

ホログラフィ干渉法の聴覚生理研究への応用

岡山大学医学部 耳鼻咽喉科学教室

小倉 義郎 木村 雄介

東京大学工学部 精密機械工学科

植村 恒義 山本 芳孝 宇田川哲夫

【昭和49年4月16日受稿】

はじめに

ホログラフィ holography はレーザ光の干渉現象を応用した特殊な光学技術である。これは最初是一種の立体写真技術として開発された（holo は英語の whole, 被写体のすべての情報を一度に記録するという意味）ものであったが、この方法で振動体を撮影するとその振動様式を示す特異な映像が得られることから、振動解析法として応用せられるようになった。これがホログラフィ干渉法である。

本法は物体の複雑な振動状態を一つのパタンとして写真記録できること、また光の波長単位の微小な振幅を精確に計測できることなどの利点があり、生物体の振動現象においても有力な研究手段となり得る。とくに聴覚生理学においては鼓膜・耳小骨の振動解析をはじめ、内耳伝音系、骨伝導における振動状態の解明と応用範囲は極めて広い。

Khanna と Tonndorf¹⁾ は本法によるネコ鼓膜の生理的、病的振動状態の観察について最初に報告した。われわれは1972年より、東大工学部精密機械工学科植村研究室と協同して本法による生物体振動現象の研究を行っているが、今回はカエルおよびモルモット鼓膜の観察結果について述べる。

2. 実験材料、装置、および方法

実験動物にはなるべく大型で活発なトノサマガエルと、プライエル反射の鋭敏な体重300gm前後の成熟モルモットを用いた。動物を断頭してできるだけ速やかに鼓膜標本を作り、石膏に包埋固定して新鮮な状態で実験に供した。なお、レーザ光の反射を強くするために、鼓膜面に画材用銀泥を乾いた筆で撒布した。

実験にはヘリウムネオン・レーザを光源とするホ

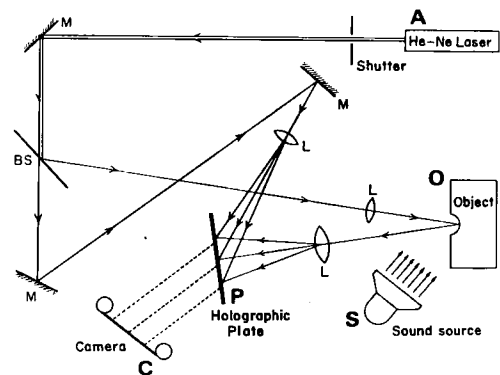


図 1. ホログラフィ記録および再生の説明図

ログラフィ記録装置を用いた（図1）。光源Aから出るレーザ光をBS（beam splitter）で2分し、一方（図中の細い線）は被写体Oに当てて反射させ（信号光 object beam）、他方（図中の太い線）は直接、写真乾板Pに当てる（参照光 reference beam）。この2つの光束は互いに干渉して、被写体の情報を写真乾板Pに記録する。これがホログラムである。

鼓膜の加振は図中Sに置いた音源により行った。用いた振動数は250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hzであり、70~110dBにわたって5 dB ステップで変化させた。音圧は鼓膜の位置においた指示騒音計の目盛りにより表示した。

撮影方法は、振動周期より充分長い露出時間をかける、時間平均法 time-averaged holography を用いた。得られたホログラムを図のPの位置におき、これを参照光で照らして見ると被写体のイメージが3次元的に再生せられ、振動体場合には振動面上に等振幅点を結んだ等高線状の明暗の干渉縞が現われる。この再生像をカメラCにより撮影した。

3. 実験結果

両動物とも約80dBで最初の干渉縞が現われ、音圧の増強につれて縞目の数の増加、すなわち振幅の増大を示した。この縞目の形、すなわち振動のパターンは振動数により一定で、高音になるほど複雑な形状となり、鼓膜の振動の複雑になることを示した(図3)。

図2はカエル右側鼓膜の振動パターンで、3kHz-105dB、および8kHz-105dBにおけるものである。3kHzでは、鼓膜は中心のコルメラ接着点をめぐって、上、後、下部にわたって振動し、前上部および後下部にそれぞれ振動のピークがあり、最大振幅点は後下方に存在し、8kHzになると振動のピークが4個になり、複雑な分割振動をしていることが容易に看取できる。また、両者の縞目の数を比較すると3kHzの方が遥かに多いことから、105dBの同一音圧における鼓膜の最大振幅値は3kHzの場合の方が8kHzにくらべて大きいことが理解できる。

図3はモルモット左側鼓膜の各振動数、各音圧における振動パターンを一覧表に示したものである。

4. 考 按

ホログラフィの原理は1948年に英国の Gabor, D.⁶⁾により案出され、その基礎実験が発表されたが、その後は理論的興味のみにとどまっていた。1950年代から始まったメーザ、レーザの研究が実用化されるようになり、1962年に米国の Leith, E. N. と Upa-

tnieks, J.⁵⁾がレーザを光源に用いてホログラフィをまったく新しい光学技術として完成させた。これは単一の光源から出る光を2つの光束に分け、一方は被写体に当てて反射させ、他方は直接、写真乾板に当て、両者を干渉させて被写体の映像を位相を含めて記録するもので、レーザ光の単色光性の強い、したがってコントラストの強い干渉縞を作る特性 (coherency) を応用して初めて技術的に実現されたのである。こうして得られたホログラムは被写体の映像の強度と位相を同時に記録した回折格子であるので、これを参照光で照らして見ると映像が3次的に再生せられる。

ホログラフィ干渉法は本技術の振動解析への応用でありストロボ法、時間平均法など数種の方法があるが、正弦振動を行う振動体の場合は時間平均法 (Powell, R. L. & Stetson, K. A.⁶⁾) が便利である。これは振動物体の個々のホログラムが連続的に重なったもので、この場合、振動の正および負の各変位の再生像の干渉により画像上に等振幅点の輪郭を示す輪状の干渉縞を生じ、ちょうど等高線を付けた地図のように見える。これによって地図を見るのと同じように複雑な振動の状態を観察できる。また、この各順位の干渉縞の示す振幅は使用光源の波長を基準とし、零次の Bessel 関数から算出せられる。ヘリウムネオン・レーザを用いた場合、その波長は $6328\text{\AA}$ であるのでその数値は表1ようになる。

1970年, Khanna, S. M. と Tonndorf, J.¹²⁾は本

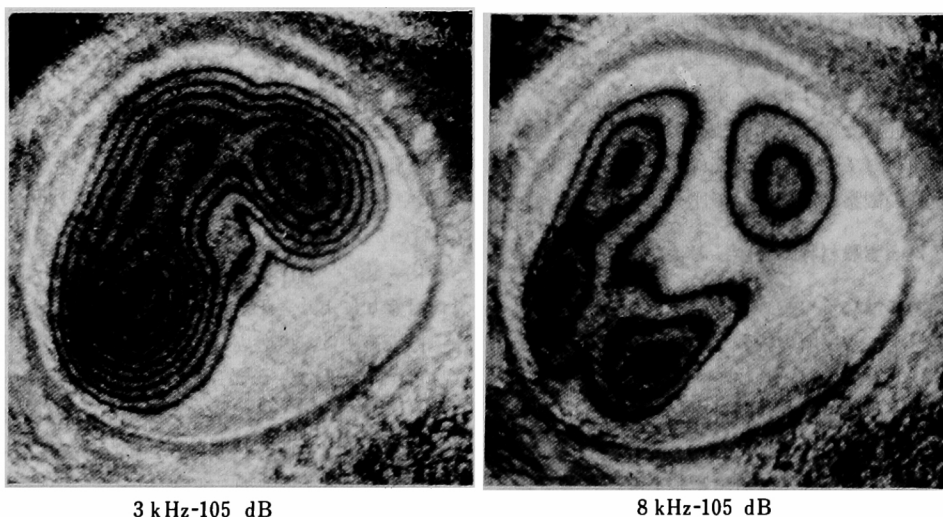


図 2. カエル鼓膜(右側)の振動パターン

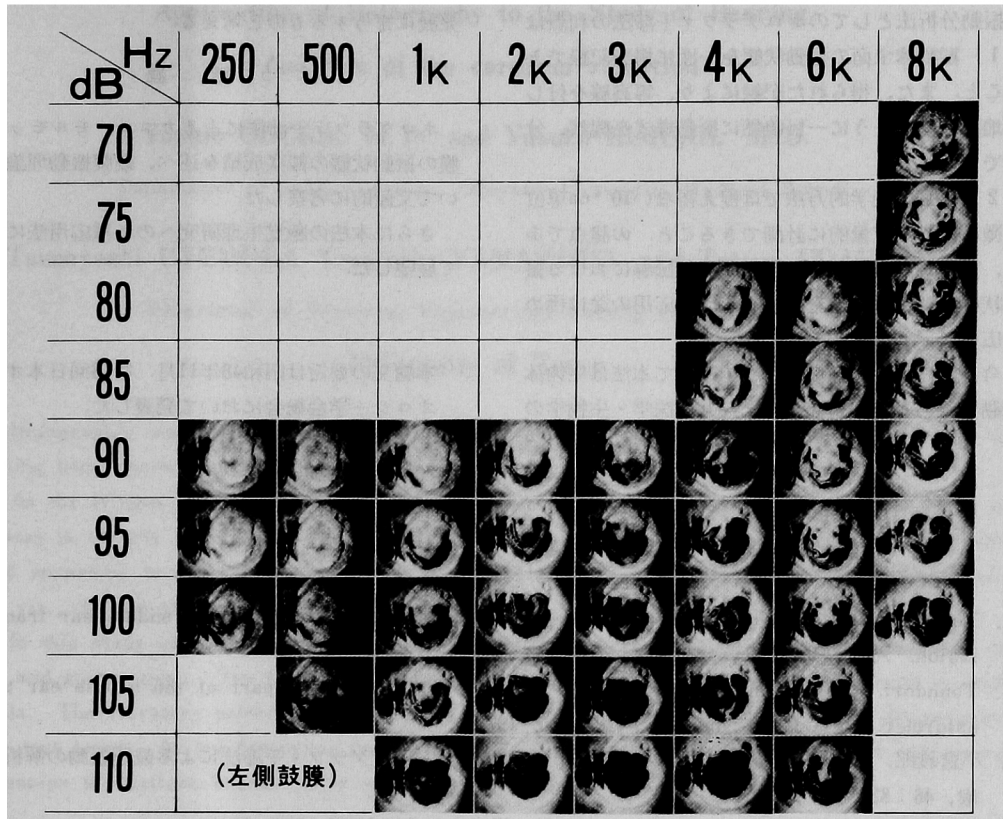


図 3. モルモット鼓膜の各振動数, 各音圧レベルにおける振動パターン

表 1. 干渉縞各順位の示す振幅

黒の干渉縞	振 幅
No. 1	$1.211 \times 10^{-6} \text{ cm}$
2	2.779
3	4.355
4	5.936
5	7.517
6	9.098
7	10.679
8	12.260
9	13.843
10	15.424

法を用いてネコ鼓膜の振動状態の詳細な観察成績を報告した。従来, 鼓膜の振動理論に関しては1世紀前より Helmholtz⁷⁾ に提唱せられた curved membrane principle がある。ツチ骨柄の長軸を横切る断面において鼓膜はツチ骨柄と鼓膜輪の間にゆるく張られた網のように凹陷した曲線状に変位して音圧を受ける。その弯曲の度合はツチ骨先端 (臍 umbo) に近づ

くほど強くなり, 音圧のツチ骨柄に加える力を減弱させてツチ骨柄上の各点における耳小骨回転軸へのテコ作用を等しくすることにより理想的な伝音作用を行うというものである。下って Békésy⁸⁾ は静電容量法 capacitive probe を用いてヒト鼓膜の振動を調べ, 2000 Hz 以下の振動数では鼓膜は耳小骨回転軸に対して螺旋運動をする固い板 stiff plate として振動すると述べた。これ以後 Békésy の説が学界に受けいれられていたが, 1960年, 切替⁹⁾ は800 Hz で加振したヒト鼓膜をストロボスコープで撮影し, 鼓膜前部および後部の各中心点が鼓膜柄より大きい振幅を有すること, また後部の振幅が前部より大きいことを示し, Békésy 説との相違を示唆した。Khanna-Tonndorf のホログラフィ干渉法による鼓膜振動モードは明らかに切替の観察, したがって Helmholtz の curved membrane 説に近く, Békésy の所見と矛盾しており, われわれの同法によるモルモット鼓膜の観察においても Khanna-Tonndorf と同じ成績が得られた。

振動分析法としてのホログラフィ干渉法の利点は

1) 振動体全面の振動状態を一度に撮影記録できること。また、得られた記録により、等高線を付した地図を見るように一目瞭然に振動様式を観察、分析できること。

2) 従来の光学的方法では捉え得ない 10^{-5} cm単位の微小振動を定量的に計測できること。の諸点であり、鼓膜・耳小骨・内耳伝音系や骨伝導における振動状態の解明など聴覚生理研究への応用の途は極めて広い。

今後の技術的な進歩改良と相まって本法は生物体振動現象の有力な研究手段となり、医学・生物学の

発展に寄与するものとする。

5. 結 語

ホログラフィ干渉法によるカエル、モルモット鼓膜の振動状態の観察成績を述べ、鼓膜振動理論について文献的に考察した。

さらに本法の聴覚生理研究への各種応用法について展望した。

本論文の要旨は昭和48年11月、第18回日本オロジー学会総会において発表した。

文 献

1. Tonndorf, J., and Khanna, S. M. : The role of the tympanic membrane in middle ear transmission. *Ann. Oto-Laryngol.*, **79** : 743-753, 1970.
2. Tonndorf, J., and Khanna, S. M. : The tympanic membrane as a part of the middle ear transformer. *Acta Otolaryng.*, **71** : 177-180, 1971.
3. 小倉義郎, 木村雄介, 植村恒義, 山本芳孝, 宇田川哲夫 : ホログラフィ干渉法による鼓膜振動の解析. *耳喉*, **46** : 83-88, 1974.
4. Gabor, D. : A new microscopic principle. *Nature*, **161** : 777-778, 1948.
5. Leith, E. N., and Upatnieks, J. : Reconstructed wavefronts and communication theory. *J. Opt. Soc. Amer.*, **52** : 1123-1130, 1962.
6. Powell, R. L., and Stetson, K. A. : Interferometric vibrations analysis by wave front reconstruction. *J. Opt. Soc. Amer.*, **55** : 1593-1598, 1965.
7. Helmholtz, H. L. F. : Die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells. *Pflügers. Arch. f. d. ges. Physiol.*, **1** : 1-60, 1868.
8. Békésy, G. von : Experiments in Hearing. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, p. 101-102, 1960.
9. Kirikae, I. : The structure and function of the middle ear. Tokyo Univ. Press, Tokyo, 1960.

Application of Holography to the Study of Hearing

—Analysis of the eardrum vibration—

Yoshio OGURA, M. D. and Yusuke KIMURA, M. D.

Department of Otolaryngology, Okayama University Medical School

Tsuneyoshi UYEMURA, Yoshitaka YAMAMOTO, and Tetsuo UDAGAWA

Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering

University of Tokyo

Holographic interferometry is a specific technique for the analysis of vibration. Images of vibrating body reconstructed with this method are superimposed by interference fringes.

As the fringes represent iso-amplitude contours like those on geodesic maps, the mode of vibration is clearly discernible at a glance. As the amplitudes relating to each fringe are calibrated according to the wavelength of the laserlight the value is most precise and submicroscopic, viz., 10^{-5} cm order.

In this study eardrum vibrations are investigated by means of time-averaged holography on frogs and guinea-pigs. The first fringe appeared at about 80 dB sound pressure level in both animals. The vibratory pattern appeared to be constant depending upon the number of frequencies of the test tones. At low frequency the eardrum showed rather a simple pattern; with increasing frequencies the pattern became more complicated containing two or more mounds.