

## ステンレス鋼表面硬化層の磁気特性に関する研究

Study on Magnetic Property of Surface Hardening Zone of Stainless Steel

高屋 茂 永江 勇二 青砥 紀身

Shigeru TAKAYA, Yuji NAGAE and Kazumi AOTO

次世代原子力システム研究開発部門

材料技術開発グループ

Advanced Material Technology Group

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。

本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行っ  
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

電話029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to

Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,

Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

## ステンレス鋼表面硬化層の磁気特性に関する研究

日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門 FBR 信頼性技術ユニット  
高屋 茂、永江 勇二、青砥 紀身

(2006年2月7日受理)

低炭素ステンレス鋼に発生する応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking: 以下 SCC) について、軽水炉プラントの SCC 対策技術の確立と安全性向上のため、SCC の発生・進展の詳細なメカニズムの解明が求められている。特に、低炭素ステンレス鋼の SCC は主として表面の加工硬化層を起点として発生・進展していることから、本研究では、SCC 発生機構解明に必要な知見を取得するため、表面硬化層の微細組織を対象に磁気特性の分析を行った。高空間分解能で磁性相の観察が可能な磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscopy: 以下 MFM) を用いて、SUS316 鋼の強切削加工材および未加工材の観察を行った結果、強切削加工材については加工面のほぼ全面で未加工材では見られなかった磁性相を確認することが出来た。強切削加工によって導入された磁性相は表面から約 10  $\mu\text{m}$  の深さまでに存在し、特に最表面で MFM 信号が大きく変化していることから、最表面に最も大きな磁化が存在するか、あるいはこの領域で最も急激に磁化が変化していると考えられる。

---

本報告書は旧核燃料サイクル開発機構が旧日本原子力研究所との契約により実施した業務の成果である。

大洗研究開発センター (駐在): 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

## Study on Magnetic Property of Surface Hardening Zone of Stainless Steel

Shigeru TAKAYA, Yuji NAGAE, and Kazumi AOTO

FBR Systems Reliability Research Unit  
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 2006)

It is needed to reveal the mechanism of occurrence and development of stress corrosion cracking (SCC) in low carbon stainless steels for establishing SCC countermeasure technology and enhancing safety of light water reactor plants. In this study, we analyzed magnetic property of microstructure in the surface hardening zone because SCC cracks in low carbon steels initiate mainly in this zone. A strong cutting worked sample and a solution-annealed sample of SUS316L steel were prepared and Magnetic Force Microscopy (MFM) observation was conducted to show magnetic phase in these samples with high spatial resolution. As result, we could detect magnetic phase at almost whole surface of the strong cutting worked sample although such a magnetic phase was not observed in a solution-annealed sample. The magnetic phase induced by strong cutting work existed from the surface to about 10  $\mu\text{m}$  depth. Because the MFM signal changed significantly at the most surface, the largest magnetization would exist at the most surface or the magnetization would change dramatically at this region.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Surface Hardening Zone, Stainless Steel, Magnetic Property, Magnetic Force Microscopy

---

This report is the outcome of the practice carried out by Japan Nuclear Cycle Development Institute under the contract with Japan Atomic Energy Research Institute.

目次

1	はじめに.....	1
2	本論.....	1
2-1	磁気力顕微鏡について.....	1
2-2	実験方法.....	4
2-2-1	試験片作成方法.....	4
2-2-2	MFM 観察視野.....	4
2-2-3	MFM 観察方法.....	5
2-3	磁気力顕微鏡観察結果.....	6
2-3-1	未加工材 (SUS316L-N) 観察結果.....	6
2-3-2	加工材 (SUS316L-P2) 観察結果.....	9
3	おわりに.....	17
	謝辞.....	17
	参考文献.....	17

Contents

1	Introduction.....	1
2	Main discussions.....	1
2-1	Magnetic force microscopy (MFM) observation.....	1
2-2	Experiment procedures.....	4
2-2-1	Sample preparation.....	4
2-2-2	MFM observation fields.....	4
2-2-3	MFM observation procedures.....	5
2-3	MFM observation results.....	6
2-3-1	Observation results of the solution-annealed sample (SUS316L-N).....	6
2-3-2	Observation results of the worked sample (SUS316L-P2).....	9
3	Conclusions.....	17
	Acknowledgment.....	17
	References.....	17

This is a blank page.

## 1 はじめに

近年、沸騰水型軽水炉プラントの炉心シュラウドや再循環系配管において、これまで耐 SCC 性（応力腐食割れ，Stress Corrosion Cracking）に優れると考えられてきた低炭素ステンレス鋼で SCC が多数報告されており、SCC 対策技術の確立とプラントの安全性向上のために、SCC の発生・進展の詳細なメカニズムを解明することが強く求められている。これまでの研究により、炉心シュラウド、再循環系配管ともに接液表面に機械加工による硬化層が存在し、その硬化層を粒内型 SCC として発生した後、粒界型 SCC として主応力と垂直な方向に進展していくことが明らかになっている[1]。本研究では、SCC 発生の主要原因のひとつである表面硬化層の微細組織を対象に磁気力顕微鏡を用いて磁気特性の分析を行い、SCC 発生機構解明に関して必要な知見を取得する。

## 2 本論

まず 2 - 1 で、今回低炭素ステンレス鋼表面硬化層の磁気特性を分析するために用いた磁気力顕微鏡の紹介を行う。次に 2 - 2 で、観察試験片と実験方法を説明する。最後に 2 - 3 で磁気力顕微鏡観察結果を示し、低炭素ステンレス鋼の加工硬化による磁気特性変化について考察する。

### 2-1 磁気力顕微鏡について

磁気力顕微鏡 (Magnetic Force Microscopy: 以下 MFM) は走査型プローブ顕微鏡の一種であり、50nm 以下の極めて高い空間分解能で磁性相を検出することが可能である。図 1 に MFM 探針の走査型電子顕微鏡写真を示す。ただし、実際に測定に使用される時とは上下が逆になっている。非磁性体のカンチレバーの先端に強磁性体がコーティングされた探針がついており、この磁性探針がプローブとして働く。図 2 に MFM の測定原理概念図を示す。カンチレバーを強制振動させながら試験片上を移動させ、各測定点での探針に作用する力（あるいはその勾配）を測定することにより、関心のある領域での全体像を得る。探針に作用する力は、探針と試験片との相互作用によりカンチレバーの振動が変化することをレーザー干渉計などの高感度センサを用いて検出する。ここで探針に作用する力としては、クーロン力やファンデルワールス力などの原子間力と磁気力が挙げられるが、探針-試験片表面間距離がごく短い場合には原子間力が、数十 nm 以上の場合には磁気力が主に検出されるため[2]、探針-試験片表面間距離を変えることにより、同じ磁性探針を用いて表面形状像 (Atomic Force Microscopy image: 以下 AFM 像) と磁気力像を共に得ることが可能である。MFM は現在、高密度ハードディスクの観察に広く使われているが、最近では SUS304 鋼の

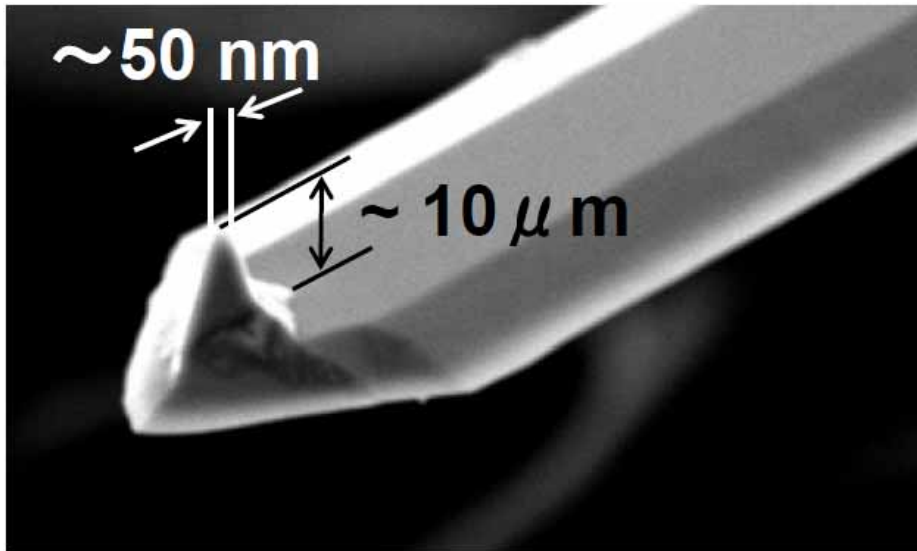


図1 MFM 探針の走査型電子顕微鏡写真

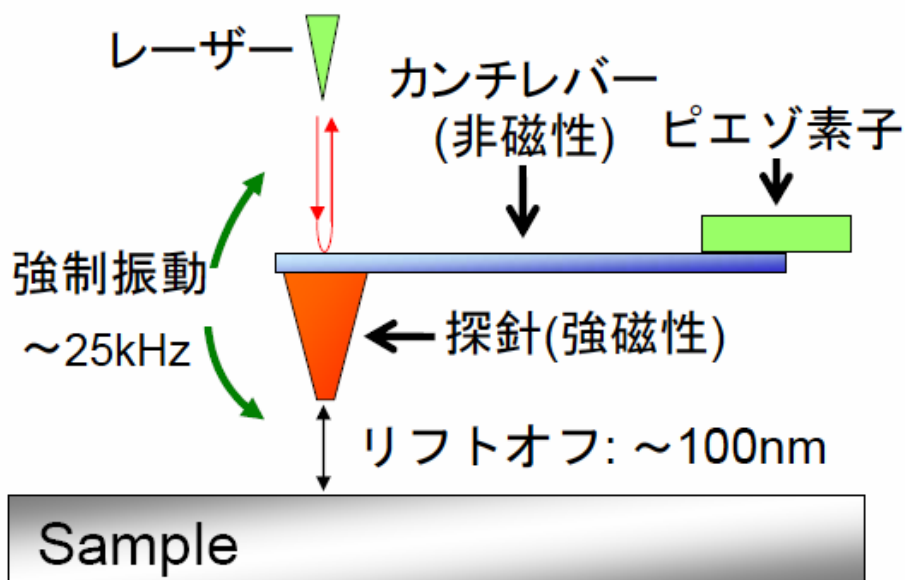


図2 MFM の測定原理概念図



の熱鋭敏化評価[3]など材料劣化評価の分野でも用いられ始めている。

本研究では、探針に働く力を検出する手法として位相差法を採用した MFM (セイコーインスツルメンツ社製 SPI3700) を用いた。位相差法では、ピエゾ素子とカンチレバーの振動の位相差を測定する。カンチレバーの振幅が十分小さいときには、この位相差は次のように表すことができる。

$$\Delta\theta = \frac{Q}{k} F', \quad (1)$$

ここで、 $Q$  は共振の鋭さを表すパラメータ、 $k$  はカンチレバーのばね定数である。また  $F'$  は磁性探針に働く磁気力の垂直方向微分であり、次のように表すことができる (図 3 参照)。

$$F'(\mathbf{r}) = \frac{\partial F}{\partial z} = \int_{tip} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \{ \mathbf{M}^{tip}(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{H}^{sample}(\mathbf{r} + \mathbf{r}') \} dV', \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{M}^{tip}(\mathbf{r}')$  は磁性探針の磁化、 $\mathbf{H}^{sample}(\mathbf{r} + \mathbf{r}')$  は試験片がつくる磁場である[4]。後に示す MFM 像は各測定点での位相差 ( $\Delta\theta$ ) をプロットしたものだが、(1)、(2)式に示すようにこの値が、試験片内の磁化が作る磁場の二階微分に対応していることに注意する必要がある。また磁性探針の磁化分布を定量的に正確に知ることが困難であるため、MFM 観察結果から試験片内の磁化、およびその磁化が作る磁場を逆解析し求めることも同様に困難である。

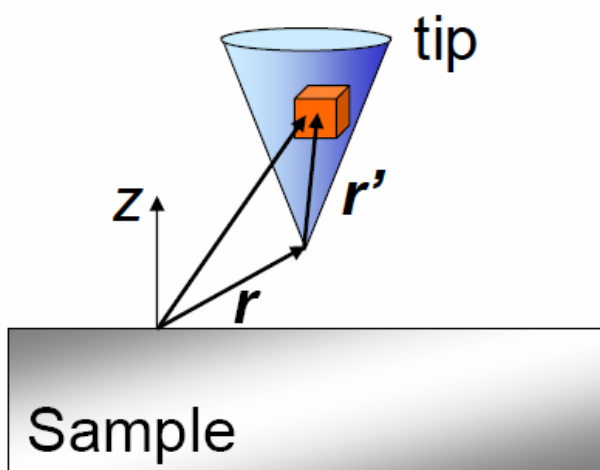


図 3 座標系

## 2-2 実験方法

### 2-2-1 試験片作成方法

試験片は日本原子力研究所から提供されたものを用いた。素材は SUS316L ステンレス鋼であり、その化学組成を表 1 に示す。試験片表面には、万能フライス盤を用いた強機械切削加工により加工硬化層が導入されている。硬さ測定の結果等から、導入された加工硬化層の深さは表面から 100 $\mu\text{m}$  程度と推定される。加工硬化層導入後、MFM 観察用に約 7mm $\times$ 3mm $\times$ 1mm の大きさに切断され、銅の電解メッキが施された。ここで銅メッキを行った理由としては、加工硬化層が導入された観察領域が試験片端部に近く、MFM 観察のために研磨する際に肩だれする心配があること、また MFM では試験片端部など高低差が激しい領域 (>  $\sim$  1 $\mu\text{m}$ ) での測定が困難であることが挙げられる。メッキ処理の後、0.05 $\mu\text{m}$  アルミナ研磨液を用いたバフ研磨までの機械研磨が行われた。

本研究では、断面が機械加工方向に平行な試験片 (図 3 参照、試験片番号 : SUS316L-P2) と、比較用の未加工材 (試験片番号 : SUS316L-N) の観察を行った。

表 1 使用したステンレス鋼の化学組成

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co
SUS316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	0.02

### 2-2-2 MFM 観察視野

観察視野は、事前に日本原子力研究所によってなされた光学顕微鏡観察結果に基づいて、銅メッキの密着が良好であり、また研磨傷の少ない領域から選んだ。観察視野数等の観察条件は表 2 に示すとおりである。

表 2 試験片の種類と観察視野

試験片番号	鋼種	試験片断面方向	観察条件	視野数
316L-N	SUS316L	未加工材	50 $\mu\text{m}$ 角以上の広視野 及び 10 $\mu\text{m}$ 角の狭視野 着磁前後で観察	1
316L-P2	SUS316L	加工方向に平行	同上	2

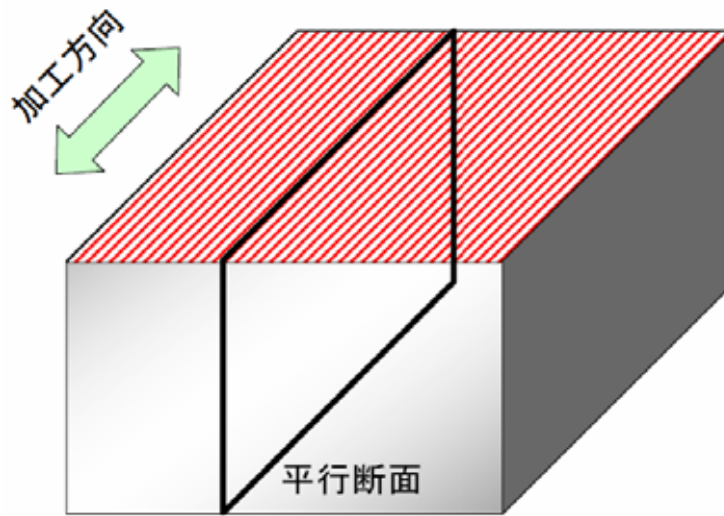


図3 加工材のMFM観察面

### 2-2-3 MFM 観察方法

MFM 観察は室温大気中で行った。用いたカンチレバーのバネ定数は約 15N/m、Q 値は約  $360 \pm 10$  である。MFM 観察時の試験片表面-カンチレバー振動中心間の距離（リフトオフ）は、SUS316L-P2 の  $100\mu\text{m}$  角の観察のときのみ着磁前後とも約 80nm、その他の場合は全て約 100nm である。ただし、この程度のリフトオフの差は結果にほとんど影響しないと考えてよい。

まず簡易消磁器を用いて試験片の消磁を行った後に MFM 測定し、次に 0.4T 程度の永久磁石を用いて試験片厚さ方向に着磁した後に再度同じ領域で MFM 観察を行った。

## 2-3 磁気力顕微鏡観察結果

### 2-3-1 未加工材 (SUS316L-N) 観察結果

まず未加工材 (SUS316L-N) に関する観察結果を示す。図 4 に示した領域で観察を行った。図 5, 6 に視野面積が  $100\mu\text{m}$  角、 $10\mu\text{m}$  角の消磁後の AFM/MFM 観察結果をそれぞれ示す。図 5 に示した消磁後  $100\mu\text{m}$  角の観察結果では、試験片内部の丸で囲んだ領域において介在物と思われる磁化領域が確認できるが、加工面においては特に磁気特性変化は見受けられなかった。一方、図 6 の消磁後  $10\mu\text{m}$  角の観察結果では、加工面で MFM 像が変化していることがわかる。ただし、その変化の仕方は、研磨傷によるものと同様である。

次に、図 7, 8 に着磁後の AFM/MFM 観察結果を示す。図 7 において、試験片内部に存在する磁化は着磁により明瞭になったものの、加工面ではほとんど変化は見られない。図 8 に関しても、同様に変化は見られなかった。

これらのことから、強切削加工を施していない面には磁性相は存在していないことがわかる。

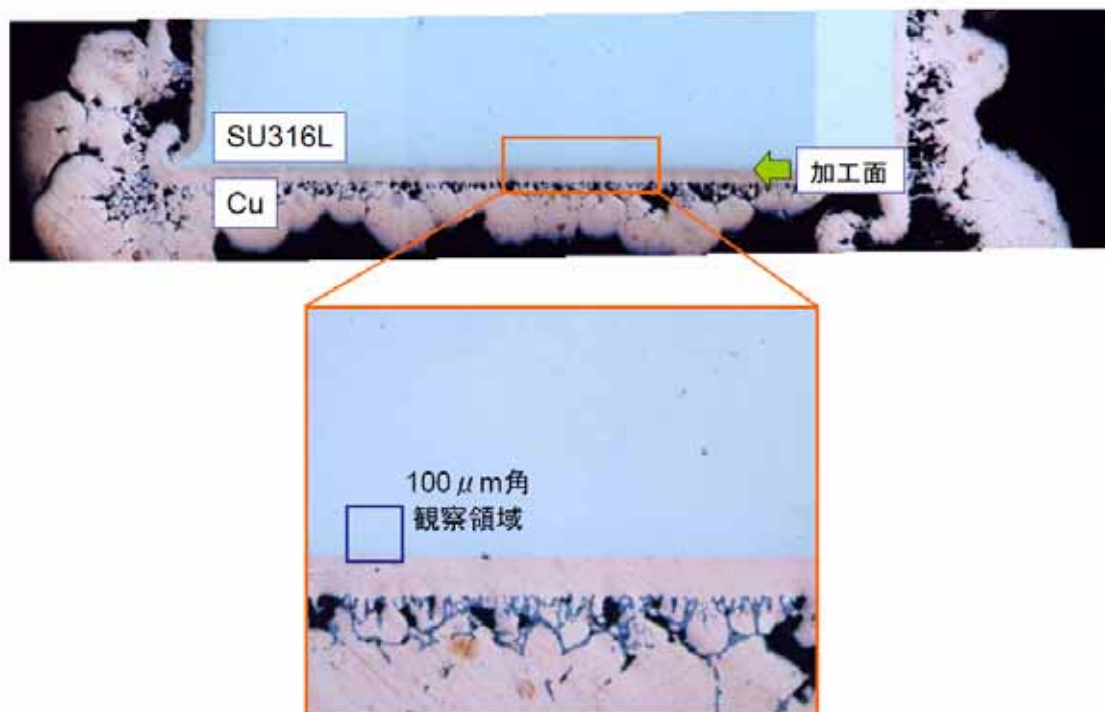
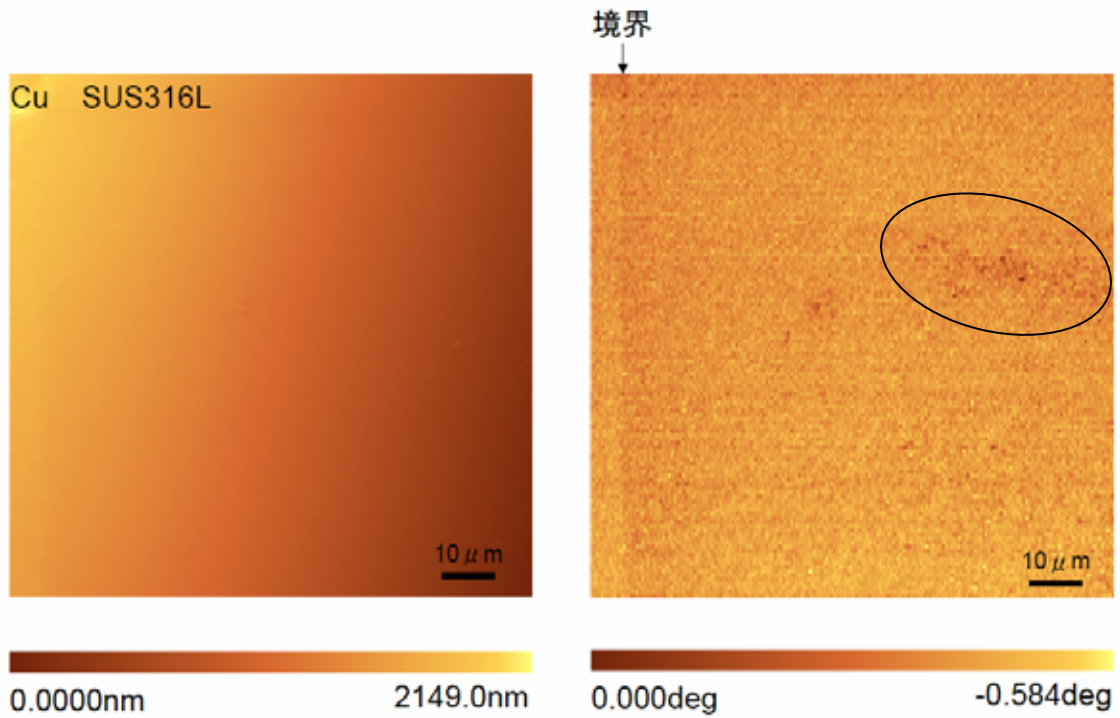


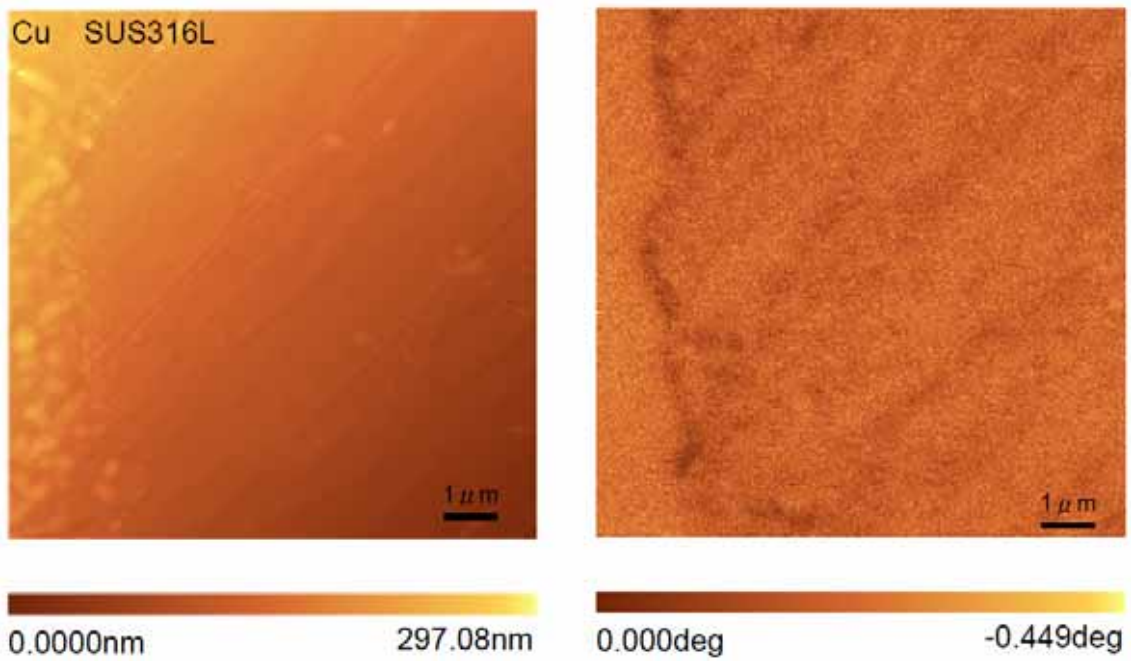
図 4 SUS316L-N の MFM 観察領域



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

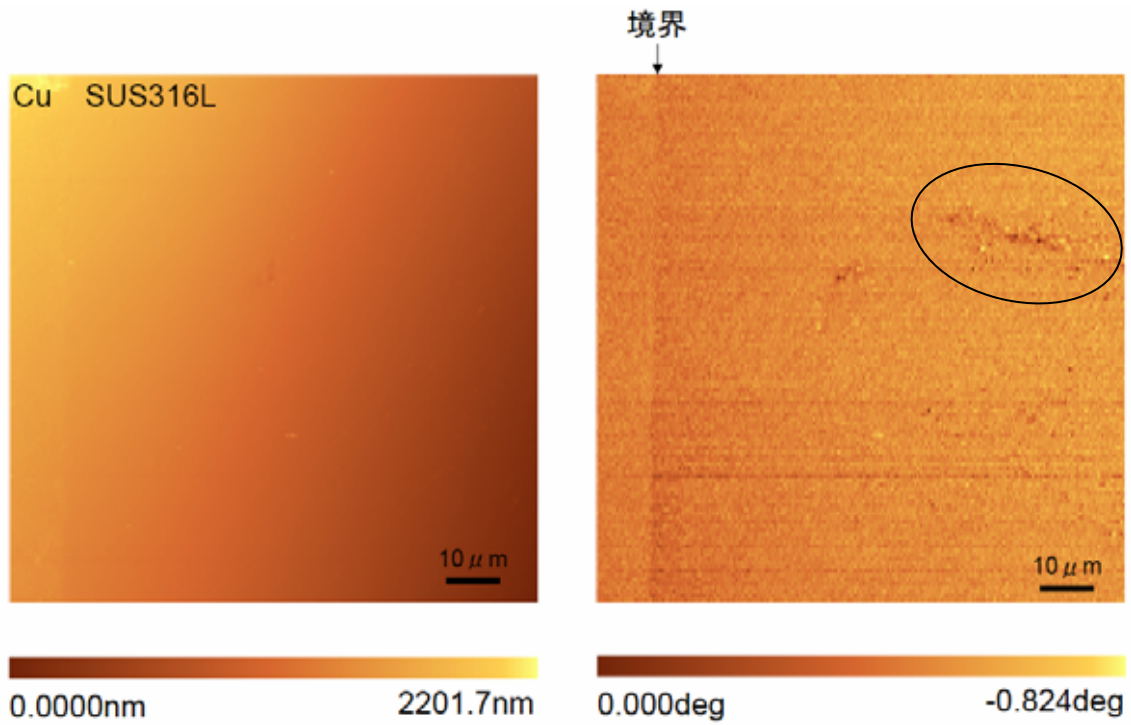
図5 SUS316L 未加工材消磁後の AFM/MFM 観察結果 (100μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

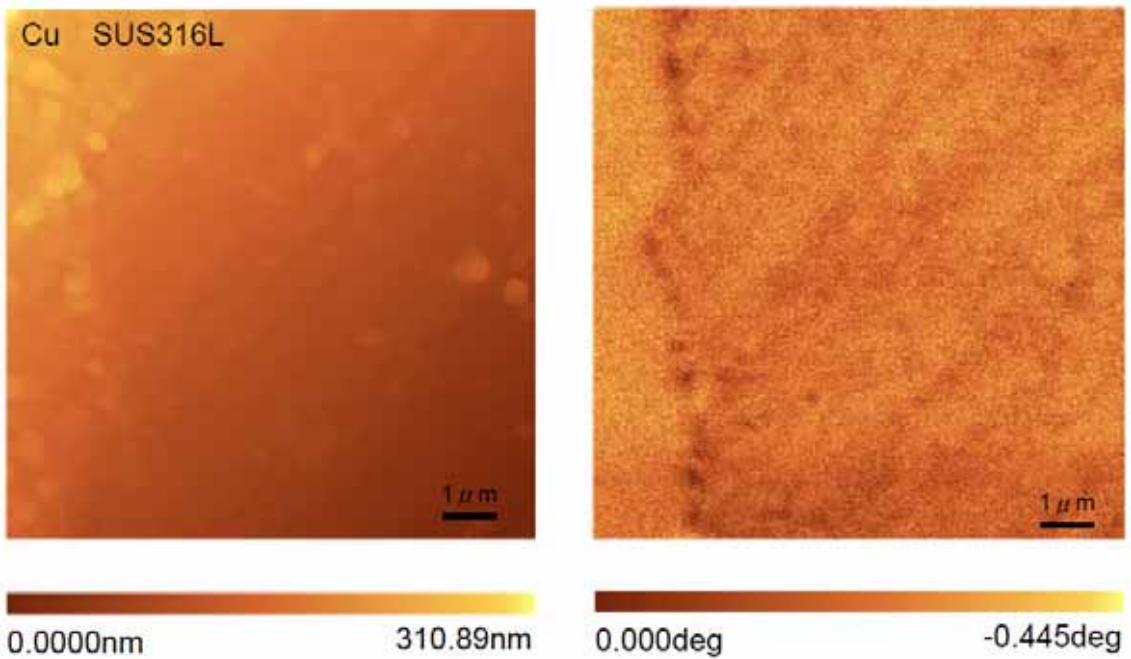
図6 SUS316L 未加工材消磁後の AFM/MFM 観察結果 (10μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

図7 SUS316L 未加工材着磁後の AFM/MFM 観察結果 (100μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

図8 SUS316L 未加工材着磁後の AFM/MFM 観察結果 (10μm 角)

## 2-3-2 加工材 (SUS316L-P2) 観察結果

加工材に関しては、図 9, 10 に示した 2 視野での観察を行った。図 11 ~ 14 に視野 1 での消磁後および着磁後の観察結果を、また図 15 ~ 18 に視野 2 での消磁後および着磁後の観察結果をそれぞれ示す。図中の白い矢印は、着磁前後の結果の比較をする際の観察領域のずれの目安として書き入れた。未加工材の場合とは明らかに異なり、観察箇所に関してはほぼ全ての面で幅 5 ~ 10 $\mu\text{m}$  の磁性相の存在を確認することが出来た。ここで、MFM 像の変化が磁性相の存在によるものであると判断できる理由として、10 $\mu\text{m}$  角の結果 (特に図 18) で明瞭な磁区構造が見られること、および消磁状態に比べて着磁後に位相差が大きくなっていることが挙げられる。この磁性相は、未加工材では見られなかったことから、強切削加工により導入されたものである。

図 19 に視野 2 の 10 $\mu\text{m}$  角での観察結果に関して、着磁前後での MFM 像の比較を示す。着磁により全体的に磁区構造が明瞭になっているが、特に SUS316L 表面で大きく MFM 像が変化しており、次に SUS316L 内部の磁性相と非磁性相の境界 (磁区構造が見える領域と見えない領域の境界) で変化していることがわかる。このことは図 20 に示した着磁前後での MFM 信号プロファイルの比較からもわかる。ただし、このプロファイル比較は図 16, 18 中の矢印で示したラインで行った。また、同ラインで AFM 信号と着磁後の MFM 信号のプロファイル比較を示した図 21 から、SUS316L 表面で大きく変化している様子が見える。

先にも述べたように、MFM 信号である位相差は磁場の二階微分であるため、試験片内部の磁化の大きさを正確に知ることは難しいが、試験片内部の磁性/非磁性の境界に比べて、加工面でより急激に磁化の大きさが変化している、あるいは磁化の値がそもそも大きいと考えられる。この傾向は、硬さ測定の結果と定性的に一致しているものの、磁気特性変化が起こった原因や、磁気特性と歪み量等他の物理量との定量的な関係を明らかにするためには透過型電子顕微鏡観察など他の手法による観察も併せて行う必要がある。



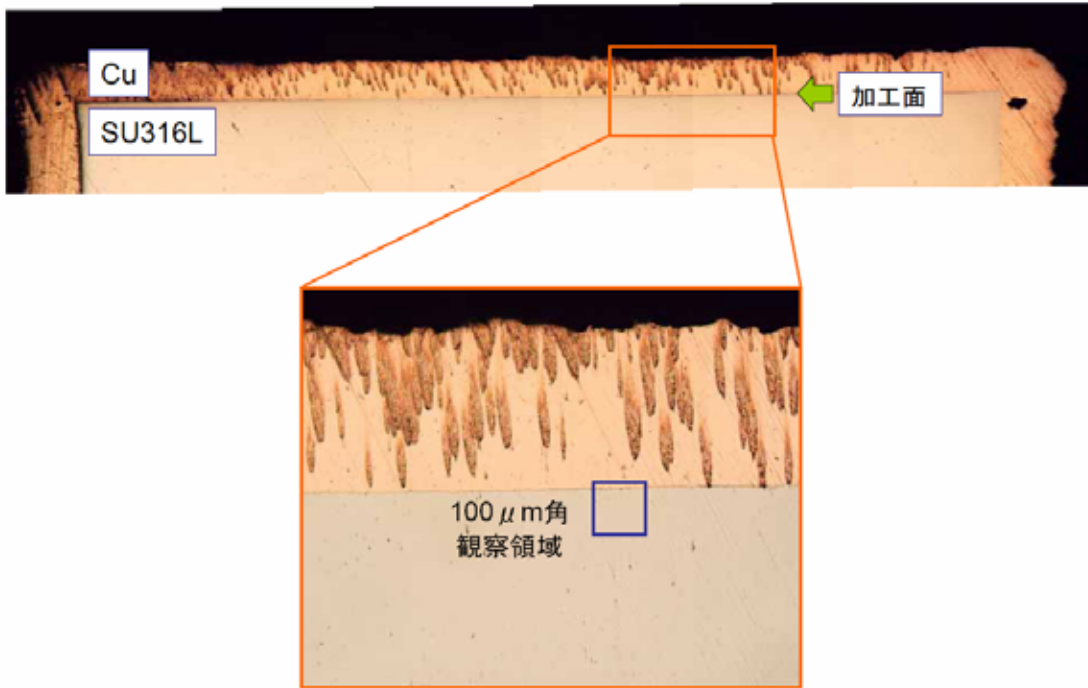


図9 SUS316L-P2 視野1の観察領域 (100μm角)

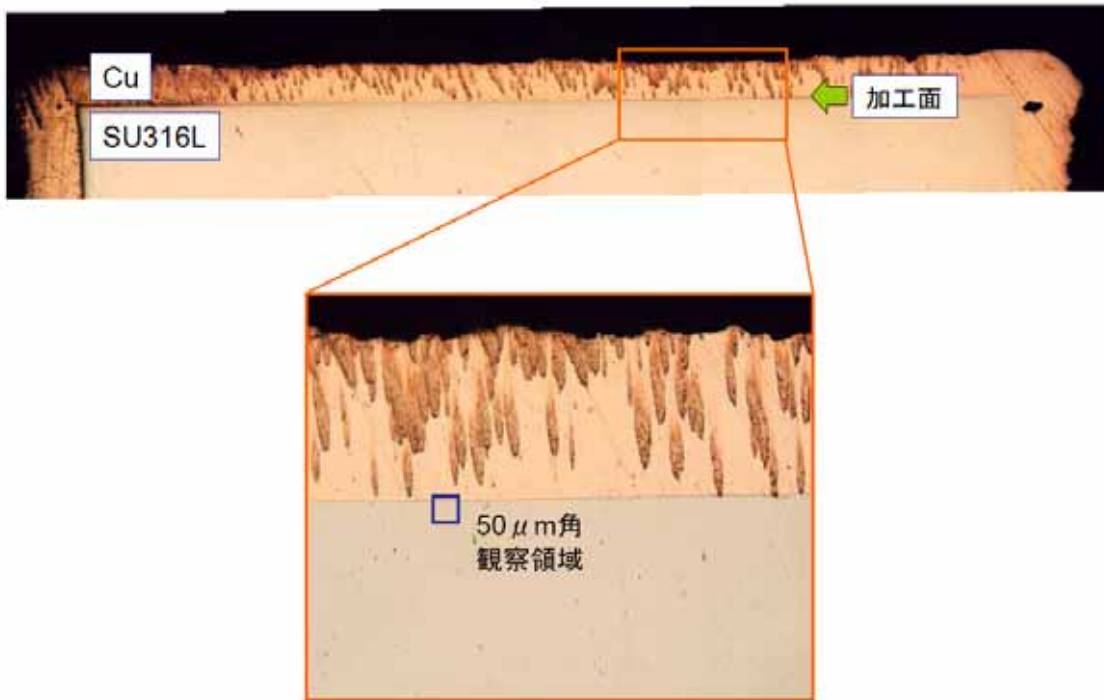
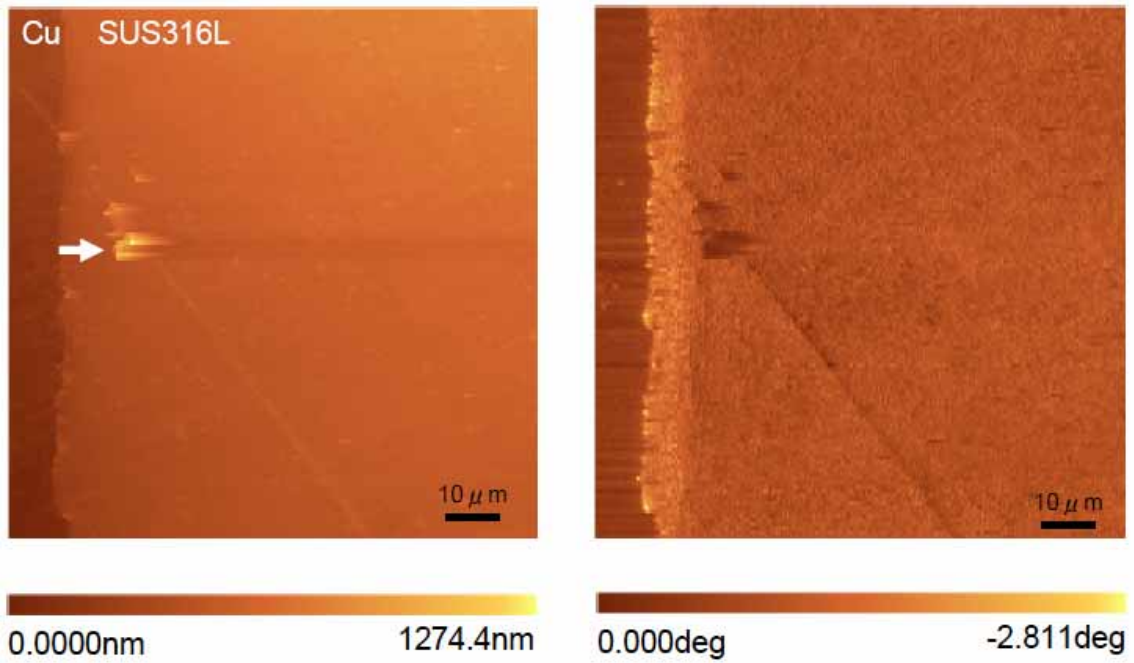


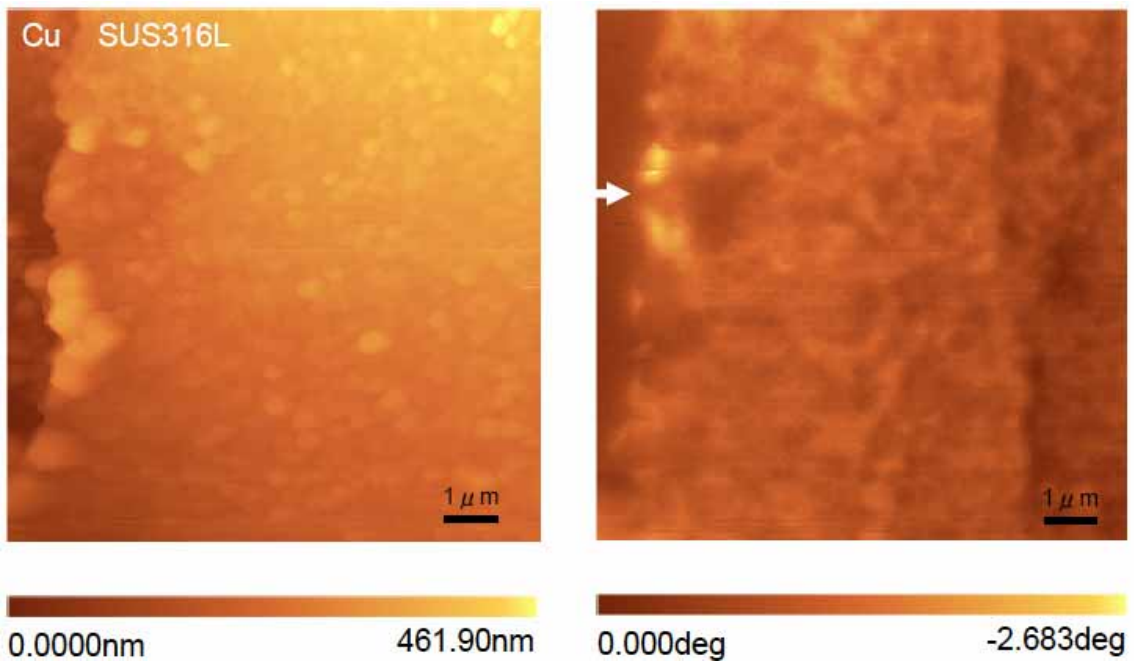
図10 SUS316L-P2 視野2の観察領域 (50μm角)





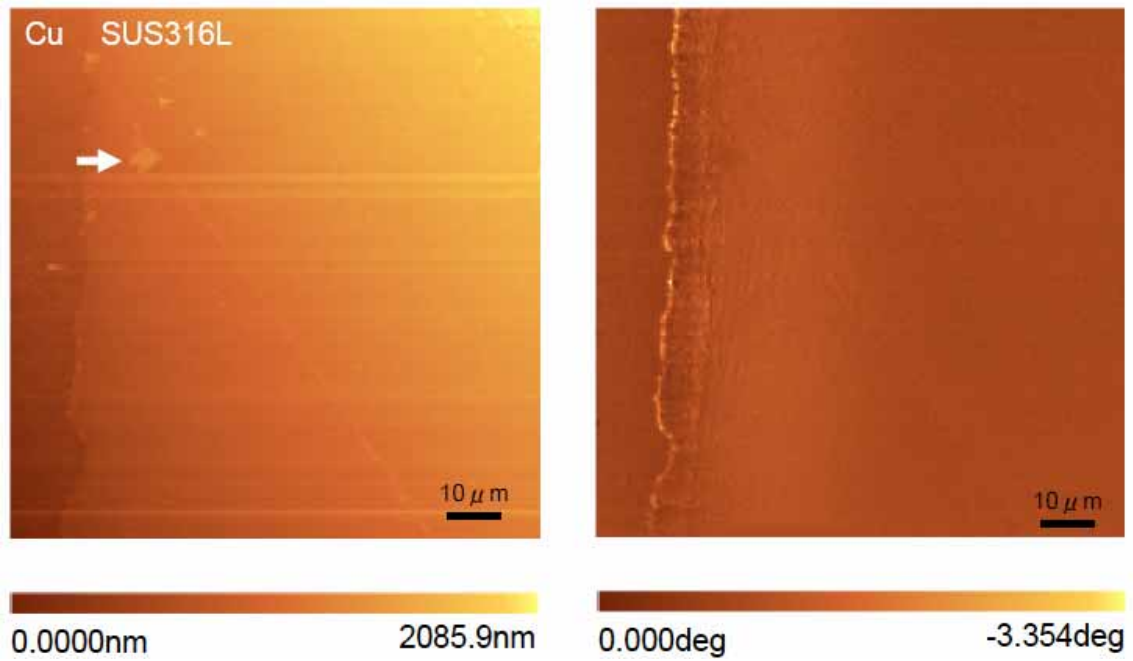
(a) AFM 像 (形状像) (b) MFM 像 (磁気像)

図 11 SUS316L 加工材消磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 1 : 100μm 角)



(a) AFM 像 (形状像) (b) MFM 像 (磁気像)

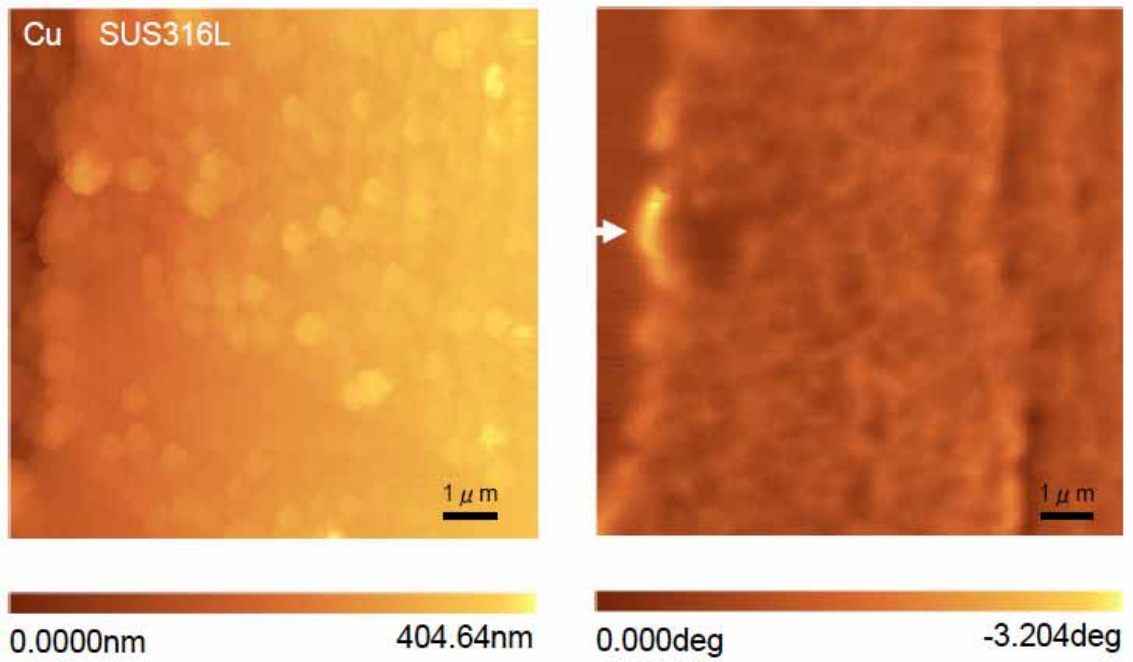
図 12 SUS316L 加工材消磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 1 : 10μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

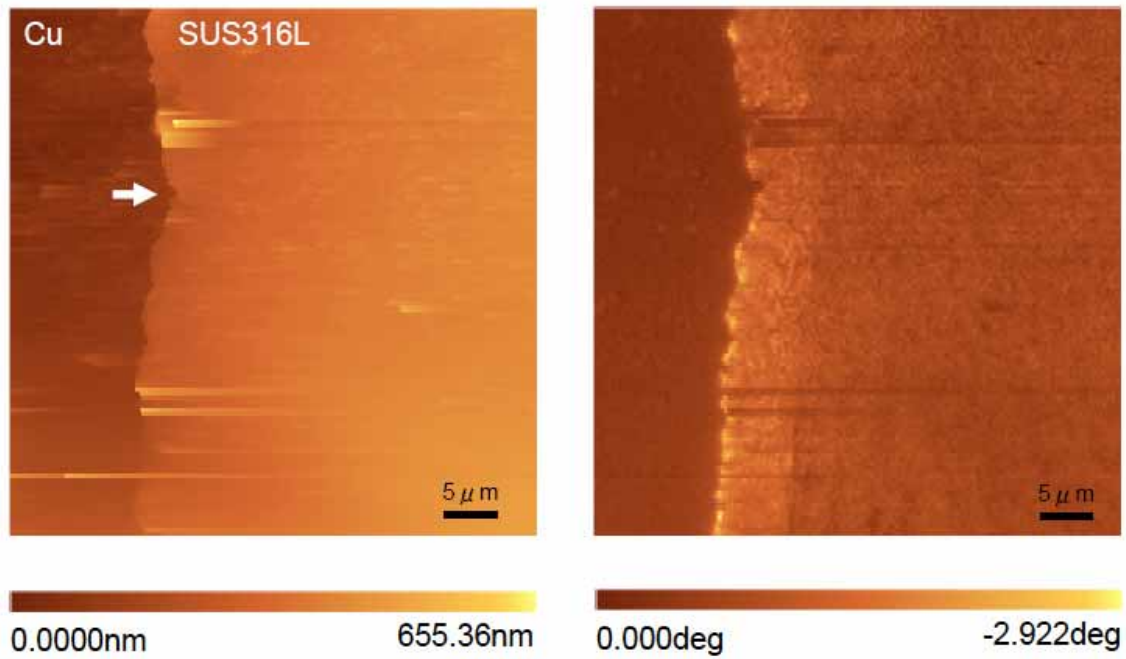
図 13 SUS316L 加工材着磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 1 : 10μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

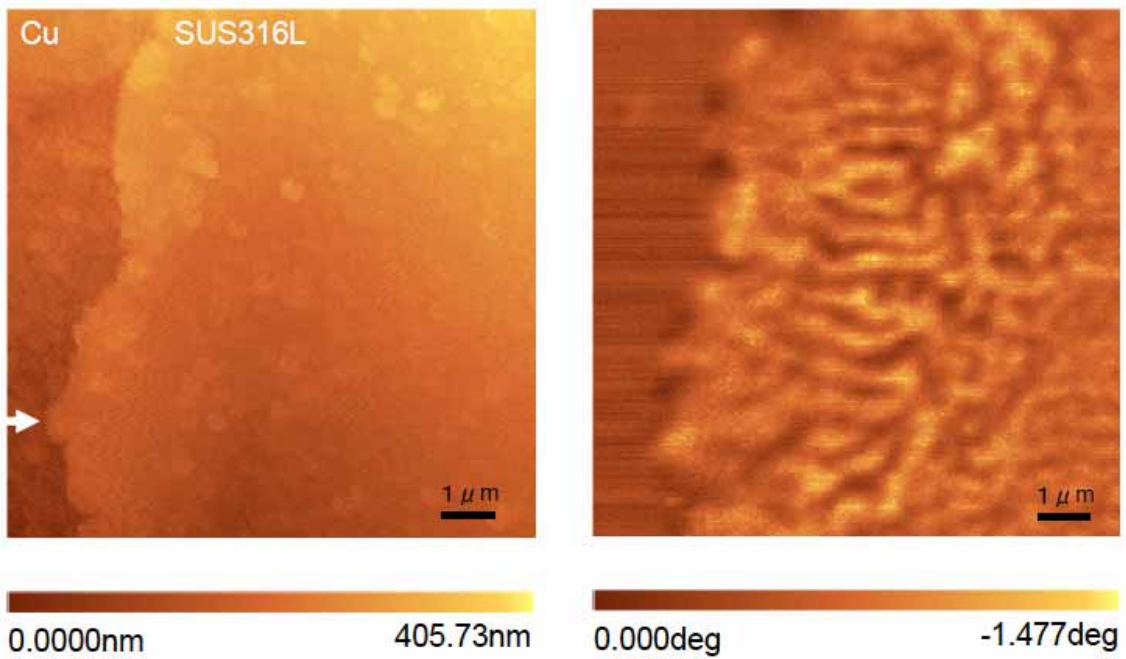
図 14 SUS316L 加工材着磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 1 : 10μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

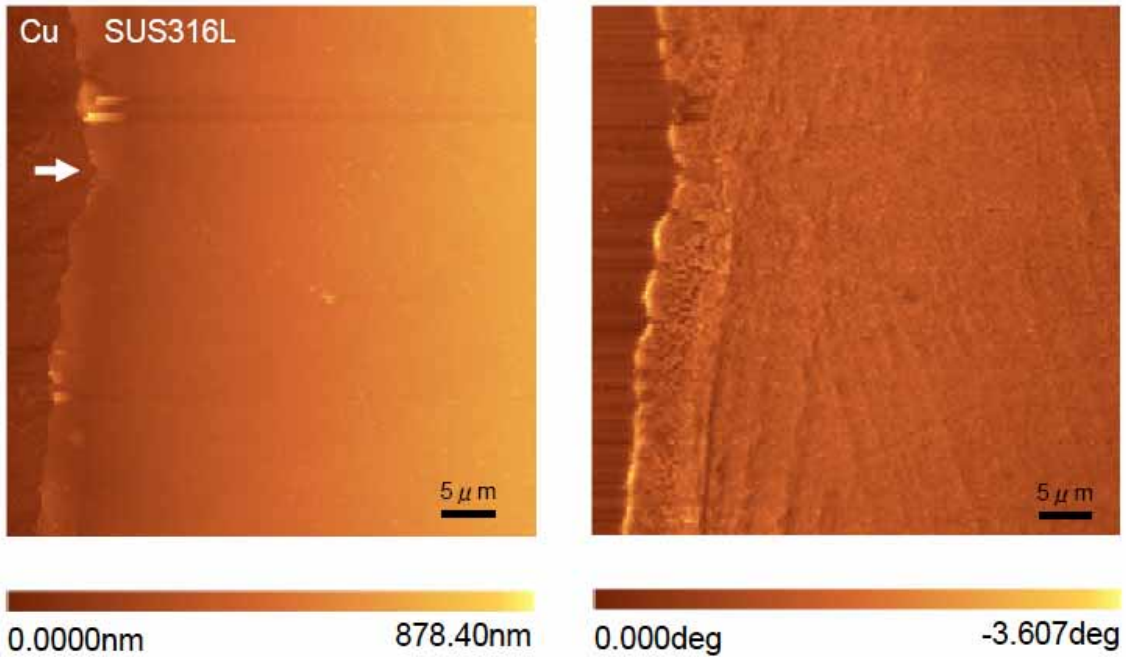
図 15 SUS316L 加工材消磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 2 : 50μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

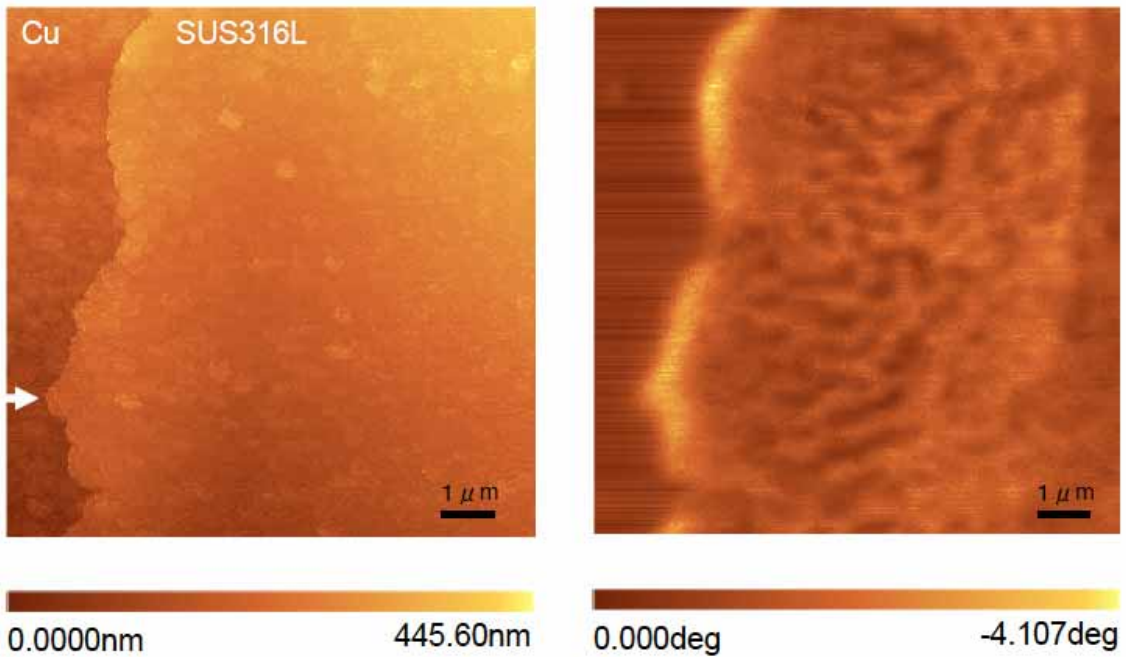
図 16 SUS316L 加工材消磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 2 : 10μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

図 17 SUS316L 加工材着磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 2 : 50μm 角)



(a) AFM 像 (形状像)

(b) MFM 像 (磁気像)

図 18 SUS316L 加工材着磁後の AFM/MFM 観察結果 (視野 2 : 10μm 角)

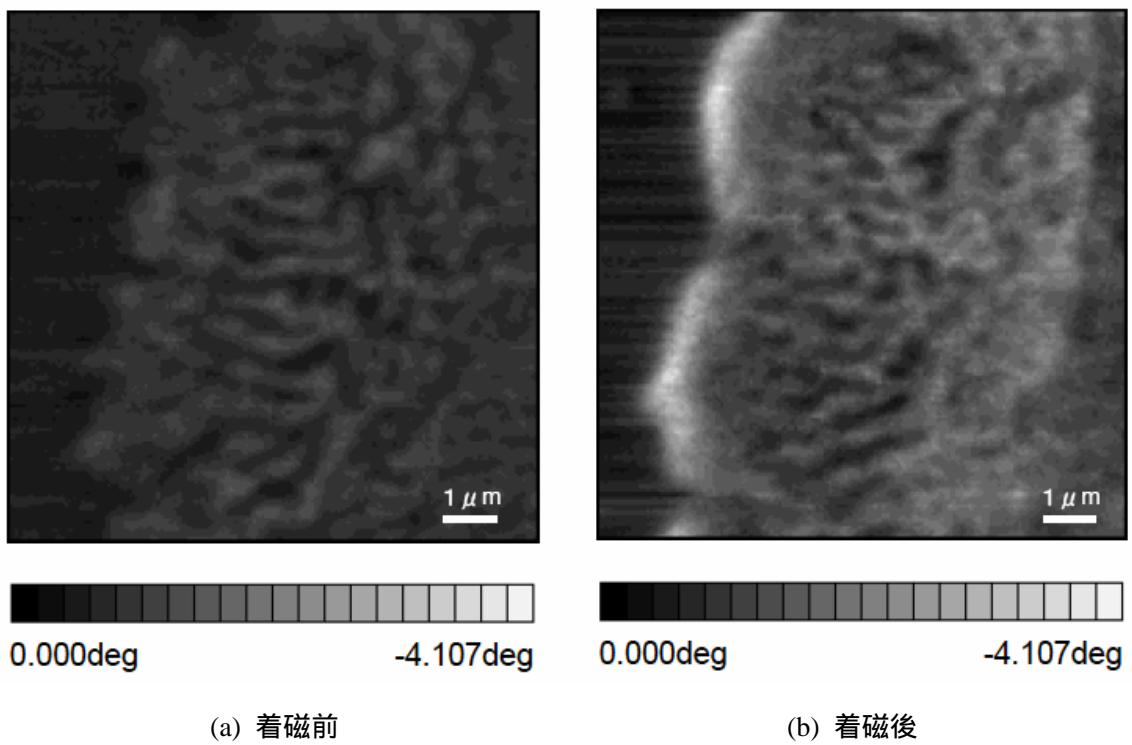


図 19 着磁前後での MFM 像の比較 (SUS316L-P2, 視野 2)

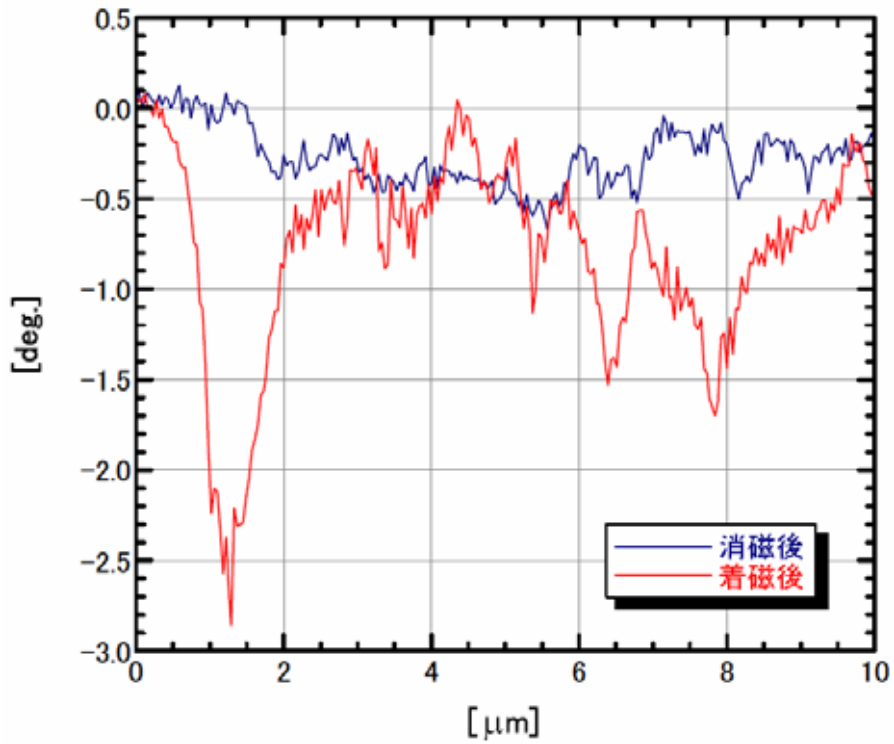


図 20 着磁前後での MFM 信号プロファイルの比較 (SUS316L-P2, 視野 2)

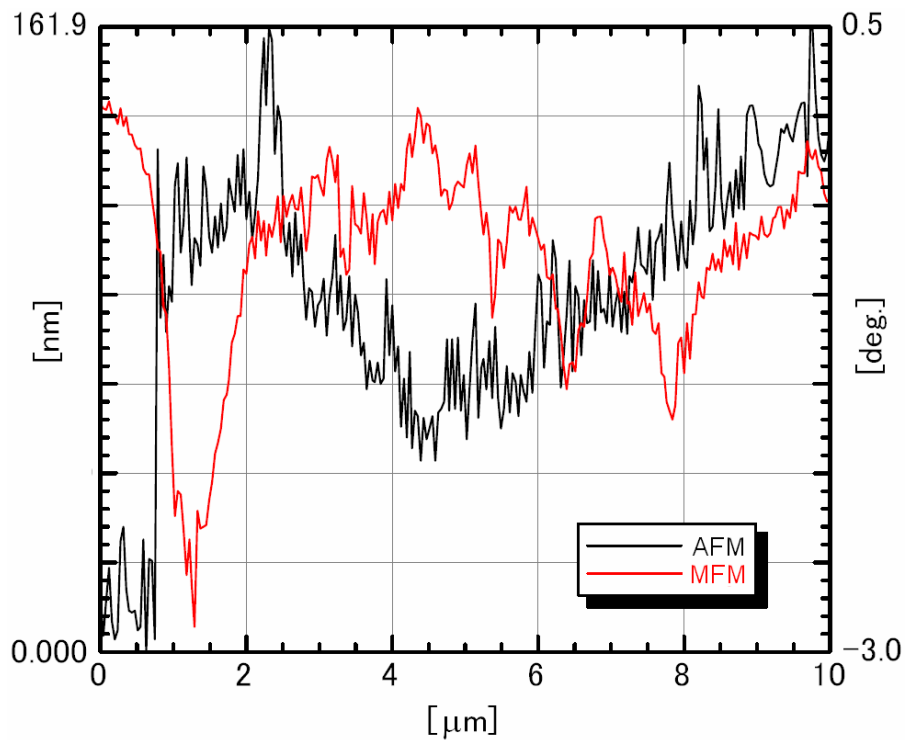


図 21 AFM 信号および着磁後 MFM 信号のプロファイル比較 (SUS316L-P2, 視野 2)



### 3 おわりに

低炭素ステンレス鋼 SUS316L の強切削加工材および未加工材の着磁前後での磁気力顕微鏡観察を行った。未加工材に関しては、試験片表面で磁性相の存在は確認されなかったが、強切削加工材に関しては、加工面ほぼ全面で表面から約 10 $\mu\text{m}$  の深さまで磁性相を観察することが出来た。このことから、加工材で見られた磁性相は強切削加工により導入されたものである。特に、最表層 2  $\mu\text{m}$  の領域で MFM 信号が大きく変化していることから、この領域に内部に比べて大きな磁化が存在するか、あるいは他の領域に比べて急激に磁化の大きさが変化していると考えられる。この傾向は、硬さ試験の結果と定性的に一致している。ただし、この磁気特性変化が起こった原因や、磁気特性と歪み量等他の物理量との定量的な関係を明らかにするためには透過型電子顕微鏡観察など他の手法による観察も併せて行う必要がある。

### 謝辞

本研究は BWR 電力 7 社委託による ( 社 ) 腐食防食協会の「高温純水における低炭素ステンレス鋼の SCC メカニズム研究」の一環として実施されたものである。

### 参考文献

- [1] 鈴木俊一, 日本材料学会第 268 回疲労部門委員会・第 111 回破壊力学部門委員会合同委員会研究討論会資料, **52**,32 (2004).
- [2] C. Schöenberger, S.F. Alvarado, S.E. Lambert and I.L. Sanders, *J. Appl. Phys.*, **67**, 7278 (1990).
- [3] S. Takaya, T. Suzuki, Y. Matsumoto, K. Demachi, M. Uesaka, *J. Nucl. Mater.*, **327**,19 (2004).
- [4] D. Ruger, H.J. Mamin, P. Guethner, S.E.Lambert, J.E. Stern, I.McFadyen, and T. Yogi, *J. Appl. Phys.*, **68** 1169 (1990).

This is a blank page.



# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼツタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s <sup>1</sup> ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>3</sup> ・A <sup>2</sup>
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
(放射核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-4</sup> ・cd=m <sup>-2</sup> ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する際には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup>	
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>	
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>	
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>	
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>	
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>	
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・K <sup>-1</sup>	
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup>	
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>	
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ・s <sup>1</sup> ・A	
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s <sup>1</sup> ・A	
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>	
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>	
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>	
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>1</sup> ・A	
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>	
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ・sr)	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バール	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>11</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m