

---

# フレキシブル基板上に製膜した強磁性金属膜特性の機械的制御

## Mechanical Control of Properties in Ferromagnetic Metal Thin Films Deposited on Flexible Substrate

---

H27助自61

代表研究者 千葉 大地 東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 准教授  
*Daichi Chiba Associate professor, Department of Applied Physics, School of Engineering,  
The University of Tokyo*

共同研究者 生津 資大 愛知工業大学  
*Takahiro Namazu Aichi Institute of Technol*

The inverse magnetostriction effect has been studied using various ferromagnetic materials. An internal stress, which is often caused by the lattice mismatch, can be an important factor that affects the magnetic anisotropy. Recently, the voltage control of magnetic anisotropy in ferroelectric/ferromagnetic structures has been reported, where the electric field on a ferroelectric material or piezoelectric transducer results in an external strain on the ferromagnetic materials. It is known that a strain on the order of 0.1% generally results in plastic deformation of most bulk metals. In thin films, however, the yield strength is expected to increase. Using a ferromagnetic film deposited on a flexible substrate is one of ways to apply larger strain on the order of ~1%. We reported that uniaxial stress-induced reversible modulation of the perpendicular magnetic anisotropy in TbFeCo and Co films deposited on a polyethylene naphthalate (PEN) substrate. We also reported the reversible switching of the in-plane easy axis and very large modulation of the magnetic anisotropy field in Ni thin films deposited on a PEN substrate. A change in the anisotropy field of ~0.3 T was achieved by applying an in-plane strain up to 2.3%, which was an order of magnitude larger than previously reported. This large strain resulted in an order of magnitude larger change in the anisotropy field compared to the previous reports, and is comparable to the change that occurs in giant magnetostrictive materials.

### 研究目的

物質の性質を自在に制御することは、材料科学の大きなテーマの一つである。磁性体に磁界を加えると、磁界方向と関連した異方的な体積変化が生じる。所謂磁歪効果である。この逆効果として、磁性体に応力を加えて変形させると、磁化の方向が変化する。この現象は逆磁歪効果として知られている。 piezo素子や強誘電体に電圧を加え、その上の金属

膜を歪ませることで磁化方向を電氣的に制御する研究がこれまでも報告されている。しかし、印加できる歪み量には限界がある。また、金属を引っ張ると、通常は0.1%程度伸びたところで塑性変形が生じ、もとに戻らなくなることがよく知られている。本研究の目的は、フレキシブル基板上に製膜したナノメートル厚の磁性金属薄膜の逆磁歪効果を調べることである。フレキシブル基板は伸縮性に富み、金属も薄膜であるために応力が小さくても%オーダーの大

きな歪みを印加できる。それだけでなく、薄膜では応力集中源となりうる欠陥や転位を減少できるため、塑性変形が起こる降伏応力を大きく拡大できる可能性がある。これを利用することで、フレキシブルな性質と、スピンの性質を融合した新たなデバイスへの展開を模索する。また、従来まで印加可能であった歪み量を超えた領域での逆磁歪効果の理解を進める。

## 概 要

物性を決める最も代表的なパラメータの一つは、原子間隔である。つまり、物質を歪ませると、その性質が変化する。これは物性の制御手法としても知られている。例えば、バルクの材料に圧力を加えて物性値の変化をみるという研究が広く行われている。また、強磁性体の逆磁歪効果のように、応力により磁化の方向が変化する現象もよく知られている。このように、応力誘起の物性変調は物性の理解と材料工学の応用の両面で重要なポジションにある。

本研究で注目するのは、金属の強磁性薄膜である。piezo素子や強誘電体を用いて電気的に強磁性薄膜に歪みを印加し、その磁気異方性や磁化方向を制御する研究がすでに報告されている。しかし、金属において弾性変形を引き起こせる限界歪み量(降伏限界)は0.1%程度であることが知られている。それに対し、金属をナノメートル程度の厚みまで薄くしていくと、降伏限界が大きくなるという報告がある。つまり、piezo素子で印加できる歪み量よりも大きな降伏限界をもつ金属薄膜には、まだまだ制御可能な領域が残っており、より大きな歪みにより巨大な磁性の変化を引き起こせる潜在能力があるはずである。

そこで我々は、フレキシブル基板上に金属強磁性薄膜を直接製膜し、その磁性を制御することを試みた。フレキシブル基板としては、ポ

リエチレンナフタレート(PEN)のフィルムを用いた。その上に、スパッタ法を用い、TaやPtなどの非磁性金属の地下層を介してCoやNiなどの身近な3d遷移金属や、TbFeCoといった比較的磁歪定数の大きな材料を製膜した。それらの膜厚は、0.4 nm (2原子層) から20 nm程度である。

一軸の引っ張り歪みを印加するために、本助成による研究経費等を用いて、共同研究者とともに超小型の引っ張り試験機を自作した。これにより、超伝導電磁石による磁界印加が可能な狭小環境下での引っ張り試験を可能とした。これにより、素子に%オーダの引っ張り歪みをリバーシブルに印加した状態で、磁化状態を観測する環境を整えた。

その結果、もともと磁化方向が面に垂直を向いているTbFeCo薄膜では、1-2%程度の引っ張り歪みにより、磁化方向が完全に面内を向くことが分かった。また、Ni薄膜では、引っ張りにより面内の磁化方向の90度回転を観測した。それぞれ、歪みを解くと磁化方向はもとの状態に戻り、変化は完全にリバーシブルであった。電気抵抗は歪みの印加に対して連続的かつ可逆的に変化し、光学顕微鏡による観察でもクラックは観測できなかった。つまり、ナノメートル厚の金属磁性薄膜では、塑性変形を起こさずに1-2%の歪みがリバーシブルに印加でき、大きな磁化方向変化が実現できるということを実証することができた。

一軸の引っ張り歪みにより、磁化が向き易くなる方向(容易軸)が生じる一方で、磁化が向きにくくなる方向(困難軸)も存在する。両者の間のエネルギー差は磁気異方性エネルギーとして定義することができる。これを決定するためには、困難軸方向に磁界を印加し、磁化が磁界方向へ完全に飽和する磁界を求めねばならない。測定の結果、飽和磁界はサブテスラ(T)オーダにも達することが分かった。これは超磁

歪材料といった、磁歪定数の大きな材料での報告値と同程度のオーダーである。また、飽和磁界を異方性エネルギーに換算すると、応力誘起によるものとしては史上最大級の変化量であることが分かった。つまり、大きな一軸歪みを加えることで、確かに強い磁気異方性が付与されていることが明らかとなっただけでなく、Niなどの身近な材料でも巨大な磁性の変化が引き起こせるという潜在能力を示すことができたと考えている。

このように、フレキシブルな素材と、身近な金属磁石の組み合わせだけで、これまで得られなかった大きな制御性を得ることができた。本研究による知見を活かし、安価でシンプルな構成をもつフレキシブルスピントロニクスデバイスとしての価値を高めていきたいと考えている。

－以下割愛－