チタン合金とアルミニウム合金の超高速衝突による 変形と材料特性の関係[†]

中 村 明* 松 本 祐 一* 柏 井 秀 明**
高 根 沢 吉 夫*** 間 山 利 勝** 小 出 憲 司****
北 川 喜 久****

Experimental Study on Crater Configurations by Hypervelocity Impact with Relation to their Material Properties of Titanium Alloys and Aluminum Alloys

by

Akira NAKAMURA*, Yuuichi MATSUMOTO*, Hideaki KASHII**
Yoshio TAKANEZAWA***, Toshikatsu MAYAMA**, Kenji KOIDE****
and Yoshihisa KITAGAWA****

Hypervelocity-impact experiments were performed on the titanium alloys and aluminum alloys to study relation between the crater configurations and the static material properties. The copper projectiles were accelerated by means of a two-stage light-gas gun at averagely 2000 m/sec, and were impacted on the zero oblique specimens. The crater configurations (crater depth, crater volume and mean crater diameter) were observed, and the relation to their static material properties (density, proof stress, elongation) were studied. As a result, several correlations between the deformation by the hypervelocity impact and the static material properties were found, as follows;

(1) The crater depth of the both materials was dependent on their density and proof stress, and was expressed by the next equation.

$$\lambda = 37.8 \rho_t^{-0.671} \sigma_{0.2}^{-0.175}$$

(2) The crater volume of the both materials decreased with an increase of the product of proof stress by elongation.

(3) The aspect ratio of the crater of the both materials decreased with an increase of proof stress.

(4) The crater configurations of the titanium alloys were different from these of the aluminum alloys. Decreasing the product of proof stress by elongation resulted in the increase of the mean crater diameter of the titanium alloys, whereas for the aluminum alloys, it resulted in the increase of the crater depth and the mean crater diameter, particularly the crater depth.

Key words : Hypervelocity impact, Crater, Titanium alloy, Aluminum alloy, Material property, Two-stage light-gas gun

1 緒 言

固体同士の高速衝突では、数 μsec 以下の極短時間の現象であるが、物質の弾性限界をはるかに超える超高压状態を実現することができる。このような現象が生じる実際の問題として、航空機や宇宙飛行体等の高速飛行物体と隕石や宇宙塵との衝突、地表面に落下

してくる隕石と地表物との衝突、原子力容器内の爆発に伴う容器の損傷、または高速で回転するタービンの破損によるタービンケーシングの損傷等が挙げられる。実験的にこのような超高压状態を実現させる手段として、さまざまな方法が実施され解析されている¹⁾。

超高速衝突下における金属同士の衝突問題として例

[†] 原稿受理 平成元年7月17日 Received July 17, 1989

* 正 会 員 防衛庁技術研究本部第1研究所 東京都目黒区中目黒, 1st Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defence Agency, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

** 防衛庁技術研究本部第1研究所 東京都目黒区中目黒, 1st Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defence Agency, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

*** 防衛庁技術研究本部第4研究所 相模原市淵野辺, 4th Research Center, Technical Research and Development Institute, Japan Defence Agency, Fuchinobe, Sagami-hara

**** (株)神戸製鋼所技術開発本部 神戸市西区高塚台, Technical Development & Testing Center, Kobe Steel Co., Ltd., Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe

えば, J. L. Summers²⁾, R. J. Eichelburger & J. W. Gehring³⁾らが飛翔体と試料の材質, 衝突速度を変化させ, 飛翔体の衝突時における運動エネルギーと試料のクレータ容積との関係, クレータ深さと衝突速度との関係について調べている。また, 試料のクレータ深さとクレータ容積を飛翔体の密度や試料の密度, 硬さ, 降伏応力と関連づけ, 実験式や半実験式が幅広く求められている。⁴⁾⁻⁶⁾

本報告では軽量合金であるチタン合金とアルミニウム合金のクレータ形状に及ぼす材料特性の影響を詳しく調べるために, 銅製の円柱状飛翔体を二段式軽ガス銃を用いて, 約 2000 m/sec の一定の衝突速度で垂直衝突させ, 試料のクレータ形状(クレータ深さ, クレータ容積, 平均クレータ口径等)を観察し, 静的な材料特性(密度, 耐力, 伸び)との関連性を定性的および定量的に検討した。

2. 実験方法

試料はチタン合金(純チタン, Ti-6Al-4V, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, Ti-15Mo-5Zr-3Alそれぞれの元素の前の数字は重量%)およびアルミニウム合金(300 MPa 級 (Al-4.8Mg-0.6Mn), 400 MPa 級 (Al-4.6Zn-1.5Mg-0.5Mn), 500 MPa 級 (Al-5.2Zn-1.7Mg-0.3Mn), 600 MPa 級 (Al-5.6Zn-2.6Mg)そ

Fig. 1. Schematic illustration of the specimen and the specimen holder.

Fig. 2. Projectile.

れぞれの引張強さで呼称)で, その形状と支持法を Fig. 1 に, 材料特性と形状寸法を Table I に示す。試料の形状は Fig. 1 に示すように, 一辺が W の正方面, 厚さ t_1 の直方体を数個重ねたもので, 支持台にクランプで固定される。飛翔体は W - W 面に垂直に衝突する。

つぎに銅製の飛翔体を Fig. 2 に示す。飛翔体は二段式軽ガス銃で発射される際, 発射管の磨耗を防ぐ意味から外側を高密度ポリエチレン製のサボに覆われて発射管に組み込まれる。材質は銅(99 wt%)で直径 10 mm, 長さ 40 mm, 質量は 26.7 g である。なお, 飛翔体の衝突速度を電磁誘導法で計測するため, 前方に直径 6 mm, 厚さ 3 mm の磁石を埋め込んだ。

Fig. 3 に実験に用いた二段式軽ガス銃を示す。装置は大きく分けて薬室, 圧縮管, 高压室, 発射管および試料室から構成される。全長約 12 m, 発射管内径は 20 mm である。推進原理は火薬室で火薬を爆発させ, そのエネルギーでポリエチレン製のピストンが圧縮管内をヘリウムガスを圧縮しながら飛翔し, その高压ガスによって飛翔体が加速されて発射管内を直進するしくみである。このようにして発射された飛翔体は分離板でサボと分離し, 飛翔体のみが飛翔する。飛翔体が検速コイルを通過するとき, 飛翔体の前方についている磁石で電極誘導作用を生じ, その信号をオシロスコープに入力して衝突速度を計測する。飛翔体は検速コイルを通過した後, 試料に衝突する。

衝突後, 試料を試料室から取り出し, クレータ部の

Table I. Material properties and size of the specimen.

Specimen	Plot symbol	ρ_t (g/cm ³)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	δ (%)	HB	Size of specimen W mm $\times$ t mm ($t_1 \times n$)	Number of specimen
Pure Ti (KS50)	○	4.50	240	376	59.0	132	100 $\times$ 80(40 $\times$ 2)	1
Ti-6Al-4V	●	4.43	917	985	18.0	308	150 $\times$ 120(40 $\times$ 3)	3
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	◐	4.70	1165	1260	11.0	393	"	2
Ti-15Mo-5Zr-3Al	●	5.03	1278	1303	1.4	407	"	2
Al (300 MPa class) (a)	■	2.66	146	287	29.0	71	100 $\times$ 150(50 $\times$ 3)	1
" (b)	■	"	172	306	27.6	77	150 $\times$ 150(25 $\times$ 6)	2
Al (400 MPa class) (a)	■	2.78	356	410	16.0	119	100 $\times$ 135(45 $\times$ 3)	1
" (b)	■	"	387	435	16.1	124	150 $\times$ 125(25 $\times$ 5)	3
Al (500 MPa class) (a)	■	2.79	444	502	12.0	134	100 $\times$ 150(30 $\times$ 5)	1
" (b)	■	"	"	"	"	"	100 $\times$ 120(30 $\times$ 4)	2
Al (600 MPa class) (a)	□	2.80	455	545	"	155	100 $\times$ 160(80 $\times$ 2)	1
" (b)	■	"	534	589	13.5	167	150 $\times$ 125(25 $\times$ 5)	3

Fig. 3. Schematic diagram of the two-stage light-gas gun.

Fig. 4. Measurement method of the crater configuration.

所で飛翔体の侵入方向に2つに切断する。その切断面より、クレータ深さ λ (cm)、クレータ容積 V_c (cm^3)、および平均クレータ口径 D_m (cm)を求める。飛翔体の試料に対する垂直度はフラッシュX線、またはクレータの断面形状より測定する。Fig. 4にクレータ形状の計測法を示す。クレータ容積はクレータ断面を飛翔体の侵入方向に H_i ずつ等分割し、おのおのの径 D_i を計測して、それぞれの円盤の容積を算出し、その総和とした。それを式(1)に示す。

$$V_c = \sum \pi D_i^2 H_i / 4 \quad (1)$$

本実験では H_i を1mmとして計算した。

平均クレータ口径 D_m は、クレータ容積 V_c とクレータ深さ λ より、式(2)で表わされる。

$$D_m = \sqrt{4V_c / (\pi\lambda)} \quad (2)$$

3 実験結果

本実験で計測された衝突速度は2000~2079 m/secで、その平均値は2031 m/sec、標準偏差は20 m/secとなった。これより衝突速度はほぼ一定と見なし、衝突速度の差による影響を無視できるとした。また、試料の法線に対する飛翔体の入射角度の最大値は2.7°で、平均値は0.9°だった。以下に述べる考察の各図にあるプロット記号が示す試料はTable Iに示すとおりである。

3.1 衝突による衝撃波で発生する応力の計算

超高速衝突下における物質の状態を推定するためにインピーダンスマッチング法を用いて応力と密度を計算した。これは一次元圧縮を考えた場合、物質を通過する衝撃波の境界面における性質を利用して、衝撃状態を決定する方法である。Table IIに本実験の条件下におけるチタン合金とアルミニウム合金の衝撃圧縮下の応力と密度比の平均値を示す。応力はチタン合金で約35.6 GPa、アルミニウム合金で約27.8 GPaとな

Table II. The mean values of stress and density ratio for the titanium alloys and aluminum alloys under shock compression.

($V_{imp} = 2.031$ km/sec, copper projectile)

Specimen	Stress σ (GPa)	Density ratio ρ' / ρ_t
Titanium alloys	35.6	1.26
Aluminum alloys	27.8	1.24

り、材料の耐力を超えている。衝撃圧縮時の密度と初期密度の比はチタン合金で約1.26倍、アルミニウム合金では約1.24倍となった。これらの値を決定するのに使用した銅、チタンおよびアルミニウムのユゴニオは文献(8)、(9)を引用した。

3.2 クレータ深さと材料特性の関係

クレータ容積が飛翔体の衝突速度に比例し、クレータの形状を半球状と仮定すれば、クレータ深さ λ は一般に次のように与えられる。

$$\lambda / d = k(\rho_p / \rho_t)^{1/3} (\rho_p v^2 / B)^{1/3} \quad (3)$$

ここで d は飛翔体の直径、 k は定数、 ρ_p と ρ_t はそれぞれ飛翔体と試料の密度、 v は飛翔体の衝突速度、 B は試料の硬さである。HermannとJonesは k を0.36としている。本実験の場合、クレータ容積は半球状とはならないので、式(3)はそのままでは適用できず、データを式(3)に代入し、重回帰分析で定数 k と指数を求めると次式のようにになった。

$$\lambda / d = 1.38(\rho_p / \rho_t)^{0.671} (\rho_p v^2 / \sigma_{0.2})^{0.175} \quad (4)$$

式(4)において式(3)の硬さ B を耐力 $\sigma_{0.2}$ に置き換えた。本実験の条件下において、式(4)はFig. 5に示すようにチタン合金とアルミニウム合金のクレータ深さに対して統一的に説明できる。本実験では d は1cmなので λ / d は λ に等価できる。また、飛翔体の密度が8.93 g/cm³、衝突速度の平均値が2031 m/secなので、それらを一定とみなすと式(4)は式(5)のように

Fig. 5. Comparison of data of λ / d with equation (4).

Fig. 6. Relation between the crater depth and material properties.

なる.

$$\lambda = 37.8 \rho_t^{-0.671} \sigma_{0.2}^{-0.175} \quad (5)$$

式(5)において, 単位は密度が g/cm^3 , 耐力は MPa である. 式(5)よりクレータ深さは試料の密度と耐力がそれぞれ増加すると減少する. クレータ深さに及ぼす試料の密度と耐力の影響度を調べるために式(5)を標準化すると, 式(6)のようになる.

$$\lambda^* = \rho_t^{*-0.646} \sigma_{0.2}^{*-0.436} \quad (6)$$

ここで * 印は標準化したという意味である. 式(6)より, チタン合金とアルミニウム合金の間では耐力よりも密度がクレータ深さに及ぼす影響が大きいことがわかる. このことは Fig. 5 より, 密度の大きいチタン合金と密度の小さいアルミニウム合金がはっきりと二つのグループに別れていることからでも明らかである.

Fig. 6 にチタン合金とアルミニウム合金のクレータ深さと材料特性(耐力, 伸び)の関係を示す. チタン合金, アルミニウム合金とも耐力が増加するにつれてクレータ深さは減少する傾向を示すが, アルミニウム合金の方がその傾きは大きく, チタン合金は β 形高強度チタン合金である Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al および Ti-15Mo-5Zr-3Al でやや緩和する傾向を示す. クレータ深さと伸びの関係ではチタン合金, アルミニウム合金とも伸びが増加するにつれてクレータ深さは増加するが, チタン合金はアルミニウム合金に比べてその傾きはゆるやかである. クレータ深さに関しては, アルミニウム合金の方がチタン合金よりも耐力と伸びに対して大きな依存性を示した.

3.3 クレータ容積と材料特性の関係

Fig. 7 にクレータ容積と材料特性(耐力, 伸び, 耐

Fig. 7. Relation between the crater volume and the material properties.

力×伸び)の関係を示す. クレータ容積と耐力の関係では, アルミニウム合金は耐力が増加するにつれてクレータ容積は減少する傾向を示しているが, 逆にチタン合金では Ti-6Al-4V から β 形高強度チタン合金である Ti-15Mo-5Zr-3Al にかけて, クレータ容積は増加する傾向を示している. 伸びに関しては, アルミニウム合金は伸びが増加するにつれてクレータ容積は増加する傾向を示すが, チタン合金は逆に減少する傾向を示している. 耐力×伸びに関しては, チタン合金とアルミニウム合金はともに耐力×伸びが増加するにつれてクレータ容積は減少する傾向を示している. チタン合金に比較してアルミニウム合金の方が傾きが大きく, 耐力×伸びの依拠性が大きい. これらの関係よりクレータ容積は耐力と伸びをそれぞれ独立でみるよりは, その積でみた方がチタン合金とアルミニウム合金に関して同様な傾向として説明できる. つまり, 耐力×伸びが増加すると両者のクレータ容積は減少する.

*1 説明変量(この場合, 密度と耐力)の平均を 0, 分散を 1 にすること.

Fig. 8. Relation between the ratio of mean crater diameter to the projectile diameter and the material properties.

3・4 平均クレータ口径-飛翔体径比 D_m/d と材料特性の関係

Fig. 8 にチタン合金とアルミニウム合金の D_m/d と材料特性（耐力、伸び、耐力×伸び）の関係を示す。耐力についてみると、アルミニウム合金では、耐力が増加するにつれて D_m/d はやや減少する傾向を示すが、チタン合金では逆に増加していく。特に Ti-6Al-4V から β 形高強度チタン合金にかけて著しい。伸びに関しては、耐力と逆の傾向を示し、アルミニウム合金では伸びが増加するにつれて D_m/d はやや増加する傾向を示すが、チタン合金では伸びが増加するにつれて D_m/d は減少する傾向を示している。耐力×伸びに関しては、チタン合金、アルミニウム合金とも、耐力×伸びが増加するにつれて D_m/d は減少する傾向を示している。

3・5 クレータ深さ-平均クレータ口径比 λ/D_m と材料特性の関係

Fig. 9 にチタン合金とアルミニウム合金のそれぞれ

Fig. 9. Relation between the ratio of crater depth to the mean crater diameter and the material properties.

の λ/D_m と材料特性の関係を示す。耐力についてみるとチタン合金、アルミニウム合金とも耐力が増加するにつれて λ/D_m は減少する傾向を示し、ほぼ同一直線上に乗る。伸びについてみるとチタン合金、アルミニウム合金とも伸びが増加するにつれて λ/D_m は増加する傾向を示す。耐力×伸びに関しては、チタン合金は耐力×伸びが増加するにつれて λ/D_m は増加する傾向を示すが、アルミニウム合金は逆に耐力×伸びが増加するにつれて λ/D_m は減少する傾向を示す。

3・6 クレータ断面形状

Fig. 10 にチタン合金とアルミニウム合金の代表的なクレータ断面形状を示す。チタン合金のクレータ断面形状は最密六方晶である α 形の純チタン→最密六方晶と体心立方晶の2相合金である $\alpha+\beta$ 形の Ti-6Al-4V→体心立方晶の準安定相 β 形の Ti-15Mo-5Zr-3Al へと結晶構造が変化するに伴い変化していく。純チタンはどちらかと言えばアルミニウム合金とよく似たクレータ断面形状をしている。 β 相の高強度チタン合金のクレータ断面形状は飛翔体が試料へ衝突した初期の段階においてクレータ口径が大きく、その後その大きさは急速に減少していく。また、クレータの底から中程にかけてき裂が走っており、伸びの小さ

Fig. 10. Cross section of the crater configuration of the specimens.

いことによるぜい性的性質を示している。 $\alpha+\beta$ 形のTi-6Al-4Vは純チタンとTi-15Mo-5Zr-3Alの中間的なクレータ断面形状を呈している。

一方、アルミニウム合金は材料特性が変化してもほぼ一定のクレータ断面形状を呈し、クレータ深さの中央部で最大の口径を有し、全体的になだらかな瓜型をしている。600 MPa級アルミニウム合金はややぜい性的な破面を見せている。アルミニウム合金の場合、面心立方晶のみで、また材料特性間のばらつきがチタン合金ほど大きくないために、クレータ断面形状が一定していると考えられる。

4 考 察

3・2～3・5節において各種クレータ形状と材料特性の関係について述べたが、ここでは材料特性の持つ意味を考慮して考察を行なう。

4・1 グレータ形状に及ぼす密度の影響

密度は材料の構造に不敏感性な材料特性なので、同一母材の材料では耐力や伸びのようにその値を大きく変えることは容易でない。したがって、同一母材間のクレータ形状に対する説明因子としては効果が少ない。しかし、チタン合金とアルミニウム合金のように密度の値がかなり異なる材料間の評価としては、その効果

は大きくなる。今回の条件下でクレータ深さ λ に対して密度が大きな影響を与えた。

4・2 クレータ形状に及ぼす耐力の影響

Table Iに示した材料特性のうち耐力、引張強さ、および硬さの間にはそれぞれよい線形関係が存在し、耐力とブリネル硬さの相関係数 r は、チタン合金が $r=0.998$ 、アルミニウム合金で $r=0.987$ となり、耐力と引張強さにおいてはチタン合金で $r=0.998$ 、アルミニウム合金では $r=0.982$ となる。このように耐力と引張強さ、および硬さの間には非常に密接な関係があるので、本報告では耐力を引張強さ、または硬さに置き換えてもその傾向はほとんど同じになると考えることができる。本実験の場合、変形とは飛翔体が試料に衝突し、侵入方向に進むときに生じる侵入方向の変形でクレータ深さに相当し、耐力はその変形を押しとどめようとする抵抗の尺度とみなすことができる。Fig. 6(a)はそのことを示しており、耐力が大きいほどクレータ深さが小さくなり、材料の飛翔体の侵入方向に対する抵抗として説明できる。

一方、Fig. 7(a)よりクレータ容積に対しては必ずしも耐力が大きいほどクレータ容積は小さくならない。チタン合金では逆にクレータ容積が大きくなっていく。

また Fig. 8 (a) より耐力は、ある大きさまでクレータ口径の変形に対する抵抗として説明できるが、ある値を越えると適用できなくなる。これらのことより耐力はクレータ口径に対する変形抵抗の尺度とはなりにくいと考えられる。

Fig. 9 (a) の λ/D_m については耐力とよい線形関係にある。チタン合金に対しては耐力が増加すると λ/D_m が減少することは上述の複合効果より直ちに理解できるが、アルミニウム合金においても λ/D_m が減少する傾向を示すのは耐力が増加するにつれて λ が減少する割合が D_m のそれよりも大きいためである。

4・3 クレータ形状に及ぼす伸びの影響

試料の伸びは耐力と対照的で、各クレータ形状の傾向は伸びと耐力ではそれぞれ逆の傾向を示す。Fig. 6 (b) よりクレータ深さに関しては Fig. 6 (a) とほぼ鏡像的な関係にある。このことより伸びは耐力と逆の関係にあり、伸びが大きいほど飛翔体の侵入方向に対する試料の抵抗が小さくなる。Fig. 7 (b) と Fig. 8 (b) よりクレータ容積と D_m/d はクレータ深さほどではないが、だいたい耐力についてみた Fig. 7 (a) と Fig. 8 (a) にそれぞれ逆の傾向を示す。Fig. 9 (b) の λ/D_m ではチタン合金とアルミニウム合金のそれぞれについては Fig. 9 (a) とほぼ鏡像の関係にあるがチタン合金とアルミニウム合金は同一直線上には乗らなくなる。以上のように伸びはだいたいにおいて耐力と逆の傾向を示し、各クレータ形状の耐力に対する傾向から伸びに対する傾向を推測することができる。

4・4 クレータ形状に及ぼす耐力×伸びの影響

耐力×伸びはその次元より材料の単位体積当たりの変形エネルギー吸収能と考えることができる。これを最もよく説明しているのは Fig. 7 (c) である。チタン合金、アルミニウム合金とも耐力×伸びが大きくなるにつれておのおののクレータ容積は小さくなっていく。この場合、チタン合金の方がアルミニウム合金よりも同じ耐力×伸びの値に対するクレータ容積の値が大きい。これはチタン合金の衝撃インピーダンスがアルミニウム合金のそれよりも大きいため、衝撃圧縮下における応力は Table II に示すようにチタン合金の方がアルミニウム合金よりも大きくなり、その結果、チタン合金のクレータ容積はアルミニウム合金のそれよりも大きくなったと考えられる。

Fig. 8 (c) の D_m/d に対しても耐力×伸びは適用できる。この場合もチタン合金の方がアルミニウム合金よりも同じ耐力×伸びの値に対する D_m/d の値が大きくなっている。Fig. 9 (c) ではチタン合金とアルミニウム合金では逆の傾向を示している。以上の事項よりチタン合金では耐力×伸びが小さくなるにつれてクレータ口径を大きくすることによって衝突エネルギーを吸

収するが、アルミニウム合金ではクレータ深さとクレータ口径を大きくすることによって衝突エネルギーを吸収していく。ただ、アルミニウム合金はクレータ口径よりもクレータ深さが大きくなっていく傾向が強い。

5 結 言

2000 m/sec 付近の超高速衝突により生じるチタン合金とアルミニウム合金のクレータ形状に及ぼす材料特性の影響を検討した結果以下の事柄が明らかとなった。

(1) 両合金のクレータ深さは密度と耐力に依存し、次式で表わされる。

$$\lambda = 37.8 \rho_t^{-0.671} \sigma_{0.2}^{-0.175}$$

(2) 両合金のクレータ容積は耐力×伸びが増加するにつれて減少していく。

(3) 両合金のクレータの縦横比は耐力が増加するにつれて減少していく。

(4) クレータ形状の特性はチタン合金とアルミニウム合金では異なり、耐力×伸びが減少するにしたがい前者は平均クレータ口径が大きくなり、後者では平均クレータ口径とクレータ深さ、特にクレータ深さが大きくなっていく傾向を示す。

今後、材料の微細構造、結晶構造等の微視的な側面からの検討が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) 庄野安彦, 真下 茂, “衝撃工学”, 第 8 章 (1988) 編者 林 卓夫, 田中吉之助, 日刊工業新聞社
- 2) J. L. Summers, NASA TN D-94 (1959).
- 3) R. J. Eichelburger and J. W. Gehring, ARS-J, **32**, 1583 (1962).
- 4) W. Herrmann and A. H. Jones, ASD-TDR-63-140, 236 (1963).
- 5) W. Herrmann and J. Wilbeck, Sand-86-1884C (1986).
- 6) R. T. Sedgwick, L. J. Hageman, R. G. Herrmann and J. L. Waddell, Int. J. Engng. Sci., **16**, 859 (1978).
- 7) M. H. Rice, R. G. McQueen and J. M. Walsh, “Solid State Physics”, Vol. 6, p. 1-63 (1958) edited by F. Seitz and D. Turnbull, Academic Press Inc, New York
- 8) R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz and W. J. Carter, “The Equation of State of Solid from Shock Wave Studies in High Velocity Impact Phenomena”, p. 293 (1970) edited by R. Kinslow, Academic, New York
- 9) W. J. Carter, S. P. Marsh, J. N. Fritz and R. G. McQueen, “The Equation of State of Selected” Materials for High-Pressure References, in Accurate Characterization of the High-Pressure Environment”, p. 147 (1971) edited by E. C. Lloyd, US Nat. Bur. Stand. Sp. Publ
- 10) D. R. Christman and J. W. Gehring, TR-65-50 (1965).