接合部衝撃特性の動的シミュレーション

Numerical Analyses of Charpy Impact Test for Welded Joints

高 嶋 康 人*・南 二 三 吉*

Yasuhito TAKASHIMA and Fumiyoshi MINAMI

Key Words: Dynamic Analysis, Dissimilar Joints, Charpy Impact Test, Hertzian Contact Theory

1. 緒 言

構造部材の耐熱性・耐食性向上や輸送機器の軽量化などを目的として適材適所で合理的に異材を組み合わせたいというニーズが高まっており、異材接合や特性の異なる異種鋼板接合に注目が集まっている。異材継手では融合部で強度や延性・剛性が著しく変化しており、継手の性能を把握するために強度急変部を対象とした評価方法が望まれる。また接合部は熱影響による靱性劣化が懸念されるため、十分な継手破壊性能を確保するにはその靱性を把握することが重要である。強度急変部を対象にした靱性試験では、例えば瀬尾らの検討¹⁾のように切欠き付近に硬化部が隣接する場合は Fig.1 に模式的に示したようにシャルピー吸収エネルギーが低下してエネルギー遷移温度が上昇する。このような強度急変部による影響は定性的には塑性変形を拘束することで応力が高くなるためと理解されている。この影響を定量的に把握するためには、実験のみならず様々な支配因子の影響を独立して考慮できる数値解析的なアプローチを用いることが望まれる。

ここでとりあげたシャルピー衝撃試験は材料の切欠き靱性を評価するための試験法として工業的に広く普及しているが、衝撃負荷を受けるシャルピー試験片の破壊現象を理解するためには、破壊が生じる切欠き付近の応力場・ひずみ場に対する衝撃負荷による動的効果を把握する必要がある。試験片に作用する衝撃荷重は、実験では計装化した試験機を用いることで測定が可能²⁾であり、打撃直後は慣性効果によって大きく変動する。この荷重変動は試験片の曲げ応力に影響することが予想されるが、応力集中を生じる切欠き底付近の応力・ひずみがどのように変動するかは十分に明らかになっていない。また、鋼のような弾塑性材料を扱う場合には、切欠き付近で塑性変形を生じ、切欠き底付近の応力・ひずみは周囲の弾性状態の領域による塑性拘束の影響を受けるため、その挙動がさらに複雑になると予想される。脆性破壊や延性破壊のローカルアプロー

チ^{3,4)}により切欠き材の破壊条件に対する理解が深まっているが、破壊プロセスゾーンの応力履歴、ひずみ履歴は破壊クライテリオンを考えるうえで極めて重要であり、シャルピー試験片の衝撃荷重による慣性効果の把握が課題である。

慣性効果は運動方程式を基礎方程式として扱う動的解析で求められるが、陽解法では収束計算は不要であるものの安定な解を得るための計算時間増分の制約により、対象とする現象の時間が長い場合は計算コストが高い。材料の延性脆性遷移温度よりも低温域でのシャルピー衝撃試験のように、巨視的に塑性変形があまり生じない脆性破壊を対象とする場合は、破壊に至るまでの時間が比較的時間短いため（例えば吸収エネルギーが 50 J のとき 0.5×10^{-3} 秒程度）、近年の計算機性能の向上もあって動的陽解法を用いた 3 次元モデルの数値解析が十分に実施可能であると考えられる。先行研究⁵⁻¹¹⁾におけるシャルピー試験片の動的解析は 2 次元モデルが多く用いられているが、ひずみエネルギーは 2 次元平面ひずみモデルを厚さ相当分換算した値と 3 次元モデルで求めた値で異なることが指摘されており、打撃直後の試験片の運動エネルギーや変形エネルギーの変化を 3 次元

Fig.1 Schematic illustration of strength mismatch effect on Charpy absorbed energy.

* 大阪大学 接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)
Joining and welding research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

モデルで詳細に把握することが必要である。

著者らは3次元モデルを用いたシャルピー衝撃試験の数値解析に取り組んでおり、動的負荷によるひずみ速度や温度上昇を考慮した解析を駆使して、鋼シャルピー試験片やその溶接・接合部の試験片の脆性破壊現象を扱い、その破壊機構の理解を深めてきた^{12)~18)}。特に、溶接・接合部の強度不連続によって塑性変形を拘束するような場合は3次元で変形や応力を考慮することが大切で、古くから実験的に検討されてきたシャルピー吸収エネルギーに対する強度不連続部の影響を説明するために重要である。本稿では、著者らがこれまでに取り組んだシャルピー試験片の動的シミュレーション¹⁶⁾の内容を中心に、接合部シャルピー試験片の解析結果¹⁴⁾を紹介する。

2. シャルピー試験片の衝撃応答特性とその動的シミュレーション

シャルピー試験片に作用する荷重は、慣性の影響で打撃直後は著しく振動する。計装化シャルピー衝撃試験で計測された荷重-荷重点変位関係の一例をFig.2に示す。同じ条件で2回実施したときの試験片Aと試験片Bの結果を示しているが、荷重応答はどちらの試験片でも同じように振動しており、ほぼ再現されている。これは、この振動が試験片のもつばらつきではなく、慣性によってもたらされたものであることを意味する。試験片Aと試験片Bの結果を比較すると、試験片Aに脆性破壊が生じて荷重が急激に低下する段階よりも小さな変形の時点で試験片Bの脆性破壊が生じていることがわかる。この試験片Bの脆性破壊発生時における荷重は、それまでに試験片に作用した最大荷重よりも低いことがわかる。このような破壊現象を取り扱う場合には、衝撃試験中の慣性の影響を考慮しておくことが大切であり、それを理解するための数値解析が有用となる。

シャルピー試験片に対する衝撃負荷による動的効果を考慮した数値解析が1970年代後半から多くの研究者によって取り組まれてきた。Ayres⁵⁾は、汎用コードMARCを用いて予き裂入りシャルピー試験片の2次元平面ひずみ動的弾塑性FEM解析を実施し、压力容器用鋼の予き裂入り試験片を計装化試験(打撃速度1.8 m/s)で測定した荷重履歴と比較している。Ayres⁵⁾の数値解析では変動する荷重がピークとなるタイミングは一致しなかったが、その周期は40 μ sで実験と対応したと述べている。荷重がピークとなる時刻の不一致は、試験片に作用する打撃点での荷重と実験で打撃ハンマーに貼り付けたひずみゲージで計測する位置の違いに起因するのではないかとしている。

また、Norris⁶⁾は、A533鋼のV字切欠きシャルピー試験片を対象とした2次元平面ひずみ動的弾塑性FEM解析(HEMPコード⁷⁾によるもので減衰は未考慮)を実施した。試験片への衝撃荷重の載荷方法について、打撃部の接触形状が曲面であるか平面であるかの違いによる応力場へ

Fig.2 Load record measured by instrumented Charpy impact testing machine.

の影響を検討しているが、試験片の塑性変形挙動には差が生じたが切欠き底付近の応力にはあまり影響しなかった。Ayres⁵⁾と同様に、試験片の打撃点での荷重は打撃ハンマーに貼り付けたひずみゲージから求めた値と同期していないと述べている。数値解析で実験を再現するためには、打撃部の接触問題の取り扱いが重要であることが示唆されている。

Tvergaardら⁸⁾は、V字切欠きシャルピー試験片の2次元平面ひずみモデルを用いて動的陽解法による弾塑性FEM解析を実施し、Gursonモデルによる延性破壊条件と最大主応力による脆性破壊条件を用いた破壊判定により延性脆性遷移挙動について検討した。吸収エネルギーの温度依存性は、強度のひずみ速度依存性と温度依存性を数値解析に反映させることで求められるとしているが、実験との対応性は全く示されていない。Mathurら⁹⁾は、Tvergaardら⁸⁾の2次元モデルでの解析を3次元に拡張し、動的陽解法による3次元弾塑性FEM解析を実施した。強度のひずみ速度依存性や温度依存性を組み入れて計算しているが、高速変形に伴う温度上昇は計算されていない。応力分布は3次元モデルの表面付近では2次元モデルと大きく異なるが、試験片厚さ中央断面では平面ひずみ条件での2次元解析結果とよく対応したと報告している。一方で、試験片のひずみエネルギーは2次元モデルに比べて3次元モデルの方が10%程度小さかった。この解析でも実験との対応性は全く議論されていないが、シャルピー試験片の3次元モデルと2次元モデルの解析結果の違いについての知見が得られている。

Rossolら¹⁰⁾は、標準V字切欠きシャルピー試験片への動的効果と塑性拘束状況を理解する目的で、汎用コードABAQUS 5.4を用いてシャルピー試験片の2次元動的弾塑性FEM解析および3次元準静的弾塑性FEM解析を実施し、実験結果と比較して検討した。解析では断熱モデルで発熱による温度上昇を求め応力解析と連成させており、切欠き底では温度上昇によって応力が低下することを指摘してい

る。打撃ハンマーと試験片の接触を考慮して解析しているが、摩擦係数は試験片に作用する荷重に対してほとんど影響しないと報告している。実験で計測した荷重の周期が数値解析結果と一致しない原因は試験機の剛性によるものと考察しており、低ブロー試験によって試験機コンプライアンスを求めて数値解析に反映させることを提案している。ただし、3次元モデルの動的解析は実施していない。

Lenkey ら¹¹⁾は、フェライト鋼のV字切欠きシャルピー試験片と予き裂入りシャルピー試験片について、汎用コード MARC を用いて2次元および3次元モデルの準静的陰解法弾塑性 FEM 解析と Newmark の直接積分法を用いた動的陰解法弾塑性 FEM 解析を実施した。動的解析で求めた荷重-変位関係は、計装化試験で測定された荷重信号と変位の関係とよく対応したと報告している。打撃ハンマーを部分的に3次元要素でモデル化しており、その密度は鋼の場合に比べて3オーダー大きい値を設定しているが、設定の根拠は示されておらず、正確なモデル化のためには議論の余地があると思われる。

著者らは、これまでの研究により、試験片と打撃ストライカーの接触剛性が打撃直後の荷重振動に影響することを明らかにし、Hertz の接触理論をふまえたモデル化によって計装化シャルピー試験の荷重応答特性を数値解析で再現できることを確認した¹⁶⁾。シャルピー試験片と打撃ストライカーの間の接触剛性は、打撃による押込量 δ [mm] と打撃部に作用する単位長さあたりの荷重 $\bar{P}$ [N/mm] の関係として Hertz の接触理論によって定義でき、互いに交差する円筒の接触に対する次式¹⁹⁾を用いて与えた。

$$\delta = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \bar{P} \ln \left[\frac{\pi E (R_1 + R_2)}{2 \bar{P} (1-\nu^2) R_1 R_2} \right] \quad (1)$$

ここで、 E は縦弾性係数 [MPa] (ここでは打撃部と試験片で同じ材質と前提)、 ν はポアソン比、 R_1 はストライカーの刃先半径 [mm] であり、 R_2 は試験片表面の曲率で平坦すなわち無限大とした。このようなモデル化によって得られた解析結果と、実験で計測した荷重応答を比較した¹⁶⁾ものを Fig.3 に示す。また、従来の解析のように剛接触でモデル化した結果を合わせて示している。剛接触でモデル化した場合には荷重が振動するものの振動周期やその大きさが実験結果とあまり一致していない。一方で、Hertz の接触理論をふまえたモデル化により、衝撃荷重の大きさや振動周期が忠実に再現できていることがわかる。

3. 接合部シャルピー試験片の動的3次元有限要素モデル

汎用コード Abaqus/Explicit ver. 6.12 を用いてシャルピー試験片とストライカーの接触剛性を考慮した動的陽解法弾塑性有限要素解析を実施した。解析の対象は Fig.4 に示すような強度の異なる鋼を接合した強度急変部のあるシャルピー試験片¹⁴⁾で、切欠きは強度の低い側に存在する。こ

Fig.3 Comparison of measured load - time curve with that computed by dynamic analysis with Hertzian model and rigid connection model.

Fig.4 Charpy specimen of dissimilar steel joints.

Fig.5 Mesh division of the Charpy specimen for dissimilar joints.

の解析に用いた要素分割について Fig.5 に示す。試験片の対称性を考慮して厚さ方向で1/2部分をモデル化した。試験片は3次元6面体ソリッド要素で分割し、打撃ストライカーとアンビルは3次元剛体シェル要素でモデル化している。打撃はストライカーに強制変位を与えて試験片に衝突させることでモデル化し、その変位速度は一般的なシャルピー試験機で振子式ハンマーのエネルギー保存則から求められる5 m/sとした。この解析手法の概要を Fig.6 にまとめた。ストライカーと試験片の接触問題には式(1)で示した Hertz の接触理論に基づいて解析した。ひずみ速度と温度上昇が流動応力に及ぼす影響は次のように考慮した。シャル

Fig.6 Summary of numerical model for dynamic analysis used in this study.

Table 1 Thermal constants used for FE analysis.

C [J/kg·K]	ρ [kg/mm ³]	λ [W/K·mm]	α_L [1/K]
4.69×10^2	7.86×10^{-6}	5.18×10^{-2}	1.2×10^{-5}

C : Specific heat, ρ : Density, λ : Thermal conductivity, α_L : Coefficient of linear expansion

Table 2 Mechanical properties used for FE analysis.

	E [MPa]	ν	σ_Y [MPa]	σ_T [MPa]	ϵ_T [%]
TS400	206000	0.3	300	400	26
TS800			720	800	10

E : Young's modulus, ν : Poisson's ratio, σ_Y : Yield stress, σ_T : Tensile strength, ϵ_T : Uniform elongation

ピー試験片の温度上昇は Table 1 に示す鋼の熱伝導物性値を用いて熱伝導解析によって計算し、断熱塑性変形による発熱は Taylor と Quinney の報告²⁰⁾を参考に塑性仕事の 9 割が熱エネルギーに換算されるとした。この計算で求めた温度上昇は応力解析に反映し、熱伝導解析と応力解析を完全に連成した解析を行った。

解析に用いる材料特性は、これまでの検討¹⁴⁾で用いた軟鋼と高強度鋼を想定した特性である Table 2 に示すような値を採用した。これは室温・静的条件下でのヤング率とポアソン比、降伏応力、引張強さ、一様伸びである。本研究の対象のように室温付近ではヤング率やポアソン比の温度依存性やひずみ速度依存性は小さいとみなし一定とした。降伏応力と引張強さの温度依存性やひずみ速度依存性は、Bennett と Sinclair により提案されたひずみ速度-温度パラメータ R ²¹⁾を用いて温度と等価な影響をもつと考えて設定した。降伏応力は室温の値から日本溶接協会 BE 委員会で提案された関係式を用いて計算し、引張強さも同様の温度

依存性をもつと仮定して計算した。一様伸びは温度やひずみ速度の影響を受けないものとし、任意の温度とひずみ速度における応力-ひずみ関係は次式の Swift 則に従うとして設定した。

$$\bar{\sigma} = \sigma_Y \{1 + (\bar{\epsilon}_p / \alpha)^n\} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力 [MPa]、 $\bar{\epsilon}_p$ は相当塑性ひずみ、 n は加工硬化指数、 α は材料定数である。 n と α の値は降伏応力と引張強さ、一様伸びに応じて一義的に定まるため、任意の温度とひずみ速度における値を求めて採用した。

4. 動的シミュレーションによる接合部シャルピー試験片の応力ひずみ場の可視化

強度急変部のあるシャルピー試験片の動的シミュレーションによって得られた塑性ひずみエネルギー密度分布を Fig.7 に示す。試験片全体に蓄えられた吸収エネルギーが 20 J となる時点の結果を示している。また、強度急変部の影響を把握するため比較として強度急変部の存在しない材料 TS400 のみで構成された均質試験片の結果も示している。均質試験片では V 字切欠きを中心として左右対称に塑性変形が生じるため、塑性ひずみエネルギー密度分布も切欠きを中心にして対象な広がり方を示している。これに対して切欠き付近に硬い材料 TS800 が存在する接合部試験片では、TS800 部分ではほとんど塑性変形が生じないために塑性ひずみエネルギーを吸収しておらず、変形が非対称となって塑性ひずみエネルギー密度分布も非対称に広がっている。シャルピー吸収エネルギーは試験片に蓄えられたひずみエネルギーの総和であるが、強度急変部のある試験片では塑性ひずみエネルギーの蓄えられる領域が大きく異なり、シャルピー吸収エネルギーのもつ意味も均質試験片の

場合と異なることがわかる。これは、実験でシャルピー吸収エネルギーに強度急変部の存在が影響したと関連して、その結果の解釈に注意が必要であることを示唆している。

このように、動的シミュレーションによって接合部シャルピー試験片の応力ひずみ場を可視化することができ、強度急変部の存在がもたらす影響を把握することができる。シャルピー試験片では、衝撃負荷の作用によりひずみ速度

Fig.7 Distribution of plastic strain energy density in Charpy specimen ($vE = 20$ J).

が大きくなることや、切欠き付近の温度上昇は試験片の破壊挙動に影響することが考えられる。延性脆性遷移挙動を示す鉄鋼材料では、一般にひずみ速度が大きくなると脆性破壊しやすくなり、温度が高くなると脆性破壊しにくくなる。シャルピー衝撃試験では同じ打撃速度を用いているが、試験片に生じるひずみ速度や温度上昇は強度急変部の存在によって異なることが予想される。

この解析で求めた、試験片全体で蓄えられる吸収エネルギーが 20 J のときの切欠き付近のひずみ速度分布を Fig.8 に示す。なお、この図は試験片の厚さ中央断面でのひずみ速度分布を示している。試験片表面では平面応力状態となるが、内部では厚さ方向の変形が拘束されることによって平面ひずみ状態に近づき、その結果として高い応力が発生するため、脆性破壊は試験片表面よりも内部から発生しやすい。このような試験片内部の状態は、たとえ高速カメラを用いて衝撃試験の様子を撮影したとしても把握することはできないが、このように 3 次元動的シミュレーションを行うことで可視化することが可能である。試験片厚さ中央のひずみ速度分布は、均質試験片と強度急変部を含む接合部試験片では大きく異なっており、接合部試験片では非対称な分布となっている。また、硬い材料 TS800 部分ではひずみ速度があまり大きくないため、その部分では脆性破壊が生じにくくなる。

試験片内部での温度上昇は実験で直接計測することが難しく、このような 3 次元シミュレーションの威力が発揮される。ここでは、切欠き付近の温度上昇について解析した結果を Fig.9 に示す。試験片全体で蓄えられる吸収エネルギーが 20 J のときの結果を示しており、切欠き底では 100 °C 程度の

Fig.8 Distribution of plastic strain rate near the V-notch in Charpy specimen ($vE = 20$ J).

Fig.9 Distribution of temperature rise during impact loading near the V-notch in Charpy specimen ($vE = 20$ J).

Fig.10 Relationship between V-notch location and absorbed strain energy ($vE = 20 \text{ J}$).

温度上昇が生じている。また、強度急変部のある接合部試験片では温度上昇する範囲が均質試験片と異なっており、隣接する硬い部分で温度上昇が生じない代わりにその反対側で温度上昇する範囲が広がっていることがわかる。

このように、ここで紹介した3次元動的シミュレーション手法を用いることで実験では計測が困難な試験片内部のひずみ速度や温度上昇などを解析することが可能であり、強度急変部のある試験片のひずみエネルギー分布も把握することができる。異材継手シャルピー試験片において異材それぞれに蓄えられるひずみエネルギーについて、切欠きの位置と関連させて試験片全体のエネルギーに対する割合をまとめた結果を Fig.10 に示す。なお、この内容は慣性力の影響を無視した準静的解析によって得られた結果を既に報告¹⁴⁾しているが、ここでは、慣性力を考慮した3次元動的解析の結果を示している。切欠きが融合部よりも低強度側にある場合には、そのほとんど(90%以上)が低強度側の材料で吸収していることがわかる。一方で、切欠きが高強度側にある場合でも、低強度側でひずみエネルギーが吸収される割合が大きい。高強度側で蓄えられるひずみエネルギーは融合部から切欠き底までの距離 d に強く依存しており、この解析のように強度の差が2倍の接合部の場合では d が3 mm 以下の場合低強度側で蓄えられるエネルギーの方が大きい。この結果は、高強度側に切欠きを入れたシャルピー試験片で靱性を評価するうえで、切欠き位置の影響が大きいことを示している。

5. 結言

これまでに著者らが取り組んだシャルピー試験片の動的シミュレーションの内容を中心に、接合部シャルピー試験片の解析結果について示した。要約を以下にまとめる。

1) 異材接合部のように強度急変部のあるシャルピー試験片

では、試験片が非対称に変形することによって蓄えられるひずみエネルギーの分布も非対称になる。そのため、試験片全体に吸収されるエネルギーが同じであっても塑性ひずみエネルギーの蓄えられる領域が大きく異なる。強度急変部を対象としたシャルピー衝撃試験では、その結果の解釈に注意が必要であることを示唆している。

- 2) 著者らが実施した3次元動的シミュレーションにより、実験では計測が困難な試験片内部のひずみ速度や温度上昇などを解析することが可能である。例えば、試験片全体で蓄えられる吸収エネルギーが20 J のとき、切欠き底では100℃程度の温度上昇が生じている。温度上昇する範囲は低強度側に広がることなどが定量的に把握できる。
- 3) シャルピー試験片と打撃ストライカーのあいだの接触問題を Hertz 理論に基づいて解析することにより、試験片に作用する荷重の振動に対する慣性の影響を忠実に再現できる。今後、このシミュレーション手法を駆使することで、接合部の衝撃特性に対する理解を一層深められることが期待される。

引用文献

- 1) 瀬尾健二、野方文雄、正木順一：材質的不連続部を含む材のシャルピー吸収エネルギーに関する研究、材料、**35** (1986) 1405-1410.
- 2) F. Fearnough, C. Hoy: Mechanism of deformation and fracture in the Charpy test as revealed by dynamic recording of impact loads, Journal of the Iron and Steel Institute, **202** (1964) 912-920.
- 3) A. Pineau: Development of the local approach to fracture over the past 25 years: theory and applications, International Journal of Fracture, **138** (2006) 139-166.
- 4) F.M. Beremin: A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel, Metallurgical and Materials Transactions A, **14** (1983) 2277-2287.
- 5) D.J. Ayres: Dynamic plastic analysis of ductile fracture — the Charpy specimen, Int. J. Fract., **12** (1976) 567-578.
- 6) D.M. Norris Jr.: Computer Simulation of the Charpy V-Notch Toughness Test, Eng. Fract. Mech., **11** (1979) 261-274.
- 7) M.L. Wilkins: Calculation of elastic-plastic flow. Lawrence Livermore Laboratory Rep., UCRL-7322 Rev. 1. (1969) .
- 8) V. Tvergaard, A. Needleman: An analysis of the temperature and rate dependence of Charpy V-notch energies for a high nitrogen steel, Int. J. Fract., **37** (1988) 197-215.
- 9) K.K. Mathur, A. Needleman, V. Tvergaard, V. Tvergaard: Dynamic 3D analysis of the Charpy V-notch test, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, **1** (1993) 467-484.
- 10) A. Rossoll, C. Berdin, P. Forget, C. Prioul, C. Prioul, B. Marini, et al.: Mechanical aspects of the Charpy impact test, Nuclear Engineering and Design, **188** (1999) 217-229.
- 11) G.B. Lenkey, Z. Balogh, N. Hegman: Finite Element Modelling of Charpy Impact Testing, Transferability of Fracture Mechanical Characteristics, Nato Science Series II, **78** (2002) 291-302.

- 12) Y. Takashima, M. Ohata, F. Minami: Analysis of Statistical Scatter in Charpy Impact Toughness, *Mater. Sci. Forum*, **783-786** (2014) 2394-2399.
- 13) Y. Takashima, T. Nishi, H. Shoji, H. Shoji, M. Ohata, F. Minami: Evaluation method for Charpy impact toughness of laser welds based on lateral contraction analysis, *Weld World*, **58** (2014) 289-295.
- 14) Y. Takashima, Y.S. Yamada, T. Handa, S. Igi, K. Oi, F. Minami: Numerical analysis of strength mismatch effect on stress field in Charpy specimen, *Weld World*, **59** (2015) 433-441.
- 15) Y. Takashima, M. Ohata, K. Inose, H. Yamaoka, Y. Nakanishi, F. Minami: Evaluation of Charpy impact toughness using side-grooved specimen for hybrid laser-arc welds of ultra-high-strength steel, *Weld World*, **60** (2016) 1191-1199.
- 16) Y. Takashima, T. Handa, F. Minami: Three-Dimensional Dynamic Explicit Finite Element Analysis of Charpy Impact Test, *Mater. Sci. Forum*, **879** (2017) 1905-1910.
- 17) Y. Takashima, T. Kawabata, S. Yamada, F. Minami: Observation of micro-cracks beneath fracture surface during dynamic crack propagation, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, (2017) In press.
- 18) Y. Takashima, F. Minami: Influence of impact velocity on transition time for V-notched Charpy specimen, *溶接学会論文集*, **35** (2017) 80-84.
- 19) W. Goldsmith, "Impact", Edward Arnold Ltd., London, (1960) .
- 20) G.I. Taylor, H. Quinney: The latent energy remaining in a metal after cold working, *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, **143** (1934) 307-326.
- 21) P.E. Bennett, G.M. Sinclair: Parameter Representation of Low-Temperature Yield Behavior of Body-Centered Cubic Transition Metals, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, **88** (1966) 518-524.

代表者メールアドレス

高嶋康人 takashima@jwri.osaka-u.ac.jp