

スポット溶接された超ハイテン材の破壊予測技術の開発

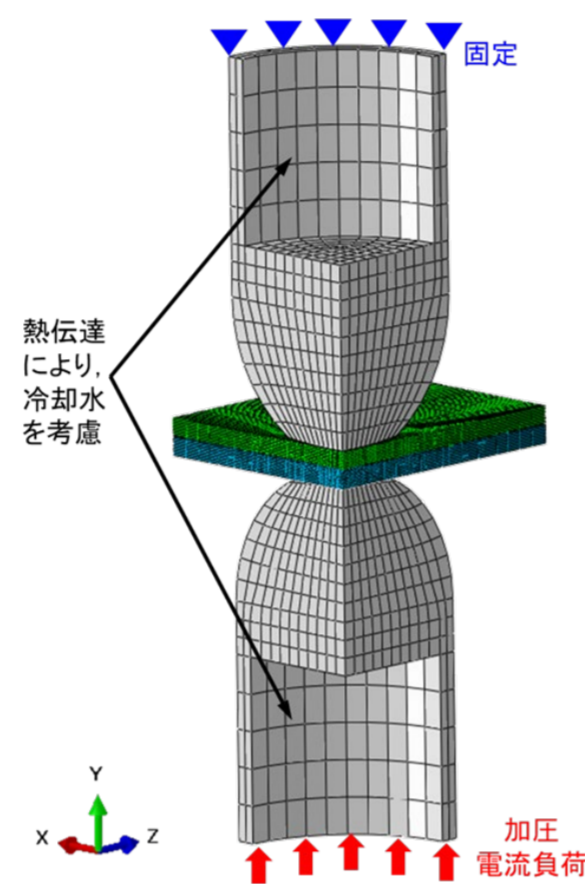
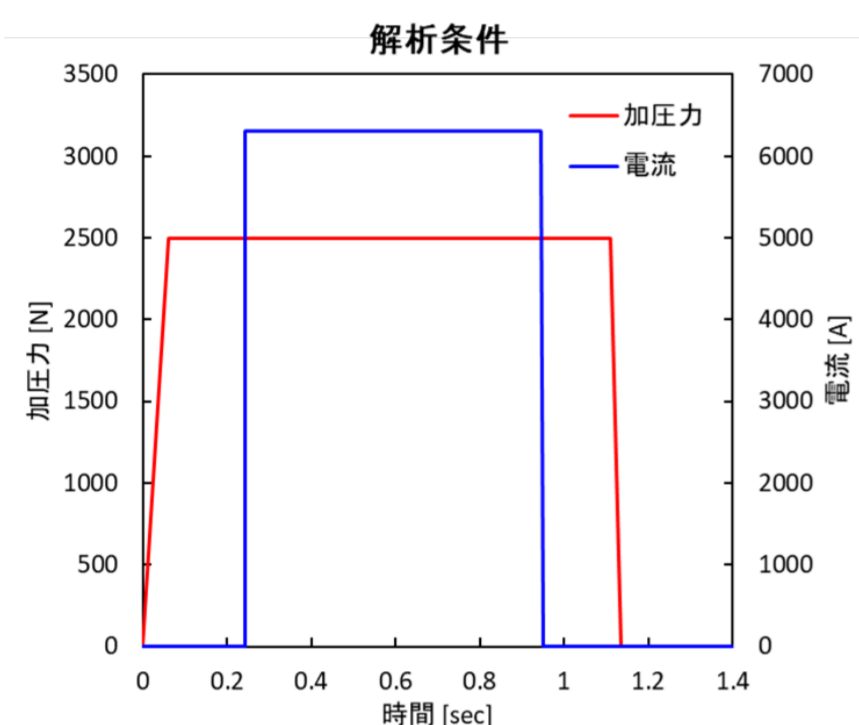
本研究開発は、国立研究開発法人 科学技術振興機構・A-STEP 産学共同(本格型)*に採択され、株式会社メカニカルデザイン、東北大学、慶應義塾大学、名古屋市工業研究所の共同研究を、3年間にわたり推進してきました。以下にその成果を示します。

スポット溶接の接合プロセスの解明

■ 概要

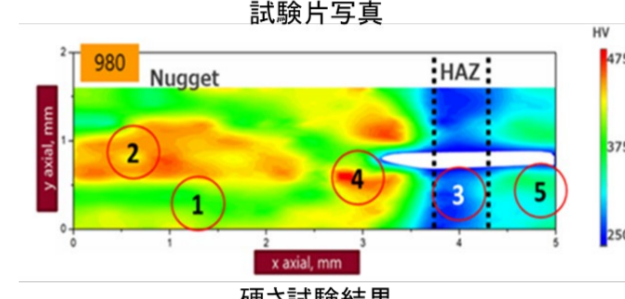
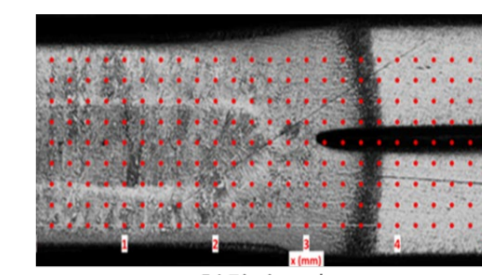
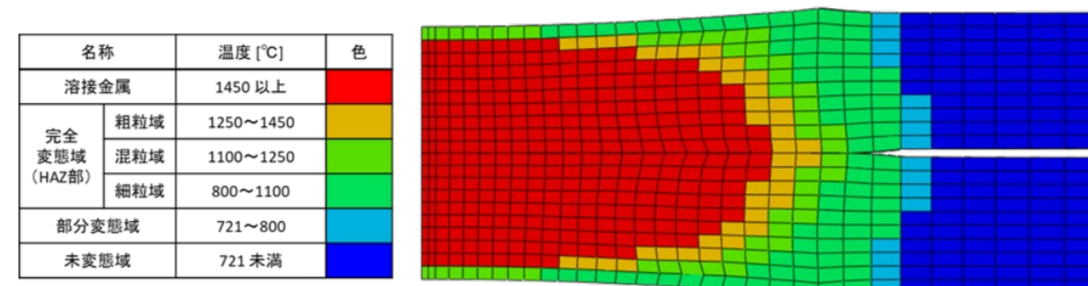
- ✓ スポット溶接におけるナゲットの形成過程を解明するために、Abaqus を用いた電気-熱-応力連成解析の技術を開発した。
- ✓ 溶接電極の形状を含む電氣的・熱的・機械的条件をモデル化し、相変態を考慮したシミュレーションである。
- ✓ 同時に、慶應義塾大学で開発されたスポット溶接試験片を対象に、引張試験、高速度カメラ計測、断面組織観察、残留応力計測など詳細な実験観察が、名古屋市工業研究所を交えて実施された。

■ スポット溶接の電気-熱-応力連成解析

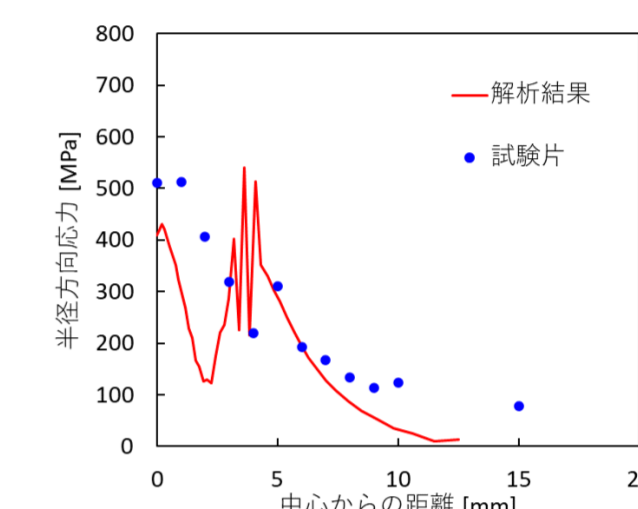
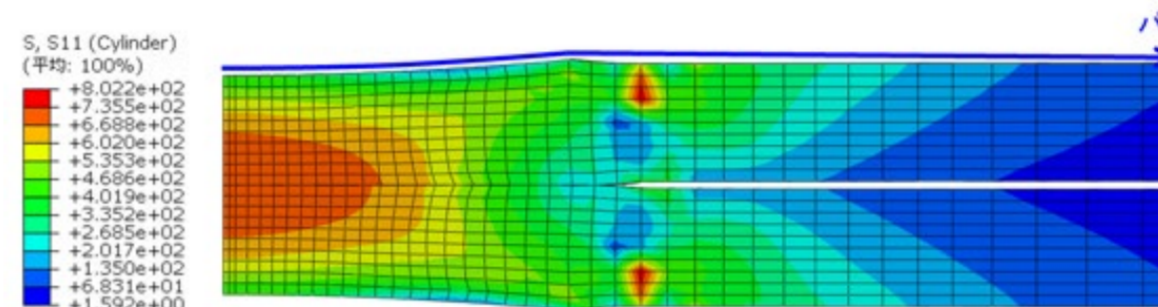


■ 解析結果

- ✓ 解析からはナゲットの成長だけでなく、HAZ部を含む熱履歴の情報が得られ、硬度分布、マイクロ試験片による局所のSSカーブ計測などの実験結果と対比した。
- ✓ 今後、大阪大学・接合科学研究所の協力も仰ぎ、冶金学的な知見に結び付けたい。



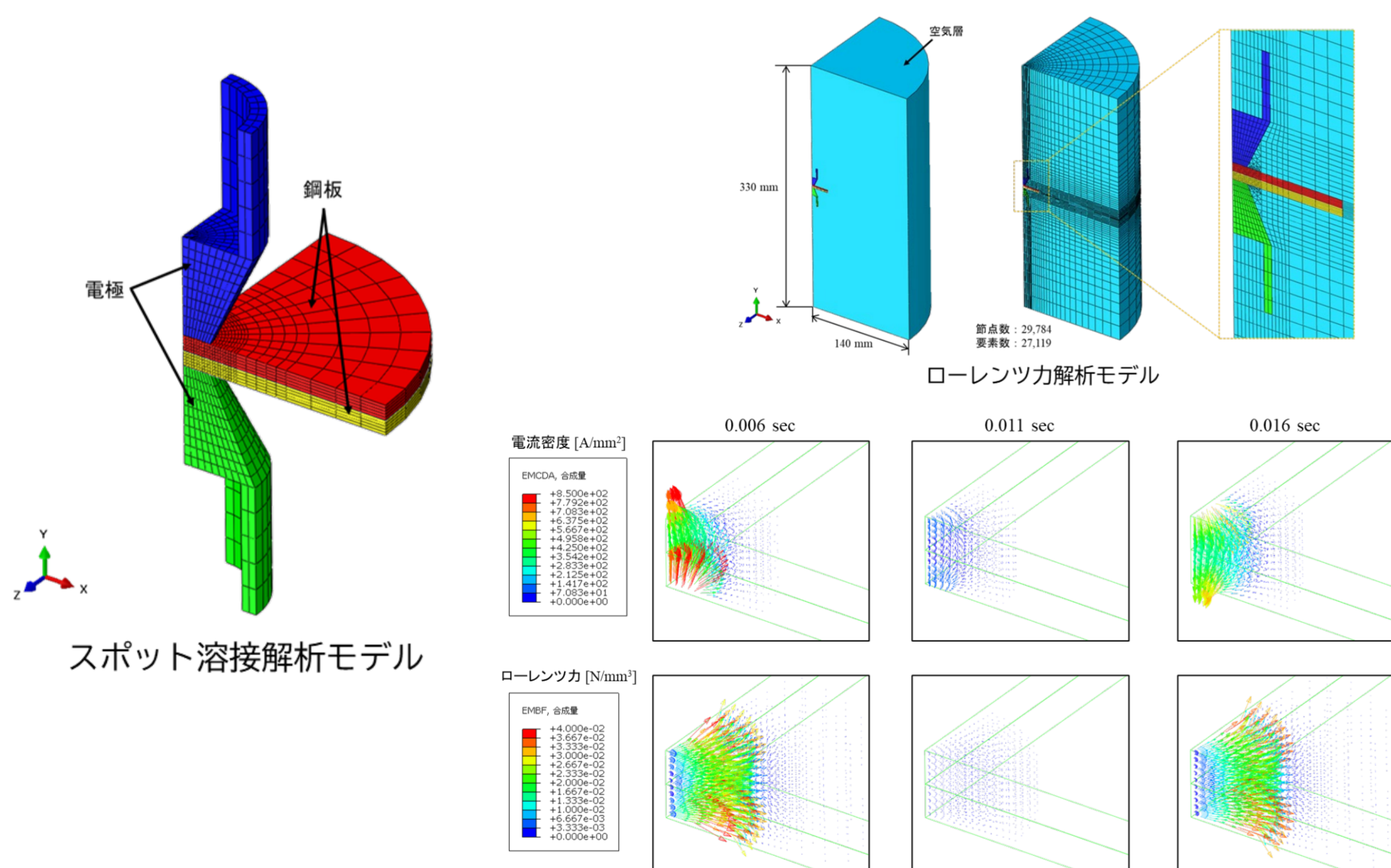
- ✓ 溶接終了後に発生する残留応力分布についても、実験結果を再現する結果が得られた。



格子ボルツマン法を用いた電磁流動解析

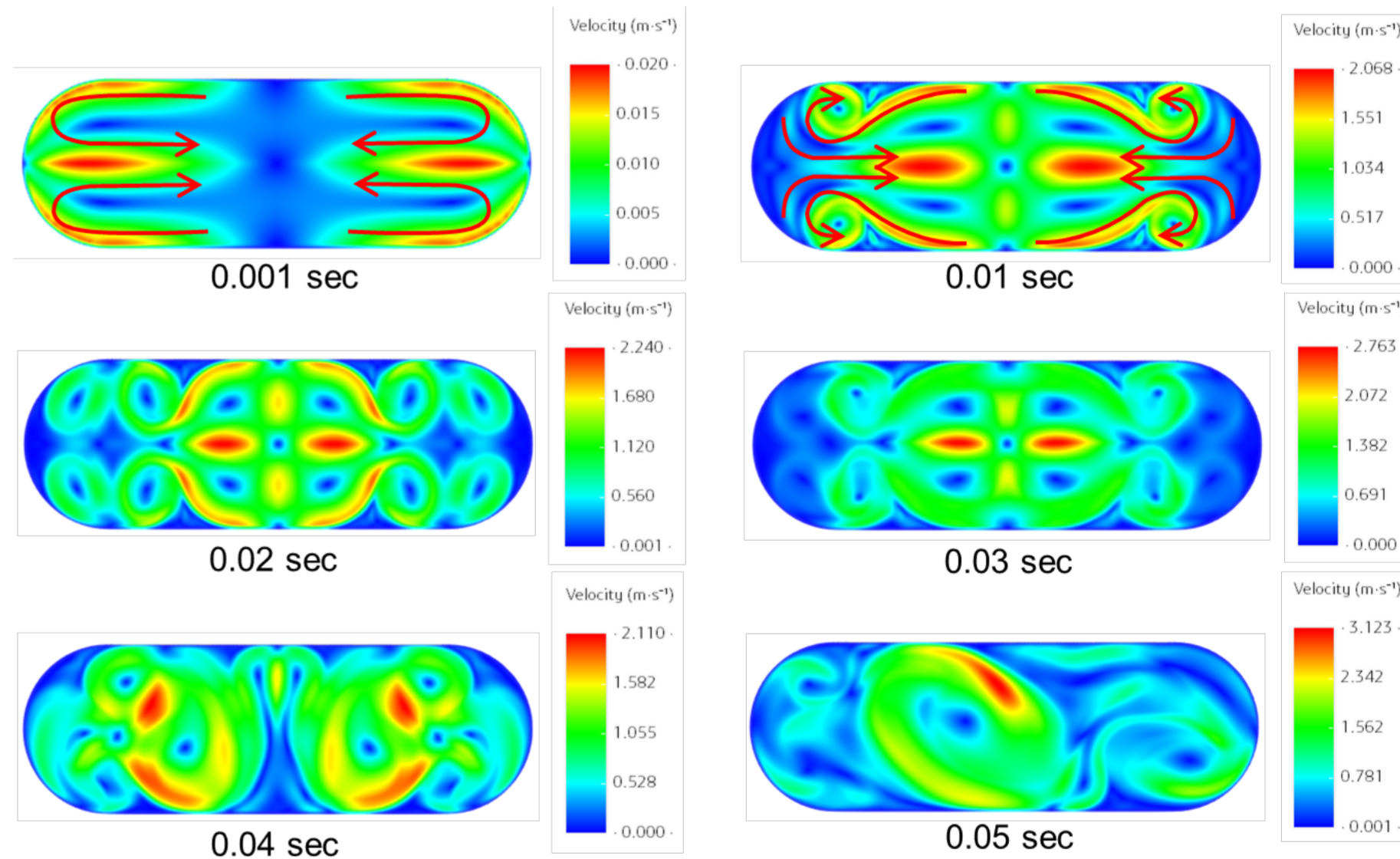
■ Abaqusによる電磁場解析

- ✓ スポット溶接の溶湯内では、電磁力(ローレンツ力)によって流動を生ずる。
- ✓ 流動現象の解明は、攪拌による異材接合強度の向上、気泡の滞留防止など、接合の信頼性向上につながる課題である。
- ✓ 電気-熱-応力連成解析によって得られた電流密度の時間履歴から、溶湯内のローレンツ力の過渡的な分布を求め、流動解析の推進力として適用した。



■ XFlowによる電磁流動解析

- ✓ XFlowは、格子ボルツマン法と呼ばれる最新の流体解析ソフトウェアである。これまでのCFDのようにNavier-Stokes方程式を解くのではなく、流体粒子の分布関数の時間発展方程式を陽的に解く手法である。
- ✓ ソフトウェアの構成が簡明であるため、構造側のCADデータだけを用意すれば、流体のメッシュ分割を行う必要もなく、GPUによる高速演算を即座に実行できる。
- ✓ 移動体や回転体、熱伝達、自由表面、気液二層流、亜音速・超音速など広範囲の流動現象に対応し、Abaqusとの流体-構造連成解析も容易に実行できる。



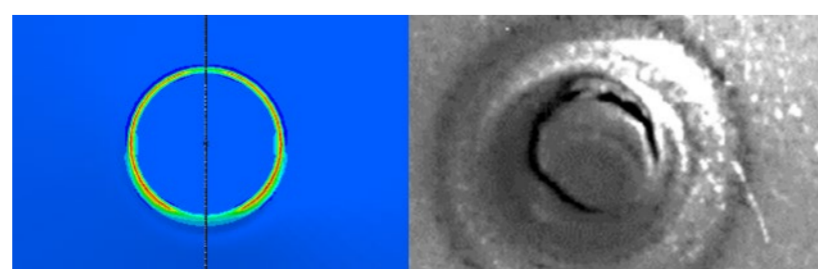
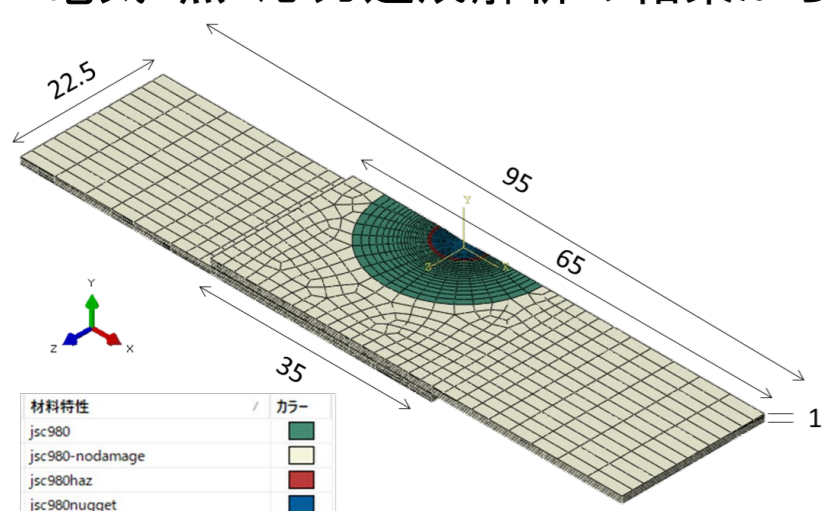
Abaqusによるフェーズフィールドき裂解析

■ Phase-Field損傷モデル

- ✓ 脆性損傷を起こす超ハイテン材の破断挙動を再現するために、東北大学において開発されたPhase-Field損傷モデルを、Abaqus の連成解析機能を利用し、ユーザサブルーチンとして実装した。
- ✓ 超ハイテン材の脆性損傷についての詳細なモデルは、慶應義塾大学、名古屋市工業研究所の試験データに基づいて作成した。

■ Tensile Shear試験の数値シミュレーション結果比較

- ✓ スポット溶接を含む試験片を対象としてTensile Shear試験を実施し、その結果を、上記のPhase-Field損傷モデルを用いてトレースした。
- ✓ 試験片は、スポット溶接に起因した初期応力、塑性ひずみを持っているので、電気-熱-応力連成解析の結果からその分布を引き継ぎ、引張を荷した。



■ Phase-Field損傷(弾塑性)サブルーチンアルゴリズム

既知: $\epsilon_n, \Delta \epsilon, \sigma_n, d_n, \Delta d, \epsilon_n^p, \epsilon_n^e$
 未知: $\sigma_{n+1}, C = \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial \Delta \epsilon}, r_{n+1}, \frac{dr}{dt}, \epsilon_{n+1}^p, \epsilon_{n+1}^e, \bar{\epsilon}_{n+1}$

低減関数: $g(d) = (1-d)^2$
 せん断弾性係数: G , 体積弾性係数: K
 偏差ひずみテンソル: $\epsilon_d = \epsilon - \epsilon_V$
 体積ひずみテンソル: $\epsilon_V = \frac{1}{3} \epsilon_V I, \epsilon_V = \text{tr} \epsilon$

- σ_{n+1}, C の算出

$$G_d = \begin{cases} g(d)G & \epsilon_V \geq 0 \\ g(d)G & \epsilon_V < 0 \end{cases}$$

$$K_d = \begin{cases} K & \epsilon_V \geq 0 \\ K & \epsilon_V < 0 \end{cases}$$

$$C = \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial \Delta \epsilon}$$
 Mises降伏関数を考慮した応力積分により、塑性ひずみ、相当塑性ひずみを算出
- H_{n+1} の算出

$$H_{n+1} = \begin{cases} \psi_0^* - \psi_0^* & \psi_0^* > H_n \\ H_n & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_0^* = \begin{cases} \psi_0^* + \psi_0^* \epsilon_V & \epsilon_V \geq 0 \\ \psi_0^* - \psi_0^* \epsilon_V & \epsilon_V < 0 \end{cases}$$
- $r_{n+1}, \frac{dr}{dt}$ の算出
 目的: 時刻 t_{n+1} における応力 σ_{n+1} を求める。

$$\sigma = \sigma_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \dot{\sigma} dt$$

$$\dot{\sigma} = 2G_d \frac{d\epsilon_d}{dt} + G_d R, \quad R = \frac{2}{3} G_d \dot{\epsilon}_V$$

$$\dot{\sigma} = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt} + G_d R, \quad C_{ij}^e = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt} + G_d R, \quad C_{ij}^p = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt}$$

$$Q = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{3G_d} + \frac{1}{H} \right) \frac{dH}{dt}, \quad R = \frac{dH}{dt}$$
- Newton-Raphson法による相当塑性ひずみ増分の計算

$$R_0 = f^{(0)} = \sigma^{tr} - 3G_d d\epsilon^{(0)} - \sigma_0(\epsilon_n + d\epsilon^{(0)})$$

$$do \ k = 1, 10$$

$$R_k = f^{(k)} = \sigma^{tr} - 3G_d d\epsilon^{(k)} - \sigma_0(\epsilon_n + d\epsilon^{(k)})$$

$$\text{if } (R_k/R_0 \leq \text{tol}) \text{ exit}$$

$$\delta d\epsilon = f^{(k)} / (3G_d + H)$$

$$d\epsilon^{(k+1)} = d\epsilon^{(k)} + \delta d\epsilon$$

$$\sigma_0(\epsilon_n + d\epsilon^{(k+1)})$$
 enddo
- 応力、塑性ひずみ、塑性ひずみ増分の計算

$$\sigma = \sigma^{tr} + \sigma_0(\epsilon) + \sigma_m I, \quad \epsilon^e = \epsilon^{tr} - \frac{2}{3} d\epsilon \frac{d\epsilon^{tr}}{dt}$$

$$\epsilon^p = \epsilon^{tr} + \frac{2}{3} d\epsilon \frac{d\epsilon^{tr}}{dt}, \quad \epsilon = \epsilon^{tr} + d\epsilon$$
- ヤコビアン計算

$$C_{ij}^e = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt} + G_d R, \quad C_{ij}^p = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt}$$

$$C_{ij}^e = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt} + G_d R, \quad C_{ij}^p = 2G_d Q \frac{d\epsilon_d}{dt}$$

$$Q = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{3G_d} + \frac{1}{H} \right) \frac{dH}{dt}, \quad R = \frac{dH}{dt}$$