



Bi-directional Reflectance Distribution Function of a Tungsten Block for ITER Divertor

Atsushi IWAMAE, Hiroaki OGAWA, Tatsuo SUGIE and Yoshinori KUSAMA

Division of ITER Project
Fusion Research and Development Directorate

February 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人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>)
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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 +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

Bi-directional Reflectance Distribution Function of a Tungsten Block for ITER Divertor

Atsushi IWAMAE*, Hiroaki OGAWA, Tatsuo SUGIE and Yoshinori KUSAMA

Division of ITER Project, Fusion Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received December 9, 2011)

In order to investigate reflection properties on plasma-facing material in ITER, the bi-directional reflectance distribution function (BRDF) of a tungsten block sample has been measured. On the machining surface of the block, one-directional machining lines are engraved. Two laser diodes $\lambda 652$ nm and $\lambda 473$ nm were used to simulate H_{α} and H_{β} emissions, respectively. The reflected light is affected by the machining surface. The reflected light traces an arc when the incident light is injected in the parallel direction to the engraved line. On the other hand the reflected light traces a line shape when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines. Ray tracing simulation qualitatively explains the experimental results.

Keywords: BRDF, Tungsten Block, ITER, Reflection Property, Tungsten

* Gigaophoton Inc. (Division of ITER Project, Fusion Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency until June 2011)

イーターダイバータ用タングステンターゲットブロックの双方向反射率分布関数

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 ITER プロジェクトユニット

岩前 敦*、小川 宏明、杉江 達夫、草間 義紀

(2011年12月9日 受理)

ITER のプラズマ対向面での光の反射特性を調べるために、対向面に使われる材料の一つであるタングステンについて、実際に使用が予定されているタングステンブロックのサンプルを使って、双方向反射率分布関数(BRDF)を測定した。 H_{α} 及び H_{β} の光の放射を模擬するために、光源として、波長が652 nm 及び473 nm の2つのレーザーダイオードを用いた。ブロック表面には、機械加工の際に生じた微細な溝が一方向に認められる。そのため、反射光は機械加工した表面の状態によって影響を受け、入射光線を表面の溝の方向に対して平行に入射した場合には、反射光は弧形に分布し、一方、入射光線を表面の溝の方向に対して垂直に入射した場合には、反射光は直線的に分布した。これらの測定結果を、光線追跡により模擬したところ、測定結果を定性的に説明することができた。

那珂核融合研究所(駐在): 〒311-0193 茨城県那珂市向山801-1

*ギガフォトン株式会社(2011年6月まで、日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門
ITER プロジェクトユニット所属)

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment	1
3. Results and Discussion	2
4. Summary	3
Acknowledgments	3
References	4

目 次

1. 序論	1
2. 実験	1
3. 結果及び議論	2
4. まとめ	3
謝辞	3
参考文献	4

1. Introduction

In magnetic fusion experiments, visible light diagnostics are widely used. Typical examples include visible spectrometers, visible diode arrays, and CCD cameras. Occasionally, it is possible to terminate the field-of-view of these diagnostics on viewing dumps such as razor blade stacks to minimize the effect of wall reflection on the measured signals. More often, however, the field-of-view is simply terminated on the vacuum vessel wall tiles. This is especially common for visible light diagnostics which have a large field-of-view, where terminating the entire viewing area would be impractical.

Typically, the divertor region is brightest for the visible emission from magnetic fusion experiments¹⁾. The lower visible emission levels of the main chamber make these measurements susceptible to light pollution from the brighter divertor regions. Investigation of the influence of reflections on measurement in tokamaks has already been made for the visible range²⁾.

Plasma-facing materials in ITER divertor consist of carbon-fiber-composite (CFC) and tungsten (W). CFC reflects light from 0.1% to 0.5% and tungsten reflects light from 10% to 30% in UV and visible wavelength³⁾. The reflection from tungsten may cause stray light for optical diagnostics in ITER. The bi-directional reflectance distribution function (BRDF)^{4),5)}, defining local illumination of the surfaces, has an influence on global illumination because of the inter-reflections between the surfaces of the inner vessel. In order to evaluate the effect of the reflection, BRDF of the tungsten block used at the divertor baffle and dome in ITER has been investigated.

2. Experiment

The defining geometry is shown in Fig. 1 where subscripts *i* and *r* are used to denote incident and reflected quantities, respectively. Thus the direction of the specular beam is $\phi_i = 180^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$ and $\theta_i = \theta_r$. BRDF is defined in radiometric terms as the surface radiance divided by the incident surface irradiance. The surface irradiance P_i (Watts) is the light flux incident on the surface per unit illuminated surface area. If the surface is ideal mirror surface of reflectance R , the out light flux is $P_o = RP_i$. However, on the actual surface the reflected surface radiance P_r is the light flux scattered through solid angle Ω_r per unit illuminated surface area per unit projected solid angle. The project solid angle is the solid angle times $\cos \theta_r$. Thus BRDF is expressed as

$$\text{BRDF} \cong \frac{dP_r/d\Omega_r}{P_i \cos \theta_r} \cong \frac{P_r/\Omega_r}{P_i \cos \theta_r}. \quad (1)$$

The surface of a tungsten block is measured with the violet-laser three-dimensional microscope (KEYENCE VK-9700). The standard surface roughness of the sample block is $R_a = 3.2 \mu\text{m}$. Figure 2 shows the three dimensional plot of the measured surface at the center of the block. Engraved lines by the machining run vertically in Fig. 2.

We take this line direction as the X -direction of the coordinate. The measured depth of the peak to valley is $2.8 \mu\text{m}$. The distance between the engraved lines are randomly distributed in the order of $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$.

BRDFs of the surface of the tungsten block are measured with two laser diodes; $\lambda 652 \text{ nm}$ and $\lambda 473 \text{ nm}$ to simulate H_α and H_β emission, respectively. The diameters of $\lambda 652 \text{ nm}$ and $\lambda 473 \text{ nm}$ lasers are $\phi 4 \text{ mm}$ and $\phi 2 \text{ mm}$, respectively. Since the roughness is small enough compare to the laser diameter, the reflection pattern are almost the same if the laser beam irradiates the slightly different position on the surface of the tungsten block. Figure 3 shows experimental setups for BRDF measurement. Two rotation stages ($\phi 40 \text{ mm}$ and $\phi 160 \text{ mm}$) are used. The $\phi 40 \text{ mm}$ rotation stage supports the block. The light beam from the laser diode illuminates the surface of the tungsten block. Photo diode is mounted on the $\phi 160 \text{ mm}$ rotation stage. The size of the photo diode is $10 \times 10 \text{ mm}^2$. In front of the photo diode, an aperture of $\phi 2.1 \text{ mm}$ is placed. The photo diode detects the reflected light by the surface of the tungsten block. When the incident light is injected to the direction in perpendicular to the engraved lines with incident angles of $\phi_i = 90^\circ$ the photo diode trace the intensity along the rotation of the stage. When the incident light is injected to the direction in parallel to the engraved lines with incident angles of $\phi_i = 180^\circ$ the vertical linear stage is added to trace the arc intensity distribution.

3. Results and Discussion

The reflection light is affected according to the machining lines described in the previous section. Figure 4 shows images of the reflected laser light ($\lambda 652 \text{ nm}$). When the incident light is injected to the parallel to the engraved lines, the reflected light traces an arc shape. On the other hand, when the incident light is injected to the perpendicular to the engraved lines, the reflected light traces a line in the incident plane. When the incident light is injected to the sandblasted tungsten surface, the reflected light is dispersed in every direction.

Some results of BRDF measurements are shown in detail in Figs. 5, 6 and 7. Figure 5 shows BRDF measurement for the $\phi_i = 90^\circ$ case of two colors for (a) $\lambda 652 \text{ nm}$ and (b) $\lambda 473 \text{ nm}$. When the incident light is injected to the parallel to the engraved lines ($\phi_i = 90^\circ$), the BRDF has a peak at its specular position, i.e. $\theta_r = \theta_i$ on the same incident plane as shown in Fig. 5 (a) and (b). The BRDF has broad distribution in incident plane for both laser wavelengths. In Fig. 5 the filled and open marks show S and P-polarization, respectively. The difference of the polarization dependence becomes larger as the incident angle takes large values. The reflection of the S-polarization is higher than that of the P-polarization at the large incident angles θ_i .

Figures 6 and 7 show the arc shape distribution for $\lambda 652 \text{ nm}$ and $\lambda 473 \text{ nm}$, respectively. With an decrease in the incident angle from $\theta_i = 75^\circ$ to 15° , the BRDF

distributions plotted with filled marks in Figs. 6 and 7 get wide and the radius of arc increases, which is plotted with open marks. Both distributions of the BRDF for $\lambda 652$ nm and $\lambda 473$ nm are similar to each other at the same incident angle θ .

Figure 8 shows the ray tracing simulation with ZEMAX of the engraved surface at incident angle $\phi_i = 180^\circ$, $\theta = 45^\circ$. The one dimensional extension in the X-direction of the measured cross section at the Fig. 2 is used to make model surface. The reflected light traces an arc shape. Random light rays within the diameter of $80 \mu\text{m}$ are injected to the model surface. The reflection on the model surface is the dominant process. When the incident angle $\phi_i = 90^\circ$, $\theta = 45^\circ$, the rays trace a line shape. Qualitatively, the ray tracing simulation explains the experimental results.

It is found that the experimental result shows the anisotropy of the BRDF depending on the incident angle. When we use illumination simulator for investigation of the reflection effect, we have to take into account the anisotropy of the BRDF. The modeling of the BRDF for whole incident angle to the tungsten block is not simple problem to solve.

4. Summary

The BRDF of machining surface of a tungsten block is experimentally examined. When the incident light is injected to the direction in perpendicular to the engraved lines $\phi_i = 90^\circ$, the reflected light traces a line. When the incident light is injected to the direction in parallel to the engraved lines $\phi_i = 180^\circ$, the reflected light traces an arc shape. The ray tracing simulation qualitatively explains the experimental results.

Acknowledgments

The authors are grateful to Dr. S. Suzuki of JAEA for supplying us a sample of the tungsten block. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect of the ITER organization.

References

- 1) Iwamae, A., Sugie, T., Ogawa, H. and Kusama, Y., Synthesized intensity of emission lines of hydrogen isotopes and impurities in the ITER divertor plasma, Plasma Phys. Control. Fusion, vol. 53, no. 045005, 2011, pp.1-17.
- 2) Schunke, B., Huysmans, G. T., Thomas, P. R., Evidence of the influence of reflections on the Z_{eff} profile measurements in the Tore Supra tokamak and their mitigation, Rev. Sci. Instrum., vol. 76, no. 083501, 2005, pp. 1-5.
- 3) Iwamae, A., Sugie, T., Ogawa, H., Kusama, Y., Divertor Impurity-Influx Monitor for ITER: Spectral Throughput Measurement on an Optical Prototype for the Upper Port and Optimization of Viewing Chords based on Computerized Tomography, Plasma and Fusion Research vol. 4, no. 042, 2009, pp. 1-11.
- 4) Nicodemus, F. E., Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface, 1965 Applied Optics vol. 4, no. 7, 1965, pp. 767-773.
- 5) Stover, J. C., Optical Scattering-Measurement and Analysis (second edition), SPIE (Bellingham), 1995, 332p., ISBN:978-0-8194-1934-7.

図リスト

- Fig.1 Geometry for the definition of BRDF. X-direction is taken as the direction of the machining graved line. ----- 6
- Fig.2 The three dimensional plot of the surface of a tungsten block. (Violet-laser three-dimensional microscope: KEYENCE VK-9700) ----- 6
- Fig.3 Experimental setup for BRDF measurements: (a) The laser light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines ($\phi_i = 90^\circ$). (b) The laser light is injected in the parallel direction to the engraved lines ($\phi_i = 180^\circ$). The $\phi 40$ mm rotation stage supports a tungsten block. The $\phi 160$ mm rotation stage supports a photo diode detector. Additional vertical linear stage is added for the $\phi_i = 180^\circ$ measurement to trace an arc shape of the reflected light. ----- 7
- Fig.4 Reflections when $\theta_i = 45^\circ$; (a) the reflected light traces an arc when the incident light is injected in the parallel direction to the engraved lines $\phi_i = 180$, (b) the reflected light traces a line when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines $\phi_i = 90^\circ$, (c) the reflected light is dispersed when the incident light is injected to the sandblasted tungsten surface. ----- 7
- Fig.5 BRDFs ($\phi_i = 90^\circ$): The reflected light traces in the cases when the incident light is injected in the parallel direction to the engraved lines. Laser wavelength: (a) $\lambda 652$ nm; filled and open marks show S- and P-polarization, respectively. (b) $\lambda 473$ nm; filled and open marks show S- and P-polarization, respectively. ----- 8
- Fig.6 BRDFs ($\phi_i = 180^\circ$): The reflected light traces in the cases when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines at the wavelength λ of 652 nm. (a) P-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively. (b) S-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively. ----- 9
- Fig.7 BRDFs ($\phi_i = 180^\circ$): The reflected light traces in the cases when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines at the wavelength λ of 473 nm. (a) P-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively. (b) S-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively. ----- 10
- Fig.8 ZEMAX simulation: (a) Three dimensional configuration ($\phi_i = 180^\circ$, $\theta_i = 45^\circ$). Random rays within the diameter of 80 μm are injected to the model surface. (b) Reflection pattern is shown on the image plane. Rays trace an arc shape. ----- 11

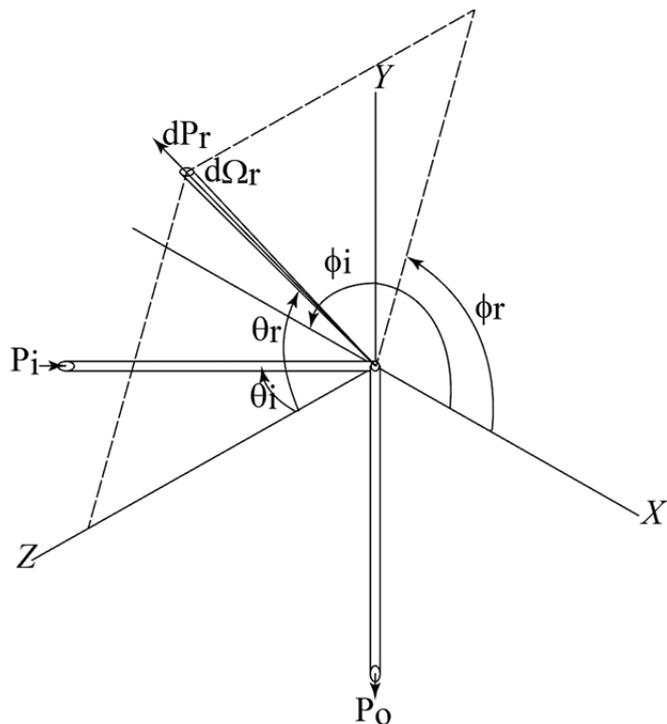


Fig.1 Geometry for the definition of BRDF. X -direction is taken as the direction of the machining grinded line.

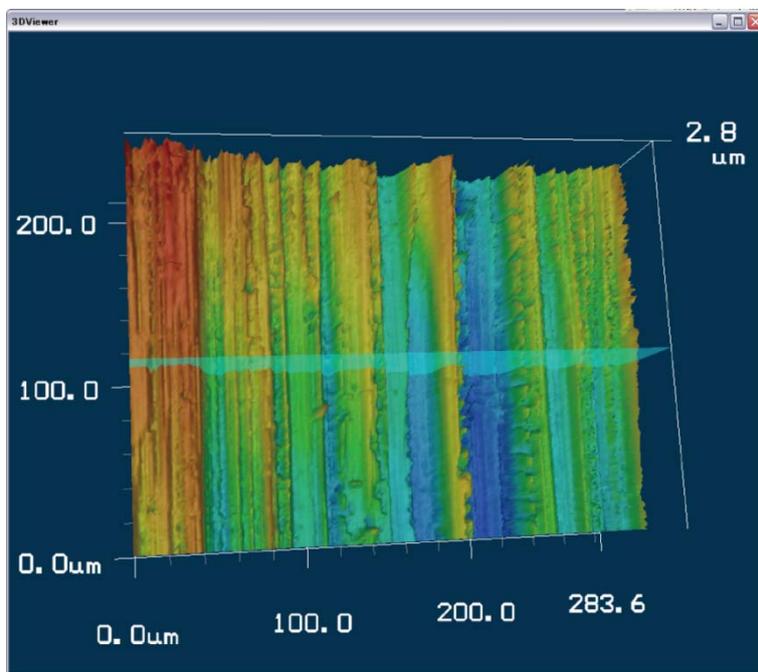


Fig.2 The three dimensional plot of the surface of a tungsten block. (Violet-laser three-dimensional microscope: KEYENCE VK-9700)

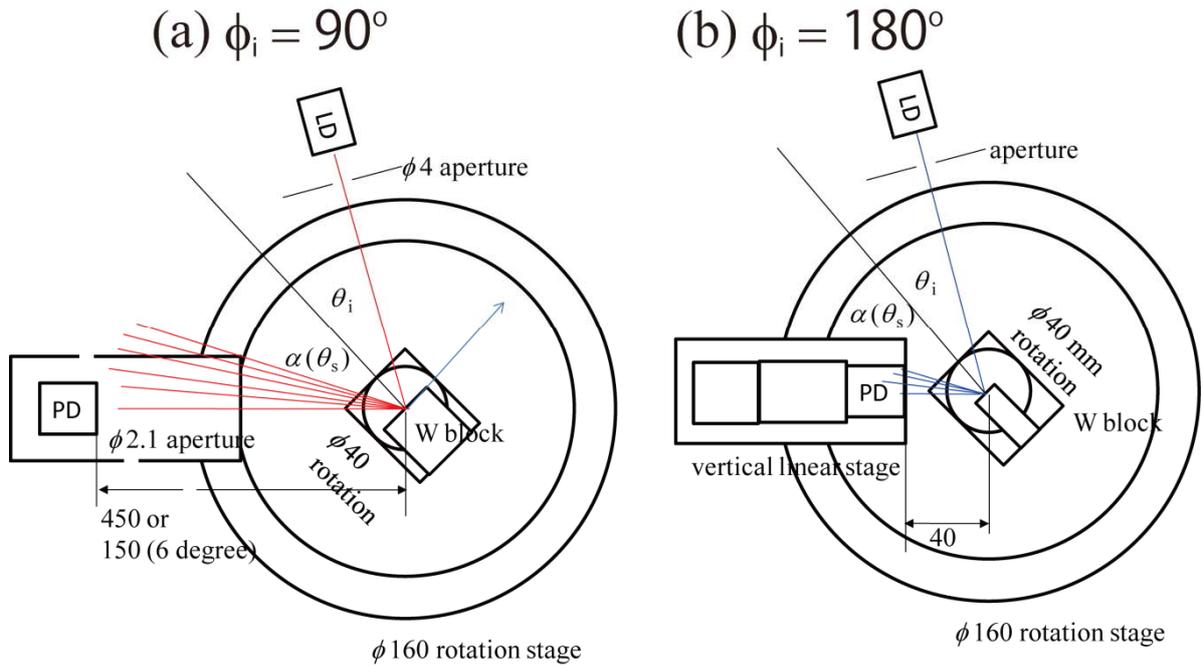


Fig.3 Experimental setup for BRDF measurements: (a) The laser light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines ($\phi_i = 90^\circ$). (b) The laser light is injected in the parallel direction to the engraved lines ($\phi_i = 180^\circ$). The $\phi 40$ mm rotation stage supports a tungsten block. The $\phi 160$ mm rotation stage supports a photo diode detector. Additional vertical linear stage is added for the $\phi_i = 180^\circ$ measurement to trace an arc shape of the reflected light.

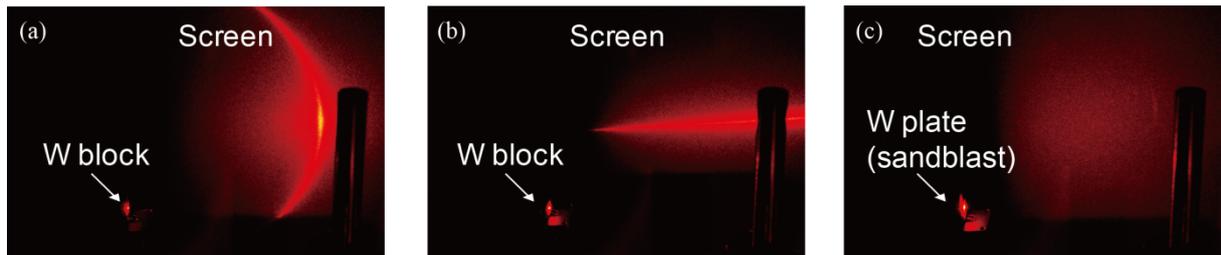


Fig.4 Reflections when $\theta = 45^\circ$; (a) the reflected light traces an arc when the incident light is injected in the parallel direction to the engraved lines $\phi_i = 180$, (b) the reflected light traces a line when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines $\phi_i = 90^\circ$, (c) the reflected light is dispersed when the incident light is injected to the sandblasted tungsten surface.

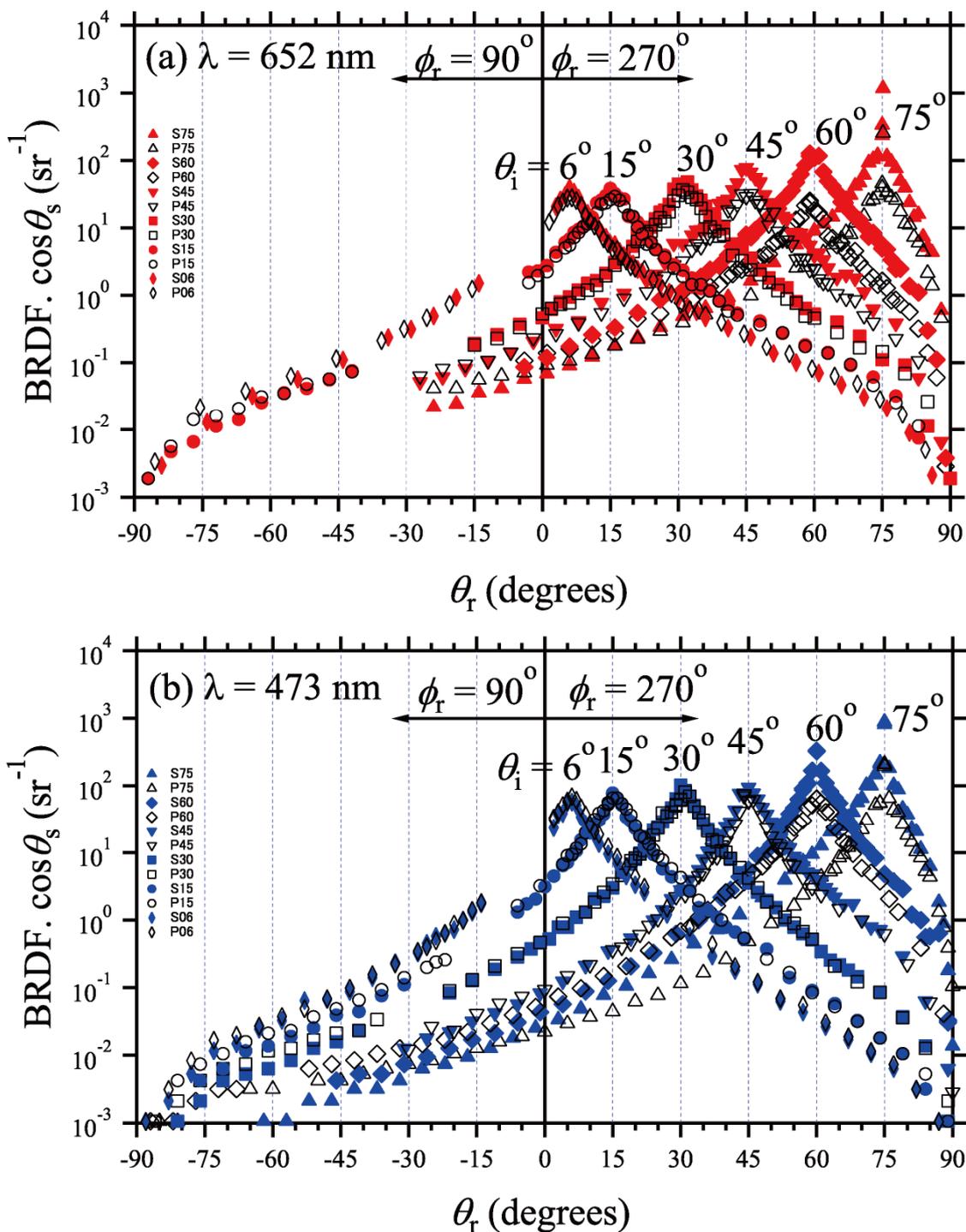


Fig.5 BRDFs ($\phi_i = 90^\circ$): The reflected light traces in the cases when the incident light is injected in the parallel direction to the engraved lines. Laser wavelength: (a) $\lambda 652 \text{ nm}$; filled and open marks show S- and P-polarization, respectively. (b) $\lambda 473 \text{ nm}$; filled and open marks show S- and P-polarization, respectively.

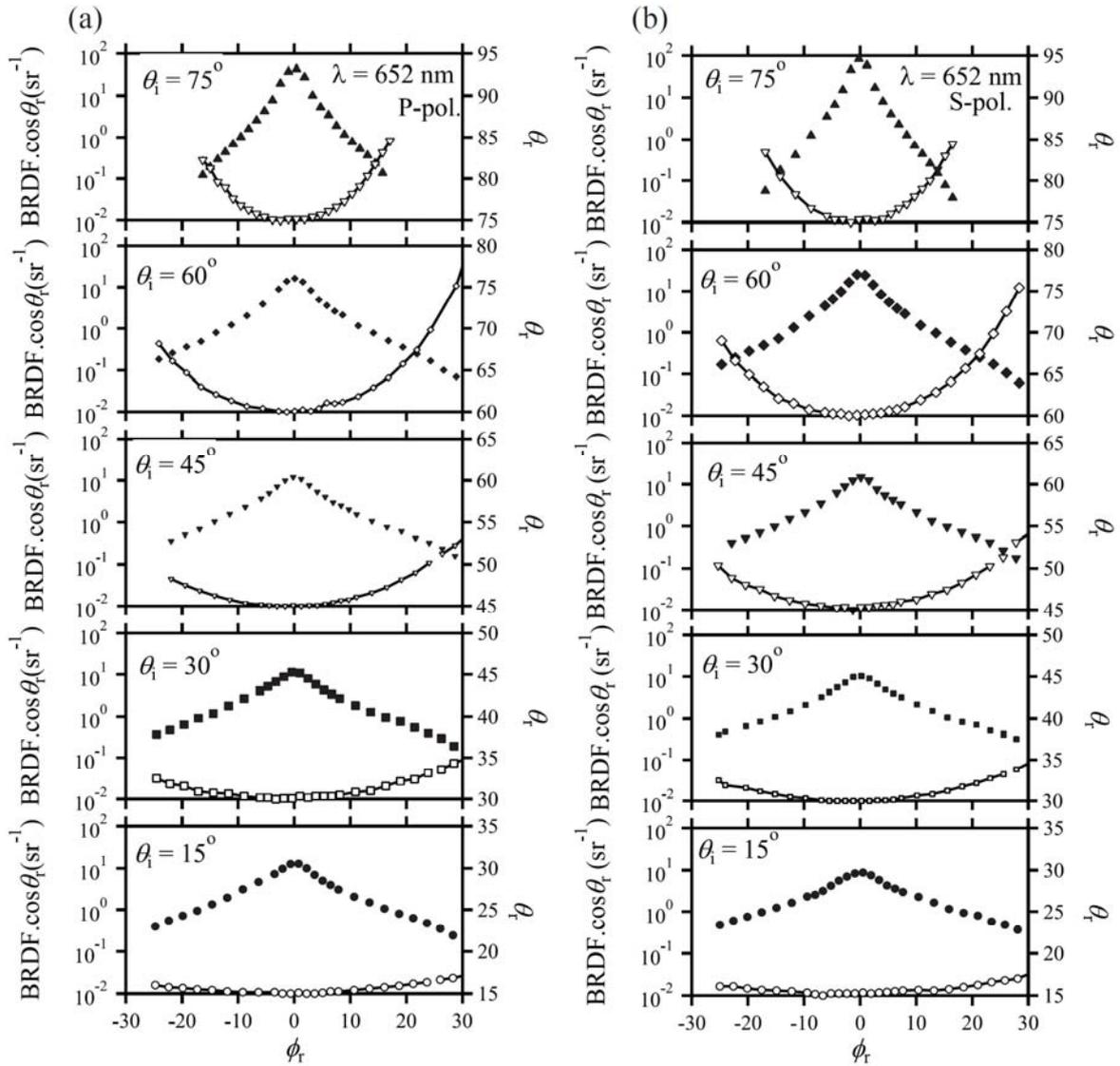


Fig.6 BRDFs ($\phi_r = 180^\circ$): The reflected light traces in the cases when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines at the wavelength λ of 652 nm. (a) P-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively. (b) S-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively.

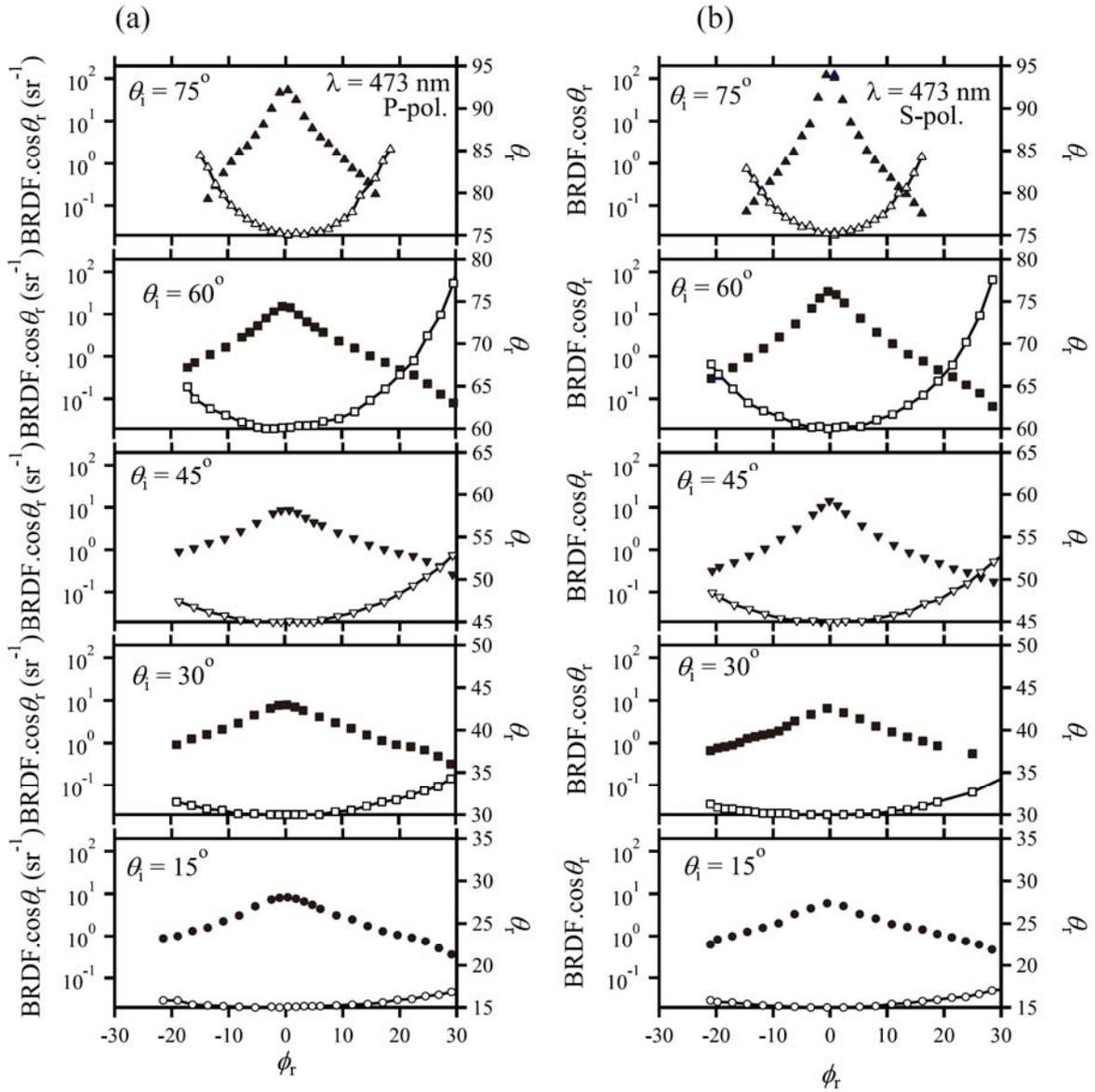


Fig.7 BRDFs ($\phi_i = 180^\circ$): The reflected light traces in the cases when the incident light is injected in the perpendicular direction to the engraved lines at the wavelength λ of 473 nm. (a) P-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively. (b) S-polarization; filled and open marks show BRDF and θ_r , respectively.

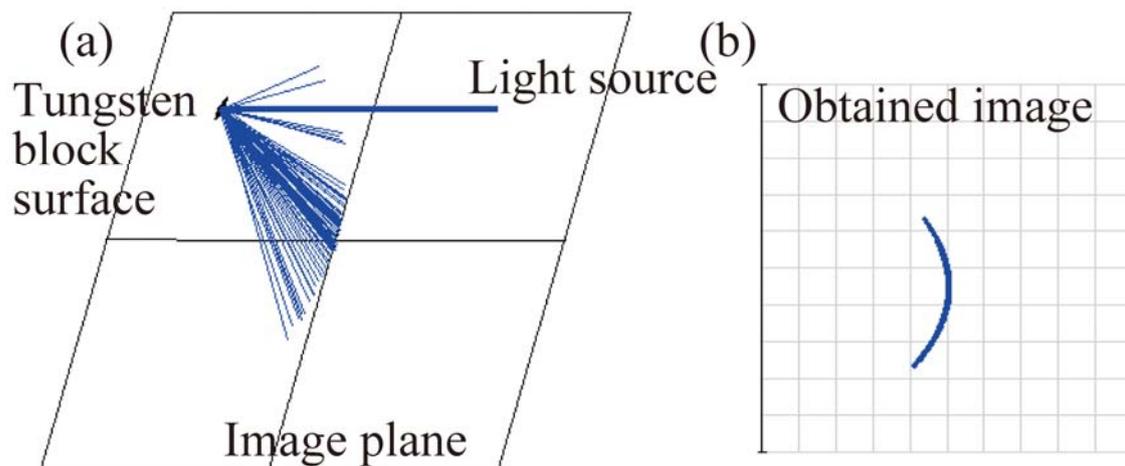


Fig.8 ZEMAX simulation: (a) Three dimensional configuration ($\phi_i = 180^\circ$, $\theta_i = 45^\circ$). Random rays within the diameter of $80 \mu\text{m}$ are injected to the model surface. (b) Reflection pattern is shown on the image plane. Rays trace an arc shape.

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 ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号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である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間は同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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 ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

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=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バトン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベクレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ 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	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

