

# 高速強変形による転位機構によらない塑性変形の研究

広島工業大学 電子工学科  
教授 桐谷道雄  
(平成8年度研究開発助成 AF-96010)

キーワード：超高速塑性変形、変形機構、点欠陥集合体

## 1. 研究の目的と背景

金属・合金の塑性変形は一般に転位の発生・移動によって進行し、点欠陥の発生は転位間の反応による副次的なものとして受け取られてきた。ところが数年前に、条件を整え高速( $>10^5/s$ )強変形( $\sim 10\%$ )を行うと、多種の金属・合金に今までに経験したことのない高濃度の原子空孔集合体が発生し、かたや転位の発生が全く観察されないことが、本研究により発見されたことが、この研究の発端である。点欠陥の大量発生と共に強度の延性変形を行い得ることを示しており、従来考えられてきたとは全く異なる塑性変形機構が存在することを示唆していた。本研究においては、長年の転位および点欠陥の多岐にわたる反応の研究の経験を生かして、上記の未だかつて経験したことのない現象の機構を明らかにすることを第一の目的とした。

上記の原子空孔集合体の大量発生は薄膜試験片を破断に至るまで変形した場合に起こるものであるが、バルク試料の高速変形を可能とし、類似の現象の存在を見いだすことが本研究の第二の目的とした。本助成金により衝撃変形装置の雛形を製作し、可能性を模索することとした。

本研究の申請・交付決定時には小さな実験室単位での研究を計画していたが、本研究による予備実験の結果を土台として平成9年度に広島工業大学大学院工学研究科から本研究者を代表者として文部省に提案した学術フロンティア研究構想「超高速塑性加工における変形機構の研究と新加工技術の開発」が採択され、現在は5カ年計画で学外・国外の共同研究センターとして組織的な研究が進展しつつある。これらについては、本研究のその後の展開ということになるが、それも部分的に含めて報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 薄膜試料の破断実験

薄膜試料の破断変形は、本研究者が長年行ってきた多種の材料研究に用いたあらゆる装置よりも簡単・単純・安価なものである。パンチの先に短冊形試料(0.05mm $\times$ 3mm $\times$ 10mm)の両端を接着し、パンチを急激に開くことにより破断する。試料は局所的に変形し、試料内部より引き出されて極めて薄くなった部分が最終的に破断する。破断寸前の先端部分の歪み速度は $10^6/s$ にも達する。

比較のために行った低速変形のほうがやや複雑な装置を必要とした。駆動モーターの回転数を何段階にも減速し、引っ張り試験チャックの移動速度を1mm/10days程度にすることにより、破断先端部の歪速度 $\sim 1/s$ を得た。

### 2.2 衝撃変形予備実験

図1に示したように、内径25mm長さ約2メートルの円筒を垂直に立て重錘を自然落下させ、底部の台座上の試料を衝撃圧縮変形する装置を試作した。重錘落下高さ(重錘速度)と、重錘反跳高さの関係、試料変形度との関係、など基礎的なデータがこの装置を用いて得られた。

0.1mm程度の薄い試料を用いて得られた最高の歪速度は $10^4/s$ 程度であり、薄膜試料の破断時に相当する歪速度は得られなかった。

### 2.3 高速衝撃変形実験

上記の予備実験を基に、高速衝撃圧縮変形装置を設

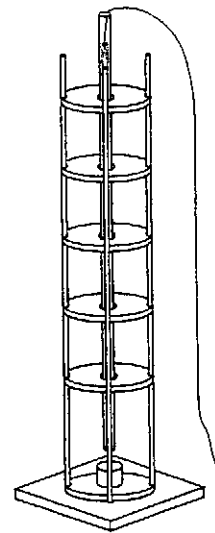


図1 簡易型衝撃圧縮装置

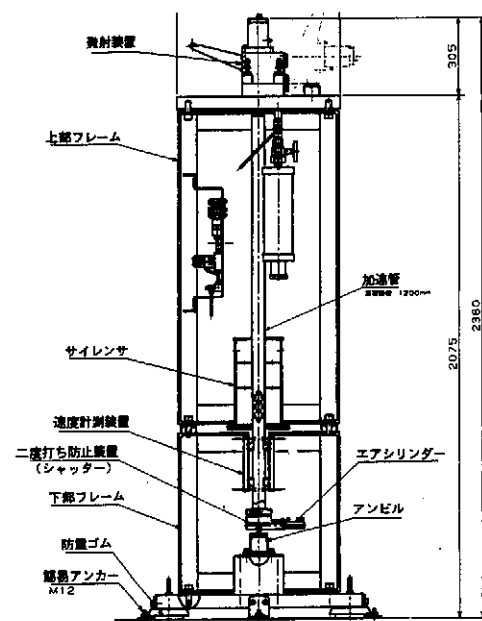


図2 高速衝撃圧縮装置

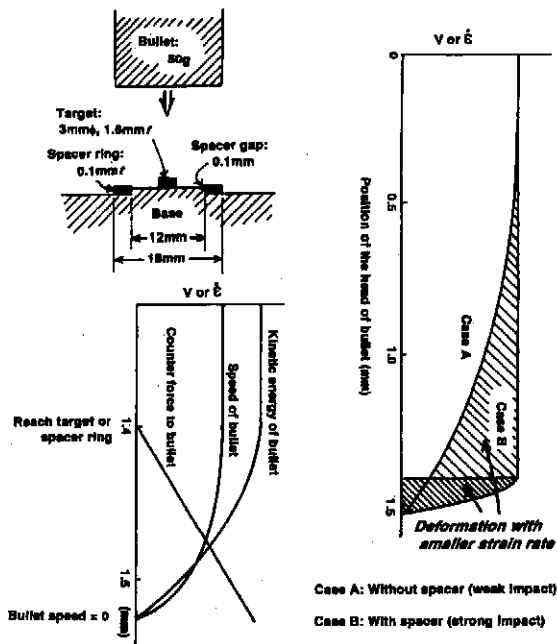


図3 衝撃圧縮変形中の歪速度の変化

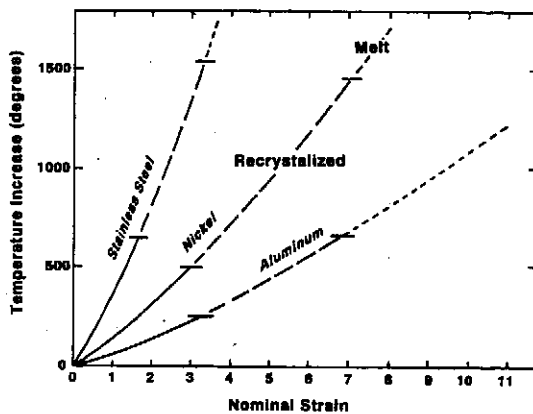


図4 高速塑性変形による試料温度上昇の評価

計製作した。図2に示したごとく、圧搾空気で重錘を発射する方式である。加速管は長さ約 2 m、発射先端部に 20 cm 間隔で 2 個の光センサーを設けタイムフライト方式で重錘速度を計測できる。

圧搾空気圧力 (最大 10 kg/cm<sup>2</sup>)、圧搾空気容積 (最大 7 l)、重錘質量 (最大 200 g)、等を加減することにより最大衝撃速度 150 m/s (時速 540 km) を得ることができる。これにより、試料厚さを 0.1mm 程度とした場合、歪み速度 10<sup>6</sup>/s が達成できる。

#### 2・4 高速変形実験における留意点

上記の高速変形実験において、配慮すべき点が二つある。その一つ目は混入する低速変形についてであり、その二つ目は変形による温度上昇である。

図3に示したごとく、試料のみにて重錘の衝撃を受け止めた場合、変形速度は変形中継続して低下し、変形速度の小さい部分が大きく混入する。そこで、試料が高

速で変形中にストッパーを設け重錘を受け止め反跳させることにより (重錘とストッパーの弾性変形中での低速変形は混入するものの) 高速のみでの変形を実現できる。

試料を塑性変形するために費やされたエネルギーは (構造変化として蓄えられる部分は極僅か) 殆どが熱エネルギーとなり瞬時に試料を加熱する。図4は数種の材料の加熱の程度を評価したものであり、変形量が大い場合には、試料は容易に再結晶し、極端な場合には融解する。実際に低い融点の金属 (Al, Zn, 等) では強加工すると融解し、やや融点の高い金属 (Cu, Ni 等) でも加工組織が観察されず再結晶している場合をしばしば経験する。高速変形組織を保存するためには、変形速度は高く保ちながら変形量を制限する必要がある。

### 3. 実験結果

#### 3・1 薄膜試料の破断変形と原子空孔集合体の量発生

##### (a) 薄膜試料の破断の形態

薄膜試料を引っ張り変形した場合、図5に模式的に示したごとく、局部的に変形が進行し試料内部から引き出された極薄膜が最終的には破断する。この極薄膜部分に高濃度の原子空孔集合体が発生する。図6は薄膜試料の破断の様子を電子顕微鏡内変形で直接観察したものである。

##### (b) 原子空孔集合体の大量発生

実験を行った全ての面心立方金属 (Al, Au, Cu, Ni, SUS) において、薄膜化した破断先端部には大量の原子

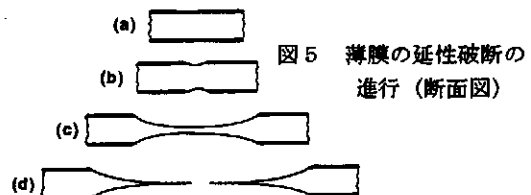


図5 薄膜の延性破断の進行 (断面図)

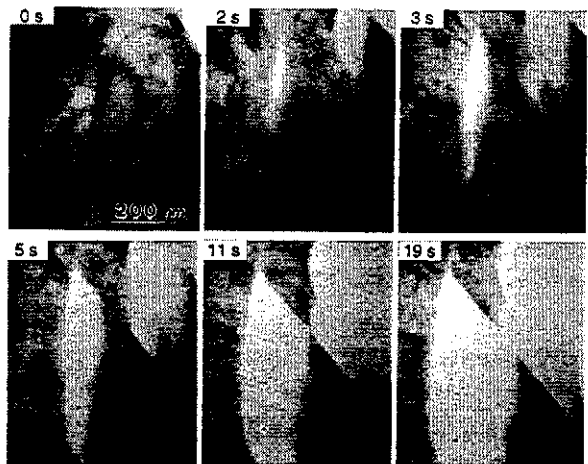


図6 電子顕微鏡内で観察した金薄膜の破断の最終段階

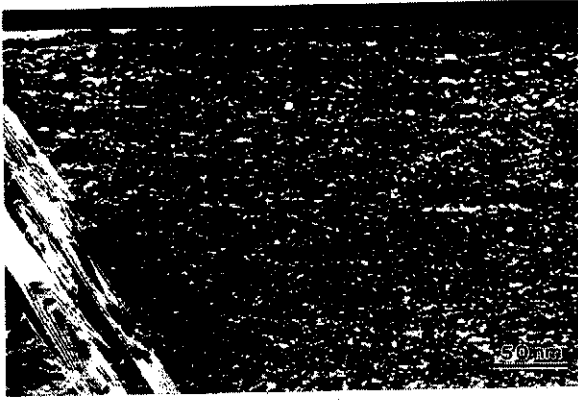


図7 銅の破断先端部に発生した大量の原子空孔集合体

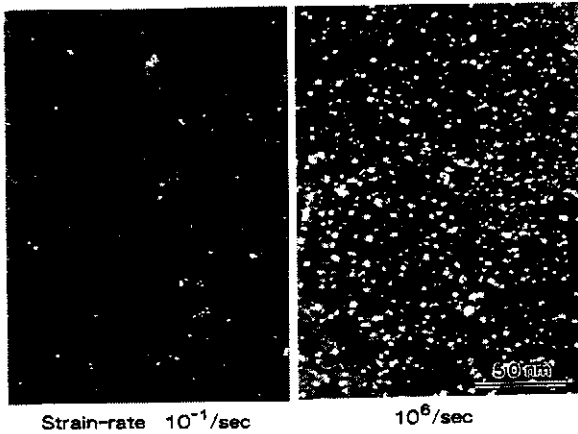


図8 原子空孔集合体発生の歪速度依存. 試料は金

空孔集合体の発生が見られた。集合体の形態は全てが積層欠陥四面体であった。図7はその代表例である。

ここで特記すべきは、原子空孔が大量に発生している領域には、転位はもとより転位が活動した痕跡も見られないことである。

#### (c) 歪速度依存

試料全体の歪み速度を 1mm/10days にまで落として、破断寸前の歪み速度を 1/s にした場合、図8に示したごとく、原子空孔集合体の発生は極度に少なくなる。

歪み速度が小さいと点欠陥の発生速度が小さくなり点欠陥が蓄積されお互いに集合する以前に試料表面に消滅することを示している。

#### (d) 温度依存

破断歪みを原子空孔が熱活性化で移動しない低い温度 (Ni の場合 200°C 以下) で行くと、図9に見られるように発達した集合体は観察されない。しかし原子空孔が移動する温度で焼鈍すると、原子空孔集合体が顕在化する。

これは、点欠陥集合体が塑性変形により直接発生するのではなく、分散した点欠陥がまず発生しこれらが集合して集合体を形成していることを示している。

#### (e) 特記すべきアルミニウムの場合

アルミニウムにおける積層欠陥四面体の発生 (図

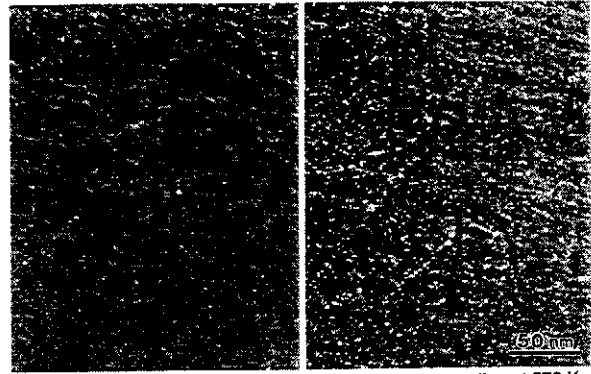


図9 原子空孔集合体発生の温度依存. 試料は Ni.  
低い温度では発生せず、変形後の昇温で顕在化する。

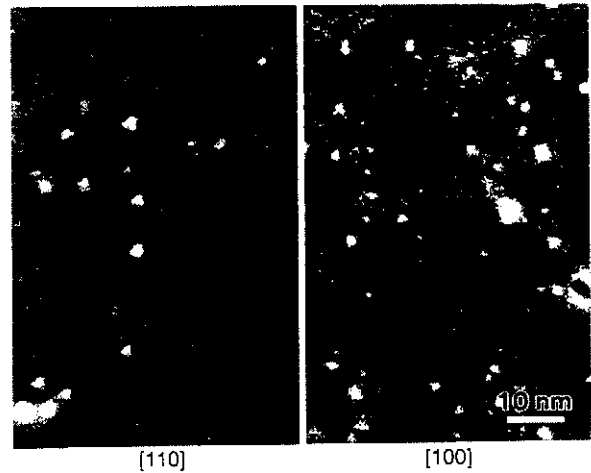


図10 変形によりアルミニウムに発生した積層欠陥四面体

10) は特記すべきである。なぜならば、この材料では高温からの急冷、各種高エネルギー粒子による照射、通常の塑性変形、等によりこの形状の欠陥が発生した例は全くない。

破断変形の場合の点欠陥の発生が極度に多いことを示している。

#### 3・2 バルク試料の高速変形による転位組織

バルク試料の高速変形実験は本研究助成の範囲のみで行ったものではないので、簡単に記述する。衝撃圧縮変形は 2・3 に説明した衝撃変形装置で行ったが、2・4 に述べた留意点を十分に考慮して行ったものである。

#### (a) 高速変形により導入される転位組織の特徴

高速変形 (歪速度  $10^6/s$  以上) の特徴は通常の低速変形と比較して初めて明らかになる。低速圧縮変形は油圧ジャッキ (最高 1.5 ton) を用いて行い、歪速度は大略  $10^{-2}/s$  程度であった。

図11の二つの例は、高速変形と低速変形で導入された転位構造を比較したものである。低速変形では転位のセル構造が発達しているが、高速変形ではほぼ一様な

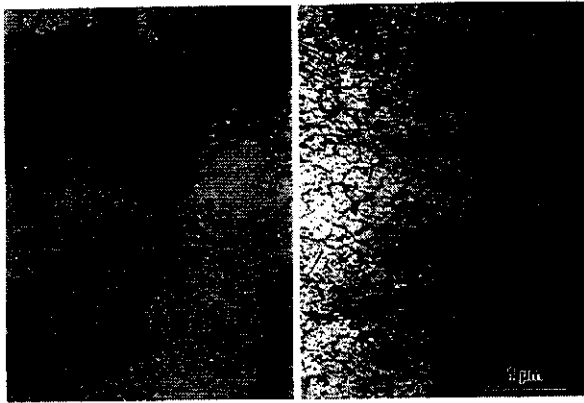


図 1.1 塑性変形によって導入された転位構造の比較。低速変形（左：歪速度  $10^{-4}/s$ ）と高速変形（右：歪速度  $10^6/s$ ）。試料はアルミニウム

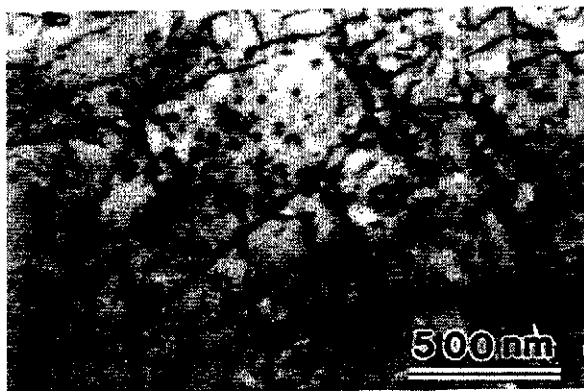


図 1.2 高速圧縮変形により発生した大量の点欠陥集合体。試料はアルミニウム

纏れた転位が導入されている。

(b) 高速変形により発生する点欠陥集合体

低速変形によっても原子空孔集合体とおぼしき欠陥は発生するが、その数は少なく、その分布は一様でなく偏在している。これらは従来転位の幾何学的な斬り合い等の反応で発生したと考えられてきた。

高速変形の場合、図 1.2 のごとく薄膜試料を破断変形した場合程ではないが高い密度の原子空孔集合体が発生した。

4. 考察

4.1 転位機構によらない金属の塑性変形

薄膜試料を破断に至るまで変形すると、極めて高濃度の分散した原子空孔が発生しこれらが集まって積層欠陥四面体の形をした原子空孔集合体が発生することが確認され、アルミニウムにおいてさえそれが例外でないことが示された。また、転位の発生・移動の痕跡も認められなかったことから、点欠陥の大量発生を伴う転位機



図 1.3 Glide element の遭遇点での点欠陥の発生

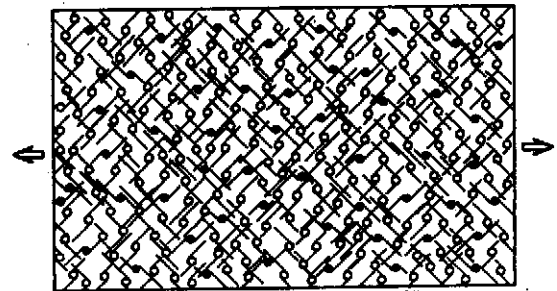


図 1.4 試料全領域を覆う glide element の発生により変形が進行し、高濃度の点欠陥が発生する。

構によらない結晶性金属の塑性変形の機構を提案した。

極めて高い内部応力の発生により、結晶の滑り面上の微小面素片 (glide element と名付ける) がずれ移動を行う。これらが同時に多数発生することにより変形が進行する。Glide element が同一面上にない他の glide element と遭遇すると、図 1.3 に示したごとく点欠陥または点欠陥列を発生する。高変形量を達成するためには図 1.4 のように瞬時に試料全体を高濃度の glide element が覆った形となり、大量の点欠陥が発生する。

日本国内はもとより、国外においても複数の研究グループが、塑性変形の分子動力学による計算機シミュレーションを開始しており、ここに提案した新しい塑性変形機構を支援する結果が出つつある。

4.2 バルク試料の超高速塑性変形

前節に上げた一例を見ても、超高速変形が通常の塑性変形とは大きく異なる可能性が伺える。説明はしなかったが、難加工性材料の塑性加工や、結晶性材料の非晶質化など、多くの有望な研究課題を含んでいる。

5. 謝辞

超高速塑性変形の研究は、本研究の守備範囲を超えて大きなものであるが、本研究を端緒として文部省支援の学術フロンティア推進研究として大きく展開しつつある。広島工業大学超高速塑性加工研究センターを中心に、本研究者が研究者組織の代表者となり、国内 35 研究グループ、国外 8 カ国 10 研究グループによる共同研究として推進しつつあるものである。

本研究助成により進めることができた部分について感謝することはもとより、研究の次の段階への基礎を築けたことに関して深く感謝するものである。