ホログラフィ干渉法による頭蓋骨振動様式の研究

岡山大学医学部耳鼻咽喉科学教室

小倉義郎, 増田 游, 三木正己, 柴田四郎

東京大学工学部精密機械工学科

植村恒義, 山本芳孝

緒 言

骨導聴力の成立機序の研究に関して、可聴周波数におけるヒト頭蓋骨の振動様式の解明は極めて重要である。この頭蓋骨振動の研究については、従来より諸家による種々の方法が発表されているが、その代表的なものは切替¹⁾の論文である。切替は、各種の可聴周波数の音源により頭蓋骨を加振し、ピックアップを用いて頭蓋骨各点における振動の大きさ、方向および位相の関係を測定した。われわれは、この問題をさらに詳細に解明するため、ヒト乾燥頭蓋骨を振動させて、各固有振動数(共振周波数)における頭蓋骨振動様式を、ホログラフィ干渉法²⁾³⁾により記録、再生して、頭蓋骨振動様式の観察、分析を行った。

実験材料、装置および方法

漂白ヒト頭蓋骨3個を用いた。それぞれの重量は、495グラム、575グラム、442グラムであり、大きさは、

前後径各、16.5 cm, 17.0 cm, 16.7 cm, 上下径各、13.7 cm, 14.5 cm, 13.5 cm, であった。頭蓋骨の固定は大後頭孔を通した硬質ゴム、ダンパー、アルミ合金の支持台によって三点支持を行い、マグネットスタンドで定盤に固定した。

加振方法は、臨床的骨導聴力検査の方法に準じて頭蓋骨の右側乳突部にリオン製 BR-40 骨導端子を 200 グラム重の力で圧抵し加振した。加振装置としては、Function generator FG-121, サンスイ製増幅器 BA-100 を使い、回路は図1のとおりである。この装置により、ヒト頭蓋骨を振動させ、チタン酸バリウムピックアップで、オッシロスコープを通してモニターを行い、3個の頭蓋骨について固有振動数(共振周波数)を求めた。そして、各共振周波数における振動様式を、波長 6328 Å のヘリウムネオン・ガスレーザー光源を用い、ホログラフィ干渉法の時間平均法で写真記録を行った(図2)。なお、各頭蓋骨で縫合部を未処理のままとした自然状態と、縫合部をアロンアルファで充填し頭蓋骨全体ができるだけ1体として振動するようにした状態で比較した。

F.G.: Function generator FG-121
A: Amplifier BA-100
O: Synchroscope SS-5100
S: Skull bone
V: Vibrator RION BR-40
P: Pick-up

図1 頭蓋骨加振装置図

L: Laser
B.S: Beam Splitter
M: Mirror
O: Object
H: Holographic plate
C: Camera
→: Signal Beam
---: Reference Beam

図2 ホログラフィ光路図

実 験 成 績

1. ヒト頭蓋骨の固有振動数

チタン酸バリウムピックアップにより漂白ヒト頭蓋骨の固有振動数（共振周波数）の計測を試みると、縫合部未充填頭蓋骨では、頭蓋を形成する各骨が、個々に各様の振動をしているようであり、側頭面では、側頭骨のみで振動し、隣接骨との縫合部で振動は完全に遮断され、他の骨は別個の振動をしており頭蓋骨一体としての厳密な固有振動数の数値が得られないことがわかった。これをホログラフィで撮影すると、写真1のように振動の断裂、遮断されている状態がよく了解される。

アロンアルファーによる縫合部充填頭蓋骨においては、頭蓋骨はほぼ一体となって振動した。最初の固有振動数は、3個の頭蓋骨においてそれぞれ、2,070 Hz, 1,720 Hz, 1,800 Hz であった。他の高次の固有振動数は、2,850, 4,000, 4,700 Hz; 2,380, 2,890, 3,100 Hz; 2,320, 3,100, 3,900 Hz などであり、それぞれの値は表1のとおりであった。

2. ヒト頭蓋骨の振動様式

縫合部充填頭蓋骨の各固有振動数（共振周波数）の音源による加振時の振動様式は各標本とも加振側側頭

写真1 未充填頭蓋骨の振動パターン（標本Ⅱ）
右側加振，左側より撮影

表1 ヒト充填頭蓋骨固有振動数

標本	固 有 振 動 数 Hz			
	1 次	2 次	3 次	4 次
I	2,070	2,850	4,000	4,700
Ⅱ	1,720	2,380	2,890	3,100
Ⅲ	1,800	2,320	3,100	3,900

部に最大振幅点があり、正中位に近づくとともに振幅は小さくなり、反対側側頭部に、もうひとつの大振幅点が認められるのが共通の所見であった。

写真2は、標本Iをその第一次固有振動数2,070 Hz、骨導端子からの音圧（正常耳の感覚レベル、以下同様）70dBで加振した時のホログラム再生写真で、加振側（写真2-a）および反対側（写真2-b）にほぼ同程度の振動が認められる。同じ標本において、第二次固有振動数2,850 Hz、65 dBの音による加振の場合は加振側頭蓋骨板の振動（写真3-a）に比べ、反対側頭蓋骨板の振動（写真3-b）は極めて小であった。

また、注目すべき所見は、400 Hz、100 Hz の、500 Hz 以下の低周波帯域音で加振した際にも、頭蓋骨面に局在する振動パターンが認められたことで、この所見は従来慣性骨導のみよりなると考えられていた低周波帯域においても、圧縮骨導成分の存在することを示唆するものである。写真4は100 Hzにおける充填頭蓋骨の振動パターンを示した。

写真2-a 充填頭蓋骨，2,070 Hz 第1共振周波数，70 dB 加振時の振動パターン（標本I）
右側加振，加振側より撮影

写真2-b 右側加振，反対側より撮影
（その他の条件は2-aに同じ）

写真 3-a 充填頭蓋骨, 2,850 Hz 第 2 共振周波数, 65 dB 加振時の振動パターン(標本 I)
右側加振, 加振側より撮影

写真 3-b 右側加振, 反対側より撮影
(その他の条件は 3-a に同じ)

写真 4 充填頭蓋骨, 100 Hz における振動パターン(標本 I)
右側加振, 加振側より撮影

考 按

現在, 骨導聴力成立機序に関して 2 種の説があるが, 低音域においては, 慣性骨導が主役をなし, 高音域においては, 慣性骨導に加えるに圧縮骨導が働いて骨導聴力が成立すると広く信じられている。Runge は低音域においては鼓室小骨を介して骨導がおこり, 骨導音は

純骨導音伝導路および骨鼓室伝導路の 2 つの経路によって伝わり, 高音域では純骨導が優勢であると述べている。Herzog and Krainz は頭蓋骨と耳小骨の振動のズレと頭蓋に作用する振動による蝸牛の圧縮, 拡大による 2 者によって骨導が成立すると述べている。Bárány も前者の詳細な実験を行っている。また Békésy は, 低周波においては, 頭蓋は平行運動をしており, 頭蓋と耳小骨に振動の位相差がおこり, 1,500 Hz 以上では頭蓋はいくつかの部分に分かれて振動し蝸牛の圧縮をおこし聴覚が生ずるとしている。わが国では切替りの鼓膜, 中耳伝音系についての膨大な研究がある。切替は, そのなかの骨導に関する基礎研究において, 頭蓋の振動について述べており, 要約してみると, 頭蓋の固有振動数は, いろいろの条件で測定し 1,800 Hz であるとしている。また, 頭蓋の振動様式については, 250 Hz 以下では全体として平行運動を行い, 500 Hz においては加振部位を中心とした一体の円形節線があらわれ, それを境に逆位相で振動していると述べており, 骨導聴力成立の機序として Bárány, Békésy らと同様, 低周波帯域では頭蓋は近似的に mass movement を行い, 中耳伝音系の慣性が振動方向によって大きな意義をもち, 高周波帯域では頭蓋各部の変形が生じた圧縮骨導が起てることが考えられると述べている。図 3 は 1,800 Hz における頭蓋振動時の節線位置を示している。

以上のごとく諸家によって種々な方法で研究がなされているが, 従来の方法は, 振動測定に際しピックアップなどにより頭蓋骨の一点づつよりの情報を総合集計して全体の振動様式を想定したものであり, 装置のチャンネル数にも限界があるため振動面全体にわたっての振動状態を調べるのは容易ではない。また, これらの方法は振動体に接触して計測を行うため, 測定素子の質量の振動状態への影響も無視できない場合もある訳である。これに対し, ホログラフィ干渉法は, 特殊な光学的振動計測法であって, 非接触で, 複雑な振動体のあらゆる点よりの情報をも簡単かつ精度よく 1 つの画面に描き出されるという利点があり, われわれは今までに, ヒトおよび各動物の鼓膜の振動様式の研究に応用してきた⁴⁾⁵⁾。

ヒト頭蓋骨の振動様式について, われわれは漂白頭蓋骨を用いたが, 自然のままの頭蓋骨では縫合部で振動が遮断され, 各頭骨が個々に振動していることが本実験でわかったので, アロンアルファを用いて縫合部を充填し頭蓋骨が一体として振動するようにして実験

図 3 頭蓋骨の固有振動数 (1,800 Hz) における振動様式 (切替より)

を進めた。縫合部充填頭蓋骨の最初の固有振動数は、われわれの実験では、1,700 Hz から 2,100 Hz にあった。切替は、漂白頭蓋骨、頭皮が付着した頭蓋骨、あるいはこれら標本の頭蓋腔内に充填を行ったりして、さまざまな条件で実験しているが、最初の固有振動数は各条件にかかわらず 1,700 Hz から 1,800 Hz にあると述べている。われわれの実験は縫合部をアロンアルファで充填しており、また頭蓋腔内が空虚の状態であり、生体とはかなり条件が異なっているが、頭蓋骨全体としての最初の固有振動数は、頭蓋の大きさ、重量との相関は不明であるが、1,700 Hz から 2,100 Hz の間に存在するものと考えられ、ほぼ切替の値と一致した (表 1)。頭蓋骨の振動様式を各固有振動数 (共振周波数) について調べた結果は、加振側側頭部、反対側側頭部に大振幅点を持ち、2 本の円形節線をもつような正弦振動をしていると考えた。この点についても切替の結果とはほぼ一致している (表 3)。

ホログラフィの原理および振動の撮影記録法については既報の論文⁴⁾⁵⁾で述べたので省略するが、ここに掲載した写真 1～4 にみるようにホログラフィの再生像に現われた縞の形状および数によって振動様式、振幅などが、ちょうど等高線を付した地図を見るように直感的に観察できることは本法の最も優れた点といえる。これら頭蓋骨面に認められる縞目は、ふつうの写真像として写っている頭蓋骨周辺部に対する歪振動のパターンを示しているの、この所見は従来唱えられた圧縮骨導の存在を画像的に証明したものである。とくに、写真 4 における干涉縞の所見は、従来、慣性骨導成分のみと考えられた低音域における圧縮骨導の存在の可能性を示唆するものとして極めて興味深いものである。

ただ、付記したいのは、われわれの用いた時間平均

法は基準の位置に対する相対運動としての振動現象のみしか捉え得ないので頭蓋骨全体の mass movement すなわち、慣性骨導成分の研究に対しては不適當である。従って、これに対しては、ストロボ法その他の方法を採用する必要がある。

結 語

聴覚生理研究へのホログラフィ干渉法の応用の一環として、骨導聴力の成立機序に重要なヒト頭蓋骨の振動様式について実験を行い次の結果をえた。

- 1) アロンアルファによる縫合部充填頭蓋骨において、固有振動数をもとめ、約 1,800 Hz を最初とした 4 つの固有振動数帯をえた。
- 2) 各固有振動数における振動様式は、両側側頭部に大振幅点をもつ、正弦振動をしめした。
- 3) 低周波音域における圧縮骨導の存在が考えられた。

本論文の要旨は昭和 50 年 11 月 8 日第 20 回日本オーロロジー学会総会において発表した。

A Holographic Study of the Human Skull Vibration

Yoshio Ogura, Yu Masuda, Masami Miki,
and Shiro Shibata

Department of Otolaryngology,
Okayama University Medical School

Tsuneyoshi Uyemura and Yoshitaka Yamamoto
Department of Precision Engineering, Faculty
of Engineering, University of Tokyo

Vibration mode of the human skull was studied by means of holographic interferometry. Three dry human skulls were vibrated with generated bone-conduction receiver for several test frequencies within audible range.

After assessing resonance frequencies on each skull, holograms of the vibrating skull were recorded and reconstructed in each resonance frequency principally.

Vibration of the skull was clearly discernible not only at the vibrated temporal surface but also the opposite side.

Noteworthy findings were vibration fringes on the temporal surface observed at the test frequencies

of 400 Hz and 100 Hz, suggesting a possible component of compression bone-conduction at such low frequency ranges.

文 献

- 1) 切替一郎: 伝音機構と骨導に関する基礎的研究.
日耳鼻, 60; 1786-1795, 1957.
- 2) Tonndorf, J., & Khanna, S.M.: The role of the tympanic membrane in middle ear transmission, *Ann. Otol.*, 79; 743-753, 1970.
- 3) Tonndorf, J., & Khanna, S.M.: The tympanic membrane as a part of the middle ear transformer. *Acta Otolaryng.*, 71; 177-180, 1971.
- 4) 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*, 48; 83-88, 1974.
- 5) 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の聴覚生理研究への応用. *岡山医誌*, 86; 215-219, 1974.

(受付 51. 1. 26)