

複素屈折率を指標とする真実接触面積測定の可能性検討

服部 泰久^{*1}

Feasibility Study on Measuring Real Contact Area Using Complex Refractive Index as an Indicator

by

Yasuhisa HATTORI^{*1}

(Received on Sep. 30, 2019 and accepted on Nov. 7, 2019)

Abstract

A new method for determining real contact area was attempted by measuring the complex refractive index of the material contained inside the contact surface by using the ellipsometry technique. Taking the contact of a steel ball with a glass plane as an example, the distribution of refractive index as well as extinction coefficient within the contact surface through the glass were successfully measured and the results showed generally good agreement with the physical properties. These measured values were considered independent of the surrounding media and of the image capture conditions, and their transition ranges were narrower than that of brightness change measured by contact microscope. As another example of contact of a glass lens, the ellipsometer successfully measured the distribution of refractive index and extinction coefficient, though the contact microscope failed. These results suggest that complex refractive index could be an effective indicator for determining real contact area.

Keywords: Real contact area, Ellipsometry, Refractive index, Extinction coefficient, Contact microscope

1. 諸 言

固体面の接触において表面形状の頂部のみが実際に接触する真実接触は、荷重分布や摩擦特性、伝熱・接触電気特性などに直結する重要な特徴であり、実用面でも研究面でもモニタリングしたいという要求は大きい。真実接触の測定法については種々の解説があり¹⁻³⁾、接触電気抵抗を測定する方法、移着を利用する方法、光学的反射を利用する方法、転写を利用する方法、超音波を利用する方法などが紹介されているが、いずれも一長一短であり万能の方法はない。この中で、光学的反射を利用する方法のひとつの接触面顕微鏡は、比較的簡便に真実接触部の平面内分布が得られ、その空間分解能が高いことから、一方の物体を透明にしなければならない制約にもかかわらずよく利用されており、他の測定法に対する標準にもなっている⁴⁻⁶⁾。

接触面顕微鏡は、試料をガラス等の透明体に接触させ、その接触面に全反射が成り立つ角度で光を入射するとき、真実接触部で一部吸収がおこる性質を利用して、反射光から明暗の差のある接触面画像を得る手法である。ただし、この方法では、真実接触部周囲の固体間すき間が連続的に広がる部分で画像の輝度も連続的に変化するため、真実接触部を確定するためには画像を輝度により二値化して境界を定めなければならない。これには何らかの基

準によるキャリブレーションが必要であり、文献 4-6)ではヘルツ接触の接触円半径の実測値が理論値と一致するように二値化のしきい値を決める操作が行われている。しかしながら、画像取得の設定は経験的に行われているため画像の輝度には物理的な意味はなく、決定されるしきい値にも明確な根拠はない。また、その値は試料材質や雰囲気によっても変える必要があり、複数の物質や雰囲気が混在する場合には定量的な測定は困難となる。

ところで、接触面顕微鏡では、偏光の調節により接触・非接触両部分からの反射光の間に明暗のコントラストを付ける工夫が併用されることが多いが、この光学系はエリプソメトリー（偏光解析法）のうちの消光法に類似のものである。エリプソメトリーでは、測定対象の光学物性や膜厚さ等の測定法が確立されている⁷⁾。そこで、接触面顕微鏡においてもエリプソメトリーの手法を利用して、接触面内の複素屈折率分布を把握することができれば、それを指標として物理的に明確な根拠をもって真実接触の測定が可能になることが期待される。しかしながら、真実接触の測定に物質の複素屈折率を指標とする方法はこれまでに例を見ない。

本論文では、接触面顕微鏡と同一の光学系において接触面内の複素屈折率測定を行い、真実接触面積測定への応用可能性について検討する。

^{*1} 工学部機械工学科准教授

2. 実験装置および測定原理

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。これは偏光調節機能を持った接触面顕微鏡である。ガラス平面にガラス側から全反射が成り立つ入射角で波長 $\lambda = 525\text{nm}$ の LED 光を入射する。ガラスは N-SF11 を材質とする屈折率 $n_g = 1.797$ の高屈折率ガラスプリズムであり、入射角 $\phi_i = 60^\circ$ とした場合、相手媒質の屈折率が 1.556 未満ならこの条件を満たす。このときガラス平面に試料が押し当てられていると、非接触部では全反射が保たれるが、接触部では一部吸収が起こって減衰全反射となるため、両部分の間に明暗の差のついた接触面画像がカメラでとらえられる。また、反射光の偏光状態は接触部と非接触部で異なるため、入射側、反射側それぞれの偏光板角度 θ_p , θ_A によって両部分からの反射光強度は相対的に変化し、適切な角度を選択することによって明暗の差をより大きくすることができる。

一方、この装置は回転検光子型のエリプソメータにもなっている⁷⁾。この装置で反射側検光子（偏光板）を回転させると、カメラで検出される光強度 I は検光子角度 θ_A に対して次のように 180° 周期の三角関数状に変化する。

$$I = I_0(1 + \alpha \cos 2\theta_A + \beta \sin 2\theta_A) \quad (1)$$

係数 α , β には装置構成と試料における反射特性が反映されており、次の関係式で表される⁷⁾。

$$\alpha = \frac{\cos 2\theta_p - \cos 2\Psi}{1 - \cos 2\theta_p \cos 2\Psi} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\sin 2\Psi \cos \Delta \sin 2\theta_p}{1 - \cos 2\theta_p \cos 2\Psi} \quad (3)$$

ここで θ_p は入射側偏光板角度である。また Ψ , Δ は試料の反射特性を表す角度であり、その意味については後述する。実験では、検光子角度 θ_A に対する光強度変化を測定し、式(1)より係数 α , β を決定すれば、式(2)および(3)の関係から Ψ , Δ を算出できる。

反射特性を表す角度 Ψ , Δ は、p 偏光, s 偏光, それぞれの振幅反射係数 r_p , r_s によって次のように定義される量である⁷⁾。

$$\frac{r_p}{r_s} \equiv \tan \Psi \exp(i\Delta) \quad (4)$$

本測定では、Fig. 2 のように、測定対象における反射をガラス側から単一媒質への入射に対する応答としてとらえている。この場合の振幅反射係数 r_p , r_s は次のフレネルの式として与えられる⁷⁾。

$$r_p = \frac{(N^2/n_g)\cos\phi_i - \sqrt{N^2 - n_g^2\sin^2\phi_i}}{(N^2/n_g)\cos\phi_i + \sqrt{N^2 - n_g^2\sin^2\phi_i}} \quad (5)$$

$$r_s = \frac{n_g\cos\phi_i - \sqrt{N^2 - n_g^2\sin^2\phi_i}}{n_g\cos\phi_i + \sqrt{N^2 - n_g^2\sin^2\phi_i}} \quad (6)$$

ここで N は測定対象の複素屈折率である。

$$N = n - ik \quad (7)$$

式(4)に式(5),(6)を代入した形に、実験より求めた Ψ , Δ を代入することで複素屈折率 N が求められ、屈折率 n と消衰係数 k はその実部と虚部として得ることができる。

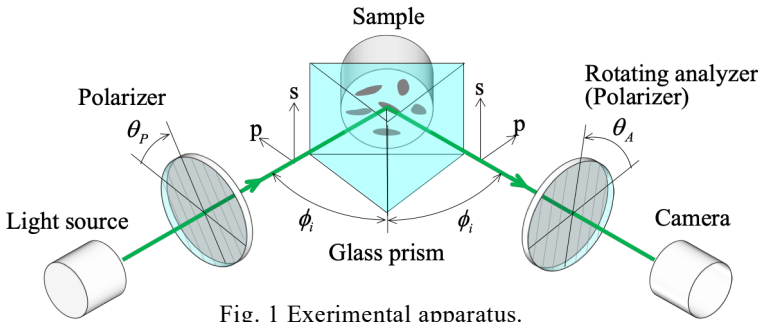


Fig. 1 Experimental apparatus.

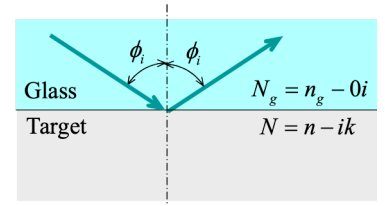


Fig. 2 Optical model of reflection.

Table 1 Experimental conditions.

	Case 1	Case 2
Sample	Steel ball	Glass(BK7) lens
Radius R [mm]	5	10.38
Load W [N]	0.25	0.5
Atmosphere	Air, Water	Air, Water
Radius of Hertzian contact a [μm]	23.9	44.2

Table 2 Material constants.

	Steel	Glass (BK7)	Air	Water	Glass (N-SF11)
Young's modulus E [GPa]	208	80	-	-	91.2
Poisson's ratio ν	0.3	0.205	-	-	0.255
Refractive index n	2.43 ⁸⁾	1.519	1	1.333	1.797
Extinction coefficient k	3.3 ⁸⁾	0	0	0	0

なお、本装置では入射側偏光板の透過軸角度 θ_p は 45° に固定している。また、通常のエリプソメータと異なり、試料面での反射の前後に、空気からガラスプリズムへの透過、および、その逆向きの透過の過程が追加されているが、入射角 $\phi_i = 60^\circ$ 、プリズム頂角 60° である本装置の場合は光線が垂直入射となるため p 偏光、s 偏光の透過特性は同一であり、式(4)の比を変化させることがないことから、上記の関係式をそのままの形で用いることができる。

3. 測定方法および条件

試料として球面を接触させた場合の接触状態について測定を行う。実験条件を Table 1 に、使用する物質の材料定数を Table 2 に示す。試料には転がり軸受用鋼球および BK7 を材質とするガラスレンズを選び、雰囲気はそれぞれ空気と水で行う。試料はばねを介してガラスプリズム平面に押し当て、ばねの変形量の調節により荷重を設定する。

測定ごとのばらつきを抑えるために、撮影画像中の最大輝度が一定となるように光源のパワーを調整する。接触面顕微鏡としては、非接触部の明るさが最大となる、入射側偏光板角度 $\theta_p = 45^\circ$ 、反射側偏光板角度 $\theta_A = 45^\circ$ に固定して接触面画像を撮影し、画像内輝度（8 ビットデジタル画像 256 階調中のレベル）の分布を導出する。エリプソメータとしては、 $\theta_p = 45^\circ$ として θ_A を 0 から 180° の範囲を 16 分割で撮影し、画像の各画素に対して前章の方法にしたがって屈折率 n と消衰係数 k を算出して接触面内分布を得る。

なお、平滑な球面と平面の弾性接触問題は Hertz により理論解が導かれており、縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、曲率半径 R の球面が、縦弾性係数 E_g 、ポアソン比 ν_g のガラス平面に荷重 W で接触するときの接触円半径 a は次式で表される⁹⁾。

$$a = \sqrt[3]{\frac{3WR}{4} \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_g^2}{E_g} \right)} \quad (8)$$

球面・平面のひずみが小さく接触円半径 a が十分小さいとき式(8)は精度よく成り立つと考えられるので、これによって接触面顕微鏡およびエリプソメータによる測定結果を検証する。2 つの例における接触円半径 a の理論値を Table 1 に合わせて示す。

4. 測定結果および考察

Fig. 3 は Case 1 について接触面顕微鏡で測定を行った結果で、(a), (b) は空気中で鋼球を接触させたときの接触面画像と接触円中央位置の輝度ラインプロファイルであり、(c), (d) はそれらの水中の場合である。 x, y は接触面

内の位置で、測定光の入射面に対してそれぞれ垂直方向、平行方向である。本装置では斜方からの撮影であるため、接触面画像(a), (c) は y 方向に圧縮されて映り、ピントの合う範囲も y 方向中央付近の狭い範囲に限られる。接触円は周囲に比べて暗く現れるが、それぞれの輝度レベルは空気中と液体中で同一でないことがわかる。ラインプロファイル(b), (d) に見られるように接触円外側のすき間が広がる領域では輝度が連続的に変化するため、明暗により接触部分を判別するためにはしきい値の設定が必要となるが、特に液体中では変化は緩やかであり、しきい値の選定で測定結果が大きく変わることがわかる。また、その選定は実験条件に加えて画像の輝度レベルにも影響され、固定値を取ることができない。

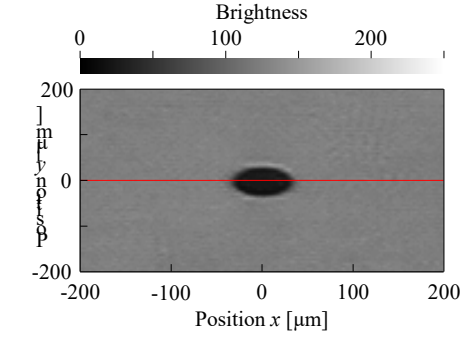
Fig. 4 (a)～(d) は、Case 1 についてエリプソメータで屈折率 n を測定した結果で、(a), (b) は空気中の場合の接触面内分布とラインプロファイルであり、(c), (d) はそれらの水中の場合である。ラインプロファイル(b), (d) において、接触部から離れた外側では空気中水中を問わず雰囲気物質の物性値通りの値が現れており、接触部中央では周囲とは明確に異なる値を示している。これらの値は画像の輝度レベルや雰囲気物質の違い等のコンディションには依存せず同一の値が得られるため、物理的な根拠をもった接触部分判別の指標となり得る。また、接触部の外側では屈折率の測定値は連続的に変化しているが、その範囲は接触面顕微鏡による輝度分布 (Fig. 3(b), (d)) の変化の範囲と同程度あるいは比較的狭いように見受けられる。

しかしながら、ラインプロファイル (Fig. 4(b), (d)) において、接触部の境界で屈折率の測定値が不連続に変化する乱れが現れることがある。これは接触面内分布 (Fig. 4(a), (c)) においても接触部周囲の同心円状の変動として認められる。この原因としては、接触部周囲のガラス平面と鋼球の間にわずかなすき間ができていた領域で、全反射光が鋼球表面の影響を受けて変化している可能性があり、すき間を考慮した全反射の光学モデルの適用を検討する余地がある。

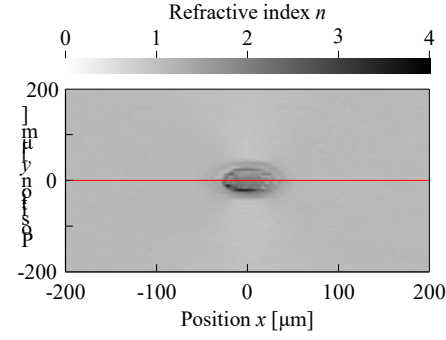
また、接触部内部で屈折率の測定値が物性値まで及んでいないが、この原因として、鋼球表面の表面粗さによりヘルツ接触部内側にも微細なすき間が存在し^{*2}、固体とすき間媒質の混合した状態（有効媒質）の屈折率が測定されている可能性が考えられる。その場合、有効媒質の物性値は表面粗さの程度によって変わり特定できないため、測定値の検証はできない。ただし、測定値は固体とすき間媒質の物性値を反映した中間的な値として得られており、周囲媒質（空気）の測定値と明確な差が見られるので、接触部を判別する指標としては有効であると考える。

Fig. 4 (e)～(h) は、Case 1 について測定した複素屈折率の虚部から得られた消衰係数 k の結果で、(e), (f) は空気中の場合の接触面内分布とラインプロファイルであり、

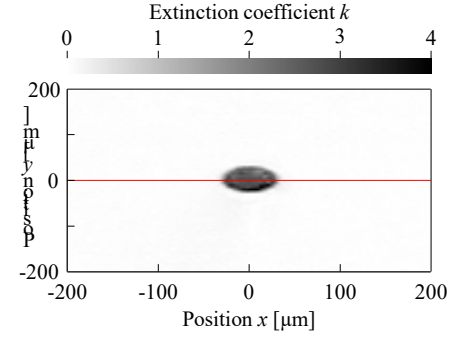
*2 表面粗さ形状が測定のサンプリング間隔によって大きく変わるように、真実接触状態も注目するスケールで変わる性質のものであり¹⁾、それは測定法の空間分解能に依存する。ここでの結果も、本装置の光学系の分解能に応じて得られた真実接触状態であり、分解能の不足を問題にしているわけではない。



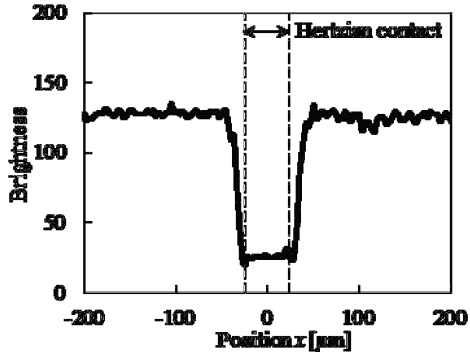
(a) Contact surface image
(in Air)



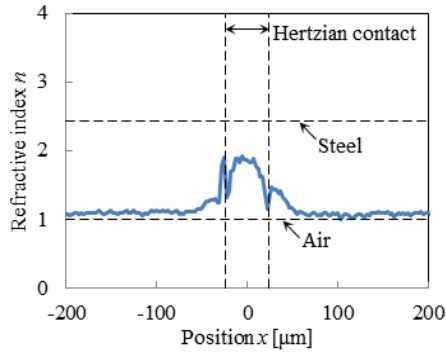
(a) Distribution of refractive index
(in Air)



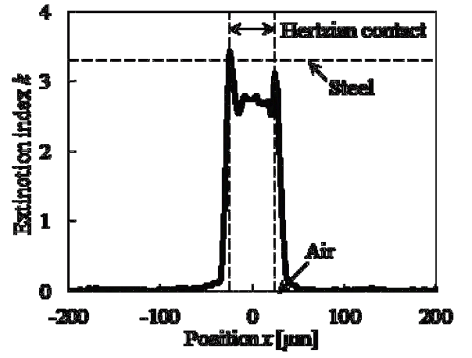
(e) Distribution of Extinction coefficient
(in Air)



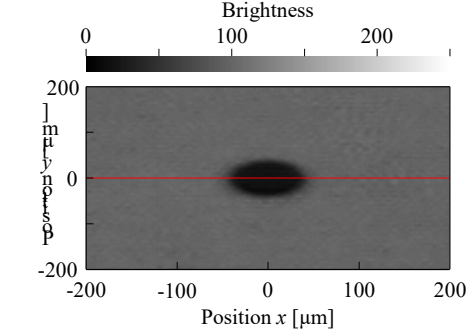
(b) Line profile in (a)
(in Air)



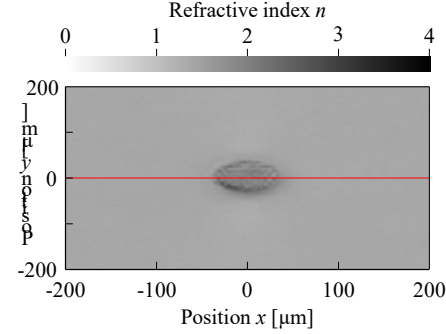
(b) Line profile in (a)
(in Air)



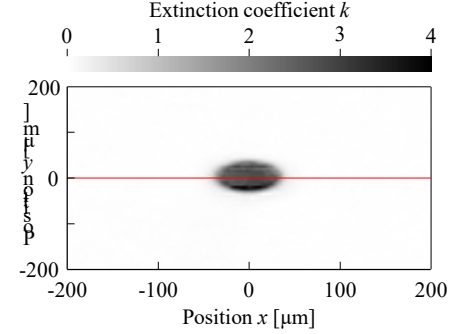
(f) Line profile in (e)
(in Air)



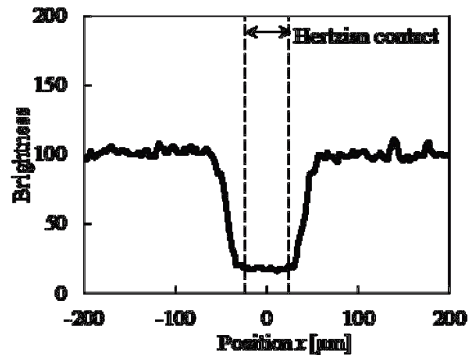
(c) Contact surface image
(in Water)



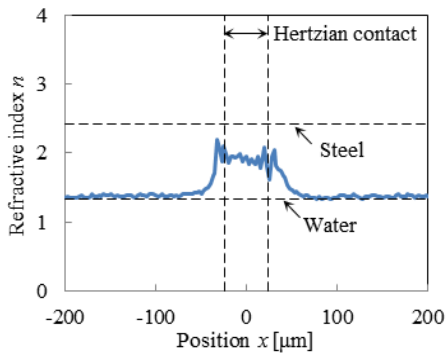
(c) Distribution of refractive index
(in Water)



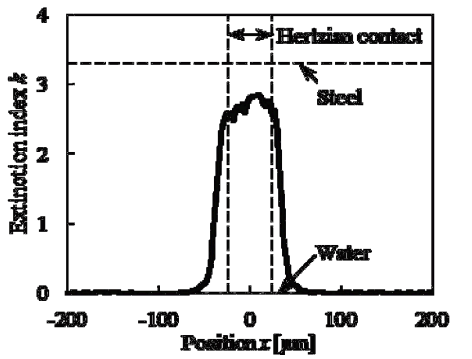
(g) Distribution of extinction coefficient
(in Water)



(d) Line profile in (c)
(in Water)



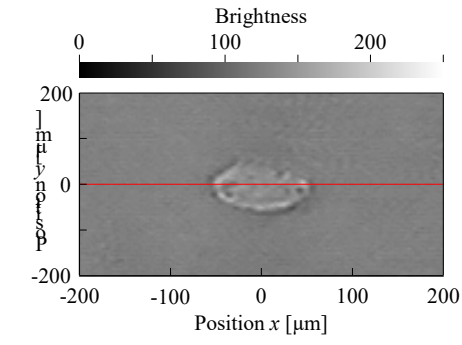
(d) Line profile in (c)
(in Water)



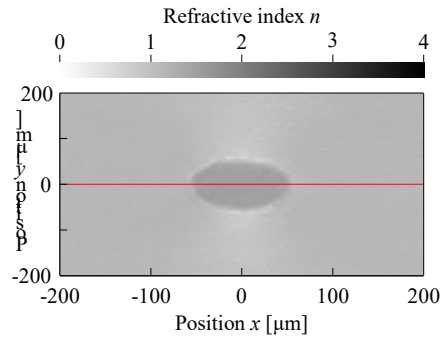
(h) Line profile in (g)
(in Water)

Fig. 3 Measured results by contact microscope
(Case 1: Steel ball).

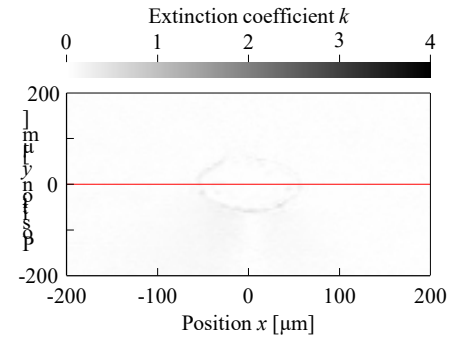
Fig. 4 Measured results by ellipsometer
(Case 1: Steel ball).



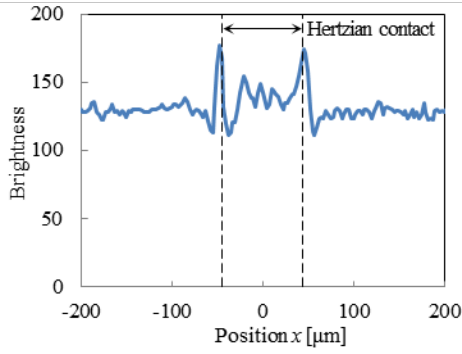
(a) Contact surface image (in Air)



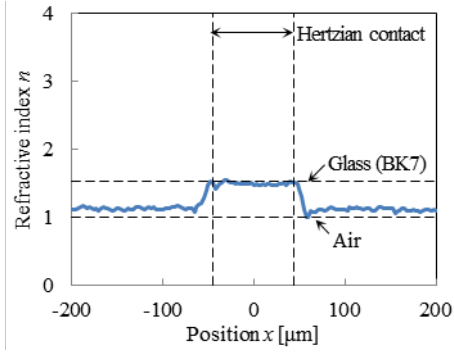
(b) Distribution of refractive index (in Air)



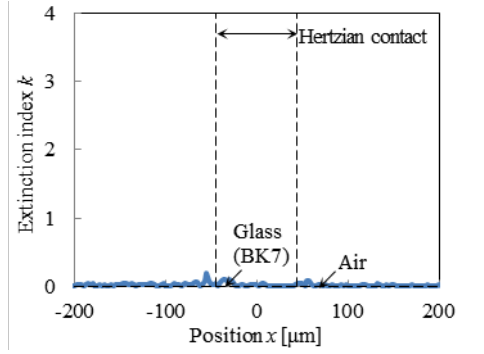
(c) Distribution of Extinction coefficient (in Air)



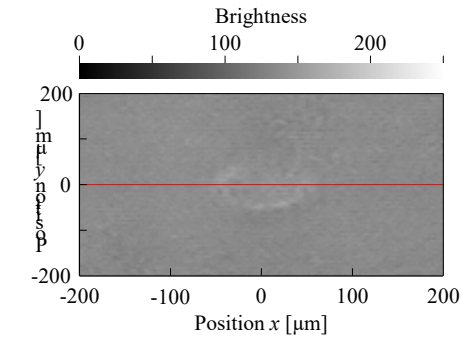
(d) Line profile in (a) (in Air)



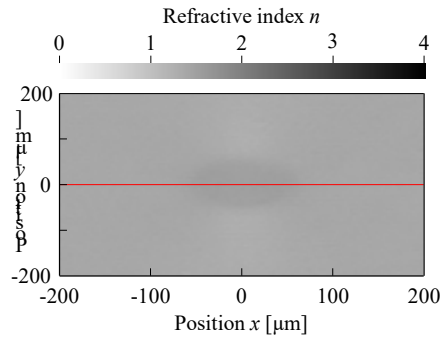
(e) Line profile in (b) (in Air)



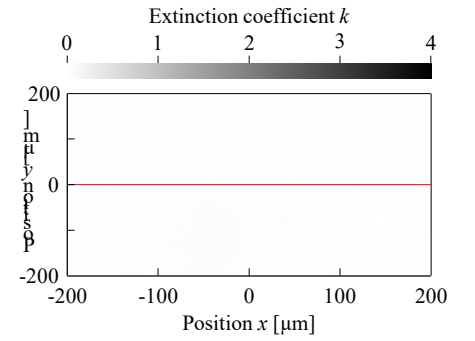
(f) Line profile in (c) (in Air)



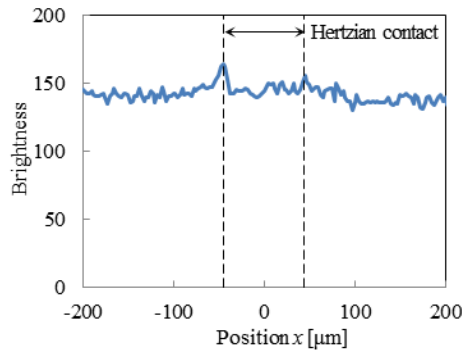
(g) Contact surface image (in Water)



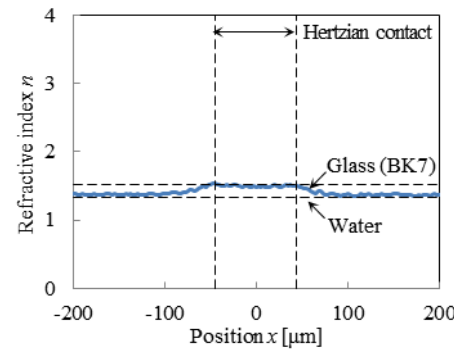
(h) Distribution of refractive index (in Water)



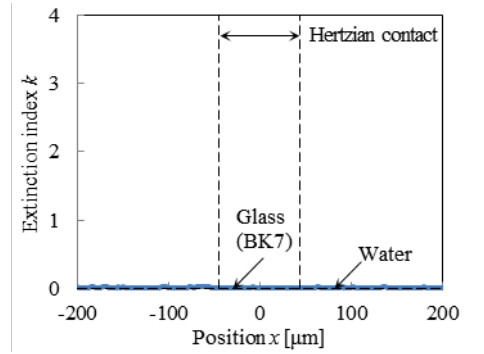
(i) Distribution of extinction coefficient (in Water)



(j) Line profile in (g) (in Water)



(k) Line profile in (h) (in Water)



(l) Line profile in (i) (in Water)

Fig. 5 Measured results by contact microscope (Case 2: Glass (BK7)).

Fig. 6 Measured results by ellipsometer (Case 2: Glass (BK7)).

(g), (h)はそれらの水中の場合である．本例では，空気中水中にかかわらず周囲物質では物性値どおりゼロ，接触部では明らかに一定レベル以上の値が測定されている．屈折率 n の場合と同様，接触部境界での変動と接触部内側での低下の傾向は見られるが，こちらも接触部分判別の指標として併用することが可能である．

Fig. 5 は Case 2 について接触面顕微鏡で測定を行った結果である．接触面画像は，空気中(a)，水中(c)ともに，接触部と非接触部の明暗が近く，輝度ラインプロファイルにおいても，空気中(b)，水中(d)ともに両部分間の有意な差は見られない．しかしながら，エリプソメータによる Case 2 の測定結果 (Fig. 6) では，屈折率 n は空気中(b)，水中(d)ともに，物質ごとにほぼ物性値どおりの値が測定されており，接触部と非接触部で明確な差が現れている．消衰係数 k についても，空気中(b)，水中(d)を問わず物性値どおりのゼロが測定されている．これは，エリプソメータにおいては，式(4)に示すように p 偏光， s 偏光の振幅反射係数の比から物性値として複素屈折率を算出する操作を，接触面内の各位置でイメージセンサの単一素子から検出された光から行っているため，接触面内の光源照度のむらや素子間の感度のばらつきの影響がないことが理由として考えられる．また，一つの測定値の算出に複数枚の画像を合わせて処理しているため，画像間のデータのちらつきが平均化されてノイズが軽減していることも挙げられる．このように，画像の輝度を指標とする接触面顕微鏡では不可能なケースであっても真実接触面積を測定可能な場合があることは，複素屈折率を指標とするエリプソメータの優位性を示している．

結 言

エリプソメトリの手法を利用して，接触面顕微鏡と

同一の光学系において，接触面内の屈折率分布，消衰係数分布を測定することができた．

これらの測定値は測定コンディションによらない，物質ごとの一定値であり，また接触部境界における遷移領域は接触面顕微鏡のものと同等，あるいは，それ以下であるため，真実接触部分判別の有効な指標となり得る．

参考文献

- 1) 川口尊久・畑沢鉄三・鏡重次郎：真実接触面の計測と評価，トライボロジスト，Vol.50,, No.7, pp.499-504 (2005).
- 2) 新田勇：真実接触面積の可視化技術，トライボロジスト，Vol.52, No.12, pp.843-848 (2007).
- 3) 中野健・田所千治・前川寛：弾性体の摩擦振動と接触面の可視化，日本ゴム協会誌，Vol.85, No.10, pp.313-318 (2012).
- 4) 大谷親・木村好次：湿式ペーパー摩擦材の接触状態の解析，トライボロジスト，Vol.39, No.12, pp.1042-1046 (1994).
- 5) 新田勇・諸橋明・大谷親：PET 薄膜を用いた真実接触面積の分布の測定，トライボロジスト，Vol. 44, No. 2, pp.128-134 (1999).
- 6) 大谷親・木村好次：湿式ペーパー摩擦材の接触特性（第1報）—未使用摩擦材の接触—，トライボロジスト，Vol.44, No.11, pp.898-905 (1999).
- 7) 藤原裕之：分光エリプソメトリ，丸善 (2003).
- 8) H. G. Tompkins, A User's Guide to Ellipsometry, Academic Press (1993).
- 9) K. L. Johnson, Contact mechanics, Cambridge University Press (1985).