

光コヒーレンストモグラフィによる 精神性発汗の動態解析



研究ノート

近江 雅人*

Dynamic analysis of mental sweating by optical coherence tomography

Key Words : Optical coherence tomography, Mental sweating, Dynamic analysis

1. まえがき

光コヒーレンストモグラフィ (OCT) は、表皮下 1~2mm の深さの生体構造を 10 μm オーダーの空間分解能でイメージングできる断層技術である¹⁾。OCT は 1990 年初頭に提案され、わずか 5 年後に眼科の網膜診断に実用化された。この眼科用 OCT に続いて、皮膚科を始め、消化器外科、産婦人科、泌尿器科等々で OCT の臨床応用が検討されている。この OCT の新たな展開の一つに、生理学分野への応用がある。OCT を用いると、皮膚表面に現れる生理現象をミクロに観察することができるので、個々の微小器官・組織の実態が明らかになる。

皮膚交感神経の支配下で機能するエクリン汗腺や末梢血管は、体温や血圧調節に関わる重要な微小器官であり、これらのダイナミックな生理機能を解明することによって、交感神経に関わる疾患などの新たな臨床診断の提案が期待できる。我々はダイナミック OCT を開発し、ヒト指先におけるエクリン汗腺の精神性発汗をインビボ観察し、その動態解析を試みている^{2, 3)}。とくに、ヒト指先の汗腺は外部刺激に反応して、らせん状管腔が急激に膨張して過剰の汗を蓄積することを見出し、これをもとに時系列に取得した OCT から汗腺ダクトに蓄えられる瞬時発汗量の時間変化を追跡した。さらに、精神性発汗の動的解析により新たに内部発汗を見出し、これを

もとに交感神経の興奮度の評価も試みている⁴⁾。本稿では、OCT を用いたこれら一連の研究について紹介する。

2. タイムドメイン OCT 光学系

低コヒーレンス干渉計において、参照光ミラーを一定速度で移動して、時間軸上で光遅延走査を行って、光軸方向に沿う反射光強度分布を測定し、断層イメージを構成する手法をタイムドメイン OCT (TD-OCT) と呼ぶ。我々が試作した高速 TD-OCT を図 1 に示す。円筒状のピエゾトランスデューサ (PZT) に約 20m の単一モードファイバを巻きつけ、この PZT 光ファイバ位相変調器を干渉計の参照光および信号光の両アームに挿入し、プッシュプル動作をさせて光遅延走査を行う。光遅延量 (イメージング深さ) は 1.5mm である。図 1 の構成では、光源に 1.3 μm SLD を用いて、干渉計および光遅延走査を全て光ファイバ化でき、安定に動作する。400 回の光遅延走査で 1 枚の OCT を取得する場合、データ取得時間は >0.2 秒である。この OCT 光学系の光軸方向の空間分解能は 16.9 μm である。

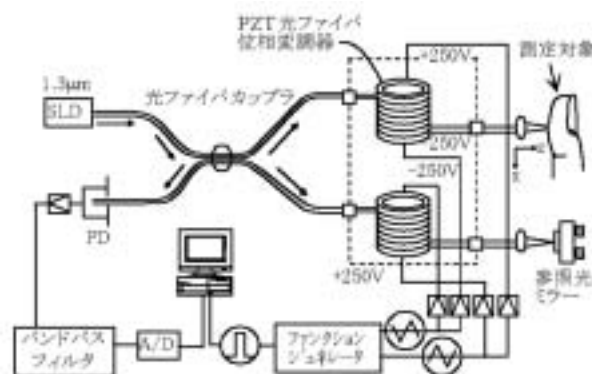


図 1 タイムドメイン OCT 光学系



*Masato OHMI

1966年9月生
大阪大学・大学院工学研究科・電磁エネルギー工学専攻 (1995年)
現在、大阪大学 大学院医学系研究科保健学専攻 助教 工学博士
生体医用光学
TEL : 06-6879-2576
FAX : 06-6879-2469
E-mail : ohmi@sahs.med.osaka-u.ac.jp

3. エクリン汗腺の OCT と発汗量の評価

ヒト指先には 1 mm^2 あたり 3～5 本のエクリン汗腺がある。汗腺の OCT イメージを図 2 に示す。表皮層にらせん構造をした汗腺ダクトを明確に捉えることができる。汗腺ダクトの直径は約 $40\text{ }\mu\text{m}$ である。ヒト指先では、汗腺は必ず指紋の山の部分に開口し、汗を放出する。

発汗は外的刺激やストレスに敏感に反応する。精神性発汗ダイナミクスの測定においては、右手で棒を強く握り握力負荷を与え、左手指先における精神性発汗の様子を OCT で測定した。握力負荷を開始すると、角層内におけるらせん状ダクトが膨張する。OCT イメージ上ではダクトの反射光強度が急激に増加して、発汗が促進されたことが分かる。発汗量の定量評価に際しては、対象とする汗腺ダクトの反射光強度を測定する。発汗量の定量評価の手順を図 3 に示す。汗腺を特定し、皮膚表面の輝線を除去し、関心領域 (ROI) を定めて、その中のピクセルの強度を積算する。

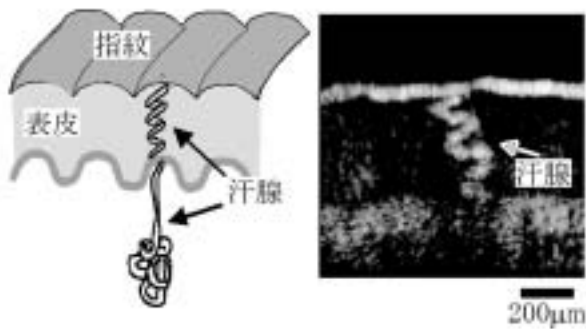


図 2 エクリン汗腺の OCT イメージ

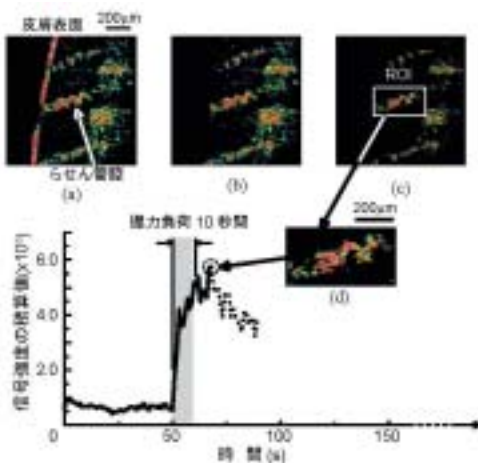


図 3 発汗量の定量評価

4. 内部発汗と外部発汗

握力負荷を与えたときに取得した時系列の OCT イメージをもとにして、発汗量および皮膚表面における汗孔径の時間変化を得る。その結果を図 4 に示す。図 4(a) は時系列のダイナミック OCT イメージを示す。図 4(b) は OCT による発汗量の時間変化である。このように、握力負荷による精神性発汗では、握力負荷と同時に精神性発汗が誘発され、発汗は 3 分以上持続している。この OCT による精神性発汗のミクロな測定結果と対比して、図 4(c) には発汗計で測定した発汗量の時間変化を合わせて示してある。発汗計はカプセル換気法を用いて、皮膚表面に生じた水分量を計測する装置である。発汗計の検出部は 1 cm^2 の円形開口であり、この中には約 400～

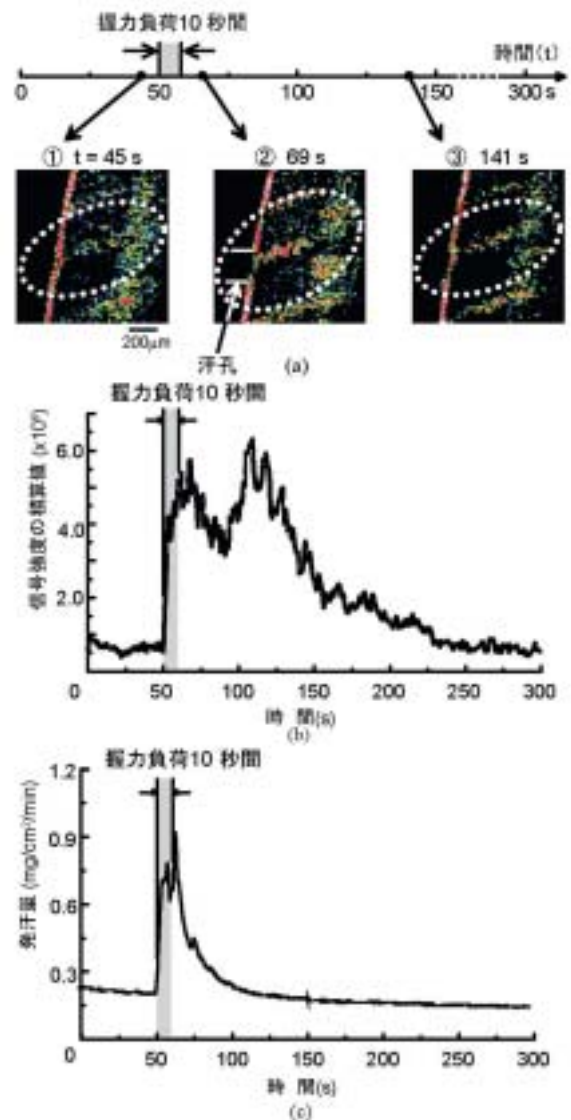


図 4 握力負荷における発汗量の変化 (外部発汗)

500本のエクリン汗腺が含まれる。握力負荷に誘発される精神性発汗では、多くの場合、皮膚表面の汗孔が開き、らせん状ダクトから汗滴が外部に放出される。このように、汗孔が開いて汗滴が放出される発汗形態を外部発汗と呼ぶことにする。いわゆる通常の発汗はこの外部発汗である。

外部発汗に対して、握力負荷のような物理的ストレスではなく、被験者に音刺激のような精神的ストレスを与えた場合には、皮膚表面への汗滴の放出が見られない発汗形態を観測する場合が多い。我々はこのような発汗形態を「内部発汗」と名付けた。このような内部発汗の場合には、OCTによる測定を用いることで発汗量の時間変化を正確に把握できる。この内部発汗における過剰の汗は、交感神経の興奮

度を反映している。実験では、被実験者に90dBの不快感（ガラスの割れる音）を0.5秒間与えて、精神性発汗の測定を行った。図5に測定結果を示す。図5(b)がOCTによる発汗量の時間変化、図5(c)が発汗計による測定結果である。発汗計の検出量はごく微量であり、これは測定領域内に含まれる数百本の汗腺のうち、わずか数%の汗腺が外部発汗を呈しているためと考えられる。このように、内部発汗はOCTでのみ高感度に検出できる発汗形態である。

さらに、この内部発汗を用いて、摂食による交感神経活動の時間変化を評価する実験を試みた。一般的に、摂食の前後の交感神経の興奮度は大きく変化し、精神性発汗量が大きく変化することが予想される。実験では、昼食1時間前、昼食後1時間～4時間で音刺激による精神性発汗量を測定した。発汗量は昼食後1～2時間で最小となり、昼食後4時間では、元の状態に復帰した。発汗量の時間変化は交感神経の興奮度を反映している。

6. まとめ

以上、OCTを用いたヒト指汗腺の動態観察と解析についての研究を紹介した。このようにOCTによる汗腺ダイナミクスでは、精神性発汗における個々の汗腺の発汗量変化をミクロに追跡することができる。これによって交感神経の興奮や異常を定量評価する素地ができた。

OCTによる汗腺の動態観察と解析に関する研究は、未だ研究の緒についたばかりであるが、皮膚生理学において既にいくつかの新たな知見が得られており、これらは新たな診断に直結する。今後、OCTのさらなる高速化と高分解能化によって、皮下組織のより精密な3Dイメージを構築し、汗腺ダイナミクスの詳細を明らかにしたい。

参考文献

1. D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito and J. G. Fujimoto: Optical coherence tomography, Science, Vol. 254, pp. 1178-1181 (1991).
2. M. Ohmi, K. Nohara, Y. Ueda, T. Fuji and M. Haruna: Dynamic observation of sweat glands of human finger tip using all-optical-fiber high-

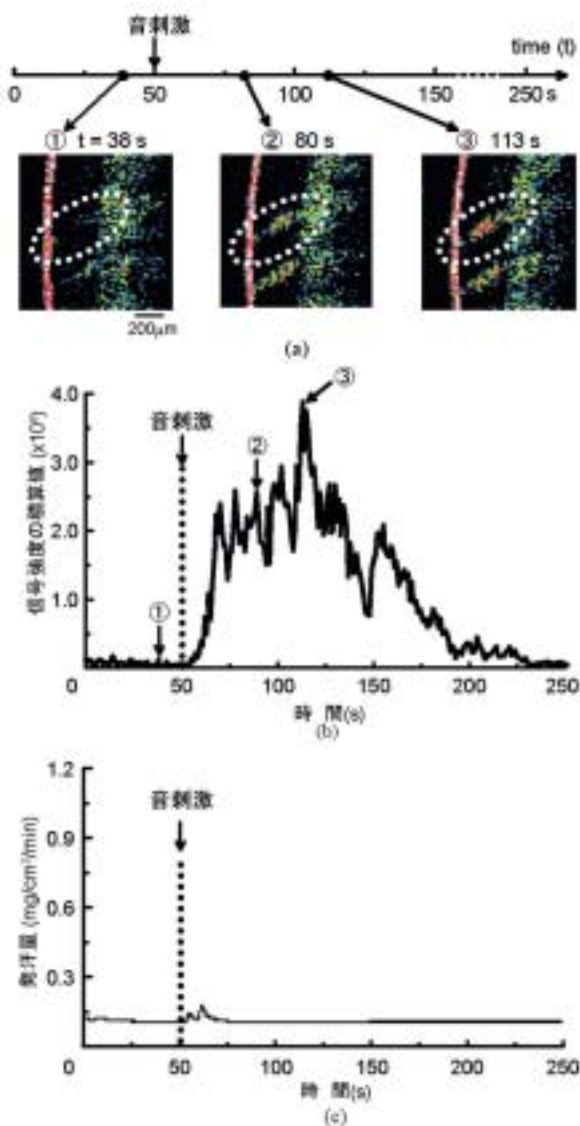


図5 音刺激に対する発汗量の変化（内部発汗）

- speed optical coherence tomography, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 26, pp. L854-L856 (2005).
3. H. Saigusa, Y. Ueda, A. Yamada, M. Ohmi and M. Haruna: Maximum-intensity-projection imaging for dynamic analysis of mental sweating by optical coherence tomography, Appl. Phys. Express, Vol. 1, pp. 098001-1 to 3(2008).
 4. M. Ohmi, M. Tanigawa, A. Yamada, Y. Ueda and M. Haruna: Dynamic analysis of internal and external mental sweating by optical coherence tomography, J. Biomed. Optics, Vol. 14, No. 1, pp. 014026-1 to 7 (2009).

