

Dennis Gabor Award を受賞して



特別寄稿

伊 東 一 良*

On the occasion of receiving the Dennis Gabor Award

Key Words : Incoherent Holography, Nonlinear Spectral Microscopy, Stellar Interferometer, Fourier-Transform Spectrometer

1. はじめに

この度、2015年の国際光工学会 (The International Society for Optical Engineering, SPIE) Dennis Gabor Award を受賞いたしました。大変、光栄に存じますと共に、これまでご指導いただきました恩師、研究を共にしてきた同僚、学生諸君に心から感謝いたします。この度の受賞は、インコヒーレント・ホログラフィーと非線形光学分光顕微鏡に関するこれまでの研究への貢献が認められたもの (SPIE ホームページ) です。これらの中で、コヒーレンスに基づく分光画像計測法の研究内容を、できるだけ分かり易くご紹介し、誘導ラマン散乱を利用した高速分光顕微鏡にも少し触れたいと思います。

2. コヒーレンス理論に基づく分光画像計測

電磁波である光は、干渉します。恒星のような遠くの小きな光源を出て地上に届いた光も、望遠鏡の前にふたつの小さな穴 (**A**, **B**) の開いた遮蔽物を置いて、これらの穴を通して重ね合わせると、干渉縞 (**F**) が生じます。星の大きさが非常に小さい場合は、くっきりとしたコントラストの高い干渉縞が観測されます。このような場合、開口 **A**, **B** 内の光は、「互いにコヒーレント (可干渉)」である、または、「コヒーレンス (可干渉性) が高い」と言います。このとき、小さな光源を、ふたつの穴の並んだ方向に移

動させると、**S** から **A**, **S** から **B** までの光の伝搬距離が変化するため、開口 **A**, **B** 内の光の位相 (光の波のずれ具合) が変化し干渉縞は移動します (図1(a))。したがって、小さな光源 (星) がふたつ並ぶと、ふたつの互いにずれた干渉縞が生じますが、ふたつの独立な光源から来る光同士は干渉しませんから、これらの干渉縞は、単純に加え合わされます (図1(b))。

このとき、ふたつの光源の間隔が変化すると、ふたつの干渉縞から生じた干渉縞のコントラストが変化し、干渉縞が消えてしまうようなことが起こります。干渉縞が消えてしまった場合は、開口 **A**, **B** 内の光は、互いのコヒーレンス (可干渉性) を失ったこととなります。光源 (星) が沢山ある場合は、それに対応したコントラストの干渉縞が観測されます。このことから、光源の明るさ分布とこれらによって照明される電磁場の干渉性との間に明確な関係があることが分かります。この関係を精密に導き出したものが、Van Cittert-Zernike の定理です。マイケルソンはこの原理と、有名なマイケルソンの天体干渉計を用いて、二重星の観察やベテルギウスの直径の計測などを行いました。



* Kazuyoshi ITOH

1948年11月生
大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了 (1975年)
現在、大阪大学 産学連携本部 e-square 特任教授 工学博士
光情報処理
TEL : 06-6879-4824
FAX : 06-6879-7878
E-mail : itoh@uic.osaka-u.ac.jp

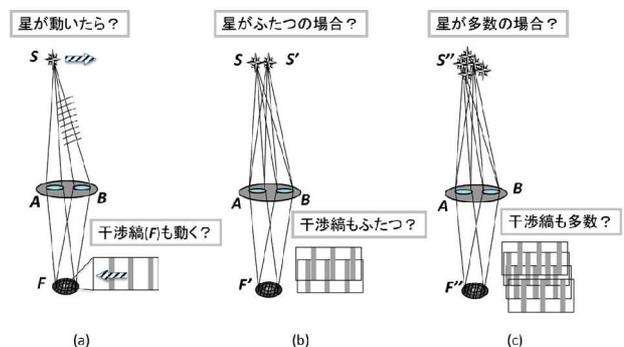


図1 (a) 天体干渉計で観測中の星が動いたら? (b) 星がふたつの場合、(c) 星が多数の場合

一方、図2に示すように、光源から出た単色の光

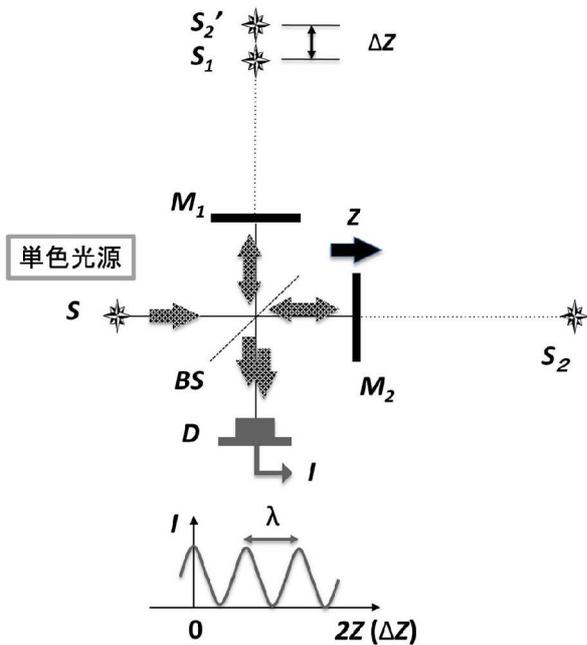


図2 マイケルソン干渉計の干渉縞

を半透鏡 BS を用いてふたつに分け、ふたつの鏡 (M_1 , M_2) までそれぞれ往復させて、重ねると、やはり干渉縞が生じます。図2に示すように、マイケルソン干渉計は平面鏡 M_1 , M_2 と半透鏡 BS とによって光源の虚像 S_1 , S_2' とを作り出し、それらの間の距離 ($\Delta Z = 2Z$) を、一方の鏡を光軸方向に移動させることにより変化させます。その結果変化する干渉縞の強度 I を、光の検出器 D を用いて測定しています。この干渉縞の強度は、光路差 (ΔZ) に対して、入射光の波長を1周期として、周期的に変化します。もし、光源がふたつの波長成分を持つと、異なる波長成分同士の干渉は通常は起こりませんから、干渉縞には異なる周期を持つふたつの干渉縞の和が観測されます。

光路差 (ΔZ) に対して、周期的に変化する信号をフーリエ変換すると、周期に相当する周波数の位置にピークが観測されます。この関係を利用して、光源の分光を行う装置が、いまでもよく使われているフーリエ分光器です。

ここまでで紹介した天体干渉計とフーリエ分光器の原理は、これまでは独立に扱われてきました。今回受賞の対象となったコヒーレンスに基づく分光画像計測法は、これらの天体干渉計とフーリエ分光器のふたつの原理を統合するものです [1]。

図3のような配置を考えます。遠方にある多色で、

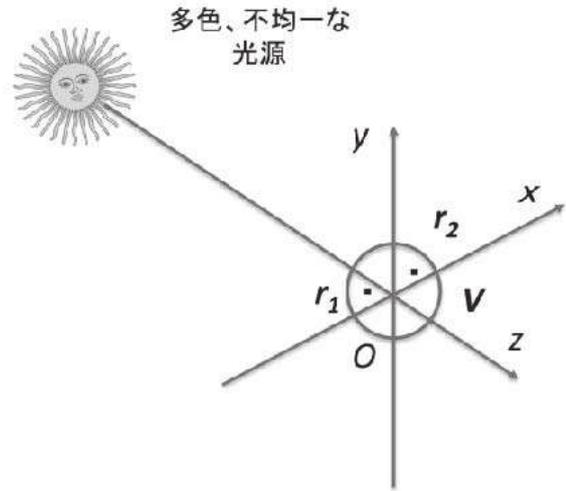


図3 コヒーレンス計測の配置

一様でない光源からやってくる光について、座標の原点を中心とする立体の計測領域 V 内の可干渉性を調べ、これらから光源の各点の分光スペクトルに関する情報を推定するという、いわゆる「逆問題」を想定しています。簡単のため、遠方の小さな光源を仮定します。注目する2点を示す位置ベクトルを、 r_1, r_2 ($\Delta r = r_1 - r_2$) としますと、

$$\Gamma(\Delta r) = \langle V(r_1) V^*(r_2) \rangle \quad (1)$$

$$G(k) = (2\pi)^{-3} \iint \Gamma(\Delta r) \exp\{-ik \cdot \Delta r\} d(\Delta r) \quad (2)$$

という関係を得ることができます。ここで、 $\langle \rangle$ は統計平均を、 $*$ は複素共役を意味し、 k は、大きさが、 $2\pi/\lambda$ の3次元波数ベクトルです。(1)式は、空間コヒーレンス関数と呼ばれ、後に示す体積干渉計を用いて、計測することができます [1]。(2)式は、よく知られた3次元フーリエ変換の式になっています。この関係を用いて、 $\Gamma(\Delta r)$ から、 $G(k)$ が再生されます。(2)式から、天体干渉計の原理と、フーリエ分光法の原理を、それぞれ導き出すこともできます。

(2)式の $G(k)$ は、遠方の光源からやって来る波数ベクトル k をもつ平面波の振幅分布を表します。重要な点は、この平面波が光源上のある1点から発せられた光波に対応し、 k の方向 (角度) に関する分布は、光源の強度分布 (または輝度分布) を意味するという事です。また同時に、光源上の各点における波数 ($|k|$) に関するエネルギーの分布、分光

情報も $G(k)$ には含まれています。われわれは、この $G(k)$ のことを、分光映像または分光画像と呼んでいます。図4(b)に分光画像の再生結果を示します。小さな図の中の右下の数値はその画像の波長 (nm) を示します。

空間コヒーレンス関数 $I(\Delta r)$ を効率よく計測する新しい干渉計も同時に提案しました [1]。図4(a)に、その干渉計の写真を示します。この理論をもとに、天体観測やCTへの応用を試みた研究者もいます [2-4]。詳しくは、筆者の解説または著書を参照して下さい [5-9]。

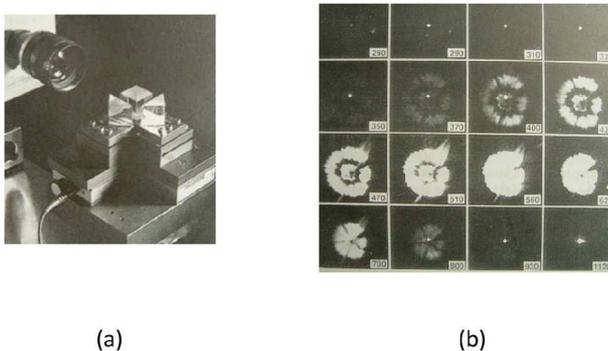


図4 (a) 体積干渉計と (b) 計測されたセキチクの分光画像、小さな四角の右下の数値は波長 (nm)。

3. 誘導ラマン分光顕微鏡

分光画像計測の研究は、北海道大学と大阪大学で行いましたが、分光顕微鏡の仕事は、大阪大学工学研究科の福井希一先生との、「真に生物学者が喜ぶような」顕微鏡を開発しようという共同研究から始まっています。幾つかの新しい方法を研究しましたが、高い生体組織の識別能力を持つ方法は、当初、見つかりませんでした。従来のラマン散乱を利用する顕微鏡は、識別能が高いのですが、観測に大変時間が掛かります。一方、光ファイバー中では、誘導ラマン散乱現象はよく利用されます。途中から参加した小関泰之先生が、この誘導ラマン散乱を分光顕微鏡に利用するという着想を思いつき、2台のレーザーを精密に同期させる装置を自作し、実験が始まりました。3代目の顕微鏡で、ようやく満足できる画質の分光画像が得られたので、学会発表し、論文を投稿しようとした矢先に、ハーバード大学から同様の研究成果が Science 誌に掲載され、ビックリした我々は、早速、別の観点から論文を書き直し、2ヶ月遅れで我々の論文が、Opt. Express 誌に掲載さ

れました [10]。しかし、さらにもうひとつの別の論文が、Stuttgart 大学から1ヶ月遅れで New Journal of Physics 誌に掲載されました。後になって、最後の論文の著者達が、最も早く学会発表をしていたことが分かりました。皮肉なことです。

「細胞や組織を、染色や標識処理をせずに、生きたまま、3次元の空間分解能で、化学組成に関する情報を含めて、高速に観察できる」誘導ラマン散乱分光顕微鏡の研究は、多数の参加者を含め、現在も熾烈な研究・開発競争が、続いています。我々のグループでは、生きたマウスの皮膚組織のビデオ観察に成功しています [11] が、キヤノン株式会社が、製品につながる開発・研究を進めています。小関先生は、筆者の退職と同時に東京大学へ異動しました。図5に最近の成果を示します [12]。健全なマウスの肝臓の誘導ラマン分光顕微鏡による分光画像の例です。図中の小さな文字は波数 (cm^{-1}) を示します。

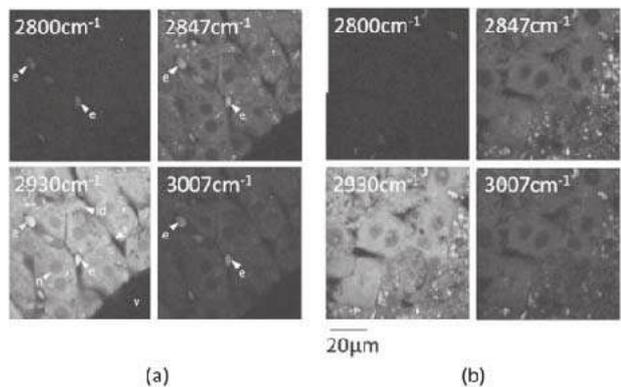


図5 誘導ラマン散乱顕微鏡による分光顕微鏡像 (a) 正常マウスの肝臓, (b) アセトアミノフェン過剰投与マウスの肝臓

4. まとめ

誌面の都合で、著者の初期と最後の研究内容を、簡単に紹介いたしました。興味が沸いた方々には、文献を参照していただければ幸いです。文化は時間と共に拡散し、平坦化します。源泉であり続けなければ、文化は陳腐化し、後退させることは、歴史がそれを示しています。いまの日本の文化は、日本人がこれまで、それを生み出し続けてきた結果です。生み出せない地域は、いずれ文化の辺境となります。筆者はすでに、大学を退職後、2年を経ています。これまで、源泉であるための貢献が、すこしでもできたとすれば、幸いです。今後、若い方々が、新しいことや、ものを生み出してゆくことの手助けが、

わずかでもできればと、願っています。

参考文献

- [1] K. Itoh and Y. Ohtsuka: *J. Opt. Soc. Am. A* **3-1**, 44 (1986).
- [2] J. M. Mariotti and S. T. Ridgway: *Astron. Astrophys.* **195**, 350 (1989).
- [3] V. Coudé du Foresto, *et al.*: *Astron. Astrophys. Supplement series* **121**, 379 (1997).
- [4] D.L. Marks, *et al.*: *Science* **25**, 2164 (1999).
- [5] 伊東一良 他: *計測と制御* 29巻, 56 (1990).
- [6] 伊東一良 他: *応用物理* 66巻, 426 (1997).
- [7] 伊東一良: *光学*, Vol. 30, No. 5, 330 (2001).
- [8] 伊東一良 [編著]: 「分光画像入門」朝倉書店.
- [9] K. Isobe, *et al.*, *Functional Imaging*, John Wiley & Sons, (2013).
- [10] Y. Ozeki *et al.*, *Opt. Express* **17**, 3651, (2009).
- [11] Y. Ozeki *et al.*, *Nature Photon.* **6**, 845 (2012).
- [12] S. Satoh, *et al.*, *Pathology International* **64**, 518 (2014).

