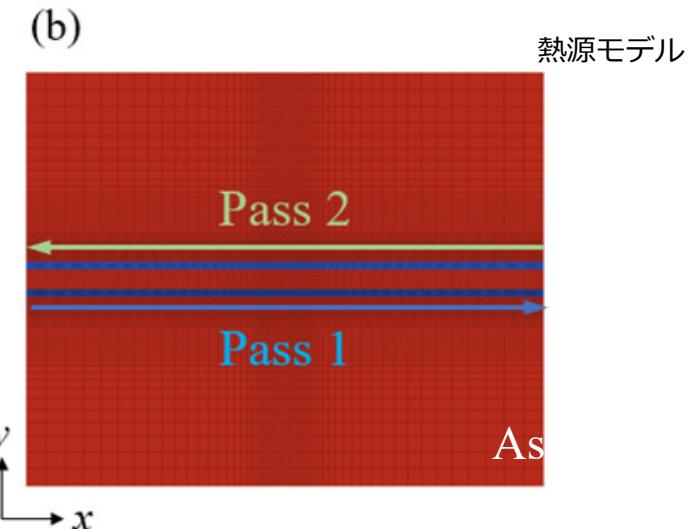
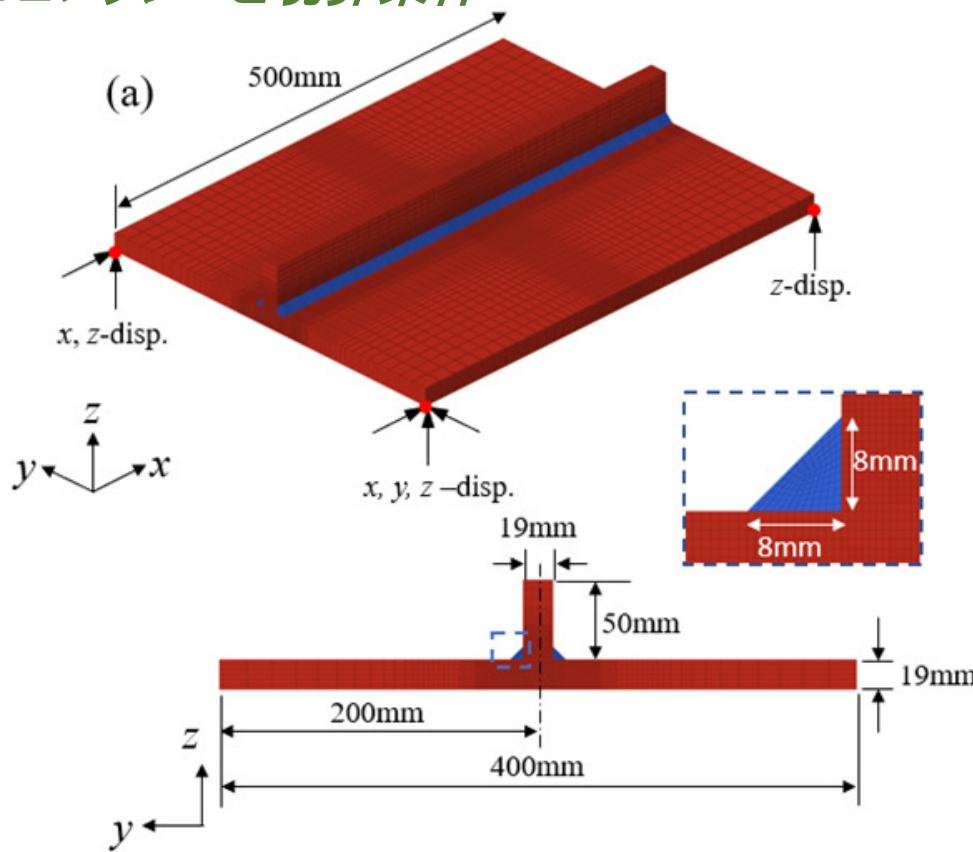


MM-SIF calculation
- Estimated RS are imported to the crack face of the cracked FE mesh.
- The developed IFM-based SIF calculation system is used.

溶接熱弾塑性FEM解析 (JWRIAN)

- FEモデル：8節点6面体要素（要素数258,840, 節点数274,195）
- 要素辺長：溶接ビード及び熱影響部のみ $0.7 \times 0.7 \times 2.5$ mm
- 熱源モデル：均一密度熱流束モデル

FEメッシュと境界条件

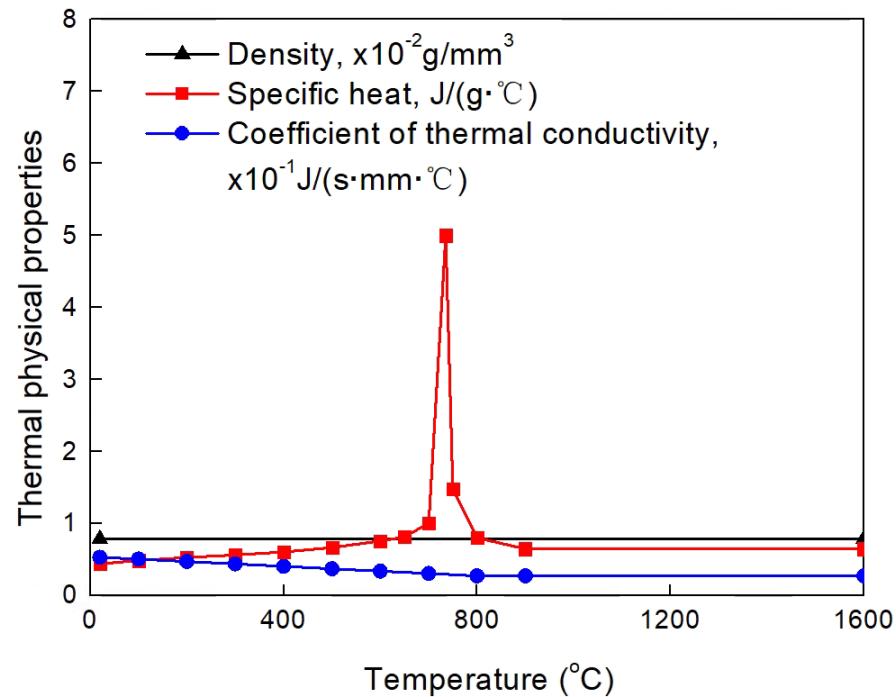
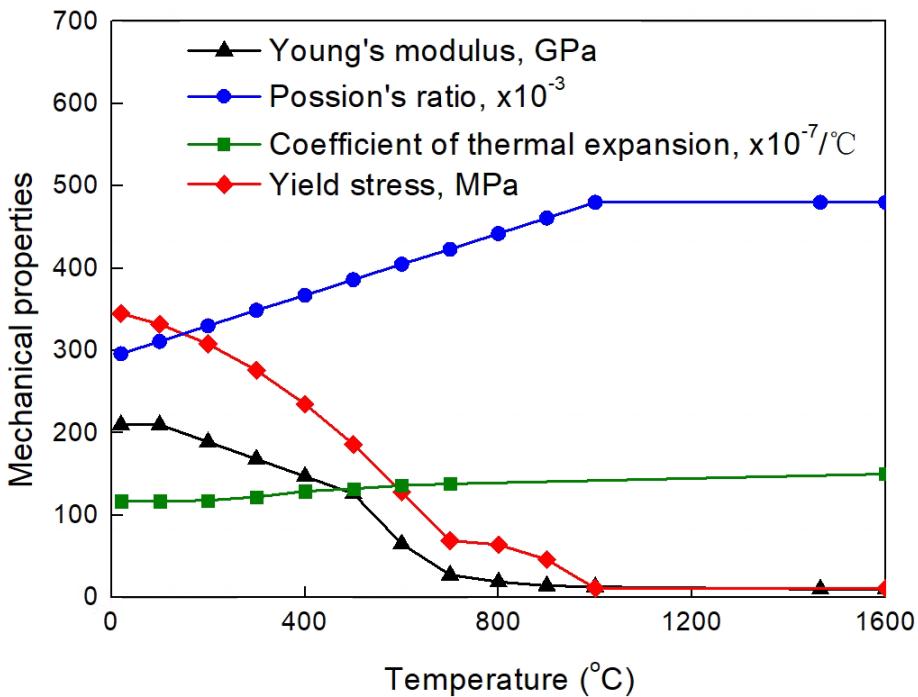


Welding conditions for each pass

Pass	Type	Power (W)	Speed(mm/s)	Inter pass temp.
1	Fillet seam	16000	8	60
2	Fillet seam	16000	8	20

溶接熱弾塑性FEM解析 (JWRIAN)

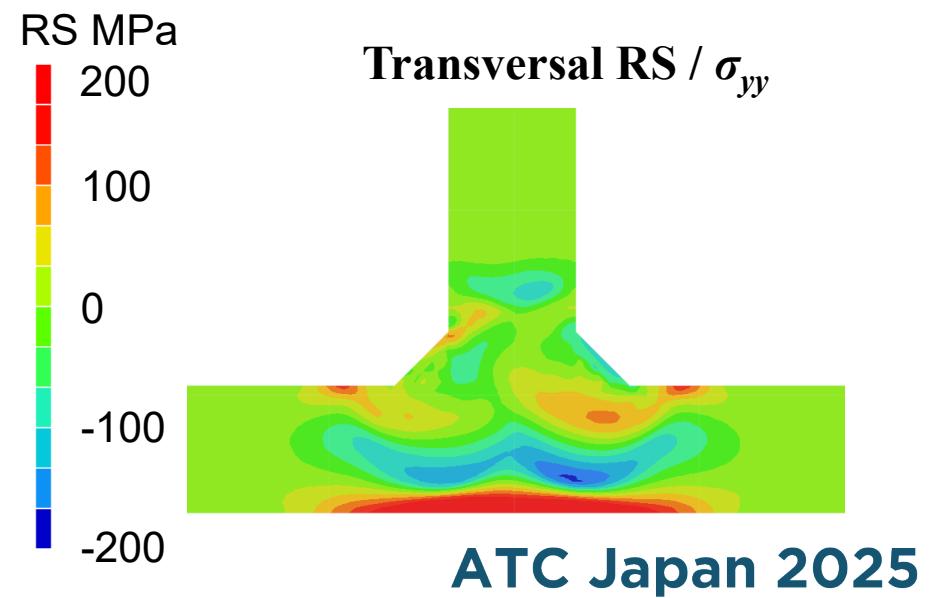
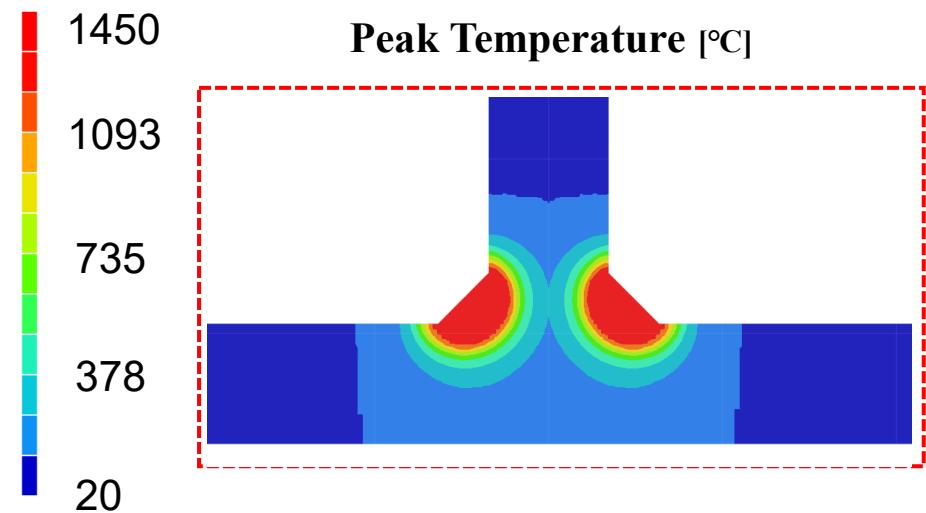
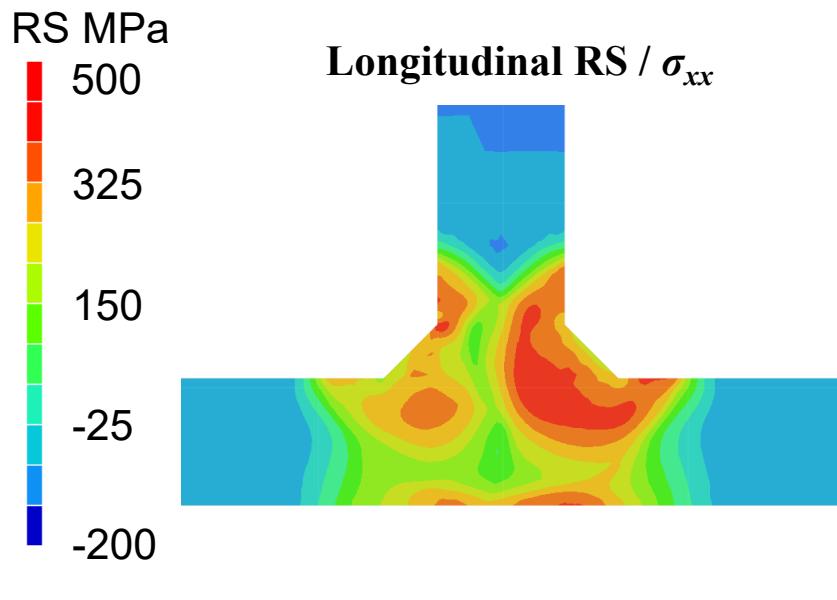
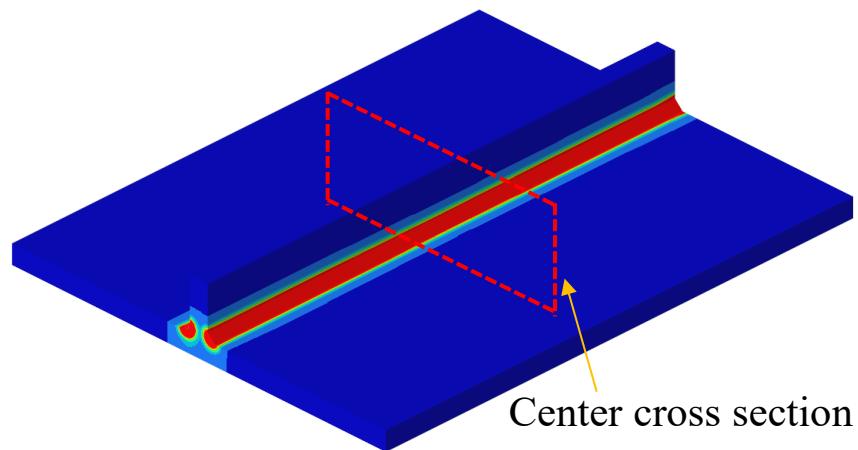
材料特性温度依存性: 母材・溶接金属 とともにS355J2H鋼 (Acevedo, C. [2011])



- 熱物性・機械的性質の温度依存性を考慮
- モデル表面の対流熱伝達係数は温度に依らず一定値20 W/m²K
- 相変態は考慮せず。

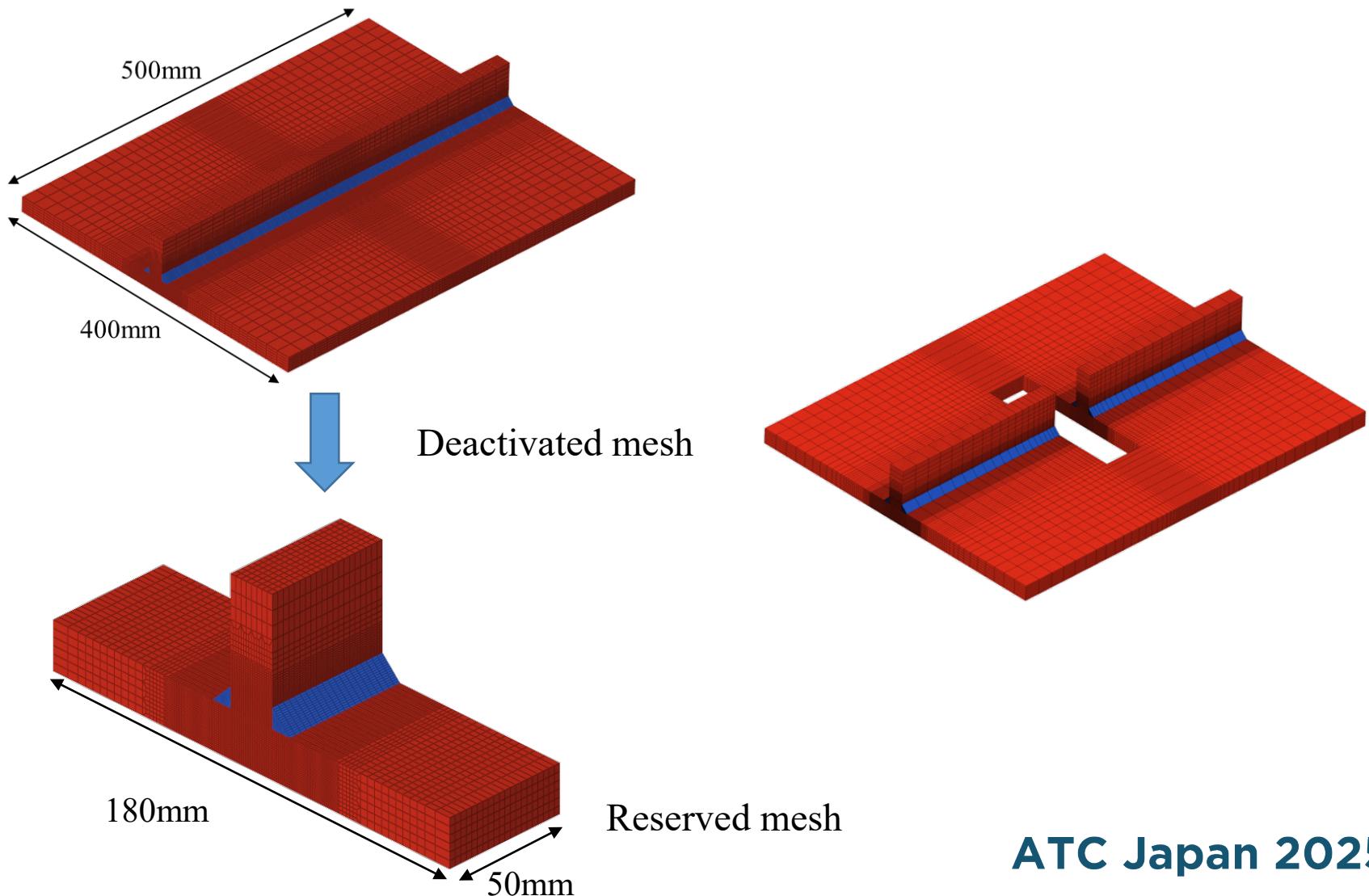
解析結果：溶接残留応力

- 熱影響部内でロンジ方向に高い引張り残留応力が発生



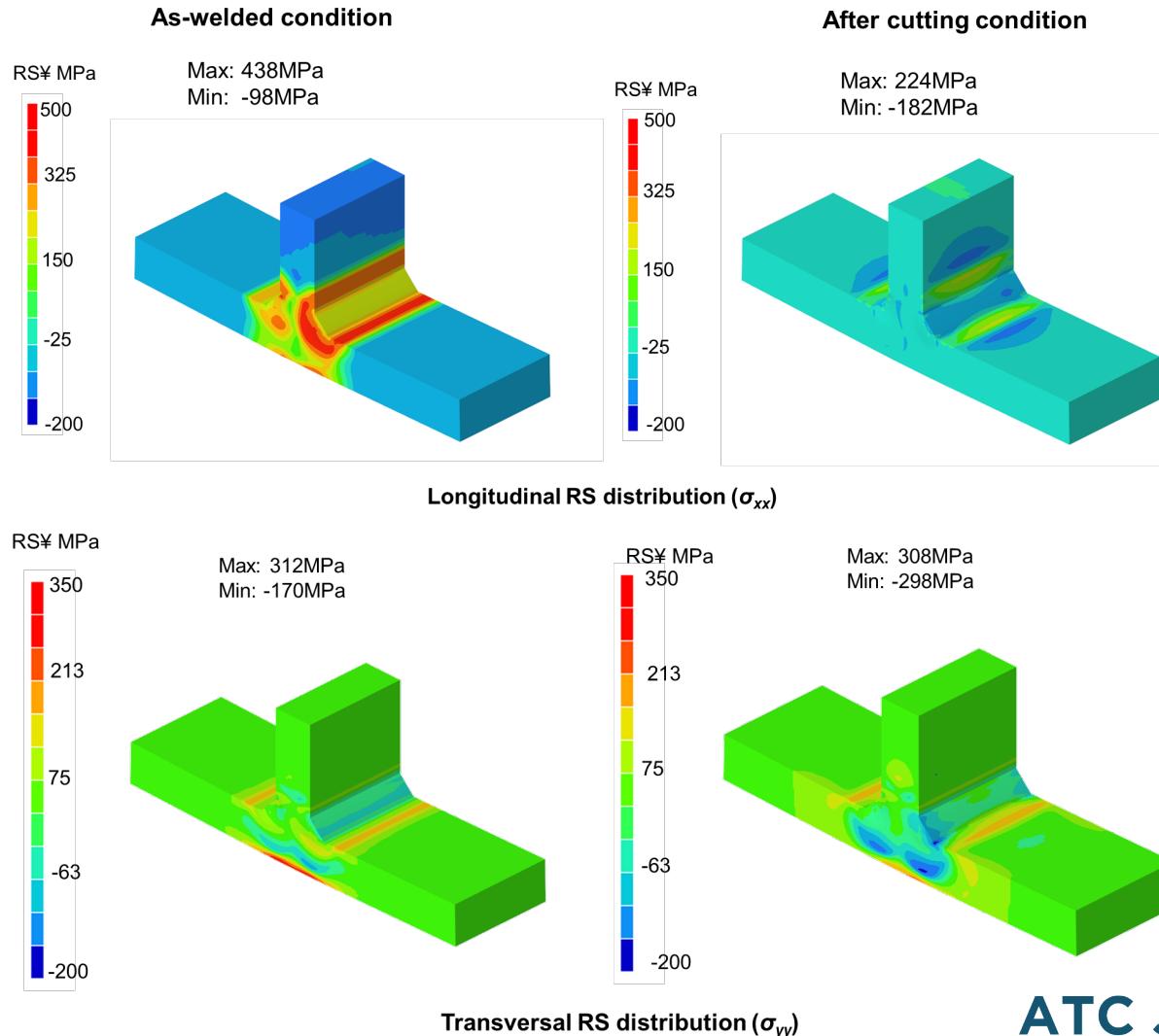
溶接後切断シミュレーション (JWRIAN)

- 溶接後の残留応力を切断解析の初期応力としてリストア解析



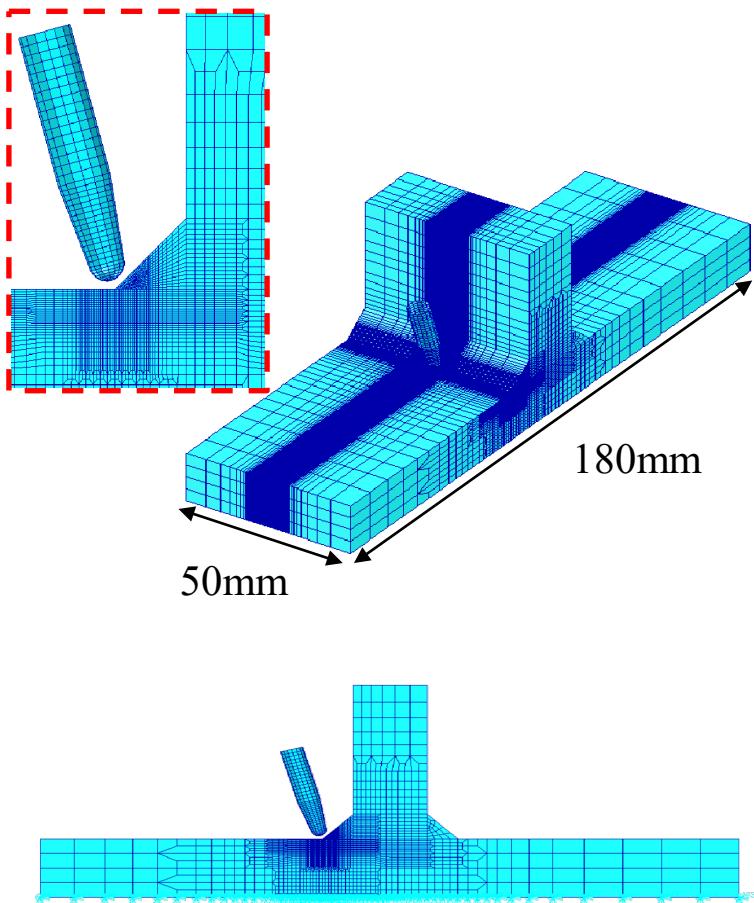
解析結果：切断後の溶接残留応力

- 切断後の平衡状態では、ロンジ方向のピーク応力が減少



HFMI解析 (Radioss)

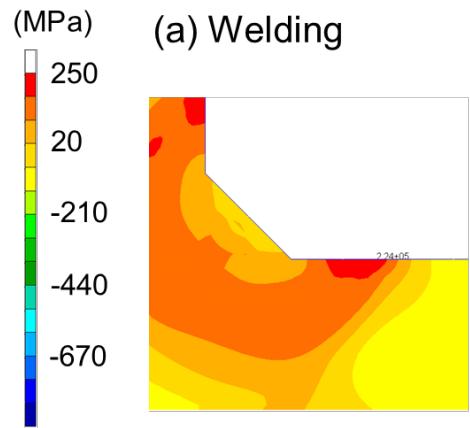
FE Mesh and Boundary Conditions



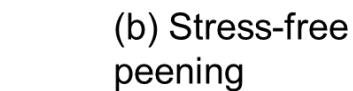
<FEモデル・解析条件>

- 8-node 3-D ソリッド要素
- 最小要素サイズ: $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ mm (ISSC rec.)
- 打撃ピン : 剛体4-node 2-D シェル要素;
- 接触解析Master : 試験体, Slave : 打撃ピン
- ピン半径 = 2.0 mm, ピーニング長 = 8.0 mm
- 周波数 = 100Hz
- 主板背面のxyz方向変位を拘束
- 等方硬化
- Solver: Altair Radioss
- 疎な溶接解析用メッシュの溶接まま残留応力を, HFMI解析用細密メッシュに補間して移行.

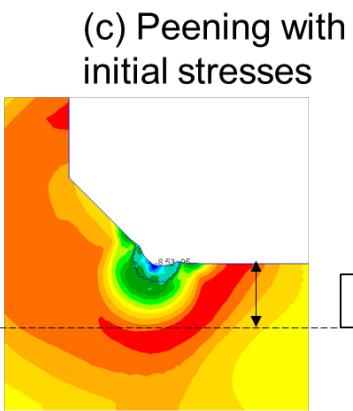
解析結果：HFMI処理後の残留応力



(a) Welding

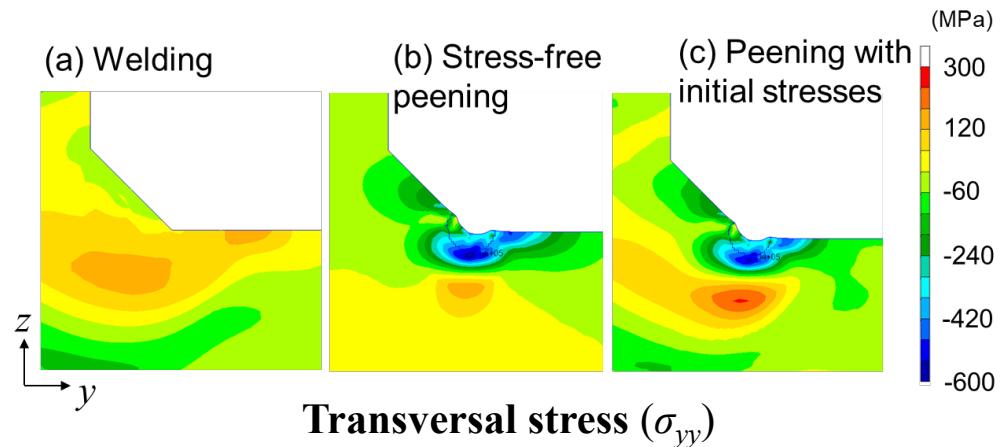


(b) Stress-free peening

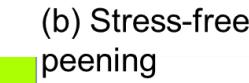


(c) Peening with initial stresses

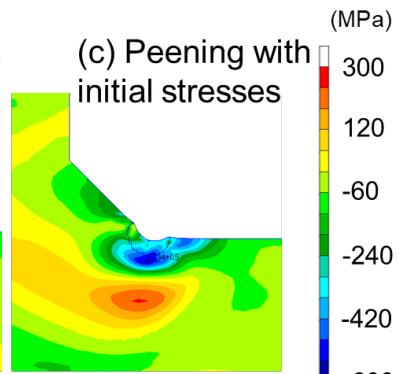
Longitudinal stress (σ_{xx})



(a) Welding



(b) Stress-free peening



(c) Peening with initial stresses

Transversal stress (σ_{yy})

- ✓ HFMI処理によって止端が円弧上に変形し、大きな圧縮残留応力が発生
- ✓ ピーニング深さ0.246 mm・幅3.53 mmとなり、国際溶接学会(IIW)の推奨範囲

多軸残留応力場を考慮した破壊力学解析

破壊力学解析 (MM-SIF)

影響関数法 (Influence Function Method, IFM)

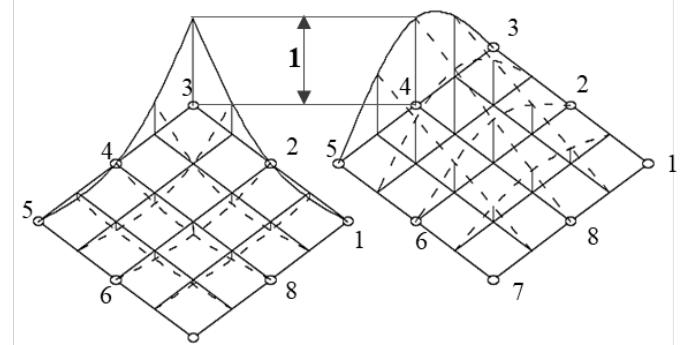
き裂面上の節点Pと、き裂前縁上の節点Qを考える。節点P周辺要素面に作用するの単位分布荷重(UDL) ij成分に対する節点Qの位置でのMM-SIF ($K_I^{ij,PQ}, K_{II}^{ij,PQ}, K_{III}^{ij,PQ}$) を評価し、ij,P,Qの全ての組み合わせから影響係数データベース (ICDB) を構築する。

ICDBを一度計算しておけば、任意の外力や残留応力分布におけるSIFが即座に計算可能。

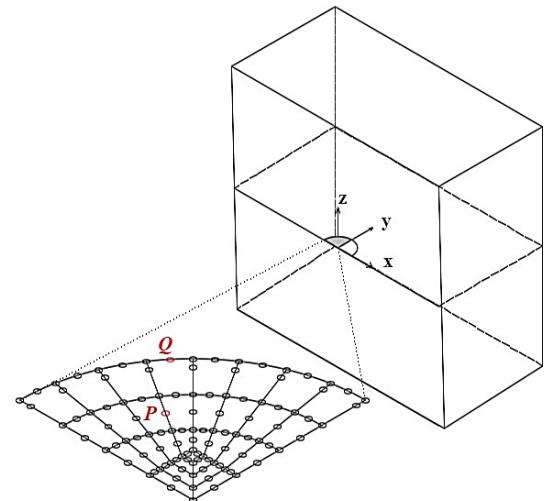
$$\left\{ \begin{array}{l} K_I^Q = \sum_P K_I^{ij,PQ} \\ K_{II}^Q = \sum_P K_{II}^{ij,PQ} \\ K_{III}^Q = \sum_P K_{III}^{ij,PQ} \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} \sigma_{ij,P} \\ \sigma_{ij,P} \\ \sigma_{ij,P} \end{array} \right.$$

Influence coefficient
database (ICDB)

Traction stresses
data

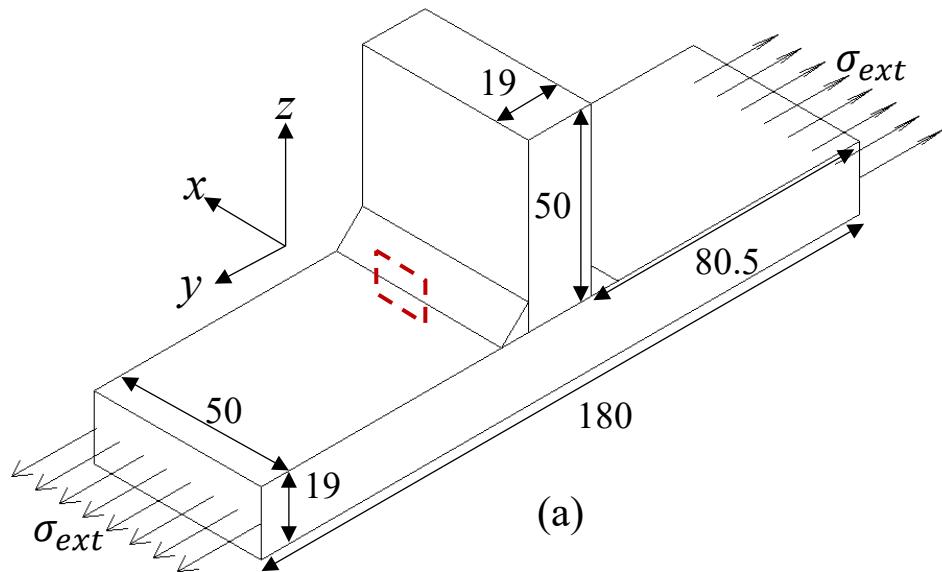


Unit distributed load (UDL)

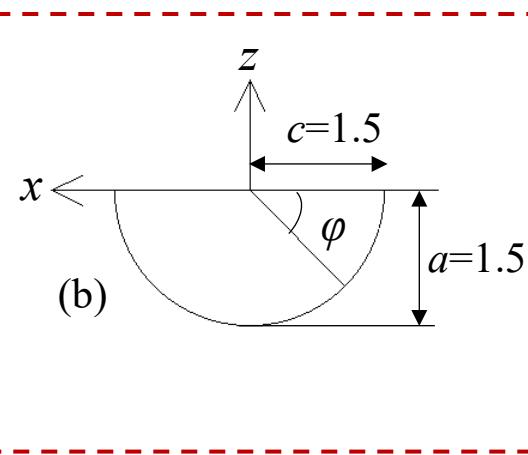


Cracked body and crack face

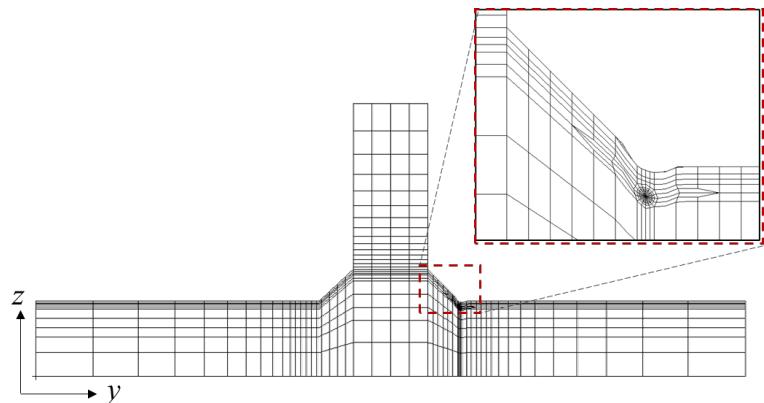
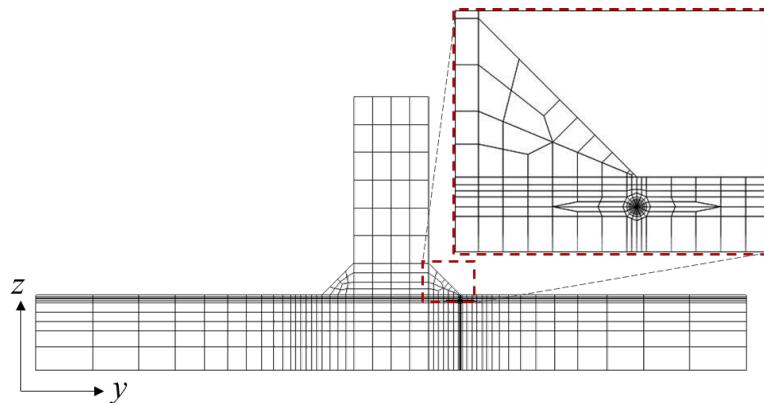
解析対象：HFMIグループ底に生じた半梢円表面き裂



①溶接ままT継手(1/2モデル)



②HFMI処理T継手(1/2モデル)
グループ形状に沿うように①を修正

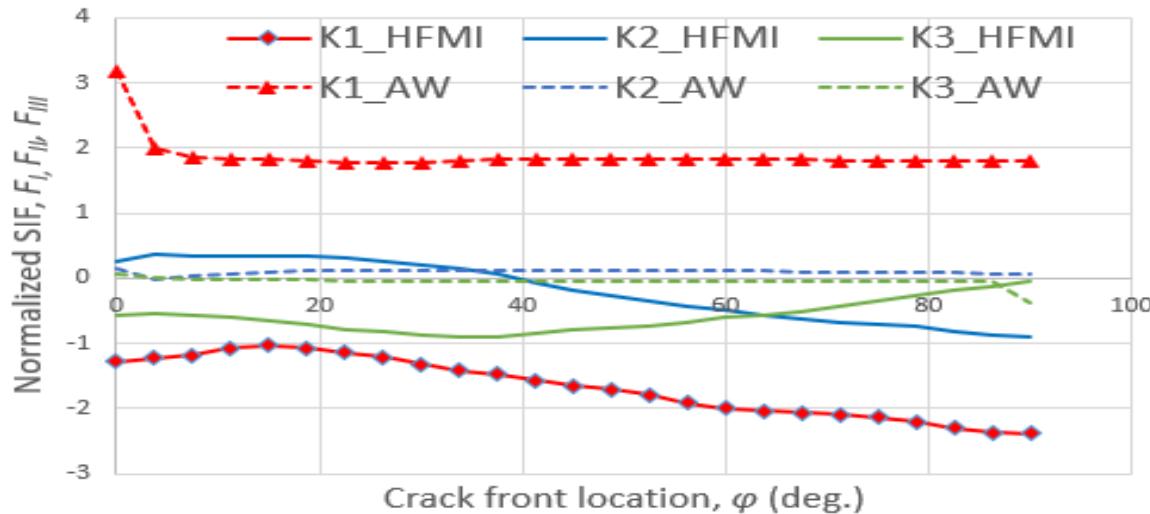


破壊力学解析 (MM-SIF)

- ①AWき裂モデル, ②HFMIき裂モデルのICDB を生成
- 溶接-HFMI解析のRSをき裂面FE節点位置で補間し, き裂面応力を計算
- き裂面応力×ICDBの線形重ね合わせにより, き裂前縁節点のMM-SIFを計算
- MM-SIFは次式で正規化したものを比較 (QはNewman and Rajuのき裂形状パラメタ)

$$F_{I,II,III} = \frac{1}{\sigma \sqrt{\pi a/Q}} K_{I,II,III}; \quad Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}$$

- AW条件では, F_I は全域で正. 溶接止端のノッチ特異性により, $\varphi = 0$ (mouth) で増大.
- HFMI処理条件では, F_I が全域で負. 溶接止端が円弧となりノッチ応力の特異性が消失.
- 一方, F_{II}, F_{III} では, 物理的な解釈が難しいものの, HFMIではAWと比べて変化大.



まとめ

- T溶接継手を対象に, HFMI溝内の不均一な多軸残留応力 (RS) 場下における表面き裂の混合モード応力拡大係数 (MM-SIF) を影響関数法 (IFM) にて評価し, HFMI処理が溶接継手の疲労特性に与える影響について検討を行った.
- 溶接有限要素 (FE) 解析およびピーニングFE解析を実施し, AW (As-Welded) およびHFMI処理継手の表面き裂面上の残留応力 (RS) を算出した.
- AWおよびHFMI処理継手において, 影響係数データベース (ICDB) を構築し, これにより複雑な応力場におけるSIFの評価が可能となり, 従来の解析手法と比較して高い計算精度と効率を実現できることを確認した.
- 解析結果から, AW条件ではき裂前縁全体で K_I が正の値を示し, 特にき裂口部近傍で急激な上昇が観察された. 一方, HFMI処理条件では, き裂前縁全体で K_I が負の値を示し, き裂口部近傍における急激な上昇は観察されなかった.
- HFMI処理による圧縮残留応力の導入が, き裂口部周辺の応力集中を抑制し, き裂の進展を遅延させる効果を持つことを示唆している.
- 本研究の結果は, HFMI処理による疲労寿命の向上を定量的に評価するための基礎的知見を提供するとともに, IFM法を用いたSIF評価の有効性を実証するものである. 今後, さらに多様なき裂形状および応力条件に対する適用性を検証し, 実際の構造設計への適用可能性を検討する.



ご清聴有難うございました