

高エネルギー速度加工

今井田 豊

同志社大学 工学部 機械系学科

High Energy Rate Forming

Yutaka IMAIDA

Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto, Japan

1. はじめに

材料の加工に衝撃力を利用する試みは古くから見られる。例えばエジプトやメソポタミアにおいては、金、銀、銅を石塊を手工具として用い、貴族の装飾品、神具、武器として自由鍛造しているが、これも広い意味では衝撃力を利用した加工法である。その後石塊などの手工具は発達し、15世紀には水力が、また18世紀には蒸気力が塑性加工に用いられ、現在の鍛造プレスやハンマに至っている。工業の発達にともない、被加工材料や加工法が多様化し1960年代になるとチタン合金などの難加工材の成形に関連して、従来見られなかった衝撃高速高圧力が金属材料の塑性加工に応用されるようになる。衝撃高圧力を利用すると加工速度と加工圧力は飛躍的に増大し、従来10m/s以下にあった加工速度が数百m/s～数千m/sに、圧力は数千気圧に達する。

この衝撃圧力は、物質粒子を高速に加速することにより、気体、液体、固体中を問わず発生し、粒子の加速源として火薬の爆轟圧や高電圧放電などが利用されている。そしてこのような衝撃高圧力を用いて金属材料を塑性変形させる加工法を総称して高エネルギー速度加工と呼んでいる。ここでは衝撃高圧力を用いた高速高圧塑性加工法についての概略を紹介する。

2. 衝撃圧力を利用した加工法の特徴

前に述べたように難加工材の成形から始まった衝撃高圧力による高エネルギー速度加工法は、当然変形速度が早く加工時間が短い、その他に次に示すような多くの特徴を有している。

- 1) 複雑な形状の成形が、従来の加工法に比べ少ない工程でできる。
- 2) 成形用の型は雌雄いずれか一方のみで良く、型材料には慣用材料の外に、鋳

鉄，低溶融金属やエポキシ樹脂，セラミック，コンクリートなどの金属以外の使用も可能である。したがって，型材，型加工，心合せなどに要する費用が少なく多種少量生産に適している。

- 3)適切な条件下においては，加工後の製品のスプリングバックが少なく精度の良い成形が得られる。
- 4)被加工材によっては高ひずみ速度下で延性が増すものがあるので，一度で大変形が可能である。
- 5)加工に要するエネルギー容量を大きくとることができるので大型部品の成形が可能である。
- 6)さまざまな塑性加工に応用することができる。例えば，成形，曲げ，絞り，穴あけ，バルジ加工，圧接，ライニング，切断，かしめ，粉末成形，表面硬化，コーティング，粉砕，などの加工が単独または同時に可能である。

以上のような特徴を持つ加工法は，通常の大量生産を目的とする塑性加工法とは相反する面もあるが，製品の付加価値を高めるために多品種少量生産が必要とされている現在，異なった観点から大いに意味のある成形法である。

3. 衝撃高圧力の測定

塑性加工において加工に要する圧力の測定は被加工物の変形抵抗の算定とともにきわめて重要な問題となる。とくに衝撃圧力による成形の場合，被加工物の変形が圧力を受けながら進行するため，圧力値はつねに変化し，正確な値を求めることは非常に困難となる。ここでは衝撃高圧力の測定法の原理と歴史を簡単に述べることにする。

衝撃圧力の測定法は大別すると，衝撃力によって物体に変形を与え，その変形量を測定し，それより圧力値を算定する方法と，衝撃波の伝播速度を測定し，それより理論的に算出する方法に分けることができるが，エレクトロニクスがそれほど発達していなかった時代には，当然衝撃波の速度など計測できるわけがなく前者の測定法によらざるを得なかった。変形量より圧力を求める場合，古くは物体の弾性変形を利用する方法¹⁾，塑性変形を利用する方法^{2)~5)}，位置の変化を利用する方法⁶⁾，などの機械的方法が用いられた。その後1950年代後半より，変形にともなう物性(電気抵抗など)の変化を電気的に取り出すことができるようになる。この原理を応用して圧力を直接求める方法がとられている。これには圧電現象を利用する方法⁷⁾，⁸⁾，電気抵抗の変化を利用する方法⁹⁾，¹⁰⁾，電磁誘導を利用する方法¹¹⁾などがあるが，2.5Gpa以下の計測には圧電効果を利用したものが良く用い

られている。一方衝撃波の伝播速度(粒子速度)を直接測定する方法としては、ピン接触子法、傾斜抵抗線法、コンデンサ法、電磁法などの電気的方法とマイクロフラッシュ法、傾斜プリズム法、光てこ法、光干渉法などの光学的方法があるが、詳しくは文献(12)、(13)を参照していただきたい。

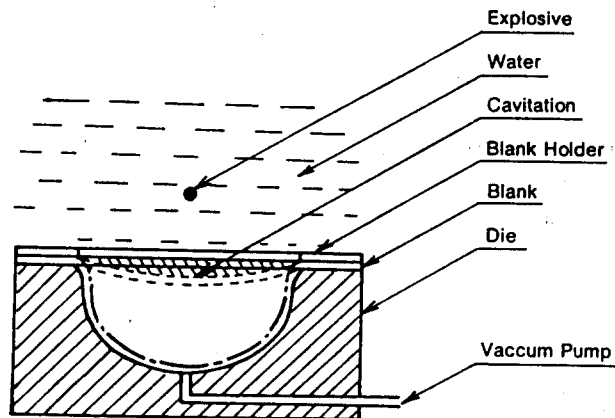
4. 火薬類をエネルギー源とする高エネルギー速度加工法

火薬類をエネルギー源とする加工法の原理は古くから見られ、前田の報告によると記録にあるものでは、1898年火薬を利用したエンボス加工の英国特許が、わが国では1920年(大正9年)に海軍から秘密特許が出されているとしている。

一般に言われている火薬は、その化学成分や爆発速度などにより、火薬と爆薬に分けることができる。前者は黒色火薬、無煙火薬などでその燃焼速度2,000m/s以下である。後者に属するものには、TNT、RDX などがあり、燃焼速度も5,000～8,000m/s^{16)、17)}におよんでおり爆発成形や爆発圧接にはこの爆薬が使用される。

4. 1. 爆発成形

爆発成形法の概略を図1に示す。図に示されるように被加工材上方に爆薬がセッ



第1図 爆発成型法

トされ、被加工材、爆薬ともに圧力伝達媒体である水中に設置される。爆薬が爆発すると衝撃的圧力波が起爆点を中心に水中を伝播し被加工材に到達する。この衝撃的圧力波により被加工材は加速され変形する。このとき圧力媒体である水と被加工材との速度差により、水と被加工材との境界面には一般に微少なキャビティが多数発生する。一方爆発部ではガスが生成され、このガス体は続いて膨張運動を始める。膨張運動は進行して水中にあるガス体はついに過膨張した状態に移

行し、今度は逆に収縮運動に転ずる。ガス体は収縮しながら徐々に圧力を高め、ついには高圧力となりふたたび膨張運動を行う。この収縮から膨張に反転するときにも衝撃的高圧力波を発生する。一方膨張に転じたガス体は、先に述べたキャビティの部分に高速の水流をもたらす、この流入した水が被加工材に衝突する際にも水撃作用により変形は促進される。このように爆発成形においては厳密にガス体の膨張、収縮時に発生する衝撃波とそれに続くキャビティへの水の流入による水撃作用とがくり返されて変形が進行する。

水中爆発による最高圧力 P_{max} は球状火薬のとき理論的に Kirkwood-Bethe¹⁹⁾により求められている。

$$P_{max} = K \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha}$$

ただし W ：火薬量， R ：火薬からの距離， α ， K ：火薬による定数で p.s.i 単位を用いると TNT 火薬の場合 $\alpha=1.13$ ， $K=2.16 \times 10^4$ ，RAD 火薬の場合それぞれ 1.15 と 2.14×10^4 の値をとり、これから計算しても非常に高圧力が発生していることがわかる。

4. 2. 爆発圧接

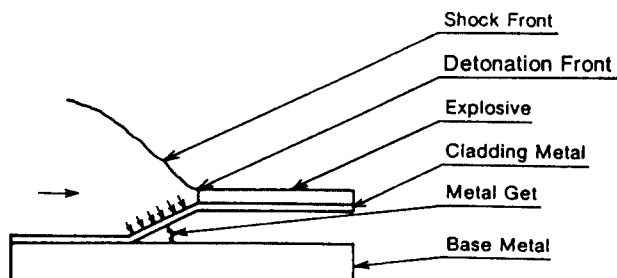
火薬または爆薬が爆発するときのエネルギーを用いて同種または異種の金属を接合することを爆発圧接といい、とくにこのうちクラッドを作ることを爆発圧着と呼んでいる。

爆発圧着は1956年ごろから日本およびアメリカでその工業利用が検討され始め、その後報告書としては1960年 Tardif²⁰⁾により2枚の金属板の圧着が初めてなされ、つづいて Pearson²¹⁾によりライニングへの応用、さらに Duvall²²⁾による発生圧力と衝突速度の計測などが見られる。

爆着クラッドの種類は数多くあり、例えば Ti, Cu, Ni, SUS, Steelなどを二重または三重に圧着することができ、合せ材と母材の組み合わせにより、ステンレスクラッド鋼、アルミニウムクラッド鋼、ニッケルクラッド鋼、チタンクラッド鋼などと呼ばれ、耐食構造用材、耐摩耗用材、耐食電導用材、耐食電熱用材、異材継手などとして、建築、原子力発電設備、電気設備、冷凍設備、船舶、海水資源設備などに使用されている。

爆発圧着法の概略を図2に示す。合せ材と母材は、材質や火薬の種類により定められる一定の間隔を保って置かれ、合せ材の上方に一定の厚さの爆薬がセットさ

れる。端面より電気雷管で起爆すると爆薬は他端へ向かって爆轟して行く。この



第2図 爆発圧接去

とき合せ材は爆轟圧を受け高速で飛翔し始め母材に衝突する。この衝突で爆発圧着が可能となるためには、合せ材を母材に対してある傾斜角で衝突させ、両金属材料の衝突点で、両金属の薄い表層部においてメタルジェットが発生しなければならない²³⁾。このメタルジェットは両金属表面を清浄化する作用をもち、酸化皮膜などのミクロな異物を除去する作用をする。2枚の金属板がある傾斜角をもって衝突するとき、メタルジェットを放出する現象はムンロー効果(またはノイマン効果)といわれており、そのためにはある限度以上の衝突速度が必要である^{24),25)}。例えばwylie²⁶⁾らは銅板と軟鋼板のクラッドにおいては衝突速度420~700m/s、衝突傾斜角11~12°においてのみ良好な圧着が成立すると報告している。メタルジェットが発生する状態では合せ材は数万気圧~数十万気圧の圧力で母材に押しつけられ、両金属面は互いの原子間結合がおよぶ距離にまで接近して圧着が進行する。このような爆発圧着法では合せ材が母材に対して適当な速度および傾斜角をもって衝突することが絶対の条件とされている²⁷⁾が最適条件下での爆発圧着クラッド鋼の結合力は非常に強く、せん断試験を行っても結合面では破断せず、合わ材または母材が破断する。爆発圧着ではこのように強い結合力を持つが、その結合機構についてはつぎの4つが考えられている。(1)金属結合面の極薄い表面で互いに金属が混じり合い合金となって結合する。(2)金属原子同志が直接接触し結合する。(3)結合部に形成された熔融層や合金層を介して結合する。(4)結合境界面に生じたさざ波状圧接境界(ripple like welding interface)により結合する。この波形模様は高速で衝突する金属間の圧着界面に良く生じ、流体力学的な立場より定量的な解析も行われており²⁸⁾良好な圧着がなされた時には必ず生じている。この爆発圧着による製品の大部分は、母材と合せ材の設置関係の容易な板状のものが多いが、棒状、管のクラッドも同じような原理で容易に生産が可能である。その他応用技術としては熱交換器の管板と管の圧着や、管の接続などにも用いられてお

り、先に述べた爆発圧着を同時に行なう研究も進められている^{29), 30)}。

5. 電気をエネルギー源とする高エネルギー速度加工

コンデンサに貯えられた電氣的エネルギーをエネルギー源とする高エネルギー速度加工は液体中で成形を行う放電成形法と大気中で変形することができる気中成形法に大別される。

5. 1. 放電成形

放電成形法はコンデンサに貯えられた電氣的エネルギーを液体中に設置した電極間に瞬時に放出し、このとき発生する衝撃的圧力でもって金属材料を塑性変形する加工法である。

液体中における高電圧放電による圧力発生現象は古くから知られており、1905年ドイツにおいてT.Svedvergがコンデンサに貯えた電荷を水中で火花放電し、コロイド状の金属懸濁液を作ったとJ.W.Kirk³¹⁾は報告している。日本においても、放電による圧力の発生が1928年長岡³²⁾により報告されている。しかしこの圧力が成形に利用され始めたのは第2次世界大戦以降であり^{33)~37)}、日本では1960年頃より研究が始められた^{38)~40)}。

液中放電成形において、衝撃大電流放電を電極間で行うとき、両電極間に金属細線を接続する細線放電と、何も接続しない間隙放電とがあるが、安定した放電を効率良く行うためには前者の方式が優れている。

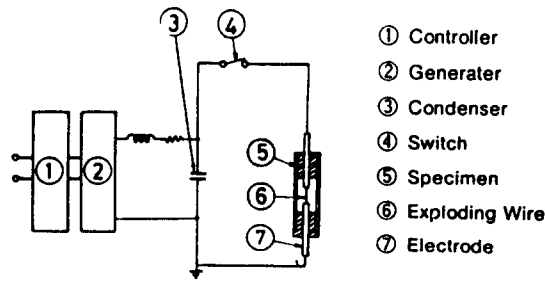
電氣的エネルギーが機械的エネルギーに変換され被加工物を成形する過程は

- (I) コンデンサに貯えられた電気エネルギーの電極間隙への放電
- (II) 衝撃大電流放電時の細線爆発による衝撃圧力波の発生および伝播
- (III) 衝撃圧力波のもつ衝撃的エネルギーによる金属材料の高速変形

という三つに大別できる。しかしこれらの各過程はいずれも過渡的な高密度エネルギー領域の現象であり、いろいろな方面から研究されてきたが^{41), 42)}、まだ現象的にも不明確な部分が多く、また理論的解析を試みるにあたっては、未知の物理定数が多いため、限られた部分が明らかにされているにすぎない。

放電成形装置の概略を図3に示す。装置は電圧の制御や高電圧発生装置より成り立つ制御回路、充電用コンデンサや抵抗から成り立つ充電回路、高電圧開閉器、電極、金属細線より成り立つ放電回路および成形部より構成される。

放電成形において得られる電氣的エネルギーはコンデンサ容量とその端子電圧に

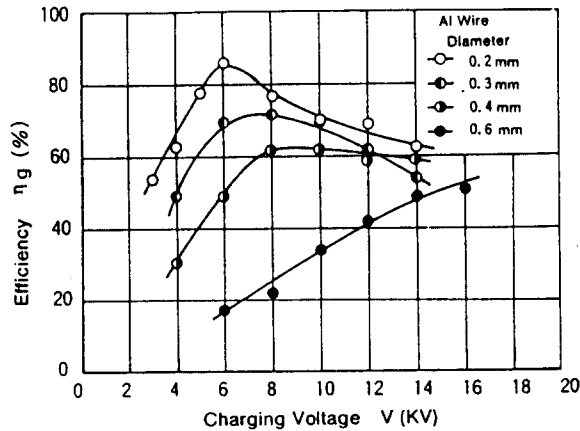


第3図 放電成形法

より決定される。したがって同じエネルギーを得るためには充電電圧を高くする方法と比較的低電圧でもってコンデンサ容量を大きくする方法があるが、どちらも一長一短をもち、使用目的と安全性により使い分けているのが現状である。

放電成形において衝撃圧力の発生機構をつぎに述べるが、細線爆発現象そのものについては放電物理の分野において報告があり^{43)~47)}、さらに圧力の発生と関連づけた研究^{48)~50)}もなされている。しかしこれらは先にも述べたように現象の一部を解明しているにすぎない。高電圧スイッチを閉じ、コンデンサに貯えた電気的エネルギーを電極間に放電すると、電極間の金属細線はジュール加熱され溶融点に達する。溶融した細線は慣性や磁場によるピンチ効果などによって短時間その形状を保持するが、流れ続ける電流により、ついには爆発的に気化し衝撃圧力波を発生する。このとき金属の蒸発によって電極間に生成された金属蒸気はさらに加熱され、高温、高压ガスを生成する。このガス体は爆薬の爆発時と同様な機構で、膨張・収縮をくり返し、そのつど圧力波を発生しながらついには消滅する。くり返し発生した衝撃的圧力波は、液体中を指数関数的に減衰しながら伝播し、被加工物に変形エネルギーを与える。被加工物の形状としては板や円管が用いられ複雑な形状を有する成形が行われている。放電成形は爆発成形とそのエネルギー源が異なるだけで、高速変形そのものに関しては本質的に同じである。しかし放電成形は電気エネルギーを利用する関係上、大きなエネルギーを得るには大型の装置が必要となるので、あまり大型部品の成形には用いることができないが、その反面エネルギーのコントロールが容易であり、発生した圧力の伝播状態を直接制御し成形制御を向上させることも可能である。

電極間に放出されるエネルギーが大きいと、金属細線はより急激に爆発し、発生圧力も大きくなる。図4は充電エネルギーと電極間放出エネルギーとの比を変換効率として表し、充電エネルギーや金属細線径が効率に与える影響を示したものの一例である。充電電圧が比較的低い場合は、線形が細いほど効率はよいが充電電圧が高



第4図 放電成形の効率に及ぼす充電エネルギー、線径の影響

くなると、最高の効率を示す線径は太い方へ移行する。このように金属細線を用いる場合、細線の種類や線径、線長などの放電条件が被加工物の変形に大きく影響を与え^{65)~70)}成形目的に最も適した放電条件を選定しなければならない。

被加工物の変形状態についての解析は、衝撃負荷を受ける物体の変形として考えればよいが、清田⁵¹⁾らも指摘しているように、(1)高速現象であるため、計測、実験が非常に難しいこと、(2)慣性項を含むつり合い方程式が複雑であること、(3)高ひずみ速度下での変形抵抗が正確に把握できないこと、などの理由のため変形解析法は未だ完全には確立されていない。しかし適当な仮定をもうけ円板^{52)~58)}および円管^{59)~64)}の解析も試みられている。

5.2. 電磁成形

電磁成型法はコンデンサに貯えた電気的エネルギーを電磁コイルに急激に放出し、そのとき発生する磁界のエネルギーによって金属材料を直接成形する高エネルギー速度加工法である。先に述べた液中放電成形法と比べると大気中で成形が可能であるのが大きな特徴である。

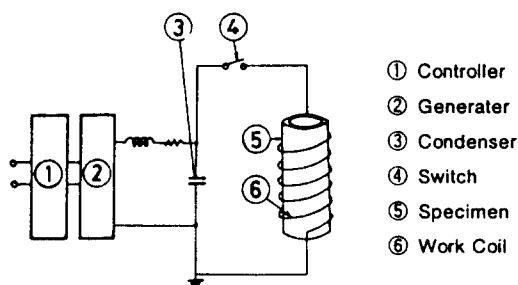
この電磁成形法は1897年Teslaによって、その原理が提唱されたとされているが⁷¹⁾、その後1955年S.A.Colgateが1957年にはD.H.Birdsallなどが鋼管や銅管の成形実験を行っており⁷²⁾、1960年代に入ると締結や成形などの工程に利用され始め1965年Johnsonらにより始めて解析的な取扱いが行われている^{73)~76)}。

電磁成形法の原理は電磁誘導の法則によるうず電流とフレミングの左手の法則

にしたがう電磁力とを利用したものである。いま2本の十分長い平行導線が距離 $r(m)$ をへだてて置かれ、それぞれに $I_1, I_2(A)$ の電流が流れると両導体はその周囲に右ねじの法則にしたがう方向の磁界を作る。このとき導体は相手導体の磁界と自己の電流によって、フレミングの左手の法則にしたがう方向の電磁力をうけるが、その力の大きさ F は

$$F = (2I_1 \cdot I_2 / r) \times 10^{-7} \quad (N/m)$$

となる。この力によって被加工物を成形しようとするのが電磁成形法の原理である。



第5図 電磁成形法

電磁成形の基本的回路図を図5に示す。被加工物、および成形コイルを除く衝撃大電流発生装置の構成は基本的には放電成形の場合と同じである。加工コイルに流れる衝撃大電流は上式の I_1 に相当し、被加工物中に誘起された誘導電流は I_2 に相当する。図に示すようにソレノイド状に巻かれた成形コイルの内側に被加工物が置かれ、成形コイルに衝撃大電流を流すと、この被加工物の成形コイル側表面にうず電流が誘起され、磁束の被加工物内部への拡散が抑えられる。したがって磁束は被加工物とコイルの間の微小空間に限定され、この部分の磁束密度が著しく高くなる。磁束密度 β (Gauss) なる磁界のエネルギー密度は μ を透磁率とすると $\beta^2 / 8\pi\mu$ (erg/cm^3) であり、圧力は、 $\beta^2 / 8\pi\mu$ (dyne/cm^2) になる。たとえば電磁密度が 1MGauss の場合空気中では約 4GPa の圧力が発生する。したがって被加工物には瞬時に上記の高圧力が作用し高速変形が行われる。

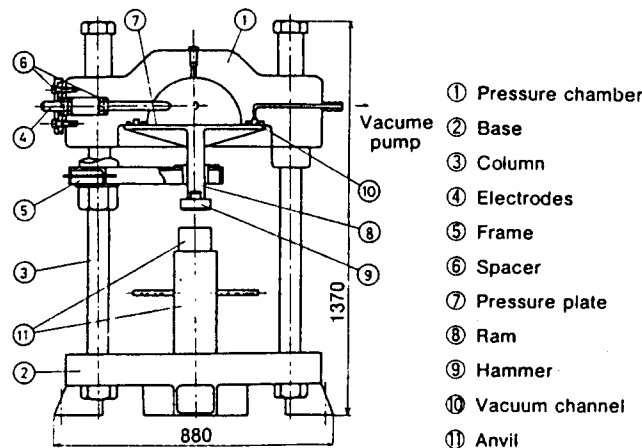
電磁成形の場合、磁界のもつエネルギーを効率よく利用するためには、相互誘導係数を大きくすれば良く、成形コイルと加工物の空間をできるだけ小さくする必要がある。また磁束の拡散を少なくするため、衝撃的磁界を与えるよう電気回路を設計することも重要な問題である。また放電成形の場合と同様に発生圧力はコンデンサの充電エネルギーや、回路定数、加工物の電気抵抗、成形コイルと加工物

間体積，などの放電条件に大きく影響をうけるが近似的には充電エネルギーに比例し，他の条件には反比例すると考えてよい⁷⁷⁾。さらに普通は，被加工物の特定の部分に電磁エネルギーを集中して，局部的変形を行わせ変形効率を上げるために磁束集中器が用いられている⁷⁸⁾。

5.3. 水中放電ハンマ，その他

水中放電成形法は，水中に設置された電極間に瞬間的に高電圧を印加して火花放電を起こし，このとき発生する衝撃的な高圧力を利用して金属の成形を行う加工法である。したがって被加工材を圧力媒体である液体と接触させなければならないので熱間あるいは亜熱間での加工は困難である。そこで水中で発生した機械的エネルギーを大気中に取り出し金属材料を成形するために開発された水中放電ハンマ⁷⁹⁾，⁸⁰⁾や電磁プレス⁸¹⁾がある。どちらも放電成形や電磁成形と同じ原理で衝撃波を発生させ，そのエネルギーによりハンマを高速で加速し，被加工物に変形エネルギーを与えるものである。

水中放電ハンマ装置の概略図を図6に示す。半球形状をした圧力室すなわち水槽部は4本のコラムにより支えられている。この圧力室の側面から挿入されている電極の中心は，ここから発生したエネルギーが圧力室壁面で反射し，受圧板に垂直に作用する位置に設計されているので，エネルギーはより有効に利用できる。衝撃高圧力をうける受圧板はラムと一体でラムの先端部にハンマは固定される。放電前には圧力室に設けられた真空溝内を真空にすることにより受圧板を圧力室に密着させハンマを上方に保持する。放電時には発生した衝撃高圧力により騒動部は



第6図 水中放電ハンマ

行われることを希望します。

参考文献

- 1) Wolf W., Ann. d. phys., 60 (1899), 329c.f.
- 2) Jahresberich d., C. T. R, III (1899), 84.
- 3) 波多野, 火兵学会誌, 27-4.5.6.
- 4) Jahresberich d., C. T. R, IV (1923), 224.
- 5) 清田, 熊本大学研究報告, 1-2 (1952), 1.
- 6) NPG Report, No.1307 (1954)
- 7) ibid., No.1307 (1954)
- 8) Jones, O. E., ほか2名, J. Appl. Phys., 33-11 (1962), 224.
- 9) Smith, S., Phys. Rev., (1954), 42.
- 10) Morri, W. J., ほか3名, Advances in High-Pressure Research, 4 (1947), 1, Academic Press.
- 11) Young, C., ほか2名, Shock Wave and the Mechanical Properties of Solids, (1971), 203, Syracuse Univ. Press.Syracuse Univ. Press.
- 12) 山田, 可児, 日本機械学会論文集 (A 編), 48-432 (昭57), 975.
- 13) 西村, 古川, 塑性と加工, 4-34 (1963), 755.
- 14) 前田, 塑性と加工, 1-34 (1960), 755.
- 15) Aircraft Production, Feb. (1960).
- 16) Cooley, R. A., Amer. Machinist, 15 (1959), 128.
- 17) Davis, J. L., Chemistry of Powder and Explosives, (1953), John Wiley & Sons Inc.
- 18) Nolnd, M. C. et al., High Velocity Metal Working, A Survey, NASA SP-5065.
- 19) Cole, R. H., Underwater Explosio, (1948), 241, Princeton Univ. Press.
- 20) Tardif, H. P., Metal Progress, 77-123 (1960).
- 21) Pearson, J., J. Metals, 12-673 (1960)
- 22) Duvall, G. E., ASTM E ST-60-161.
- 23) Carpenter, S.H. & Winttmann, R. H., The Theory and Application of Explosive Welding, Univ. of Denver.
- 24) Rinehart, J. S. & Pearson, J., Behavior of Metals under Impulsive Loads, (1965), 220, Dover Publication.
- 25) Cowan, G. K. & Holtzman, A. H., J. Appl. Phys., 34-4 (1963), 928.
- 26) Wylie, H. k, Williams, P. E. C. & Crossland, B., Proc. of 3rd Int. Conf. of the Center for High Energy Forming. Pt. 3. 1. (1971).
- 27) Bahrani, A. S. & Crossland, B., Proc. 1st Int. Conf. of the Center for High Energy Forming. vol. 1 (1967), 1. 1. 1.
- 28) Cowan, G. R. & Holtzman, A. H., J. Apply. Phys., 34-928 (1963).
- 29) 藤田, 清田, 高浜, 藤本, 片山, 塑性と加工, 15-156 (1974), 19.
- 30) 藤田, 八戸, 内藤, ibid., 18-201 (1977), 827.
- 31) Kirk, J. Sheet Metal Indust., 39-424 (1962), 533
- 32) 長岡, Sci. Papers of Inst. Phys. Chem. Rev., 8 (1928), 269.
- 33) Peters, C. G. & Emerson, W. B., R.N. B. S., 38 (1947), 449.
- 34) Harding, H. V. & Matutaifis, V.E., Amer.Machinist, Mar. 3 (1952), 136.
- 35) Parr, J. F., Tool Engng., 44 (1960), 81.
- 36) Wagner, H. J., ibid, 44 (1960), 83.
- 37) Cadwell, G. C., Metal Working, 106 (1962), 49.
- 38) 佐野, 向坂, 青木, 島津評論, 19 (1962), 11.
- 39) 奥島, 井上, 精密機械, 29-8 (1963), 491.
- 40) 大矢根, 真崎, 日本機械学会論文集 (第3部), 29-205 (1963), 1491.
- 41) 高エネルギー速度特集号, 精密機械, 31-7 (1967).
- 42) 奥島, 人見, 井上, 大森, ibid., 31-6 (1965), 470.
- 43) Komel' kov, Y. S., Sov. Phys. Tech. Phys., 6. 8 (1962), 691.
- 44) stel' nikv. I. S. & Ushakov, V. Ya., ibid., 10. 9 (1966), 1307.
- 45) Alkimov, a. P. et al., Sov. Phys. doklady, 15. 10 (1971), 959.
- 46) Chace, W. G. & Moore, H. K., Exploding Wire, 1. 2. 3, (1959), Plenum Press.
- 47) Skovortsov, Yu. V. et al., Sov. Phys. Tech. Phys. 5. 10 (1961), 1100.
- 48) 栖原, 北島, 福田, 塑性と加工, 8-77 (1967), 279.

- 49) 大矢根, 真崎, 日本機械学会論文集 (第3部), 29-205 (1963), 1491.
- 50) 大矢根, 真崎, *ibid.*, 30-217 (1964), 1028.
- 51) 清田, 日本機械学会誌, 68-559 (1965), 1114.
- 52) Hudson, G. E., *J. Appl. Phys.*, 22-1 (1951), 1.
- 53) 大矢根, 真崎, 日本機械学会論文集 (第3部), 33-251 (1967), 1163.
- 54) Wang, A. J. & Hopkings H. G., *J. Mech. phys. Solids*, 3 (1954), 22.
- 55) Wang, A. J., *J. appl. Mech.*, 21 (1955), 375.
- 56) Munday, G. & Newitt, D., *Phil. Trans. Roy. Sos. London*, 256-1065 (1963), 1.
- 57) 戸部, 加藤, 小原 日本機械学会論文集 (第3部), 44-382 (1978), 2166.
- 58) 戸部, 加藤, 小原, *ibid.*, 49-441 (1983), 859.
- 59) Hodge, P., G., *J. Mach. Phys. Solids*, 3 (1955), 176.
- 60) Hodge, P., G., *J. Appl. Mech.*, 23 (1956), 617.
- 61) 大矢根, 真崎, 日本機械学会論文集 (第3部), 32-237 (1966), 825.
- 62) 中沢, 谷治, 加賀, 塑性と加工, 21-232 (1980), 96.
- 63) 中沢, 谷治, 加賀, 機械技術研究所乃報, 34-3 (1980), 108.
- 64) Yamada, T., Kani, K. & Tabo, E., *Proc. Int. conf. Production Engng.*, (1974), 274.
- 65) Kegg, R. L., *Trans ASME Ser. B*, 86-2 (1964), 127.
- 66) Haeuslyer, J. & Mander Bleche Rohre, 9 Sep. (1968), 519.
- 67) 栖原, 北島, 福田, 塑性と加工, 9-88 (1968), 324.
- 68) 戸部, 加藤, 小原 日本機械学会論文集 (第3部), 44-380 (1987), 1397.
- 69) 戸部, 加藤, 小原, *ibid.*, 44-384 (1987), 2908.
- 70) Tobe, Kato & Ohara, *Inst. Phys. Bristol and London Conf.*, Ser. No47 (1979), 383.
- 71) 寺本, 清田, 塑性と加工, 11-119 (1970), 888.
- 72) 北条, *ibid.*, 3-20 (1962), 601.
- 73) Baines K., Duncan, J. L. & Johnson, W., *Proc. Inst. Mech. Engrs.* 180-pt. 1-4 (1965~1966), 93.
- 74) Al-Hassani, S. T. S., Duncan, J. L. & Johnson, W., *Int. Conf. Manufact. Technol.* (1967).
- 75) Al-Hassani, S. T. S., Duncan, J. L. & Johnson, W., *J. Mech Engng. Sci.*, 16-1 (1974), 1
- 76) 根岸, 村田, 鈴木, 前田, 塑性と加工, 21-234 (1980), 642.
- 77) 鈴木, 根岸, *ibid.*, 18-192 (1977), 16.
- 78) 鈴木, 根岸, *ibid.*, 14-152 (1973), 722.
- 79) 三木, 今井田, 中井, *ibid.*, 8-82 (1967), 603.
- 80) 今井田, 同志社大学理工学研究報告, 20-2 (1979), 46.
- 81) 樋口, 前田, 塑性と加工, 20-216 (1979), 37.
- 82) 元木, 藤田, 行村, 久須本, 電気加工学会誌, 5-9 (1971), 53.
- 83) 元木, 藤田, 村松, *ibid.*, 11-21 (1976), 20.
- 84) 山田, 可児, 塑性と加工, 18-192 (1977), 35.
- 85) 高松, 鈴木, 圧力技術, 19-1 (1981), 22.
- 86) 日本塑性加工学会編, 高エネルギー速度加工, 塑性加工技術シリーズ(6), コロナ社, (1993).
- 87) 林, 田中, 編著, 衝撃工学, 日刊工業新聞社, (1988)