

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686069

研究課題名（和文）窒化クロムの元素置換による正方晶化：要因解明と超高硬度材料の新規合成

研究課題名（英文）Crystal structure change in CrN by atom substitution: Factor elucidation and preparation of new super hard material

## 研究代表者

鈴木 常生（SUZUKI TSUNEO）

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：00313560

## 研究成果の概要（和文）：

ドリル等の切削工具に被覆される硬質薄膜の高硬度化は、切削の高効率化に直結する。そのための新しい硬質材料を開発した。窒化クロムに酸素を固溶させた新物質 Cr(N, O) が高硬度と高い耐酸化性を示すことを確認した。酸素含有量の増加に伴い Cr サイトの空孔が導入されて岩塩型構造を保つことが分かった。酸化マグネシウム単結晶基板上にも同様の薄膜を作製することにより結晶子サイズの大きな結晶が作製でき、酸素の置換が明確となり、さらに高い耐酸化性の要因を明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

Hardening of coated thin films on cutting tools can increase an efficiency of cutting process. We have developed new material. The new material Cr(N, O), where O atoms are substituted for N atoms in CrN lattice, showed high hardness and superior oxidation resistance. It was found that the crystal structure kept NaCl type in spite of O atom substitution, since vacancies in Cr site were introduced with increasing oxygen content. Also, Cr(N, O) thin films with large crystalline size were successfully prepared on MgO single crystal substrate. These thin films revealed the oxygen substitution clear, and cause of high oxidation resistance.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2011 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2012 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	19,600,000	5,880,000	25,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学、材料加工・処理

キーワード：硬質薄膜・パルスレーザー堆積法・遷移金属窒化物

## 1. 研究開始当初の背景

金属の切削加工に用いられるエンドミル等工具は、特性改善のために硬質材料が薄膜としてコーティングされている。硬質薄膜材

料として主に研究されている材料として、ダイヤモンド、DLC、c-BN、TiN や CrN に代表される遷移金属窒化物が挙げられる。これらの材料は非常に魅力的な特性を有するもの

の、重大な欠点を含むものもある。ダイヤモンド・DLCの炭素系薄膜は、最も需要のある鉄鋼材料の加工に使用できないという欠点を持つ。ダイヤモンドに次ぐ硬度のc-BNはその非常に大きな内部応力が薄膜形成後に剥離を招いてしまうため、切削工具用硬質薄膜として実用化には至っていない。以上から、遷移金属窒化物系が現在の硬質薄膜材料の主流となっている。1990年代以降、脱切削油加工化・高速加工化に加えて、加工材の難削化の背景からTiNやCrN等への元素添加による特性改善の研究が行われるようになった。遷移金属窒化物への元素添加による高硬度化は、①第3元素添加による置換固溶硬化②微細組織化・ナノコンポジット構造による高硬度化、の2つがある。

研究代表者はパルスレーザー堆積法(Pulsed laser deposition: PLD)により、酸素を積極的に取り込ませたCr(N, O)固溶体の合成に成功し、その結晶構造、機械的特性についての報告を行った。薄膜内の酸素はCrNのNサイトに置換固溶しており、作製された薄膜はCrNの同様のB1構造を有していた。薄膜の硬度は酸素固溶量の増加に伴い上昇し、最大でHV3700(37 GPa)の硬度を示した。これはCrNの硬度(20-22 GPa)を大きく上回っており、Cr(N, O)が切削工具用硬質薄膜材料として十分使用できるものであることを明らかにした。また酸素添加により、800°Cにおいても岩塩型構造を維持することから、高い耐酸化性をもつことも明らかである。CrNの成膜時に酸素を導入することで合成されるCr(N, O)薄膜は、現在のCrNコーティングの製造ラインに比較的容易に応用できることが予想される。しかしながらCr(N, O)薄膜の酸素含有量増加に伴う高硬度化のメカニズムは明らかにされていない。このことは、現在の材料設計指針にはない新たな要因が存在する可能性を意味する。この要因を明らかにすることで、硬質薄膜材料設計の新たな指標を得られると考える。

## 2. 研究の目的

Cr(N, O)の酸素含有量増加に伴う特性向上の要因は、現在明らかにされていない。その理由の一つとして、系統だった酸素含有量の制御が可能な成膜手法が無いことが挙げられる。これまで、PLDによるCr(N, O)薄膜の合成は、成膜雰囲気として真空チャンバー内の残留酸素と導入された窒素またはアンモニアガスを用いていた。そのため雰囲気中の酸素分圧は、成膜バッチ毎に僅かながらの誤差を生じてしまい、細かい酸素含有量制御は困難であるという問題がある。スパッタリング法によるCr(N, O)法では、酸素・窒素混合ガスを反応雰囲気として用いた報告もあるが、成膜時圧力に対する酸素分圧変化が大き

いたために、薄膜の成長形態にまで影響を与えている懸念がある。組織の成長形態を変えず、薄膜内の酸素含有量のみ精密に変化させる成膜手法が確立されれば、組織変化の影響を排除した硬度評価や厳密な固溶限を求めることが可能であり、高硬度化要因への新たなアプローチを築けると考える。

もう一つ、特性評価に関して問題となることとして結晶子サイズが挙げられる。上記手法で作製されたCr(N, O)薄膜の結晶子サイズは100 nm以下と非常に微細であり、結晶子内の酸化挙動の評価が困難であった。Cr(N, O)の耐酸化性は、結晶内に取り込まれた酸素が熱処理により外部に拡散しようとし、粒界にCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>という酸化バリアとして析出するという仮説が立てられたが、観察の困難さからその証明には至っていない。そのため、粗大結晶子を得ることができれば、上記仮説の検討ができる。

そこで本研究では、上記問題を解決した新しい成膜手法を開発の開発を目指し、酸素含有量を精密に制御したCr(N, O)薄膜の作製を試みた。同時に粗大結晶粒を得るためにエピタキシャルCr(N, O)薄膜の作製も試み、得られた薄膜による酸化挙動の検討を行った。

## 3. 研究の方法

本研究ではパルスレーザー堆積(PLD)法により薄膜作製を行った。従来のPLD法を用いた成膜手法ではCr(N, O)薄膜の酸素含有量の精密制御は困難である。その大きな要因として、成膜時の反応雰囲気が挙げられる。従来のPLD法によるCr(N, O)薄膜の作製では、その反応雰囲気として、真空チャンバー内の残留酸素と導入する窒素またはアンモニアガスを用いていた。残留酸素という非常に不安定な要素を用いることにより、成膜バッチ毎に僅かな酸素分圧の誤差が生じていた可能性が大いに考えられる。酸素含有量の違いにおけるCr(N, O)の特性評価では、酸素量の精密な制御を必要としなかったが、厳密な固溶限特定等には細かな酸素含有量の制御は必須である。そこで薄膜内の酸素含有量の精密制御を目的としたPLD法による新規成膜手法を提案する。提案する新規成膜手法の大きな違いは、その成膜中の反応雰囲気にある。従来の酸化源としてチャンバー内の残留酸素を、窒化源として窒素またはアンモニアガスを使用してもものとは違い、新規手法では、超高真空チャンバーを導入し、酸化源として純酸素ガスを、窒化源としてラジカル化させた窒素をそれぞれ用いた。これにより従来のものよりも反応性の高い雰囲気が得られ、かつ酸素ガスの導入にバリアブルリークバルブを用いることで、雰囲気中の酸素分圧の精密制御が可能となる。上記雰囲気中の酸素分圧によりCr(N, O)薄膜の酸素含有量制御を試み、

作製した薄膜について評価を行った。具体的な成膜手順としては、初めに、チャンバーを  $1.0 \times 10^{-6}$  Pa まで真空引きを行った後、バリアブルリークバルブを用いて純酸素ガスを導入した。この際の真空計の指示値を、チャンバー内の酸素分圧と定義した。その後、流量 1sccm の純窒素ガスをラジカル化させてチャンバー内に導入した。その後、チャンバー内に設置した金属 Cr ターゲットにレーザーを照射し薄膜作製を行った。薄膜内の酸素含有量を変化させるため、雰囲気中の酸素分圧を  $5\text{--}10 \times 10^{-5}$  Pa の範囲で変化させた。成膜時の基板温度を 973 K、ターゲット-基板間距離を 45 mm とした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 酸素含有量の精密制御

図 1 に、作製した薄膜内酸素含有量の酸素分圧依存性を示す。薄膜の組成は、ラザフォード後方散乱分光法 (RBS) および電子損失分光法 (EELS) により定量した結果を組み合わせることで算出した。RBS の結果では N, O 起因のピーク分離が困難であり、EELS の結果では O 起因のピークの影響で Cr の定量の際に必要なバックグラウンドを決定できなかったため、RBS では金属元素と非金属元素の組成比を、EELS では N と O の組成比をそれぞれ定量し、全組成とした。薄膜の酸素含有量は  $P_{O_2}$  に比例し、最大 62 mol% の酸素の含有が確認された。酸素含有量は酸素分圧によって精密に制御されたと言える。

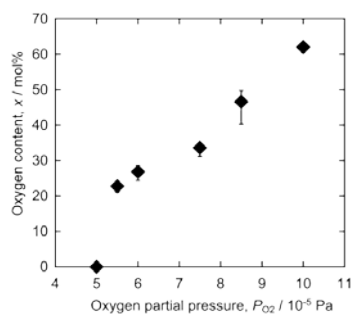


図 1 酸素含有量の酸素分圧依存性

次に、成膜した薄膜の組成を、3 元状態図上にプロットしたものを図 2 に示す。酸素を含有しない場合は金属元素と非金属元素の比が等しく、ほぼ化学量論組成であるのに対し、酸素含有量増加に伴いその組成比にずれが生じることを確認した。Cr の組成は 47 mol% から最大で 34 mol% まで減少し、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  の組成比に近づくことを確認した。後述する結晶相同定結果から、B1 単相である範囲においても酸素量減少が確認できることから、Cr サイトに原子空孔が生成されていることが示唆された。

図 3 に各酸素分圧下で作製した薄膜の X 線回折 (XRD) 図形を示す。全ての薄膜から、CrN

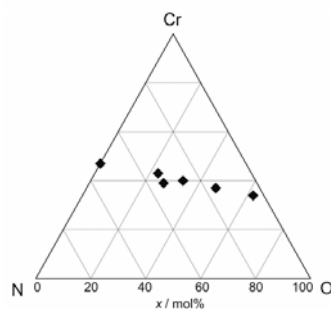


図 2 Cr(N, O) 薄膜の組成

同様の B1 構造に起因するピークが確認された。また、 $P_{O_2} = 10 \times 10^{-5}$  Pa で作製した薄膜のみ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  相を含んでいた。B1 相 (111) · (200) に起因する XRD ピークからそれぞれ算出した、各薄膜の B1 相が有する格子定数は、 $P_{O_2}$  に依存して線形に減少することが確認された。格子定数の単純減少から B1 相への酸素固溶が確認された。この格子定数の減少は、前で述べた Cr サイトに生成された原子空孔の影響であると示唆される。なお、研究開始時は、空孔の導入を予期していなかったため、O 置換により Cr イオン結合性が  $\text{Cr}^{2+}\text{-O}^{2-}$  に近づき、Jahn-Teller 効果で正方晶化すると予測したが、応力以外に起因する有意義な正方晶化は確認できなかった。その理由として、協同現象で正方晶化するよりも空孔を導入した方が、大きなエネルギー利得になるためであると解釈している。

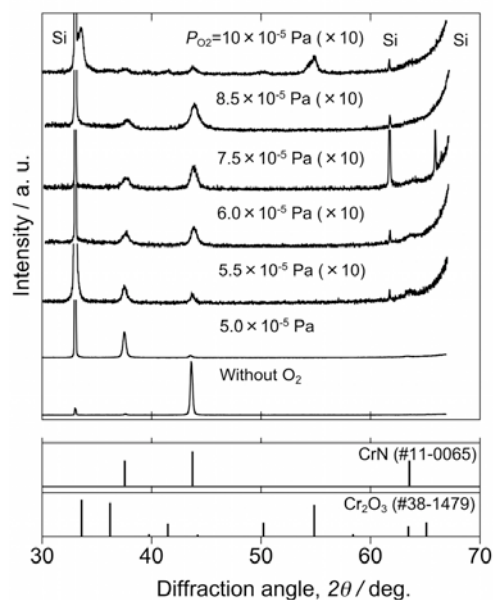


図 3 Cr(N, O) 薄膜の X 線回折図形

図 4 に各酸素分圧下で作製した薄膜の赤外分光スペクトルを示す。 $P_{O_2} \leq 7.5 \times 10^{-5}$  Pa において、 $390\text{--}430 \text{ cm}^{-1}$  付近にブロードなピークが確認された。一方、それよりも  $P_{O_2}$  が高い場合は、それまでは確認されなかった  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

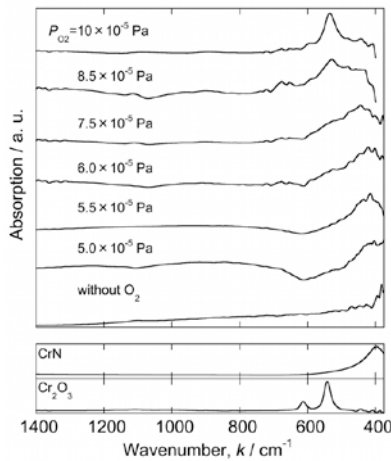


図4 Cr(N, O) 薄膜の赤外分光スペクトル

の Cr-O 結合に起因したピークが  $550\text{ cm}^{-1}$  付近に確認された。XRD および FT-IR の結果を総合すると、 $P_{O_2} = 8.5 \times 10^{-5}\text{ Pa}$  という条件下では、B1 相の他に  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  相がアモルファスで存在していることが言え、単相 B1-Cr(N, O) が合成される条件、言い換えれば Cr(N, O) への酸素固溶限は  $P_{O_2} = 7.5\text{--}8.5 \times 10^{-5}\text{ Pa}$  (酸素含有量で 37–43 mol%) であった。

透過型電子顕微鏡による微構造観察の結果、Cr(N, O) の結晶子サイズは  $100\text{ nm}$  程度であり、 $P_{O_2}$  によって変化しないことが確認された。スパッタリング法で作製した Cr(N, O) 薄膜では、結晶子サイズは酸素分圧によって減少することが報告されているが、本研究で用いた新規手法ではそれが見られなかった。この理由として、成膜時の酸素分圧値の違いが考えられる。本研究では  $1.5 \times 10^{-2}\text{ Pa}$  という成膜時圧力に対し、酸素分圧を  $5.0\text{--}10 \times 10^{-5}\text{ Pa}$  という三桁低い範囲で変化させている。酸素分圧の変化が薄膜の成長形態に与える影響は極めて少ないと考えられ、薄膜組織を変化させずに薄膜内の酸素含有量のみの変化を実現させていると示唆される。

図5に各酸素分圧下で成膜した薄膜の硬度測定の結果を示す。押し込み深さが膜厚の

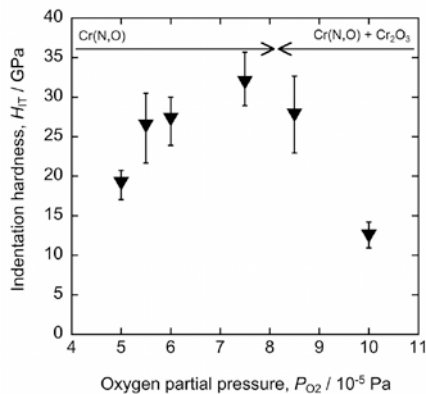


図5 薄膜硬度の酸素分圧依存性

10%以下となる様に圧子の押し込み荷重を  $0.07\text{ mN}$  に設定した。薄膜の硬度は B1 相単相である範囲において、 $P_{O_2}$  に伴い増加することが確認された。その最大硬度は  $32\text{ GPa}$  であり、過去の報告と同等の値であった。最大硬度は固溶限付近において確認された。

### (2) エピタキシャル Cr(N, O) 薄膜の作製

エピタキシャル薄膜は、その単結晶という性質から、多結晶では不可能な様々な評価が可能となる。また、薄膜の膜厚次第では、大面積の同一結晶子を得ることも可能であり、同一結晶子内での評価が容易となる。そこで、更なる特性評価のためのエピタキシャル Cr(N, O) 薄膜の作製を試みた。エピタキシャル Cr(N, O) 薄膜の作製にあたって、基板材料として酸化マグネシウム (Magnesium oxide: MgO) (100) 単結晶基板を選定した。MgO の格子定数は  $0.421\text{ nm}$  であり、Cr(N, O) との格子不整合度は前述の結果を参照すると 1.4–2.1% である。

図6に MgO 基板上に成膜した薄膜の XRD 図形を示す。MgO 基板上の薄膜では、基板のピークの隣に Cr(N, O) (200) 面に起因すると思われるピークのみが検出された。このピークから算出した (111) の回折角に  $\theta\text{--}2\theta$  を固定、サンプルを (111) 面と (100) 面のなす角度である  $54.7\text{ deg}$ . 傾けた状態で測定した  $\phi$  スキャンの結果を図6右上に示す。90 deg. 毎、4本のピークが検出されたことから、このサンプルはエピタキシャル Cr(N, O) 薄膜であることが確認された。図6の結果は、全て薄膜起因であることが確認済みである。

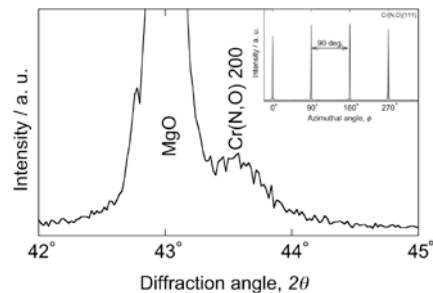


図6 MgO 基板上に成膜した、Cr(N, O) 薄膜の X 線回折結果。(右上) 111 面における  $\phi$  スキャン結果。

### (3) 酸化挙動の評価

エピタキシャル Cr(N, O) 薄膜の作製に成功し、大面積の単一結晶子を得ることが可能となった。そこで Cr(N, O) の耐酸化性向上機構の解明を目指し、エピタキシャル Cr(N, O) 薄膜を用いた酸化挙動の評価を試みた。Cr(N, O) の酸化挙動として以下の考えられた。金属間化合物 TiAl は予備酸化により  $\text{Al}_2\text{O}_3$  被膜を形成し Ti の外方拡散を防ぐことで酸



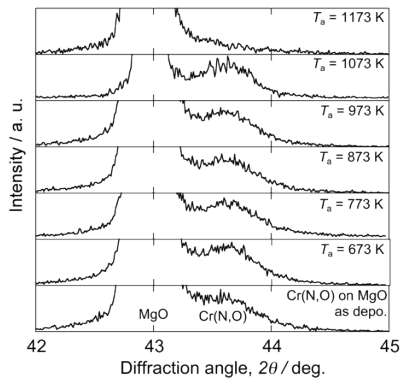


図7 酸化温度で試験後のエピタキシャル Cr(N, O) 薄膜の X 線回折図形

化の進行を抑制すると考えられている。Cr(N, O)においてもこの予備酸化による酸化抑制の効果を受けているのではないかと考えられた。はじめは様に分布していた酸素原子が、熱処理により結晶子の外周部へ拡散し結晶粒の最表面に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を形成、この境界の Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層がバリアとして働き、大気中の酸素による酸化を遅らせているというものである。もちろん、外部の酸素との反応により薄膜表面に Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層が形成する可能性も考えられる。以上の仮説を元に、エピタキシャル Cr(N, O) 薄膜に大気下における酸化試験を行い、その酸化挙動、薄膜内の酸素分布の変化について評価を行った。

図7に、各酸化温度で酸化試験後の薄膜の XRD 結果を示す。図の下部には、CrN, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の ICDD カードデータを同時に示す。基板のメインピーク付近 (2θ = 42-45 deg.) を Cu のアブソーバーを XRD の X 線検出器前に設置し、40kV・40mA という低出力で再測定した結果を同時に示す。酸化試験前、および保持温度 (T<sub>a</sub>) が 1073 K 以下の酸化試験後の薄膜では Cr(N, O) に起因するピークが検出された。また、T<sub>a</sub> = 1173 K において、このピークの消失が確認された。加えて、T<sub>a</sub> = 873 K 以上において Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に起因するピークが検出された。Cr(N, O) に起因するピークであるが、T<sub>a</sub> の上昇に伴い僅かながら高角度側へシフトすることが確認された。これは、面間隔の減少を意味している。(酸素含有量の精密制御)の結果によると、Cr(N, O) は酸素含有量の増加に伴い格子定数が減少する。この結果と合わせると薄膜内の酸素含有量の増加が示唆された。また、別要因として薄膜の内部応力が酸化試験により緩和されたことが考えられる。

図8に、酸化試験前、および T<sub>a</sub> = 1073 K で酸化試験後の薄膜の透過型電子顕微鏡により観察した明視野像と電子線回折図形を示す。膜厚方向に対して数点 EELS 測定を行った結果から定量した、窒素と酸素の組成比

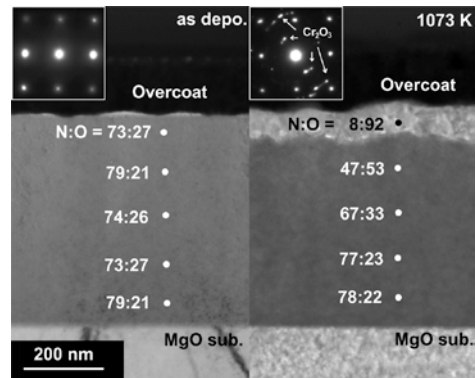


図8 酸化試験前後の薄膜の明視野像、電子線回折結果および電子損失分光により定量した窒素/酸素比。

を同時に示す。酸化試験前では様な薄膜組織であるのに対して、酸化試験後には薄膜表面に新たな層の存在が確認された。XRD と電子線回折結果と併せて、新たに表面に生じた層は Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> であると考えた。酸化試験前において薄膜の組成比はほぼ同様であるのに対して、酸化試験後では膜厚方向に偏りが生じ、薄膜表面付近では N:O = 47:57 の組成比が得られた。酸化試験後の酸素含有量がどの位置においても試験前と比較して多いことから、外部からの酸素拡散が生じていると考えた。

以上の結果から、Cr(N, O) 薄膜の酸化モデルの検討を行った。考察した酸化モデルは以下の通りである。

- ・ 薄膜表面における酸化層の生成
- ・ 1 による薄膜内への酸素拡散の抑制

前で述べた仮説では薄膜内部での酸素拡散を含んでいたが、結果から、B1 相の結晶内から酸素が外部へと吐き出されることは無かった。これは、XRD および EELS の結果から明らかである。代わりに、薄膜最表面において Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の形成を確認した。本手法による Cr(N, O) の成膜時の酸素分圧は 10<sup>-5</sup> Pa オーダーという非常に小さい値であり、大気中は Cr(N, O) にとって酸素過剰な状態といえる。よって大気中での酸化試験では外部からの酸素拡散が支配的であり、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が最表面に形成されたと予想する。仮説とは酸化挙動が異なっていたが、この薄膜最表面に形成された Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> によって、予備酸化と同様の効果が得られたと考えられる。加えて、膜厚方向に酸素の偏りが生じたが、これは形成された Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に層が後に拡散する酸素の妨げとなることで薄膜内に成膜時と同様の環境を作り出し、B1 構造を維持したままさらなる酸素固溶を実現したと考えた。酸素固溶量の増加は硬度の上昇を意味する。以上から、Cr(N, O) 薄膜は切削環境において、自ら酸化バリアの生成と硬度上昇を行う“インテリジェントマテリアル”である可能性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Kazuma Suzuki, Toshiyuki Endo, Teruhisa Fukushima, Aoi Sato, Tsuneo Suzuki, Tadachika Nakayama, Hisayuki Suematsu and Koichi Niihara: "Controlling Oxygen Content by Varying Oxygen Partial Pressure in Chromium Oxynitride Thin Films Prepared by Pulsed Laser Deposition", *Material Transactions*, 54 [7] (2013) (In Press) 査読有り  
<http://matjournal.org/index.php?mid=jindex&stage=jlist1&jid=MATERTRANS>
- ② 鈴木常生, 藤ノ木和哉, 浅見廣樹, 平井誠, 湯之上隆, 末松久幸, 八井 浄: "パルスレーザー堆積法による傾斜組成 Cr-Al-N-O 薄膜の作製", *日本金属学会誌*, 76 [6] (2012) 391-396. 査読有り  
DOI:10.2320/jinstmet.76.391
- ③ Jun Shirahata, Tetsutaro Ohori, Hiroki Asami, Tsuneo Suzuki, Tadachika Nakayama, Hisayuki Suematsu, Yoshiharu Nakajima, Koichi Niihara: "Preparation of Cr(N, O) thin films by RF reactive unbalanced magnetron sputtering", *Thin Solid Films*, 519 [11] (2011) 3497-3500. 査読有り  
DOI:10.1016/j.tsf.2011.01.106
- ④ 白幡 淳, 佐藤蒼生, 鈴木和真, 大堀鉄太郎, 浅見廣樹, 鈴木常生, 中山忠親, 末松久幸, 新原皓一: "ケイ素を添加した酸化クロム薄膜の機械的特性とその微構造", *日本金属学会誌*, 75 [2] (2011) 97-103. 査読有り  
DOI:10.2320/jinstmet.75.97
- ⑤ Jun Shirahata, Tetsutaro Ohori, Hiroki Asami, Tsuneo Suzuki, Tadachika Nakayama, Hisayuki Suematsu and Koichi Niihara: "Fourier-Transform Infrared Absorption Spectroscopy of Chromium Nitride Thin Film", *Japanese Journal of Applied Physics*, 50 [1] (2011) 01BE03-1~01BE03-4. 査読有り  
DOI:10.1143/JJAP.50.01BE03
- ⑥ Tsuneo Suzuki, Fumiya Sekiguchi, Jun Shirahata, Hiroki Asami, Tadachika Nakayama, Hisayuki Suematsu and Koichi Niihara: "Preparation and Characterization of Cr-Zn-N-O Thin Films deposited by Pulsed Laser Deposition", *Japanese Journal of Applied Physics*, 50 [1] (2011) 01BE18-1~01BE18-3. 査読有り  
DOI:10.1143/JJAP.50.01BE18

[学会発表] (計 1 2 件)

- ① 佐藤蒼生ほか, CrN系化合物における高硬度化および高電気伝導化, 日本金属学会, 2013年3月27日, 東京理科大学
- ② 遠藤稔之ほか, パルスレーザー堆積法によりSiを強制固溶させたCr-Si-N薄膜の作製と硬度評価, 日本金属学会, 2013年3月27日, 東京理科大学
- ③ 鈴木知真ほか, エピタキシャルCr(N, O)薄膜の基板拘束による酸素含有量変化, 日本金属学会, 2013年3月27日, 東京理科大学
- ④ 佐藤蒼生ほか, CrNへのO, Mgの同時添加による硬度および電気伝導性の評価, 日本金属学会, 2012年9月12日, 愛媛大学
- ⑤ Toshiyuki Endo *et al.*, Preparation of Epitaxially Grown Cr-Si-N Thin Films by Pulsed Laser Deposition, 37<sup>th</sup> International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites, 2013. 3. 27, Daytona, USA.
- ⑥ Aoi Sato *et al.*, Influence of Oxygen on the Hardness and Electrical Resistivity of Cr(N, O) Thin Films, 37<sup>th</sup> International Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites, 2013. 3. 27, Daytona, USA.
- ⑦ 鈴木知真ほか, PLD 法により作製したエピタキシャルCr(N, O)薄膜の大気下における酸化挙動, 日本金属学会, 2012年9月12日, 愛媛大学
- ⑧ 佐藤蒼生ほか, 高硬度・低電気抵抗を目指したCr(N, O)薄膜への置換型固溶元素の添加, 日本金属学会, 2012年3月28日, 横浜国立大学
- ⑨ 鈴木知真ほか, PLD法によりMgO単結晶基板上にエピタキシャル成長させたCr(N, O)薄膜の作製, 日本金属学会, 2012年3月28日, 横浜国立大学
- ⑩ K. Suzuki *et al.*, Control of oxygen content with oxygen gas introduction in Cr(N, O) thin films prepared by pulsed laser deposition, 36<sup>th</sup> International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2012), 2012. 1. 24, FS3-016, Florida, USA
- ⑪ 佐藤蒼生ほか, Cr(N, O)薄膜の酸素量の変化に伴う電気伝導性の評価, 日本金属学会, 2011年11月7日, 沖縄コンベンションセンター
- ⑫ 鈴木知真ほか, 酸素含有量を精密制御したCr(N, O)薄膜の PLD 法による作製, 日本金属学会, 2011年11月7日, 沖縄コンベンションセンター

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 常生 (SUZUKI TSUNEO)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号: 00313560