

多層同時爆接法による金属積層複合材料の製造とその塑性変形特性

外本和幸*

1. はじめに

爆発圧接（爆接）技術は、接合強度に対する高い信頼性から金属クラッド材の製造技術のひとつとして工業的地位を確立している¹⁾。多層構造からなる極低温用の継手材料も爆接法によって製造されているが、2枚の金属板同士の爆接を繰り返すことによって作製されており、工数の低減が望まれている²⁾。多層に重ねた金属板を同時に爆接することができれば、上記の問題も解決されると思われる。そこでここでは、多層同時爆接法を用いて金属積層複合材料を製造する方法についてまず報告する。この種の研究はすでにいくつか報告されているものの、接合条件と界面に生じる波状組織との関係について系統的にうまく説明されていない場合が多い³⁾⁵⁾。ここでは特に多層爆接過程について数値解析を行うことで接合条件を定量的に明らかにするとともに、界面に生じる波状組織のサイズとの関連を明らかにすることをを行った。さらに各衝突における接合条件を均一化することで、各界面ともに良好に接合された金属積層複合材料を得るための技術を確立した。また、得られた複合材料については、その塑性変形特性を明らかにすることを目的として、いくつかの実験を行った。ここでは、これらの結果について簡単に紹介する。

2. 多層爆接実験法

爆接法の基本原則をご理解いただくために、通常に用いられる爆接法の模式図を図1に示す。通常、平行に設置された2枚の金属板の上に一定厚さの爆薬を設置し、その一端を雷管によって起爆して駆動板を数百m/sの速度にまで加速後、母材に高速衝突させる。この時、衝突点は激しい変形を受け、衝突点前方に金属ジェットを飛散し、これが両金属表面を清浄化してその後の衝突によって両者が強固に接合される。また衝突点の材料は、高圧力下で高速変形をすることによって流体的挙動を示し、界面が波状の組織を呈するのが特徴である。熱的影響は接合界面のごく近傍に限られ、通常の熱処理による拡散を利用した接合法の界面組織とはかなり異なる様相を呈するのが特徴である。

本研究で用いた多層同時爆接法の模式図を図2に示す。ここでは模式図に示すように、爆薬によって駆動板(Driver plate)を高速飛翔させ、一定の間隙を設けて設置した積層金属板を一挙に接合しようとする。用いた爆薬は、硝酸アンモニウムを主体とする旭化成工業(株)製のPAVEXで、爆速は約2.2km/sと爆薬としては比較的低爆速のものであ

る。適当な爆速を持つ爆薬の選択は極めて重要である。図1や図2の装置を用いる場合、水平方向への衝突点移動速度（爆速に等しい）が接合材料中の音速を超えると、材料表面の清浄化に寄与する金属ジェットを形成することができずに接合しない¹⁾。また、PAVEX爆薬は粉末状で比重が 0.55g/cm^3 とかなり低く、爆薬の装填厚さを厚くできるのが特徴である。爆轟圧力の作用時間を考えると、装填厚さが厚い程、圧力作用時間は長くなるので、この点も多層爆接に有利に作用することになる。

本研究で試みた実験条件については表1にまとめて示すが、一部の試験では、Al薄板の間にSUS304鋼の金網を挿入した複合材料の製造も試みた。

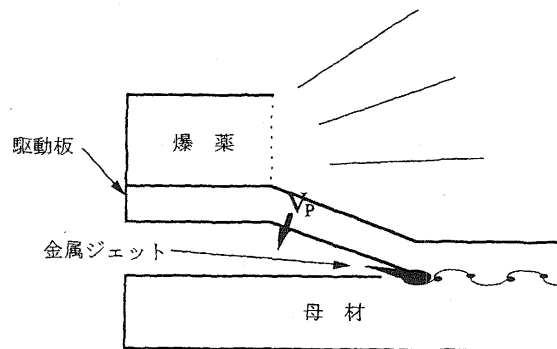


図1 通常の爆接プロセスに関する模式図

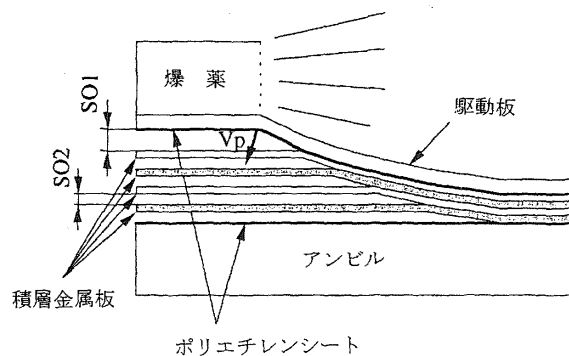


図2 多層爆接法の模式図

表1 多層爆接における実験条件

記号	爆薬厚 (mm)	金属板 1 (厚/mm)	金属板 2 (厚/mm)	駆動板 (厚/mm)	SO1 (mm)	SO2 (mm)
CB1	40	Cu(0.5) x3	黄銅(0.5) x3	Cu(3)	1	1
CB2	40	Cu(0.5) x4	黄銅(0.5) x3	Al(2)	15	2
AS1	40	Al(0.3) x5	SUS304 (0.3)x4	Al(4)	5	0.5
AS2	40	Al(0.3) x5	SUS304 (0.3)x4	Al(4)	5	1
AS3	40	Al(0.3) x5	SUS304 (0.3)x4	Al(4)	5	2
AS4	40	Al(0.3) x4	SUS304 (0.3)x5	Al(4)	5	1
AS5	40	Al(0.55) x5	SUS304 (0.3)x4	Al(4)	5	1
ASMI	40	Al(0.3) x5	SUS304* (0.3)x4	Al(4)	5	0
CS1	40	Cu(0.3) x5	SUS304 (0.3)x4	Al(4)	5	0.5
AM1	50	Al(0.6) x4	MS** (0.4)x3	Al(2)	2	2
TM1	50	Ti(0.5) x4	MS** (0.4)x3	Al(2)	2	2

* SUS304 鋼メッシュ (0.25mm φ)

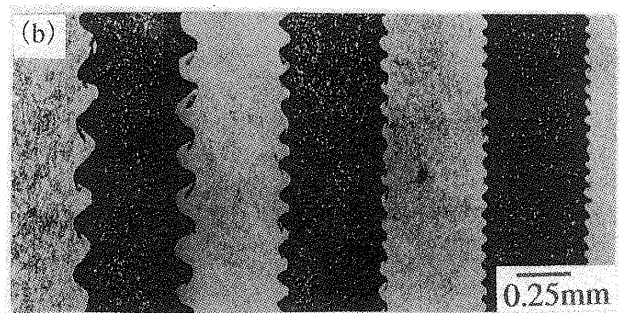
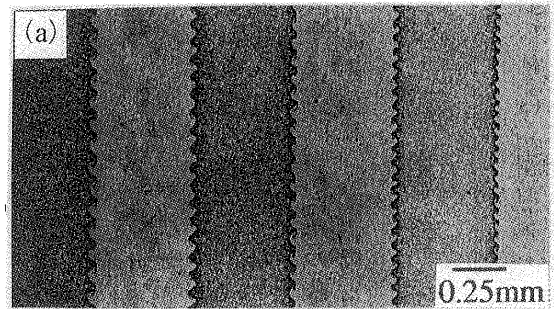
**MS; マルエージング鋼 (時効前の状態)

3. 多層爆接過程の数値解析と接合条件の最適化

銅と黄銅を交互に積層して爆接した材料の切断面の光学顕微鏡組織を図3に示す。図3中の左が爆薬側、右側がアンビル側となっている。各接合界面ともに明瞭な波状組織を示しており、接合界面の近傍においては相当に激しい変形が生じていることがわかる。ここで波状組織のサイズについて見ると、図3(a) (実験番号 CB1) の場合にはおおむね一定の波長を示しているのに対して、図3(b) (実験番号 CB2) では、爆薬側から遠ざかるにつれて波長が次第に減少する結果を示した。

実験条件の相違による結果の相違の原因を明らかにするためには、接合条件を定量的に明らかにすることが必要であるので、差分法を用いた一次元の数値解析を試みた^{6,7)}。それらの結果を図4に示す。図4(a), (b)の解析結果は、図3(a), (b)のものそれぞれ対応している。図4中には、爆轟ガスによる金属板の加速の状況と衝突に伴う速度の減少が示されている。併せて、図中には衝突に伴う運動エネルギー損失量 (ΔKE) と駆動板直上に作用する爆轟ガス圧の変化が記してある。図4(b)の場合は、駆動板と積層した金属板の間隙を十分に大きく取って、爆轟ガスによる加速がある程度減衰した状態で金属板同士が衝突する。このため各金属板の衝突後には、運動量保存則に従った速度減少が認められるわけである。衝突の進行に伴う速度の減少は著しく、図3(b)に示すような波長の減衰が生じることになる。Al-Hassani ら²⁾は ΔKE と界面波の波長には比例関係があることを述べているが、我々の研究でも同様の傾向があることを確認している⁸⁾。図4(a)は、駆動板と積層した金属板の間隙を比較的小さくした場合で、爆轟ガスによる加速域内で金属板の接合が行われる状況になっている。このため、金属板が衝突後、速度減少した後にも、爆轟ガスによって金属板が再び加速されることで速度回復が行われ、衝突速度はすべての接合界面でかなり均一化されている。同時に ΔKE についても図4(a)中に示すように各衝突点でかなり均一となっており、このことによって、図3(a)で示したように、各接合界面の波状組織の大きさの変化はかなり小さくなる。

ギ一損失量 (ΔKE) と駆動板直上に作用する爆轟ガス圧の変化が記してある。図4(b)の場合は、駆動板と積層した金属板の間隙を十分に大きく取って、爆轟ガスによる加速がある程度減衰した状態で金属板同士が衝突する。このため各金属板の衝突後には、運動量保存則に従った速度減少が認められるわけである。衝突の進行に伴う速度の減少は著しく、図3(b)に示すような波長の減衰が生じることになる。Al-Hassani ら²⁾は ΔKE と界面波の波長には比例関係があることを述べているが、我々の研究でも同様の傾向があることを確認している⁸⁾。図4(a)は、駆動板と積層した金属板の間隙を比較的小さくした場合で、爆轟ガスによる加速域内で金属板の接合が行われる状況になっている。このため、金属板が衝突後、速度減少した後にも、爆轟ガスによって金属板が再び加速されることで速度回復が行われ、衝突速度はすべての接合界面でかなり均一化されている。同時に ΔKE についても図4(a)中に示すように各衝突点でかなり均一となっており、このことによって、図3(a)で示したように、各接合界面の波状組織の大きさの変化はかなり小さくなる。



Explosive side



Anvil side



図3 多層爆接された銅-黄銅積層複合材料の界面組織 ((a);実験番号 CB1, (b);実験番号 CB2)

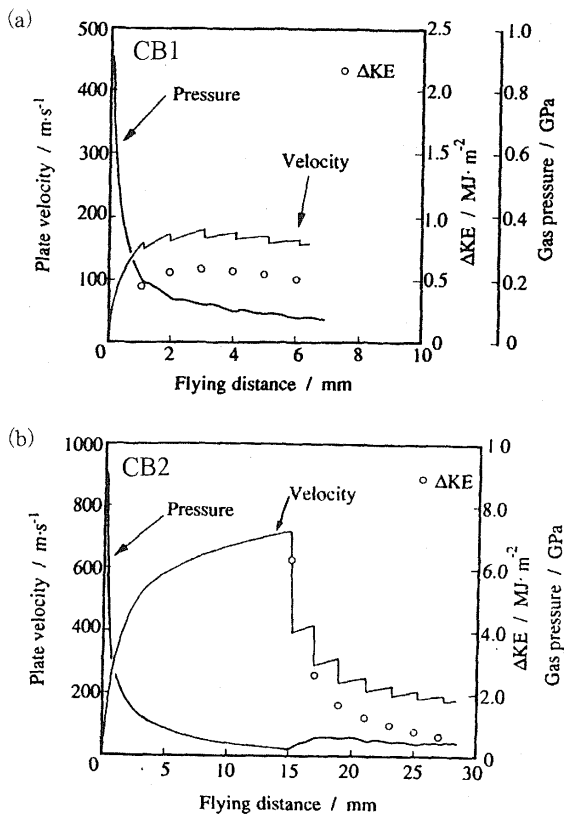


図4 多層爆接過程の数値解析結果
((a);実験番号CB1, (b);実験番号CB2)

Al とステンレス鋼など、密度や力学特性の大きく異なる材料を接合する場合には、速度を統一するだけでは、すべての接合界面において良好かつ均一な接合条件を得ることは難しい。

図5にAl-SUS304鋼の多層爆接過程の解析例を示すが、両者の密度の相違から、衝突点での運動エネルギー損失量 (ΔKE) はAlがSUS304鋼に衝突する場合と、SUS304鋼がAlに衝突する場合で大きく異なることを示している。ここでは同じ厚さの金属板を使用したのがこのような結果になったが、厚さを調整して衝突される金属板の質量を一定にすることを行えば、衝突条件の相違を小さくすることは可能である。しかしながら板厚の調整が自由にできない場合もあるので、その場合は、その時の条件が接合可能な範囲に収まっているかどうかを検討する必要が生じる。これまでの研究によって、各接合界面における ΔKE が $0.08 \sim 0.6 \text{ MJ/m}^2$ の範囲で接合可能であることがすでに明らかにされている⁹⁾。図5(a)の場合はおおむねこの条件を満たしていて実際、この条件で良好な接合が達成されている。これに対して図5(c)の場合には、一部の衝突においてエネルギー過剰が生じてしまい良好な接合が得られない。図5(a)の場合の界面組織を図6に示すが、全ての界面で良好な接合状態を示していた。ただし、接合界面は平滑な境界を呈していた。図5(b)の上記の中間の場合には、

前述の接合条件範囲をやや超えると思われたが、実験においては全ての界面で反応層などを生じることなく、良好に接合された。

Al-SUS304鋼の場合には、条件によっては波状組織が見られる場合もあるが、平滑な界面を呈するような場合が、多層爆接材の場合には多く認められた。これは両者の力学特性が大きく異なるため、両材料がともに激しく変形するのではなく、図8に模式的に示すように、軟材のみが変形して金属ジェットを発生する場合があります。このような場合においても、条件が適当であれば両者は良好に接合され、高い接合強度を示すことができる。これに対して、図5(c)の場合のようにエネルギー過剰の場合には、図7に示すように界面に厚い反応層を形成するか、AlがSUS304鋼に衝突した境界において剥離を生じる結果を示すことになる。この層のAl濃度はAlを70-90mass%含むことが確認されており、Alが激しく変形することで溶融し、それが相手材の成分をわずかに溶かした結果であると推定された。

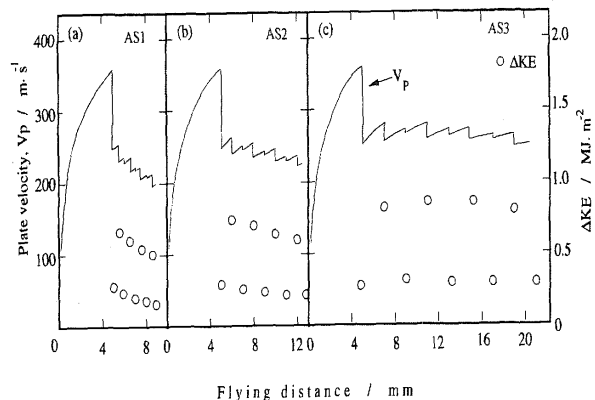


図5 Al-SUS304鋼に関する数値解析結果
((a);AS1, (b);AS2, (c);AS3)の場合)

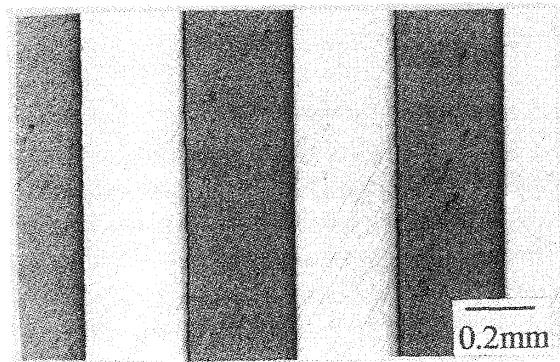


図6 Al-SUS304積層複合材料の断面組織(AS1)

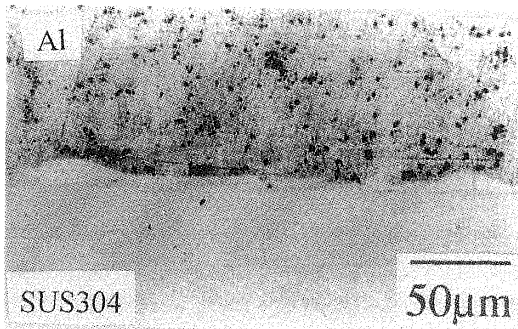


図7 エネルギー過剰な状態で Al-SUS304 鋼接合界面に生じる反応層

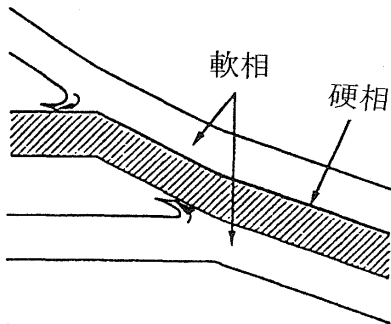


図8 複合材料の構成相の強度差が大きい場合の衝突点近傍での変形の状況を示す模式図

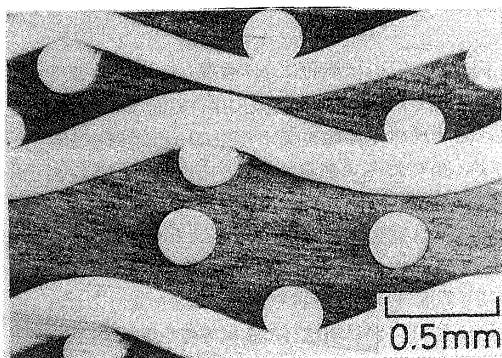


図9 ステンレス鋼金網で強化された Al 基複合材料の断面組織 (ASM1)

上記のような方法で条件を整えることで、積層複合材料の製造に関する指針を確立することができた。また、図9に示すような金網で強化した Al 基複合材料の製造なども

可能である。この場合、これまで述べてきた金属ジェットの生成による接合とは異なり、Al が金属金網の周りを激しく塑性流動するような機構で複合化が達成される。

4. 積層複合材料の塑性変形特性

界面に熔融層などを形成せず、良好な状態で得られた強化材体積率の異なる Al-SUS304 鋼積層複合材料について行った引張試験についての、応力-ひずみ曲線を図10に示す。また、得られた引張り特性値を、その他の材料の試験結果も併せて表2にまとめて示す。

引張試験による応力-ひずみ曲線から、変形中に剥離などを生じること無く、試料全体で破断していることがわかる。Al は限界まで加工硬化しており、ほとんど伸びを示さないはずであるが、SUS304 鋼との接合が極めて強固であるために、くびれの発生が拘束されて高い伸び値を示す。この伸び値は、SUS304 鋼体積率の増加とともに増加した。引張強度についても、各相の引張強度値に体積率をかけてその総和を求めるいわゆる複合則による予測値と同程度か、わずかに低めの値を示す場合が多かった。ステンレス鋼金網で強化した Al 基複合材料についても同様の傾向を示した。これに対して、Ti-マルエージング鋼の場合の結果は、複合則による予測値より高い引張強度値を示した。この結果は、この場合、時効硬化前の材料に対して爆接を行い、爆接後に時効を施したことによる。時効中に Ti とマルエージング鋼の界面には数 μm 以下程度の極薄い金属間化合物層が均一に生成されており、これによって強化されたものと推定された。また、Al-マルエージング鋼の場合には、同様に化合物層を形成するものの、熱応力などの影響で接合強度を弱める結果となり、引張変形途中で界面剥離を容易に生じたために、高い引張強度値を得ることはできなかった。

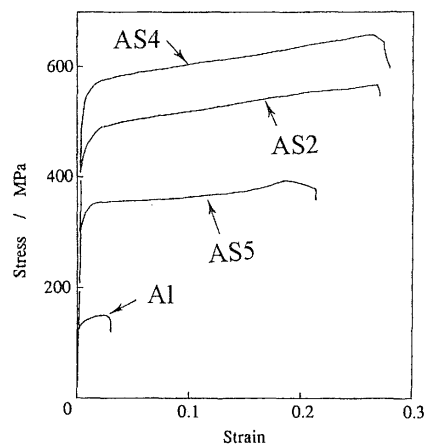


図10 Al-SUS304 鋼積層複合材料の引張試験結果

得られた材料の圧延加工性についても、ここで Al-SUS304 鋼の結果を中心に述べてみたい。圧延による圧

下率 $r = (t_0 - t) / t_0$; t_0 は初期板厚, t は圧延後の板厚) を増加するとともに, 硬相である SUS304 硬中にくびれを生じ始める. 圧下率の増加とともに, くびれは図 11 に示すような圧延方向に対して 45° 方向にせん断帯を形成する用な形の不均一変形へと成長した. 一連の実験によると, 硬相と軟相の変形抵抗の差が大きい程, 硬相の体積率が低い程, 界面の波状組織のような初期の運動が大きい程, 低い圧下率においてくびれなどの不均一変形が生じやすいことが認められた.

表 2 得られた複合材料の引張試験結果

記号	強化材 体積率	UTS (計測) /MPa	UTS (予測) /MPa	破断歪 (計測)
CB1	0.50	393	406	0.11
AS4	0.56	614	625	0.25
AS2	0.44	498	521	0.26
AS5	0.30	370	402	0.21
ASM1	0.21	160	168	0.032
CS1	0.44	642	636	0.087
AM1*	0.33	756	790	0.018
TM1*	0.38	1245	1209	0.034

*500 °C, 30min.時効処理後の結果

UTS; 最大引張強度

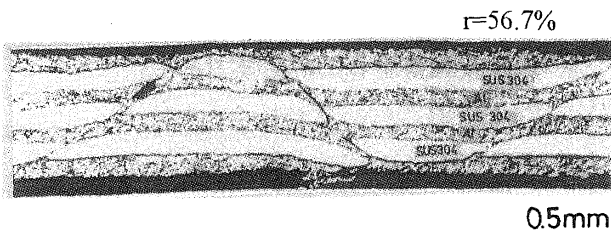


図 11 圧下率 56.7%まで圧延した Al-SUS304 鋼(AS1)の断面組織

我々は得られた複合材料について, 深絞り, せん断などの塑性加工実験なども試みている^{10),11)}. 積層数が増えると特性が平均化されて興味深い研究結果はあまり認められなかった. これに対し, 表が軟材で裏が硬材である場合とその逆の場合, すなわち 2 層構造からなるような場合の変形特性は, 状況によってかなり異なる場合が認められた. この時, 軟材および硬材のそれぞれを, 金属薄板の数層を爆接した材料で製作すると, その界面組織を追跡することで, 材料内部の変形の詳細を明らかにすることが可能になる.

著者らは, 多層に爆接した材料の波状組織を標点として, 材料内の微細な変形を実験的に明かにする方法を提案している¹²⁾. 波の間隔は数十 μ m 程度にまで細かくでき, 大変形後もその痕跡は十分に観測できる特徴を持っており, せん断変形等の実験的解析に有効な手法である^{12),13)}.

5. まとめ

ここでは, 多層に重ねた金属板を一挙に爆接することで積層複合材料を得るための技術に関して, その方法を紹介するとともに, 得られた複合材料の引張特性をはじめとする塑性変形特性の特徴について紹介した. 本稿を通じて, 爆接は, 一般に溶接が難しい Al-ステンレス鋼などの組み合わせに関しても, 条件を整えてやることであれば比較的容易に強固な接合を達成する技術であることがご理解いただけたかと思っている. 後の塑性変形によっても容易に剥離しないこともおわかりいただけたと思う.

また著者らは, ここに紹介した以外にも, Al とセラミックスの爆接¹⁴⁾や粉末衝撃成形法を利用した Al-SiCp 複合材料創製技術¹⁵⁾などについても研究を行っており, プロセスの特殊性を活かした興味深い成果が挙がりつつあることをここに報告しておきたい.

終りに, 本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の助成によることを付記し, ここに深謝申し上げます.

参考文献

- 1) B.Crossland: Explosive Welding and Its Application, Clarendon Press, Oxford, (1982).
- 2) 久保田: 塑性と加工, 28-322(1987),1211.
- 3) S.T.S.Al-Hassani et al.: Int.J. Impact Eng.,2-1(1984), 85.
- 4) H.El-Sobky and T.Z.Blazynsky: Proc.7th Int.Conf.on High Energy Rate Fabrication, Univ.of Leeds, (1981), 100.
- 5) S.N.Shoukry and A.A.Hegazy, Prepellants, Explosives, Pyrotechnics, 13(1988),144.
- 6) K.Hokamoto et al.: Mem.Faculty of Eng., Kumamoto Univ.,40-1(1995),1.
- 7) K.Hokamoto et al.: Composites Eng.,5-8(1995),1069.
- 8) 外本ほか: 日本金属学会誌, 54(1990),809.
- 9) 外本ほか: 溶接学会論文集, 11-1(1993),16.
- 10) K. Hokamoto et al.: Proc. 3rd Int Conf.on Technology of Plasticity, 3(1990), 1441.
- 11) 外本: (財)天田金属加工機械技術振興財団研究概要報告書・国際交流報告書(7), (1995),115.
- 12) 藤田ほか: 塑性と加工, 30-338(1989),434.
- 13) M.Mochihara et al.: Metals and Materials, 4-4(1998),859.
- 14) K.Hokamoto et al.: J.Mater.Process.Technol.,85(1999), 175.
- 15) シバクマールほか: 平 12 塑加春講論,(2000),81.