

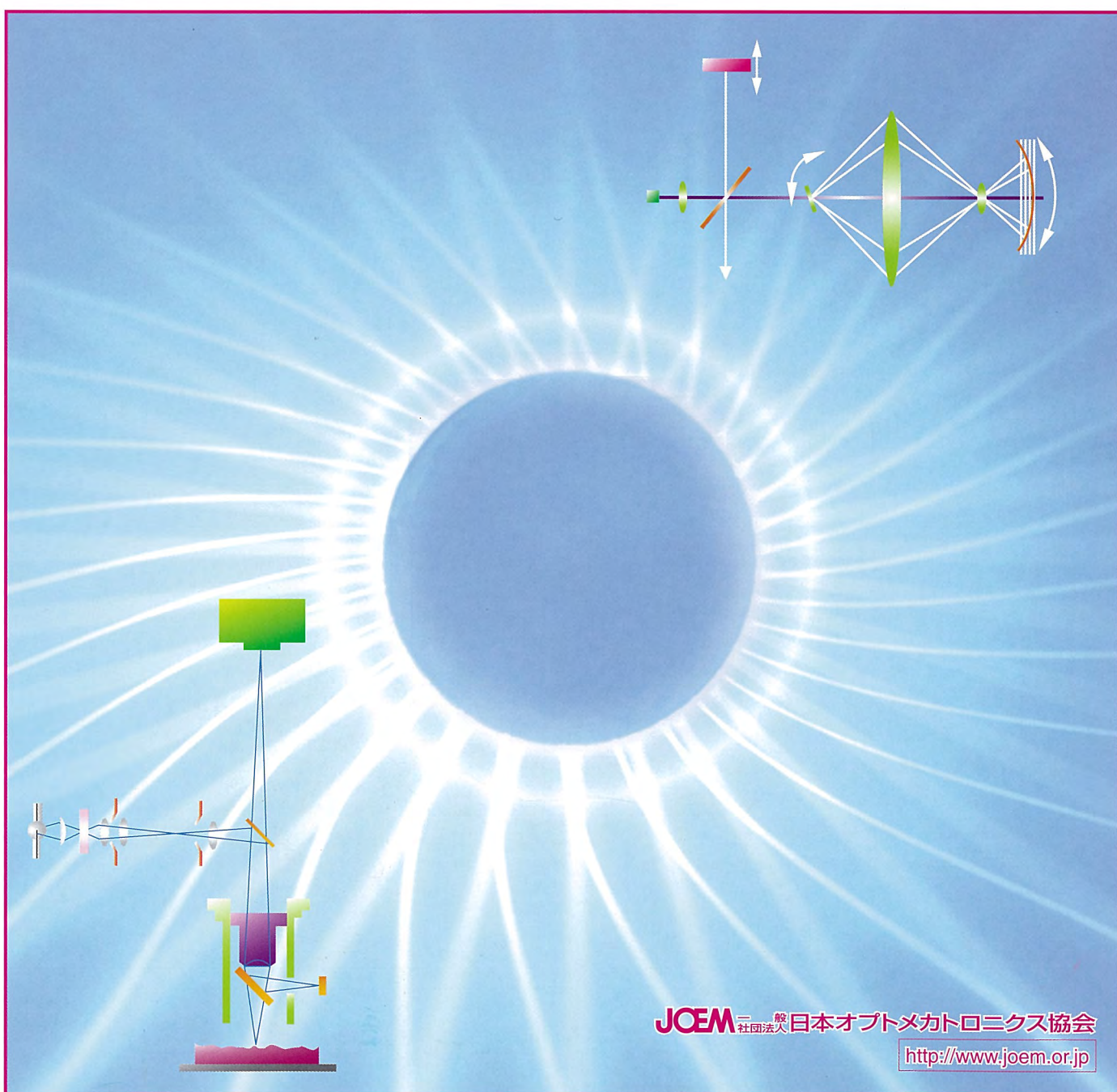
光技術 CONTACT

■特集：金型産業と光学技術●単結晶ダイヤモンド工具による超合金製金型の超精密切削●3Dナノ金型による光学素子製造技術●レンズ金型用離型膜へのDLCの応用●高精度ガラスモールド成形装置の概要●3Dプリンターとその応用、特に光造形法を中心に

'14 Vol. 52
通巻609

8

OPTICAL AND ELECTRO-OPTICAL ENGINEERING CONTACT



JOEM 一般社団法人 日本オプトメカトロニクス協会

<http://www.joem.or.jp>

光技術コンタクト

OPTICAL AND ELECTRO-OPTICAL
ENGINEERING CONTACT

'14 Vol. 52
通巻609

8

焦点：「光学設計者にとっての“設計制約”と“設計自由度”」	加藤 茂	1
■特集：金型産業と光学技術	(コーディネーター：初内正幸, 天神林孝二, 松田裕之)	
●単結晶ダイヤモンド工具による超硬合金製金型の超精密切削	鈴木浩文	3
●3Dナノ金型による光学素子製造技術	谷口 淳	9
●レンズ金型用離型膜へのDLCの応用	瀧 真, 安井治之, 神谷雅男, 滝川浩史	15
●高精度ガラスモールド成形装置の概要	松月 功	22
●3Dプリンターとその応用, 特に光造形法を中心に	萩原恒夫	30
オプトメカトロニクスミーティングカレンダー		39
JOEMレポート&インフォメーション		40
1. 技術部会活動一覧表		40
2. 技術部会の講演要旨		41
3. 人材育成事業		44
協会出版刊行物&研修会・セミナー及び他学会協会の催し物のご案内		46

Published monthly by

JOEM

JAPAN OPTOMECHATRONICS ASSOCIATION

3-5-22 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo 105-0011, Japan

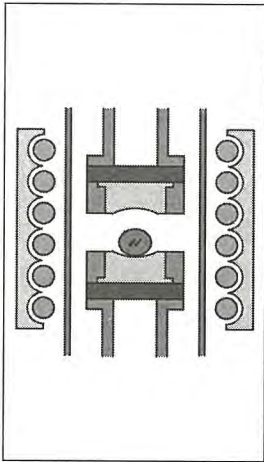
Distributed outside Japan by MARUZEN COMPANY, LTD.

INTERNATIONAL DIVISION EXPORT DEPT.

P.O. box 5050, Tokyo International 100-31 Japan

レンズ金型用離型膜への DLC の応用

株式会社オンワード技研
瀧 真



1. はじめに

少し前までは、カメラに使われるレンズはガラスの塊から切り出された母材や、予めほぼ製品に近い形にプレスされたレンズ母材を出発材料とし、研磨/ラッピングにより鏡面に仕上げるというプロセスを経て作られてきた。

しかし'80年代から、モールドプレス成形（図1）にてレンズとして利用可能な鏡面が得られるようになってきており、研削・研磨という厄介な工程が大幅に簡略化された他、非球面ガラスレンズも簡単に作れるようになった。

一般に球面レンズを使用する限り、どうしても球面収差の問題が生じることから、精密な光学系になるほど、何枚もの球面レンズを組み合わせ、これを補正することになる。ところが、非球面レンズを用いると複数枚のレンズを1枚で置き換えることが可能になる（図2）。

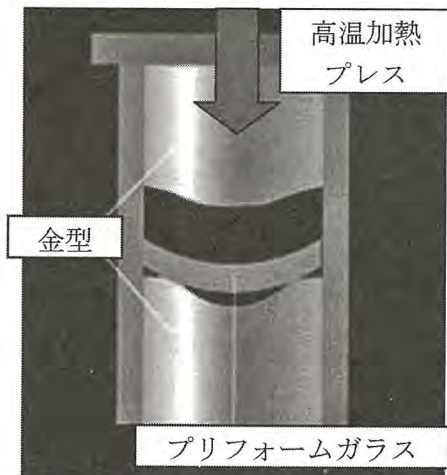


図1 モールドプレス製法の模式図

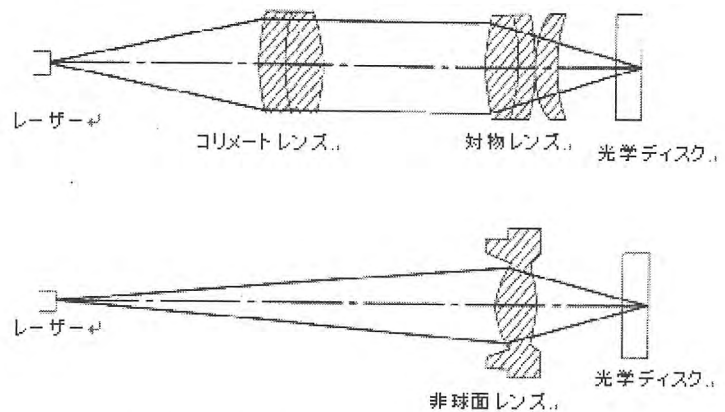


図2 CDピックアップレンズの非球面化
(三菱化学㈱HPより)

理想のレンズと言われる非球面レンズだが、その表面曲率は放物線・双曲線的な複雑な形状であるため、研削・研磨にて作るには、PC制御の研削装置か、完全な手作業にて時間を掛けて製作することになる。これに対し、モールドプレスの場合には、プリフォームと呼ばれるほぼ鏡面に仕上げられたガラス材料を、非酸化雰囲気下でガラスが軟化する温度まで加熱してプレスすることで、容易に高精度な非球面レンズを製作できる。このため、現在、モールドプレス法は様々なレンズの製造に幅広く利用されている。

ガラスレンズのモールドプレス用金型（レンズ金型）には、高温に耐え、プレスの衝撃にも耐えうるバインダレス焼結超硬合金（タングステンカーバイド：WC）や炭化珪素（B-SiC）が用いられている。しかし、ガラスの種類によっては融着しやすいため、型表面にガラスの離型性が良い保護膜が必

要となる。

離型性保護膜には白金 (Pt) 等を含む貴金属合金系とカーボン系があるが、酸素プラズマによる除膜・再コーティングが可能で、高硬度でキズ等も付きづらく、平滑性が優れるダイヤモンドライクカーボン (DLC) 膜の評価が高く、現在、最も多用されている。

モールドプレス法は、低コストで非球面ガラスレンズが製作できるが、実際には硝材や、型材などにより、曇り、割れ、ヒケ等の様々な問題を生じており、完全に研磨なしで成形できるわけではない。

また、さらなる光学系の小型化のため、より高屈折率ガラスのモールドプレスが求められており、これに伴い成形温度が上がる傾向があることから、より高い耐熱性を持つ DLC 膜の開発も望まれている。

2. DLC とは

2-1 DLC の種類

一口に DLC 膜と言っても非晶質の炭素膜というだけで、実際には様々な DLC 膜が市販されている。しかし、 sp^2 (グラファイト構造) 成分と sp^3 (ダイヤモンド構造) 成分の比率と、水素 (H) 含有であるかどうかで、図3の図を用いて概ね次の4種類に分類される^{1,2)}。 sp^2 成分を多く含む a-C (amorphous carbon), sp^3 成分を多く含む ta-C (tetrahedral amorphous carbon) と、それぞれに H を含んだ a-C:H, や ta-C:H の4つである。

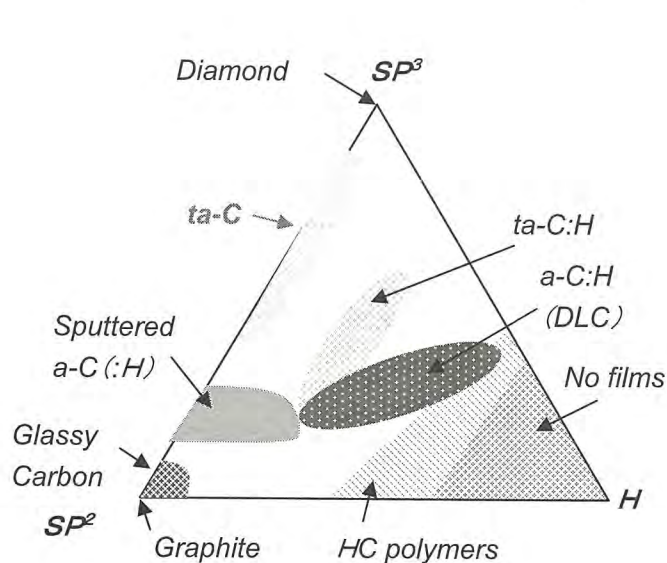


図3 DLC の分類

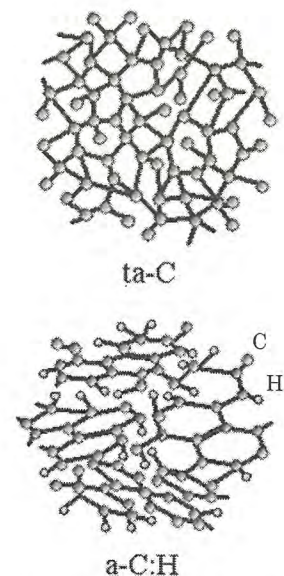


図4 各 DLC の分子構造の模式図

この内、a-C:H は最も一般的な DLC として、最も幅広く応用されている。この膜の成膜は主に、炭化水素系の原料ガスを熱フィラメントにより分解しプラズマ化するイオン源法 (PVD) や、高周波プラズマにより原料ガスを分解するプラズマ CVD 法 (PCVD 法) などが利用されている。

しかし、炭化水素系ガスを原料とする手法は、原料ガスに含まれる水素が膜中に混入し、これらが 500°C 程度で脱離し始め、それに伴い膜の脆性化が生じるため、レンズ金型用には適さない。そこで、レンズ金型用には、加熱 DLC と呼ばれる、成膜時に 300°C 以上まで加熱することで膜から水素を脱離させる手法がとられるが、これにより膜はグラファイト化するため、柔らかい a-C 膜となり十分な耐摩耗性が得るのが難しくなる。

これに対し、スパッタリング法や真空アーク法では、固体グラファイトを原料として成膜するため、膜中に水素が含まれない耐熱性の高い DLC 膜を成膜することができる。しかし、スパッタリング法では、そもそも sp^3 の比率が高い膜を成膜することが難しく、通常は実質的に前述の加熱 DLC に近い、

柔らかい a-C 膜しか成膜できない。

真空アーク法は固体グラファイトを陰極としてアーク放電させる手法で、 sp^3 の比率の高い高密度な膜が成膜でき、DLC の中では最もダイヤモンドに近い性質の膜が成膜できる。

しかし、アーク放電に伴い陰極からドロップレット（数 μ ~数十 μ m 程度の陰極材料微粒子）が放出され、生成膜に付着することで膜の平坦性が失われという大きな問題がある。

この問題の解決法としては、磁気フィルタによるドロップレット除去が有力であり、さまざまな形状のフィルタードアーク装置（FAD）が提案され、レンズ金型用の DLC の成膜装置として実用化されている。

我々のグループでは、積極的にドロップレットを捕集する機構を有する T 形状フィルタードアーク（T-FAD）法を実用化し、これをレンズ金型向け保護離型膜の成膜に応用している²⁾。

2-2 T-FAD

T-FAD 装置の概要を図 5 に、また実際の装置の外観を図 6 に示す。

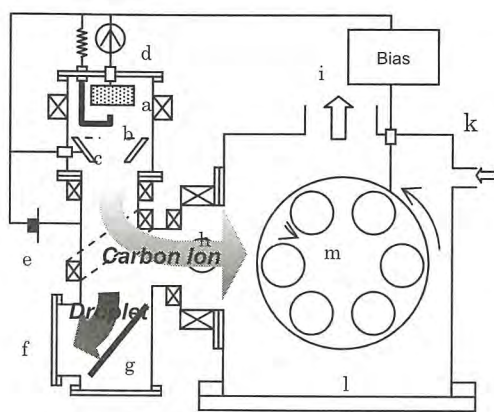


図 5 T-FAD 装置概要

- a) Graphite Target
- b) Trigger Electrode
- c) Anode
- d) DC power supply for arc discharge
- e) DC power supply for Duct Bias
- f) End pocket
- g) Reflector
- h) Scanner Coil
- i) To vacuum pump
- j) Rotor platform
- k) Gas inlet
- l) Process Chamber

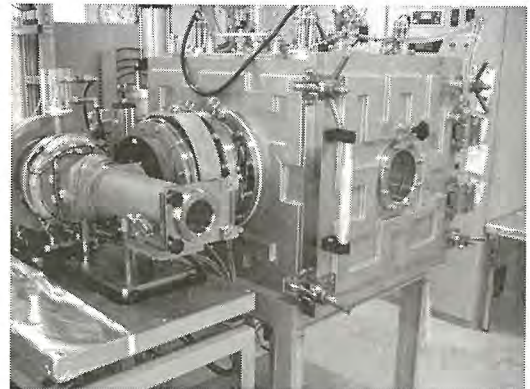


図 6 T-FAD 装置外観

同装置は黒鉛陰極の真空アークプラズマ源を備える。このプラズマ源は T 字状のプラズマ磁気輸送ダクトを介して、成膜プロセスチャンバと接続されている。カーボンプラズマはプラズマ発生部およびダクトに取り付けられた複数の電磁コイルが発生する磁界によって、Tダクト内で直角に曲げられ、プロセスチャンバに輸送される。黒鉛陰極から発生したドロップレットおよび中性粒子は磁界の影響を受けないため、陰極と対抗する方向に設置した延長ダクト（ドロップレット捕集ダクト）の方向に直進し、カーボンプラズマから除去される。

カーボンプラズマがチャンバ内に輸送されるダクトの出口には、プラズマビームスキャナコイルが設置されている。スキャナコイルの磁界はビームに垂直な鉛直方向をむいており、交流磁界によりビームを上下に振ることができる。また、基材を固定する台車には回転機構が組み込まれており、水平方向への成膜エリアを大幅に拡大させてある。

弊社の装置の場合、レンズ金型への成膜は標準で、 70×70 のエリアを 12 面同時に成膜しているが、より大きな $\phi 200$ 程度までの金型への成膜も別途対応可能となっている。

2-3 AC-X

弊社では上記 T-FAD 装置で成膜した ta-C を商品名 AC-X として、受託成膜している。以下、T-FAD で成膜した ta-C 膜を AC-X と記し、レンズ金型向け AC-X の諸特性を次に示す。

図 7 には AC-X を被覆したレンズ金型の一例を示す。また、図 8 には研磨済み超硬基材上に成膜した AC-X の原子間力顕微鏡（AFM）像を示す。

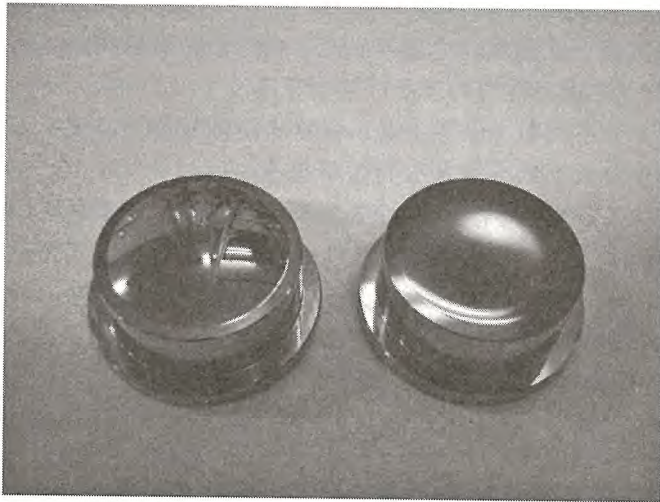


図7 AC-X被覆レンズ金型外観写真

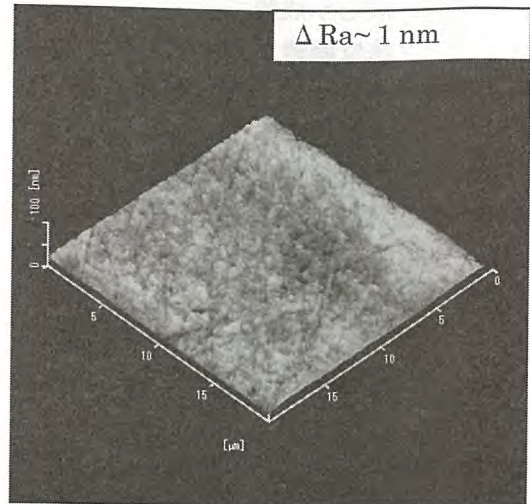


図8 AC-Xの表面AFM測定結果

通常のDLC (a-C:H)は黒色だが、AC-Xは非常に透明性が高いため干渉色を示し、膜厚によって色が変わる。また、図8のAFM像はバインダレス超硬基材 (Ra:1.5nm) 上にAC-Xを成膜し、その表面を観察した結果となっている。AC-X表面粗さ Ra:2.1nm だったので、成膜前後の粗さの差は $\Delta Ra : 0.6nm$ となる。これまでの実績より、レンズ金型用 AC-X の ΔRa は約 $\sim 1nm$ 程度となっており、十分な平滑性が得られている。

次に、図9にはAC-Xの光電子分光 (XPS) の測定結果を、図10にはAC-Xのナノインデンテーション硬さとヤング率の関係を示す。

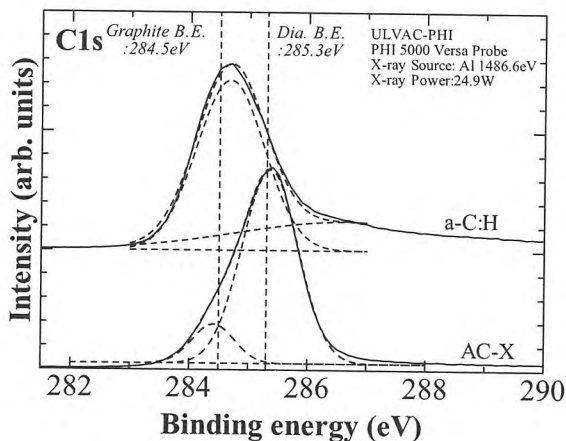


図9 AC-Xの光電子分光測定結果

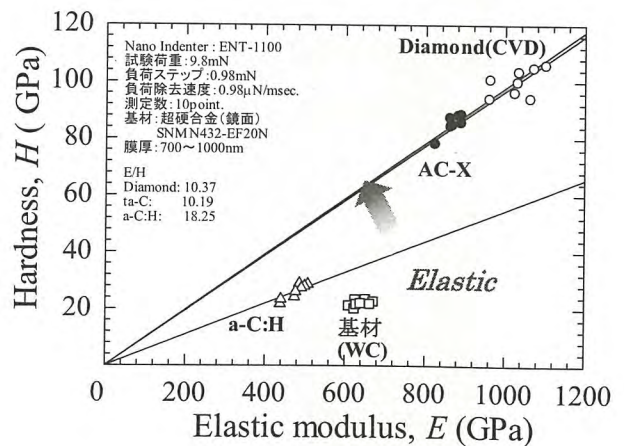


図10 AC-Xの硬さ/ヤング率の相関図

図9よりAC-Xの電子の結合エネルギーは $\sim 285.3eV$ と sp^3 の結合エネルギーと一致していることがわかる。ガウシアン関数でフィッティングし、面積比から算出した sp^3 の比率は86.9%と極めて高く、ダイヤモンドに極めて近い状態と言える。

図10からは、AC-Xの硬度 H とヤング率 E 及びその比 E/H はダイヤモンドに準ずる値を示しており、a-C:Hよりも明らかにダイヤモンドに近い物性であることがわかる。

E/H はあまり一般的ではないが、塑性指数の材料定数部分で、値が小さいほど変形のエネルギーを弾性的に蓄えるため、アブレッシブ磨耗に強いと言われている³⁾。

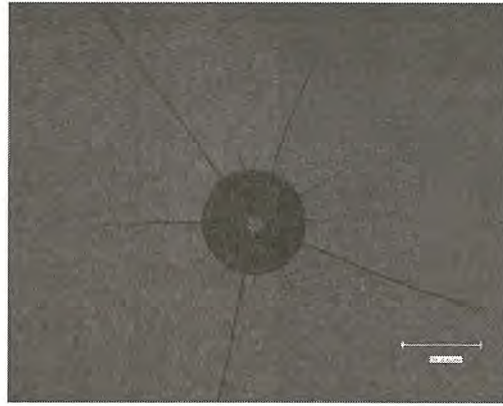


図 11 AC-X のロックウェル圧痕試験結果

図 11 には AC-X を成膜した超硬試験片上でのロックウェル HRC (150kg) 圧痕試験結果を示す。

これより、AC-X は圧痕の周りに顕著な剥離は見られず、基材の塑性変形に膜が追従していることがわかる。これはつまり、AC-X が高い密着力を持っていることを示している。

このように、AC-X はダイヤモンドに近い物性を持っており、従ってダイヤモンドと同様に優れた耐融着性と耐熱性を持つことから、レンズ金型向け離型膜として実用化されている。

3. レンズ金型用 AC-X の開発

3-1 ガラスモールドプレスの諸問題

弊社では受託加工でレンズ金型向けに AC-X を成膜しているが、表 1 に示したように実際のモールドプレスでは様々な問題が存在しており、膜にもこれらの対策が求められている。

しかし、残念ながら現状では解決が難しい問題も多く、また膜だけの問題ではなく、プリフォーム材の前処理や成形方法を含めたトータルでの対策が必要となることも多い。

表 1 ガラスモールドプレスにおける諸問題

トラブル	原因
張り付き	型表面のガラスに対する濡れ性
金型の曇り	ガラスからアルカリやホウ素が金型に付着
	膜の微小剥離 金型表面の粗さ
ヒケ	ガラスの内外温度差, 型材とガラスの熱伝導率の差
表面割れ	表面流動性不足, 低粘性
内部割れ	高粘性
金型の腐食	フッ化物等による金型の腐食
失透	結晶化～成形温度上昇

最近では、高屈折、低分散の光学特性が得られる、希土類酸化物系 (La_2O_3 , Gd_2O_3) 硝材の使用が増えており、これらがガラス転移温度を押し上げるため、膜の耐久性が不十分となり、曇りなどが発生しやすい傾向がある。

3-2 レンズの曇りについて

次に、具体的なトラブルの例として、レンズに曇りが発生した事例について紹介する。

図 12 には、曇りが発生した金型の中心部表面を SEM 観察した結果を示す。また、図 13 には曇りが発生したレンズの中心部分のエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) による測定結果を示す。



図 12 曇りが発生した金型中央部表面
SEM 観察結果×75 倍

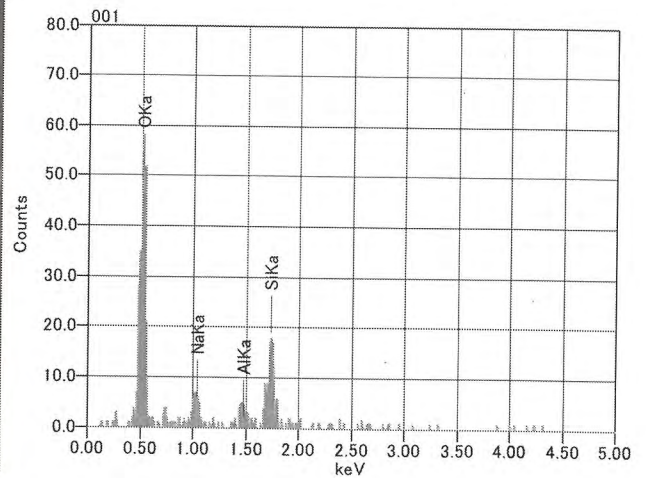


図 13 レンズ曇り部 EDS 元素分析結果

目視では金型の表面は十分に綺麗で、特に異常は見られないが、SEM 観察を行うと図 12 のように金型の表面に放射状に曇りが発生していることがわかる。この曇りは電子線の加速電圧を上げると見えなくなるため、極薄い不純物が金型の表面に付着していると推察される。残念ながら金型の付着物は極微量なため、分析にて特定するには至らなかった。

しかし、図 13 に示すように、金型の付着物に相対するレンズの表面に、硝材には含まれない Na が存在することがわかった。この結果より、ユーザにて検証した結果、工程外から Na がレンズに付着し、これが原因となって曇りが発生していた。

これは、一例ではあるが、曇りの発生には様々な原因が考えられ、多方面からの検討が必要となる。

3-3 Super AC-X (耐熱 ta-C:Si)

DLC に Si をドーピングすることで、耐熱性が向上することは広く知られているが、通常は Si をドーピングする手法として、テトラメチルシラン (TMS: $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$) ガスを導入して成膜する方法が用いられる。このため、T-FAD でこの手法を用いると、膜中に水素が混入してしまい、前述のように十分な耐熱性が得られない。

そこで、我々のグループでは TMS ガスを利用せずに、Si を ta-C にドーピングする手法を開発した。この手法で成膜した ta-C:Si 膜を、真空中 750°C で 1 時間加熱した後の SEM 像を図 15 に示す。図 14 には、比較例として同時に加熱した AC-X の SEM 像を示す。

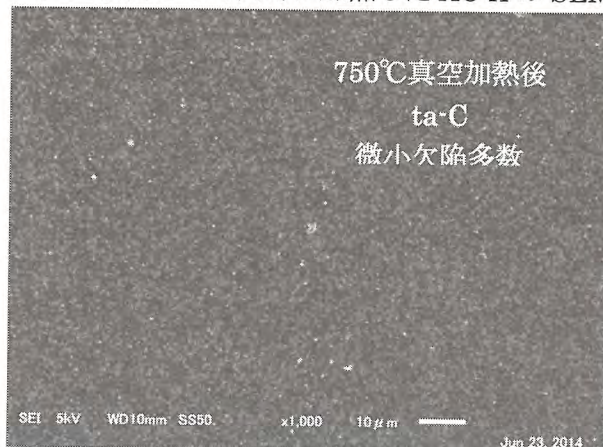


図 14 750°C真空加熱後 AC-X (ta-C) 膜
表面 SEM 像×1,000 倍

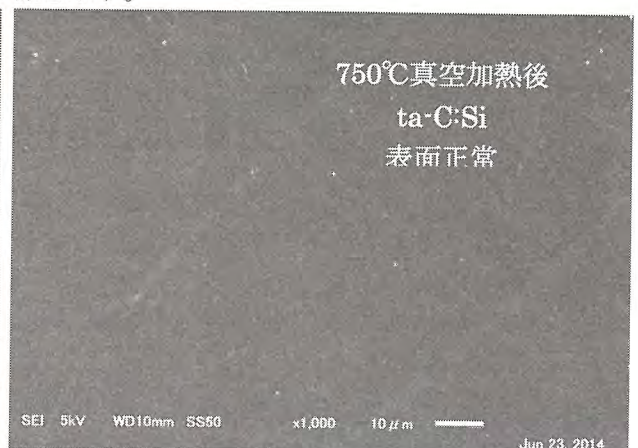


図 15 750°C真空加熱後 SuperAC-X (ta-C:Si) 膜
表面 SEM 像×1,000 倍

これより、AC-X では、膜の酸化/脱炭により膜が微小に消失し始めているのに対して、ta-C:Si 膜の表面は成膜直後から変化なく、正常な状態が保たれている。これより、新たに開発した ta-C:Si 膜が AC-X に比べ、より優れた耐熱性を持っていることがわかる。

また、実用に近いレンズ金型に ta-C:Si 膜を成膜し、テストサンプルを用いて 300 回のレンズ成形を行ったが、何ら問題は見出されなかった。

弊社では近日中に、この ta-C:Si 膜を商品名: SuperAC-X として、受託成膜を開始する予定である。

4. おわりに

DLC をレンズ金型用の離型膜として利用する場合、貴金属膜に比べて耐熱性が劣るという点が、DLC の弱点と言える。今回の Super AC-X はこの点を改良した ta-C 膜であり、レンズ金型だけでなく、様々な応用が期待される。

なお、実際のモールドプレスの現場では様々な問題を抱えながら、高精度なレンズのプレス成形が行われている。耐熱性だけでなく、その他の様々な問題の解決にも取り組んでいる故、何かあれば気軽にご相談させて頂ければ幸甚である。

5. 謝辞

本研究は JST 平成 19 年度重点地域研究開発プログラム事業の一環として行ったものです。ここに、JST に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) J. Robertson ; *Mat. Sci. Eng. R.*, 37, 129 (2002)
- 2) H. Takikawa, K. Izumi, R. Miyano and T. Sakakibara; *Surf. Coat. Tech.*, 163, 368, (2003) .
- 3) S. Miyake, T. Saito, K. Yu, T. Mikami, K. Ogata; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, 55, 669, (2004)
- 4) 寺井 良平; *マテリアルインテグレーション Vol.18 N0.9* , 10 (2005)



瀧 真 TAKI, Makoto
株式会社オンワード技研 技術研究開発部 研究室長, 企画開発室 室長
〒929-0111 石川県能美市吉原町ワ-13



安井治之 YASUI, Haruyuki
石川県工業試験場 機械金属部
〒920-8203 石川県金沢市鞍月 2-1



神谷雅男 KAMIYA, Masao
伊藤光学工業株式会社 技術部
〒443-0041 愛知県蒲郡市宮成町 3 番 19 号



滝川浩史 TAKIKAWA, Hirofumi
国立大学法人豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1