衝撃圧接の接合性に及ぼすプロジェクタイト径の影響

Effect of Projectile Diameter on Weldability of Impact Welding

伊達秀文*

Hidefumi DATE

(Received April 16, 2008)

The impact welding has been carried out using the projectile with the diameter of 11 and 5 mm. The large projectile with the slenderness ratio L/d (L is Length and d is diameter) of 1 to 5 was welded to the stainless steel target. However, only the small projectile with the slenderness ratio less than 1.2 was welded to the same stainless steel target. In order to clarify the effect of the diameter of the projectile on the weldability, the temperature elevating process in the cylindrical projectile subjected to a longitudinal impact is evaluated numerically using LS-DYNA. The slenderness ratios used in the analysis were 1.0, 2.0 and 3.0. The coefficient of friction used in the analysis was 0.2. The constitutive equation used in the analysis was Cowper-Symonds type. Those numerical results indicated that the deformation mechanism of the projectile with the slenderness ratio less than 2.0 is different of that of the projectile with the slenderness ratio more than 2.0. It was clarified from those results that the temperature of the small projectile with the slenderness ratio less than 1.5 arrives at the bonding temperature by the difference of the deformation mechanism regardless of the small kinetic energy.

Key Words: Welding, Longitudinal impact, Compound layer, Heat generation

1. 緒言

円柱プロジェクタイトを 200m/s 以上に加速してターゲットに縦衝突させたとき、プロジェクタイトがターゲットに接合することを見出し、この接合法を衝撃圧接法と呼び、これまで種々の観点から報告してきた¹⁾。接合界面には必ず化合物層が観察されることから、接合は両金属の接合界面が融解し、接合体内を伝ばする応力波により攪拌され、衝撃持続中に凝固し接合が完了するとする接合モデル (Mechanical mixing model) を提案した²⁾。このモデルを基に、潜熱を熱容量の一部として取り扱うエンタルピー法を用いて化合物層の生成を解析した結果、実験結果とよく一致することを明らかにした³⁾。一方、接合強度試験の結果、接合面に生成される化合物層内で破断することが観察されたので、接合強度は化合物層の強度に依存することが推定された⁴⁾。そこで、化合物層の応力・ひずみ関係をインデンテーション法により同定し、接合強度は界面に生成された化合物層の機械的強度及びその健全性に強く依存することを明らかにした⁵⁾。

これまで実験で用いられたプロジェクタイトは、直径 11mm で、長さは 5mm から 50mm のものであった。しかし、

直径を 5mm とした場合、直径 11 mm の直径のプロジェクタイトと同等の衝突速度において、プロジェクタイト長が 6mm 以下でのみ接合することが見出された⁶⁾。直径 5mm の全ての試験片が接合しない、あるいは短いプロジェクタイトのみが接合しないのであれば、プロジェクタイトの質量不足による運動エネルギーの不足と結論付けることも可能であるが、より短い試験片でのみ接合が達成されることは、プロジェクタイトの持つ運動エネルギーのみの観点から接合の可否を議論するだけでは不十分であることを示しており、試験片の細長比による相似則も成立しないことをも意味している。

本論文では、直径が小さい試験片において、試験片長の短い試験片のみが接合する理由を明らかにするために、接合実験と数値実験を行ない、それぞれの結果の比較から、プロジェクタイト径が小さい場合に短円柱のみが接合する理由を検討した。

2. 試験片と実験方法

本実験で用いたプロジェクタイトの材料は、これまでの衝撃圧接試験で最も加速がよく、安定して接合した工業用純アルミニウム (A-1050) の焼鈍材である。プロジェクタ

* 東北学院大学工学部 機械知能工学科 (〒 985-8537 多賀城市中央 1-13-1)

Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University (1-13-1 Chuou, Tagajo, Miyagi 985-8537 Japan)

Table 1 Material parameter

	K	n
Aluminum	132 MPa	0.28
SUS304	1490 MPa	0.52

Fig. 1 Experimental apparatus

イル形状は、直径 $d = 11\text{mm}$ の試験片では、長さ $h = 11, 20, 30, 40, 50\text{mm}$ の円柱であり、直径 $d = 5\text{mm}$ の試験片では、長さ $h = 4, 5, 6, 7, 8, 12, 20\text{mm}$ とした。ターゲット材にはアルミニウムプロジェタイルと最もよく接合したオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) を用い、厚さ 5mm 、直径 40mm の円盤状とした⁷⁾。ターゲットの衝突面は、研削加工の後、1000 番の耐水研磨紙で研磨し、超音波洗浄の後、圧接試験に供した。

数値解析において、プロジェタイル及びターゲットの力学特性が必要なことから、それらの特性を圧縮試験により計測した。それぞれの材料が、次式の n 乗硬化則に従うとしたとき、準静的な試験で得られた材料定数は Table 1 に示す通りである。

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

衝撃圧接試験に用いたガスガンを Fig. 1 に示す。ターゲットは真空室中に設置された突起を持つロードセルの先端にネジ止めされている。プロジェタイルはアルミニウム製の破壊円板を圧力差により破壊した窒素ガスにより約 5m の距離を加速されターゲットに衝突する。衝突速度は、破壊円盤中央に加工された十字の切欠きの深さにより制御される。衝突速度は、ターゲット前方約 30mm の位置を通っているレーザー光をプロジェタイルが遮る時間とプロジェタイルの長さを用いて評価する。衝撃力は、直径 40mm のロードセル突起部に貼り付けられたひずみゲージにより計測する。

Fig. 2 Schematic of element constitution ($d=11\text{mm}$, $h=20\text{mm}$)

3. 有限要素解析

有限要素法による解析には、陽解法有限要素法コードの一種である LS-DYNA (Ver.940) を用いた。ターゲットの変形はプロジェタイルの変形に比較して極めて小さいことが以前の実験から明らかになっているので、数値解析では、ターゲットは剛体板として取り扱った。 $d=11\text{mm}$ 、 $h=20\text{mm}$ のプロジェタイルの基本とした要素分割を Fig. 2 に示す。解析領域は、いずれの場合も変形の対称性を考慮してプロジェタイルの $1/4$ とし、円周方向に 18 分割、半径方向に 10 分割、軸方向に 40 分割の 8 節点ソリッド要素を用いた。 $d=5\text{mm}$ のプロジェタイルでは、 $d=11\text{mm}$ のプロジェタイルと同じ大きさの要素で分割したものを基本とした。さらに、要素形状依存性を明らかにするために、各辺の長さを $1/2$ とした微小要素分割した解析も行なった。本論文では、断らない限り基本要素分割の結果について述べている。モデル長は、 $d=5\text{mm}$ 、 11mm 共に $h/d=0.5, 1, 2, 3$ として数値解を求めた。構成式は、塑性域を直線硬化とする 2 直線近似とし、降伏応力は以下に示すひずみ速度に依存する Cowper-Symonds 型を用いた。

$$\sigma_y^d = \sigma_y^s \left[1 + \left(\frac{1}{c} \frac{d\varepsilon}{dt} \right)^{1/p} \right] \quad (3)$$

ここで、 σ_y^d : 動的降伏応力、 σ_y^s : 静的降伏応力、及び p 、 c は材料定数である。それぞれの値は、Table 1 に示した値を用いた応力-ひずみ曲線を線形硬化塑性体と仮定し、縦弾性係数との交点から静的降伏応力を $\sigma_y^s = 60\text{MPa}$ 、そのこう配から加工硬化率を 73.5MPa とした。プロジェタイルと剛体面の摩擦係数は接触面の相対速度や潤滑状態、あるいはひずみなどで異なることが知られているが、本論文では、これまで動的試験の結果として報告された値から 0.2 とした⁸⁾。また、 p と c の値もこれまで報告された値から p

Fig. 3 Effect of slenderness ratio on weldability

= 2、 $c = 6000$ とした⁹⁾。衝突速度は、特に断らない限り接合の範囲である 300 m/s として計算を行なっている。

温度を考慮した変形を検討する際に、Johnson-Cook 型の構成式が用いられることが多い¹⁰⁾。しかし、本論文で用いた陽解法有限要素法コード LS-DYNA (Ver.940) では Johnson-Cook 型の構成式を採用することは可能であるが、内部発熱を構成式中に反映するアルゴリズムを備えていない¹¹⁾。温度の影響を考慮しない Johnson-Cook 型は、ひずみが大きい領域では、取り扱いがより単純な上述した Cowper-Symonds 型とほぼ同等なので、本論文では Cowper-Symonds 型を用いて数値解析を行った。したがって、本論文では、温度変化を起こさない個々の要素の応力-ひずみ特性から 4.3 節で述べるひずみエネルギーを用いて要素温度を評価した。

4. 実験結果及び検討

4.1 接合試験

$d = 5\text{mm}$ と 11mm のプロジェタイルを用いた接合試験の結果を Fig. 3 に示す。図から明らかなように、 11mm のプロジェタイルは実験を行なった全ての試験片長において接合したが、 $d = 5\text{mm}$ の試験片では 7mm 以上の試験片長を持つプロジェタイルでは接合しなかった。この結果から、円柱を用いた衝撃圧接の接合性は、緒言で述べたように細長比を示す h/d (h : プロジェタイル長、 d : プロジェタイル直径) 及び運動エネルギーのみでは整理できないことが明らかである。 $d = 5\text{mm}$ のプロジェタイルを用いた接合体でも接合界面に化合物層が観察されたことから、 $d = 5\text{mm}$ のプロジェタイルでも変形に伴う発熱が重要と考えられる。しかし、縦衝撃によりいずれのプロジェタイルも極端なひずみ勾配を持つことから、プロジェタイル内に極端な温度勾配が発生し、単純にプロジェタイルの

Fig. 4(a) Metal flow in projectile ($V=320\text{ m/s}$)

Fig. 4(b) Deformation of elements ($V=320\text{ m/s}$)

持つ運動エネルギーから衝撃端温度を評価することができない。

また、実験的にプロジェタイル内の任意箇所の発熱を検討することは困難であるので数値解析により検討を行なう。しかし、そのためには、実験で得られるプロジェタイルの変形形態と数値解析で得られた変形形態に類似性があることを明らかにすることが必要である。

4.2 変形様式の比較

プロジェタイル断面を耐水研磨紙及びダイヤモンドスラリで研磨した後、ふっ酸で腐食した $d = 11\text{ mm}$ 、 $h = 20\text{ mm}$ のプロジェタイルの断面内に生じた材料流れを Fig. 4 (a) に示す。また、Fig. 4(a) と比較するために、上述した材料特性を用いて求められたプロジェタイル断面における要素の変形の一例を Fig. 4(b) に示す。比較を容易にするために $V=320\text{ m/s}$ の衝突速度で数値解析を行った例を示している。両図の比較から明らかなように、プロジェタイルとターゲットの接触面で発生する摩擦力とプロジェタイルの半径方向外側への材料の流れにより、Fig. 4(b) 中の要素番号 2、6、7 を結ぶ領域に大変形領域が形成され、数値解析で得られた変形形態は、実験結果に見られるプロジェタイルの外周端の反り上がりを除いて実験結果とよ

Fig. 5 Compound layer formed at joining interface (V=350 m/s)

く一致している。加工硬化指数を作為的に 25MPa へと減少させて行った数値解析で、実験結果と同様な外周端の反り上がり変形後半に発生することが確認された。これは数値解析では考慮していない温度上昇による軟化が原因と考えられる。本論文で用いた計算コードは前述したように内部発熱による軟化を導入することが出来ない。したがって、内部発熱による軟化の変形形態等への効果の検討は、今後の課題としたい。Fig.4(b) 中の番号は温度評価を行った要素である。

衝突面中央の界面に生成された化合物層の一例を Fig. 5 に示す。図中の直線 AB はプロジェタイル中心を示している。化合物層は、Fig. 4(a), (b) に示す大変形領域と衝突面で囲まれる領域に相似形で形成されていることが分かる。これらの実験結果と数値結果で求められた変形形態の類似性から、数値解析を用いて要素内の温度上昇を評価することは妥当と考えられる。また、 $d = 5 \text{ mm}$ のプロジェタイル内の変形形態も、 $d = 11 \text{ mm}$ のプロジェタイル内のそれと同様であることを確認している。

4.3 温度上昇量の推定

発生温度の推定に用いた要素は Fig. 4(b) に示した通りである。各要素の温度はそれぞれの要素の応力-ひずみ曲線から、次式を用いて評価した。

$$T = \frac{F}{\rho c_s} \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (3)$$

ここで、 ρ : 密度、 c_s : 比熱、 F : ひずみエネルギーの熱への変換率である。本論文では、ひずみエネルギーは全て熱へ変換すると仮定し、 $F=1$ とした。 σ_{ij} 、 $d\epsilon_{ij}$ はそれぞれ応力テンソル、ひずみ増分テンソルである。

5. 数値結果及び検討

5.1 要素温度の評価

$d = 11 \text{ mm}$ のプロジェタイルでは Fig. 4(b) に示した要素、或いは $d = 5 \text{ mm}$ のプロジェタイルにおいては相対的にほぼ同様の位置における温度上昇量の 1 例を Fig. 6(a),

Fig. 6(b), Fig. 6(c) に示す。

緒言で述べた接合モデルで化合物層が生成し、接合するためには、界面での融解が必要である。以前に報告したエンタルピー法を用いての結果から、化合物層が形成される領域とその厚さは、界面に形成される温度分布と温度上昇過程に依存することが明らかである³⁾。これらの結果から推定すれば、接合するためには、プロジェタイル衝撃端の一部分が融解し、衝撃持続時間中にターゲット材と混合、凝固することが必要である。当然、その領域の大きさは衝突速度に依存する。実験的には、衝突速度 200 m/s 以上でプロジェタイル直径 $d = 11 \text{ mm}$ 、 $h = 20 \text{ mm}$ のほとんどのプロジェタイルが接合することが確認されていることから、同形状のプロジェタイルで 200m/s の衝突速度における数値解析において、温度評価を行った結果、要素の最低温度増分は約 400K であった (Fig. 4(b) 中の要素番号 5 は除く)。この結果から本論文では計算結果と対応させるために、融解領域と見積もられる箇所の要素の最低温度増分が 400 K で接合可能であると仮定した。ただし、本論文で用いられたプログラムでは、前述したように、構成式中の材料定数に温度上昇の影響は反映されていない。

番号 2、6、7 は、最も変形が大きいと推定される領域内の要素、番号 3、4 は 2、6、7 より多少小さい変形を受けていると推定される要素、そして番号 1 は衝撃端中央で単軸ひずみに近い変形を受けている要素である。

$d=11 \text{ mm}$ の結果は、Fig. 6(a) から明らかなように、 $1 < h/d < 2$ の最小値の存在が推定され、その前後で温度が上昇する。 $h/d=0.5$ における温度増分は他の細長比の温度増分と比較して大きい、全体的にはほぼ 400K 以上の温度上昇があり接合可能と考えられる。一定速度衝突 ($V=300 \text{ m/s}$) 下でのプロジェタイル長の増加は、運動エネルギーの増加と比例関係にあることから、一般的には試験片長の増加と共に温度が増加すると考えられる。しかし、実際には $h/d=1$ 近傍を最小値とし、その前後で増加することから、緒言でも述べたように、温度上昇は単純にプロジェタイルの持つ運動エネルギーのみでは決定されないことを示唆している。

$d = 5 \text{ mm}$ における大きい変形領域では、Fig. 6(b) から明らかなように、 $h/d=1$ 近傍で温度増分の最小値を示す。しかし、 $h/d=1$ 付近から細長比が増加しても、それほど大きな温度上昇量は得られない。また、 $h/d = 0.5$ においては質量が小さいにも拘らず極めて大きな温度上昇量が認められることから、プロジェタイルの直径に関わらず $h/d=1$ 近傍を境界に変形形態が異なることが推定され、 $h/d < 1$ で接合の可能性を示唆している。

Fig. 6(c) は $d = 5 \text{ mm}$ のプロジェタイルにおける 1、3、4 要素の結果を示す。 $h/d > 1$ では Fig. 6(b) の結果と大きな相違は無いが、 $h/d=0.5$ では Fig. 6(b) の結果とは異なり、要素位置の影響が大きく現れる。要素 1 については h/d の

Fig. 6 (a) Effect of slenderness ratio on temperature increment ($d=11\text{mm}$)

Fig. 7 Effect of downsizing of mesh on temperature Increment

Fig. 6 (b) Effect of slenderness ratio on temperature increment ($d=5\text{mm}$)

Fig. 6 (c) Effect of slenderness ratio on temperature increment ($d=5\text{mm}$)

影響をあまり受けず、単軸ひずみ状態とみなすほど厳しい変形をしていない⁹⁾。 $d=11\text{mm}$ の番号1,3,4要素の結果は、 $d=5\text{mm}$ の傾向と同様であるが、温度増分が全体的に200 K 程高い。この結果からも、 $d=11\text{mm}$ のプロジェクティルの接合の安定性が伺える。

本解析で用いた構成式は、要素寸法に依存するので、それぞれの幅を1/2とした要素を用いた解析も行なった¹⁰⁾。 $d=11\text{mm}$ の例をFig. 7に示す。横軸は基本要素の番号であり、小要素分割では基本要素内に位置する要素を対応させている。 $d=11\text{mm}$ の要素1において小要素を用いた結果、温度増分が約1400Kとなり、基本とした要素形状の結果と比較して約1000 Kの増分差が生じた。これは、 $d=11\text{mm}$ のプロジェクティルの要素1内の応力勾配及びひずみ勾配が極めて大きい、すなわち中心ほど単軸ひずみ状態へ近づいていることを示しており、要素寸法依存性が強く現れる。一方、 $d=5\text{mm}$ プロジェクティルの要素1においては、1/2要素でも、約50Kほどの温度増分差しか現れず、 $d=11\text{mm}$ のプロジェクティルほど極端な応力及びひずみの勾配は発生していない。要素2では $d=11\text{mm}$ の結果より $d=5\text{mm}$ の結果にDownsizingの効果が現れるが、それ以外の要素にはDownsizingの効果はあまり現れない。数値解析を行なった範囲では、温度増分は $1 < h/d < 2$ で最小を示すことから、最小値の前後で変形機構は異なり、温度増分は増加することを示している。しかし、プロジェクティル径 $d=5\text{mm}$ の結果であるFig. 6(b)の $h/d=1$ と $h/d=3$ の結果を比較してもそれほど違いが見られないことから、温度増分のみで $d=5\text{mm}$ のプロジェクティルが $h/d < 1$ で接合すると結論付けるには不十分と考えられることから、次に衝撃力について検討を行う。

Fig. 8 (a) Stress history of target obtained by experiment

Fig. 8 (b) Stress history of the target obtained by numerical analysis

5.2 応力履歴の影響

5.2.1 大きな細長比を持つ試験片

Fig. 8(a) は、 $d = 11 \text{ mm}$ 、 $h = 20 \text{ mm}$ のプロジェクタイトルが衝突速度 300 m/s でターゲットに衝突し、接合した際のロードセルで計測した衝撃力の履歴である。図中 A 部に衝撃中、負の衝撃力の発生が見られる。一方、同形状のプロジェクタイトルの衝突解析を LS-DYNA を用いて計算された衝突剛体壁が受ける衝撃力の推移を Fig. 8(b) に示す。負の衝撃力は現れないが、衝撃初期に衝撃力がほぼゼロとなる領域が発生する。Fig. 8(b) に表れる衝撃力ゼロの現象は、プロジェクタイトルの衝突面を半径方向に伝ばする横波により、プロジェクタイトルの衝撃端中央部がターゲット面から分離する方向に運動することにより誘起されることを数値モデルの変形形態が示唆している。したがって、Fig. 8(a) に

Fig. 9 Temperature elevation of each element ($d=11$, $h/d=2$)

A で示す負の衝撃力は、正方向の衝撃力の急激な減少による Overshoot と考えられ、実際には衝撃端に負の圧縮応力は発生しないと考えられるが、プロジェクタイトルの衝撃端で衝撃力がほぼゼロとなり衝撃面がターゲット面から分離する現象が生じていると推定される。

Fig. 9 に Fig. 8(b) に対応する要素 1、2、6、7 における温度上昇過程を示す。要素 1 では、衝撃初期に衝突面分離に伴う温度上昇停滞域が生じるが、再衝突と同時に急激な温度上昇が起こり、最大温度は接合温度と仮定している 400 K を越える。他の要素は、変形の進行と共に温度は上昇し衝撃終了時に 400 K を越えるので、 11 mm の直径を持つプロジェクタイトルは衝撃端全体で接合可能温度に到達し、衝撃端の分離の有無に関わらず安定した接合が得られる。

$d = 5 \text{ mm}$ 、 $h/d=2$ のプロジェクタイトルの要素 1 における衝撃応力の履歴を Fig. 10 に示す。縦軸は応力表示であるため、その値は Fig. 8 (a)、(b) と異なるが、衝撃初期に Fig. 8 (b) と同様に、ほぼ応力がゼロとなる領域が形成される。温度上昇過程も、 $d = 11 \text{ mm}$ の結果と傾向は同様であり、一例として $h/d=2$ で求められた要素 1 における温度上昇過程の比較を Fig. 11 に示す。Fig. 6(a)、(b) の比較からも明らかに、 $d = 5 \text{ mm}$ のプロジェクタイトルの温度増分量は小さく、接合に必要な温度に達せず、プロジェクタイトルのターゲットからの分離も重なって接合は困難であると推定される。

5.2.2 小さな細長比を持つ試験片

$d = 5 \text{ mm}$ 、 $h/d=0.5$ の試験片における要素 1 の衝撃応力の推移を Fig. 12 に示す。

Fig. 10 Stress history of projectile ($d=5$, $h/d=2$, Element=1)

Fig. 12 Stress history of element 1 ($d=5\text{mm}$, $h/d=0.5$)

Fig. 11 Effect of the diameter on temperature increment at element 1 ($h/d=2$)

図から明らかなように $h/d=2$ 以上で見られた衝撃初期の応力ゼロの領域が消失している。その結果、Fig. 13 に示すようにいずれの要素においても階段状の温度変化は見られず、全体的に高い温度増分が得られる。記載した結果は、典型的に現れる $h/d=0.5$ の結果であるが、同様な結果が $h/d=1$ でも得られている。Fig. 11 と同様に、 $h/d=0.5$ でプロジェタイル長が異なる場合の要素 1 における温度推移を Fig. 14 に示す。プロジェタイル径に関わらず接合可能温度である約 400K を示している。以上のことから、プロジェタイル長が小さくなると、プロジェタイル衝撃面のターゲットからの分離が生じなくなると同時に、接合に必要な最小限の温度増分が保持されることにより接合が可能となると考えられる。

Fig. 13 Temperature elevation of each element ($d=5\text{ mm}$, $h/d=0.5$)

6. 結 論

衝撃圧接試験において、接合性へ及ぼすプロジェタイル直径の影響を明らかにするために実験と数値解析を行ない、発生温度と衝撃面挙動の観点から検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) プロジェタイル径が 5mm のとき、その長さが 6mm 以下でのみ接合し、径が 11mm の結果とは異なることから、衝撃圧接では、巨視的には試験形状の相似則は成立しない。
- 2) 細長比が 2 以上の試験片では、直径にかかわらず衝撃初

Fig. 14 Effect of the diameter on temperature Increment at element 1 (h/d=0.5)

期にプロジェタイルの衝撃面の一部がターゲット面から一時分離する。

- 3) 直径 11mm のプロジェタイルは、いずれの細長比においても、充分な運動エネルギーの変換による発熱が生じるため、衝撃初期に観察される衝撃面の分離が起こっても接合は可能である。
- 4) 直径 5mm のプロジェタイルは実験の範囲における細長比では、運動エネルギーが充分でないため発熱量に余分はなく、衝撃初期に観察される衝撃面の分離が起こると大きな細長比において接合は困難となる。

謝 辞

衝撃圧接の一連の研究に対して、大阪大学名誉教授 奈賀正明先生には長期間に亘り、ご懇切なご指導を賜りました。また、本研究におきましても貴重なアドバイスを頂きました。記して感謝の意を表します。

実験にご協力頂きました、当時学生 of 作間洋平氏、また数値計算にご協力頂きました、当時学生 of 佐藤和栄氏並びに秋野恭兵氏に併せて感謝の意を表します。

引用文献

- 1) H. Date, Y. Sato and M. Naka: J. of Materials Science Letters, 12 (1993) 626-628.
- 2) 伊達秀文、材料、48 (1999) 1072-1077.
- 3) 伊達秀文、奈賀正明、高温学会誌、26 (2000) 112-117.
- 4) 伊達秀文、材料、50 (2001) 639-644.
- 5) 伊達秀文、二川正敏、奈賀正明、高温学会誌、31 (2005) 364-369.
- 6) H. Date: Abstracts Book in Sixth International Symposium on Impact Engineering, (2007) 50.
- 7) K. Ogawa: Exper. Mechanics, 37 (1997) 37-43.
- 8) M. S. J. Hashmi: J. Strain Analysis, 15 (1980) 20-26.
- 9) 伊達秀文、奈賀正明、高温学会誌、21 (1995) 312 - 319.
- 10) M. A. Meyers, "Dynamic Behavior of Materials", WILEY-INTERSCIENCE, 1994 p329.
- 11) J. O. Hallquist, "LS-DYNA(Ver.940) User's Manual", Livermore Software Technology Corporation, 19.15.3
- 12) 富田佳宏、材料、48 (1999) 1207 - 1213.