Microwave sheath-voltage combination plasma 法により 高速成膜された a-C:H:Si 膜の摩擦摩耗特性

中野 敏光^{a,*}, 上坂 裕之^b, 田中 一平^b, 柴沢 穂高^c, 北爪 一考^c, 橋富 弘幸^d

^a 岐阜大学 大学院工学研究科 生産開発システム工学専攻 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

^b 岐阜大学 工学部 機械工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

^c 名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市中種区不老町)

^d (株) CNK (〒448-0803 愛知県刈谷市野田町場割 28)

The Friction Property of a-C:H:Si Deposited by High-Speed Coating with Microwave Sheath-Voltage Combination Plasma Method

Toshimitsu NAKANO^{a,*}, Hiroyuki KOUSAKA^b, Ippei TANAKA^b, Hotaka SHIBASAWA^c,
Kazutaka KITAZUME^c and Hiroyuki HASHITOMI^d

^a Mechanical and Civil Engineering Division, Gifu University (1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193)

^b Department of Mechanical Engineering, Gifu University (1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193)

^c Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603)

^d CNK Co., Ltd. (Bawari 28, Noda-cho, Kariya-shi, Aichi 448-0803)

Microwave sheath-voltage combination plasma (MVP) is high-density plasma generated in the substrate vicinity. Plasma Chemical vapor deposition (CVD) with MVP enables deposit of a-C:H:Si film at much higher deposition rates than with conventional plasma CVD employing DC and RF plasmas. Nevertheless, the friction property of a-C:H:Si films deposited using MVP, where deposition rates are typically higher than 100 $\mu\text{m/h}$, have not been elucidated. Therefore, for this study, ball-on-disc friction tests of a-C:H:Si films deposited by MVP were conducted, where a steel ball (SUS304, JIS) is slid against a coated steel disk (S25C or SCM415, JIS) at a normal load of 9.8 N and sliding speed of 0.157 m/s under dry conditions in ambient air. The MVP-synthesized a-C:H:Si films with Si contents of 5.5-19.6 at% showed a friction coefficient of 0.025-0.12, indicating a friction coefficient of around 0.05, which has been reported often for conventional a-C:H:Si films, is possible by a-C:H:Si films deposited by MVP. A conventional a-C:H:Si film with silicon content of 7.2 at%, which was deposited using a commercial DC plasma CVD for comparison, showed a friction coefficient of 0.12 from the same test. For these films, the friction coefficient decreased with the hydrogen content in the film detected using Rutherford backscattering spectroscopy (RBS) - Elastic recoil detection analysis (ERDA). This tendency was not reported for conventional a-C:H:Si films. Compared to the hydrogen content, carbon and silicon contents in the film were detected using RBS-ERDA. The oxygen detected at the film surface using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) did not clearly correlate with the friction coefficient. Additionally, results show that the specific wear rate of a-C:H:Si film increases monotonically with the film's Si content. This result is similar to a tendency reported already for conventional a-C:H:Si films.

Keywords : PECVD, a-C:H:Si, Friction, RBS-ERDA

1. 緒 言

Diamond Like Carbon (DLC) 膜は高硬度であり、低い摩擦係数を示すことや高い耐摩耗性を示すことから自動車のエンジン部等の摺動部品に対して適用されている。また、DLC は Si や N, Ti 等を含有させることによって膜特性を変化させることが可能である^{1),2)}。このうち Si 含有アモルファス炭素膜 (a-C:H:Si) については膜中の Si 含有量が摩擦摩耗特性に大きな影響を及ぼすことが報告されている³⁾。

DLC 膜の成膜法として、Chemical Vapor Deposition (CVD) 法の一つであり、比較的取扱いの容易な DC プラズマ CVD

法が挙げられる。しかしながら、この方法では DC プラズマのプラズマ密度が低いことから、成膜速度が数 $\mu\text{m/h}$ 程度と低い⁴⁾。このため、大量生産を行うには多数の部品に対するバッチ処理を大きな炉内で行う必要があり、成膜装置の大型化に伴うコストの増大が課題となっている。

この課題の解決手段として Microwave sheath-Voltage combination Plasma (MVP) 法⁵⁾の利用が提案された。図 1 に MVP 法を用いたプラズマ CVD 装置の概略図を示す。ステンレス鋼製の真空チャンバにはポンプ、圧力計、ガス供給ライン、DC バイアス導入端子が設けられている。また、チャンバ下部には石英窓が設置され、そこに導電性の基材を保持するステンレス鋼製のジグ ($\Phi = 10 \text{ mm}$) が挿入される。治具および基材は石英によってチャンバから絶縁されており、DC

* E-mail : v3812103@edu.gifu-u.ac.jp

バイアス導入端子と直径 0.5 mm タングステン製のワイヤで接続される。チャンバは接地されている。石英窓の下方には導波管および 2.45 GHz のマイクロ波発振器が接続されている。マイクロ波発振器から発振されたマイクロ波は導波管および石英窓を通してチャンバ内に導入される。基材に対して負のバイアスを印加し、チャンバ下部の石英窓より 2.45 GHz のマイクロ波を投入すると、基材とプラズマ間のイオンシースとプラズマの境界に沿ってマイクロ波が表面波モードで伝搬する^{6),7)}。マイクロ波はプラズマにパワーを与えながら伝搬するため基材近傍において高密度のプラズマが生成される。本研究で用いる MVP 法ではこの基材近傍に生成される高密度のプラズマによって高速での成膜が可能となる。一例として、MVP 法を用いることにより 156 $\mu\text{m}/\text{h}$ に達する超高速での a-C:H:Si 膜の成膜が報告されている⁵⁾。このような従来の 100 倍程度の高速成膜が可能になると、小型炉で短時間の処理が可能になることによるコスト低減が期待されている。

現在この MVP 法を用いた a-C:H:Si 膜の超高速成膜法の実用化を目指した研究開発が進められているが、超高速で成膜された a-C:H:Si 膜の摩擦摩耗特性とその膜質との関係については未だ報告がなされていない。そこで本研究では MVP 法によって超高速成膜された a-C:H:Si 膜の摩擦摩耗特性および膜構造との関係を明らかにすることを目的とし、摩擦試験による摩擦・摩耗特性の評価と、Rutherford backscattering

spectroscopy (RBS) - Elastic recoil detection analysis (ERDA) および X-ray photoelectron spectrometer (XPS) を用いた膜組成の分析を行った。

2. 実験方法

2. 1 摩擦試験に用いた DLC 膜

表 1 に膜組成分析と摩擦試験に用いた DLC 膜の成膜条件を、表 2 に DLC 膜の膜特性をそれぞれ示す。MVP 法を用いて成膜された Si 含有量の異なる a-C:H:Si 膜を MVP-1 ~ MVP-6、PIG 法⁸⁾によって成膜された Si 非含有の DLC 膜 (a-C:H 膜) を PIG-1、DC プラズマ法によって成膜された a-C:H:Si 膜を DC-1 と呼称する。基板には MVP-1 ~ MVP-6 および DC-1 には S25C を PIG-1 には SCM415 を用いた。MVP-1 ~ MVP-6 の成膜では炭化水素ガスに CH_4 または C_2H_2 を用いた。また、Si 含有量は炭化水素ガスと Tetramethylsilane (TMS) の流量比を調整することによって制御した。

PIG-1 の成膜には神港精機社製 PIG 式 DLC 膜形成装置を用い炭化水素ガスに C_2H_2 を用いた。DC-1 の成膜にはプラズマ CVD 装置 (日本電子工業社製 JPC-815-6SC) を用い炭化水素ガスに CH_4 を用い、 CH_4 と TMS の流量比を 100:14 とした。

膜厚はカロテスト (ナノテック社製ボール研磨式測定器) によって測定した。また、膜硬度の測定にはマイクロビッカース硬さ試験機 (アカシ社製 HM-114) を用いた。

2. 2 摩擦試験

摩擦試験にはボールオンディスク型摩擦試験機 (新東科学社製トライボギア) を用いた。表 3 に摩擦試験条件を示す。試験は室温 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 、湿度 15-40% の大気中無潤滑下において行い、相手材に直径 8 mm の高炭素クロム軸受鋼ボール (SUJ2, JIS) を用いた。試験条件は垂直荷重 9.8 N、回転半径 6 mm、回転速度 250 rpm、試験時間 60 min とした。

Fig. 1 Schematic of a plasma CVD with MVP method for ultra-high-speed deposition of silicon doped DLC

Table 1 Deposition condition of DLC by MVP method

Sample name	MVP-1	MVP-2	MVP-3	MVP-4	MVP-5	MVP-6
Substrate bias	Voltage, V - 650					
	Pulse frequency, kHz 0.5					
	Duty ratio, % 50					
Microwave (2.45 GHz)	Power, kW 1.5					
	Pulse frequency, kHz 0.5					
	Duty ratio, % 25					
Gas flow rate, sccm	Ar 40					
	CH ₄ 200					
	C ₂ H ₂ 200					
	TMS 20					
Pressure, Pa	100					
Deposition time, min	6	2	2	12	12	12

Table 2 Friction test condition

Sample name	Film property		
	Hardness, HK	Film thickness, μm	Deposition rate, $\mu\text{m}/\text{h}$
MVP-1	1108	7.35	74
MVP-2	1086	3.23	97
MVP-3	1184	5.8	174
MVP-4	2721	2.41	12
MVP-5	2038	3.43	17
MVP-6	2153	3.2	16
PIG-1	1491	3.2	2
DC-1	2809	2.3	2

Table 3 Film property of DLC

Ball	Material	High carbon chromium bearing steel (SUJ2, JIS)
	Diameter [mm]	
Normal load [N]		9.8
Radius of rotation [mm]		6
Rotational speed [rpm]		250
Measuring time [min]		60 (Sliding distance = 565.2 m)
Lubrication condition		Dry

また、摩擦試験後に摩耗痕の断面形状を表面粗さ測定器(東京精密社製 SURFCOM 2900DX3)によって測定し DLC 比摩耗量を算出した。

2. 3 膜構造の分析

膜構造の分析として、成膜後の DLC 膜の未しゅう動部に対する RBS-ERDA 測定(神戸製鋼所製 HRBS500)および XPS 測定(アルバック・ファイ社製 Quantera)を行った。RBS-ERDA 測定は、水素を含む元素の組成比を分析するために行った。XPS 測定は通常表面から数 nm の層の情報を得られるとされるため、膜最表面の元素組成を分析するために行った。

RBS-ERDA 測定、XPS 測定ともに 1 試料につき 1 点測定を行い測定箇所は摩耗痕外の表面の大きな傷の無い面とした。また、測定前に Ar スパッタによって最表面の汚染物を除去した。RBS-ERDA 測定はエネルギー 2.3 MeV の He^{+} イオン照射し、散乱された He 粒子(He , He^{+} , He^{++})を半導体検出器により検出し得られた RBS スペクトルと ERDA スペクトルからシミュレーションフィッティングにより深さ方向の組成を求め、深さ 10 – 50 nm の各元素組成の平均を算出した。

XPS 測定は X 線源に $\text{AlK}\alpha$ 線を用い測定領域は直径 100 μm とし、得られた $\text{Cl}1s$, $\text{Si}2p$ および $\text{O}1s$ スペクトルから各元素組成を算出した。

3. 実験結果および考察

3. 1 膜の元素組成

表 4 に RBS-ERDA 測定によって得られた膜中深さ 10–50 nm の元素組成の平均および XPS 測定によって得られた膜最表面の元素組成を示す。

RBS-ERDA 測定の結果からは膜中には C, Si, H が含まれており、H 含有量は 24 – 34 at.% 程度と一般的な a-C:H 系膜と同程度であることがわかった。また、N や金属元素等の不純物は検出されなかった。

また、MVP 法によって成膜された MVP-1 ~ MVP-6 の水素含有量について見ると C_2H_2 を用いて成膜された MVP-1 ~ MVP-3 は CH_4 を用いて成膜された MVP-4 ~ MVP-6 に比べ分子 1 個あたりの水素原子数が少ないにもかかわらず膜中に水素が多く含まれていた。比較的高い圧力での成膜において CH_4 よりも C_2H_2 を用いて成膜された DLC 膜の水素含有量が多くなるのが S. Peter らによって報告されている⁹⁾。この報告において炭素原子の堆積速度に対し C_2H_2 は CH_4 と比べて多くのラジカルが基板に入射しており、その結果、圧力の

上昇に伴い C_2H_2 の入射炭素原子 1 個当たりのイオンエネルギーは CH_4 よりも低下することが示されている。また、入射炭素原子 1 個当たりのイオンエネルギーの減少は水素含有量の増加につながることから、比較的圧力の高い範囲においては C_2H_2 を原料ガスに用いて成膜された DLC 膜は CH_4 を用いて成膜された DLC 膜に比べ水素含有量が高くなるとされている。本実験においては 75 Pa と比較的高い圧力での成膜であることから、 C_2H_2 を用いて成膜した場合ラジカル堆積量の増加とそれに伴う入射炭素原子 1 個当たりのイオンエネルギーの減少によって水素含有量が多くなったと考えられる。

XPS 測定の結果からはそれぞれの膜からは酸素が検出され、MVP-1 には O が 4.2 at.% 含まれていた。MVP-2 ~ MVP-6 および DC-1 にも 0.75 ~ 2.2 at.% 程度含まれていることがわかった。一方で Si を含有しない PIG-1 には O が 0.17 at.% しか含まれていなかった。Si を含有している MVP-1 ~ MVP-6 および DC-1 は、Si 比含有の PIG-1 に比べ O 含有量が多いことから検出された膜表面の O は成膜後に Si と大気中の酸素や水分とが反応して取り込まれたものではないかと考えられる。また、MVP-1 が最も多くの O を含んでいたのは成膜中にチャンバ壁に残留していた水分等を由来とする酸素が膜中に侵入したことによるものではないかと考えられる。

3. 2 摩擦試験結果

表 5 に各試験片の摩擦係数および DLC 比摩耗量を示す。また、図 2 (a) ~ (h) に各試験片のすべり距離に伴う摩擦係数の変化を示す。すべり距離が 250 m から 450 m における摩擦係数の平均値を各試験片の摩擦係数とした。

摩擦係数を見ると Si を含有していない a-C:H 膜である PIG-1 の摩擦係数は試験開始後徐々に上昇を続け、摩擦係数は 0.3 で安定した。一方で a-C:H:Si 膜の MVP-1 ~ MVP-6 および DC-1 の摩擦係数はなじみ過程を経た後に 0.025 ~ 0.12 で安定した。MVP1 は摩擦係数 0.025 と比較的低摩擦であったのに対し MVP4 のように摩擦係数 0.118 と高いものまである。その差は試験片毎に膜組成が異なっていることによるものと考えられる。

以上の結果から、MVP 法によって高速成膜された a-C:H:Si 膜は a-C:H 膜である PIG-1 よりも低い摩擦係数であり、a-C:H:Si 膜である DC-1 と同じかそれ以下の摩擦係数であることが示された。

このことから、MVP 法によって高速で成膜された a-C:H:Si 膜においても Si 含有量等を適切にすることで従来法によつ

Table 4 Chemical composition of DLC film for determined by RBS-ERDA and XPS analysis

Sample name	RBS-ERDA, at.%				XPS, at.%		
	C	Si	H	O	C	Si	O
MVP-1	58.39	5.55	33.50	2.56	88.09	7.76	4.15
MVP-2	58.02	10.22	31.63	0.00	85.74	12.76	1.5
MVP-3	52.68	15.44	31.88	0.00	77.93	20.86	1.21
MVP-4	66.20	7.10	26.64	0.00	89.72	8.73	1.55
MVP-5	62.43	9.47	27.99	0.00	85.44	13.82	0.75
MVP-6	51.91	19.56	28.36	0.00	69.34	28.43	2.23
PIG-1	75.39	0.00	24.12	0.00	99.83	0.00	0.17
DC-1	63.53	7.24	28.97	0.00	87.95	9.96	2.1

Table 5 Friction coefficient and specific wear rate of DLC obtained by friction test

Sample name	Friction coefficient, μ	Specific wear rate, $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$
MVP-1	0.025	8.6×10^{-8}
MVP-2	0.083	4.3×10^{-7}
MVP-3	0.062	6.0×10^{-7}
MVP-4	0.118	3.9×10^{-7}
MVP-5	0.111	6.0×10^{-7}
MVP-6	0.094	1.1×10^{-6}
PIG-1	0.301	6.8×10^{-8}
DC-1	0.120	3.4×10^{-7}

Fig. 2 Friction of (a) MVP-1, (b) MVP-2, (c) MVP-3, (d) MVP-4, (e) MVP-5, (f) MVP-6, (g) PIG-1, and (h) DC-1 slid against SUJ2 ball behavior as a function of number of sliding distance

て成膜された a-C:H:Si 膜と同程度かそれ以下の摩擦係数を得ることが可能であることが示された。

DLC 比摩耗量について見ると a-C:H:Si 膜である DC-1 では DLC 比摩耗量は $3.4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ であり, a-C:H 膜である PIG-1 は $6.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ であった。一方で, MVP 法で成膜された a-C:H:Si 膜の中で最も比摩耗量が低かった MVP-1 では $8.6 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ であり, PIG-1 と同程度であった。このことから MVP 法によって高速で成膜された a-C:H:Si 膜においても Si 含有量等を適切にすることによって a-C:H 膜と同等の耐摩耗性を得られることが示された。

3. 3 膜中元素組成と摩擦係数の関係

図 3 に RBS-ERDA 測定によって得られた膜組成と摩擦係数の関係を示す。

図 3 (a) に示す C 含有量と摩擦係数の関係から C 含有量と摩擦係数には明確な相関が得られなかった。

図 3 (b) に示す Si 含有量と摩擦係数の関係から MVP によって高速成膜された a-C:H:Si 膜は, a-C:H 膜である PIG-1 よりも低い摩擦係数を示した。このような a-C:H 膜に比べ Si を含有した a-C:H:Si 膜が低摩擦係数を示すことは森らの既報⁴⁾と同様の結果であった。

MVP-1 ~ MVP-6 について見ると Si 含有量と摩擦係数の関係に明確な相関が得られなかった。このことから Si 含有量以外に摩擦係数の低下に影響を与える膜組成が存在すると考えられる。

図 3 (c) に示す H 含有量と摩擦係数の関係から水素含有量が多くなるに従い摩擦係数が低下する傾向にあることがわかる。このことから MVP 法によって成膜された a-C:H:Si 膜の摩擦係数に H 含有量が影響を与えていると考えられる。

3. 4 膜中元素組成と DLC 比摩耗量の関係

図 4 に RBS-ERDA 測定によって得られた膜中元素と DLC

Fig. 3 Friction coefficient of DLC film as a function of (a) C, (b) Si, and (c) H contents in the film determined by RBS-ERDA analysis

比摩耗量の関係を示す。C 含有量や H 含有量とは相関せず, Si 含有量が 5.5-19.6 at.% の間で増加するに伴い DLC 比摩耗量が $8.6 \times 10^{-8} - 1.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ に増加する傾向が見られた。この様に Si 含有量が 5 at.% を超えるあたりから Si 含有量の増加に伴い耐摩耗性が大きく低下する傾向は既報⁴⁾と同様であった。

3. 5 酸素含有量と摩擦係数および DLC 比摩耗量の関係

図 5 に XPS 測定によって得られた膜最表面の O 含有量と摩擦係数および DLC 比摩耗量との関係を示す。a-C:H:Si 膜の最表面の O 含有量と摩擦係数の関係においては, a-C:H:Si 膜中の H 含有量との関係(図 4 (c))でみられたような明確相関はなかった。また, a-C:H:Si 膜の最表面の O 含有量と比摩耗量の関係においては, a-C:H:Si 膜中の Si 含有量との関係(図 5)でみられたような明確な相関はなかった。このことか

Fig. 4 Specific wear rate of DLC film as a function of (a) C, (b) Si, and (c) H contents in the film determined by RBS-ERDA analysis

ら膜最表面に O が含有されていることによる摩擦摩耗特性への影響はほとんどないと考えられる。

4. 結 言

本研究では MVP 法によって高速成膜された a-C:H:Si 膜の大気中無潤滑下での摩擦試験による摩擦係数および耐摩耗性の評価を行い、従来法で成膜された a-C:H 膜および a-C:H:Si 膜との比較を行った。さらに RBS-ERDA および XPS を用いて膜中および膜最表面の組成を調べ、膜組成の違いが摩擦摩耗特性に与える影響を調べた。その結果を以下にまとめる。

(1) PIG 法によって成膜された Si を含有しない a-C:H 膜の摩擦係数は 0.3 であり、DC プラズマ法によって成膜された Si 含有量 7.2 at.% の a-C:H:Si 膜の摩擦係数は 0.12 であった。一方同じ摩擦試験において、MVP 法によって高速成膜された a-C:H:Si 膜は、Si 含有量が 5.5～19.6 at.% 程度の範囲において、0.025～0.12 の摩擦係数を示した。このことから、MVP 法によって高速成膜された a-C:H:Si 膜は Si 非含有である a-C:H 膜よりも低摩擦であり、Si 含有量を適切に調節することにより従来の DC プラズマ法によって成膜された a-C:H:Si 膜と同程度もしくはより低い摩擦係数を得ることができると示された。

(2) MVP 法および従来の DC プラズマ法によるプラズマ CVD によって成膜された a-C:H:Si 膜は、Si 含有量が 5.5～19.6 at.% 程度の範囲において、摩擦係数は Si 含有量との間に明確な相関を示さず、ばらついていた。これらの膜の摩擦係数を、水素含有量で整理すると水素含有量が 24.1～33.5 at.% の範囲で増加するに伴い摩擦係数が 0.3 から 0.025 に低下する傾向が示された。このことから、a-C:H:Si 膜の大気中無潤滑下での摩擦試験において、Si 含有量以外に水素含有量が摩擦係数に影響を与えていることが示された。

Fig. 5 (a) Friction coefficient and (b) specific wear rate of DLC film as a function of O content determined at film surface by XPS

(3) MVP 法によって高速成膜された a-C:H:Si 膜は Si 含有量が 5.5～19.6 at.% の間で増加するに伴い DLC 比摩耗量が $8.6 \times 10^{-8} \sim 1.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ まで増加する傾向が見られた。また、PIG 法によって成膜された a-C:H 膜の DLC 比摩耗量は $6.8 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ であり、従来の DC プラズマ法によって成膜された a-C:H:Si 膜は $3.4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ であった。このことから MVP 法によって高速成膜された a-C:H:Si 膜は Si 含有量を適切に調節することによって a-C:H 膜と同程度の耐摩耗性を得ることが可能であること示された。また、Si 含有量の増加に伴い耐摩耗性が低下する傾向は従来のプラズマ CVD 法による a-C:H:Si 膜での既報⁴⁾の傾向と同様であった。

謝 辞

本研究の一部は、JST Astep シーズ育成タイプ(AS2525015K)および JSPS KAKENHI (16H04256)の助成を受けて実施された。また、RBS-ERDA 分析は、JST CREST (テーマ：超低摩擦機械システムのためのトライボ化学反応を制御したナノ界面創成)の助成を受けて実施された。

(Received April 27, 2017 ; Accepted September 27, 2017)

文 献

- 1) N. Umehara ; Proceedings of the International Tribology Conference Nagasaki, 1007 (2000).
- 2) T. Saitoh, S. Miyake, S. Watanabe ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **53**, 606 (2002).
- 3) K. Nakanishi, H. Mori, H. Tachikawa, K. Itou, M. Fujioka, Y. Funaki ; *Surface & Coatings Technology*, **200**, 4277 (2006).
- 4) H. Mori, N. Takahashi, K. Nakanishi, H. Tachikawa, T. Ohmori ; *J. Surf. Finish. Soc. Jpn.*, **59**, 401 (2008).
- 5) H. Kousaka, Y. Takaoka, N. Umehara ; *Procedia Engineering*, **68**, 544 (2013).
- 6) H. Kousaka, N. Umehara, K. Ono, J. Xu ; *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**, 1154 (2005).
- 7) H. Kousaka, J. Xu, N. Umehara ; *Vacuum*, **80**, 1154 (2006).
- 8) N. Terayama ; *Journal of Plasma and Fusion Research*, **87**, 548 (2011).
- 9) S. Peter, K. Graupner, D. Grambole, F. Richter ; *Journal of Applied Physics*, **102**, 053304 (2007).