

テラヘルツ分光装置の 社会実装に向けた 研究開発動向

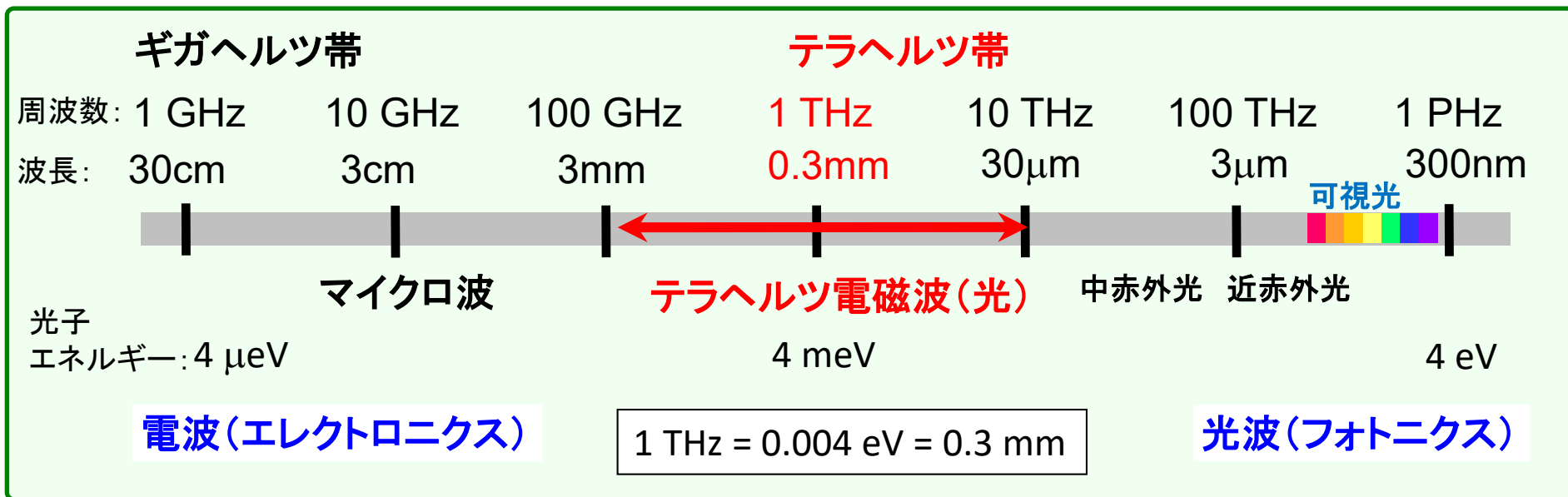
慶應義塾大学

渡邊 紳一

イントロダクション: テラヘルツ光センシング

テラヘルツ光源: 可視光に比べて波長が500倍ほど長い光(電波)

可視光とは異なり、
プラスチック・紙・半導体などに透過性をもつ
→新しい非破壊検査光源として期待されている。



ここでは以下の論文について紹介します。

B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," Opt. Lett. **20**, 1716-1718 (1995).

H. B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Q. Chen, and X. C. Zhang, "Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications," Proc. IEEE **95**, 1514-1527 (2007).

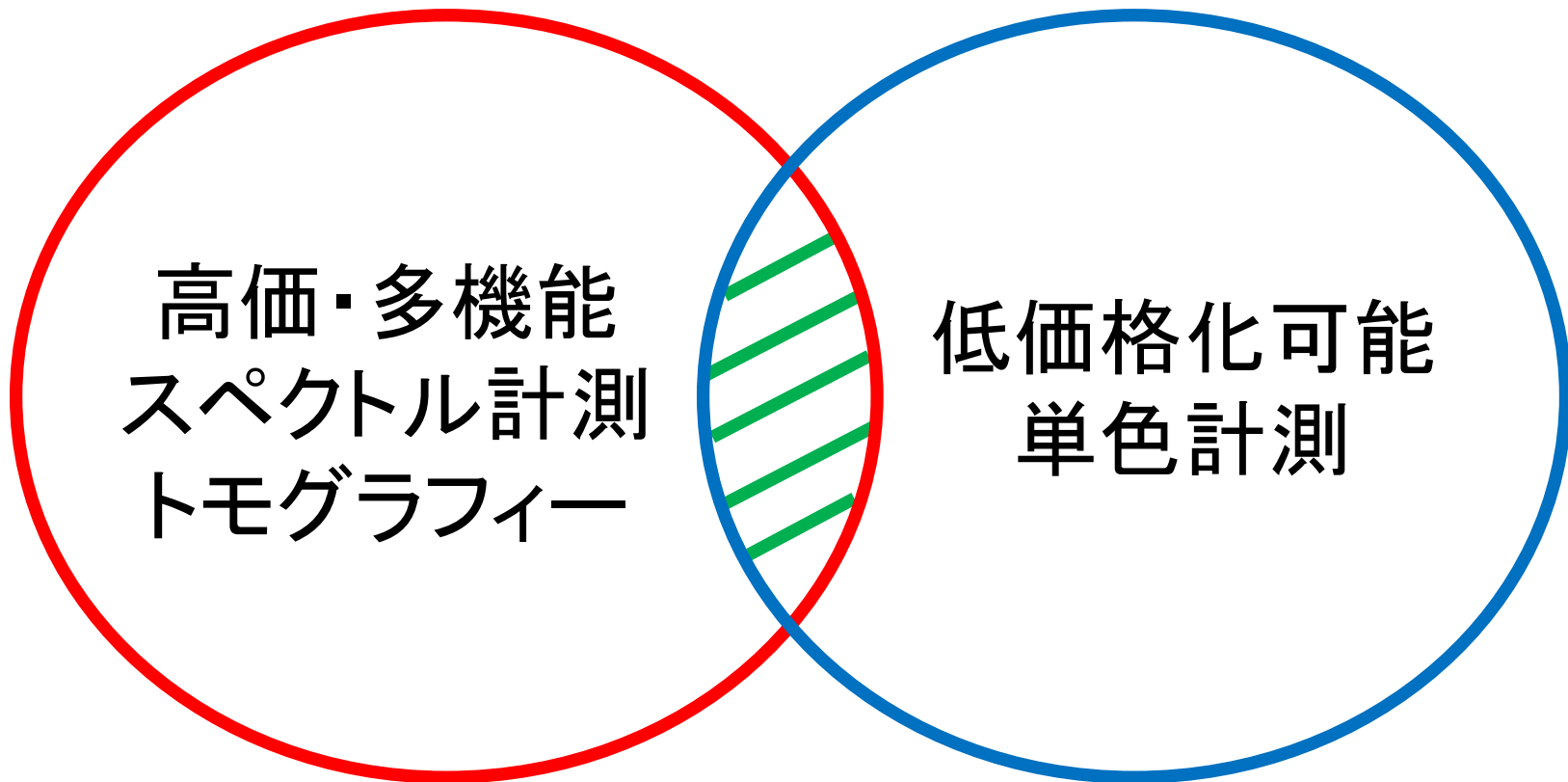
配布物での図表の表示は行いません。

THz-TDS

THz電子デバイス

高価・多機能
スペクトル計測
トモグラフィ

低価格化可能
単色計測

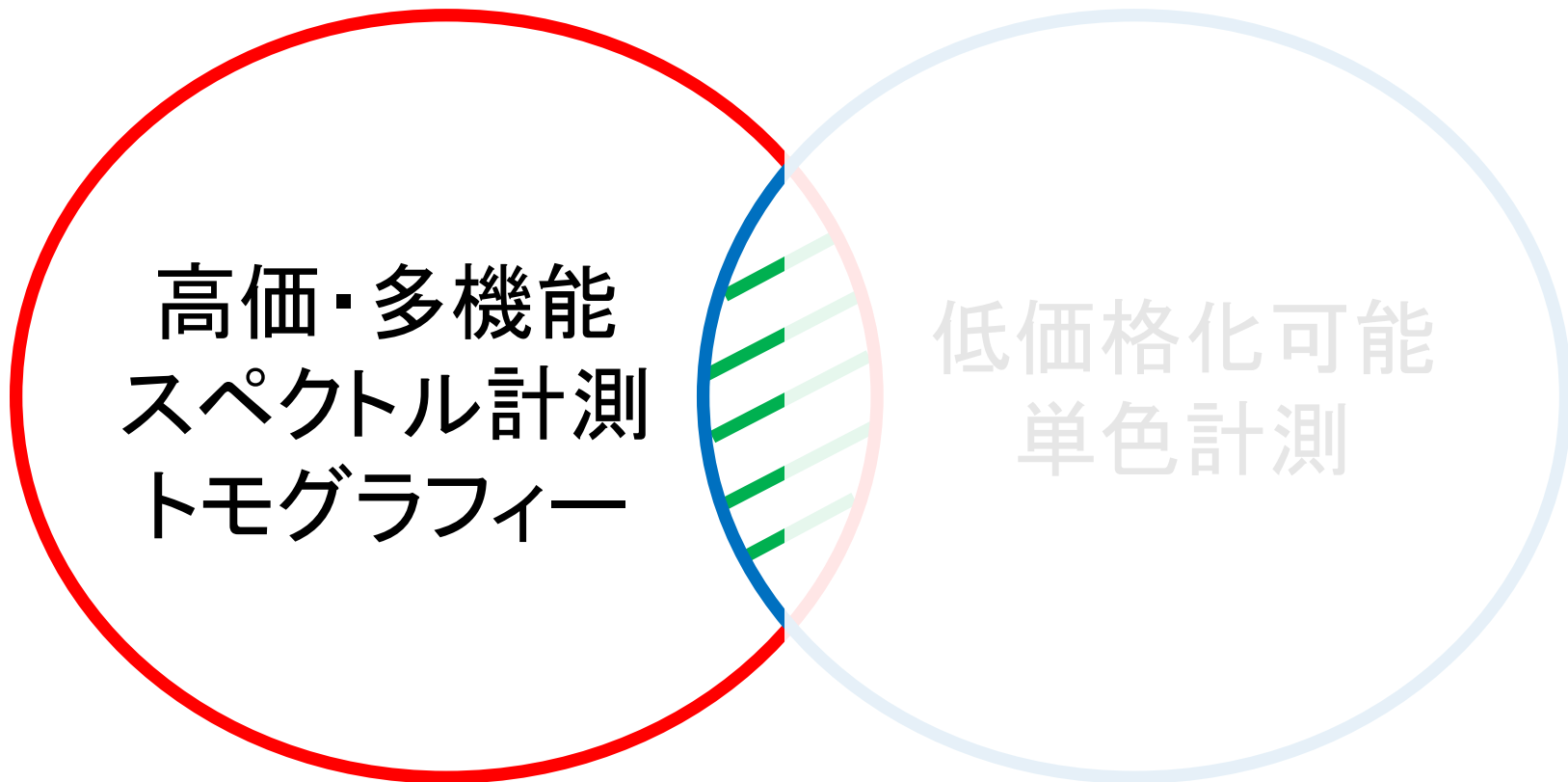


THz-TDS

THz電子デバイス

高価・多機能
スペクトル計測
トモグラフィ

低価格化可能
単色計測



テラヘルツ時間領域分光システム
(Terahertz Time-Domain Spectroscopy)
THz-TDS

ここでは以下の論文について紹介します。

D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, " Picosecond photoconducting Hertzian dipoles," Appl. Phys. Lett. **45**, 284-286 (1984).

M. Tani, *et al.*, "Novel terahertz photoconductive antennas," International Journal of Infrared and Millimeter Waves **27**, 531-546 (2006).

E. Castro-Camus, *et al.*, "Polarization-sensitive terahertz detection by multicontact photoconductive receivers," Appl. Phys. Lett. **86**, 254102 (2005).

F. Sizov and A. Rogalski, "THz detectors," Prog. Quantum Electron. **34**, 278-347 (2010).

K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, and H. Inoue, "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," Opt. Express **11**, 2549-2554 (2003).

D. Grischkowsky, S. Keiding, M. v. Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," J. Opt. Soc. Am. B **7**, 2006-2015 (1990).

D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, "T-ray tomography," Opt. Lett. **22**, 904-906 (1997).

W. L. Chan, J. Deibel, and D. M. Mittleman, "Imaging with terahertz radiation," Rep. Prog. Phys. **70**, 1325-1379 (2007).

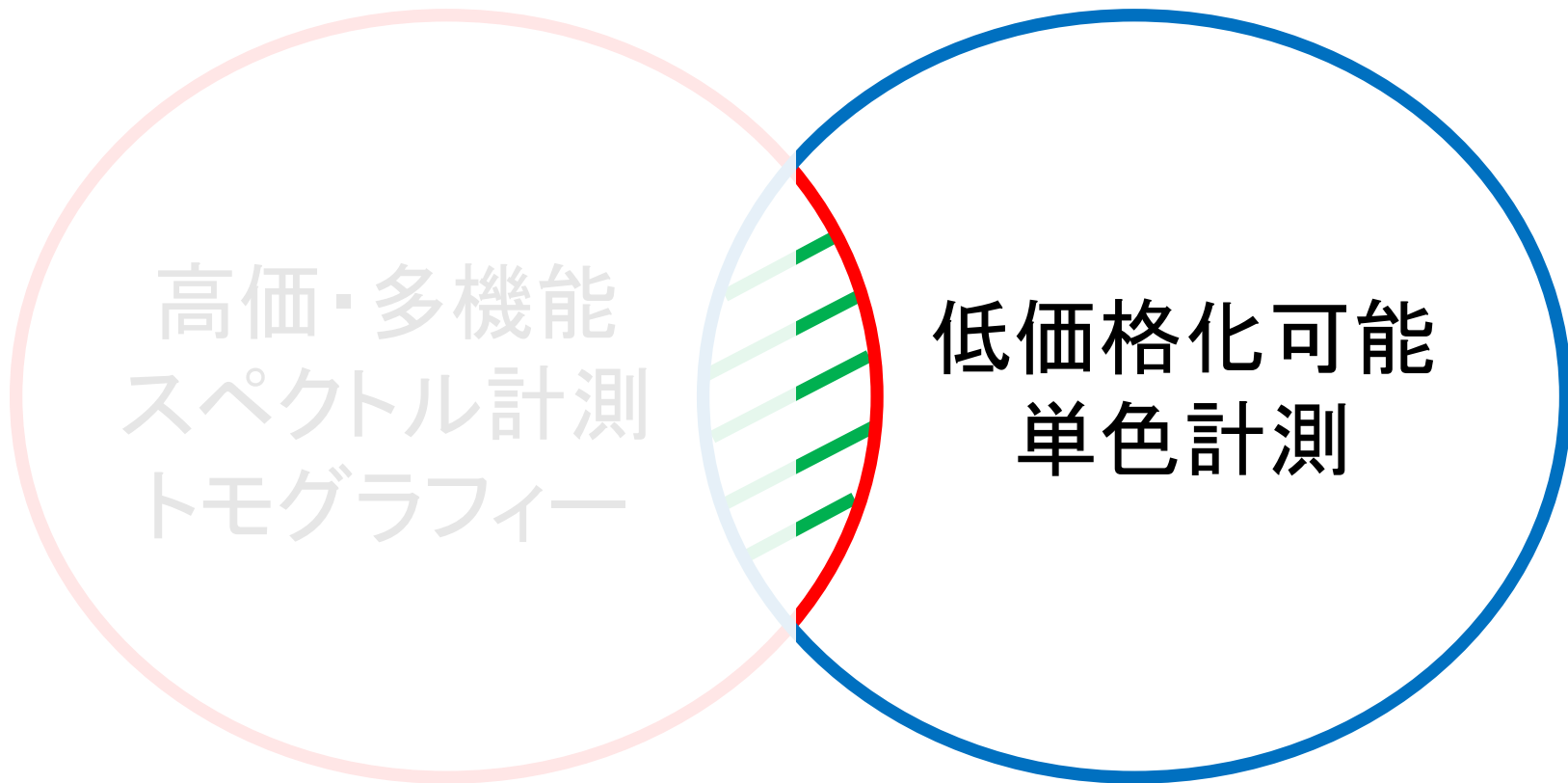
配布物での図表の表示は行いません。

THz-TDS

THz電子デバイス

高価・多機能
スペクトル計測
トモグラフィー

低価格化可能
単色計測



電子デバイスを用いた テラヘルツイメージング測定

ここでは以下の論文について紹介します。

M. Asada, S. Suzuki, and N. Kishimoto, “Resonant Tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators,” Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 4375 (2008).

H. Ito and T. Ishibashi, “InP/InGaAs Fermi-level managed barrier diode for broadband and low-noise terahertz-wave detection,” Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 014101 (2017).

山口 淳、「電子デバイスを用いたテラヘルツイメージングシステム」、電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン 12(3), 197-202, 2018.

配布物での図表の表示は行いません。

THz-TDS

THz電子デバイス

高価・多機能
スペクトル計測
トモグラフィ

低価格化可能
単色計測



電子デバイス、かつ、TDS

電子デバイスを用いた テラヘルツ時間領域分光測定

ここでは以下の論文について紹介します。

M. M. Assefzadeh and A. Babakhani, “Broadband oscillator-free THz pulse generation and radiation based on direct digital-to-impulse architecture,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **52** (11), 2905-2919 (2017).

配布物での図表の表示は行いません。

最近の応用例

ここでは以下の論文について紹介します。

[1] J. Zhang *et al.*, “Nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer composites using reflective terahertz imaging,” *Sensors* **16**, 875 (2016).

[2] M. Okano and S. Watanabe, “Anisotropic optical response of optically opaque elastomers with conductive fillers as revealed by terahertz polarization spectroscopy,” *Sci. Rep.* **6**, 39079 (2016).

[3] A. Moriwaki, M. Okano, and S. Watanabe, “Internal triaxial strain imaging of visibly opaque black rubbers with terahertz polarization spectroscopy,” *APL Photonics* **2**, 106101 (2017).

[4] H. Iwasaki, M. Nakamura, N. Komatsubara, M. Okano, M. Nakasako, H. Sato, and S. Watanabe, “Controlled terahertz birefringence in stretched poly(lactic acid) films investigated by terahertz time-domain spectroscopy and wide-angle X-ray scattering,” *J. Phys. Chem. B* **121**, 6951 (2017).

文献[1]については配布物での図表の表示は行いません。

カーボン検査の可能性

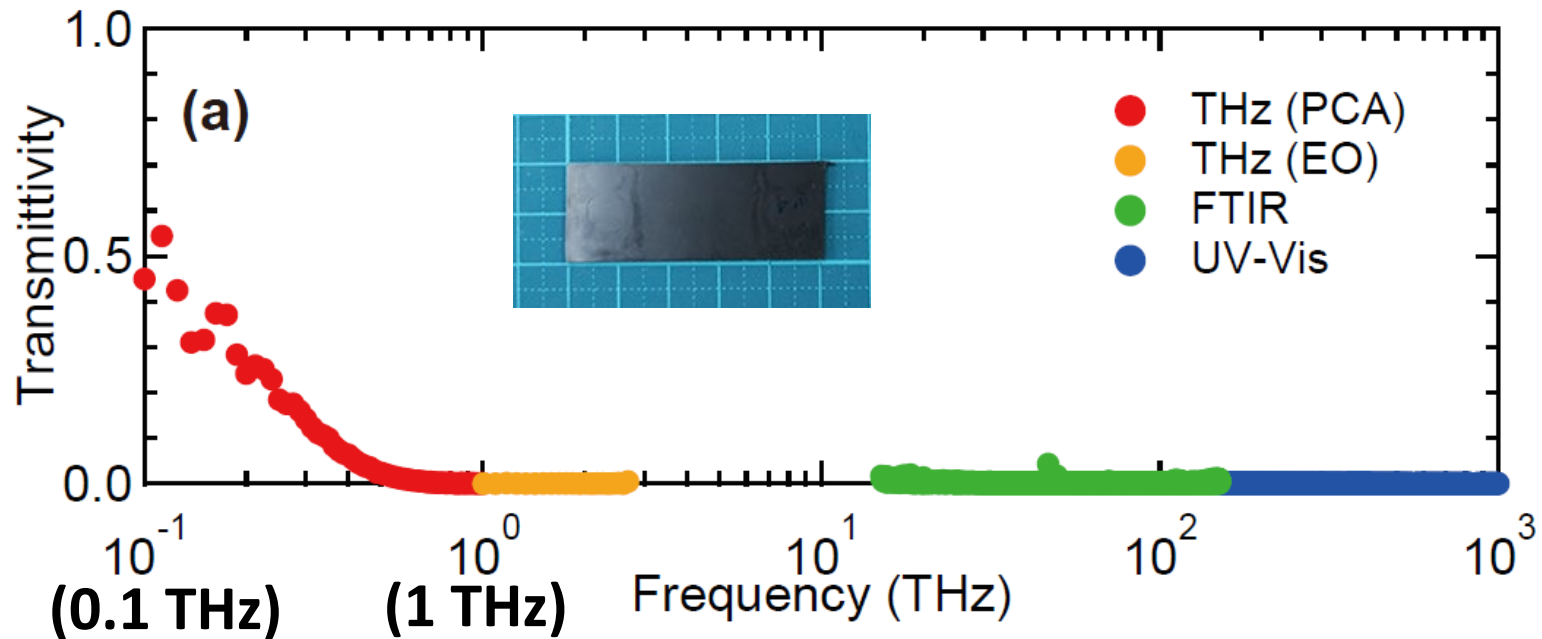
炭素繊維強化プラスチック(CFRP)



市場規模 4.9兆円(@2030年)

引用元: 富士経済プレスリリース

ゴム材料の多くは、**光を透過せず全く内部調査できない**



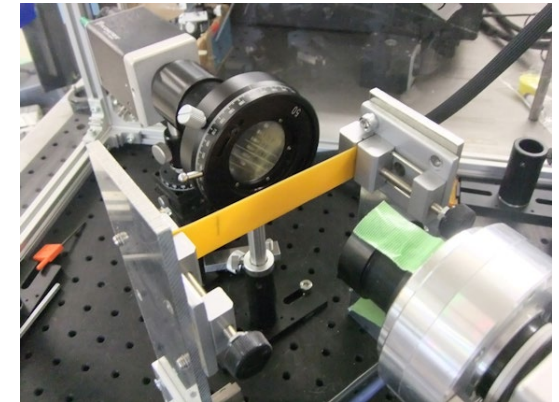
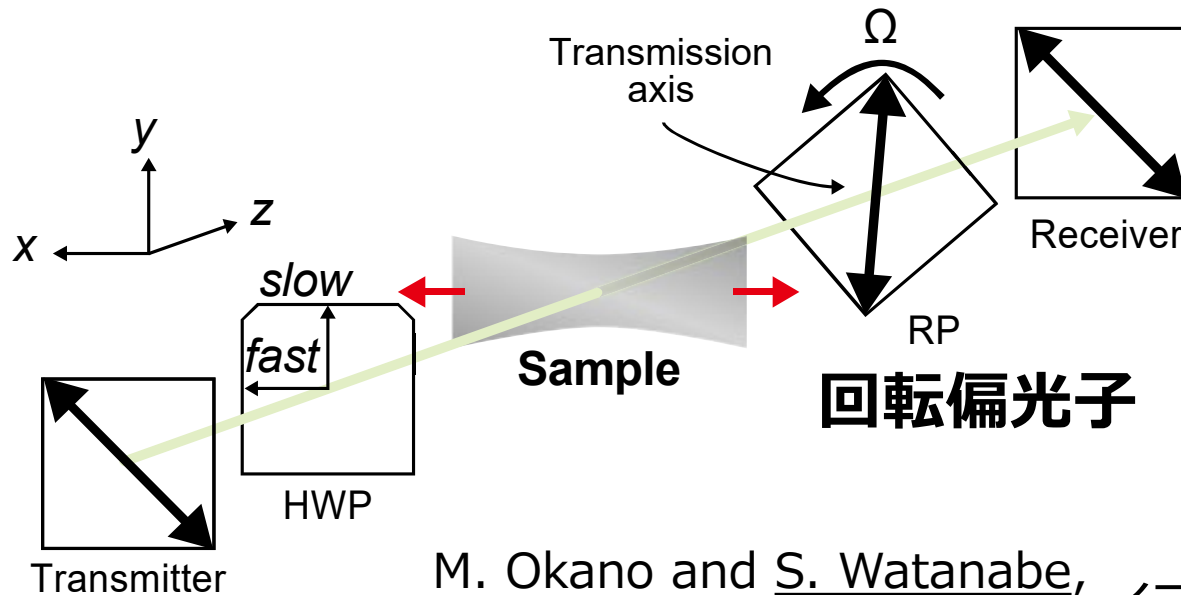
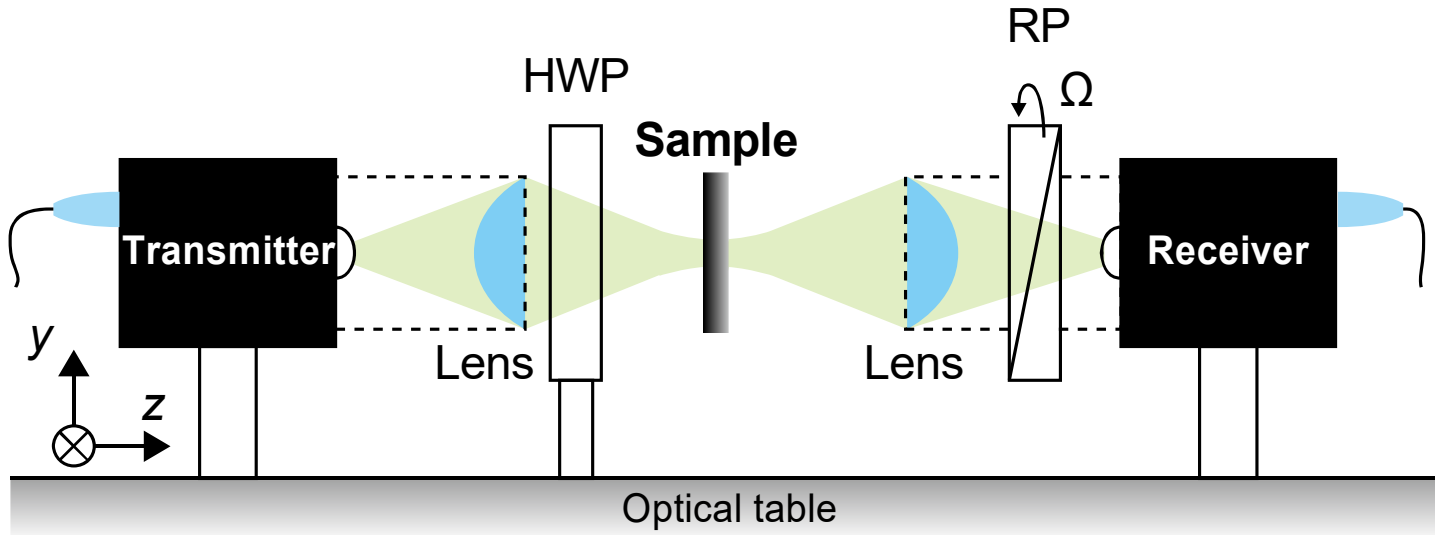
ゴム材料は、通常、耐久性を増すために**カーボンブラック(CB)**を添加。

⇒CBのために、光が透過しなくなる（非破壊検査できない）。

⇒しかし、**テラヘルツ光だけはゴム材料内部を透過する！**

⇒しかも、**偏光計測で異方性計測が可能であることを発見。**

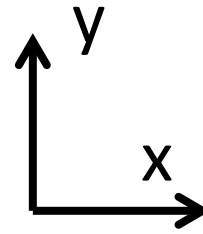
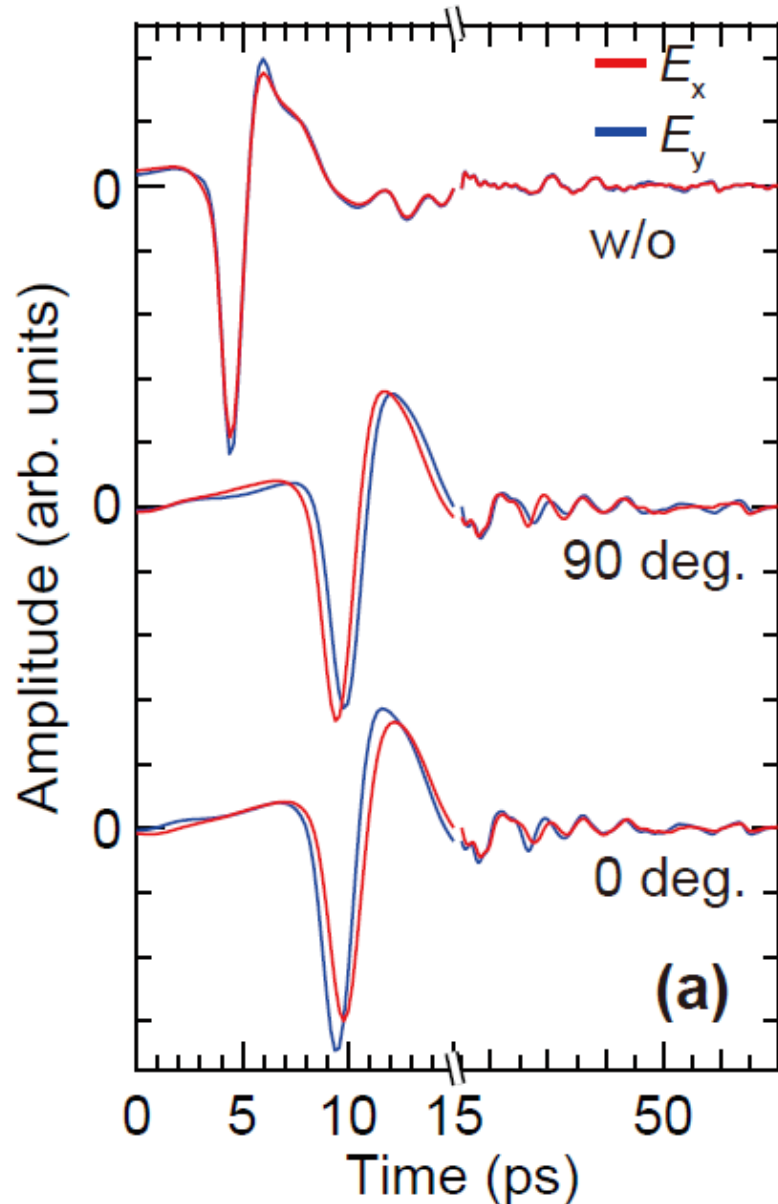
テラヘルツ偏光実験セットアップ^o (市販のTHz-TDS装置を改造)



M. Okano and S. Watanabe,
Sci. Rep. **6**, 39079 (2016).

同時に引っ張り試験を
行うことができるように改造

黒色フッ素ゴムにおける巨大な複屈折（未延伸）



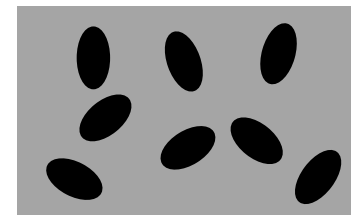
長軸方向に偏光した
THzパルスの
透過光のほうが遅れる



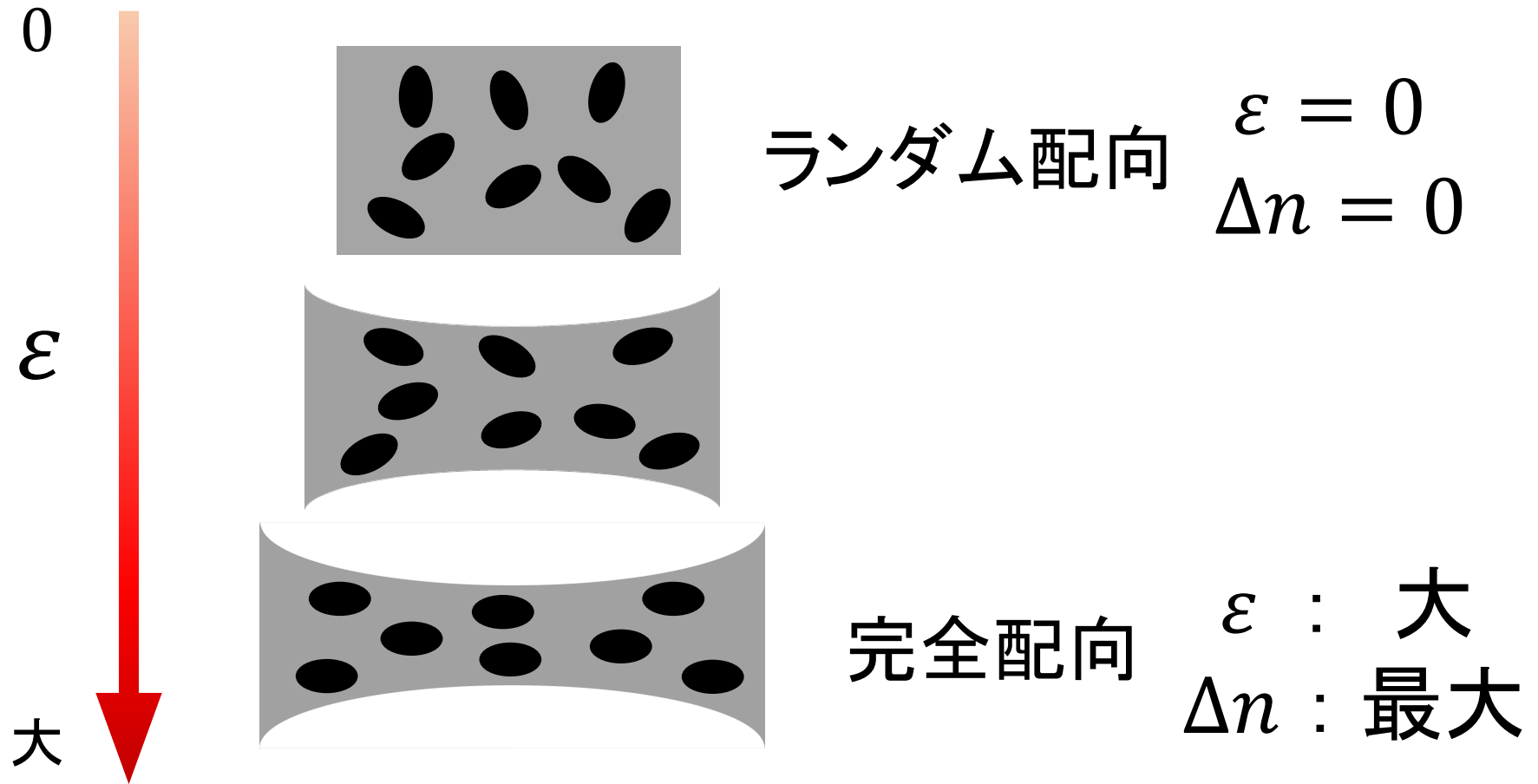
屈折率は
長軸方向が大きい



カーボンの配置による
異方性を
観測している。

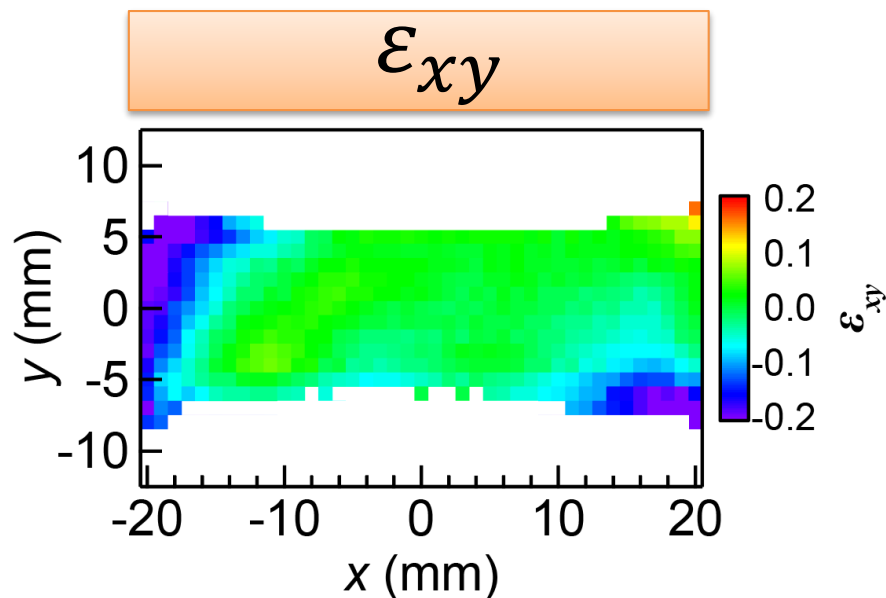
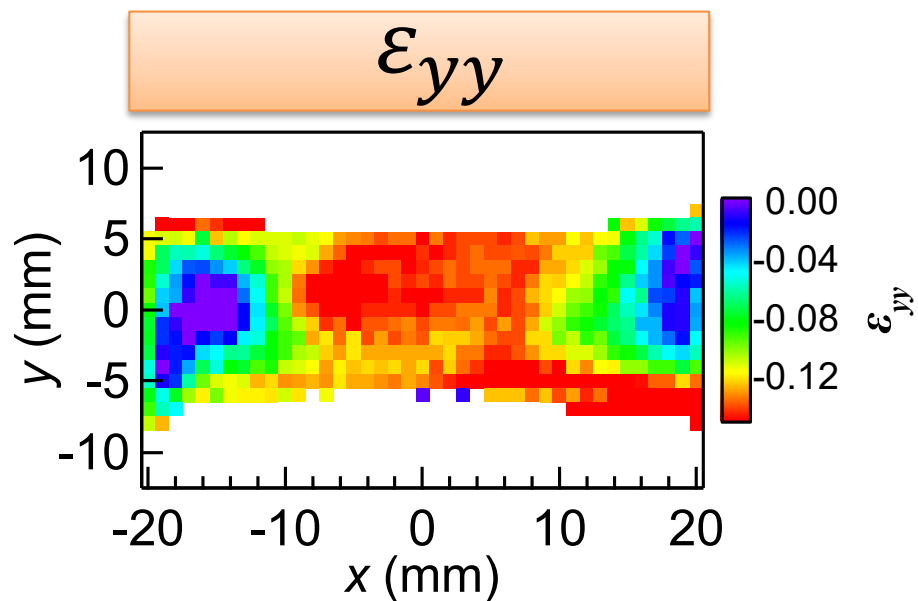
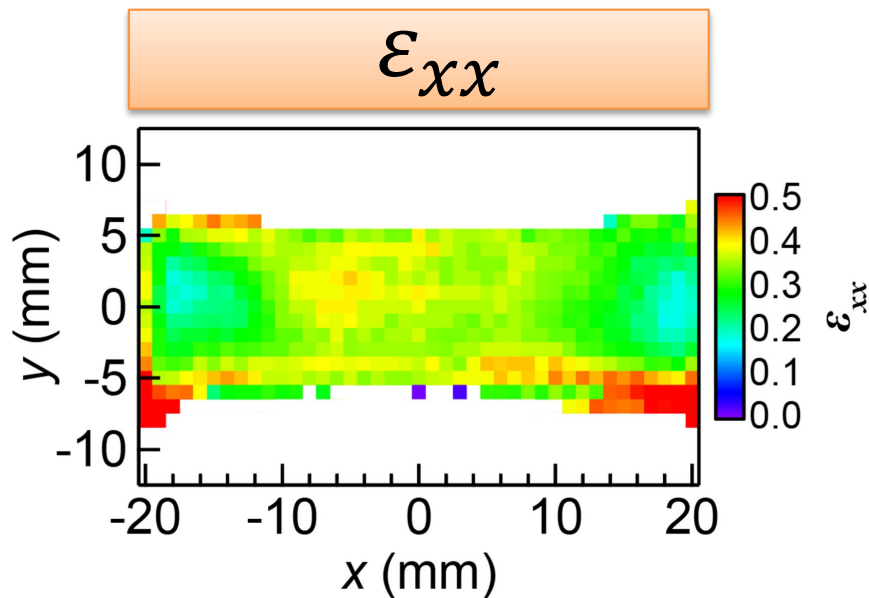


複屈折 (Δn) から、定量的な歪み量を決定する。



あらかじめ Δn と ε の関係を調べておき、 Δn から歪み量に変換した。

Analysis 2: Mapping of ϵ_{xx} , ϵ_{xy} , ϵ_{yy}



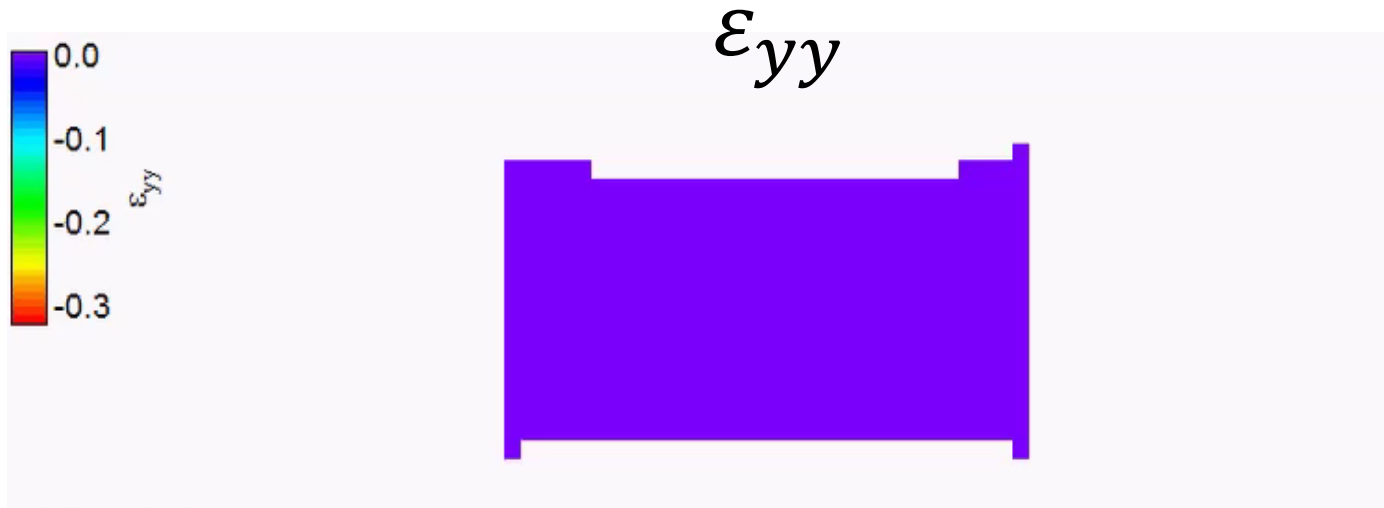
$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

– Spatial mapping of strain in black rubbers –

Estimation from THz birefringence

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

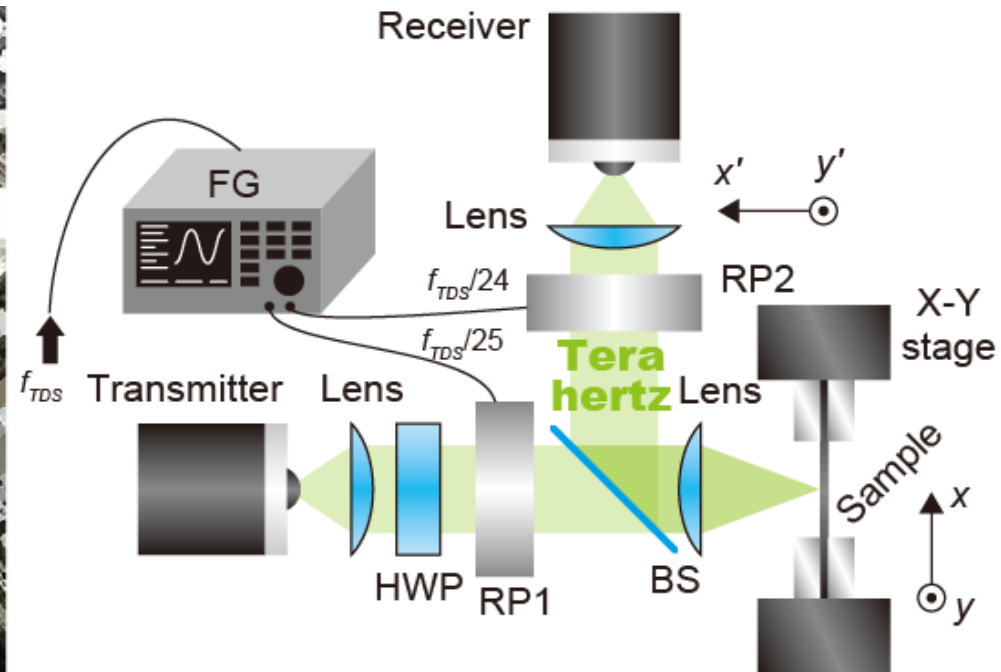
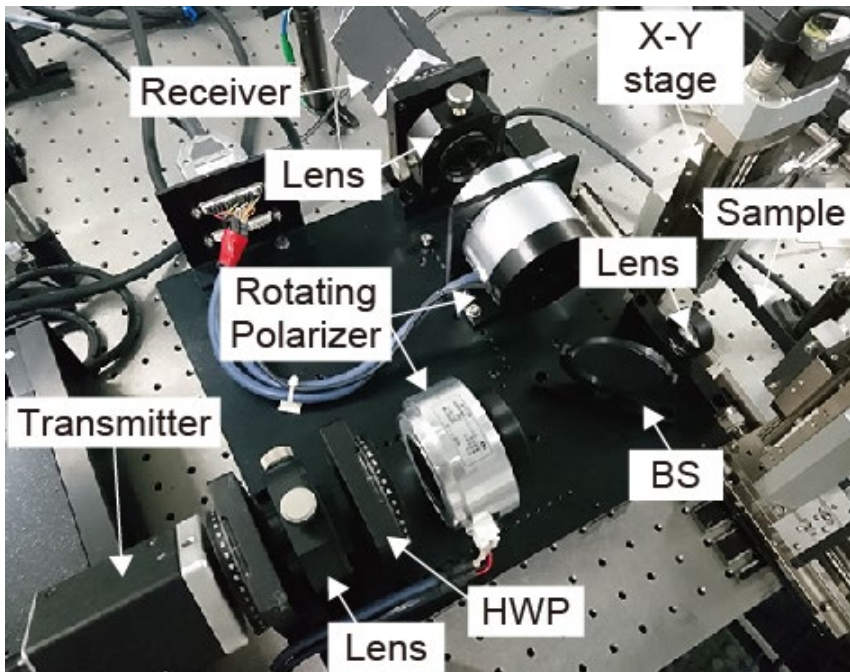
Estimation from thickness



DR=1.00

A. Moriwaki, M. Okano, and S. Watanabe,
APL Photonics **2**, 106101 (2017).

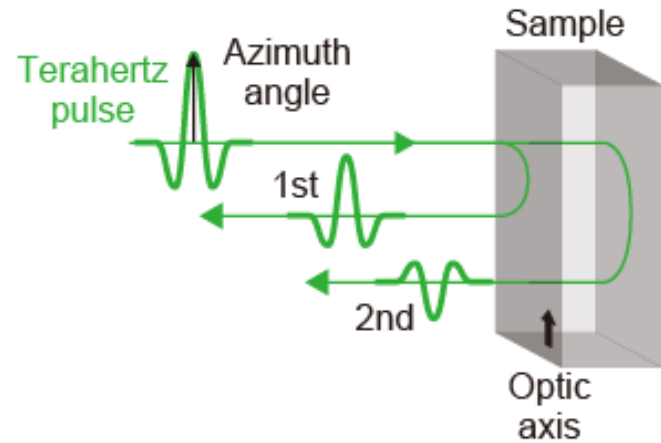
反射型テラヘルツ偏光イメージング装置



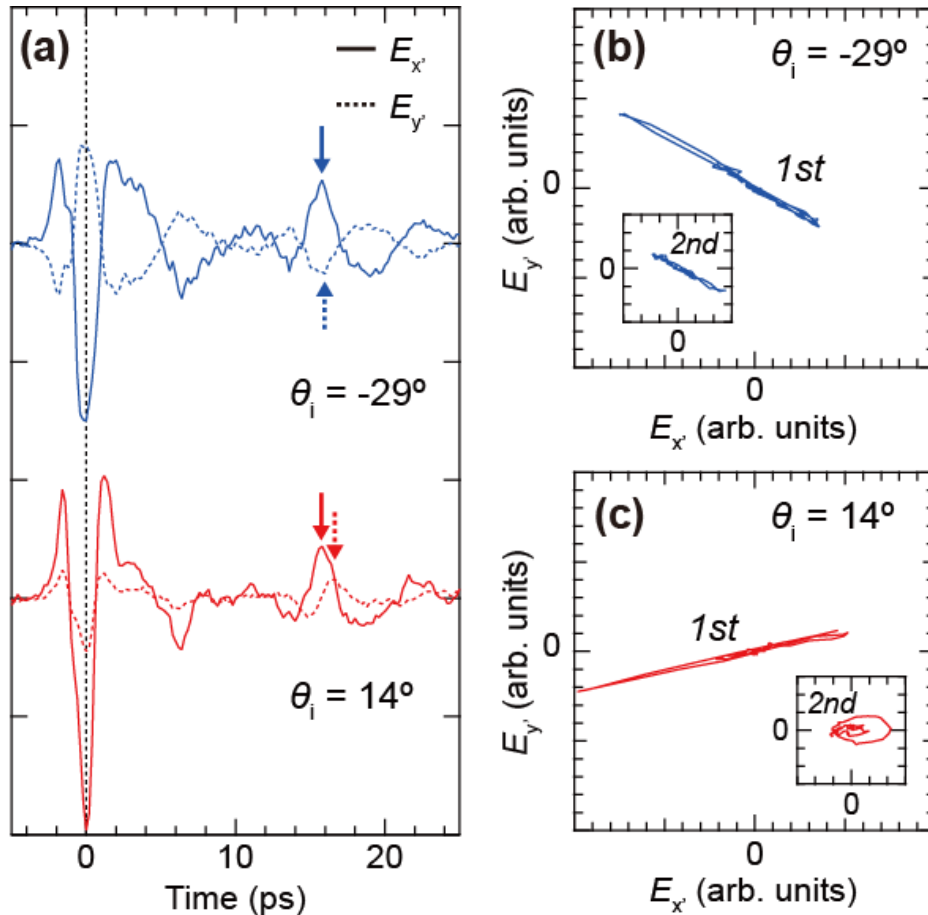
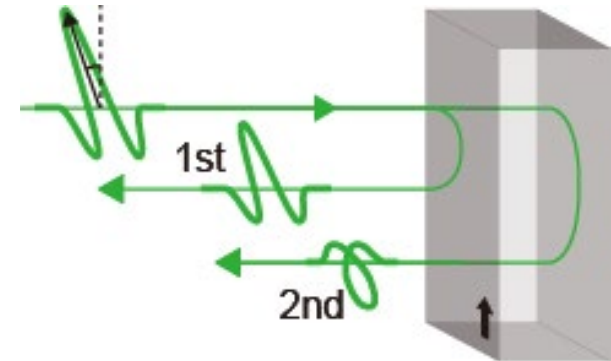
M. Okano and S. Watanabe, Polym. Test. **72**, 196 (2018).

新しい解析方法(新計測コンセプト)

照射THz波の偏光 // ゴムの光学軸



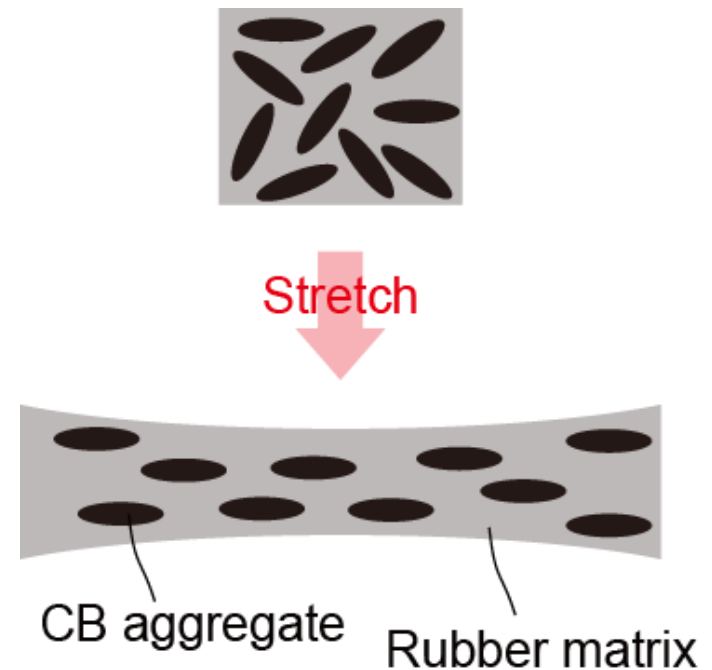
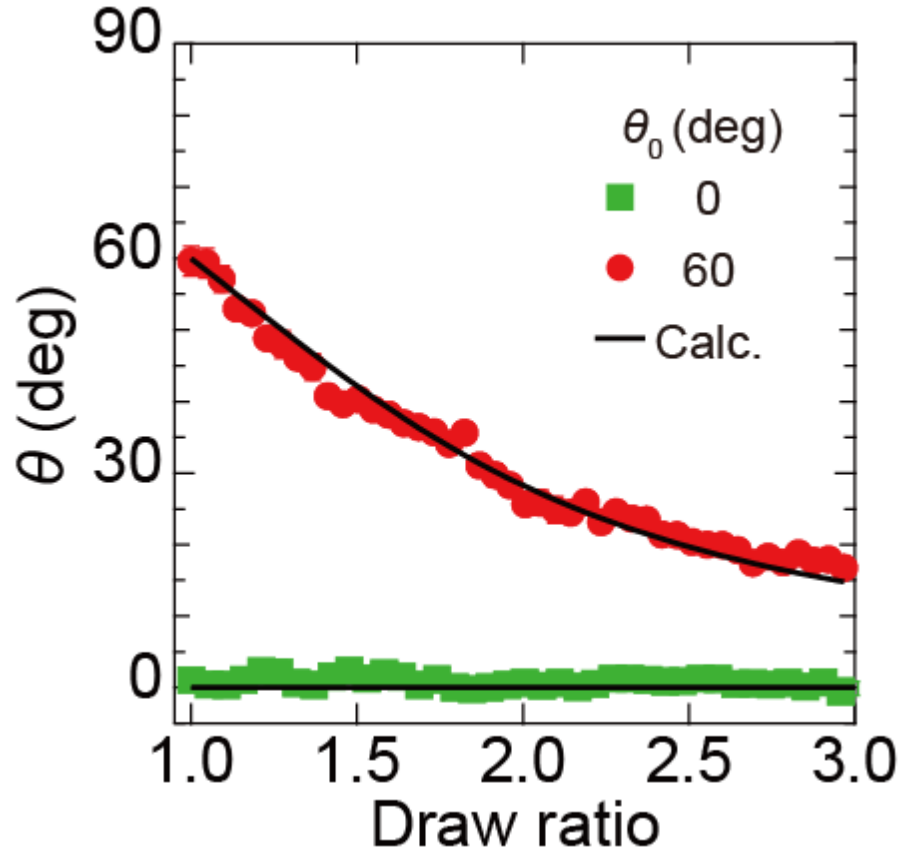
照射THz波の偏光 \perp ゴムの光学軸



表面反射成分と裏面反射成分の偏光状態の違いを利用して、光学軸を決定する。(渡邊紳一、岡野真人、PCT/JP2017/030814 出願日:2017/8/28)

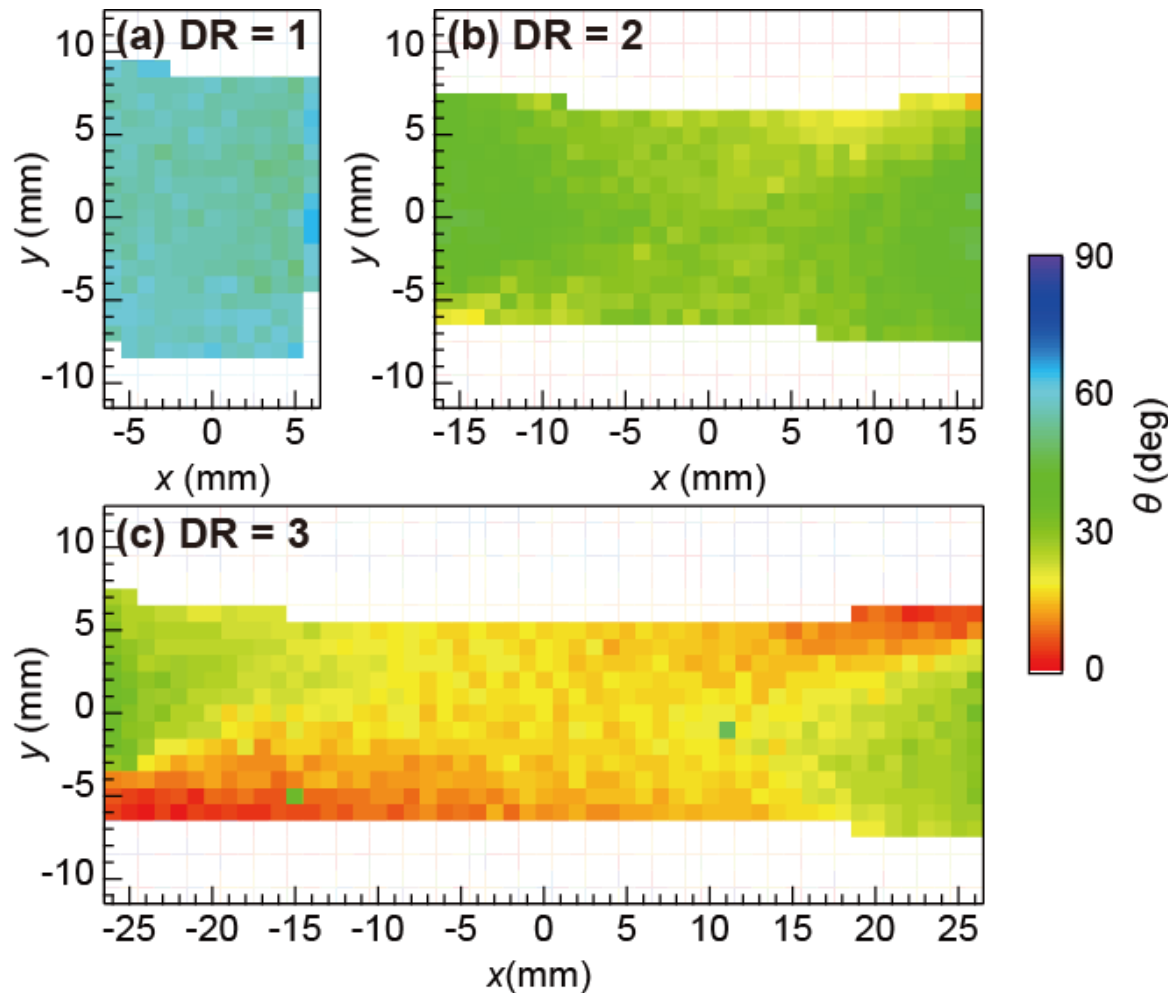
反射計測により、ゴムの光学軸の決定に成功

光学軸の延伸率依存性



反射計測によるゴムの異方性イメージングに成功

光学軸の空間マッピング



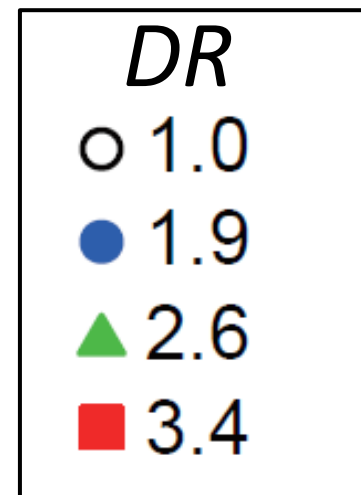
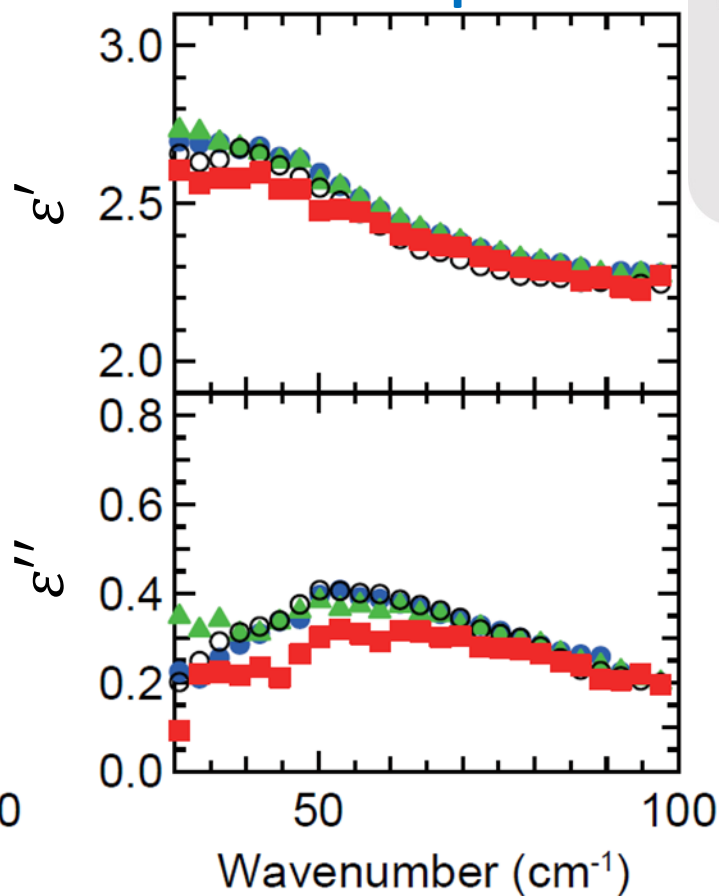
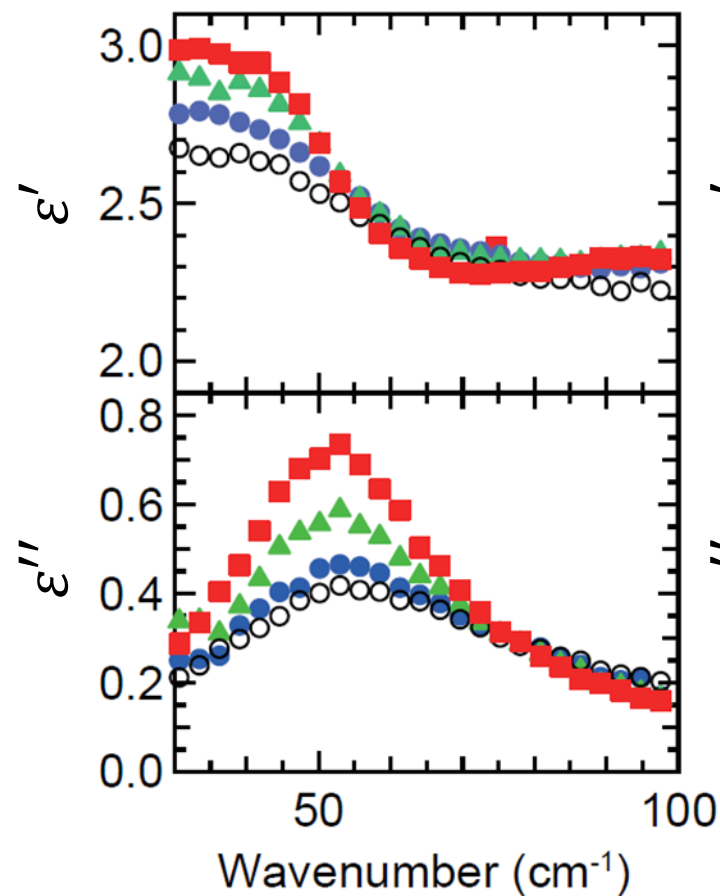
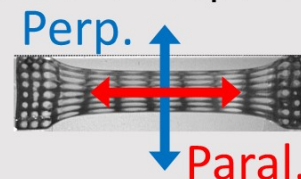
Polarization dependence of PLA's

the complex dielectric function ($\hat{\epsilon} = \epsilon' + i \cdot \epsilon''$)

Parall.

Perp.

Polarization dependence

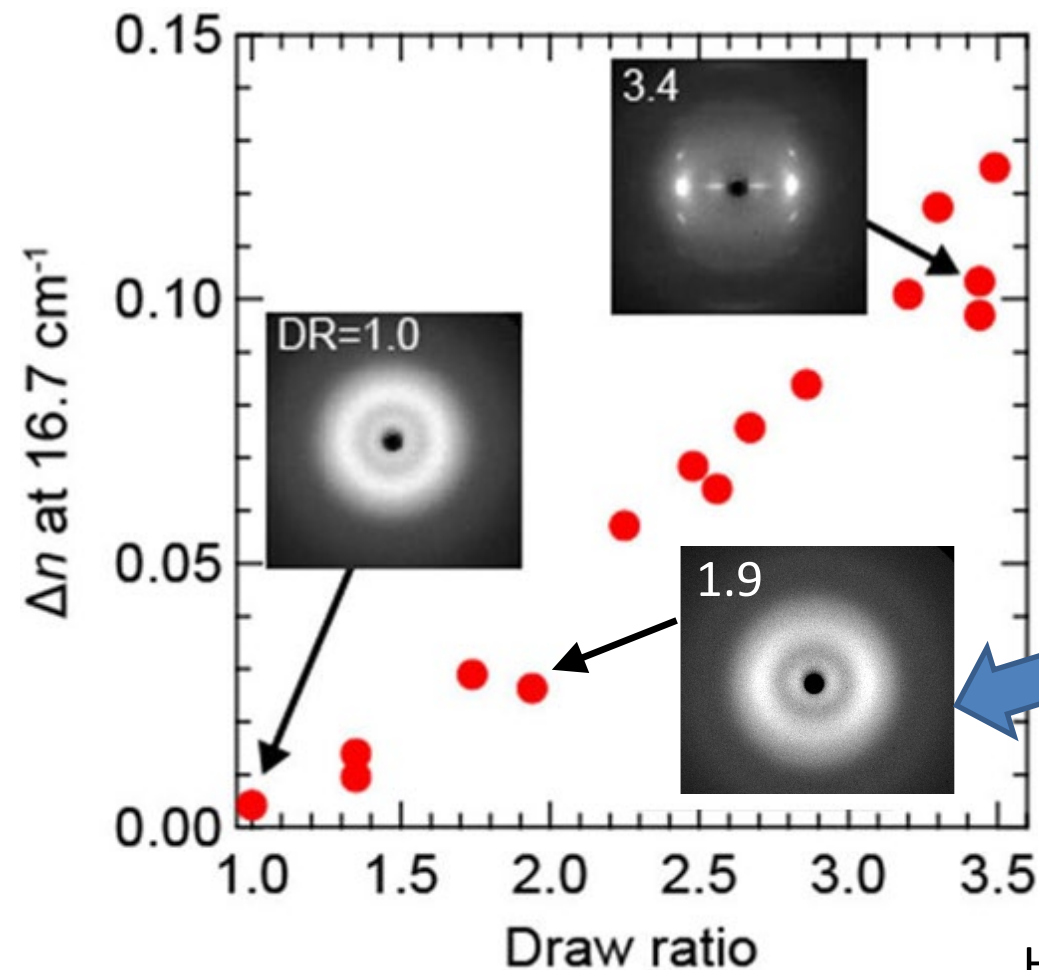


- $DR=1$: isotropic
- $DR=3.4$: anisotropic

H. Iwasaki, *et al.*,

J. Phys. Chem. B **121**, 6951-6957 (2017).

Terahertz and XRD anisotropy



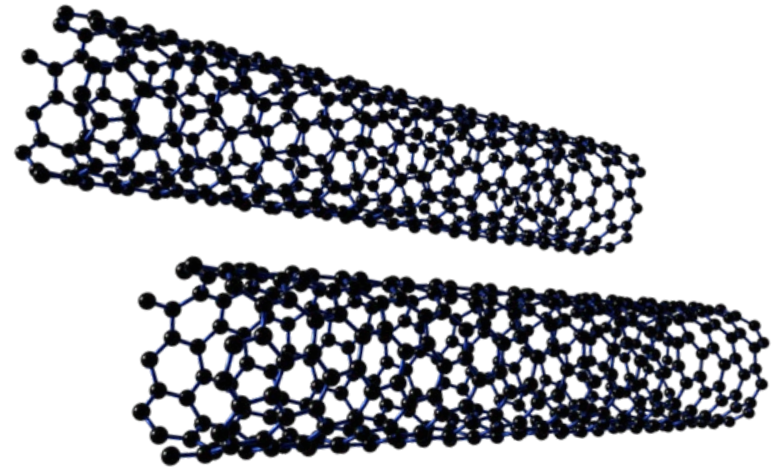
At DR=1.9,
XRD anisotropy is
not so evident, but
THz anisotropy (Δn)
is evident !

ゴム検査市場の広がり

自動運転技術による
高齢ドライバーの増加



カーボンナノチューブなど
新たなカーボン補強材



市場規模:

11.6兆円@2018年

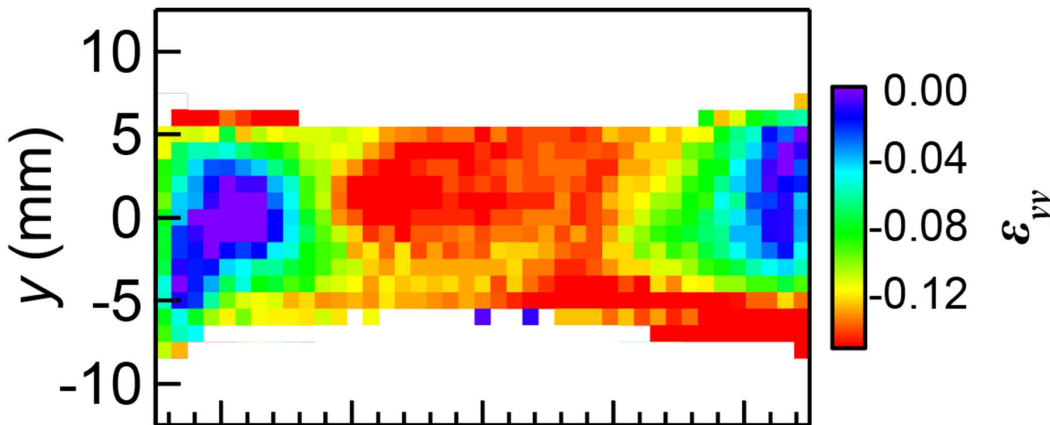
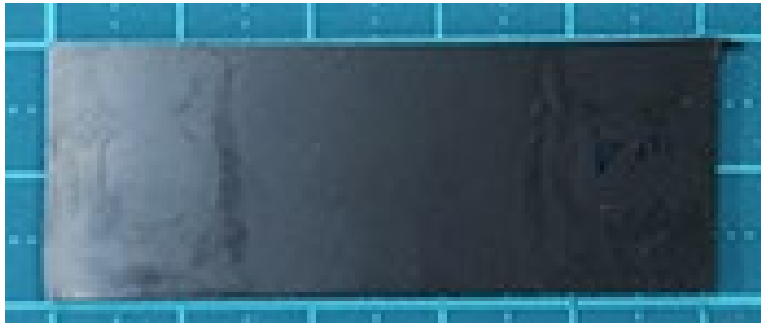
引用元:富士経済マーケット情報

87億ドル@2022年

引用元:リサーチステーション合同会社

巨大な市場をもつ素材検査が**できる!**

テラヘルツ光では**カーボン**が見える



テラヘルツ装置

検査可能項目

(1) 均一性

(2) 並び方

(3) 動き方

(4) ひずみ

(5) 欠陥

可視光では不可能

競合技術との比較

	テラヘルツ	X線
金属	×	○
結晶・半導体	○	◎
ゴム・高分子	◎	△

X線装置が不得意な分野に切り込む