

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ドライプレス加工用のボロンドープダイヤモンドコーテッド高靱性超合金工具  
の開発」

## 研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター

# 目 次

## 第 1 章 研究開発の概要

- 1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標
  - 1.1.1 研究開発の背景 2
  - 1.1.2 研究目的および目標価 2
- 1.2 成果概要 3
- 1.3 当該研究開発の連絡窓口 3

## 第 2 章 本論

- 2.1 本論-(1) 高韌性超硬合金評価と試験用金型の製造
  - 2.1.1 高精度超硬合金の評価 4
  - 2.1.2 ダイヤモンドコーティングの下地処理における影響 4
  - 2.1.3 ダイヤモンドコーテッド金型の製造 4
- 2.2 本論-(2) ダイヤモンド膜の最適合成条件の確立
  - 2.2.1 プレス金型へのダイヤモンドコーティング 5
  - 2.2.2 熱平衡条件下での超硬合金の脱炭処理 5
  - 2.2.3 ダイヤモンド膜の機械的特性の評価技術の確立
    - 2.2.3.1 耐摩耗性の評価 8
    - 2.2.3.2 付着力の評価 8
    - 2.2.3.3 疲労特性の評価 9
- 2.3 本論-(3) ダイヤモンド膜の高効率研磨技術の確立
  - 2.3.1 研磨方法の検討の概要 9
  - 2.3.2 砥粒レス超音波研磨法 10
  - 2.3.3 放電研磨法 11
  - 2.3.4 ダイヤモンドパッドによる手研磨法 12
  - 2.3.5 ラップ盤を用いた研磨法 12
  - 2.3.6 旋盤を用いた研磨法 13
- 2.4 本論-(4) CVD ダイヤモンドコーテッド金型の実機による評価実験
  - 2.4.1 実機試験概要 13
  - 2.4.2 ステンレス鋼板 SUS304 のドライせん断加工 14
  - 2.4.3 ステンレス鋼板 SUS304 のドライ絞り加工 15
  - 2.4.4 焼結ダイヤモンド工具による打抜き加工 19

## 第 3 章 最終章

20

# 第1章 研究開発の概要

## 1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1.1.1 研究開発の背景

地球温暖化対策としての温室効果ガスの低減のみならず、EU(欧州連合)を中心としたRoHS 規制、REACH 規則などの環境に悪影響を与える恐れのある化学物質への規制が世界で強まっている。

このような状況に鑑みて我が国のプレス加工関連企業において、潤滑油や洗浄剤を全く使用しないプレス加工や、環境負荷の少ない植物系(西洋アブラナ等)油の少量使用などを前提としたドライプレス加工、あるいはセミドライプレス加工技術の開発が急務となっている。

### 1.1.2 研究目的及び目標

ダイヤモンドコーテッド金型用の超硬合金について、ダイヤモンドコーティングのための下地処理を施した場合、ダイヤモンド膜をコーティングした場合について強度評価を行い、ダイヤモンドコーテッド金型としての実体強度を評価して設計指針に反映させる。

基板の下地処理に関して、村上試薬を用いた化学エッチングと水素-酸素プラズマによる脱炭処理を併用することで、凹凸面の形成によるメカニカルアンカリング効果と、ダイヤモンド合成時の再炭化に伴う化学的結合力の向上効果により実用的な付着力が得られることを確認した。今年度はより簡便な基板脱炭方法を開発することでコーティング処理のコスト低減を目指す。このほか、ダイヤモンド膜の機械的特性評価のために専用の付着力試験機と疲労試験機を製作した。

ダイヤモンド膜中にドーピングしたボロン量の最適化により放電加工が可能な電気伝導性と耐磨耗性の向上効果が両立できる合成条件を確立した。更に、放電加工により極めて短時間にダイヤモンド膜特有の突起部を選択的に研磨できることも明らかにした。この技術については萌芽的でありすぐに実用化に結びつくものではないが、実用化にあたり傷害となっている研磨コストの低減のために検討を進める。既存研磨技術のブラッシュアップについても地道な改良を続けており、引き続き各種研磨パラメータの最適化を図る。

実用的な順送型によるプレス加工においては、ブランクからの抜き(せん断)加工と深絞り加工であるが、実際には位置決め用の小径穴/異形穴抜き加工も不可欠である。小径/異形穴のせん断加工については焼結ダイヤモンドの使用を前提に加工条件の検討を行う。

前述したような個々の要素技術を相互に連携させて最適化を図りながら、ダイヤモンドコーテッド順送型を製作してドライプレス加工を実施してパンチ・ダイスの磨耗程度、得られる製品の品質評価等を行うことでドライプレス加工の総合評価を行う。

## 1.2 成果概要

### (1) 高靱性超硬合金の評価と試験用金型の製造(実施：富士ダイス)

昨年度開発した超硬の中から、特に熱伝導率の高い超硬を2種類選び、実機試験用の金型の製作を行った。金型の種類はせん断パンチ、せん断ダイ、絞りパンチ、絞りダイ、絞りしわ押さえである。また、せん断パンチ、せん断ダイについては成形時の角部の応力集中を緩和することを目的にそれぞれ0.1と0.2の面取りを施した金型を製作した。さらに、それぞれの金型において各4個ずつ製作した。その内訳はコーティング用2個、ノンコーティング用1個、予備用1個である。なお、絞りパンチについては4個すべてがノンコーティング用である。

### (2) ダイヤモンド膜の最適合成条件の確立および機械的特性評価(実施：学校法人日本工業大学)

ボロンドープダイヤモンド膜を本研究で開発した高靱性超硬合金に成膜するための条件を確立し、実機試験用の金型要素パーツであるせん断ダイ、打抜きパンチ、しわ押さえ、絞りダイスにボロンドープダイヤモンド膜のコーティングを施した。

また、ダイヤモンド膜の評価方法についても付着力、疲労、耐摩耗性の3種類の試験機を製作して評価技術を確立した。

### (3) ダイヤモンド膜の高効率研磨技術の確立(実施：地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・国立大学法人山梨大学)

ダイヤモンドコーテッド工具を高効率に研磨するために、砥粒レス超音波研磨法、放電研磨法、ダイヤモンドパッドによる研磨法、ラップ盤を用いた研磨法についてその効果を検証した。

したがって、ダイヤモンドコーテッド工具の研磨においては、R面を砥粒レス超音波研磨法で、端面・内面・テーパ面をダイヤモンドパッドを用いた乾式高速摺動研磨法で研磨することで、高効率で理想的な研磨面を得ることができる。

### (4) CVDダイヤモンド膜コーテッド金型の最適化設計と実機評価(山陽プレス工業株式会社、日進精機株式会社)

CVDダイヤモンドコーテッド工具による板厚1mmのステンレス鋼板SUS304を用いたドライ絞り加工において、とくに大きな問題も発生せずに30,000回を達成できた。

また打抜き加工では、焼結ダイヤモンドと超硬母材を機械的に保持したΦ8の焼結ダイヤモンドパンチを作成し、材料を板厚1.0mmのSUS304としパンチの耐久性を確認するテストを行った。その結果、潤滑油無しで40万ショット以上の加工を達成した。

## 1.4 当該研究開発の連絡窓口

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター

開発本部研究 開発第一部 機械技術グループ

TEL 03-5530-2570 FAX 03-5530-2591

## 第2章 本論

### 2.1 本論-(1)高靱性超硬合金評価と試験用金型の製造 (富士ダイス株式会社)

#### 2.1.1 高靱性超硬合金の評価

これまでのサポイン事業において、既存のダイヤモンドコーティング用超硬合金と用いられているフジロイ D10 より高抗折力, 高 K1C(破壊靱性値)の超硬合金を開発し, 実機評価を行った。

加工評価の目的は、超硬合金自体の物性と金型形状を主眼に検討したものである。そのため、ダイヤモンドコーティングにおける下地処理、およびダイヤモンドコーティングにおける効果要因を排除するため、金型にダイヤモンドコーティング処理は行わなかった。テストに用いた超硬材料は、既存の超硬材種を比較するためにダイヤモンドコーティング処理が可能な、富士ダイス(株)製超硬合金フジロイ D10 および、開発材種の N o . 2, N o . 3, N o . 7. また、ダイヤモンドコーティング処理は困難であるが、打抜き加工に多く用いられているフジロイ V F 12, 汎用超硬のフジロイ D 60 の合計 6 種類を用いた。金型の刃先形状は打抜き加工時の衝撃によるチッピングの影響を比較するために、さらに C 面, R 面をつけた 3 種類を準備した。

開発した超硬合金 N o . 2, N o . 3 のパンチ刃先の C 面がある値において、比較として潤滑油を用いた打抜きテストを行った。その結果、量産化として十分の対応できる寿命である 10 万ショットをクリアすることができた。

以上の結果より、抗折力値, および K1C 値を向上させたダイヤモンドコーティング用高靱性超硬合金は今回の打抜き加工条件における衝撃荷重に対して十分対応できる機械的特性値を有していることが確認された。刃先については、ある値の C 面をつけることで、打抜きの衝撃に対しては十分であることも確認された。

これらのことを踏まえると、開発した超硬合金にダイヤモンドコーティングをし、更なる、高硬度, 低摩擦係数, 高熱伝導率の効果によりステンレスとの凝着を低下することができれば、実用化に耐えうるドライ加工用金型が開発されるものと思われる。

#### 2.1.2 ダイヤモンドコーティングの下地処理における影響

ダイヤモンドコーティングは、その基材となる超硬合金との付着力を向上させるために基材に下地処理が必要となる。今回は、薬液を用いた下地処理により超硬合金の機械的特性にどのような影響するかを確認した。今回のテストで用いた超硬合金はダイヤモンドコーティングのスタンダードであるフジロイ D10 を使用し、処理後の特性値の評価が容易にできるように J I S 試験片 (4 × 8 × 24mm) の形状とした。

その結果、未処理と比較して、各下地処理をした試験片の硬さおよび抗折力が低下していることが確認された。化学的下地処理は、処理時間および薬液の濃度, 温度, 時間により調整することが可能である。超硬材種ごとに適正な処理条件を見出すことで超硬基板の強度の低下を最低限に抑えることができると考えられる。

#### 2.1.3 ダイヤモンドコーテッド金型の製造

今回試験を行うための金型の超硬選定は、昨年度に評価を行った結果を基に、将来量産化を踏まえた場合の生産性も考慮し検討を行った。また、効率的に評価を行うために製作する金型材種を限定する必要がある。昨年度評価した超硬合金のうち、ダイ

ダイヤモンドコーティングが可能で、さらに厚板のステンレスの打抜き加工に対応できる材種として、No.2, No.3, No.7の3種類が挙げられるが、今回はNo.2を基準とし、さらにより熱伝導率の高いNo.3の2種類を選定した。製作する金型は、山陽プレス工業㈱で設計し、その金型はダイヤモンドコーティングが可能である寸法とした。金型は各4個製作することとし、その内訳は、ダイヤモンドコーティング用2個と、基礎評価用としてノンコーティング用を1個、さらに予備用として各1個とした。また絞り加工用パンチは、これまでの実績上ダイヤモンドコーティングは不要とした。またC面の値は2種類のを準備した。

## 2.2 本論-(2)ダイヤモンド膜の最適合成条件の確率(日本工業大学)

### 2.2.1 プレス金型へのダイヤモンドコーティング

今回実機評価の対象とした4種類の金型にボロンドープダイヤモンド膜をコーティングした。具体的には、ステンレス帯鋼からブランクを打抜くためのせん断パンチ・ダイのセット、絞り加工を行うための絞りダイスとしわ押さえのセットである。ダイヤモンド膜の付着力を向上させるための基板前処理として、村上試液処理と硝酸によるエッチング処理を施した。

図2.2.1にせん断ダイスへのコーティング結果を示す。(a)外観観察結果によれば直径50mm程度のダイス端面全面に均一なダイヤモンド膜がコーティングされている。(b)に端面、側面、内面のラマンスペクトルを示す。測定位置は(c), (d), (e)のSEM観察箇所とほぼ対応している。いずれの箇所のラマンスペクトルも明瞭なダイヤモンドピーク( $1332\text{cm}^{-1}$ )が認められ、ピークの左右(低波数側と高波数側)のバックグラウンドに段差が認められる。この段差は、ノンドープダイヤモンドには認められず、ボロンドープダイヤモンド特有の現象である。すなわち、実用的にダイヤモンド膜が必要な領域にはボロンが含有されていること、また、含有量に際立った違いは認められないことがわかる。また、(c)~(d)のSEM観察結果によれば、いずれの箇所においてもダイヤモンド特有の自形面が観察され、良好なコーティングが実現出来ていることがわかる。図2.2.2にせん断パンチにダイヤモンド膜をコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果を示す。良好に自形面が認められる。図2.2.3に絞り加工時に用いるしわ押さえにコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果を示す。(b)~(d)の各部のラマンスペクトルより膜中にボロンが取り込まれていることが確認できる。また、端面全面に自形を有するダイヤモンド膜がコーティングされていることがわかる。

図2.2.4には絞りダイスにコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果を示す。この場合、ダイヤモンドピークは小さくなり、バックグラウンドの段差も明瞭に認められない。しかし全面に自形面を有するダイヤモンド膜がコーティングされていることがわかる。

これらのことより、ステンレス鋼板のドライ加工に必要なパンチ・ダイにボロンドープダイヤモンド膜をコーティング出来る技術を確立できたことがわかる。

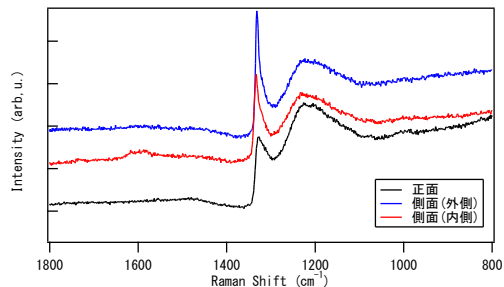
### 2.2.2 熱平衡条件下での超硬合金の脱炭処理

ダイヤモンド膜をプレス金型に応用する場合、金型の基材となる超硬合金金型との付着力向上は重要な課題である。基材の表面に微細な凹凸面を形成することでの機械

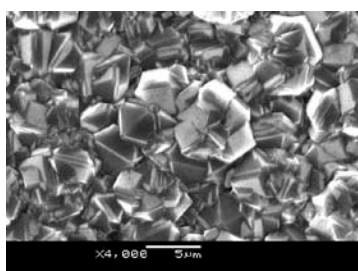
的なアンカーリング効果の向上と、ダイヤモンド膜と基材との化学的結合力の向上が不可欠である。前者の凹凸面の形成については既にその方法を確立している。一方、後者の化学的結合力の向上については実用化には適していないと思われる非平衡条件下での処理に替わり熱平衡条件下での可能性を検討したが、困難であることが分かった。今後の対策としては、固体拡散による方法が考えられる。



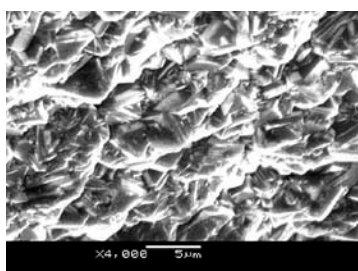
(a) コーティング後の外観



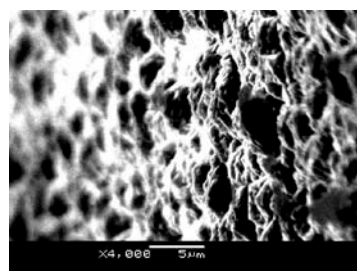
(b) ラマンスペクトル



(c) 端面



(d) 側面

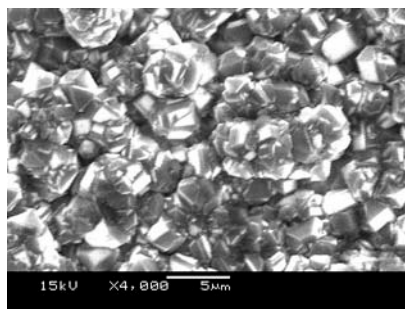


(e) 内面

図 2.2.1 せん断ダイへコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果



(a) コーティング後の外観

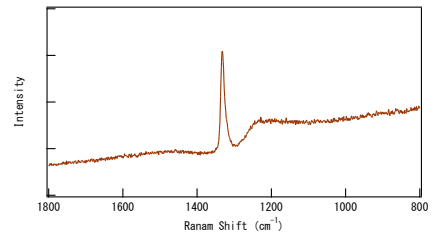


(b) 端面

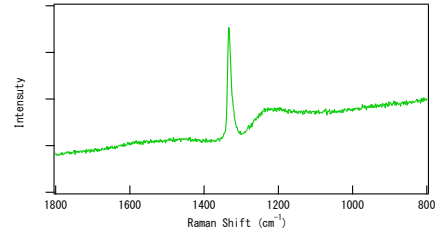
図 2.2.2 せん断パンチへコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果



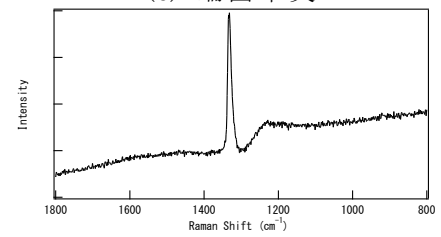
(a) 外観



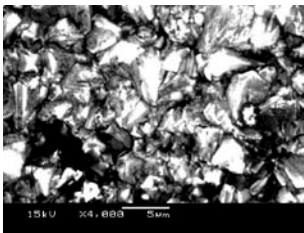
(b) 端面内側



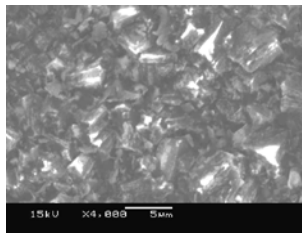
(c) 端面中央



(d) 端面外側



(e) 端面内側

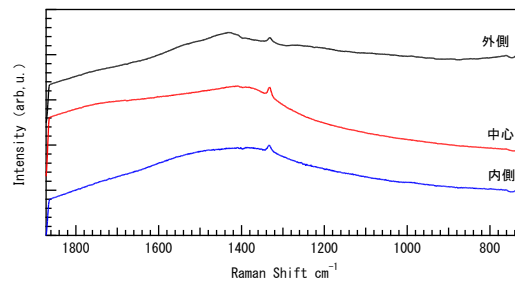


(f) 端面外側

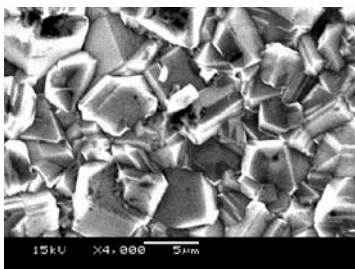
図 2.2.3 しわ押さえにコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果



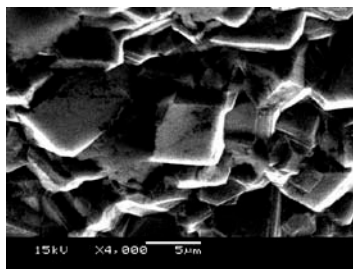
(a) コーティング後の外観



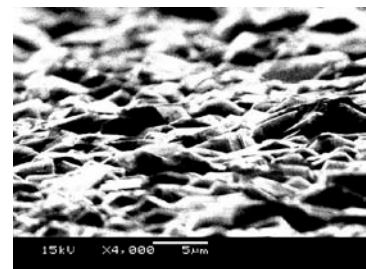
(b) ラマンスペクトル



(c) 外側



(d) 中央



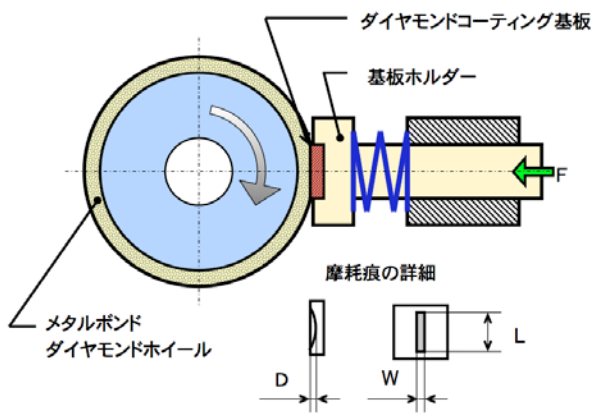
(e) 内側(R部)

図 2.2.4 絞りダイスにコーティングしたダイヤモンド膜の観察結果



## 2.4 ダイヤモンド膜の機械的特性の評価技術の確立

### 2.2.4.1 耐摩耗性の評価



(a) 構造の概略

(b) 外観

図 2.2.5 ダイヤモンドホイール式摩耗試験機の構造と外観

図2.2.5に開発したダイヤモンドホイール式摩耗試験機の原理と外観を示す。基本的にはメタルボンドダイヤモンドホイールに試料を押し付けて得られた摩耗痕から摩耗体積を算出するものである。

### 2.2.3.2 付着力の評価

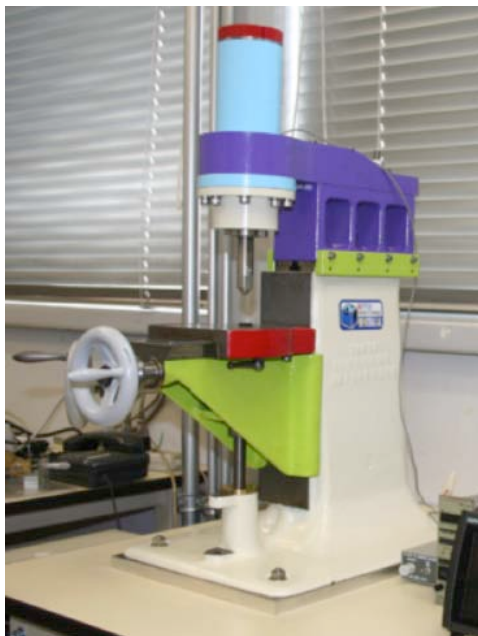
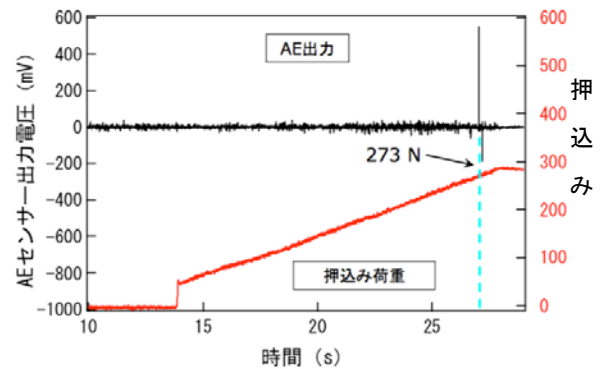
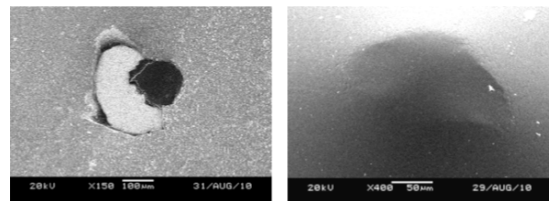


図 2.2.6 付着力試験機の外観



(a) 押し込み荷重と AE 信号の関係



(b) ダイヤモンド膜の剥離状況と圧子先端

図 2.2.7 ダイヤモンド膜の付着力測定結果

押し込み荷重を連続的に負荷しながらダイヤモンド膜の剥離/破壊をアコースティックエミッション(AE)センサーで検出することで付着力を評価できる試験機を開発した。

図 2.1.6 に製作した付着力試験機の概観を示す。

図 2.2.7 に測定結果の一例を示す。押し込み荷重が増大し 273N に達した時に AE シグナルが検出され、直後に押し込みを停止したときの圧痕部と圧子先端の観察によれば、圧子接触部の周辺にダイヤモンド膜の剥離が認められた。

### 2.2.3.3 疲労特性の評価

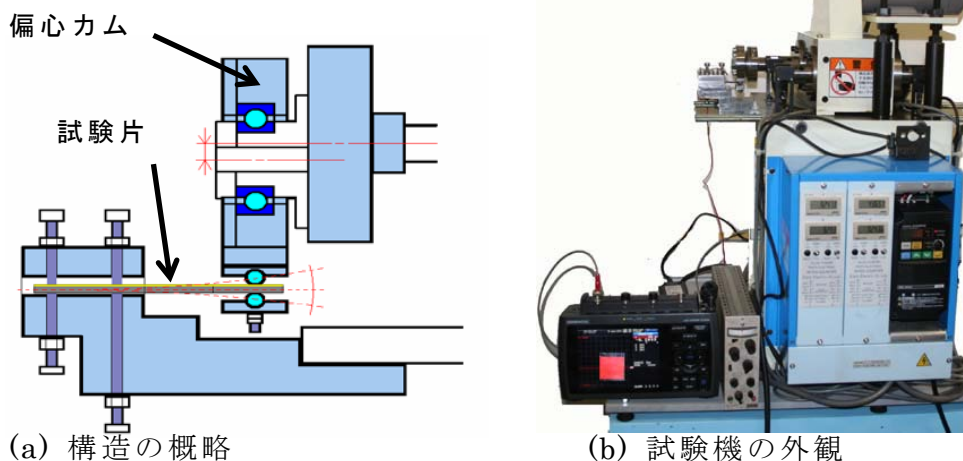


図 2.2.8 平面曲げ疲労試験機の構造と外観

市販の回転曲げ試験機を改造してダイヤモンド膜をコーティングした超合金基板の平面曲げ疲労特性が評価できる試験機を試作した。

図 2.2.8 に構造の概略と外観を示す。回転軸に対してベアリングを介した偏心カムを取り付け最大で 0.6mm の偏心を付与できる構造となっている。片持ちで指示された曲げ試験片の端部を、偏心カムと一体となったボール指示点でクランプすることで、試験片に任意の変位(曲げ)を与えることができる。

## 2.3 本論-(3)ダイヤモンド膜の高効率研磨技術の確立

(東京都立産業技術研究センター・山梨大学)

### 2.3.1 研磨方法の検討の概要

CVD ダイヤモンド膜は多結晶体であるが、研磨を施し表面を滑らかに仕上げることで摩擦係数が減少し、油と同様、もしくはそれ以上のトライボロジー特性が得られることが知られている。すなわち、CVD ダイヤモンドコーテッド金型によるドライプレス加工を行うには、ダイヤモンド膜の研磨が必要となる。

通常、ダイヤモンドを磨く方法はダイヤモンドホイールもしくはダイヤモンド砥粒を用いた機械的な研磨方法がある。また、高効率にダイヤモンド膜を研磨する方法として、ダイヤモンド膜を構成するカーボンと金属とを高温下で反応させてダイヤモンド膜を磨耗させていく方法がある。しかし、いずれの方法もプレス金型に見られる曲面を研磨する方法としては不向きである。

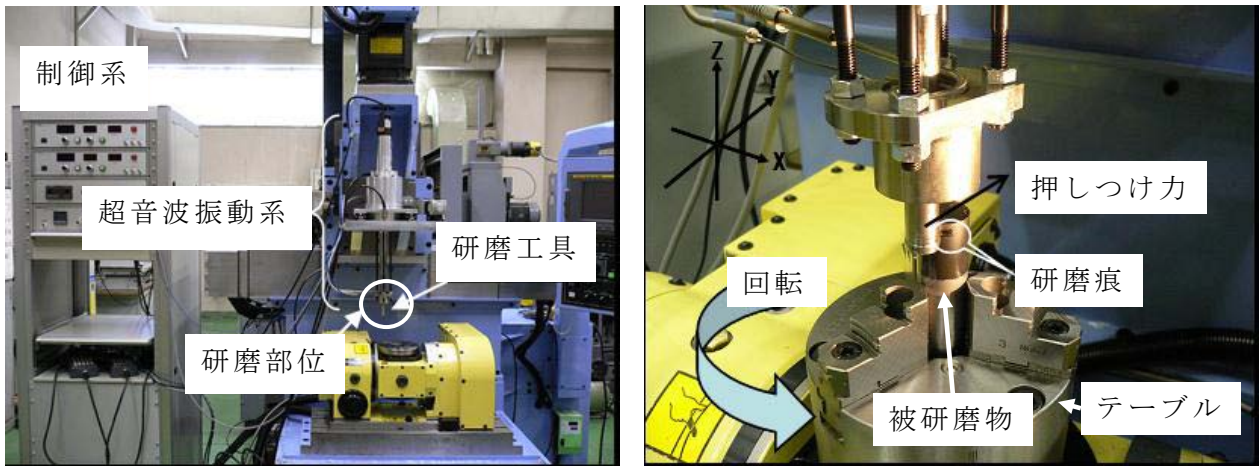
そこで、ダイヤモンドコーテッド工具を高効率に研磨することを目的に、上述した従来のダイヤモンドの研磨方法の特徴を活かした新たな研磨方法を検討する。

### 2.3.2 砥粒レス超音波研磨法

本方法は、熱化学反応と機械的な磨耗の相乗効果によってダイヤモンド膜を摩滅させ、研磨を行うものである。熱化学反応は超音波振動する研磨工具をダイヤモンド膜に押し当てた際に発生する摩擦熱を利用する。したがって、研磨工具はダイヤモンド膜を構成するカーボンと反応し易い金属になる。

図 2.3.1 に研磨装置の外観を示す。3 軸の NC フライス盤の主軸部分に軸方向に振動する超音波振動系を取り付け、テーブル上に 2 軸の回転テーブルを固定している。

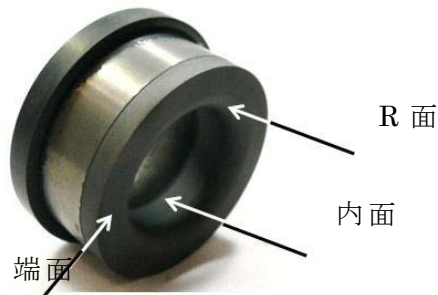
図 2.3.2 に金型の研磨前と研磨後の外観写真を示す。



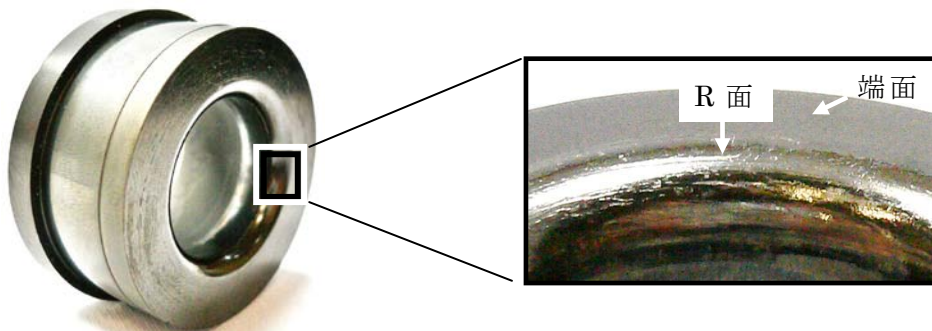
a) 旋盤の外観

b) 研磨部位

図 2.3.1 砥粒レス超音波研磨装置の外観と研磨部位



a) 研磨前の絞りダイスの外観写真と研磨箇所



b) 研磨後の絞りダイスの外観写真

c) 研磨後の R 面の写真

図 2.3.2 放電加工機の概観と原理図

### 2.3.3 放電研磨法

本研究においては、放電加工によるボロンドープダイヤモンド膜の研磨についても検討した。

図 2.3.3 に放電加工後の加工面を示す。一見ボロンドープ量およびコンデンサ容量の加工性への影響が見出せないが、3,300pF で比較すると、ボロンドープ量が高くなるにしたがい加工性が向上しているといえる。これはボロンの含有量が高くなるにつれて電気抵抗値が小さくなったためである。また、電気抵抗値の低い基板 D (B: 1,500ppm) のコンデンサ容量に対する加工面の变化を見ると、容量が大きくなるにしたがって加工性は向上しているといえる。これも、電気抵抗値が低いためにコンデンサ容量の大きさの影響が顕著になったためと考えられる。

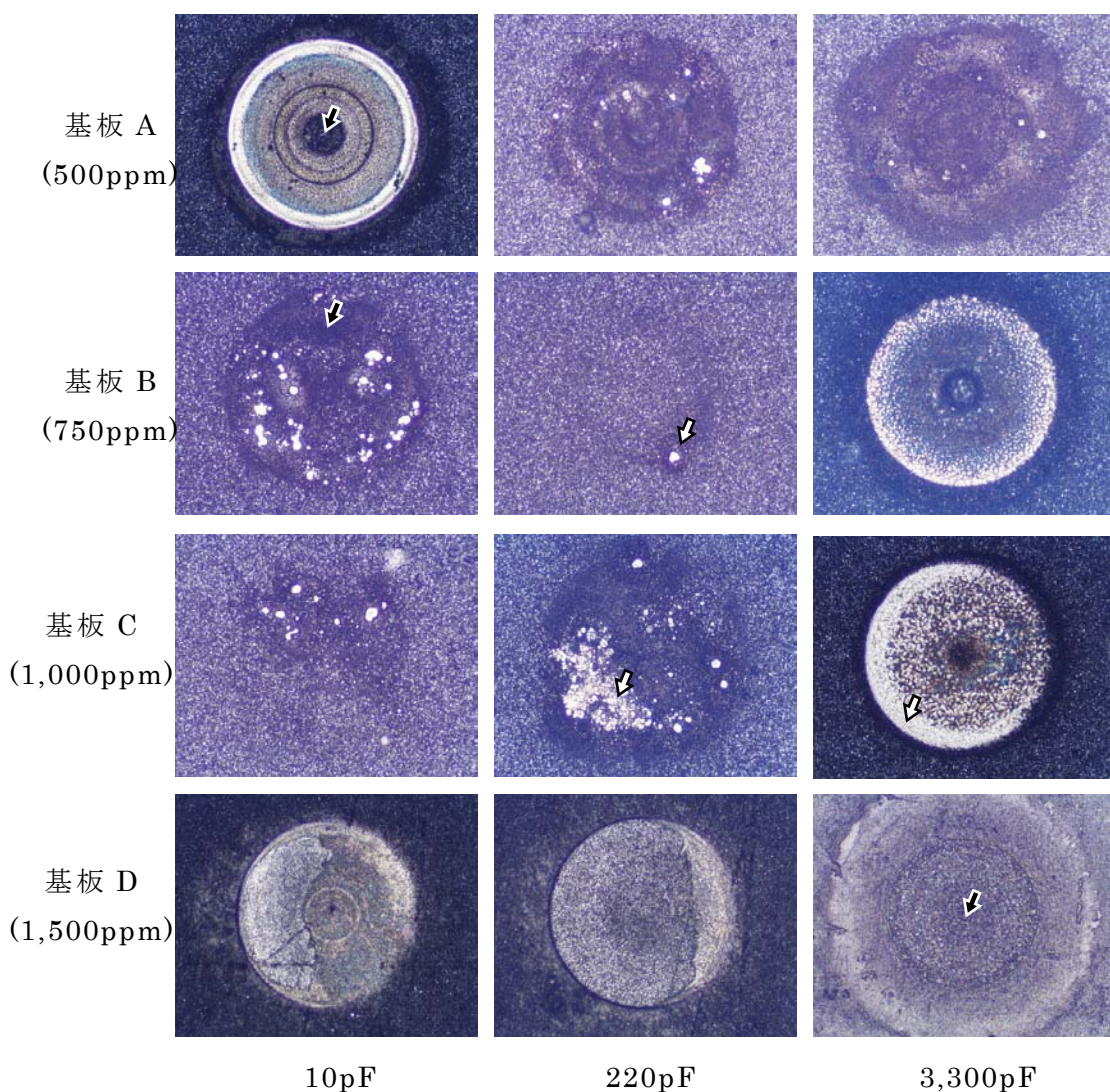


図 2.3.3 放電加工後のダイヤモンド膜の表面の様子



a) 旋盤の外観



b) 手研磨の様子

図 2.3.4 旋盤の概観と研磨の様子

#### 2.3.4 ダイヤモンドパッドによる手研磨法

研磨は、図 2.3.4 に写真を示す小型卓上旋盤に試験片をセットし、回転している試験片にダイヤモンドパッドを押し当てて研磨する方法を採用した。

本法では、研磨前の表面粗さ ( $2.5\mu\text{mRz}$ ) を  $1.0\mu\text{mRz}$  程度にするまでに 20 時間を要した。また、その後 30 時間を目安に研磨したが、 $0.8\mu\text{mRz}$  よりも小さくすることはできなかった。

#### 2.3.5 ラップ盤を用いた研磨法

これまでのところ、内面ならびに端面の研磨に有効な手段は、ダイヤモンドパッドを用いた手研磨法であることが分かった。しかし手研磨は、人間の手により 10 時間以上の作業が必要であり、ダイヤモンド膜の研磨方法が確立したとはいえない。本法は、従来の機械的研磨と、手研磨法の検討において研磨効率の向上にはダイヤモンドパッドを用いることが良いとの見解を組み合わせた研磨方法である。

図 2.3.5 に本法で研磨した絞りしわ押えの外観写真を、図 2.3.6 に研磨前後の粗さ曲線を示す。まず、図 2.3.5 より、研磨前は絞りダイスと同様に光沢のない表面であるが、研磨後は光沢があり、定規の反射像が目視できる程度に仕上がっている。図 2.3.6 から明らかなように、表面の粗さは著しく小さく ( $0.1\mu\text{mRz}$ ) なっていることが分かる。

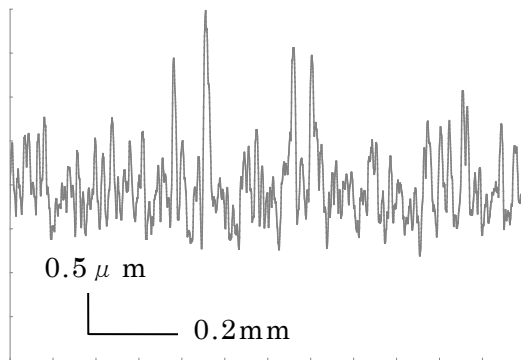


a) 研磨前

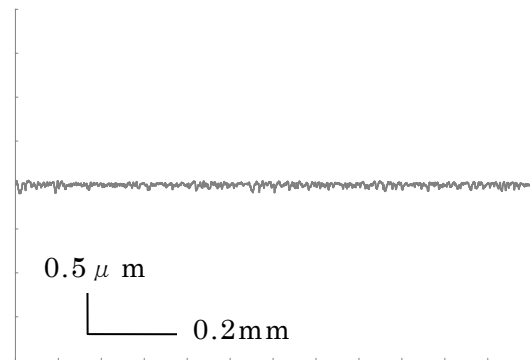


b) 研磨後 (R 面)

図 2.3.5 研磨前後の研磨面の外観写真



a) 研磨前



b) 研磨後

図 2.3.6 研磨前後のダイヤモンド膜の粗さ曲線 (ダイヤモンドパッド高速摺動研磨)

### 2.3.6 旋盤を用いた研磨法

内面の研磨には旋盤を用いた。内面の研磨時にはダイヤモンドパッドを適当な大きさに切出し、これをバイトに貼り付けることで研磨工具とした。この結果、3時間の研磨で内面の粗さを  $0.5\mu\text{mRz}$  にすることができた。したがって、旋盤を用いた手法であれば、テーパ面の研磨も可能であるといえよう。

## 2.4 本論-(4)CVD ダイヤモンドコーテッド金型の実機による評価実験

(山陽プレス工業(株), 日進精機(株))

### 2.4.1 実機試験概要

CVD ダイヤモンドコーテッド金型を用いる実験は、せん断加工と絞り加工の2通りで実施する。

パンチとダイス、及びしわ抑え板は、最終的に山陽プレス工業(株)がダイセット型に組み込み、実機試験用金型として仕上げる。さらに、ダイセット型に組み込まれた実機試験用金型はプレス機械に取り付けられ、連続10万回のドライせん断加工、ドライ絞り加工を実施することによりCVDダイヤモンド膜の寿命評価を行う。

## 2.4.2 ステンレス鋼板 SUS304 のドライせん断加工

### (1) 実験条件

ドライせん断加工の実験に使用する被加工材の公称板厚は 1.0mm とした。なお、実験の効率を考え、せん断加工実験で作成された打抜き品を絞り加工で使用するブランクとして流用することとし、その打抜き品の大きさは絞りブランクの大きさである  $\phi 38\text{mm}$  とした。実際に製作され、金型を装着したダイセット金型の写真を図 2.4.1～図 2.4.3 に示す。



図 2.4.1 せん断加工上型の写真

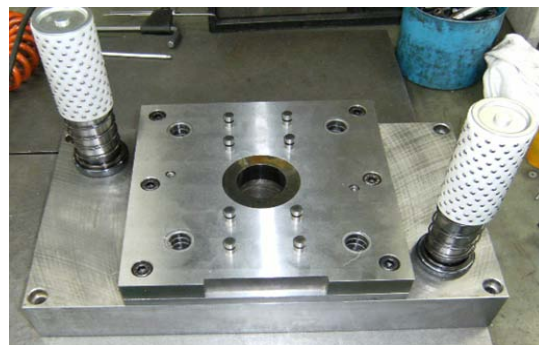


図 2.4.2 せん断加工下型の写真

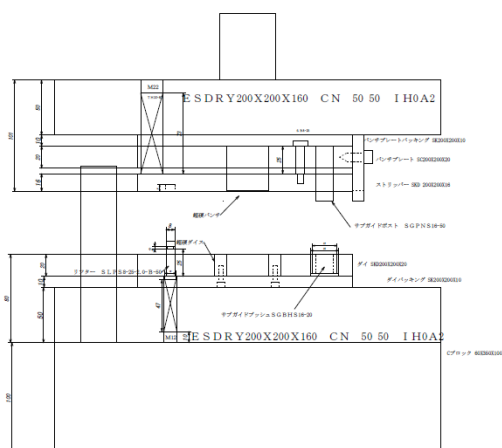


図 2.4.3 せん断型組立図とプレス機械への取り付け状態

### (2) せん断加工用金型の寿命評価試験

CVD ダイヤモンドコーテッド金型の耐摩耗性評価、寿命評価、およびダイヤモンドの剥離状況評価は、せん断品の切り口面性状の観察、バリの高さの計測によって行う。また、打抜き品の切り口面の表面性状の観察と写真撮影は実態顕微鏡で 50 倍に拡大して行った。

実験では、同一寸法の CVD ダイヤモンドコーテッド金型とノンコーテッド金型の二つの金型を用意し、両者を比較することによって CVD ダイヤモンド膜のせん断金型としての優位性について評価することを試みた。

### (3) 実験結果および考察

材質 No. 2 の工具で切り刃先端の面取り C0.1 のノンコート金型のドライの条件においては、わずか 1,000 回の加工で金型刃先にチッピングが発生した。一方、比較のために行った、無洗浄油を使用した場合には、50,000 回の加工においてもチッピングは発生しない。

さて、ダイヤモンドコート金型においては、材質 No. 2 工具で面取り C0.1 の条件でドライせん断加工を実施したところ、わずか 95 回で切り刃先端にチッピングが発生し、No. 3 工具で C0.1 の場合には 24 回加工しただけで、同様にダイヤモンド膜の剥離が確認された。

一方、面取り C0.2 の条件では材質 No. 2 の工具では 4,000 回、No. 3 の工具では 5,000 回のドライせん断加工を行っても明確なチッピングは発生しない。しかし、両工具ともダイヤモンド膜の剥離が確認された。

## 2.4.3 ステンレス鋼板 SUS304 のドライ絞り加工

### (1) 実験条件

ドライ絞り加工の実験に使用する被加工材の公称板厚は 1.0mm とし、前章のせん断加工で、 $\phi 38\text{mm}$  に打抜いたものを絞り加工用ブランクとして使用した。実験に使用する工具は、ダイス、しわ抑え板およびパンチである。パンチは、通常の絞り加工の場合には焼き付きの発生がないのでノンコートとした。また、絞り加工における実験も、せん断加工の実験と同様に安全のためにサーボプレス機を使用した。

絞り実験用に製作されたダイセット金型の写真を図 2.4.4、図 2.4.5 に示す。また、その組立図と、実際にプレス機に取り付けて絞り加工した時の様子をそれぞれ図 2.4.6、図 2.4.7 に示す。

### (2) 絞り加工金型寿命性評価

絞り加工実験においては、CVD ダイヤモンド膜の耐摩耗性評価、寿命評価、およびダイヤモンド膜の剥離状況評価は、連続 10 万回のドライ絞り加工を実施し、その成形品の表面性状を観察することによって行なう。これらを表面粗さ測定器、および顕微鏡で観察することによって CVD ダイヤモンド膜の寿命評価が可能である。

なお、連続絞り加工中に破断が発生した場合には、その時点で寿命と評価する。

評価に使用するサンプルは以下の方法で採取する。まず、1~3 枚目を採取、続いて 10 枚目前後の 3 枚、それ以後は 10 枚ごとにその前後で 3 枚ずつ採取した。以後は同様に、100 枚目からは 100 枚ごとに 3 枚ずつ採取、さらに 10,000 枚以降は 10,000 枚ごとに 3 枚を採取するという方法で 100,000 枚が終了するまで採取する。

### (3) 実験結果

CVD ダイヤモンドコート金型による連続ドライ絞り加工を行い、成形されたカップ側壁の表面粗さの変化を測定した結果を図 2.4.8 に示す。測定箇所は、カップ側壁部の中央付近を円周方向に測定した。

30,000 回の連続ドライ絞り加工において、その表面粗さの変化はほとんど認められない。

成形されたカップの全体表面写真と顕微鏡による側壁部の拡大写真を図 2.4.9 と図 2.4.10 に示す。顕微鏡写真では、観察した部分は絞りカップ側壁のほぼ中央付近であ



る．1回目から30,000回目でその表面状態に変化は見られず，また，凝着発生による傷の発生も観察されない．目視にても，大きな傷等の発生はまったく観察されず，良好な摩擦状態で加工が行われたことを裏付ける表面状態を呈していた．

つぎに，30,000回連続ドライ絞り加工後のダイスとしわ抑え板をダイセットから取り外し，ダイヤモンド膜の剥離状況の直接観察を試みた．その結果を図2.4.11と図2.4.12に示す．

ダイスにおいては，図2.4.11に示すように表面の4か所をSEMにて観察した．絞り加工においては，ダイス肩半径部③および④で最も厳しい材料との接触状態となるのが普通であるが，ダイヤモンド膜のある程度の摩耗は観察されるものの剥離は発生していないのが確認できる．

一方，しわ抑え板では，加工に伴って板厚が増加するので，外周部から内側に向かって次第に厳しい接触状態となる．図2.4.12に示したしわ抑え板の表面で，白く変色しているように見える部分がこの場所に相当する．図からも明らかのように，この領域においてもはっきりとダイヤモンド膜が存在しているのが確認できる．



図 2.4.4 絞り加工上型の写真



図 2.4.5 絞り加工下型の写真

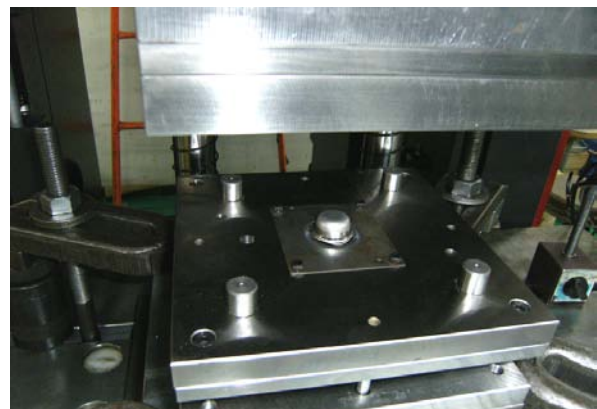
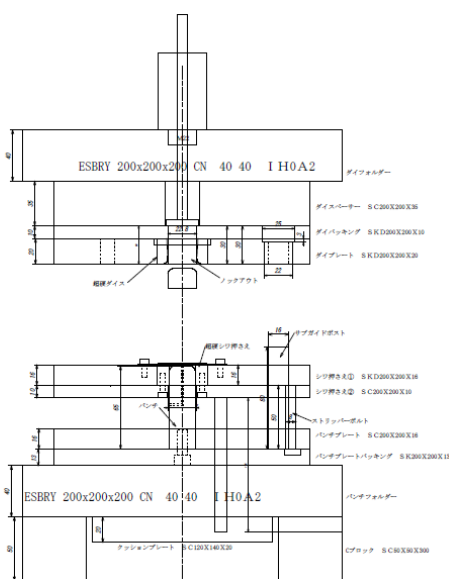


図 2.4.7 プレス機械に取り付けて成形した状態

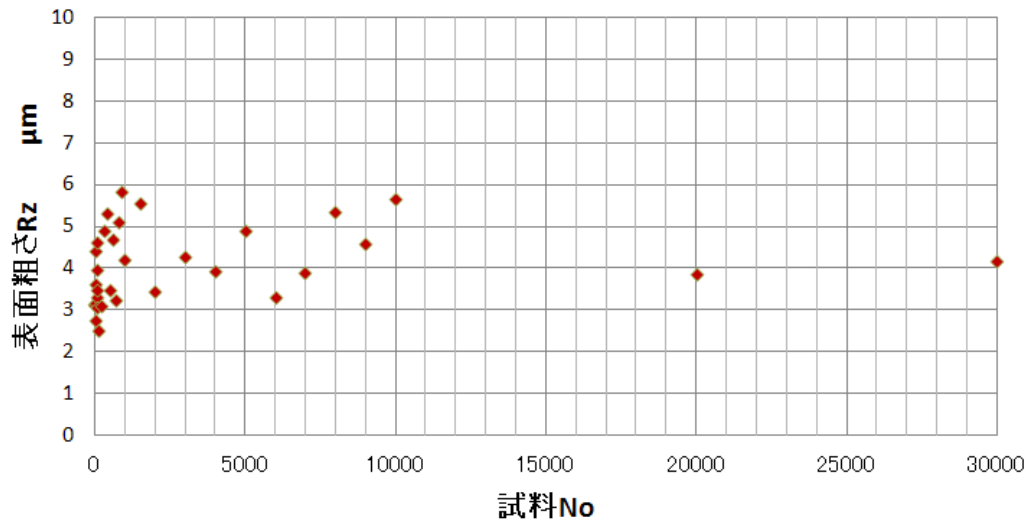


図 2.4.8 絞りカップ側壁部の表面粗さ測定結果


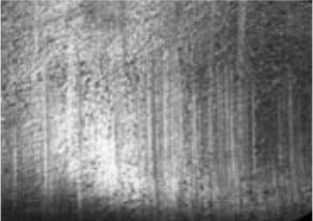



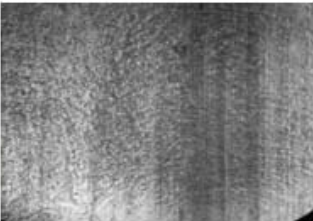


試料No	絞りカップ全体写真	側壁拡大写真
1		
10		
100		
1,000		

図 2.4.9 絞りカップ表面性状観察結果(1~1,000回)







試料No	絞りカップ全体写真	側壁拡大写真
10,000		
20,000		
30,000		

図 2.4.10 絞りカップ表面性状観察結果(10,000～30,000回)


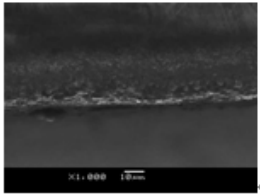
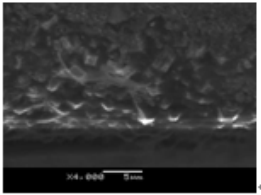
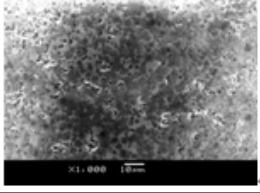
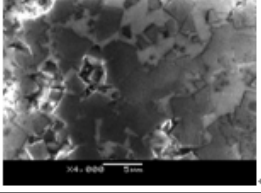

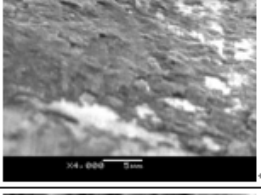
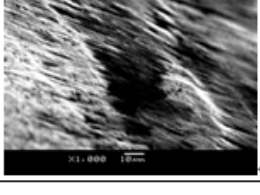
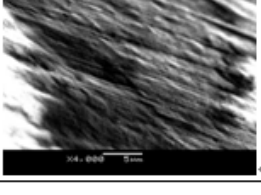
		1000倍	4000倍
	①部の拡大図		
②部の拡大図			
③部の拡大図			
④部の拡大図			

図 2.4.11 絞りダイスのダイヤモンド膜間の残存状況の確認

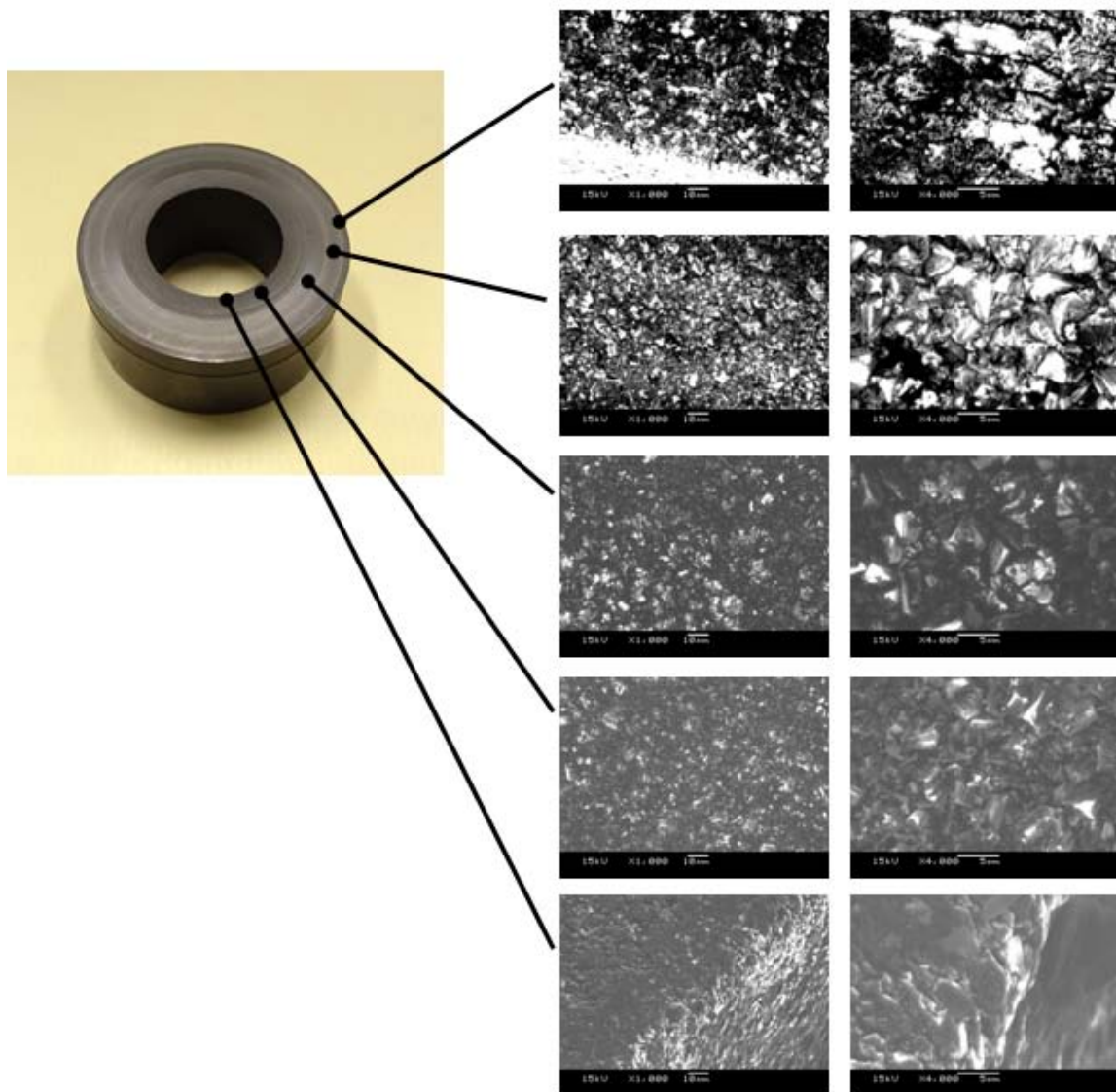


図 2.4.12 しわ抑え板表面のダイヤモンド膜の残存状況の確認

### 2.4.3 焼結ダイヤモンド工具による打抜き加工

前回、焼結ダイヤモンドを超硬にロー付けしたパンチで SUS304 板厚 0.5mm の材料を抜いたところ、20φの外径抜きパンチは4万ショットでチッピングを起したが、φ8の中抜きパンチでは10万ショットまでチッピングを起さずに抜けたことを確認している。但しロー付けする際の熱でダイヤモンドを劣化させることがあり、安定していなかった。ダイは全て超硬（D20）である。

今回はロー付けを止めて、φ8の機械的に保持するタイプの焼結ダイヤモンドパンチを作成し、材料も板厚 1.0mm にして、パンチの耐久性を確認するテストを行った。

その結果、昨年より寿命が向上したことが確認された。

### 第3章 最終章

本研究開発チームは、難加工材であるステンレス鋼板のドライプレス加工を実現するべく、摩擦係数が最も低く抜群の耐摩耗性を有するダイヤモンド膜の利用を検討してきた。そして、ステンレス鋼板(板厚：1.0mm)の絞り加工において1万回の加工を達成した。しかし一方でステンレス鋼板のドライ打抜き加工においてダイヤモンド膜コーティング基材である超硬パンチの靱性が不十分でチッピングが生じることが判明した。そこで、チッピングを起こすことなくダイヤモンド膜の付着力を確保できる①高靱性超合金の開発、②耐摩耗性を向上させたボロンドープダイヤモンド膜合成の最適化、コストパフォーマンス向上のための③ダイヤモンド膜の研磨効率の向上を図る。最終的にはドライプレス加工の信頼性を評価するための④ダイヤモンド金型の製作と耐久性評価までを実施することを目指した。

その結果、①ダイヤモンド膜の付着力を低下させることなく靱性(抵抗力・破壊靱性値)を向上させた超合金を開発した。なお、本開発品はプレス金型のみならずダイヤモンドコーティング基材としてドリル、エンドミル等への適用も可能である。②ステンレス鋼板の絞り加工は極めて過酷な摺動環境であり、ダイヤモンドの耐摩耗性を向上させる必要がある。合成雰囲気中にボロンを含むガスを添加することでボロンドープダイヤモンド膜を合成し、耐摩耗性が3倍程度向上する最適条件を見出した。③気相合成によりコーティングされたダイヤモンド膜は特有の凹凸面を有しており研磨工が不可欠である。ダイヤモンドコーテッド工具の研磨において、R面を砥粒レス超音波研磨法で、端面・内面・テーパ面をダイヤモンドパッドを用いた乾式高速摺動研磨法で研磨することで、高効率で理想的な研磨面が得られた。④ドライプレス加工のためのダイヤモンドコーテッド工具を製作し、実機評価を行った。その結果、板厚1mmのステンレス鋼板(SUS304)のドライプレス加工において、位置決め用抜きパンチは42万回、ブランク打抜きパンチで5.7万回、絞りダイスにおいて3万回以上の加工が可能であることを確認した。

ところで、1mmのステンレス鋼板のドライプレス加工を実施したのは、世の中に出回っているステンレス製品の多くは、板厚1mm以下がほとんどであり、この1mmのステンレス鋼板のドライプレス加工ができるようになれば、ほとんどのステンレス製品はドライプレス加工で成形できることになるからである。また、1mmのステンレス鋼板のドライプレス加工ができるようになれば、世の中でもっとも沢山使用されている冷間圧延鋼板の板厚2, 3mmのドライ加工も、強度的に見て十分対応できると予測できる。この意味からして、本年度の実験で得られたこれらの結果は、ドライプレス加工の実用化を推進する上で非常に大きな成果となりえる。