

ブリルアン分光法：産業用途への展望

パナギオティス・ヴェルギリス、ジュゼッペ・アントナッチ

ブリルアン分光法の全光学的アプローチは、幅広い産業用途に対して有望である。

材料固有の粘弾性特性の評価は、製造、建築、食品包装、化粧品など、多岐にわたる産業分野において不可欠となっている。当社の目標は、この粘弾性特性を定義することにより、工学設計や材料開発の効率化を進め、適切な品質管理を実現することだ。

香水、洗剤、殺虫剤などの開発工程においては、適切な有効成分の研究だけでなく、製品の効果の検証や顧客への訴求も重要である。例えば、水のような粘性を持つ製品開発では、シャンプーの場合、扱いにくいという課題がある。一方、殺虫剤の場合、少量の雨で流されてしまうという課題が挙げられる。製品開発や品質管理において、製品の粘弾性を測定することは容易ではないが、非常に重要である。

レオメータ、粘度計、ナノインデンタが主流である中、ブリルアン分光法は、粘弾性を測定する分析機器の分野で注目されている。ブリルアン分光法は全光

学技術であり、自然に発生するギガヘルツ帯域の音波(フォノン)からのブリルアン光散乱を利用して、マイクロメートルレベルの全光学的手法により、ラベルフリー(非標識)かつ非破壊的に微細な力学的特性を測定する⁽¹⁾。この非接触アプローチは、従来のエラストグラフィ法に代わり、さまざまな産業用途における力学的特性を評価する実用的な方法として有望だ。

産業用途

医薬品には液体、半液体、固体があり、その粘弾性特性を測定することにより、医薬品の製剤化や開発工程に直接影響を与えることができる。この機能は、薬効、原料成分の品質、剤形、そして最終的には完成品の品質を決定する上で重要だ。例えば点鼻薬は、有効成分の薬物送達を実現するために特定の力学的特性を示す必要がある。組織や筋肉の損傷を修復する素材の開

発や、感覚特性や伸びやすさが重視される皮膚科製品の開発には、応力やひずみの測定が不可欠だ。このような特性を評価できる機器を利用すると、製薬製品の開発を加速できる⁽²⁾。

ブリルアン分光法を利用すると、医薬品のさまざまな製造工程において粘弾性のモニタリングが可能になる。これにより、試料の無駄を最小限に抑えながら、医薬品の製造工程をリアルタイムで調整し、再現性を確立できる。また、同手法は新しい治療法の開発にも有望だ。例えば、癌においては、細胞外基質(マトリックス)が硬化すると、他の組織への細胞浸潤が抑制される可能性が証明されている⁽³⁾、⁽⁴⁾。ブリルアン分光法を利用すると、癌の発生や進行における細胞と細胞外基質の相互作用をさらに把握でき、標的型で効果的な薬剤や治療法の開発が可能になる。

バイオ用途関連の素材の特性は、細胞との相互作用を予測および把握する



ブリルアン分光法を利用すると、医薬品のさまざまな製造工程において粘弾性のモニタリングが可能になる

ために厳密に制御されなければならない。例えば、外科用インプラントや補綴器具の開発に使用される素材には、生体環境に適応可能な力学的特性が要求される⁽⁵⁾。分かりやすい例としてはハイドロゲルが挙げられる。これは再生医療、組織工学、医療用インプラント、標的薬物送達システム、創傷治癒などの生物医学的用途に有望な、軟質の生体材料である^{(6)~(9)}。ブリルアン分光法を利用すると、力学的特性を迅速、リアルタイム、非破壊的に評価できる。同手法は、生体細胞や組織を被検試料とする場合に不可欠であり、継続的なモニタリングを実現し、試料の無駄を最小限に抑えられるのだ。

クリーム、軟膏、スプレー、フォーム、ジェルなど、化粧品やパーソナルケア製品の品質を最高レベルで維持することは困難である。エマルジョンの長期的な物理的安定性を評価および予測するには、粘弾性特性を正確に測定する装置が必要だ⁽¹⁰⁾。パーソナルケア製品の多くは製品ライフサイクルが比較的短いため、開発は迅速に行わなけれ



ブリルアン粘弾性センサを製造ラインに組み込むことで、化粧品を継続的にモニタリングできる



ブリルアン分光法は、研究開発段階での材料開発から製造時の品質管理まで、ポリマーの製品ライフサイクルを研究するのに有益である

ばならない。配合物の長期的な物理的安定性と経時的な粘稠度の変化を予測するには、加速保管試験が不可欠である。ブリルアン粘弾性センサを製造ラインに組み込むことで、製品を継続的にモニタリングし、製造工程の自動化を促進できる。これにより、高品質かつ最適な質感を確保できるのだ。

粘弾性測定を通じてさまざまな食品の各特性の変化を把握することにより、消費者の嗜好に合った新しい配合の食品を開発できる。粘弾性測定装置は、液体や半固体材料の単純な粘弾性特性評価から固形製品の破壊試験に至るまで、食品の原材料や完成品を包括的に分析できる⁽¹¹⁾。ブリルアン分光法を利用すれば、粘弾性特性のモニタリングを継続的に行うことにより、食品の品質を確実に保証できる。また、生産ラインを自動化し、製造工程の各段階における制御精度を向上できる。

ポリマーは、土木工学、航空宇宙、産業機械など、さまざまな産業で幅広く使用されており、振動制御、緩衝、絶縁などで重要な役割を果たしている。例えばゴムは、その効果的な減衰特性と応力緩和挙動を活かし、自動車に広く使用されている⁽¹²⁾。ポリマーの微細な力学的特性を解析すると、分子と超分子構造(モルフォロジー)の相関関係を明らかにできる。ブリルアン分光法は、研究開発段階での材料開発から製造時の品質管理まで、ポリマー

の製品ライフサイクルを研究するのに有益である。同手法は、操作が簡便で信頼性の高い品質検査ツールとして機能するため、完成品の性能を保証し、顧客満足度を向上させる。

機能層の密着性、ワイヤーボンディングの強度、保護コーティングの耐擦傷性は、半導体にとって重要な領域である。マイクロメートルレベルで力学的特性を評価する機器の活用が不可欠だ。ブリルアン分光法は、ウエハ上の各微小構造物の微細な力学的特性を、その特性の変化や性能低下などを引き起こさずに、迅速、リアルタイム、正確に評価するソリューションとなり得る。

ガラスは最近、高周波共振器やスイッチなどの微小電気機械システム(MEMS)用途において、シリコンを上回る堅牢な代替材料として注目されている⁽¹⁴⁾。マイクロメートルレベルのガラスの動的な力学的特性を同定することは、その耐衝撃性や耐振動性を把握する上で極めて重要である。さらに、三次元(3D)ガラス微細加工技術は、ライフテクノロジー、医療技術、光学、



ブリルアン分光法を利用すれば、粘弾性特性のモニタリングを継続的に行うことにより、品質を確実に保証できる

フォトニクス、高級品・時計製造、マイクロ光学、照明、研究開発など、ガラス製マイクロデバイスの分野で新たな標準となりつつある。

製品の歩留まりを向上させ、顧客の要件を満たすためには、製造工程中使用される材料の微細な力学的特性を追跡することが不可欠である。ブリルアン分光法を利用すれば、粘弾性特性をリアルタイムで評価できる。実際の用途では、材料の損傷耐性や衝突安全性などの重要な特性に関して洞察を得ることができる⁽¹⁴⁾。ブリルアン分光法は非破壊的な性質を有するため、大

量生産における品質管理にも適しており、顧客への納品前に各製品の品質を確実に保証できる。

塗料、インク、接着剤、コーティング剤などの高度に構造化された流体の場合、多くの成分が完成品の流動挙動に影響を与える。また、バインダーは光沢、耐久性、柔軟性、強靭性といった特性にも大きく関与する。塗料、インク、コーティング剤の配合を最適化し、バッチ間の一貫性を確保するには、レオロジー性能を総合的に評価する試験が不可欠である。生産ラインの要所にブリルアン分光計を設置することで、製造工程のモニタリングを自動化し、無駄を最小限に抑えながら高品質な製品を安定的に生産できる。

潤滑剤は金属製エンジンの摩擦の軽減において重要な役割を担っており、世界的なエネルギー消費の削減に貢献している。内燃機関で潤滑油を効果的に使用することにより、燃料消費を節減できる。その結果、全体的なエネルギー効率が向上するとともに、車両の二酸化炭素排出量が削減され、持続可能な社会への移行が促進される。潤滑工程において粘度は重要な役割を果たすため、潤滑剤の粘弾性特性をモニタリングすることが極めて重要である。潤滑剤の性能を最大限に引き出すためには、製造工程の各段階や最終形態に



ブリルアン分光法は、紙パルプやその他のセルロース繊維の力学的特性を評価できるため、コスト削減と製造サイクルの短縮によって、製造工程の効率を大幅に向上できる

において潤滑剤の粘弾性特性を測定できる技術や機器が不可欠だ。ブリルアン分光法は、製品の品質向上と新素材の開発支援に貢献できる可能性がある。

ブリルアン分光法は全光学技術であり、物理的および力学的特性を測定できるため、リモートセンシングへの応用が期待されている。実際に、この技術はすでにブリルアン分光ライダー (LiDAR) システムを利用して、海水温度と塩分濃度のリモートセンシングを行う目的で応用されている⁽¹⁵⁾。このシステムは、飛行時間情報を用いて深度を測定し、ブリルアン分光法を温度と塩分濃度の指標として活用している。温度は0.5°C、塩分濃度は1% (パーミル)の精度で測定できることから、ブリルアン分光ライダーシステムは長距離 (40メートル以上)の海水リモートセンシングに有力な手法と言える。さらに、ブリルアンファイバセンサは、ファイバに沿った位置関数ごとのブリルアン周波数シフトを測定することにより、標準的な市販ファイバを用いて、長距離にわたるひずみや温度の分布を測定できる^{(16)、(17)}。

製紙工程では、個々のパルプ繊維間の結合形成は、湿潤状態の繊維の硬さに影響される。ブリルアン分光法は、紙パルプやその他のセルロース繊維の力学的特性を評価できるため、コスト削減と製造サイクルの短縮によって、製造工程の効率を大幅に向上できる。これは、パルプと紙の製造技術研究において革新的な技術となり得るものであり、繊維の特性を評価する標準的な試験方法になる可能性も秘めているのだ^{(18)、(19)}。

絵画、彫刻、工芸品はさまざまな材料で制作され、油性や水性などさまざまな種類の塗料で彩色されているため、クリーニングや修復作業において

は適切に取り扱うことが極めて重要である。ブリルアン分光法を利用すると、対象物の物理的および微細な力学的特性を高精度に予測できるため、工芸品の修復工程において、クリーニング作業中の潜在的な損傷のリスクを最小限に抑えられる⁽²⁰⁾。さらに、構造的特性を分析すると、油彩画の劣化過程を解明する鍵となる。非接触かつ非破壊的に微細な力学的特性を測定できる技術は他に存在しないため、ブリルアン分光法は、貴重な芸術品や文化的傑作に対するこの種の分析においては、唯

一無二の手法となっている。

結論

ブリルアン分光法は、産業分野において粘弾性特性を測定するための新たな代替手法として注目されている。一方、従来のエラストグラフィ法は、現在、さまざまな産業用途で材料の微細な力学的特性評価に使用されているが、時間も費用もかかるというデメリットがある。ブリルアン分光法を利用すれば、高精度かつリアルタイムでの非破壊測定が可能になるため、実用的な方法として有望視されている。

参考文献

- (1) R. Prevedel, A. Diz-Muñoz, G. Ruocco, and G. Antonacci, *Nat. Methods*, 16, 10, 969-977 (2019); doi:10.1038/s41592-019-0543-3.
- (2) H. Patil, R. V. Tiwari, and M. A. Repka, *AAPS PharmSciTech*, 17, 1, 20-42 (2016); doi:10.1208/s12249-015-0360-7.
- (3) V. Gkretsi and T. Stylianopoulos, *Front. Oncol.*, 8 (May 2018); doi:10.3389/fonc.2018.00145.
- (4) G. Antonacci et al., *Nat. Commun.* (2024); <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49419-2>.
- (5) P. Moshayedi et al., *J. Biomater.*, 35, 13, 3919-3925 (Apr. 2014); doi:10.1016/j.biomaterials.2014.01.038.
- (6) H. Geckil, F. Xu, X. Zhang, S. Moon, and U. Demirci, *Nanomed.*, 5, 3, 469-484 (2010).
- (7) C. E. Hoffler, X. E. Guo, P. K. Zysset, and S. A. Goldstein, *J. Biomech. Eng.*, 127, 7, 1046-1053 (Aug. 2005); doi:10.1115/1.2073671.
- (8) M. Beil et al., *Nat. Cell Biol.*, 5, 9, 803-811 (2003).
- (9) W. F. Liu and C. S. Chen, *Mater. Today*, 8, 12, 28-35 (2005).
- (10) T. Tadros, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 108-109, 227-258 (May 2004); doi:10.1016/j.cis.2003.10.025.
- (11) S. Tariq, A. J. Giacomini, and S. Gunasekaran, *Biorheol.*, 35, 3, 171-191 (May 1998); doi:10.1016/s0006-355x(99)80006-7.
- (12) I. D. Fatima, N. Shafi, and H. Anjum, *Proc.ICA EM*, 117-121 (2019); doi:10.1109/icaem.2019.8853764.
- (13) A. Sakhnevych, R. Maglione, and F. Timpone, *Sensors*, 23, 22 (2023); doi:10.3390/s23229213.
- (14) R. Ramachandramoorthy et al., *Nano Lett.*, 19, 4, 2350-2359 (Apr. 2019); doi:10.1021/acs.nanolett.8b05024.
- (15) Y. Wang, Y. Xu, P. Chen, and K. Liang, *Sensors*, 23, 1 (2023); doi:10.3390/s23010446.
- (16) J. B. Murray, A. Cerjan, and B. Redding, *Optica*, 9, 1, 80-87 (2022); doi:10.1364/optica.435716.
- (17) Y. Muanenda, C. J. Oton, and F. Di Pasquale, *Front. Phys.*, 7 (Oct. 2019); doi:10.3389/fphy.2019.00155.
- (18) C. Ganser, U. Hirn, S. Rohm, R. Schennach, and C. Teichert, *Holzforchung*, 68, 1, 53-60 (2014); doi:10.1515/hf-2013-0014.
- (19) K. Elsayad et al., *Cellulose*, 27, 8, 4209-4220 (May 2020); doi:10.1007/s10570-020-03075-z.
- (20) M. Alunni Cardinali et al., *Sci. Adv.*, 8, 26 (Jul. 2022); doi:10.1126/sciadv.abo4221.

著者紹介

パナギオティス・ヴェルギリス (Panagiotis Vergyris) は、伊スペクトフォトンクス社の上級ディレクター、ジュゼッペ・アントナッチ (Giuseppe Antonacci) は同社のCEO。
e-mail: panos@spectrophotonics.com URL: <https://spectrophotonics.com>