平成20年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「製品の複雑形状化・高精度化・微細化及び ハイサイクル生産に対応する金型及び成形 技術の開発」

# 研究開発成果等報告書

平成21年 3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人富山県新世紀産業機構

- 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
  - 1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
  - 1-3 成果概要
  - 1-4 当該プロジェクト連絡窓口
- 第2章 硬質膜の設計・成膜条件の確立
  - 2-1 研究目的及び目標
  - 2-2 実験方法
  - 2-3 研究成果
- 第3章 硬質膜の物性評価と寿命評価
  - 3-1 研究目的
  - 3-2 実験方法および研究成果
- 第4章 硬質膜の構造解析と成膜メカニズムの調査
  - 4-1 研究目的及び目標
  - 4-2 実験方法
  - 4-3 研究成果
- 第5章 硬質膜被覆金型の鍛造実機による摩擦摩耗評価とサーボプレス援用による超精密鍛造用金型 の開発
  - 5-1 研究目的及び目標
  - 5-2 実験方法
  - 5-3 研究成果
- 第6章 鍛造を対象した硬質膜の摩擦摩耗評価と摩擦挙動の解明
  - 6-1 研究目的及び目標
  - 6-2 研究成果
- 第7章 硬質膜被膜金型のダイキャスト実機による溶着性評価
  - 7-1 研究目的及び目標
  - 7-2 実験方法
  - 7-3 研究成果
- 第8章 実用化の検討
  - 8-1 目的
  - 8-2 実施内容および結果
- 第9章 全体総括
  - 9-1 成果の総括
  - 9-2 今後の事業化に向けた取組み

#### 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) 金型表面処理技術の確立

従来の金型表面処理被膜(硬質膜)には一長一短があり、例えば最近注目されている硬質膜である ダイヤモンド・ライク・カーボン膜(DLC)は、摺動性、耐焼付き性、耐溶着性に優れている反面、耐 熱性、耐酸化性に劣るという欠点を有している。これまでも硬質膜に関する研究は数多く行われてき たが、大半が特定の機能を有する化合物(単一組成)における成膜条件に関するものや化合物を積層 化することで相乗効果を創出しようとするものであり、いずれも硬質膜の種類が限定され、応用され る範囲も狭いという課題があった。

そこで、本研究では、スパッタ装置を用いて基本硬質膜に任意の機能材料をナノオーダーで混合す ることにより、耐摩耗性、摺動性、耐焼付き性、耐溶着性(離型性)など多方面に優れた混合硬質膜の 製作・被膜技術を確立し、これにより適用できる金型分野及び被加工材料の拡大を図ることを目指し た。

### (2) 超精密鍛造用金型の開発

自動車部品業界では年々厳しい部品の軽量化の対応に迫られており、その対策として、アルミニウム合金などの利用による材料の軽量化、薄肉化、部品構造の簡略化などが検討されている。例えば、 ブレーキシリンダー等の材質も炭素鋼からアルミニウム合金に置き換わる傾向にある。しかし、アル ミニウムは金型部材である鉄鋼材料と化合物を作りやすいため、焼付きやこれに起因した摩耗・欠損な どの問題が生じる危険性がある。しかし、鍛造のように高い面圧下での塑性加工では、金型保護膜と して耐焼付き性・耐溶着性に優れた金属系硬質膜を選択することは極めて困難である。また、部品の 薄肉化により、加工ストレスが増加し、成型後の浸炭焼入れ時に熱処理歪が発生する問題を抱えてお り、鍛造加工時の摩擦係数の低減と焼付き防止は業界にとって大きな課題となっている。

そこで、本研究では、酸化物を主体とした硬質膜を金型に被膜することで耐熱性、耐焼付き性・耐 溶着性の向上を図り、メンテナンスの頻度を軽減したハイサイクル成形技術を確立するとともに、深 穴成形やネットシェイプ成型等複雑形状の加工技術の確立を目指した。また、塑性加工を対象とした トライボ(摩擦摩耗)試験を実施することで摩擦状況を把握し、より摩擦係数のより小さい金型、硬質 膜及び鍛造工程の設計に連携させ、超精密製品の金型の開発を目指した。さらに、プレス加工条件を 任意に制御することにより、精密なプレス加工が期待されるサーボプレス加工機を援用することでよ り複雑・高精度・微細な成形技術の確立を目指した。

### (3) 幅広薄肉用ダイキャスト金型の開発

近年の携帯電話やパソコン等の情報家電製品に用いられるダイキャスト部品等は、小型化・軽量化 のため、部品肉厚は、0.8mm 程度まで薄肉化する傾向にある。これを実現するためにダイキャスト鋳 造時の圧力と温度はますます高くする必要があり、金型の耐久性の低下が懸念されている。また、耐 久性の向上を図るため、耐酸化性に優れた保護膜(硬質膜)が開発されているものの、硬質膜の酸化 開始温度が論じられるのみで、溶着物と硬質膜界面の反応や硬質膜と加工金属との親和性に関する研 究は極めて少ない状況にある。さらに、耐酸化性に優れた硬質膜被膜金型の性能評価においても、大 半が製品の寸法公差を評価するのみであり、硬質膜の性能について着目されることは少なかった。

そこで、本研究では、部品の薄肉化に対応するため、製品の寸法精度に大きな影響を及ぼす金型へ

の金属溶着に着目し、幅広薄肉試験金型を用い、製品の寸法精度と対応する金型の寸法精度及び金型 表面(硬質膜表面)の溶着物性状を比較し、相互関係を調査するとともに、その結果を実製品の金型 設計に反映させ、電子家電部品用の幅広薄肉ダイキャスト技術の標準化を図った。

1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1)研究組織・管理体制

研究組織



### 管理体制

【富山県新世紀産業機構】



# 【株式会社北熱】



【株式会社ギフ加藤製作所】



【三晶技研株式会社】



【国立大学法人名古屋工業大学】



### (2)研究者氏名

株式会社北熱

氏 名	所属・役職				
政 誠一	常務取締役				
嶋村 公二	コーティング部門 係長				
山口 絵美	コーティング部門				
堀江 省吾	コーティング部門				

## 株式会社ギフ加藤製作所

氏 名	所属・役職					
鳥澤 雅之	技術開発部	取締役部長				
三輪 和人	技術開発部	圧造技術グループ課長				
藤田 育穂	技術開発部	金型工場グループ工場長				

# 三晶技研株式会社

氏 名	所属・役職							
篠塚峰宏	ダイカスト事業部 第二製造部 部長							
按田正伸	ダイカスト事業部 第二製造部 鋳造課 課長代理							
洒井昌弘	技術本部 DC技術部 DC技術課 課長							

国立大学法人富山大学

氏 名	所属・役職					
野瀬 正照	芸術文化学部 芸術文化学科 教授					

国立大学法人名古屋工業大学

氏名	所属・役職
堂田 邦明	大学院 工学研究科 教授
牧野 武彦	大学院 工学研究科 助教

富山県工業技術センター

氏 名	所属・役職							
二口 友昭	中央研究所 加工技術課長・統括研究員							
冨田 正吾	企画管理部 企画情報課 主幹研究員							
本保 栄治	中央研究所 評価技術課 主任研究員							
山岸 英樹	企画管理部 プロジェクト推進担当 主任研究員							
川堰 宣隆	中央研究所 加工技術課 研究員							

(3)協力者

アイシン精機株式会社 部品調達部 グループマネージャー 林 武志

1-3 成果概要

(1) 硬質膜の設計・成膜条件の確立

本研究の目的は、鍛造製品の複雑形状化とダイキャスト製品の高精度化・微細化に対応するため の耐焼付き性と耐溶着性に優れた金型保護膜の開発である。加工方法や加工材料に最適な膜を提供 するには、スパッタ法により自由に機能材料を混合する方法が有利と考え、本研究開発を実施した。 これは、機能材料蒸発源ともう一方の蒸発源を同時または交互にスパッタすることで、機能材料を硬 質膜に分散・積層するものである。

本年度の研究目標は、機能材料混合硬質膜を実機金型へ応用し、実用化の目処を立てることにある。 昨年度研究で、寿命向上効果が確認された混合硬質膜 TiMoN を用いて深穴成形(精密自動車部品、パ ンチ径 18mm)の試作評価を行ったところ、94,700 ショットと従来比4倍の寿命向上効果を確認した。 また、径が5mm~30mmの深穴成形パンチでも試作評価を行い、いずれの径でも従来比3~4倍の寿命向 上効果があることが確認できた。さらに、被加工材においても炭素鋼からクロム鋼まで幅広く適用で きることを確認した。この混合硬質膜については、金型表面用保護膜として特許を出願した。(出願番 号 2008-139452)

さらに、ダイキャスト金型に応用するため TiMoN より耐酸化性に優れる TiAlMoN を開発した。この際、混合硬質膜の基本となるスパッタ法による TiN の成膜方法について、蒸発源の冷却と印加電力の 最適条件を見出し、AIP 法と同程度の時間で膜厚 3 µ m の成膜を可能にした。この TiN を幅広薄肉用金 型に被覆することで平均肉厚 0.5mmのダイキャスト成形が可能となった。

(2) 硬質膜の物性評価と寿命評価

株式会社北熱が製作する硬質膜について、機能膜の成膜条件出しおよび機能メカニズムの解明のため、富山県工業センター所有の分析機器を用いて解析した。これにより、鍛造金型用および鋳造金型 用の高機能硬質膜の開発に寄与した。

また、簡便で実用的な金型寿命の非破壊検査法開発のため、横波超音波である SH 波を用いた鍛造 金型およびダイカスト金型の被害量非破壊評価試験を実施した。ギフ加藤製作所と共に実施した鍛造 金型の評価においては、金型の被害要因が複雑であり、本法による非破壊検査法の開発には至らなか った。しかしながら、これまで不明であった鍛造ショット数に伴う硬質膜および基材の劣化実態を材 料評価試験により明らかにした(鍛造ショット数の増加に伴う硬質膜厚および基材硬さ分布の変化量 を取得した。硬質膜厚は減少し、基材硬さは増加する傾向を示す)。この知見は、今後の硬質膜および 金型設計に活かされるほか、ショット数に伴う寸法精度低下の制御にも有用なものとなることが期待 できる。

一方、三晶技研株式会社および株式会社北熱と共に実施したダイカスト金型の評価においては、鋼の焼き戻しに伴う硬さ低下について精度良く検知する手法を、実機ベンチ試験および理論検証試験により示した(金型基材の焼き戻しによる硬さ低下は、SH 波エネルギ伝播経路をより基材表層側へ変化させることを利用したもの)。本非破壊検査法により、不測の金型破損について十分準備できるほか、再熱処理などリペア時期を適性に判断することができるため、本来の金型寿命を有効に活用することが可能となる。今後の装置開発に十分期待される成果を得た。

7

(3) 硬質膜の構造解析と成膜メカニズムの調査

本年度はまず TiAlN/BN 膜の FE-TEM 観察および XPS 分析を実施した。さらに小規模成膜装置を 用い, CrAlN および CrAlN//a-C 複合膜を作製するとともに、バイアス印加実験も実施し、得られた膜 の構造解析と特性評価によって成膜メカニズムの検証に繋げる方法で、研究を進めた。

TiAlN/BN 複合膜については、膜中にホウ化物は存在せず、TiAlN 相の粒界に BN 相が存在するナノ コンポジット構造を有することが証明され、昨年までの研究結果を裏付ける成果が得られた。ついで、 CrAlN 膜に炭素を複合化する前に単相膜での成膜条件と膜構造及び機械的性質の関係を明らかにした。 とくに最適なバイアスを印加すると CrAlN 単相膜でも 50GPa を超える超高硬度が得られた。さらに、 CrAlN に炭素を複合化し、各種の機器を用いて、微細構造および機械的性質を評価した。その結果、 CrAlN に炭素を複合化すると、塑性硬さはあまり向上しないが、CrAlN の結晶は微細化すること、そし て炭素は CrAlN の格子間に侵入型で入ることはほとんどないことが明らかになった。さらに FE-TEM および X 線光電子分光分析などを用いて、微細構造を調べた結果、CrAlN/a-C 複合膜の形成過程では、 炭化物の生成はなく、CrAlN 微結晶と a-C 相が混在するナノコンポジット膜を形成し、CrAlN/a-C 複合 膜においてもすでに報告した TiAlN/a-C 膜と同様の成膜過程が考えられるという結果になった。

# (4) 硬質膜被膜金型の鍛造実機による摩擦摩耗評価とサーボプレス援用による超精密鍛造用金型の 開発

実機鍛造工程による摩擦摩耗評価と金型設計・鍛造工程設計への反映に関する研究では、全ての図 面規格を満たしたアルミ製精密自動車部品を成形する事ができた。さらに、深穴成形パンチに硬質膜 を被覆した場合の性能を調査するため、開発膜TiMoN被覆パンチとTiCN被覆パンチを比較したところ、 内径精度はTiMoN被覆パンチで成形した方がパンチ形状に近い穴成形ができる事を確認した。また、 ハイサイクル生産の可能性を調査するため、TiMoN 被覆パンチを使用して生産スピードを 80rpm から 100rpm までアップしたところ、100rpm でも高品質の製品を成形できることを確認した。

実機鍛造中のパンチ温度を熱電対により測定したところ、60℃前後と確認された。この温度測定を 利用すると、パンチベアリング部損傷による急激な摩擦抵抗の増加を温度変化として捉えることがで きるので、インライン監視システムを構築するため今後実用化を検討することとした。

サーボプレスによる精密鍛造技術の確立に関する研究では、複雑形状部品を成形するための組立式 金型を開発した。この際、金型に開発膜 TiMoN を被覆しサーボプレスのスライドモーションを組合せ る事により、切削レスな製品を成形することができた。

サーボプレス援用と硬質膜被覆金型による超精密鍛造技術の確立に関する研究では、先行移動式パンチガイドによるパンチ振れ防止機構の付いた精密深穴成形金型③を設計・製作し、開発膜 TiMoN 被 覆パンチとサーボプレスのスライドモーションと組合せて深穴成形を行ったところ、本研究の目標で あるL/Dは、目標値;L/D≧3.5に対しL/D=4.22を達成した。

(5) 鍛造を対象とした硬質膜の摩擦摩耗評価と摩擦挙動の解明

本年度は、昨年度製作した塑性加工用摩擦試験機を用い、硬質膜の摩擦特性を調査した。

摩擦試験による摩擦力評価として、後方押出し加工の工具引抜き時の荷重を測定し、株式会社北熱の 開発膜と従来の各種膜の摩擦力測定を行った。この結果、開発膜の摩擦力は従来膜と比べて必ずしも 低くないことを明らかにした。

摩擦面の観察では、表面粗さ測定装置を用いて、工具の試験前後の表面粗さを測定し、開発膜の最

大高さ(Rz)が他の従来膜と比べて低いことを明らかにした。

焼き付き状態の精密三次元形状解析として、後方押出し加工時の摩擦で生じる焼き付き状態を解析 する予定であったが、本研究の範囲内では加工硬質膜の優れた摩擦特性のために焼き付きが生じなか ったため、解析は行わなかった。

(6) 硬質膜被膜金型のダイキャスト実機による溶着性評価

本年度は、硬質膜の評価とダイカスト条件の評価の2項目について研究を進めた。

複合硬質膜の耐溶着性と金型表面粗さの影響評価では、RN+UBMS-TiN 膜を被覆した幅広薄肉試験金型(THS-SCO1)を用いて、マグネシウムダイカスト(AZ91D)の耐溶着性に及ぼす金型表面粗さの影響について調査した。その結果、表面粗さのMg溶着量に及ぼす影響は少なく、RN+UBMS-TiN 膜の剥離もないので、安定した成形が可能であると確認された。

ダイカスト諸条件の評価では、RN+UBMS-TiN 膜を被覆した幅広薄肉模擬金型(THS-SC02)を用いて、 金型冷却システムと組み合せてダイカスト成形を行なった。過熱局部を効果的に冷却するシステムが 成形の安定化とハイサイクル化に不可欠であると確認された。

また、真空(減圧)装置を併用することで成形性が、さらに向上することが確認された。 以上、幅広薄肉材のダイカスト成形について、金型表面処理、金型冷却および真空装置の3つの要素 の最適条件を見出した。

(7) 実用化の検討

本年度は深穴成形パンチの保護膜として寿命向上効果が認められた TiMoN 膜の実用化について、以下の点について検討を行った。

生産面では、深穴成形パンチ形状(製品形状、深穴比L/D)と製品材質を変えて再現性を確認した。その結果、パンチ形状を問わず深穴成形に使用される炭素鋼の多くに適用可能であると確認された。また、量産に備え、炉のメンテナンスの影響を調査してコンタミネーションが膜質と深穴成形寿命に大きな影響を与えることがわかった。この対策としての新たなメンテナンス方法を確立して効果を確認した。

また今後の事業化に向けて、サンプル呼称をスムース TX およびスムース MX とし、ポスター作成と PR 用冊子を作成し、2008 しんきんビジネスフェアーに出展し技術紹介を行った。

さらに新たな市場獲得を目指し、精密鍛造成形では、TiMoN 膜被覆パンチとサーボプレスを用いて ①アルミ製精密自動車部品の成形、②複雑形状部品の切削レスな成形および③L/D>4の深穴成形の 実用化の目処を立て、幅広薄肉材のダイカスト成形においては、金型表面処理、金型冷却および真空 装置を用いることで肉厚ばらつきがほとんどない状態での平均肉厚 0.5mm の製品の成形に目処をたて た。

9

### 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

(1)管理法人

法人名:財団法人富山県新世紀産業機構(代表者 理事長 石井隆一) 住 所:〒930-0866富山県富山市高田529番地 連絡担当者名、所属役職名:中川章 産学官連携推進センター部長 TEL:076-444-5636 FAX:076-444-5630 e-mail:nakagawa@tonio.or.jp

(2) 総括研究代表者

氏 名: 政誠一

組織名:株式会社北熱

所属役職名:常務取締役

 $\mathsf{TEL}: 0\ 7\ 6-4\ 3\ 6-1\ 4\ 3\ 1 \quad \mathsf{FAX}: 0\ 7\ 6-4\ 3\ 6-1\ 4\ 3\ 2$ 

e-mail:smasa@hokunetsu.com

(3) 副総括研究代表者

氏 名:鳥澤雅之

組織名:株式会社ギフ加藤製作所

所属役職名:技術開発部取締役部長

 ${\tt TEL: 058-252-1431} \quad {\tt FAX: 058-252-7340}$ 

e-mail:e112m\_torizawa@kgk.jp

(4)研究実施者

機関名	代表者役職氏名	連絡先			
株式会社 北熱	代表取締役社長	〒930-0106			
	矢後俊郎	富山県富山市高木西 115			
		TEL 076–436–1431 FAX 076–436–1432			
		E-mail :smasa@hokunetsu.com			
株式会社	代表取締役社長	〒501-0111			
ギフ加滕製作所	加藤真一	岐阜県岐阜市鏡島 1348 番地			
		〒501-3954			
		岐阜県関市千疋向野 991-9			
		TEL 058–252–1431 FAX 058–252–7340			
		E-mail ∶e112m_torizawa@kgk.jp			
三晶技研株式会社	代表取締役社長	〒936-8501			
	今家英明	富山県滑川市上小泉 1586 番地			
		〒930-0301 宮山県中新川那ト市町佐島 792			
		田山尓丁羽//14回上1199113年123 TEL 076-473-1220 FAX 076-473-1892			
		E-mail shinozuka@sanshogiken.co.jp			

国立大学法人 富山大学	学長 西頭徳三	〒930-8555 富山県富山市五福 3190 番地
		〒933-8588
		富山県高岡市二上町 180 番地
		TEL/FAX 0766-25-9152
		E-mail nose@tad.u-toyama.ac.jp
国立大学法人	学長 松井信行	<u>⊤</u> 466-8555
名古屋工業大学		愛知県名古屋市昭和区御器所町
		TEL/FAX 052-735-7415
		E-mail dohda.kuni@nitech.ac.jp
富山県	中央研究所	〒933-0981
工業技術センター	所長 公野古己	富山県高岡市二上町150番地
	川区 伯利加口	TEL 0766-21-2121 FAX 0766-21-2402
		E-mail tomida@itc.pref.toyama.jp

第2章 硬質膜の設計・成膜条件の確立

2-1 研究目的及び目標

本研究の目的は、鍛造製品の複雑形状化とダイキャスト製品の高精度化・微細化に対応するための 耐焼付き性と耐溶着性に優れた金型保護膜の開発である。

昨年度の研究において、(Ti, Mo)N 膜を成膜した冷間鍛造パンチは、従来 PVD 膜を成膜した場合に比 べて約4倍の寿命を達成することできた。本研究成果は、鍛造製品のハイサイクル化に大きく貢献で きるものと考えられる。一方、ダイキャスト製品に対しては、有効な硬質膜を開発することができな かった。

本年度は、優れた摩擦摩耗特性を示す(Ti, Mo)N 膜の特性を応用し、(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜の構造設計を行う。

これらの混合硬質膜を被覆した金型を用いて実機鍛造と実機ダイキャスト鋳造による性能評価を 実施し、それぞれの加工方法に応じた最適な混合硬質膜を選択する。特に、ダイキャスト鋳造では、 混合硬質膜被覆金型を用いて、平均肉厚 0.5mm の幅広薄肉ダイキャスト技術を確立する。

さらに、実際の冷間鍛造と同等の面圧をかけることができる高荷重ボールオンディスク試験機を用いて、各種硬質膜の摩擦摩耗試験を行った結果についても報告する。

本年度は下記のサブテーマ3課題について研究を実施した。

(1)機能材料混合硬質膜の成膜【1-1-3】

(2)機能材料混合硬質膜の実機金型への応用【1-1-4】

(3) 硬質膜被覆試験金型(幅広薄肉用)のダイキャスト実機による溶着性評価【3-1-4】

2-2 実験方法

(1) 機能材料混合硬質膜の成膜【1-1-3】

・混合硬質膜の成膜

混合硬質膜の成膜には、UBM スパッタ装置(神戸製鋼所製、UBMS-504)を用いた。本装置は、4 基の 電極を有しており、この電極に設置したターゲット金属を同時スパッタすることにより、様々な混合 膜を生成できる。TiAl ターゲット、Mo ターゲット、Cr ターゲットおよび Ti ターゲットを任意に組合 せ、(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜を作製した。混合硬質膜の膜厚は 1~4 $\mu$ m とし、試験片(SKH51: HRC62±2)に被覆した。

・硬さ試験

微小硬さ試験機(Fisher 製、ナノインデンター)を用いて硬質膜被覆試験片(SKH51:HRC62±2)の表面硬さを測定した。荷重増減速度20mN/20sec、クリープ時間1秒、押込み深さ0.1~0.4µm、ベルコビッチ圧子で塑性変形硬さおよびヤング率を測定した。

・スクラッチ試験による密着性評価

スクラッチ試験機(CSEM 製、レベテスト)を用いて硬質膜被覆試験片(SKH51:HRC62±2)の剥離 臨界荷重を測定した。テーブル移動速度は10mm/min、荷重増加速度は10N/mmとした。

・ロックウェル圧痕試験による密着性評価

ロックウェル硬度計(AKASHI 製)を用いて硬質膜被覆試験片(SKH51:HRC62±2)に圧痕を打ち、 膜の剥離状態を顕微鏡で観察した。荷重は150Kgfとし、判定は優、良、可および不可の4段階とした。

・ボールオンディスク摩擦摩耗試験

摩擦摩耗試験機(CSEM 製、トライボメータ)を用いて硬質膜被覆試験片(SKH51:HRC62±2)の摩

擦係数を測定した。ボール径 6mm (SUJ2、A1050)、負荷荷重 5N、摩擦回転半径 3.0mm、周速度 100mm/sec、 摺動距離 50m、無潤滑で試験を行った。

・加熱酸化試験

硬質膜被覆試験片(SKH51:HRC62±2)を加熱・酸化(大気中、700℃×5時間)し、加熱酸化後の 試験片の膜断面をレーザ走査顕微鏡により観察した。

・高荷重ボールオンディスク摩擦摩耗試験

摩擦摩耗試験機(VIC インターナショナル製、VWM-2500)を用いて硬質膜被覆試験片(SKH51: HRC62±2)の摩擦係数を測定した。ボール径 6mm(SUJ2)、負荷荷重 2000N、摩擦回転半径 4.0mm、周速 度 100mm/sec、摺動距離 20m で、無潤滑の場合と油潤滑の場合について試験を行った。

2-3 研究成果

(1) 機能材料混合硬質膜の成膜【1-1-3】

(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜

(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜の機械的性質を評価した結果を表 2-1 に示す。尚、比較として (Ti, Mo)N 膜の機械的性質についても記載する。まず、Mo 含有量と塑性変形硬さの関係を図 2-1 示す。 いずれの混合硬質膜についても、Mo 含有量 50at%までは、ベースとなる基本硬質膜と同等の塑性変形 硬さを示した。Mo 含有量 50at%を越えると塑性変形硬さは大きく減少した。次に、Mo 含有量と剥離臨 界荷重の関係を図 2-2 に示す。いずれの混合硬質膜についても、Mo 含有量 50at%までは、ベースとな る基本硬質膜と同等の剥離臨界荷重を示した。Mo 含有量 50at%を越えると剥離臨界荷重は大きく上昇 した。

(Ti, Al, Mo)N 膜は、非常に高い硬さを有しているものの、密着性が著しく低い。また、(Cr, Mo)N 膜 は、硬さが非常に低い。よって、今回作製した(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜は、(Ti, Mo)N 膜のよ うに高い硬さと優れた密着性を備えていないことがわかった。

1.7	試料名	膜厚	塑性変形	ヤング率	剥離臨界	ロックウェル			
No.	[Mo/Metal 含有量]	$(\mu m)$	硬さ(GPa)	(GPa)	荷重(N)	判定			
1		0.7	50.0	<u>,</u> ,	97	ा <i>र –</i>			
1	(II, AI)N LOat%]	2.7	53. 8	383	37	μĴ			
2	(Ti,Al,Mo)N-0.5kW [17at%]	3.3	49.8	368	30	可			
3	(Ti,Al,Mo)N-1kW [32at%]	3.4	52.1	371	31	可			
4	(Ti,Al,Mo)N-2kW [51at%]	3.2	46.7	367	45	優			
5	(Ti,Al,Mo)N-3kW [60at%]	3.2	44.8	361	44	優			
6	CrN [Oat%]	3.4	23.2	265	48	म			
7	(Cr,Mo)N-0.5kW [17at%]	3.3	27.1	293	46	優			
8	(Cr,Mo)N-1kW [31at%]	3.3	32.5	315	43	不可			
9	(Cr,Mo)N-2kW [48at%]	3.3	28.7	309	51	優			
10	(Cr,Mo)N-3kW [60at%]	3.2	28.0	310	43	良			
11	TiN [Oat%]	3.0	35.7	383	56	優			
12	TiMoN-0.5kW [17at%]	2.9	38.0	389	57	優			
13	TiMoN-1kW [32at%]	2.8	38.3	366	69	優			
14	TiMoN-2kW [49at%]	3.3	38.0	361	83	優			
15	TiMoN-3kW [59at%]	3.4	30.4	345	66	優			
16	MoN [100at%]	2.0	13.2	235	77	優			

表 2-1 (Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜の機械的性質



(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜の摩擦摩耗特性を評価した結果を表 2-2 に示す。尚、比較として (Ti, Mo)N 膜の摩擦摩耗特性についても記載する。

(Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜の摩擦係数およびボール摩耗径は、Mo含有量に関係なく、(Ti, Mo)N 膜と同等の値を示した。

摩擦摩耗試験後の表面観察を行った結果、Mo含有量 51at%の(Ti, A1, Mo)N 膜は、SUJ2 に対する耐焼 付性が優れていることがわかった。しかし、Mo含有量 17at%、32at%および 60at%の(Ti, A1, Mo)N 膜や、 (Cr, Mo)N 膜の場合、表面に SUJ2 の焼付きが発生していた。よって、Mo 含有量 51at%の(Ti, A1, Mo)N 膜のみ、(Ti, Mo)N 膜と同様に優れた摩擦摩耗特性を示すことがわかった(図 2-3)。

No.	武料名 [Ma Matal 今左号]	摩擦係数		ボール摩耗径 (mm)		耐摩耗性		耐焼付性	
	[MO/Metal 占有里]	SUJ2	A1050	SUJ2	A1050	SUJ2	A1050	SUJ2	A1050
1	(Ti,Al)N [Oat%]	0.779	0.618	0. 757	1.403	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigtriangleup$	$\times$
2	(Ti,Al,Mo)N-0.5kW [17at%]	0.829	0.685	0. 743	1. 474	0	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
3	(Ti,Al,Mo)N-1kW [32at%]	0.814	0.697	0.760	1.582	0	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
4	(Ti,Al,Mo)N-2kW [51at%]	0.742	0.891	0.667	1. 476	0	0	0	0
5	(Ti,Al,Mo)N-3kW [60at%]	0.774	0.929	0. 751	1.301	0	0	$\bigtriangleup$	0
6	CrN [0at%]	0.626	0.867	0.749	1.567	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigtriangleup$
7	(Cr,Mo)N-0.5kW [17at%]	0.638	0.755	0.851	1.650	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigtriangleup$
8	(Cr,Mo)N-1kW [31at%]	0.643	0.773	0.909	1.608	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigtriangleup$
9	(Cr,Mo)N-2kW [48at%]	0.738	0.818	0.899	1.546	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigtriangleup$
10	(Cr,Mo)N-3kW [60at%]	0.815	0.825	0.748	1.395	$\times$	$\bigcirc$	_	$\bigtriangleup$
11	TiN [Oat%]	0.769	0.666	0.839	1.367	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\times$	$\bigtriangleup$
12	TiMoN-0.5kW [17at%]	0.805	0.654	0.754	1.312	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigtriangleup$
13	TiMoN-1kW [32at%]	0.708	0.617	1.049	1.512	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigtriangleup$
14	TiMoN-2kW [49at%]	0.768	0.710	0.600	1.329	0	0	0	$\triangle$
15	TiMoN-3kW [59at%]	0.836	0.881	0.698	1. 151	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigtriangleup$
16	MoN [100at%]	0.750	0.862	0.323	1.280	$\times$	$\bigcirc$	-	$\bigtriangleup$

表 2-2 (Ti, Al, Mo)N 膜および(Cr, Mo)N 膜の摩擦摩耗特性



図 2-3 摩擦摩耗試験後の表面観察像(SUJ2)

優れた摩擦摩耗特性を示した Mo 含有量 51at%の(Ti, A1, Mo)N 膜を加熱処理(700℃×5 時間)し、処理 後の膜断面を観察した写真を図 2-4 に示す。Mo 含有量 51at%の(Ti, A1, Mo)N 膜の場合、表面に酸化層 が生成されていたものの、母材側に正常層が残っていた。(Ti, A1)N膜およびMo 含有率49at%の(Ti, Mo)N 膜と比較すると、(Ti, A1)N 膜ほどの耐熱性は有していないものの、Mo 含有率 49at%の(Ti, Mo)N 膜より 高い耐熱性を示すことが分かった。



図 2-4 加熱処理後の膜断面観察像(700℃×5時間)

これらの評価結果より、Mo含有量51at%の(Ti, Al, Mo)N 膜は、(Ti, Mo)N 膜と同等の優れた摩擦摩耗 特性を示しながら、高い硬さと高い耐熱性を示すことがわかった。

・硬さ	:高	(Ti,Al,Mo)N膜	$\gg$	(Ti,Mo)N膜	$\gg$	(Cr,Mo)N膜	低
・密着性	:高	(Ti,Mo)N膜 🏻 🏾	$\gg$	(Cr,Mo)N膜	>	(Ti,Al,Mo)N膜	低
・摩擦摩耗特性	:優	(Ti,Mo)N膜 =	=	(Ti,Al,Mo)N	膜	≫ (Cr,Mo)N膜	劣
・耐熱性	:高	(Ti,Al,Mo)N膜	$\gg$	(Ti,Mo)N膜			低

この(Ti, Al, Mo)N膜をMgダイキャスト金型に適用し、金型の寿命評価を行った結果、従来PVD膜を 適用した金型より劣る結果となった。(Ti, Al, Mo)N膜の特性から考察すると、密着性が低いため、ダ イキャスト鋳造の高い面圧に耐えることができなかったものと考えられる。現状、密着性を向上させ る方策がないため、Mo系膜によるMgダイキャスト金型の寿命向上は難しいと判断した。

### 高荷重ボールオンディスク摩擦摩耗試験

冷間鍛造実機試験において、パンチにかかる圧力は、2.9GPa である。高荷重下での膜の損傷状態を 調査するため、高荷重ボールオンディスク摩擦摩耗試験を実施した。

荷重 2000N、無潤滑で試験を行った結果、UBM スパッタ法による(Ti, Mo)N 膜は、耐摩耗性および耐焼付性に優れることが分かった。荷重 2000N、油潤滑で試験を行った結果、AIP 法による CrN 膜、UBM スパッタ法による TiN 膜、(Ti, Mo)N 膜および(Ti, Al, Mo)N 膜は、耐摩耗性および耐焼付性に優れることが分かった。

これらの結果より、UBM スパッタ法による(Ti, Mo)N 膜は、高荷重下で優れた摩擦摩耗特性を示すことがわかった。

No.	試料名	摩擦係数	ボール摩耗径 (mm)	耐摩耗性	耐焼付性
1	TiN 膜(AIP)	0.39	2.103	$\bigcirc$	×(凝着)
2	Ti(C,N)膜(AIP)	0.39	2.442	$\bigcirc$	×(凝着)
3	(Ti,Al)N膜(AIP)	0.39	2.478	0	×(凝着)
4	CrN 膜(AIP)	0.36	2.240	0	×(凝着)
5	TiN 膜(UBMS)	0.41	2.918	× (剥離)	0
6	(Ti,Mo)N膜(UBMS)	0.42	2.837	0	0
7	(Ti,Al,Mo)N 膜(UBMS)	0.34	2.953	× (剥離)	0

表 2-3 各硬質膜の摩擦摩耗特性(2000N, 無潤滑)

表 2-4 各硬質膜の摩擦摩耗特性(2000N,油潤滑)

No.	試料名	摩擦係数	ボール摩耗径 (mm)	耐摩耗性	耐焼付性
1	TiN 膜(AIP)	0.13	1.208	△ (クラック)	$\bigcirc$
2	Ti(C,N)膜(AIP)	0.13	1.484	△ (クラック)	0
3	(Ti,Al)N膜(AIP)	0.13	1.129	△ (クラック)	0
4	CrN 膜(AIP)	0.13	1.072	$\bigcirc$	0
5	TiN 膜(UBMS)	0.12	1.090	$\bigcirc$	$\bigcirc$
6	(Ti,Mo)N膜(UBMS)	0.12	1.053	0	$\bigcirc$
7	(Ti,Al,Mo)N 膜(UBMS)	0. 16	1.031	0	0



図 2-5 高荷重ボールオンディスク摩擦摩耗試験後の表面観察像(2000N, 無潤滑)



図 2-6 高荷重ボールオンディスク摩擦摩耗試験後の表面観察像(2000N, 油潤滑)

### (2) 機能材料混合硬質膜の実機金型への応用【1-1-4】

### 鍛造金型への応用

H19 年度研究にて寿命向上が確認された TiMoN 被覆鍛造パンチの再現実験を行った。ショット数は 94,700 で、H19 年度の結果(54,000 ショット)を超えるものとなった。ベアリング部外観を図 2-7 およ び図 2-8 に示す。



図 2-8 ベアリング部外観観察(30 倍)

試験前後のベアリング部のレーザ捜査顕微鏡像(LSM像 100倍)を図 2-9 に示す。試験後のベア リング部では前方~中央部にかけ、膜の変質が確認され、中央~後方部では加工傷が確認された。試 験後の膜表面は光沢が無く、後方部では外周全域に破壊(黒色の傷)が確認された。三次元像を比較す ると、試験前後の前方部および中央部ではほとんど差が見られないものの、後方部では焼付きにより 拡大した段差が確認された。

さらに、試験前後のベアリング部を1000 倍で拡大観察した結果を図 2-10 に示す。100 倍での観察 結果からも確認されたように、前方〜中央部では膜の色調に変化が見られ、後方部の加工傷の大きい 箇所では膜の破壊が確認された。後方部のLSM 像では加工傷による凹凸が確認された。



図 2-9 試験前後ベアリング部外観観察(観察倍率; 100 倍)



図 2-10 試験前後ベアリング部外観観察(観察倍率; 1000 倍)

試験前後の表面粗さを比較した結果を表 2-5 に示す。測定条件は基準長さ 0.25mm、区間数 5、評価 長さ 1.25mm とした。評価パラメータには Ra、Rt を用いた。

軸方向では、Ra と Rt に試験前後の大きな差異は見られなかったが、円周方向では、Rt に試験前後の変化が確認された。ベアリング部の位置に関係なく押出方向の傷が多く、特に後方端の傷は母材に 達することを確認した。

測定方向	円周方向						軸方向	
表面粗さ	$\operatorname{Ra}[\mu m]$			$\operatorname{Rt}[\mu m]$			$\operatorname{Ra}[\mu m]$	$\operatorname{Rt}[\mu\mathrm{m}]$
測定箇所	前方部	中央部	後方部	前方部	中央部	後方部	中央	中央
試験前	0.130	0.130	0.129	0.168	0.155	0.173	0.026	0.200
試験後	0.127	0.127	0.128	0.790	1.039	0.866	0.015	0.172

表 2-5 表面粗さ測定結果

試験前後のベアリング部の形状測定結果を図 2-11 に示す。図内X軸の距離はパンチ先端からの距離を示し、左から(0)前方部、中央部、後方部に相当する。

ベアリング部前方部、中央部では形状の変化はないが、後方部では加工傷および焼付物による形状 の変化が確認された。



図 2-11 試験前後ベアリング部形状測定結果

#### 鋳造金型への応用

混合硬質膜被覆中子ピンを用いて実機ダイキャスト鋳造試験を実施した。

ここでは、試験前後のキャビティ部の外観観察、Mg 溶着高さおよび表面粗さを測定し、硬質膜の性能評価を行った。試験結果を表 2-6 に示す。混合硬質膜では、TiAlMoN が最も優れる結果が得られた。

TiAlMoNを被覆中子ピンの外観観察結果を図 2-12 に示す。試験前後の変化はわずかに確認された。

TiAlMoN を被覆中子ピンの表面粗さの変化を図 2-13 に示す。試験前後での表面粗さ変化は少なく、 鋳造による表面の荒れは極めて少ないと推測した。

TiAlMoN を被覆中子ピンの Mg 溶着高さを図 2-14 に示す。TiAlMoN 膜の Mg 溶着高さは 1.0  $\mu$  m 以下 であり、従来の硬質膜(AIP-TiN、TiAlN、CrN>1.0  $\mu$  m)に比べ耐溶着性に優れると判断された。

鋳造試験は 151,396 ショットまで試験を行ったが、表面状態や Mg 溶着量からこの TiAlMoN 被覆中 子ピンはまだ継続使用可能と判断され、寿命向上を達成するものと推測した。

膜種	ショット数	Mg 溶着量	寿命	備考
TiA1N-C	<9,000	多い	溶損	H19年度試験に比べ成分比率を変更した
TiA1MoN	>150,000	少ない	溶損	表面性状(粗さ、溶着)良好

表 2-6 評価結果



図 2-12 TiAlMoN 試験前後中子ピン外観





図 2-14 Mg 溶着高さ(TiAlMoN)

(3) 硬質膜被覆試験金型(幅広薄肉用)のダイキャスト実機による溶着性評価【3-1-4】

中子ピンによる実機鋳造試験から性能が良好な UBMS-TiN と TiAlMoN を選択し、幅広薄肉ダイキャスト鋳造試験に供した。被覆したキャビティの表面性状を比較評価したところ、UMBS-TiN が幅広薄肉成形に優れることを確認した。結果を表 2-7 に示す。

			• • • • • •		
膜種	金型	ショット数	Mg 溶着量	寿命	備考
UBMS-TiN	試験金型	>7,000	少ない	—	AIP 膜より溶着量少
TiA1MoN	試験金型	1,000	多い	溶損	1,000 ショットで溶損発生

表 2-7 幅広薄肉試験金型における評価

次いで UBMS-TiN を実製品の成形に類似する幅広薄肉模擬金型(図 2-15)に被覆して実機評価を行った。

評価結果を表 2-8 に示す。図 2-16 には試験前後のキャビティ部 LSM 像を示す。鋳造数も 5,000 ショットとわずかなため、試験前後での外観および表面粗さに変化は認められなかった。

Mg 成形品の肉厚測定箇所および測定結果を図 2-17 および図 2-18 に示す。肉厚測定は 1000 ショット毎の 3 個の製品について実施した。図 2-17 の測定点以外の箇所についても同様の肉厚測定を実施し

たが、すべての箇所で肉厚にばらつきがなく、均一に薄肉形成されることを確認した。図 2-18 では、 ショット数ごとに肉厚が増加するが、これは金型の表面に付着・堆積する離型剤やバリにより金型が 開くことによるもので、ダイキャスト成形ではごく一般的な現象である。実用化にあたっては、ショ ット数の多い実製品で寿命の検証を継続研究する必要がある。

膜種	金型	ショット	Mg 溶着量	寿命	備考
		数			
UBMS-TiN	実製品模擬金型	>5,000	少ない	—	Mg 成形品で肉厚測定を実施

表 2-8 幅広薄肉模擬金型における評価



図 2-15 UBMS-TiN 幅広薄肉模擬金型



図 2-16 UBMS-TiN 試験前後キャビティ外観



図 2-17 肉厚測定位置



図 2-18 ショット数毎-Mg 製品肉厚

### 3-1 研究目的

富山県工業技術センターが分担する研究テーマは【1-2-1】~【1-2-4】の4つで構成される。【1-2-1】 および【1-2-2】は、株式会社北熱が担当するテーマである【1-1】「金型表面処理技術の確立」の推進 に関し、株式会社北熱が製作する硬質膜について、機能膜の成膜条件出しおよび機能メカニズムの解 明のため、X線マイクロアナライザ(EPMA)やX線回折(XRD)など、富山県工業センター所有の分析 機器を用いて各成膜条件下における基本硬質膜(【1-2-1】)および機能材料混合硬質膜(【1-2-2】)の 化学成分、結晶構造物の評価等を株式会社北熱と協働で実施するものである。本項の研究内容および 進捗は、株式会社北熱担当の【1-1】と同一であるため、詳細は【1-1】該当頁を参照されたい。

【1-2-3】および【1-2-4】は、硬質膜を含めた金型の余寿命評価(劣化状態の把握)を可能とする ため、固体変質との高い感受性が示されている横波超音波(SH波)を用いた非破壊評価技術の開発に 関する研究である。これは硬質膜および金型基材の使用劣化における波形データと材料評価結果との 相関を精査し、鍛造および鋳造それぞれの金型において、超音波による非破壊評価技術を確立しよう とするものである。初年度は予備実験を実施した上で、実機試験用の深穴成形鍛造金型(【1-2-3】)お よびベンチ試験用の幅広薄肉成形ダイカスト金型(【1-2-4】)の材質・形状に適した SH センサをそれ ぞれ設計・試作し、その性能確認までを実施した。第二年度は作製された各 SH センサを用いて、それ ぞれの金型において断続的に負荷付加および超音波評価試験を行い、取得されたデータの解析により、 SH 波の金型被害における伝播挙動(相関性)を検証した(協働機関: 鍛造金型-株式会社ギフ加藤製 作所、ダイカスト金型-三晶技研株式会社および株式会社北熱)。その結果、鍛造金型においては連続 的なデータ変化を取得したものの、データは単調な変化を示さず、被害の要因が複雑に重合している と推定された。これより、鍛造金型を評価対象とした場合、本法では簡便な非破壊検査ツールとして の可能性は乏しいと判断した(実用とするためには、劣化挙動に再現性が強く求められる。つまり、 支配的な劣化パラメータが必要となる)。一方、ダイカスト金型においては、ショット数の増加に伴い 伝播時間および音圧減衰率が単調に減少する結果を得た。これは金型基材 (SKD61) がマグネシウム溶 湯による熱負荷により焼き戻され、硬さが低下していることに強く関係したものと考えられた(硬さ が低下するに伴い母材の音速が上昇し音波経路が表層側へシフトしたことによると推定)。本現象およ び本測定法は、量産性の保証およびコスト低減に有効な技術となるため、協働企業と共に特許の出願 を実施した(特願2008-063390「金型の非破壊検査方法とその装置」)。

最終年度は【1-2-3】(鍛造金型の評価)において、今後の硬質膜および金型設計の高度化・高機能 化に資するため、材料評価試験によりショット数に伴う劣化実態の把握を行った。また【1-2-4】(ダ イカスト金型の評価)においては、断続試験により得られた結果が、仮定した理論どおり硬さ低下を 反映しているものかどうか、断続評価試験に供した金型の材料評価試験およびSKD61 ブロック材を用 いた電気炉による疑似金型劣化評価試験により検証した。

3-2 実験方法および研究成果

株式会社北熱が担当するテーマである【1-1】「金型表面処理技術の確立」の推進に関し、株式会社 北熱が製作する硬質膜について、機能膜の成膜条件出しおよび機能メカニズムの解明のため、富山県 工業センター所有の分析機器を用いて解析を支援した【1-2-1,-2】。これにより、鍛造金型用および鋳 造金型用の高機能硬質膜の開発に貢献をした(スムース MX およびスムース TX)。 また、簡便で実用的な金型寿命の非破壊検査法開発のため、横波超音波である SH 波を用いた鍛造 金型およびダイカスト金型の被害量非破壊評価試験(NDE: Nondestructive Evaluation)を実施した 【1-2-3,-4】。株式会社ギフ加藤製作所と共に実施した鍛造金型の NDE においては、金型の被害要因が 複雑であり、本法による NDE 法の開発には至らなかった。しかしながら、これまで不明であった鍛造 ショット数に伴う硬質膜および基材の劣化実態を材料評価試験により明らかにした(鍛造ショット数 の増加に伴う硬質膜厚および基材硬さ分布の変化量を取得した。硬質膜厚は減少し、基材硬さは増加 する傾向を示す:図 3-1 および図 3-2)。この知見は、今後の硬質膜および金型設計に活かされるほか、 ショット数に伴う寸法精度低下の制御にも有用なものとなることが期待できる。



図 3-1 【1-2-3】 鍛造ショット数と硬質膜厚さ



図 3-2 【1-2-3】使用前後の鍛造金型基材硬さ分布

一方、三晶技研株式会社および株式会社北熱と共に実施したダイカスト金型のNDEにおいては、鋼の焼き戻しに伴う硬さ低下について精度良く検知する手法を、実機ベンチ試験および理論検証試験により示した(金型基材の焼き戻しによる硬さ低下は、SH波エネルギ伝播経路をより基材表層側へ変化させる。理由はbct→bcc変態による固体横波音速増加に伴う音波屈折率の変化による:図3-3および図3-4)。現在、信頼性、簡便性、評価面形状およびコスト等の点から、鋳造金型の焼き戻しに伴う硬

さ低下を知る非破壊検査法として実用上満足に利用されているものはない。本法によれば、前処理と して表層の酸化スケールを簡単に磨くことで、これらの問題をクリアしながら、超音波計測において 最も基本的なパラメータである伝播時間で金型硬さを評価することが可能である。これにより、金型 のクリティカル部位における硬さ低下量を知ることができ、不測の金型破損について十分準備できる ほか(量産性の保障)、再熱処理などリペア時期を適性に判断することができるため、本来の金型寿命 を有効に活用することが可能となる(ランニングコスト低下)。本事業期間内では本法装置に関する特 許出願まで実施したが、今後の装置開発も十分期待される成果を得た。



図 3-3 【1-2-4】焼き戻し硬さとSH 波伝播時間



図 3-4 【1-2-4】硬さ低下に伴う(a)SH 波受信波形および(b) 音波パラメータの変化イメージ

第4章 硬質膜の構造解析と成膜メカニズムの調査

#### 4-1 研究目的及び目標

ダイキャストは、日本の基幹産業に不可欠な技術であり、製品には高い寸法精度が要求されるとと もに、軽量化や省エネルギー化などの観点から、アルミニウムやマグネシウム製品の需要が増してい る。その一方で、厳しいコスト低減の要求もあり、金型の耐久性向上が強く求められている。金型に は通常、窒化処理が施されるが、最近ではTiN、CrN などの硬質保護膜による被覆処理も窒化処理と合 わせて行われるようになってきた。しかしこれらの表面改質を施しても、厳しいコスト低減の要求に 対して、耐久性が十分とはいえない。

近年、TiAlN よりも耐酸化性に優れた CrAlN 膜が注目されており、これにアルミニウムなどとの濡 れ性の悪い a-C(非晶質炭素:以下、非晶質炭素のことを a-C と記す)を加えたナノコンポジット膜 が金属加工用金型部品の表面改質膜として有効であり、金型の飛躍的な長寿命化が可能ではないかと 考えられる。

そこで、最終年度である本年度は、研究対象として CrAIN をとりあげ、単相膜および CrAIN/a-C 複 合膜をダイキャスト成形あるいは鍛造成形に適する硬質膜の設計に寄与することを目的とし、下記の 2項目について実験を行った。

①機器分析による機能材料混合硬質膜の構造解析

②小規模スパッタ装置による成膜メカニズムの検証

である。本年度も昨年度と同様に上記①と②の項目を同時並行的に実施した。すなわち、小規模成膜 装置を用い、CrAlN および CrAlN/a-C 複合膜を作製するとともに、得られた膜の構造解析と特性評価 によって成膜メカニズムの検証に繋げる方法で、研究を進めた。

4-2 実験方法

(1) 試料の作製

成膜メカニズムの調査 には、富山大学が保有す る対向ターゲット式小型 スパッタ装置(大阪真空 機器製作所製FTS-R2)を 使用した。図 4-1に装置 の外観及び概略図をそれ ぞれ示す。この装置は、 主にスパッタリングチャ ンバ(ターゲット2対)、 基板ホルダー、真空排気 系、制御盤、RF 電源(ス パッタ用+基板バイアス



図 4-1 CrAlN/a-C 複合膜の2元同時性膜装置概略図

用)、D.C. 電源(スパッタ用、基板バイアス用)、パルス D.C. 電源、真空計そしてガス導入系から構成 されている。本装置のスパッタリング形式は対向ターゲット式と呼ばれ、スパッタリングチャンバ内 には、永久磁石内臓の水冷式ターゲットホルダーに固定された二枚のターゲットが向かい合った状態 で上下に二組装備されている。 本装置の基板ホルダーは公転が可能で、ステップ回転および連続回転(0~10rpm)が可能であり、 ホルダー裏側に設置されている石英ランプヒーターによって最高400℃まで加熱できる。また、RFバイ アスおよび D. C. バイアスがそれぞれ独立で印加可能となっている。

真空排気系は複合分子ポンプとオイルミストトラップを装備した油回転真空ポンプから構成され、 チャンバ内到達圧力は 5×10<sup>-7</sup>Torr 以下である。真空度の測定はチャンバ上部と複合分子ポンプの入 り口付近の 2 箇所に設置されている電離真空計によって行う。チャンバ内へ導入するスパッタガス (Ar)と反応ガス(N<sub>2</sub>)の流量制御はマスフローコントローラーで行われ、Ar は最大 100sccm、N<sub>2</sub> は最大 50sccmの範囲でフルスケールの±1%の精度で制御可能である。

基板にはSiウェハー(100)と1μmのダイヤモンドペーストまで鏡面研磨を施した高速度鋼(SKH51) 基板をそれぞれ用いた。基板は、アセトン染み込ませた布で軽く拭った後、アセトンおよびエタノー ル中で超音波洗浄し、2-プロパノールに浸漬後、N,ガスを吹き付けて乾燥させた。

スパッタガスにはAr (99.9999%)、反応ガスにはN<sub>2</sub> (99.9999%)を用いた。ターゲットにはCr<sub>50</sub>Al<sub>50</sub> 合金(99.9%)及びカーボン(99.9%)を用いて、基板を装置にセットし、チャンバを 5×10<sup>5</sup>Pa 以下の真 空まで排気し、Ar 流量を 50sccm で、基板のエッチングを 10 分間行った後、10 分間の前スパッタを行 い、次いで主スパッタを行った。Ar ガス流量を 10 または 15sccm、N<sub>2</sub>ガス流量は 10~30sccm、ヒータ の温度は単相膜の場合 200℃~350℃の間で、複合膜の場合には炭素のグラファイト化防止の観点から 250℃にそれぞれ設定した。CrA1N 薄膜の作製にはパルス D. C. 電源を用いて、電力を 1000~2000W に、 a-C 膜の作製には D. C. 電源を用いて、D. C. 電流を 1.0~4.0 A (500W~2000W) にそれぞれ調整し、上下 箇所に基板をセットした基板ホルダーを 10rpm で回転させ、成膜を行った。

(2) 膜の構造解析

得られた膜の構造解析には下記の手法を用いた。

·薄膜X線回折法、

・透過型電子顕微鏡観察(TEM)および高分解能透過型電子顕微鏡観察(HR-TEM)

・エネルギーフィルター付き透過型電子顕微鏡法(エネルギーフィルターTEM)

・X線光電子分光分析法 (XPS)

などである。これらの原理等や測定条件等については、平成18年度の成果報告書第4章に詳しく記載 した。紙面の制限もあるので、今年度の報告でも省略する。

4-3 研究成果

(1) TiAlN/BN 複合膜の微細構造観察と結合状態分析

BN の存在を確認するため、塑性硬さが最も高かった 14vol%BN 複合膜について Ti および B の EELS 測定を行なった。このことから、TiAlN/BN 複合膜では BN 相は主に結晶粒界に存在しているのではな いかと考えられる。

ついで、複合膜の化学結合状態を調べるため、XPS 測定を行った。この結果から TiAlN/BN 混合膜中の B は主に h-BN 結合を有して存在していると考えられる。

#### (2) TiAlN/BN 系膜の作製条件と膜構造の相互関係把握

昨年度、TiAlN/BN 膜の HR-TEM による微細構造観察の結果、TiAlN/14vol%BN 複合膜には多数の TiAlN 結晶粒が存在し、それらの結晶粒と結晶粒の間に"むらむらコントラスト"をしめすアモルファスラ イクな領域が存在することを報告した。今年度の EELS 観察および XPS 分析などの結果を総合すると、このアモルファスライクな領域が BN 相であることは間違いないと言える。すなわち、本研究の膜は、従来報告されているような TiB<sub>2</sub>などのホウ化物を含む複雑なナノコンポジット膜ではなく、TiAlN の 微結晶粒界にアモルファスライクな構造を持ち、かつソフトな BN 相が存在するナノコンポジット膜で あると断定できる。

(3) CrAlN 系膜の作製条件と膜構造の相互関係の把握

図 4-2 に各 Ar ガス流量をパラメーターとして N<sub>2</sub>ガス流量による塑性硬さの依存性を示す。何れの N<sub>2</sub>ガス流量においても、Ar ガス流量が少ないほど CrAIN 薄膜の塑性硬さは高くなる傾向を示した。

Ar ガス流量=20sccm で $N_2$ ガス流量を変化させて成膜を行ったところ、 $N_2$ ガス流量=5sccm で塑性硬さ は急激に増加し約 19GPa を示し、 $N_2$ ガス流量の増加により一度塑性硬さは減少するが、再び硬さは増 加し $N_2$ ガス流量=20<sup>3</sup>0sccm で塑性硬さが約 22GPa と一定の値を示した。Ar ガス流量=15sccm に固定し た条件では、 $N_2$ ガス流量に対して、塑性硬さは 25~32GPa の間で変動した。Ar ガス流量=10sccm に固 定した場合には、 $N_2$ ガス流量=20sccm~25sccm の範囲で CrA1N 薄膜の塑性硬さは 40GPa を超え、 $N_2$ ガ ス流量が増加するにつれて、塑性硬さは著しく減少した。

つぎに、デューティ比(= d.c.)の異なる薄膜について薄膜法(低入射角法)による X線回折実験を行

った。異なるデューティ比で作製した CrAIN 膜の XRD 回折図形を図 4-3 に示す。得られた X線のピーク位置から薄膜の構造はB1構造の CrAIN に相当することが分かった。またデューティ比が減少することにより、ピーク幅が広くなる傾向を示した。 θ-2θ 法による X線回折パターンのピークの半価幅から計算した結晶子サイズとデューティ比の関係を図 4-4 に示す。CrAINの結晶子サイズは、デューティ比が減少するにつれて減少する傾向を示した。d.c.=75%において9nm、d.c.=88%において17nm を示した。



図4-2 Ar 流量をパラメータとして窒素流量の変化 による CrAlN 膜の塑性硬さの変化。



さらに FE-SEM を使用して薄膜断面の微細構造 観察を行った。図 4-5 に薄膜の断面組織を示す。 d. c. =75%及び 86%の薄膜は、いずれも細い柱状結 晶からなる繊維状組織を示した。また、デューティ比の低い薄膜の方が、柱状の結晶が若干細かく、 粒界のポアも少なくなっており、密度がより高い と考えられる。一方、この二つの試料を EPMA にて 化学組成を調査した結果、化学組成について大き な違いが見られなかった。

CrAIN 薄膜の塑性硬さと実効ヤング率に及ぼす チューティ比(d.c.)の影響を図 4-6 に示す。実効 ヤング率は、 d.c. に関係なく一定の値を示した。 一方、 塑性硬さは、 d.c.の減少に伴い一旦低下 するが、d.c.=86%以下では増加する傾向を示し、 d.c.=75%で塑性硬さが 40GPa を超える値を示した。



デューティー比の影響

Power=1500W, Frequency=240kHz, Ar=10sccm, N=30sccm, Substrate temperature=~150°C



図 4-5 異なるデューティー比で作製した CrAlN 膜の断面 FE-SEM 像: (a)75%, (b)78%, (c)86%, (d)88%.



図 4-6 CrAlN 膜の塑性硬さ及びヤング率に及ぼすデューティ比の影響

(4) バイアス印加の膜構造に及ぼす影響

本研究の計画当初は、回転成膜法を用いたナノコンポジット膜の成膜時におけるバイアス印加の影響を調べる予定であった。しかしながら、スパッタ装置のバイアス電力印加機構(ブラシ)の接触不良が生じ、回転成膜時にバイアス電力を安定して供給できなくなった。その修理には多額の費用が必要であり、本プロジェクトの期間中の修理は不可能であった。やむなく、停止中のみバイアス印加が行えるように応急修理をした上で、CrAIN 単相膜の微細構造に及ぼすバイアス印加の影響を調査することとした。

適切なバイアス印加(負バイアス)により Ar<sup>+</sup>などのプラスイオンのピーニング効果による歪硬化 が発生すること、および膜の配向性が強まることなどから、50GPa を超える極めて高い硬度が得られ た。 (5) 薄膜 X線回折法による CrAlN/a-C 複合膜の構造解析

4-2-1 に示した同時成膜法を用いて CrAIN/a-C 複合膜を作製した。a-C 混合比の異なる 5 種類の薄 膜について薄膜法及び θ-2θ 法による X 線回折実験を行った。薄膜法による X 線回折パターンを図 4-7 に示す。得られた X線のピーク位置から薄膜の構造は B1構造の CrAINに相当することが分かった。 また、グラファイト及び Me-C に相当する回折ピークは見られなかった。θ-2θ 法によるピーク位置 から計算した面間隔は炭素を複合させてもほとんど変化しない結果となったことから、炭素原子が CrAIN 格子間に侵入型で存在することは考えにくい。 回折ピークを見ると a-C 混合比の増加に伴い ピーク強度が弱くなり、ピーク幅が広がる傾向が見られる。θ-2θ 法による X 線回折パターンのピー クの半価幅から計算した結晶子サイズと a-C 混合比との関係を図 4-8 に示す。CrAIN 単層膜の結晶子 サイズは 18nm であったが、a-Cを添加すると結晶子サイズは低下し7.2vol‰-C 複合膜で 12nmを示し、 さらに a-C 混合比が増えると結晶子サイズは急激に小さくなり、19vol‰-C 複合膜で 3nm まで低下し、 a-C の複合化により、結晶が微細化することがわかった。





図 4-7 各 a-C 含有量の CrAlN/a-C 膜の X 線 回折図形

(6) CrAlN/a-C 複合膜の微細構造観察 走査型電子顕微鏡及び透過型電子顕微鏡 を用いて薄膜の微細組織観察を行った。図 4-9 に FE-SEM による異なる a-C 混合比の 薄膜断面組織の変化を示す。CrAlN 単層膜 では大きな柱状の結晶から構成される柱状 構造が観察された。 a-C の複合化によって 柱状の構造が細かくなり、5vol%ではやや細 かい柱状構造が見られ、7. 6vol%で組織はそ れらが非常に細かい繊維状の組織が観察さ れた。11vol%の薄膜に至っては平滑な組織 となり柱状あるいは繊維状の組織は観察さ れなかった。

図 4-8 a-C 含有量による結晶子サイズの変 化 (*θ*-2*θ*法のピーク幅から算出)



図 4-9 CrAlN/a-C 膜の断面【FE-SEM 象】 32

(7) エネルギーフィルターTEMによる CrAlN/a-C 複合膜の微細構造観察

そこで、エネルギーフィルターTEMを用いて、非晶質炭素相の存在個所を調べた。CrAIN /7. 6vol%a-C 複合膜について EELS にて分析を行った。その結果アモルファスライクな位置に比較的多くの炭素が存 在していることが分かった。

(8) CrAlN/a-C系膜の作製条件と膜構造の相互関係の把握

CrAIN/7.6vol‰-C複合膜に対して XPS による膜の化学結合状態の分析を行った。 結果を総合すると、この二元同時成膜法により作製した CrAIN/a-C 膜の結晶粒は CrAIN で構成され、 それらの粒界に非晶質炭素が存在し、炭化物などの第三相はほとんど存在しない、ナノコンポジット 膜であると考えられる。 第5章 硬質膜被覆金型の鍛造実機による摩擦摩耗評価とサーボプレス援用による超精密鍛造用金型の開発

5-1 研究目的及び目標

自動車部品は軽量化が進み、素材が炭素鋼からアルミニウム合金へ置き換わる傾向にあり、炭 素鋼の場合でも薄肉化の傾向にある。さらに形状も部品の一体化等による影響で複雑高精度化す ることに加え、コスト削減も強く求められる。これらの問題を解決するためには、高精度、長寿 命の金型によるハイサイクル生産が求められるが、冷間鍛造では金型に大きな圧力(深穴成形用 パンチの圧力>2.9GPa)が加わるので、鍛造時のパンチの摩擦低減による鍛造荷重低減や焼付き 防止による金型寿命延長は、大きな課題となっている。

本研究では、ブレーキシリンダ等深穴成形の為の金型表面処理を導入し、金型寿命向上とハイサイ クル加工による低コスト化と精密鍛造技術の確立を目指した。また、サーボプレスを援用することで 複雑形状部品の成形法の確立と深穴比L(製品穴深さ)/D(製品内径)≧3.5の深穴成形技術の確立を 目指した。

本年度研究では、以下の3項目について研究を進めた。

- (1) 鍛造実機による摩擦磨耗評価と金型設計・鍛造工程設計への反映
- (2) サーボプレスによる精密鍛造技術の確立
- (3) サーボプレス援用と硬質膜被覆金型による超精密鍛造技術の確立

5-2 実験方法

(1) 鍛造実機による摩擦磨耗評価と金型設計・鍛造工程設計への反映

アルミ製精密自動車部品用金型の開発と成形法の確立

平成 19 年度に行った実験結果を基に、金型レイアウトを一部変更し工程数を全 5 工程から全 6 工 程へ変更した。実験条件を表 5-1 に示す。鍛造実機は6 ステーションボルトフォーマー(NH620M03) を用い、加工速度は80、90、100rpmの3 種類とし、100rpm での成形の可能性を探った。

硬質膜は開発膜 TiMoN (呼称;スムース MX)と TiCN の2 種類とし、両者の比較を行った。

アルミ合金として A6061W-H (引張り強さ 172 N/mm<sup>2</sup>)を用いて実験を行った。

本製品は、両側に深穴形状を持った薄肉な筒状製品であり、製品内径精度の評価では、内径3ヶ所、外径に対する内径の同軸度 2ヶ所と底厚寸法を測定した。

	表 5-1 実験条件
命心生物社	6ステーションボルトフォーマー
政迫險恢	NH620M03
加工速度	80, 90, 100 rpm
カーシュ	フォーマーオイル SRX-230N
<i>9</i> - <i>7</i> <b>7</b> F	(ロッキー潤滑技研)
硬質膜	TiCN / スムースMX
	A6061W-H
极加上的	引張り強さ:172 N/mm <sup>2</sup>
#### 鍛造工程におけるパンチの温度測定

L/D≧3.5の深穴成形技術の開発には、高性能の硬質膜をパンチに被覆する事が絶対条件となる。 高性能の硬質膜選定にあたっては、パンチ温度を測定し温度の面からの評価を加える必要があると考 えた。

鍛造実機における深穴成形時の硬質膜被覆パンチの温度を熱電対により直接測定するため、図 5-1 に示すパンチ温度測定用金型を設計・製作した。熱電対はホルダーに固定されレバーに取付けられて おり、スプリングにより常時パンチに押付けられる構造となっている。鍛造実機は6ステーションボ ルトフォーマー(NH620M03)を用い、S15C製精密自動車部品の深穴成形を行っている第4工程に取付 けて測定を行った。その他の実験条件を表 5-2 に示す。



図 5-1 金型全体写真

	表 5-2 実験条件
卻法松枯	6ステーションボルトフォーマー
政迫滅城	NH620M03
加工速度	80 rpm
	7.1-7-7/1 SDV 920N
カーラント	$7\pi - 7 - 37/\nu$ SKA - 250N
クーラント	(ロッキー潤滑技研)
クーラント 	フォーマースイル SKA=230N (ロッキー潤滑技研) S15C

(2) サーボプレスによる精密鍛造技術の確立

複雑形状成形用金型による精密自動車部品の切削レス成形法の確立

本精密自動車部品は、底面部に4ヶ所の突起とシャープコーナー部を持ったカップ状の製品である。 従来、この製品は冷間鍛造と切削加工の組合せにより生産されているが、複雑形状成形用金型による 研究では、サーボプレス機能と硬質膜による効果で冷間鍛造のみで製作できないか検討が加えられて いる。

図 5-2 に硬質膜被覆を考慮した組立式金型の全体図を示す。硬質膜を一番必要とするのは、4 ヶ所 の突起を成形する穴底部であるが、この金型が分解できない場合、穴底部まで硬質膜を被覆する事は 困難である。そこで金型後方部のネジ部品を外す事により硬質膜被覆を必要とする部分を取出し、被 覆できる構造とした。しかし、昨年度に行った実験の結果、図 5-3 に示すように金型の底面部が早期 に破損し、量産に対応可能な寿命を持った金型の開発が重要課題となった。さらに、図 5-4 に示す製 品底面部のコーナー部を形状測定器で測定したところ、図 5-5 に示すようにXY方向共にダレ幅は、 図面規格 0.08 以下を満足する事ができなかった。

そこで、本年度はこれらの問題を解決するため、ダイスの4ヶ所突起を成形する部分に開発膜 TiMoN (スムース MX)を被覆して鍛造試験を行った。表 5-3 に実験条件を示す。また、表 5-4 にダレ幅改善 のためのスライドモーションの動作仕様を示す。



図 5-2 金型組立図

		表 5-3 実験条件			
	サーボプレフ	H1F110-11			
	リーホノレス	加圧能力 : 1100kN			
	告日 日 十十万斤	S15C(内部硬度 Hv110~150)			
彩山	<b></b> 我 印 的 員	リン酸塩皮膜処理			
	パンチ仕様	ASP-60 (硬度 HRC65~67)		金型底面部	底面部
	ダイス仕様	超硬(硬質膜 : スムースMX)		図5-3 金型底	面部外観写真



底面部拡大

	表 5-4 スライドモーション					
対策前	速度 50%(180°)→速度 30%(168°)→速度 20%(180°、0.1 秒間停止)					
対策後	速度 50%(180°)→速度 30%(164°)→速度 20%(180°、0.1 秒間停止)					

(3) サーボプレス援用と硬質膜被覆金型による超精密鍛造技術の確立

精密深穴成形用金型③によるL/D≧3.5深穴成形技術の確立

深穴比L/D≧3.5 深穴成形を行うための予備実験として、平成19年度に精密深穴成形用金型②を 製作し研究を行ったところ、固定式パンチガイドによるパンチの曲がり防止機能が、深穴成形に有効 である事を見出した。これを利用して最終的にL/D=2.9を達成した。

そこで本年度は、固定式パンチガイドを改良し先行移動式とした精密深穴成形用金型③を設計・製作した。図5-6に金型全体図、図5-7に工程図を示し、図5-8には原理図を示す。パンチ形状はベアリング部以外をストレート形状とし、その部分をパンチガイドによりガイドされる構造とした。サーボプレスが駆動しパンチが下降すると、パンチガイドが先行してパンチ上をスライドし、ダイス入口部へ嵌まり込みながらパンチの芯出しを行い、深穴成形中のパンチの曲がりを防止する構造となっている。表 5-5に実験条件を示す。パンチに被覆する硬質膜は、CrNと開発膜 TiMoN(スムース MX)の2種類とした。本実験で使用したスライドモーションを表 5-6 に示す。この表の No.5の速度 100%は、通常のプレスと同様のモーションとなっている。



図 5-6 金型全体図



	表 5-5 実験条件				
み. ガールフ	H1F110-11				
リーホノレス	加圧能力 : 1100kN				
制日北府	S15C(内部硬度 Hv110~150)				
<b></b> 我 印 们 貝	リン酸塩皮膜処理				
パンチ仕様	HAP-40 (硬度 HRC64~66)				
硬質膜	CrN/スムースMX				

	表 5-6 スライドモーション					
No.	No. 分類 動作仕様					
1	$1 \sim 3$	速度 50%(160°) ⇒ 速度 30%(174°) ⇒ 速度 10%(180°)				
2	$4 \sim 6$	速度 50%(160°) ⇒ 速度 30%(180°)				
3	7~9	速度 20%				
4	10,11	速度 50%				
5	12,13	速度 100%				

5-3 研究成果

(1) 鍛造実機による摩擦磨耗評価と金型設計・鍛造工程設計への反映

アルミ製精密自動車部品用金型の開発と成形法の確立

本製品は先に述べた様に両側が深穴形状になっているが、その片側の穴は φ 15.8 と φ 17.2 の 2 段 形状になっており、その繋ぎ部を A 部として図 5-9 に示す。この部分を形状測定器により測定した図 5-10 と比較すると、A 部形状が図面規格を満足していない事が分かった。この部分の成形法を図 5-11 に示す。

最初は、対策前工程に示す通り第3工程より順次成形して行く工程とした。これは材質がS15Cの 場合に採用している工程だが、アルミニウムに適用すると形状が崩れることがわかった。これに対応 するため、対策後の工程に示す通り最終工程のみで成形する事とし、パンチに作用する圧力を高くし パンチ形状に倣い易くする工程に変更した。その結果、図5-12の実測形状図に示す通り図面規格を満 足する事が出来た。これによりその他の寸法も、全ての図面規格を満足したアルミ製精密自動車部品 を冷間鍛造する事が可能となった。







図 5-12 対策後の A 部実測形状図

次に、加工速度を80rpmとし2種類の硬質膜TiCNと開発膜TiMoN(スムースMX)とを比較した。 図 5-13 に同軸度⑩、図 5-14 に同軸度⑪を比較した結果を示すが、両者に明確な差異は認められなかった。また、図 5-15 に底厚⑬を比較した結果を示すが、底厚バラツキはTiCNの方が安定している傾向を示した。続いて図 5-16、17、18 に内径④、⑤、⑥の精度を比較した結果を示す。縦軸は〈内径実 測値ーパンチ径〉となっており、0 に近い値ほどパンチ径に近い穴が明いている事になるが、3 ヶ所共 に開発膜TiMoN(スムースMX)の方がパンチ径に近い形状となった。





次に開発膜 TiMoN (スムース MX) 被覆パンチを用い、加工速度を 80、90、100rpm と変化させて、 速度 100rpm での成形の可能性を探った。図 5-19 に速度増加に伴う鍛造圧力ピーク値の変化を示す。 横軸に生産数、縦軸に鍛造圧力ピーク値を取り、生産数 500 個までは 80rpm、500~1000 個まで 90rpm、 1000 個以上を 100rpm で成形した。青色曲線が深穴成形を行っている第 5 工程であるが、速度が増加 するに従いピーク値の変動が大きくなる傾向が見られた。図 5-20 に同軸度⑩と加工速度、図 5-21 に 底厚⑬と加工速度の関係を示す。加工速度が増加しても同軸度⑩には、影響が見られなかった。同様 にして同軸度⑪にも影響は見られなかった。底厚のバラツキは加工速度 90rpm で成形した時、一番安 定しており硬質膜 TiCN と同等レベルとなった。続いて図 5-22 に内径④と加工速度の関係を示す。内 径精度においても加工速度が増加しても影響は見られなかった。また内径5、⑥についても同様な結 果となった。



アルミ製精密自動車部品用金型の開発と成形法の確立を目指し、金型構造、工程設計、製品搬送、 硬質膜等をS15C製の製品と比較検討し試作を重ねた結果、全ての図面規格を満足する製品を冷間鍛造 により成形する事ができた。この場合、硬質膜TiCNと開発膜TiMoN(スムースMX)を比較した結果、 同軸度に関しては差がないが、内径精度はTiMoN被覆パンチで成形した方がパンチ形状に近い穴があ く事を確認した。底厚のバラツキはTiCNの方が安定していたが、TiMoNの場合でも加工速度90rpmで TiCNと同レベルの値を示した。さらに、TiMoN被覆パンチにより加工速度100rpmまでアップした結果、 鍛造圧力ピーク値がやや不安定になるものの製品品質的には問題ない成形が可能であると確認された。

#### 鍛造工程におけるパンチの温度測定

鍛造中のパンチ温度を熱電対により直接測定した結果を図 5-23 に示す。横軸は測定時間(経過時間)、縦軸は温度を示す。このグラフより鍛造中のパンチ温度は、60~70℃程度である事が分かった。 この温度は当初の予想よりかなり低い温度であったが、その理由としてクーラント油による冷却効果 が考えられる。測定したパンチには、硬質膜 CrN が被覆されており、12 時13 分に計測を開始し 20 時 35 分に測定を終了するまで急激な温度上昇もなく、約 36,000 個の製品を鍛造した。図 5-24 に開発膜 TiMoN (スムース MX)を被覆したパンチの測定結果を示す。このパンチの測定では、測定中に約 1 時 間、金型交換による機械停止をした為、測定が途中で中断されているが、鍛造中のパンチ温度は先の CrN 被覆パンチとほぼ同じ温度で推移した。この他にも TiN、TiCN を被覆したパンチ温度を測定した が、いずれも類似する結果となった。クーラント油による冷却が関与する工程では、パンチ温度によ り硬質膜の性能評価を行うことは困難となった。

一方で、図 5-25 では温度が急に上昇する時間が何箇所か確認された。このパンチは測定中に、前 工程の金型破損による影響でパンチベアリング部分に多数の傷が付き、製品に品質異常を起こし測定 を中止したものであるが、ベアリング部損傷時間はグラフ上の温度が急に上昇した時間と一致する事 が確認された。このことは、パンチ温度測定がベアリング部損傷による急激な摩擦抵抗の上昇を温度 の急激な変化として捉えることが可能である事を示している。

鍛造中のパンチ温度の熱電対による測定を応用すれば、パンチ損傷による温度上昇を検知すること で製品品質異常の早期発見が可能となる、作業者による目視確認に替わる新しい監視システムの開発 に繋がる知見を得る事ができた。



41



図 5-24 パンチ温度測定結果(開発膜:TiMoN)



図 5-25 パンチ温度測定結果(開発膜:TiMoN)

(2) サーボプレスによる精密鍛造技術の確立

複雑形状成形用金型による精密自動車部品の切削レス成形法の確立

量産対応が可能な新しい金型の開発に当たり、図 5-2 に示した組立式金型の破損した部分が薄すぎる可能性が有った為、後方の部品と合わせ強度アップを図った。その金型の構造図を図 5-26 に示す。 破損し易いA部は、図 5-27 に示す様に一体構造の超硬ニブとした。しかし、この金型を使用した場合でも、同様にA部が破損した。さらに様々な対策案を考案し実験を行ったところ、図 5-28 に示す構造の金型がA部の破損に有効である事を見出した。この金型では、破損するA部を図 5-29 に示すようにに薄いリング状ニブとに分割した構造とし、金型組立時に両側の部品で挟み込み、ネジにて締付固定する構造とした。この金型を実験に用いることでダレ幅の改善につながった。



本研究で使用しているサーボプレスには、1 サイクル中の成形荷重、スライド位置、速度、角度等 をモニタリングできるシステムがあり、これをパソコンより出力したものが図 5-30 である。赤い縦線 がカーソルになって任意の位置へスライドさせる事ができ、成形荷重、スライド位置、速度、角度等 の値を表示することができる。下図は昨年度より検討を行ったスライドモーションの中で、ダレ幅改 善に一最も効果のあったものである。



図 5-30 成形荷重曲線

表 5-7 底厚差比較

	製品実測値(mm)			成形荷重曲線				金型弾性
No.	完成品	ブランク	底厚差H	最大成形	成形開始	下死点	差h	変形量
	底厚H1	底厚H2	(H2 - H1)	荷重/kN	位置h2	h1	h2-h1	h-H
1	4.81	5.05	0.24	261	1.311	0.357	0.954	0.714
2	4.64	5.03	0.39	301	1.589	0.403	1.186	0.796
3	4.32	4.93	0.61	323	1.91	0.438	1.472	0.862
4	4.05	4.93	0.88	338	2.216	0.448	1.768	0.888
5	3.95	4.94	0.99	385	2.536	0.515	2.021	1.031
6	3.87	4.94	1.07	450	2.84	0.593	2.247	1.177
7	3.79	4.94	1.15	508	3.178	0.665	2.513	1.363
8	3.68	4.94	1.26	560	3.416	0.726	2.69	1.43
9	3.62	4.97	1.35	615	3.738	0.786	2.952	1.602
10	3.56	4.96	1.4	618	3.781	0.789	2.992	1.592

ダレ幅改善に効果のあったスライドモーションに関する詳細(10回の繰返し)を表 5-7 に示す。こ の表は、完成品底厚 H1 とブランク底厚 H2 を実測し、その底厚差 H を求め、次にグラフより読み取っ たデータである成形開始位置 h2 と下死点 h1 との差 h を比較したものである。実測値より求めた H 値 とグラフデータより求めた h 値とは同じ鍛造前後の底厚差を見たものであるが、両者の差が金型の弾 性変形量を示すものである。金型の弾性変形量は、完成品底厚が図面規格である 3.5mm に達した時、 約 1.6mm となっている。このスライドモーションでは、下死点通過後、一旦 168° までスライドを上 昇させているが、168°の位置を成形荷重曲線より読み取ると 1.16mm しか上昇しておらず、金型の弾 性変形量を完全にクリアしていない事が分かった。そこで一度完全に負荷を取り除き、再度成形する 事によりダレ幅を改善する目的で、スライドの戻しを 168°から 164°(表 5-4 の対策後スライドモ ーション参照。)へ変更し実験を行った。その結果を図 5-31、32 に示す。ダレ幅は、XY 方向共に図面 規格である 0.08 以下を充分に満足する結果となった。



サーボプレスによる精密鍛造技術を確立する研究の一つとして、複雑形状成形用金型による精密自動車部品の切削レス化の検討を行ったところ、事業化に求められる量産成形金型として、リング状ニ ブとに分離した分割式金型が有効である事を見出した。そして、サーボプレスのモニタリングシステ ムによる解析結果から金型の弾性変形量を考慮に入れたスライドモーションへ変更し、この分割式金 型にスムース MX を被覆し実験を行った結果、全ての図面規格を満足した切削レス品を冷間鍛造により 成形する事ができた。

(3) サーボプレス援用と硬質膜被覆金型による超精密鍛造技術の確立

精密深穴成形用金型③によるL/D≧3.5深穴成形技術の確立

通常のプレスモーションにて実験を行ったところ、L/D≒3に達したあたりより、金型から異音が 発生し始めた。図5-33にその時の成形品をハーフカットし内面を観察したものを示す。異音が発生し た位置では、肉眼でも縞模様が観察出来た。サーボプレスのモニタリングシステムにより成形荷重曲 線を調べてみると、異音発生域では、荷重曲線、スライド速度曲線に激しい振れが見られた。この原 因を調査したところ、成形された穴が深くなったためパンチ外径と成形品内径部との隙間からエアー が上手く逃げる事ができず、パンチがスティックスリップしている状態である事がわかった。

そこで、異音発生域で成形速度を遅くする事によりエアーを逃げ易くするため(異音防止)、前掲表 5-6のスライドモーション動作仕様で、No. 1~4を対策案として考案した。

この条件で実験を行ったところ、硬質膜 CrN を被覆したパンチの場合に No.4 の速度 50%のモーションで若干の異音が発生したが、他の条件では異音は発生しなかった。開発膜 TiMoN (スムース MX) を被覆したパンチでは、対策案のスライドモーション全て異音は発生せず、深穴比; L/D=3.69 まで成形する事ができた。成形品をハーフカットした内面を図 5-34 に示す。



図 5-33 成形品内面写真(L/D≒3)

図 5-34 成形品内面写真(L/D=3.69)

次に、L/D=3.69時のパンチの保護膜として硬質膜 CrN と開発膜 TiMoN (スムース MX) を比較した。図 5-35 に最大成形荷重とスライドモーションの関係を示す。分類 12,13 は通常のプレスモーションであるが、対策したスライドモーションのものに比べ、高い成形荷重を示している。開発膜 TiMoN (スムース MX) パンチで成形した方が若干低い値を示す傾向にあった。図 5-36 に同軸度とスライドモーションの関係を示す。分類 7、8、9 はスライドモーションが速度 20%のものであるが、他の条件のモーションに比べ低い値を示している。図 5-37、38 に開発膜 TiMoN (スムース MX) と CrN パンチで成形した時の内径精度を示す。入口、中間、穴底内径差が小さい程、高精度な穴が成形されて明いていることを示すが、ここでも分類 8、9 が良い結果を示している。

以上の結果を基に、開発膜 TiMoN (スムース MX) パンチを用いスライドモーション速度 20%とし、 装置の限界である深穴比まで実験を行った。

図 5-39 に最大成形荷重と深穴比の関係、図 5-40 に同軸度と深穴比の関係を示す。最大成形荷重、 同軸度共に深穴比を大きくして行っても急激な変化は見られず、先行移動式パンチガイドの効果が発 揮され、最終的には図 5-41 に示す様にL/D=4.22 までの深穴成形を達成する事ができた。







図 5-41 L/D=4.22 を達成した深穴成形品

第6章 鍛造を対象とした硬質膜の摩擦摩耗評価と摩擦挙動の解明

### 6-1 研究目的及び目標

鍛造技術の高度化において、金型技術は最も重要な位置を占 める。その中でも潤滑は、加工精度と金型の寿命を決定する基 盤的な技術である。鍛造では、素材と金型の接触条件が厳しく、 素材の変形はほとんどの場合軸対称であるため、加工力と摩擦 力の分離が困難であり、荷重から摩擦状態を評価することは簡 単ではない。本研究では、初年度に、後方押出し加工(図 6-1) におけるパンチ引抜き荷重を測定することを決定し、基本的な 設計を行った。昨年度は摩擦測定装置を作製し、測定が可能で あることを示した。今年度の目標は、昨年度製作した摩擦測定 装置を用いて①摩擦試験による各硬質膜(株式会社北熱の開発 被膜と従来被膜)の摩擦力評価を行い、表面粗さ測定機を用い て②摩擦面の観察と③焼き付き状態の精密三次元形状解析を行 うこととした。



図 6-1 後方押出し加工の概略図

6-2 研究成果

(1) 摩擦試験による各硬質膜の摩擦力評価

# 塑性加工用摩擦試験機

試験機全体の外観写真を図 6-2 に示す。図 6-2 (a) は試験機全体、(b) はダイ部(試験機下部)で ある。(a)の上方のロードセルによって押出し加工時の荷重を測定し、その下の測定部によって引抜 き時の荷重を測定する。(a)のダイ部の上のセンタリング冶具を使って、パンチとダイのセンタリン グを行う。(b)のダイの上に固定した被加工材/パンチ分離治具(写真では半割り型の右半分を装着 している)によって、パンチ引抜き時に被加工材がパンチとともに上昇してしまうのを防ぎ、引抜き 荷重の測定を可能にする。(c)は試験片の例である。



図 6-2 塑性加工用摩擦試験機の外観図

押出しパンチに各種硬質被膜を施したものについて、後方押出し加工直後のパンチ引抜き荷重を測 定する。パンチ形状および母材の鋼種は昨年度と同じである。実験条件を表 6-1 にまとめる。

表 6-1 実験条件					
断面減少率	68.7	[%]			
試験片	S15C				
押込み量	4~6 [mm]				
パンチ母材	・チ母材 HAP-40 (HRC66)				
	CrN				
パンチ被膜の種類	MX (TiMoN)				
()は物質系	TX (T	iN)			
	被膜な	よし 各2本			
潤滑油	SRX-	230N			

後方押出し加工の断面減少率は68.7 [%]である。試験片は軟鋼のS15C と純銅のC1020Hである。押込み量は、4mm~6mmとした。被膜はCrN、MX (TiMoN)、TX (TiN)と被膜なしの4種類である。再現性を調べるため、同 じ被膜のパンチを各2本ずつ作製した。潤滑油は昨年度と同じSRX-230N を使用した。潤滑油は試験前に試験片全表面とパンチの加工部に塗布し た。パンチを交換するごとに、S15Cで実験を行う前に、パンチ中心のず れが無いことを確認するため、軟らかいC1020Hで試験を行った。試験片 は、図6-3に示す形状であり、昨年度と同じである。各種被膜の試験を まずC1020Hで2回行い、その後、S15Cで3回の試験を行った。加工荷 重と引抜き荷重測定の結果は、S15Cのみについて示す。



図 6-3 試験片(S15C) 形状

### 各種被膜パンチの加工荷重と引抜き荷重

図 6-4~7 に、各種被膜パンチの加工荷重線図を、図 6-8~11 に、引抜き荷重線図を示す。横軸はストローク [mm]、縦軸は荷重 [kN] である。パンチは2本ずつあるので、例えば CrN の場合、それぞれ CrN(1)、CrN(2) と表している。加工荷重の最大値は、被膜なしの場合も含めて、どの被膜の場合も約 580kN であった。

被膜による引抜き荷重線図の傾向の違いを以下にまとめる。

- ・CrN 被膜の場合は、引抜き荷重は徐々に上がり終盤で最大になる。その後徐々に荷重が下がる。
- ・MX 被膜の場合は、引抜き荷重は急に上がって最大になる。
- ・TX 被膜の場合は、引抜荷重は徐々に上がっていき終盤で最大になる。
- ・被膜なしの場合は、引抜き荷重が試験回数ごとに上がっている。

また、これらの傾向は、引抜き時のストロークが長い場合(押出し加工時のストロークが長い場合) も、ほぼ成り立っていることがわかる。







図 6-5 加工荷重線図(MX 被膜パンチ)



(a) TX(1)



















図 6-12 にストローク(引抜き量)が約 10mm になっている各種被膜パンチの引抜き荷重線図をまとめたものを示す。図 6-13 に各種被膜パンチの最大引抜き荷重を示す。CrN 被膜の場合が最も低く、TX 被膜は高い結果となった。



図 6-12 各種被膜パンチの引抜き荷重線図のまとめ



図 6-13 各種被膜パンチの引抜き荷重線図のまとめ

(2) 摩擦面の観察

### パンチランド部の光学顕微鏡観察

押出し加工直後の引抜き荷重の測定結果とともに、試験後の押 出しパンチと被加工材内径の表面状態も重要な情報である。まず、 試験後のパンチ表面の状態を調べた。図 6-14 に押出しパンチ表 面状態の観察場所を示す。観察場所はパンチランド部からパンチ 終端側のテーパ部にかけてであり、実加工において、損傷が一番 激しい箇所である。図の下側がパンチ先端側である。図 6-15 に 各種被膜パンチの試験後のこの部分の光学顕微鏡写真を示す。被 膜パンチの場合は、焼付きは見られず、被膜の剥離も発生してい なかった。被膜なしのパンチでは、ランド部全体にわたって、著 しいキズが生じていた。次節でパンチランド部の表面粗さを示す。



図 6-14 押出しパンチ表面 状態の観察場所



図 6-15 パンチランド部の光学顕微鏡写真(すべて試験後)

# パンチランド部と被加工材内径の表面粗さ

表面粗さの測定には、図 6-16 に示す株式会社東京精密・サーフコム 1400D-12 (R 面駆動部使用) を用いた。この装置は、一般的な表面粗さ試験装置では測定が困難な円筒形の外径円周方向の表面粗 さ測定と、測定部のセッティングの変更により、図 6-17 に示すような内径円周方向の表面粗さ測定 が可能である。今回は、S15C で3回試験した後にパンチランド部のパンチ終端側端部の表面粗さを測 定した。被加工材は、押出し加工後の試験片上端から 6mm の位置で内径の表面粗さを測定した。



図 6-16 表面粗さ測定機全体の外観

図 6-17 被加工材内径の測定

図 6-18~21 に、各種被膜パンチのランド部表面粗さ曲線を示す。横軸はストローク[mm]、縦軸は 荷重[kN]である。CrN 被膜の試験前後の表面突起が目立つ。

図 6-22~23 に、各種被膜パンチのランド部表面粗さの Ra、Rz を示す。Ra は、MX>CrN>TX の順に 大きい。Rz は、CrN>MX=TX の順である。MX 被膜、TX 被膜は Rz が小さいことがわかる。また、全体 的に試験後には試験前に比べて粗さが小さくなる場合のほうが多い。被膜なしの場合は、試験後に Ra、 Rz ともに著しく大きくなり、光学顕微鏡観察の結果、深くキズがついていたことと対応している。

なお、各種被膜パンチには焼付きが発生しなかったことから、当初の目標としていた焼き付き状態 の精密三次元形状解析は行わなかった。



(a) CrN(1)(b) CrN(2)図 6-18 CrN 被膜パンチのランド部表面粗さ曲線(上:試験前、下:試験後)



(a) MX(1) (b) MX(2)





(a) TX(1)







図 6-21 被膜なしパンチのランド部表面粗さ曲線(上:試験前、下:試験後)



図 6-22 各種被膜パンチのランド部表面粗さ(上:Ra、下:Rz)



図 6-23 被膜なしパンチのランド部表面粗さ(上:Ra、下:Rz)

パンチ表面のデータは3回試験後のもののみであるが、被加工材には各回の情報が残っていること から、回ごとの変化を示すことができる。

図 6-24~27 に、各種被膜パンチで加工した S15C 内径の表面粗さ曲線を示す。

図 6-28~29 に、各種被膜パンチで加工した S15C 内径の表面粗さの Ra、Rz を示す。これらの図よ り、TX 被膜は、1回目の加工後の Rz が低いが、回ごとに粗さが大きくなっていること、CrN 被膜と MX 被膜では回ごとの変化の傾向は不明瞭で、むしろ回ごとに粗さは小さくなっていることがわかる。被 膜なしでは、粗さの絶対値そのものが他の場合よりも大きいが、回ごとに粗さが大きくなっているこ とがわかる。







図 6-27 被膜なしパンチで加工した S15C 内径の表面粗さ曲線









図 6-29 被膜なしパンチで加工した S15C 内径の表面粗さ(上: Ra、下: Rz)

引抜き荷重測定値とパンチ表面状態、被加工材の内径表面状態を比較することによって、各 硬質被膜の摩擦特性を整理する。

まず、硬質被膜がある場合は試験後のパンチ表面の粗さにほとんど違いがないのに対して、 被膜なしのパンチでは著しい表面損傷が起こったこと(図 6-15、図 6-18~23)から、硬質被 膜の存在が後方押出し加工時の摩擦状態を効果的に緩和することが明らかである。

被膜がある場合を比較すると、引抜き荷重は開発被膜(MX, TX)がわずかに高く、従来被膜 (CrN)が低い結果となった(図 6-13)。株式会社ギフ加藤製作所による実機試験によると開 発費膜のパンチ高寿命化の効果は明確である。試験後の被加工材内径表面の粗さが低いこと

(図 6-28)が、パンチ/被加工材間の直接接触の割合が高いことを反映していると考えれば、 開発被膜のパンチ表面の粗さが低い結果として引抜き荷重が高くなったと考えることができ る。 第7章 硬質膜被膜金型のダイキャスト実機による溶着性評価

7-1 研究目的及び目標

近年の携帯電話やパソコン等情報家電製品に用いられる部品の肉厚は0.8mm 程度と薄肉化する傾向 がある。このためダイカスト鋳造時の圧力と温度はますます高くなり、金型の耐久性悪化が懸念され る。この対策として耐酸化性に優れる硬質膜(金型保護膜)が開発されているものの、酸化開始温度 が議論されているのみで、溶着物-硬質膜界面の反応や膜-金属間の親和性に関する情報は極めて少な い。また、硬質膜被覆金型の性能評価においても製品の寸法公差のみが評価対象となるため、未だに 金型設計上の問題と硬質膜性能の問題とが分別できないことが多い。

本研究の目的は、幅広薄肉試験金型を用いて、製品の寸法精度と対応する金型の寸法精度および金 型表面(硬質膜表面)の溶着物性状を比較調査し、その結果を電子家電部品用の幅広薄肉ダイカスト 技術の標準化に反映させることである。

本年度の研究では、複合硬質膜の評価とダイカスト諸条件の評価の2項目について試験を行なった。

複合硬質膜の耐溶着性と金型表面粗さの影響評価では、RN+UBMS-TiN 膜を被覆した幅広薄肉試験金型(THS-SC01)を用いて、マグネシウムダイカスト(AZ91D)の耐溶着性に及ぼす金型表面粗さの影響について調査した。

ダイカスト諸条件の評価では、複合硬質膜 RN+UBMS-TiN (スムース TX)を被覆した幅広薄肉模擬金型 (THS-SC02)を用いてマグネシウム合金ダイカスト成形を行い、成形サイクルタイムと過熱部冷却 との関係に付いて評価し、大型部品のダイカスト成形で採用が増えている真空(減圧)装置の小物薄 肉材での有効性を評価した。

7-2 実験方法

(1) 複合硬質膜の耐溶着性と金型表面粗さの影響評価

複合硬質膜の耐溶着性と金型表面粗さの影響調査は幅広薄肉試験金型(THS-SC01)を用いて、マグ ネシウム合金ダイカスト成形を実施した。ダイカスト合金は一般的に携帯電話やパソコン等情報家電 製品に多く用いられる MD1D(AZ91D)材とした。表 7-1 に化学成分を示す。

試験成形では1,000 ショット毎に5,000 ショットまで成形し、その後2,000 ショット追加し、トータル7000 ショットの成形を行なった。ダイカスト成形条件を表7-2 に示す。

ダイカスト合金が金型内に充填される際、特に溶着や溶損が発生し易いゲート部に一番近いE番について、光学顕微鏡による表面観察を行った。

試験金型の表面粗さはキャビティに湯流れ方向と平行に3分割し、 $0.3\mu m$ 、 $0.1\mu m$ 、 $0.02\mu m$ の3 水準の設定とした。以下に複合硬質膜の概略を示す。

• 母材 = SKD61

• 硬質膜 = RN+UBMS-TiN (スムースTX)

(RN; ラジカル窒化、 UBMS; アンバランスドマグネトロンスパッタ法、 スムース TX;開発膜UBMS-TiNの呼称)

種類	記号	化学成分							
1550	MIDIO	AL	Zn	Mrg	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
I種D	MDID	8.3~9.7	0.35~1.0	0.15以上	0.05以下	0.10以下	0.03以下	0.005以下	残部

表7-1 ダイカスト合金化学成分 (JIS)

成形機	50 トンホットチャンバー機
マグネシウム材	MDC1D (AZ91D)
溶湯温度(℃)	650
金型温度 (℃)	250
射出圧力(Mpa)	8.0
離型剤	水溶性

表 7-2 ダイカスト成形条件

### (2) ダイカスト諸条件の評価

キャビティ部に複合硬質膜 RN+UBMS-TiN 膜 (スムース TX) を被覆した幅広薄肉模擬金型 (THS-SC02) を用いてマグネシウム合金ダイカスト成形を実施し評価した。

過熱部冷却システムを評価するに際し、従来の小物薄肉材の成形条件をベースに金型開き時間を変化させて 300 ショットダイカスト成形し、成形サイクルタイムと過熱部冷却との関係について評価した。小物のダイカスト成形では、成形機は8トンから50トンクラスが主流であり、キャビティ部は割り型(積み木形のキャビティ構成)構造となっているため冷却経路が取れない事が多い。今回の研究に際しては、幅広薄肉模擬金型(THS-SCO2)を過熱し易い分流子部に冷却を通す金型構造とした。

真空(減圧)装置の小物薄肉材での有効性について評価を実施した。これまでの小物のダイカスト 成形では金型の寸法や成形機の寸法の制限があり、真空(減圧)装置を用いる事は稀であるが寸法精 度や外観品質の向上を果たすために導入した。成形システムを図 7-1 に示す。

評価方法は外観観察を主体とし、各条件のダイカスト成形品を目視及び光学顕微鏡で表面観察した。



図 7-1 成形システム

7-3 研究成果

#### (1) 複合硬質膜の耐溶着性と金型表面粗さの影響評価

マグネシウム合金ダイカスト製品は比重の軽さや比強度を生かして機能部品に主に使われてきた が、近年の傾向として分業化が進みユニットを組み込む電機部品メーカーが、最終ユーザーの電機製 品メーカー(組み立て)納入するようになった。その結果、ダイカストメーカーには外観の要求品質 が高く、機能上・強度上全く問題のない「湯じわ」「金型への溶着跡」であっても表面欠陥として問題 視される事がしばしば起こるようになった。この品質課題(表面欠陥)に対応するため、ダイカスト 成形では射出速度のアップや温調装置を用いた金型温度の強制的アップを行なう傾向にあり、金型に はマグネシウム合金が溶着し難く湯流れの良い表面処理が求められるようになった。

これまでの研究結果から、耐溶着性の優れる RN+UBMS-TiN を被覆し、面粗度を変えたキャビティで 溶着性を評価した。一定ショット数毎に成形機から金型を取り外し、キャビティの表面観察を光学顕 微鏡(×6.5 倍)で行なった。ダイカスト金型で幅広く採用されている KANUC(前年度に評価済)と 比較評価した。観察した写真を図 7-2 と図 7-3 に示す。ダイカスト成形条件は表 7-2 に示す。

#### 結果

①ショット数を計 7,000 ショットまで成形しても、面粗度 ( $Ra; 0.3 \mu m$ 、  $0.1 \mu m$ 、  $0.02 \mu m$ ) にか かわらずマグネシウム合金の溶着は確認されなかった。

②Ra; 0.3µm部にマグネシウム合金に溶損された跡(図の赤丸部)がショット数を重ねるのにしたがい拡大する傾向にあり、耐溶損の点では面粗度は低い(Ra<0.1µm)ことが望ましい。</li>
③Ra; 0.1µm、0.02µmについて外観の変化は確認されなかった。
④RN+UBMS-TINの溶着量は KANUC と同程度と確認された。

# <u>考察</u>

表面粗度の大小によるマグネシウム合金(MD1D)の耐溶着性の違いはなく、複合硬質膜 RN+UBMS-TiN は母材からの剥離が発生していない。耐溶着性は KANUC と同程度であり、成形品質安定化の効果が確認された。

試験鋳造スタート時	1,000 ショット後	2,000 ショット後
3,000 ショット後	4,000 ショット後	5,000 ショット後
7,000 ショット後		

図 7-2 RN+UBMS-TiNの状況



図 7-3 KANUC の状況

(2) ダイカスト諸条件の評価

成形機はホットチャンバー50トン機として、複合硬質膜 RN+UBMS-TiN 膜(呼称;スムース TX)を、 キャビティ部に被覆した幅広薄肉模擬金型(THS-SC02)を用いて、ダイカスト成形した。マグネシウ ム合金は MD1D とした。

過熱部冷却装置は、株式会社アーレスティテクノサービスのジェットクールユニット(JECSSmini) を用いて冷却回路を構成した冷却システム(Jet-Cool-System)とした。エアーパージする事により金 型内に不要な冷却水が残留せず、過冷却を防ぐ構造となっている。JECSSminiの仕様及び外観を図7-4 に示す。

	電源	AC100V
	消費電力	63W
2 -	消費エア一量	最大10NL
	使用エアー圧力	0.4~0.8Mpa
	使用水源	上水
	スタート信号	a接点
	高圧水量	0.6L/1サイクル
щ-њ	高圧水圧力	Max1.4Mpa
шЛ	エアーパージ圧力	0.7Mpa(供給エアー圧力)
	ポンプ	シリンダーポンプ



図 7-4 JECSSmini 仕様及び外観

① 過熱部冷却システム有無のサイクルタイムとび品質の評価

従来の小物薄肉材のダイカスト成形条件をベースとし、過熱部冷却システムを用いた場合は次の3 種類のタイマー時間をそれぞれ変化させて300ショットの成形を行った。ここではサイクルタイム短 縮の効果及び連続成形の安定性と外観品質を評価した。

a.「連続t」 金型に離型剤を塗布してから次の成形に入る時間を制御する。

b. 「型開t」 マグネシウム合金を射出後金型内に成形品を保持する時間を制御する。

c. 「離型剤 t 」 離型剤を塗布する時間を制御する。

評価は基準となる「従来成形」1条件と過熱部冷却を行なったものを13種の条件に変化させて行なった。

<u>結果</u>

a. 「連続 t」は 2.5 sec を 0.5 se 縮め 2.0 sec で安定して成形できる事が確認された。

b. 「型開 t」は 2.5 sec を 1.0 sec 縮め 1.5 sec で安定して成形できる事が確認された。

c. 「離型剤 t」は 1.2sec を 0.3Sec 縮め 0.9sec で安定して成形できる事が確認された。

Jet-Cool-System を用いる事により従来の成形サイクルの 20.1sec が外観品質を保持しながら 18.3sec となり 1.8sec のサイクルアップを確認した。表 7-3 に比較結果を示す。

成形機条件	単位	従来成形条件	JCS 使用の最良条件
メイン圧力	Mpa	9.0	9.0
射出圧力	Mpa	8.0	8.0
射出速度	m/sec	2.5	2.5
射出 t	sec	0.7	0.7
連続 t	sec	2.5	2.0
型開き t	sec	2.5	1.5
離型剤 t	sec	1.2	0.9
AIRt	sec	3. 0	3. 0
溶湯温度	°C	650	650
サイクルタイム	sec	20.1	18.3
金型温度	°C	250	250
成形安定性		0	0
製品外観		0	0

表 7-3	ジェット	、クールシステム	、有無によるサイ	イクルタイ	イムの比較結果
-------	------	----------	----------	-------	---------

冷却出遅時間	(sec)	2.0			
冷却通水時間	(sec)	4.0			
エアーパージ時間	(sec)	2.0			
冷却吐出圧力	(Mpa)	1.0			
エアー圧力	(Mpa)	0.4			
JCS の設定条件					

成形安定性 ◎ チョコ停もなく 300 ショット安定して連続成形出来る

製品外観 〇 目視で湯じわ、未充填が見られるが NG レベルではない

JCS=ジェットクールシステム (Jet-Cool-System)

# 考察

従来、小物ダイカストでは金型設計上の困難さから冷却回路設計を省く傾向があったが、今回の評価では体積や熱容積が小さい成形品でも過熱部の冷却を積極的に行なう事により成形サイクルを大きく縮める事が可能である事が確認された。1 サイクル 1.8sec の差は生産数で 400 個余り/日の数量アップとなり大きな生産効率のアップが望めるので、今後の金型設計に反映する計画である。

今回の評価では分流子のみジェットクールを入れる構造としたが、製品形状によっては過熱部がキ ャビティにも存在する場合があるので、小さなキャビティにジェットクールを入れ込む方法の検討を 進め引き続き検証する事が今後の課題である。

# ② 真空(減圧)装置の小物薄肉材での有効性の評価

先の評価試験で、最良の結果が得られたジェットクールシステムを用いた成形条件をベースとし、 成形機側の条件は変えずに真空(減圧)装置の有無による表面品質に対する有効性を評価した。

本装置は予めタンク内を真空状態に保持し、射出完了時間から設定時間後にバルブを開き金型内の 空気を抜き取る作動回路とした。図7-5に装置の仕様(設定値)及び外観を示す。



到達圧力 Pa 6.7×10<sup>-</sup>2 雪動擽出力 w 750

真空(減圧)装置

電動機出力	w	750
真空引時間	sec	4.0
ブロー時間	sec	1.0
真空タイミング	sec	1.1
ブロータイミング	sec	1.0

図 7-5 真空(減圧)装置仕様及び外観

結果

- a. 真空(減圧)を用いた成形品の方が湯じわがなく平滑であり真空(減圧)の表面品質改善対策 としての有効性を確認出来た。
- b. 真空タイミング時間設定は 1.1sec が限界でありそれよりも 0.1sec 短くすると射出前に金型内 にマグネシウム合金が充填されてしまう事が確認出来た。成形条件及び評価を表 7-4 に示す。

成形機条件	単位	真空(減圧)なし	真空(減圧)あり
JCS		あり	あり
メイン圧力	Mpa	9.0	9.0
射出圧力	Mpa	8.0	8.0
射出速度	m/sec	2.5	2.5
射出 t	sec	0.7	0.7
連続 t	sec	2.0	2.0
型開き t	sec	1.5	1.5
離型剤 t	sec	1.0	1.0
AIRt	sec	2.0	2.0
溶湯温度	°C	650	650
サイクルタイム	sec	18.3	18.3
成形安定性		0	$\odot$
製品外観		0	0

表7-4 成形条件及び評価

製品外観 〇 顕微鏡観察で湯じわ・未充填があるが外観レベル問題なし

○ 目視で湯じわ、未充填が見られるが NG レベルではない

JCS=ジェットクールシステム (Jet-Cool-System)

考察

小物ダイカストでは成形品自体の容積が小さいため、キャビティのガス量を考慮することが少なかったが、今回の評価では小物であってもガス抜きを積極的に行なう事によって品質の改善が図れる事が分かり、小物ダイカストに於いても真空(減圧)装置の有効性が認められる結果となった。

今後の課題としては充填時間が短いために真空(減圧)装置の反応タイミング制御がし難く 0.1sec を挟んでの制御が必要となり課題が残る結果となった。更なる品質向上のためにも今後も研究を進め て行きたい。

# 第8章 実用化の検討

# 8-1 目的

本研究は、鍛造金型やダイキャスト金型の焼付き性と溶着性を改善し、複雑形状化・高精度化・ 微細化する自動車部品と情報家電製品の量産技術を実用化するものである。ここでは【1】金型表面 処理、【2】鍛造金型による自動車用深穴成形部品及び【3】ダイキャスト金型による情報家電用薄肉 成形部品の実用化をめざした。実用化のイメージを下表に示す。



図 8-1 実用化へのイメージ

8-2 実施内容及び結果

【1】 金型表面処理の実用化

本年度は深穴成形パンチの保護膜として寿命向上効果が認められた TiMoN 膜の実用化について、以下の通り検討を行った。

(1) 生産にむけて

生産面では、深穴成形パンチ形状(製品形状、深穴比L/D)と製品材質を変更して再現性を確認 した。以下に量産試験した結果を示す。

深穴成形鍛造金型への適用(1)

・深穴成形品(S15C, L/D=1.5)の鍛造パンチへ, TiMoN膜を適用した.



従来Ti(C,N)膜:約20,000ショット → スムースMX膜:94,700ショット 従来Ti(C,N)膜に対して,4倍以上の寿命を示した.

図 8-2 深穴成型鍛造金型への応用(1)

深穴成形鍛造金型への適用(2)

・深穴成形品(KTCF15AF1. L/D=約4)の鍛造パンチへ, スムースMX 膜を適用した.



従来PVD膜:3,000ショット → スムースMX膜:10,000ショット 従来PVD膜に対して、3倍以上の寿命を示した.

図 8-3 深穴成型鍛造金型への応用(2)

また、量産に備え、炉のメンテナンスの影響を調査してコンタミネーションが膜質と深穴成形寿 命に大きな影響を与えることがわかった。この対策としての新たなメンテナンス方法を確立して効 果を確認した。ここでは他の膜種の成膜後でも炉を空焼きすることでコンタミネーションを防ぎ、 その後の深穴成形性能に影響を与えないことを確認した。



図 8-4 炉の空焼きの有無とコンタミネーション

(2) 今後の事業化に向けて

サンプル呼称をスムース TX およびスムース MX とし、ポスター作成と PR 用冊子を作成し、2008 しんきんビジネスフェアーに出展し技術紹介を行った。


図 8-5 PR 用ポスター

【2】 鍛造金型による自動車用深穴成形部品の実用化

精密鍛造成形では、TiMoN 膜被覆パンチとサーボプレスを用いて①アルミ製精密自動車部品の成形、 ②複雑形状部品の切削レスな成形および③L/D>4の深穴成形の実用化の目処を立てることができた。

H22年度以降に客先への提案制度を利用して実用化を目指す予定である。

【3】ダイキャスト金型による情報家電用薄肉成形部品

幅広薄肉材のダイカスト成形では、金型表面処理、金型冷却および真空装置を用いることで肉厚ば らつきがほとんどない平均肉厚 0.5mm の製品の成形に目処をたてた。しかし、評価ショット数が量産 数には至っていないので、H21 年度以降の量産評価後の実用化をめざす予定である。 第9章 全体総括

## 9-1 成果の総括

総じて計画とおりの進捗率を達成した。『金型表面処理技術の確立』、『超精密鍛造用金型の開発』および『幅広薄肉ダイキャスト用金型の開発』の連携がとれ、開発膜が鍛造金型とダイキャスト金型に 適用されたことによって、各々の分野で事業化に向けた成果が得られたことは高く評価される。

成膜技術では、スパッタ法による成膜コストをAIP法並みに低下させたことによって、高付加価値の機能材料混合硬質膜が商用生産品として大きく普及する可能性が得られたと考える。

特に開発膜が適用された鍛造金型では寿命向上効果が著しく、深穴成形以外の加工分野への適用も 大いに期待されるところである。また、サーボプレス援用技術により目標の複雑形状化・高精度化の 加工技術の実用化にも目処がたち、今後は川下ユーザへの提案を残すばかりとなった。

また、ダイキャスト金型でも平均肉厚 0.5mm の幅広薄肉成形を達成したことは、今後のダイキャスト成形の高精度化につながるものと期待できる。

本研究開発で『金型表面用保護膜』に関する特許を共同出願したことは、企業連携の成果といえる。 以下サブテーマごとに総括する。

### (1) 金型表面処理技術の確立

## 硬質膜の設計・成膜条件の確立

開発膜された混合硬質膜 TiMoN は、冷間鍛造の深穴成形用金型の保護膜として、従来比4倍の寿命 向上を達成することができた。この成果は、第118回表面技術協会講演大会で発表され、金型表面用 保護膜として特許(出願番号 2008-139452)も出願された。この技術は、深穴成形以外に絞り加工、 プレス加工などへの応用も可能と考えられ、自動車など電気・機械部品の加工金型に広範囲に適用さ れると期待される。スパッタ法は、任意に選択された機能材料を蒸発源とすることで容易に混合硬質 膜成膜を成膜できるので、加工材料や加工方法に応じた様々な膜種開発に優れる方法として期待され る。

### 硬質膜の物性評価と寿命評価

硬質膜および基材の劣化実態を、鍛造ショット数と硬質膜厚および基材硬さ分布の変化量から捉え た知見は、今後の硬質膜および金型設計に活かされるものと高く評価される。また、ダイカスト金型 の焼き戻しに伴う硬さ低下を精度良く検知する方法は、不測の金型破損について準備できるとともに リペア時期を適性に判断することに利用可能と思われる。いずれの検出方法も金型寿命を有効に活用 することにつながるため、今後の装置開発が期待される。

## 硬質膜の構造解析と成膜メカニズムの調査

TiAlN/BN 膜について、FE-TEM 観察および XPS 分析を実施して、TiAlN 相の粒界に BN 相が存在する ナノコンポジット構造を有することが証明された。同様に、CrAlN/a-C 膜の形成過程でも炭化物の生 成はなく、CrAlN 微結晶と a-C 相が混在するナノコンポジット膜が形成されることが証明された。こ のことは、本研究開発の基礎となった TiAlN/a-C 膜の形成過程に類似し、スパッタ法で機能材料を混 合・分散・積層した材料の物性を理解する上で非常に貴重な情報となった。

### (2) 超精密鍛造用金型の開発

### 硬質膜被覆金型の鍛造実機による摩擦摩耗評価とサーボプレス援用による超精密鍛造用金型の開発

焼付きが少ない TiMoN 被覆金型とサーボプレス用いた鍛造成形では、①アルミ製精密自動車部品の 成形、②複雑形状部品の切削レスな成形、③L/D>4の深穴成形を実用化レベルに達することができ た。これらの技術は、高度化技術として自動車部品の川下ユーザへの提案が予定され、事業化に大き な期待が寄せられる。また、鍛造パンチの温度測定では、パンチベアリング部損傷による急激な摩擦 抵抗の増加を温度変化として捉える事が出来たので、ハイサイクル生産における鍛造障害の予測シス テムとして実用化の検討を継続してもらいたい。

#### 鍛造を対象とした硬質膜の摩擦摩耗評価と摩擦挙動の解明

深穴成形において、パンチの引き抜き時の摩擦力から評価する方法で、様々な硬質膜の摩擦摩耗挙 動解析ができることが確認された。パンチ主軸長さの問題から芯出しにばらつきが生じることや真円 度測定器センサーの都合で焼き付き形状が測定困難となったことは反省される。パンチ主軸の設計見 直しとパンチの芯だし精度の向上をまって実機深穴成形との整合をとるべく継続研究が必要と考える。

#### (3) 幅広薄肉ダイキャスト用金型の開発

## 硬質膜被覆金型による幅広薄肉材のダイキャスト成形技術の確立

金型表面処理、金型冷却、真空装置の3つの要素を柱に成形条件を組立てる事で、幅広薄肉材のダイカスト成形の安定化が図れることができた。実機ダイキャスト成形では、肉厚ばらつきがほとんどなく平均肉厚0.5mmの製品を成形したことは評価に値する。しかし、ショット数が少ないので、寿命と寸法精度の再確認のための継続研究が必要である。

9-2 今後の事業化に向けた取組み

株式会社北熱では、開発膜の深穴成形に関する有効なデータが得られたことから、これらの成果を 本事業のアドバイザー;アイシン精機株式会社および同グループ企業への報告することは、事業化を 進めるにあたって重要な要素と考える。また深穴成形以外の鍛造加工に関する試作評価を継続的に行 うことは、金型および金型部品メーカーへの加工データの提供を可能とし、開発膜を金型および金型 部品メーカーの標準仕様に加える方法は事業の範囲を拡大するものと期待される。また、本研究の開 発膜の事業化範囲をさらに拡大するため、汎用金型部品の熱処理・機械加工・コーティングの一貫生 産を実施し、提案書に示したとおり低コストのプレコート汎用金型部品製造販売を計画的にすすめて もらいたい。提案書に示された性能目標はほぼ満足しているので、早期の事業化が待たれる。

製品	金属	成形方法	剥離臨界	酸化開始	塑性変形	焼付き高さ	
			荷重	温度	硬さ	溶着高さ	
深穴成形パンチ	Fe 系	冷間鍛造	>50N	>300°C	>30GPa	<5µm	
深穴成形パンチ	Al 系	冷間鍛造	>40N	>300°C	>25GPa	<5µm	
光ピックアップ部品	Mg 系	ダイキャスト	>30N	>600°C	>20GPa	<3µm	

金型表面処理の性能目標

株式会社ギフ加藤製作所では、開発膜とサーボプレスを用いて当初の目標である①アルミ製精密自動車部品の成形、②複雑形状部品の切削レスな成形および③L/D>4の深穴成形の事業化の目処がたてられている。本事業のアドバイザー;アイシン精機株式会社での評価やアイシン・エィ・ダブリュ株式会社での技術提案が、既に計画されているので、その後の事業化は確実に進むものと考える。同グループと協議する計画とされていることに期待したい。また、事業化目標のなかで性能はすべて満足しているので、現在の経済環境にあわせた販売量目標を再設定し、提案書に示されたとおり硬質膜被覆金型を用い現行鍛造機により成形する場合と超精密金型を用いてサーボプレスを援用した場合に分けて早期にすすめてもらいたい。

製品	鍛造機	L/D	サイクル	寸法公差*	金型寿命	販売量/年
現状ブレーキシリンダー	6段7十7	2.5	60	$\pm 15 \mu m$	10,000 個	8,760千個
新規ブレーキシリンダー	6段7十7	3.0	80	$\pm 10 \mu m$	20,000 個	16,800千個
新規電子機器部品	サーボブレス	3.5	100	$\pm 10$ µm	100,000 個	2,400,000 千個

超精密鍛造用金型の事業化目標

三晶技研株式会社では、硬質膜TXを被覆した幅広薄肉金型による薄肉成形(平均肉厚<0.5 mm)の 規格化(標準化)を実施し、電子機器メーカー(ソニー株式会社)へのサンプル提供により性能評価 が計画されている。これまでの点肉厚0.5 mmの世界から、平均肉厚0.5 mmの規格を達成する事業とし て進めてもらいたい。事業化目標のなかで、新規情報家電製品幅広薄肉筐体部の最低肉厚に相当する 点肉厚0.3 mmを早急に検証した後、現在の経済環境にあわせた販売量目標を再設定して事業化にあた ってもらいたい。

製品	鋳造機	点肉厚	平均肉厚	寸法公差*	金型寿命	販売量/年
現状光ピックアップ部品	15Ton	0. 4mm	2. 5mm	$\pm 4 \mu m$	200,000 個	20,000 千個
新規光ピックアップ部品	15Ton	0. 3mm	2. Omm	$\pm 3 \mu$ m	400,000 個	30,000 千個
新規情報家電製品	30Ton	0. 3mm	0. 6mm	$\pm4\mu$ m	300,000 個	10,000 千個
幅広蓮肉管体部						

幅広薄肉ダイキャスト用金型の事業化目標

## 生産

生産にあたっては、提案書に示された以下の役割分担を活用してもらいたい。

- 超精密鍛造金型については、株式会社ギフ加藤製作所が金型設計製作を行う。その熱処理及び 金型表面処理は株式会社北熱が受注し加工する。
- ② 株式会社ギフ加藤製作所は完成した金型を用いて、自動車用制動系部品及び自動変速機部品の 鍛造成形を実施する。
- ③ 一方、幅広薄肉ダイキャスト金型については三晶技研株式会社が金型設計製作を行う。
- ④ その熱処理及び金型表面処理は株式会社北熱が受注し加工する。三晶技研株式会社は完成した
  金型を用いて DVD 光ピックアップ部品及び小型薄肉筐体等の精密ダイカスト部品の製造を実施する。

5 また金型表面処理についてはプレコート用金型部品として、株式会社北熱が熱処理・設計製 作・コーティングの一貫生産を実施する。

## 販売

提案書に示した販売の方針は、以下のとおり継続する。

自動車用制動系部品及び自動変速機部品については、株式会社ギフ加藤製作所が本研究アドバイザーのアイシン精機株式会社やアイシン・エィ・ダブリュ株式会社へ販売し、最終的にトヨタ自動車を始めとする自動車各社製品に組み込まれる。DVD 光ピックアップ部品などのダイカスト製品については、 三洋電機株式会社、ソニー株式会社及びシャープ株式会社へ納入され、各社製品に組み込まれた後、 販売される。プレコート汎用金型部品は株式会社ギフ加藤製作所と三晶技研株式会社以外に一般の金 型設計製作メーカーや株式会社ミスミ等部品メーカーへ販売する。

# 市場獲得

提案書に示された以下の方針にしたがって市場獲得をすすめる。

事業化の第1段階としてのアイシン精機株式会社(アドバイザー)及び三洋電機株式会社と詳細な要求性能、形状、コスト等について検討し、自動車用制動系部品・自動変速機部品及び光ピックアップ市場における占有率を高めるための、商品開発を実施する。さらに自動車用電子部品、光通信、パソコン、携帯電話市場への展開も順次行っていく。