

# 歪みセンサへの応用を目指した 金属ナノクラスタを分散した非晶質炭素膜

Nano-cluster dispersed amorphous carbon film for strain sensor applications

東北大学国際高等融合領域研究所  
東北大学大学院工学研究科  
東北大学流体科学研究所  
東北大学流体科学研究所

竹野 貴法 Takanori TAKENO  
菅原 敏文 Toshifumi SUGAWARA  
三木 寛之 Hiroyuki MIKI  
高木 敏行 Toshiyuki TAKAGI Member

In this study, a novel strain sensor using metal-containing diamond-like carbon films is proposed. A film of several hundred nanometer in thickness was deposited onto silicon wafer. The strain sensitivity was measured by the 4-point bending test. The temperature coefficient of resistance was also calculated from the results of temperature dependence of the resistance. The obtained results show that the variation of normalized resistance has the relation against the applied strain and gauge factor was calculated as 6.1. However, the temperature coefficient of the resistance was  $\sim 2170$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . However, relatively high temperature coefficient of resistance can be improved by increasing metal concentration. Thus, the proposed sensor is expected to be used as a newly developed thin film strain sensor.

**Keywords:** Diamond-like Carbon, Tungsten metal, Strain Sensor

## 1. はじめに

構造物における機械的応答の使用期間中の長期計測は、異常箇所の早期発見の為に重要である。しかしながら、ロードセルや圧力変換器などの高精度センサは、そのサイズが大きい事が多く、配管などの3次元の形状を有する構造物のモニタリングには不向きである。さらに、劣化や腐食といった化学的な作用ある環境においてその様なセンサはそれ自体が腐食される可能性があるため、計測感度が低下することが予想される。よって、構造物の機械的特性の長期的な計測には、小型かつ化学的に安定なセンサが必要である。

ダイヤモンドライクカーボン(Diamond-like Carbon: DLC)膜は主に炭素を主成分とする薄膜材料であり、硬質(硬さ 80 GPa)、低摩擦係数(大気環境中で $\mu \sim 0.1$ 程度)、酸・塩基に対して安定、生体適合性が良いなどの特性を有する非晶質膜である。近年、DLC膜の優れた特性を利用し、センサ材としての検討がなされてきている。特に歪みセンサ応用に関しては、その感度を表すゲージ率が約 40 程度であり、小型化も用意にできることが報告されている[1]。しかしながら、DLC膜の電気抵抗が非常に高い事や、抵抗値が温度に強く影響を受けることから、実用的な利用には至っていない。高いゲージ率を保ちつつ、温度による影響を小さくする必要がある。

DLC膜の温度による影響を低減する方法の一つとして、膜内部に金属を分散させる手法がある。金属濃度を変化させることで、抵抗の温度依存性を半導体的なものから導電体的なものまで変化させることが可能であり、理想的にはある金属含有量においては温度依存性が無くなる可能性がある。本研究では、金属を混入することで温度依存性を低減させつつ、可能な限りゲージ率を高くした膜を構造物自体に直接製膜することを目標としている。本発表においては、その一部として、タングステン金属を含む DLC 膜の歪みセンサとしての可能性について検討する。

## 2. 試験片の作製

タングステンを含むダイヤモンドライクカーボン膜(以下、W-DLC膜)は、気相化学合成法とスパッタリング法の組み合わせ手法により、単結晶シリコン基板上に作製した。初めに製膜装置内に基板を導入し、ポンプにより  $4.0 \times 10^{-4}$  Pa まで真空引きすることで、残留分子の影響を最小限にした。所定の圧力に到達した後、アルゴンガスを 3.3 Pa になるまで導入し、13.56 MHz ラジオ波を印加することでプラズマ化した。そして、それを基板表面にさらすことで基板表面を洗浄した。続いて、メタンガスを導入し、ラジオ波の印加と同時にスパッタ電力を印加することで、気相化学合成法と

Table 1 Deposition parameters used in this study

Gas	Ar/CH <sub>4</sub> = 10/2.7
Substrate self-bias voltage	- 400 [V]
Operation pressure	3.3 [Pa]
Sputtering target	Tungsten (W)
Input DC power	40 [W]

スパッタリング法を同時に行い、W-DLC 膜を作製した。試験片合成の為の作製条件を Table 1 に示す。

電気抵抗の歪み依存性を 4 点曲げ試験により評価した。作製した試験片を 7×3 mm<sup>2</sup> に切り、電気抵抗測定の為の金電極を蒸着した。続いて、4 点曲げ試験用治具に試験片を接着剤で固定し、治具反対側に歪みゲージを取り付けた。温度や光による抵抗の揺らぎを防ぐため、温度をヒータで制御すると同時に実験系を覆い、暗闇の環境で 4 点曲げ試験を行った。電気抵抗は 2 端子法により測定し、測定中は温度を 37°C に維持した。

### 3. 結果と考察

Fig.1(a) に作製した試験片の歪み依存性を示す。圧縮・引張の歪みに対して、印加歪みの増大とともに抵抗値が上昇することが分かった。歪みセンサとしての感度評価の為、実験結果を式(1)によりフィッティングした。

$$\Delta R/R_0 = K \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 $R_0$ 、 $\Delta R$ 、 $K$ 、 $\varepsilon$  はそれぞれ、無付加状態における抵抗値、無付加状態からの抵抗値の変化分( $R(\varepsilon)-R_0$ )、ゲージ率、印加歪みである。フィッティングの結果より、歪みの感度を示すゲージ率( $K$ )を求めたところ  $K \sim 6.1$  であった。得られた感度は、商用の歪みゲージの約 3 倍であることが分かった。

次に、W-DLC 膜の抵抗温度係数を 30~42°C の範囲で測定した。測定結果を Fig.1(b) に示す。温度の上昇と共に抵抗値は減少した。これは W-DLC 膜の構造が、ナノメータサイズ金属が絶縁体 DLC マトリクスに分散したグラニューラー構造を示すこと、また、今回測定した金属含有量がパーコレーション閾値以下であることに起因する。抵抗温度係数は次式により求めた。

$$TCR(ppm/^{\circ}C) = \frac{R(T_2) - R(T_1)}{T_2 \cdot R(T_1) - T_1 \cdot R(T_2)} \times 10^6 \quad (2)$$

ここで、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $R(T_1)$ 、 $R(T_2)$  はある測定点 1、2 におけ

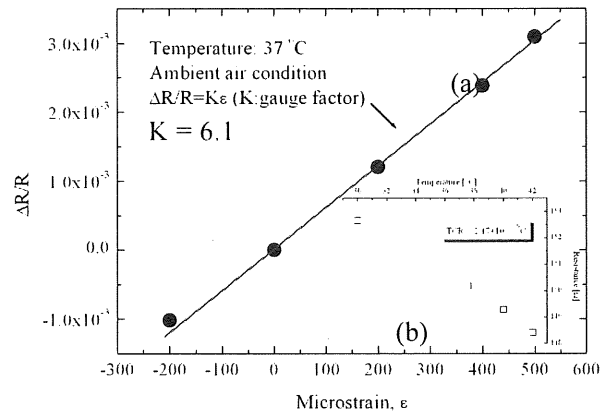


Fig.1 Strain and temperature sensitivity of the investigated film; (a) strain dependence of normalized resistance, (b) temperature coefficient of resistance.

る温度及びその温度の時の抵抗値である。式(2)により求められた抵抗温度係数は 2170 であった。カーボン皮膜抵抗器の抵抗温度係数が最大で 200 ppm/°Cであることを考えると 10 倍高い値であった。抵抗温度係数を低下させる為には、金属含有量をさらに増加させることが必要である。しかしながら、ある金属含有量を境として、抵抗の温度依存性が半導体的なものから金属的な特性に変化することを考えると、抵抗温度係数が最小となる金属含有量が存在するはずである。金属の最適含有量を求める事は今後の課題である。

### 4. まとめ

本研究では、小型、高精度、化学的に安定なセンサの作製を目的として、金属を含む DLC 膜の歪みセンサとしての可能性を検討した。

- 1) 4 点曲げ試験により抵抗の歪み依存性を測定したところ、作製した試験片のゲージ率が約 6.1 であることが分かった。
- 2) 抵抗温度係数は 2170 ppm/°C とカーボン被膜抵抗器の 10 倍であった。

最適な金属含有量の DLC 膜歪みセンサを金属に直接作製することで、配管などの 3 次元的形状を有する箇所歪みモニタリングが可能であると考えられる。

### 参考文献

- [1] E.Peiner et al., "Micro force sensor with piezoresistive amorphous carbon strain gauge" *Sensors and Actuators A*, Vol.130 (2006) pp.75-82