vol. 2017-1

Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.
March 2017

三峯, 2016年2月

【特集】 汎用FEMによるスポット溶接の解析

FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019

汎用 FEM によるスポット溶接の解析

【1】 はじめに

今回のニュースレターではマルチフィジックスを取り上げ，電気－熱－応力の連成解析の例として自動車用薄板鋼板に利用されるスポット溶接の問題を解析します．ナゲットの形成過程をシミュレーションによって明らかにし，その形状寸法や残留応力に関わる支配的なパラメータを，数値的に明らかにすることを試みました．Abaqus 2016[(1)]を用いた例題です．

【2】 マルチフィジックス解析への汎用 FEM の適用（単位系に関する注意事項）

マルチフィジックスの解析にあたって基本的な注意を促すために，単位系についてまず明らかにしておきます．

- 基本単位系は以下を採用します．長さ：mm，質量：ton，時間：s.
  これを用いて応力解析に関する単位（力，応力）は以下となります．力（=質量×加速度）：ton･mm/s^2 = 10^{3}kg･10^{-3}m/s^2 = N,
  応力(=力／面積)：N/mm^2 = MPa
- 電気－温度－構造の連成を考えるとき，共通な物理量はエネルギ（仕事）であり，以下のように定義できます．
  エネルギ（=力×距離）：N･mm = N･10^{-3}m = mJ（ミリジュール）．
- 従って温度に関する単位（質量密度，熱伝導率，比熱）は以下となります．
  質量密度：ton/mm^3，熱伝導率：mW/mm･℃（ミリワット／mm･℃），比熱：mJ/ton･℃（ミリジュール／ton･℃）．
- また電気に関しては，基本単位として電流：Aを採用します．
  エネルギの単位系を合致させることに注意すると，電気に関する単位（電圧，電気抵抗）は以下となります．電圧（=電力／電流）：mW/A=mV（ミリボルト），電気抵抗（=電圧／電流）：mV/A=mΩ（ミリオーム）．

【3】 解析モデルと負荷条件

解析モデルをFig. 1に示します．モデルの基本的な構成は，先行例[(2)]を参考としました．薄板は厚さ1.6mmの鋼板とし，2枚を重ねて外側から電極を押し当てるモデルです．それぞれの界面は接触によって相対しており，機械的な接触だけでなく，熱的にも電気的にも接触条件を付与しました．熱的，電気的な接触とは，界面における伝導に抵抗を与えることを意味します．電極は先端径φ6mm，先端曲率半径40mmのドームラジアス形の電極を想定しました．要素タイプはAbaqusの熱－電気－構造連成要素（Q3D8およびQ3D6）を適用し，対称性を考慮した1/4部分のモデル化です．要素数は約5,000でした．

境界条件をFig.1に示します．対称境界条件を与えると共に，上側の電極の上面を構成する節点に対して，y方向変位の拘束と電位を与えました．電気的な負荷は電流によりますが，モデルには何らか基準となる電位を与える必要があります．

このモデルに，以下の手順で負荷を与えました．

Step1：下側の電極の下面に3.5kN（モデルにはその1/4）の加圧力を負荷する．モデルの初期温度は25℃である．

Step2：加圧された状態で， 6.0kAの電流（モデルにはその1/4）を負荷する．ただし過熱を防ぐ目的で負荷は周期的に行い，周波数50Hzで14cyclesの通電を行う．薄板内部の温度が上がって溶融領域（ナゲット）ができるので，その形成過程を検討する．

Step3：電流の負荷を終了するとともに機械荷重を除荷し，その後の残留応力分布について検討する．

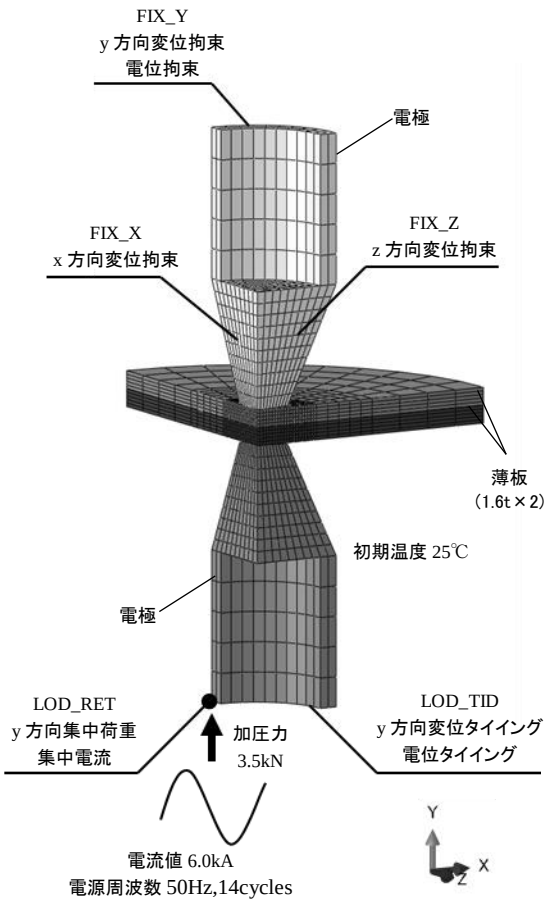


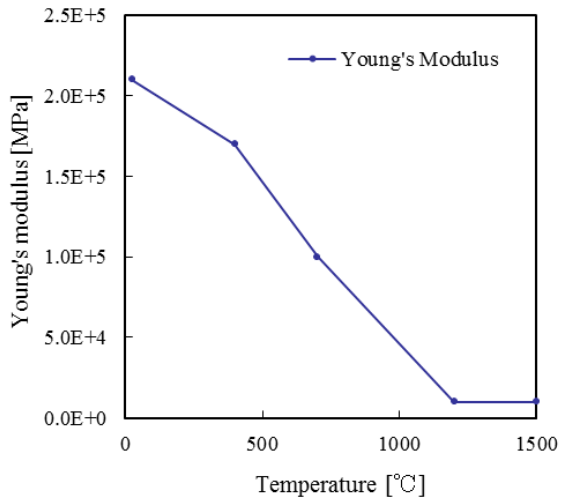
Fig.1　解析モデル

【4】 材料のモデリング

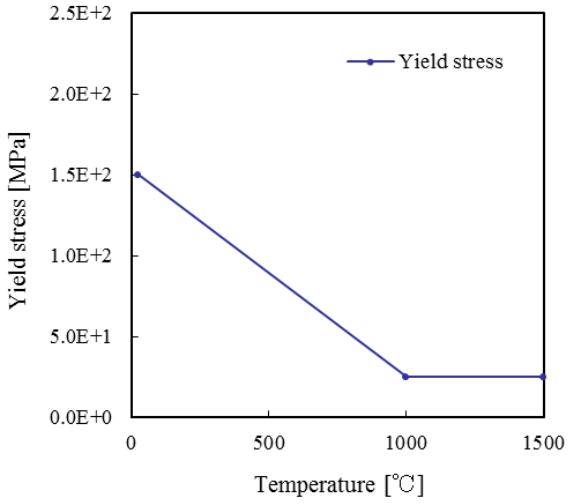
(1) 薄板の材料定数

スポット溶接の対象となる鋼板は，特性の大きく異なるマルテンサイトとオーステナイトの二相に区別できます．溶接の冷却過程においてはオーステナイトからマルテンサイトへ変態すると言われているため，冷却後の残留応力を精度良く評価するには，これらの相分率を考慮できる解析が必要です[2]．しかし本研究ではまずナゲットの形成過程に注目するため相変態は考えず，Fig.2に示すオーステナイトの物性を解析に採用しました．ヤング率と降伏応力に関しては温度依存性を考慮しました．ポアソン比は0.3で一定です．

熱特性については，熱伝導率と比熱についてFig.3のような温度依存性を与えました．質量密度は7.80E-9 ton/mm^3，熱膨張率は1.20E-5 ℃$^{-1}$で一定としました．また電気伝導率には，Fig.4のような温度依存性を与えました．

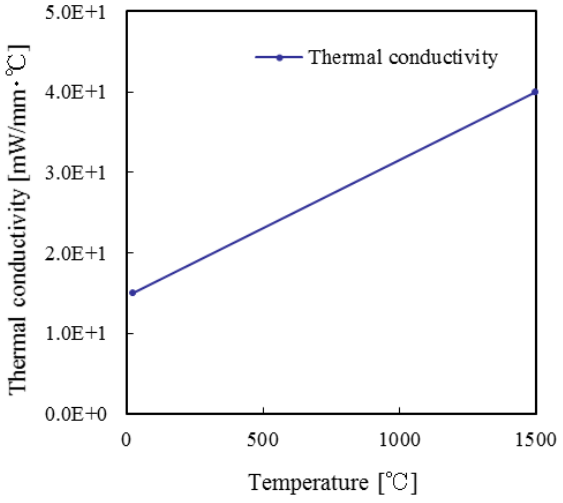


ヤング率

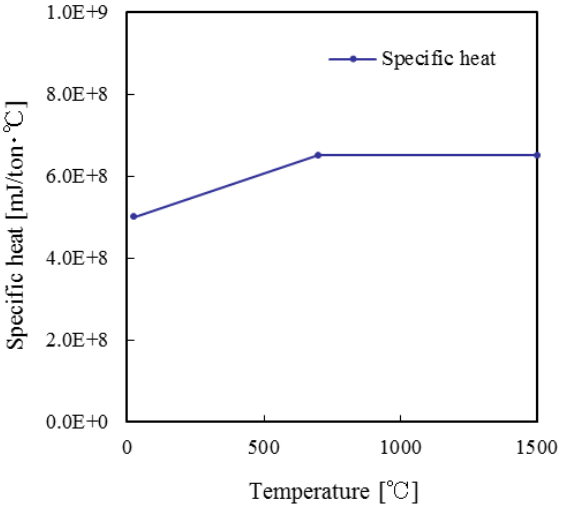


降伏応力

Fig.2　薄板の機械特性

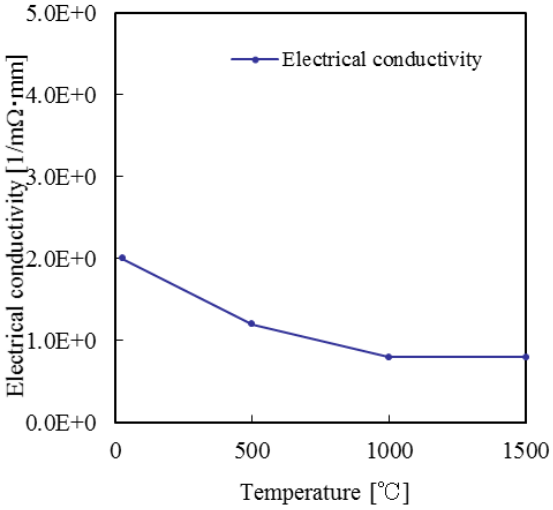


熱伝導率



比熱

Fig.3　薄板の熱特性



導電率

Fig.4　薄板の電気特性

(2) 電極の材料定数

電極の材料特性をTable 1～Table 3に示します．アルミナ分散強化銅を想定した材料特性（実質は銅に近い値）を使用しました．熱伝導率，電気伝導率ともに，薄板よりも1桁以上大きく，熱伝導率は10～25倍，電気伝導率は30～70倍の値となっていることに注意して下さい．

電極の熱伝導率が大きいことによって，その冷却が容易であり，薄板の表面温度の上昇を抑えることができます．また電気抵抗（電気伝導率の逆数）の視点からは電極に比べて薄板の方が大きいため，薄板についてのみジュール発熱させることができます．すなわち銅電極の良伝導性を利用して，薄板同士の接触界面付近だけを局所的に加熱し，適正な寸法のナゲットを形成させることができる構成になっています．

Table 1　電極の機械特性

ヤング率	MPa	1.10E+05
ポアソン比	ー	3.30E-01

Table 2　電極の熱特性

質量密度	ton/mm^3	8.90E-09
熱伝導率	mW/mm･℃	3.60E+02
比熱	mJ/ton･℃	4.20E+08

Table 3　電極の電気特性

導電率	/mΩ･mm	5.80E+01

(3) 薄板/薄板間の界面特性

次に薄板同士の接触面における界面特性をTable 4，Table 5に示します．接触熱通過率，接触電気伝導率とも，界面圧力や温度に依存しない一定値としました．これらの値は，薄板の熱伝導率，電気伝導率と板厚から次式のように算出される通過率と同等な値と想定しました．（ただし薄板同士の接触熱通過率は，上下の対称性より結果には影響しないことに注意して下さい．）

$$h_{\text{gap_plate}} = \frac{\lambda}{t} = \frac{15 \backsim 40}{1.6} = 9.375\text{~}25 \ \left[\text{mW/mm℃}\right]$$

$$\sigma_{\text{gap_plate}} = \frac{\sigma}{t} = \frac{0.8 \backsim 2.0}{1.6} = 0.5\text{~}1.25 \ \left[1/\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2\right]$$

Table 4　Plate/Plate 間の接触熱通過率

表面間の圧力		接触熱通過率	
0.00E+00	MPa	2.00E+01	mW/mm^2･℃
1.00E+03		2.00E+01	

Table 5　Plate/Plate 間の接触電気伝導率

表面間の圧力		接触電気伝導率	
0.00E+00	MPa	2.00E-01	/mΩ･mm^2
1.00E+03		2.00E-01	

(4) 電極/薄板間の界面特性

電極と薄板の接触面における界面特性をTable 6，Table 7に示します．接触熱通過率，接触電気伝導率とも，薄板同士に設定した値に対して10倍の値としました．

この設定によって，まず熱通過率についてはその大きさが次式の順序になるため，電極と薄板表面の温度上昇を抑えることができます．

電極単体　＞　電極－薄板　＞　薄板単体　≈　薄板－薄板

また電気抵抗（導電率の逆数）を以下の順序にすることによって，薄板同士の界面で選択的に発熱をさせることができます．前掲の電極の良伝導性と合わせ，これらの界面特性の順位は，ナゲットを適正な寸法で形成させるのに基本的な因子となります．実機でもおそらくこの条件を達成しているのではないでしょうか．

薄板－薄板　≈　薄板単体　＞電極－薄板　＞　電極単体

Table 6　Electrode/Plate 間の接触熱通過率

表面間の圧力		接触熱通過率	
0.00E+00	MPa	2.00E+02	mW/mm^2･℃
1.00E+03		2.00E+02	

Table 7　Electrode/Plate 間の接触電気伝導率

表面間の圧力		接触電気伝導率	
0.00E+00	MPa	2.00E+00	/mΩ･mm^2
1.00E+03		2.00E+00	

【5】 解析結果

電流と荷重の負荷履歴を Fig.5 に示します．0.1sec で荷重を負荷した後，0.28sec のあいだ 14cycles の通電を行い，その後 0.1sec で機械荷重を除荷します．得られた電位の履歴を Fig.6 に示します．電流のサイクルに対応して電位も周期的に変動します．薄板の電気抵抗は温度とともに上昇します（Fig.4）が，材料の軟化による接触面積の増加の効果が上回るため，電位は減少の傾向をたどります．

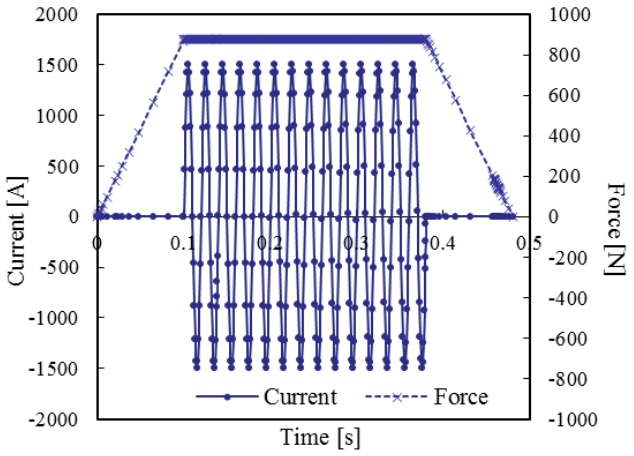


Fig.5　電流・荷重の負荷

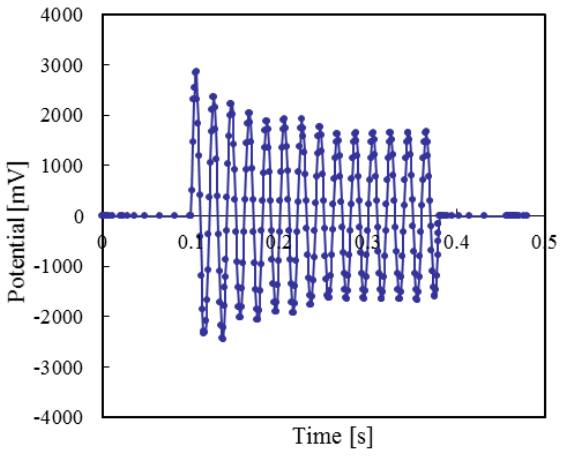


Fig.6　電極の電位履歴

薄板間の中心節点における温度履歴をFig.7に示します. 電流負荷と同時に急激に温度は上昇し, その後, 通電時間（0.28sec）の間，2000℃超えでほぼ一定の温度となります.

14cycles通電後の，中心軸上の温度と電位のパスプロットをFig.8に示します．薄板同士の界面で大きな電位差が生じて発熱し，その結果，近傍の温度が局所的に高くなることがわかります.

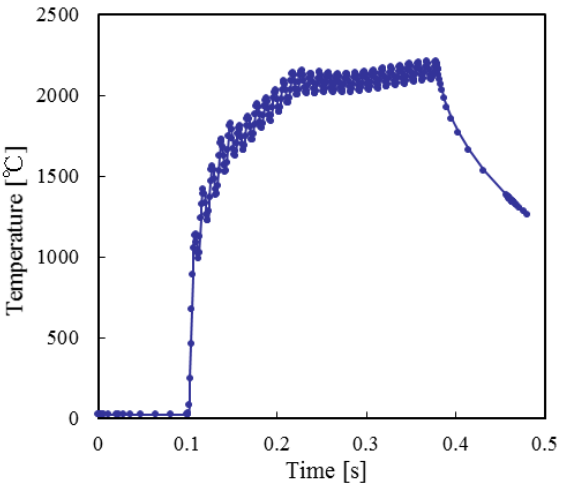


Fig.7　薄板界面中央の温度履歴

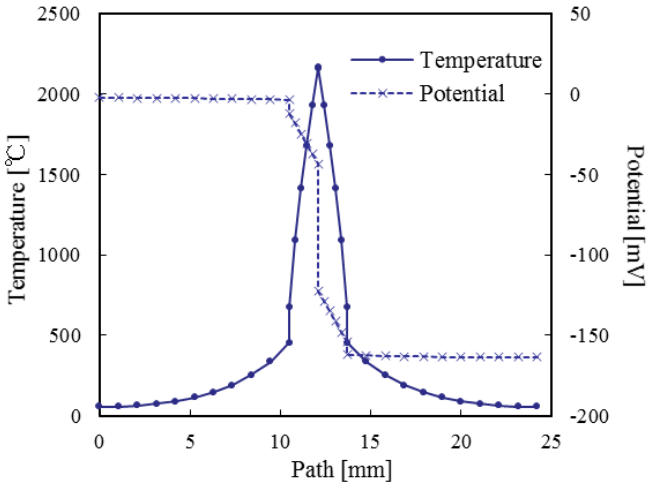


Fig.8　中心軸上の温度と電位のパスプロット

1cycleおよび14cycleにおける温度と電流密度の分布をFig.9，Fig.10に示します．温度分布において灰色で表示されている領域が1450℃以上に加熱された領域で，この領域を溶融領域つまりナゲットと想定します．0cycle～14cycleにおけるナゲット径（幅方向に最大となる寸法）およびナゲット溶け込み率（板厚方向に最大となる寸法を母材の元の寸法で除した値）の推移をFig.11に示します.

Fig.9の1cycle終了時には，薄板間の温度が上昇していますがまだナゲットは形成されていません．その後，2cycle～6cycleにかけてナゲットは主に薄板の板厚方向に大きく成長します．これは接触面積が小さいために，中心部に電流密度が集中

するためです．すなわち電極先端の曲率は，プロセス初期において電流密度を集中させる効果があります．薄板の軟化にともなって接触面積が大きくなり，Fig.10のように電流密度が分散されると，ナゲットの成長が鈍くなり，7cycle以降はゆるやかな増加を示すことがわかります．最後に参考として冷却後の残留応力分布をFig.12に示します．

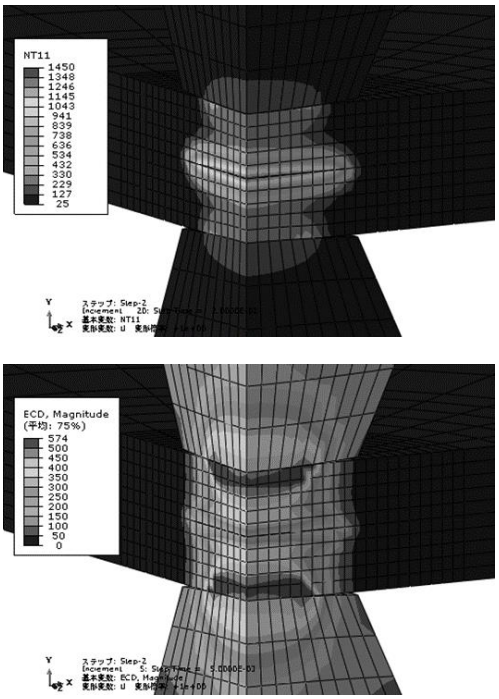


Fig.9　温度分布と電流密度，1cycle

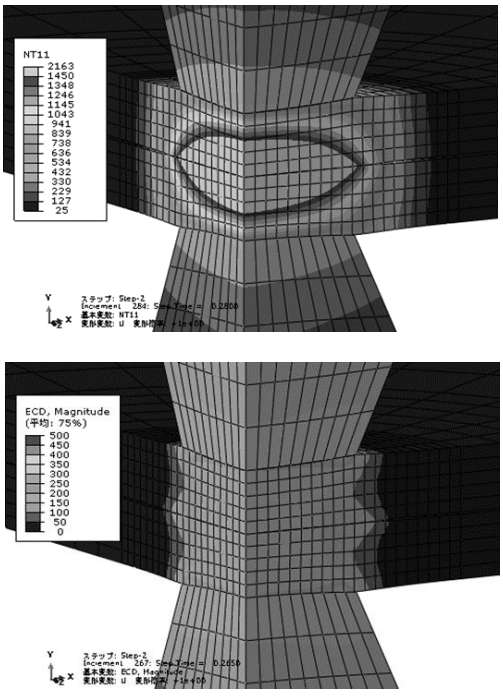


Fig.10　温度分布と電流密度，14cycle

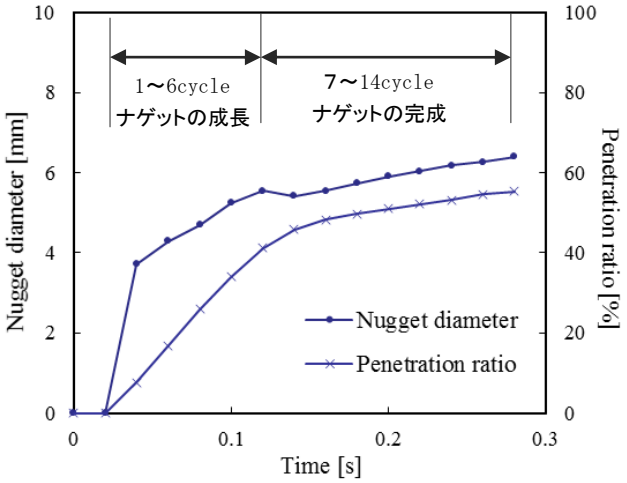


Fig.11　ナゲット径およびナゲット溶け込み率の推移

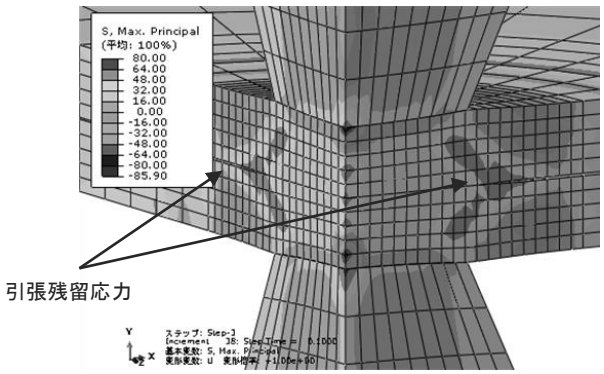


Fig.12　冷却後の残留応力（参考）

【6】 結言

最近の汎用FEMを使用し，その連成解析の機能を用いてスポット溶接の解析を行い，特にナゲットの形成条件の観点から基本的な特性について把握しました．

参考文献

(1) Abaqus Users Manual, 2016, Dassault Systems Simulia Corp., USA, 2015.
(2) 伊與田，三上，橋本，谷口，池田，望月：980MPa 級高張力鋼抵抗スポット溶接部におけるナゲット寸法および残留応力の数値シミュレーション，溶接学会論文集, Vol. 29, No. 2, (2011) 86-95.

Mech D&A News Letter　解析データ販売

ニュースレターで紹介した解析の入力データを以下のように販売しております．詳細は弊社ホームページをご覧下さい．今回のスポット溶接の解析，また過去のニュースレターに関するものも用意しております．

Vol.2017-1 汎用 FEM によるスポット溶接の解析 （Abaqus2016 対応データ）	￥324,000（税込）
Vol.2012-1 Abaqus/CFD による流体解析　　その 1 円柱まわりの流れ，カルマン渦の発生 （Fig.4（a）～（b）に対応する解析データ，Abaqus6.10 以降 Abaqus2016 対応データ）	￥54,000（税込）
Vol.2012-2 Abaqus/CFD による流体解析　　その 2 カルマン渦による流体－構造連成振動　（Fig.3, Fig.4 に対応する解析データ，Abaqus6.10 以降 Abaqus2016 対応データ）	￥32,400（税込）

※　Abaqus はダッソー・システムズ株式会社殿の製品です．

その他，過去の代表的な弊社ニュースレターを以下に示します．

Vol.2012-1　Abaqus/CFD による流体解析（その 1 円柱まわりの流れ，カルマン渦の発生）
Vol.2012-2　Abaqus/CFD による流体解析（その 2 カルマン渦による流体－構造連成振動）
Vol.2010-3　多層基板の熱粘弾性反り解析技術の開発
Vol.2009-1　現代のＣＡＥ　－シミュレーションに従事するということ－
Vol.2008-4　熱伝導解析における諸問題　（その 1 熱荷重問題と伝熱工学）
Vol.2006-1　粘弾性解析における諸問題　（その 4　粘弾性計測と FEM による制振性能の直接評価）
Vol.2006-2　粘弾性解析における諸問題　（その 5　プリント基板の熱粘弾性反り）
Vol.2005-1　弊社における粘弾性材料の計測と同定
Vol.2005-2　粘弾性解析における諸問題　（その 1　Mawell モデルの基本的な性質）
Vol.2005-3　粘弾性解析における諸問題　（その 2　時間－温度換算則とマスターカーブの作成）
Vol.2005-4　粘弾性解析における諸問題　（その 3　一般化 Maxwell モデルの同定
Vol.2004-1　はり解析における諸問題　（その 4　曲げねじり連成振動）
Vol.2004-2　最適化ソフトウェアを用いた弾塑性材料モデルの同定
Vol.2004-3　弾性円筒シェルの座屈後解析
Vol.2004-4　現代の CAE　－科学に従事するということ－
Vol.2003-1　はり解析における諸問題　－その 2　塑性ヒンジ解析－
Vol.2003-2　はり解析における諸問題　－その 3　衝撃問題の解析－
Vol.2002-1　陰解法と陽解法による非線形構造解析の実際
Vol.2002-2　はり解析における諸問題　－その 1　線形問題－
Vol.2002-4　陰解法と陽解法によるロール圧延の解析
Vol.2001-4　溶融はんだの形状予測解析
Vol.2000-1　シェル構造物の非線形解析 -平板の大たわみ問題-
Vol.2000-2　シェル構造物の非線形解析 -座屈問題-

Mechanical Design & Analysis

株式会社 メカニカルデザイン
〒182-0024　東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2 階
TEL 042-482-1539　　FAX 042-482-5106
E-mail:comm@mech-da.co.jp　　http://www.mech-da.co.jp/