

ポリカーボネイトレンズの諸特性



はじめに

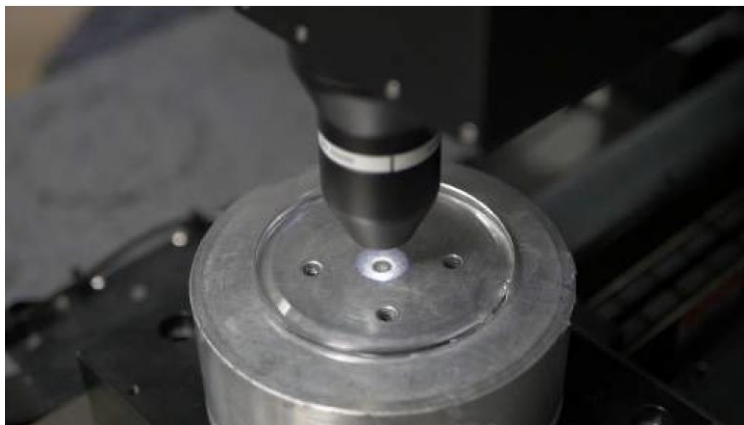
ポリカーボネートレンズは多くの光学用途で広く使用されています。その高い耐衝撃性、軽量性、大量生産時の低コストなどの利点により、様々な用途において従来のガラスよりも実用性が高くなっています。様々な用途の中には、安全性（例：保護眼鏡）、複雑性（例：フレネルレンズ）、耐久性（例：交通信号レンズ）といった基準が求められるものがあり、プラスチックを使用しなければ満たすのが困難な場合があります。十分な光学特性を維持しつつ、多くの要件を低コストで満たす能力が、プラスチックレンズをこの分野で際立たせています。しかし、ポリカーボネートレンズにも限界があります。消費者の主な懸念は、傷が付きやすい点にあります。これを補うため、耐傷性コーティングを施す追加加工が行われます。ナノベアは、当社の3つの計測機器（プロフィロメーター、トライボメーター、インデンター）を活用し、ポリカーボネートレンズの重要な諸特性について検証します。

■ポリカーボネイトレンズを試験する重要性

レンズの表面データは、表面粗さと曲率半径を取得するのに理想的です。これらの特性はレンズの光学品質に影響を与えからです。曲率半径はレンズの屈折力に影響し、表面粗さは光の散乱に影響します。さらに、レンズの厚さも測定されます。レンズの厚さはその実効焦点距離に影響します。さらに、レンズ表面に欠陥が増えるほど、レンズの品質は低下します。耐傷性が高い材料は経時的な摩耗が少なく、外部要因による欠陥が生じにくい傾向があります。耐傷性は試料の傷欠陥に対する抵抗性を定義します。これは材料本体の耐傷性や耐傷性コーティングの効果を評価するために使用できます。さらに、接着性傷試験を実施することで、コーティングとレンズ間の密着品質を判定することが可能です。摩擦係数（COF）は、様々な材料に対するトライボロジー試験で測定できます。ポリカーボネートレンズは多様な用途で使用されるため、他の材料がレンズと相互作用した際の挙動を理解することは実用的です。これにより、相補的な材料を選択する際に摩擦を最小化（または最大化）できます。摩耗試験は、異なる条件下における試料の耐久性を実証します。本研究で実施した試験と得られた結果は、実際の応用環境における試料の性能を反映しているといえます。この結果を活用することで、ユーザーの用途に最適な材料・プロセス・設計を特定できます。また、高精度測定機器を用いれば品質管理試験を繰り返し実施可能です。

測定項目

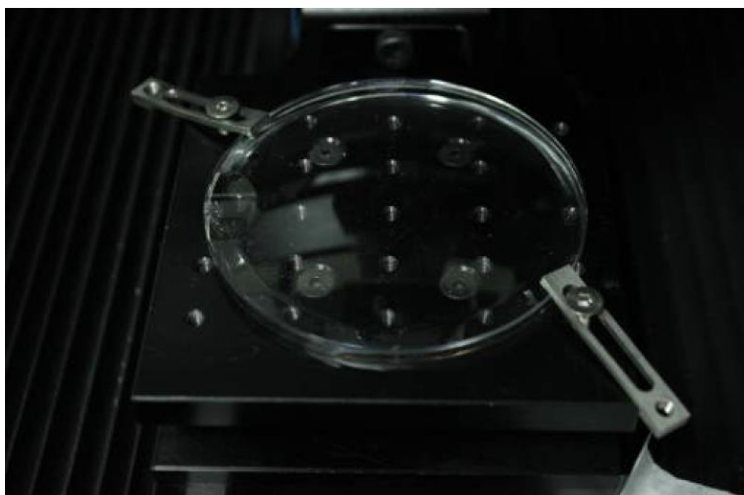
本事例研究では、ポリカーボネートレンズのいくつかの重要な特性について総合的な調査を実施します。プロフィロメーター、トライボメーター、機械式インデンターを用いて次の特性を取得します：表面粗さ、曲率半径、厚さ、引っかかり硬さ、各種材料に対する摩擦係数、および摩耗率。



プロファイラによる測定

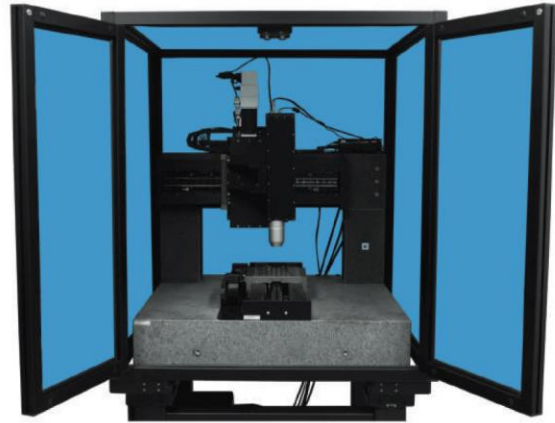


トライボメーターによる測定



機械式インデンターによる測定

曲率半径・表面粗さ計測



使用機材：リアルナノ 3Dプロフィロメーター ©様々な測定レンジ、オプションをご用意しています。

曲率半径と表面粗さ測定

リアルナノ 3Dプロフィロメーターの試験パラメーター

試験装置	ST400プロフィロメーター
光学センサー	L1センサー (Zレンジ200 μm)
スキャンサイズ	10mm x 10mm
ステップサイズ	5 μm x 5 μm
スキャン時間	62秒

プロメトリー測定の結果は以下のとおりです。 それぞれレンズを捉えた2D及び3D画像を表示しました。

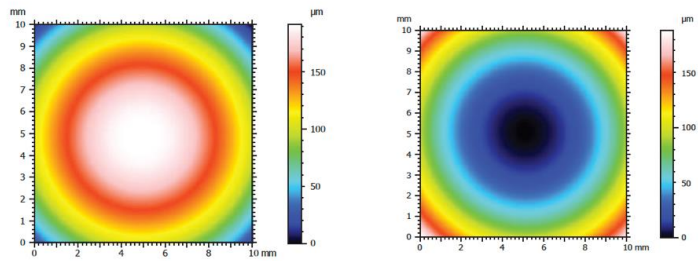
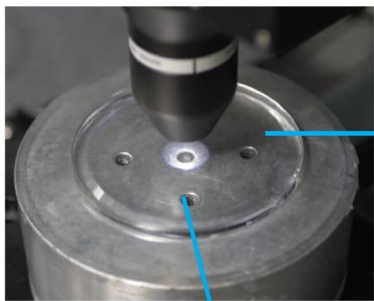
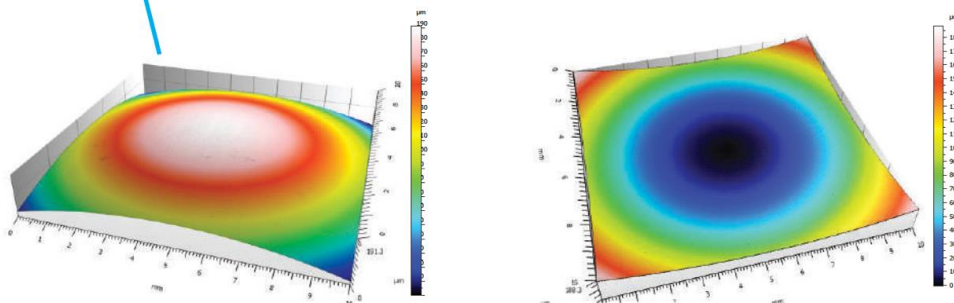
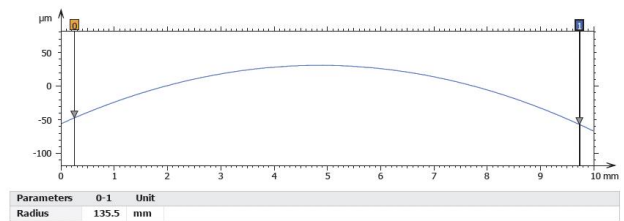
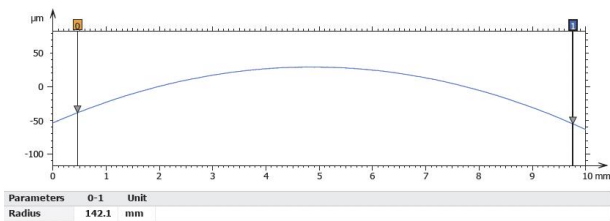
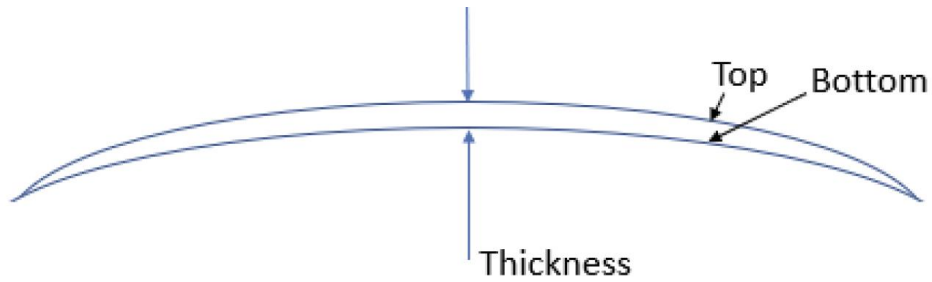


Figure 1: False-color view of front side (left) and back side (right) of polycarbonate lens

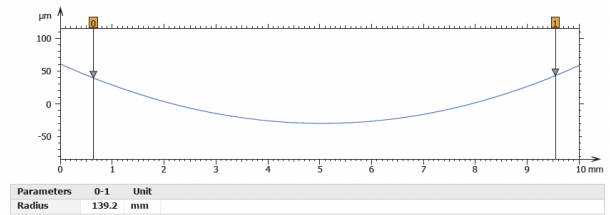
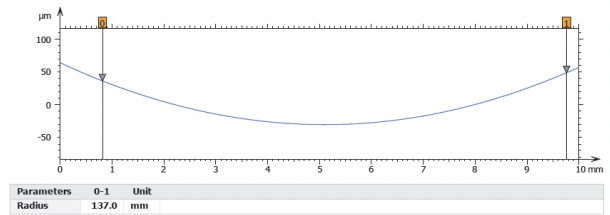


結果 1 曲率半径

レンズの領域スキャンを実施することで、曲率半径が曲線の頂点で捕捉されることを保証できます。レンズの対称性を観察するため、曲率半径はX軸とY軸の両方から算出しました。前面(Top)では142.1mmと135.5mm、背面(Bottom)では137.0mmと139.2mmの数値が得られました。



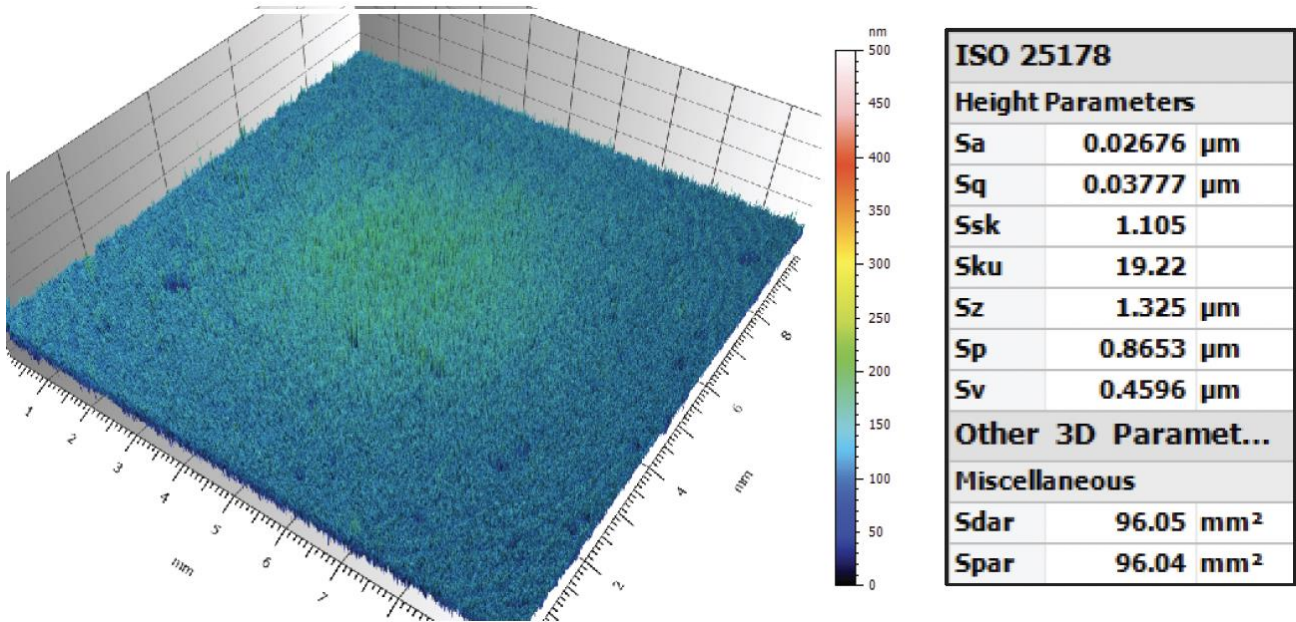
Top側のX軸（左）とY軸（右）のプロファイルを抽出したグラフ



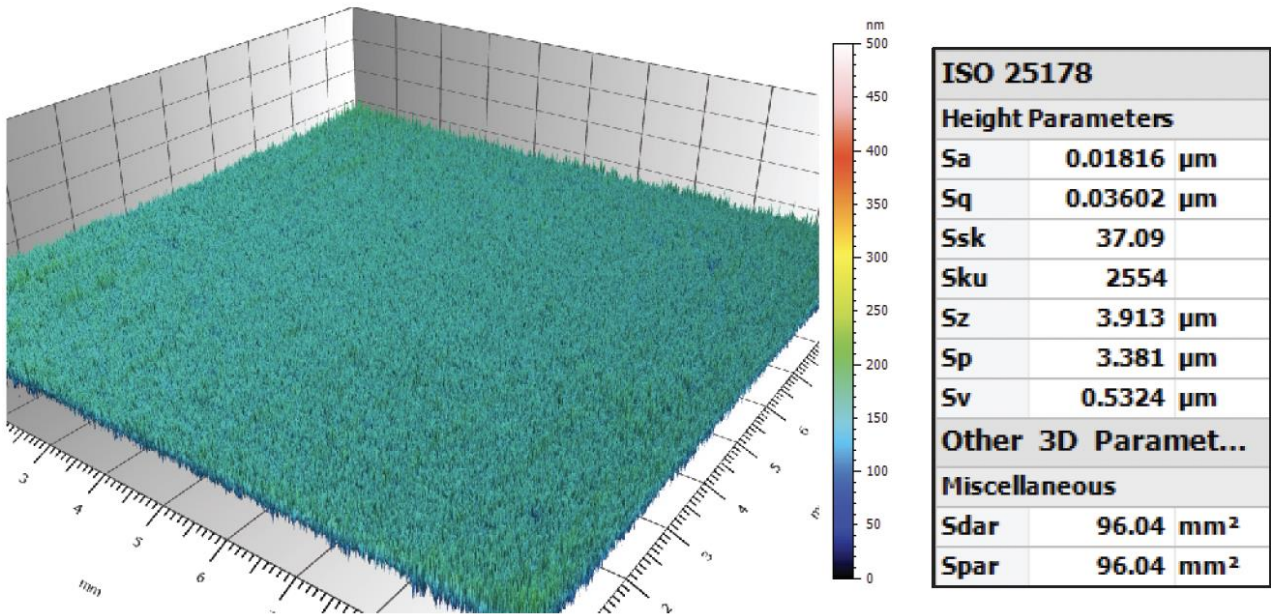
Bottom側のX軸（左）とY軸（右）のプロファイルを抽出したグラフ

結果 2 表面粗さ

粗さデータを取得するには、試料の形状を除去する必要があります。粗さ高さパラメータを得るため、0.25mmのネスト指数を持つガウスフィルターを適用しました。ポリカーボネートレンズの表面ではSa値26.76nm、プラスチックレンズの裏面では18.16nmが得られました。それぞれのSq値は37.77nmと36.02でした。これらの値は非常に低く、光がレンズ表面と相互作用する際に光の散乱を最小限に抑えるのに理想的です。



レンズ 表側



レンズ 裏側

厚み測定

リアルナノ 3Dプロフィロメーターの試験パラメーター

試験装置	PS50プロフィロメーター
光学センサー	PS5センサー (Zレンジ10,000 μm)
スキャンサイズ	5mm x 5mm
ステップサイズ	10 μm x 10 μm
スキャン時間	36分32秒

ナノビアのポイントセンサーシステムを利用して、ポリカーボネートレンズの厚さを測定しました。この測定は、各表面に焦点を合わせることで行われます。複数の焦点を持つことができるのは、ナノビアの軸方向色収差補正技術によるものです。空気とサンプルの間の屈折率の違いは、サンプルの屈折率を用いて補正されます。サンプルの上面と下面の二つの表面が、図に示されています。サンプルの組成が不明であるため、屈折率は一般的なプラスチックであるポリカーボネートの値 (1.58) を使用しました。スキャンした二つの表面の差を引くことで、厚さが得られます。曲率の頂点付近でスキャンしたサンプルの平均厚さは、約2.611mmであることがわかりました。

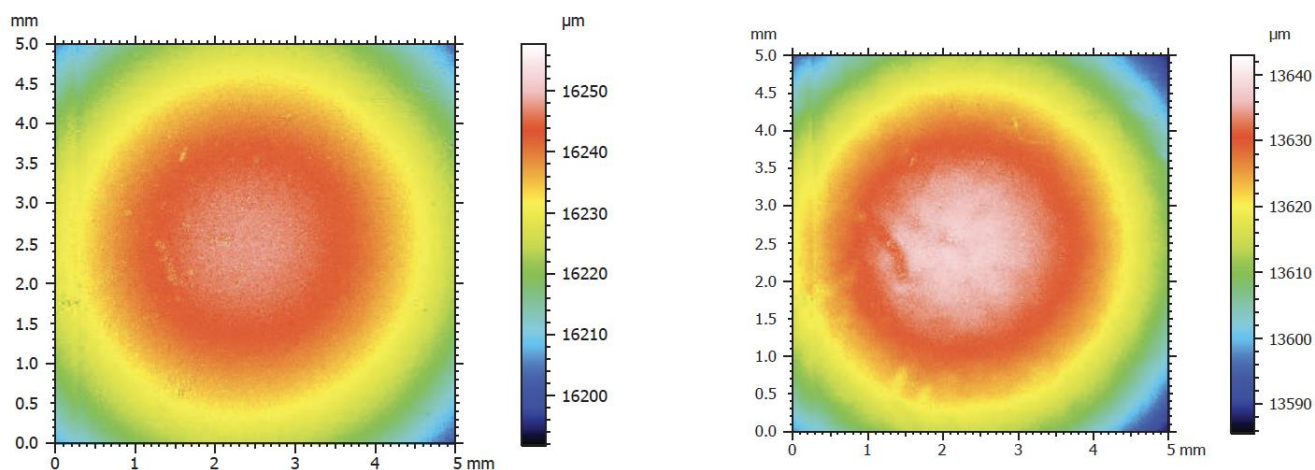
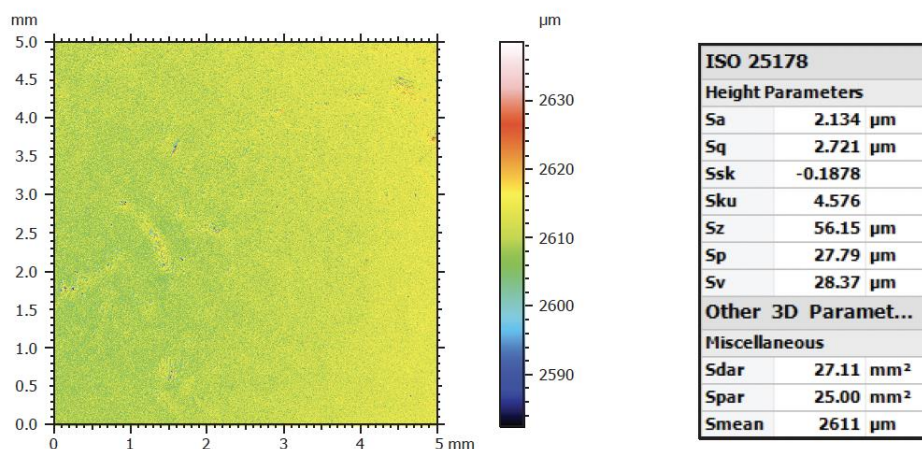


Figure 7: False-color view of top surface (left) and bottom surface (right)



耐スクラッチ試験



◎使用機材

機械式インデーター（モデルPB1000）。

◎完全にアップグレード可能。

ナノからマイクロ範囲まで交換の必要なしのモデル。

◎堅牢で低いコスト

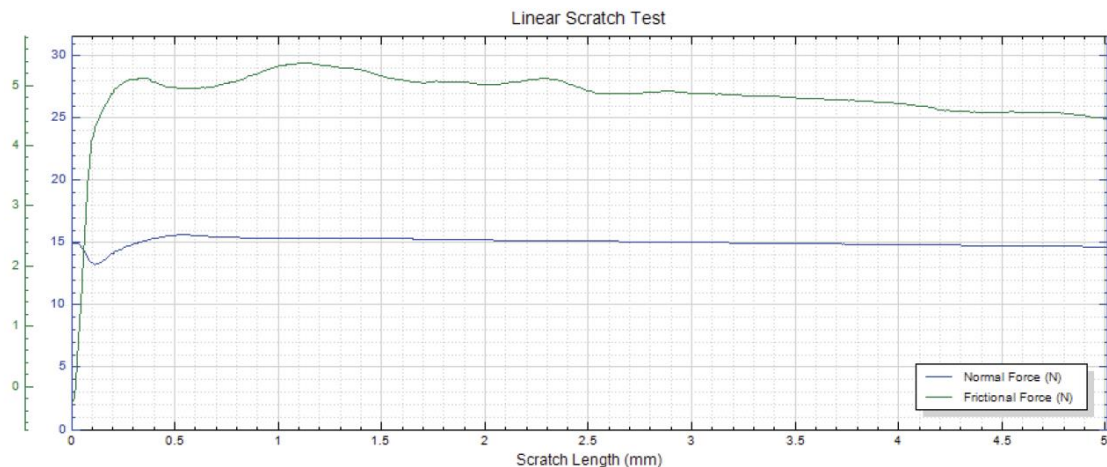
高さ調整可能なクリアランスを備えた広々としたプラットフォーム。
アップグレード可能。

インデータースクラッチ試験パラメータ

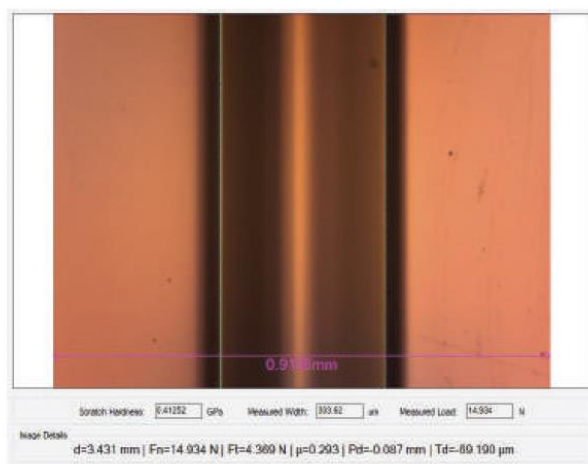
試験パラメーター	値
負荷タイプ	一定
初期負荷	15N
スクラッチ長	5mm
スクラッチ速度	18mm/min.
インデーター形状	120° コーン型
インデーター先端材料	ダイヤモンド
インデーター先端直径	200 μm

スクラッチ試験は ASTM-G171 に準拠して実施されました。レンズの曲率による誤差を最小限に抑えるため、スクラッチはレンズの頂点部分に施されました。その結果、スクラッチ硬度は 420.59 ± 8.69 MPa となりました。予想通り、プラスチックの性質上、スクラッチ硬度の値は比較的低くなっています。参考までに、過去に実施したアルミニウム、銅、および鋼のスクラッチ硬度試験では、それぞれ 0.84、0.52、および 3.20 GPa の値が得られました [2]。試験条件は異なるものの、ポリカーボネートレンズのスクラッチ耐性は、銅のような柔らかく傷つきやすい金属と同程度のオーダーであると考えられます。

スクラッチ試験で計測された摩擦のグラフ



光学顕微鏡下で行ったスクラッチ硬度測定。スクラッチの端に青色の点線を施し、スクラッチ幅を取得しました。



	Measurement 1 (MPa)	Measurement 2 (MPa)	Measurement 3 (MPa)
Scratch 1	432.19	418.89	412.52
Scratch 2	431.51	416.25	413.4
Scratch 3	431.71	421.55	409.8

結果表

光学プロフィロメトリーを使用したスクラッチのイメージング

スクラッチ試験の結果を詳細に検査するため、ナノピアのプロファイル測定装置でプロファイルを測定しました。スクラッチが発生した領域の周囲に大量の材料が存在することが確認されました。傷周辺の材料量（ピーク）と失われた材料量（ホール）はほぼ同等です。本研究から、軟質プラスチックはスクラッチ時に容易に変位したことが観察されます。これにより、当該材料の耐傷性は低いと結論付けられます。

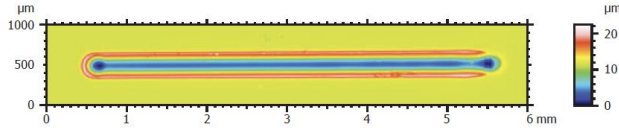
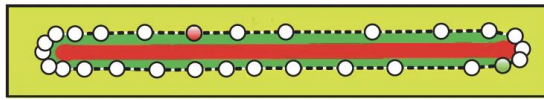


Figure 11: False-color view of a scratch made on the lens



Parameters	Unit	Hole	Peak
Surface	μm ²	842375	1147975
Volume	μm ³	4360728	4307441
Max. depth/height	μm	11.79	10.65
Mean depth/height	μm	5.177	3.752

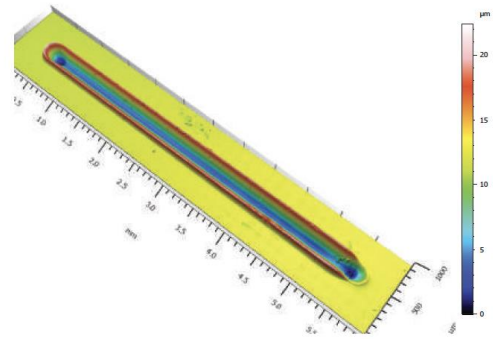
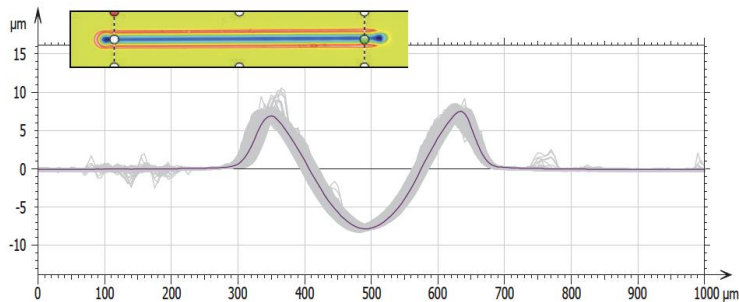


Figure 12: 3-D view of scratch made on the lens



		Mean	Std dev
ISO 4287			
Amplitude parameters - Primary profile			
Pa	μm	1.785	0.05234
Pq	μm	3.200	0.06309
Pz	μm	15.78	0.3143
Pp	μm	7.864	0.2652
Pv	μm	7.914	0.1409
Pc	μm	15.06	1.288

スクラッチの平均深さは、表面から $7.864 \pm 0.2652 \mu\text{m}$ となりました。これは、スクラッチ領域全体にわたる一連のプロファイルを抽出し、各プロファイルの最大谷深さ（Pv）を平均化することで取得しました。

トライボロジー試験



◎使用機材

- ・トライボメーター（T50）。
- ・耐久性に優れたオーブンプラットフォーム
- ・高精度マイクロ加工
- ・業界最長の保証期間
- ・幅広い環境条件への対応

摩擦係数

ポリカーボネートレンズ摩擦係数試験パラメータ

試験パラメーター	値
負荷	0.5N
試験時間	5分
回転速度	10r.p.m.
半径距離	0.0 – 5.0mm
総合距離	0.78m
ピン形状	ボール型
ピン材質	ゴム、PTFE、ZrO ₂ 、Al ₃ O ₂ 、SS440C
ピン直径	6mm

ポリカーボネートレンズ摩擦係数試験パラメータ

組み合わせ	ディスク材料	ピン材質
1	ポリカーボネイト	ゴム
2	ポリカーボネイト	PTFE
3	ポリカーボネイト	ZrO ₂
4	ポリカーボネイト	Al ₃ O ₂
5	ポリカーボネイト	SS440C

ピン・オン・ディスク螺旋試験を実施し、全試験を通じてピンがディスク上の摩耗していない領域を通過することを確認しました。そして、最初の5回転分のデータをグラフから切り取りました。これは半径が0に近い（接線方向の動きが最小）時点のデータを排除するためです。COFデータを解析する際には、レンズの曲率を考慮に入れる必要があります。

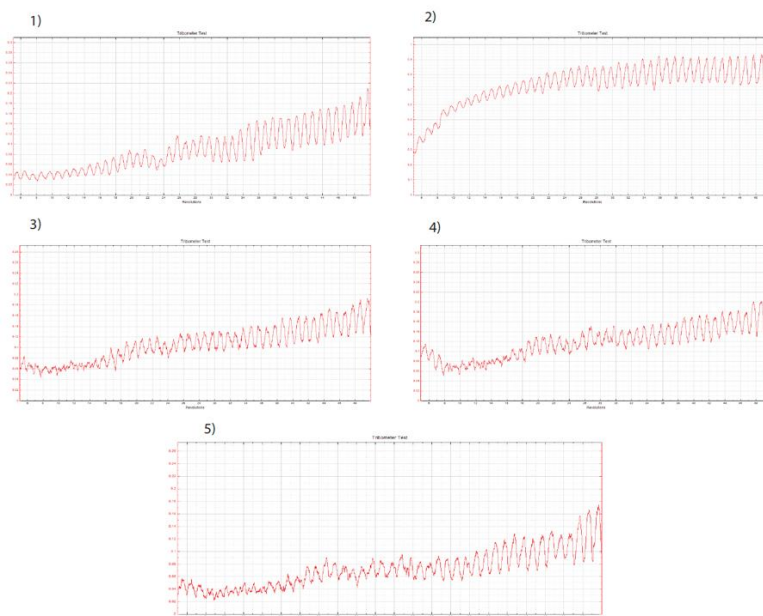


Figure 15: COF graphs of 1) Rubber, 2) PTFE, 3) ZrO₂, 4) Al₂O₃, 5) SS440C

それぞれの材料を摩擦係数（COF）の高い順にランク付けすると次のとおりです：ゴム、Al₂O₃、ZrO₂、PTFE、SS440C。実施された試験は、試料への摩耗の影響を最小限に抑えるため、小さな負荷を用いて行われました。試験結果は、

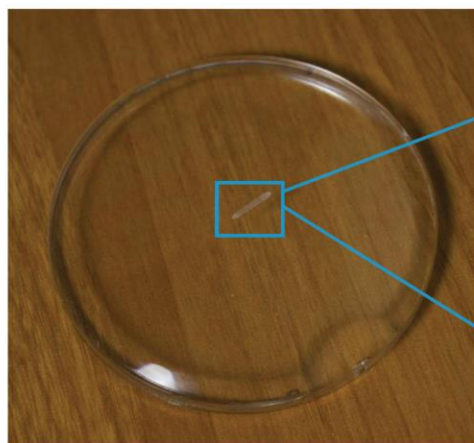
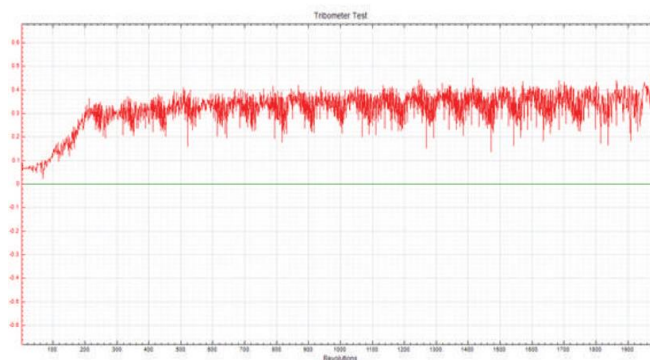
Pin Material	Max COF	Min COF	Average COF
Rubber	0.947	0.277	0.734
PTFE	0.210	0.027	0.089
ZrO ₂	0.193	0.043	0.106
Al ₂ O ₃	0.215	0.051	0.120
SS440C	0.175	0.022	0.072

直線運動の摩耗

ポリカーボネートレンズ摩擦係数試験パラメータ

試験パラメーター	値
負荷	20N
試験時間	20分
回転速度	100r.p.m.
直線距離	10mm
総合距離	40m
ピン形状	ボール型
ピン材質	ZrO ₂
ピン直径	6mm

曲率の影響を最小限に抑えるため、レンズ頂点付近で直線試験を実施しました。COFグラフからは、摩耗が2段階に進行していることが確認できます。0~200回転は、両表面が試料表面に適応する段階のようです。200回転以降、顕著な摩耗が生じ始めます。摩耗試験で生じた遊離粒子が摩耗領域表面に付着し、三体摩耗を引き起こしています。摩耗率を正確に算出するため、摩耗軌跡のプロファイリング、レンズ曲率の解析的除去、および穴体積研究を実施し体積損失を算出しました。総体積損失は577,479,379 μm^3 でした。酸化ジルコニウムはプラスチックレンズに対して平均61.69 \pm 6.830 μm の摩耗を示しました。



Sample of polycarbonate lens with wear track

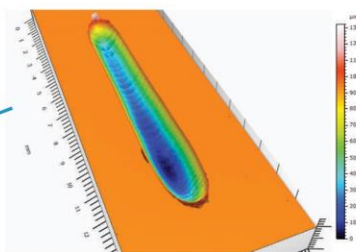
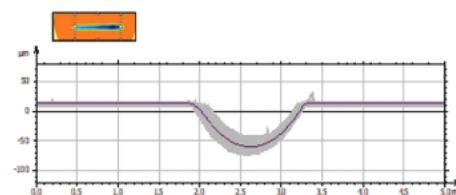


Figure 17: 3-D View of wear track created by linear wear test



Figure 18: Volume of a hole analysis conducted on worn area



		Mean	Std dev
ISO 4287			
Amplitude parameters - Primary profile			
Pa	μm	19.59	3.305
Pq	μm	24.59	3.668
Pz	μm	77.59	10.71
Pp	μm	15.90	4.438
Pv	μm	61.69	6.830
Pc	μm	*****	*****

おわりに

ポリカーボネートレンズの重要な特性は、ナノビア社のメトロロジー機器を用いて様々に評価できることがわかりました。材料の特性を正確に測定・定量化する能力は、材料の選定および品質管理プロセスにおいて非常に重要です。今回は試験していませんが、ナノビアは豊富な環境試験オプションにより温度、湿度、潤滑環境、腐食環境などでの特性も簡単に測定できます。



〒274-0812 千葉県船橋市三咲7-22-7
TEL:047-449-2961 FAX:047-449-2926