

# ホログラフィ干渉法による乳児頭蓋骨の振動解析の実験的研究

岡山大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：小倉義郎教授）

武 田 恒 雄

（昭和60年8月27日受稿）

Key words : vibration analysis. infant skull. holography.  
bone-conduction hearing.

## 緒 言

骨導聴力 bone-conduction hearing の成立機序に関して可聴音域振動数の各試験音によるヒト頭蓋骨の振動様式の解明は、極めて重要な研究課題である。骨導聴力の理論的研究は、19世紀末から始められたが現在代表的なものは、Békésy, Bárány, 切替らの論文である。切替は各可聴音域振動数の音で頭蓋骨を加振しピックアップ法により頭蓋骨表面の各点の振動の大きさ、方向、位相を測り振動図形を作成した。小倉(1976)<sup>1)</sup>三木(1980)<sup>2)</sup>らは、最新の光学技術ホログラフィの応用である微小振動解析法、ホログラフィ干渉法 holographic interferometry により成人頭蓋骨の振動様式の観察を報告したが、今回著者は、本法を用いて乳児頭蓋骨の振動解析実験を行ったので、その結果を報告する。

## 実験材料及び実験方法

### 1) 実験材料

漂白乾燥した乳児頭蓋骨3個を用いた。各標本の諸元は表1の通りである。乳児の頭蓋骨は成人に比べて各頭骨が菲薄で縫合も不完全であり、前頭部・後頭部など各頭骨の接合部に大小の泉門 fonticulus が開いている。そのため実験に用いたものは各頭骨の接合部、泉門などを薄い接着テープにて補強し形態を保持した。写真1に生後6ヵ月の乳児頭蓋骨(標本I)を示す。このように強度の問題があるため乳児頭蓋骨では成人の場合のように骨導受話器を側頭骨乳様

標本番号	月齢(M)	重量(g)	サイズ(mm)	
			前後径	左右径
I	6	39.8	88	74
II	8	37.0	96	92
III	8	38.5	94	88

表1 実験材料乳児頭蓋骨の諸元



写真1. 乳児頭蓋骨(標本I, 生後6ヵ月)

突起部に圧抵すると破壊するおそれがあるため、加振は音響スピーカーを用い自由音場で行った。

### 2) 実験方法

頭蓋骨標本の固定は、成人頭蓋骨の場合と同じく大後頭孔縁を内外よりダンパーで支えてボルトで支持し、マグネットスタンドで定盤に固

定した。加振音は Function Generator FG-121, サンスイ製アンプリファイヤー BA-100 で発振・増幅させた正弦波を音響スピーカー Fostex FE 103 で空気振動に変換させた。乳児頭蓋骨の自由音場内での加振の状況を写真 2 に示す。音圧の測定はリオン製騒音計 NA-09 型の C 特性を用いて行い、頭蓋骨のスピーカーに最も近い位置の値を加振音の音圧レベルとした。振動観察用のホログラフィ記録・再生装置にはヘリウムネオンレーザ光源を用いた。又、ホログラフィ記録にはホログラフィ干渉法の一法である時間平均法 time-averaged holography を用いた。

ホログラフィ干渉法による振動計測は、ホログラム再生像上に現われた、地図の等高線状の明暗の干渉縞を観察することによって行われるが、この干渉縞の各順位の振幅は、光源に用いられたレーザ光の波長を基準にして  $10^{-5}$  cm レベルの精確さで算出される。ヘリウムネオンレーザ光を用いた場合の各干渉縞の示す振幅値を表 2 に示す。

自由音場での頭蓋骨の振動が音源の位置に影響されるか否かを調べるために音源を頭蓋骨標本の両側方、及び後方に置いて振動パターンを比較した。両側方というのはホログラフィ撮影の同側、及び反対側の側頭骨骨面を指す。本実験の模式図を図 1 に示す。

干渉縞の順位      振 幅  $10^{-5}$  c m

B は明

D は暗

1 B	0.0
1 D	1.211
2 B	1.928
2 D	2.779
3 B	3.532
3 D	4.355
4 B	5.132
4 D	5.936
5 B	6.709
5 D	7.517
6 B	8.239
6 D	9.098
7 B	9.878
7 D	10.679
8 B	11.459
8 D	12.260
9 B	13.040
9 D	13.483
10 B	14.627
10 D	15.424

表 2 ホログラム再生像の干渉縞の順位と振幅値  
(ヘリウムネオンレーザ、波長 632.8 nm)

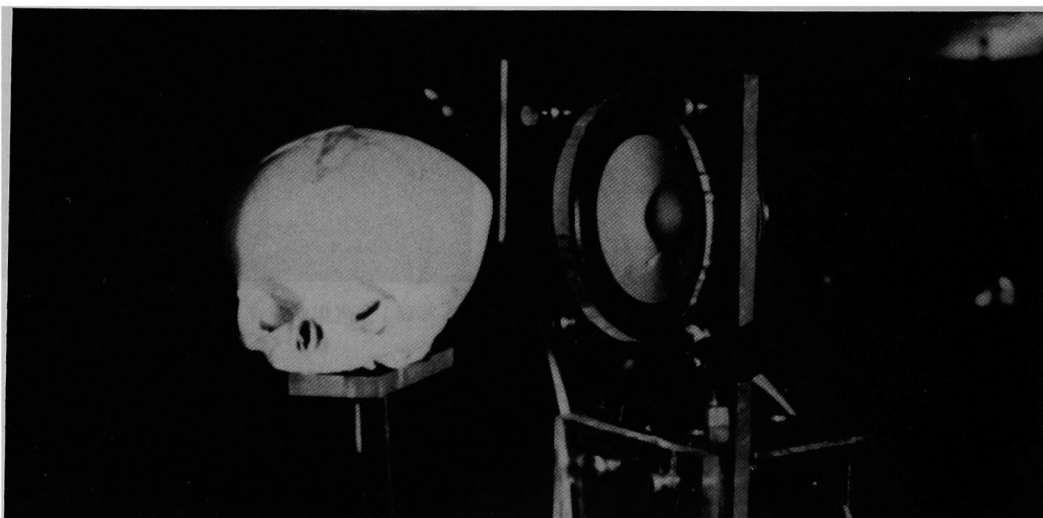


写真 2 乳児頭蓋骨の加振

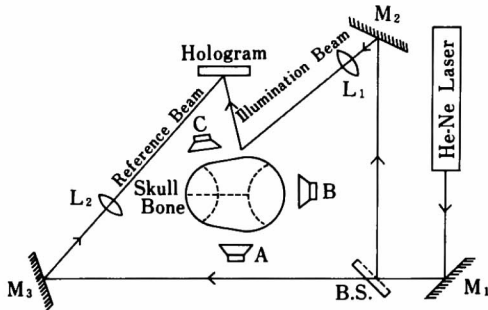


図1. ホログラフィによる乳児頭蓋骨振動解析実験模式図

- A. B. C. 音響スピーカー
- B. S. ビームスプリッター
- M<sub>1</sub>. M<sub>2</sub>. M<sub>3</sub>. 反射鏡
- L<sub>1</sub>. L<sub>2</sub>. レンズ

実験結果

頭蓋骨後方(ホログラム撮影方向に対して90度の方向), 及び側方(撮影方向に向かって頭蓋骨の反対方向)より加振した際のそれぞれの振動パタンの比較を写真3に示す。標本は6ヵ月乳児頭蓋骨(標本I)で, 加振音は2 kHz-120 phonである。写真から分かるように音源の位置は振動様式に大きな影響を持たないと思われる。以上の結果から, 音源を頭蓋骨の側面(ホログ

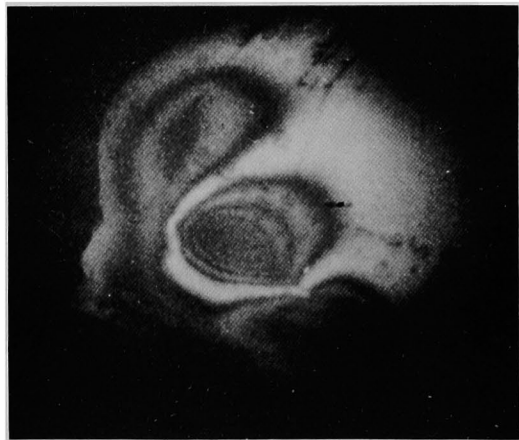
ラム撮影面の反対側)に置いて爾後の実験を行った。

使用した加振音は500, 1,000, 2,000, 3,000, 4,000各 Hz で, 干渉縞は110 phonの音圧で初めて現われた。写真4は, 8ヵ月の乳児頭蓋骨の振動パターンであり, 写真5は, 6ヵ月乳児頭蓋骨の3,000 Hz-110 phon, 及び120 phonの振動パターンである。乳児頭蓋骨において局所的な骨壁の変位を示す同心円状の干渉縞は1,000 Hz以上の振動数において見られ, 500 Hzでは平行線状の干渉縞が観察された。この結果から, 500 Hzでは支持部を支点とする頭蓋骨一体としての振動を行っており, 1,000 Hz以上では両側側頭面に最大変位を持つ局所的な骨壁の振動を行っていると考えられる。振動パターンは加振音の振動数により特有の形を示し, 音圧の増減は干渉縞の数を変化させるのみで振動パタンの形状には影響を持たなかった。

図2は6ヵ月乳児頭蓋骨の加振音振動数一振幅曲線で縦軸の振幅は干渉縞の順位で表わされている。横軸は加振音振動数 kHz である。音圧音圧110 phon, 120 phonともに3 kHzで最大値を示しており, ほぼこの付近が固有振動数であると思われる。その振動の値は表2から算出せられ3 kHz-120 phonの最大振幅値は $15.424 \times 10^{-5} \text{ cm}$ , 同じく110 phonでは $4.355 \times 10^{-5} \text{ cm}$ であった。



側方加振



後方加振

写真3 加振2方向における乳児頭蓋骨振動パタンの比較

(標本I 6ヵ月乳児頭蓋骨 2 kHz-120 phon)

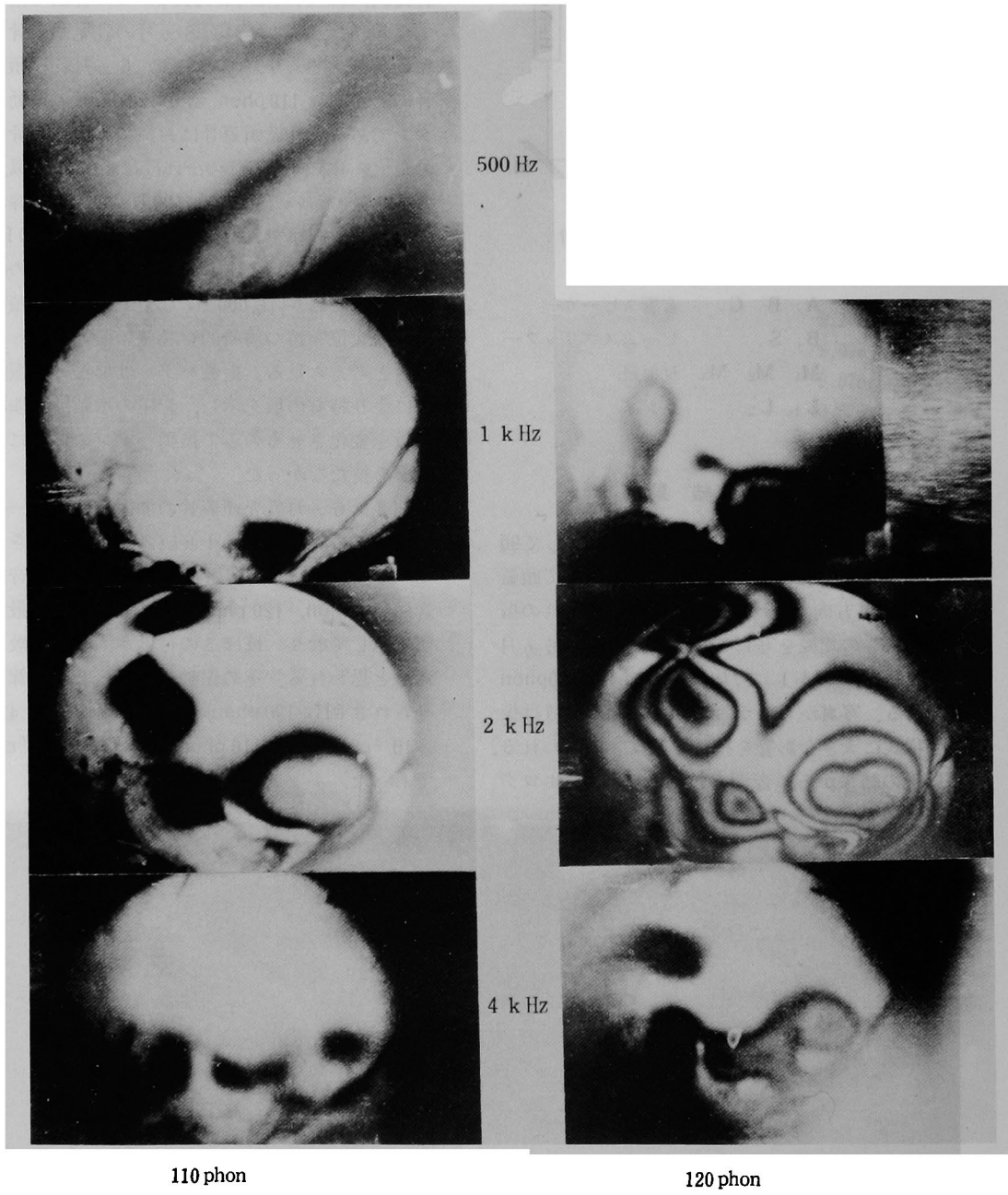
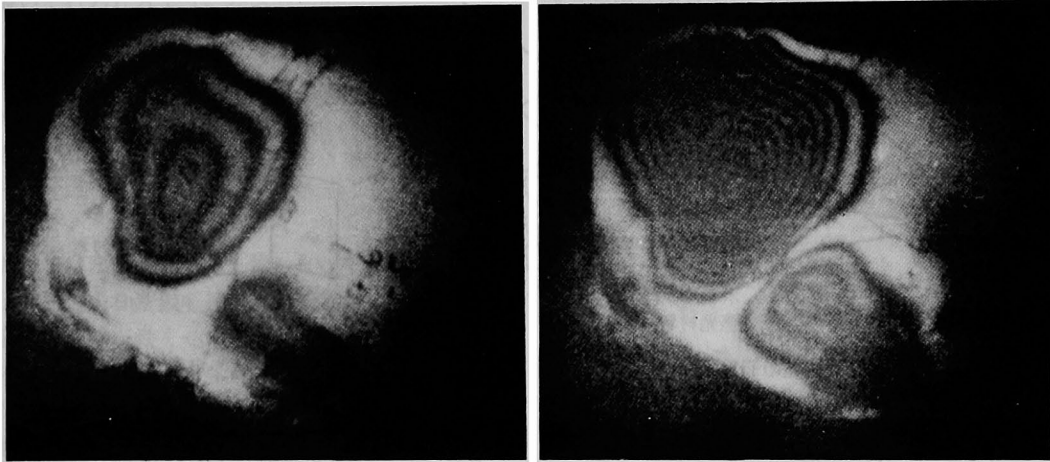


写真4. 8ヵ月乳児頭蓋骨の振動パターン一覧



3 kHz-110 phon

3 kHz-120 phon

写真5. 6ヵ月乳児頭蓋骨の振動パターン

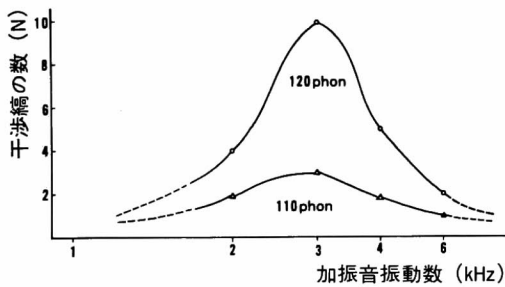


図2 乳児頭蓋骨の加振音振動数—振幅曲線  
(標本I, 6ヵ月乳児頭蓋骨)

考 按

ホログラフィは光波の振幅と同時に位相の情報をも併せて記録する新しい光学技術であり、その原理は1948年英国のGabor<sup>3)</sup>が新しい顕微鏡の技術としてその基礎実験を発表した。1962年米国のLeith-Upatnieks<sup>4)</sup>はレーザ光の単色光性(コーヒーレンス coherence)に着目し、これを応用してホログラフィを技術的に実用化した。以後この技術はめざましい発展をとげ、今日では影像の立体化、情報処理、記録等の各分野で応用されている。ホログラフィ干渉法はホログラフィの振動計測への一応用法であり、理工学全領域にわたって振動の精密測定に用いら

れている。医学・生物学の分野では1970年、1971年 Tonndorf-Khanna<sup>5),6)</sup>がホログラフィ干渉法により実験動物の鼓膜振動の観察を行い報告した。また本邦では、小倉ら<sup>1),7),8)</sup>がホログラフィ干渉法の時間平均法を用いてカエル、ヒト鼓膜の振動を観察し報告した。また同法を用いて耳小骨の振動観察についてGundersen<sup>9)</sup>らがツチ骨、キヌタ骨の振動の観察、分析を報告している。頭蓋骨の振動様式については小倉、三木<sup>1),2)</sup>が成人乾燥頭蓋骨を用いて分析を行った。

ホログラフィの原理<sup>10)</sup>は、「光の波面を再生する新しい写真技術」である。ホログラフィの記録再生過程は図3—(1)に示すようにレーザ光で物体を照射し、物体によりその振幅と位相の変調を受けた光(これを物体光 object beam という)とともに、同じレーザ光源から物体を照射せずに直接ホログラム用感光材料に到達する光(これを参照光 reference beam という)を同時に与え、物体光と参照光により形成される干渉縞の強度を感光材料に記録する。このようにして得られた干渉縞の記録、すなわちホログラムを現像したのち図3—(2)のようにもとの位置においてホログラム記録の際に用いた参照光と同等の光(これを再生参照光又は再生照明光という)を照射すると、さきに記録した物体光の波面と同じ振幅と位相をもつ光波が再生され、もとの物体

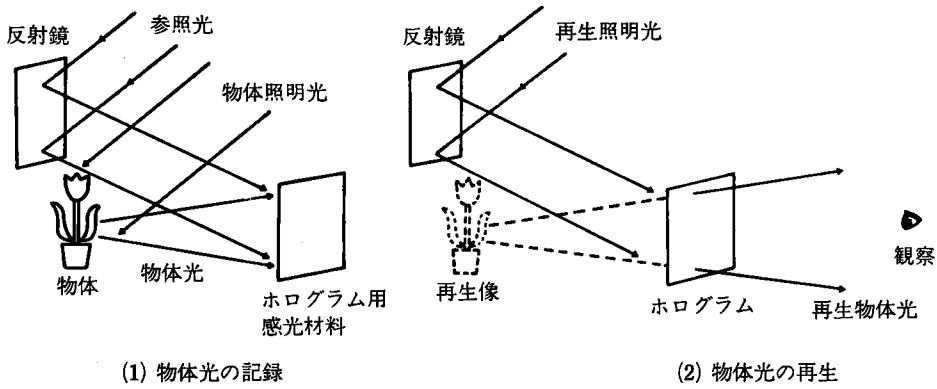


図3 ホログラフィの原理<sup>10)</sup>

の影響が三次元的に観察される。

ホログラフィ干渉法<sup>11)</sup>は、振動物体をホログラフィで撮影記録するもので、再生像に等振幅点を表わす干渉縞が表われるので振動物体の形状を問わず、振動様式がちょうど等高線を付した地図を見るように観察でき、また各点の振幅は干渉縞の数を読むことによりレーザー光の波長を基にして精確に計算することができる(表2)。ホログラフィ干渉法には、時間平均法、実時間法、ダブルパルス法など数種の方法があるが、著者が用いた時間平均法は、振動物体を連続的にレーザー光で照射しその振動周期に比し十分長い露出時間をかけホログラムに記録する方法である。この場合物体光の参照光に対する位相差は振動とともに変化するので各時点における干渉縞が時間的に平均化されてホログラムに記録される。そして振動振幅が大きくなるに従って明暗をくり返しながらか明さを減少する干渉縞が観察される。

骨導聴覚 bone-conduction hearing について最初に理論的考察を行った Bezold は、「耳小骨と内耳液の振子様の運動」が無ければ音覚は生じない、すなわち「頭蓋—鼓室」型の骨導理論を主張した。Bezold(1885)のあと Runge(1925)もまた「耳小骨の相対運動のみが蝸牛を刺激する」という見解を持ち、低音域では Bezold のいう骨—鼓室伝導路で骨導音が聴取されるとしているが、同時に高音域では骨質を経由して、直接、内耳に達する純骨導の成分のあることも是認していた<sup>12)</sup>。

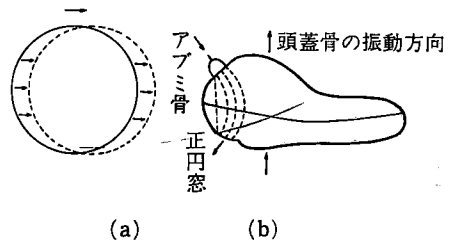


図4. 慣性骨導における頭蓋骨振動(a)と内耳の振動(b)<sup>14)</sup>

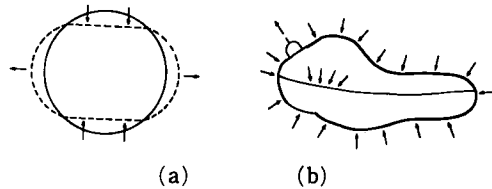


図5. 圧縮骨導における頭蓋骨振動(a)と内耳の振動(b)<sup>14)</sup>

Herzog-Krainz(1926)は側頭骨の錐体部と耳小骨にそれぞれ小鏡を貼りつけて振動を光学的に計測し、骨導聴覚は頭蓋骨の振動と耳小骨の振動との間の位相の遅れ—骨・鼓室伝導—と、蝸牛を交互に圧縮・拡張させて内耳の基底膜を振動させる頭蓋骨の振動—圧縮骨導—の2成分によると唱えた。これが現在の慣性骨導 inertia bone conduction と、圧縮骨導 compression bone conduction の2元説の始まりである(図4, 図5)この二つの骨導聴覚成立機序に関して、新しい理学機器による頭蓋骨の振動の研究は引き

続いて行われるようになった<sup>13),14)</sup>。

Békésy(1932)<sup>15)</sup>は頭蓋骨を種々の振動数の検査音で振動させ、低音域と高音域とでは振動様式が異なることを見いだした。すなわち200 Hzと800 Hzでは全体が一体となって振動し、1,600 Hzでは頭蓋骨の各点によって振動状態が異なり頭蓋骨の歪みが生じている。つまり、低音域においては頭蓋骨は歪みを伴わない平行運動をし、伝音系の主な質量を持つ耳小骨は慣性により頭蓋骨と同じ振動をせず両者間に位相差を生じ、その相對運動のため耳小骨が内耳液を動かして気導音の場合と同じ機序で聴覚が起こる。また、高音域では頭蓋骨壁に分割振動が起こり、その変形、弯曲のために蝸牛が圧縮・拡張されて、両内耳窓の弾性の差により基底膜の変形を生じて音覚が起こるとした。Bárány(1938)<sup>13)</sup>は435 Hzの加振音で頭蓋骨は平行運動を行うと述べ、この音域での慣性骨導の存在を示唆した。一方Guild(1936)<sup>16)</sup>は臨床的、及び病理組織学的觀察から骨導音は側頭骨乳様突起の含気蜂巢部に存在する subaditus trabeculae を伝わるという特異的な伝導路について述べている。

切替(1957)<sup>12)</sup>はピックアップ法による頭蓋骨の固有振動数の計測と各振動数の加振音による頭蓋骨振動様式の觀察、光弾性による振動時の頭蓋骨模型の応力解析などの諸法を用いて研究を行い、骨導聴覚に関して、低音域では伝音系の慣性、すなわち、慣性骨導が重要な役割りを演じ、高音域における頭蓋骨の振動様式や、光弾性実験に見られる蝸牛部の圧縮・伸展の所見などから、高音域の圧縮骨導の関与を考察した。

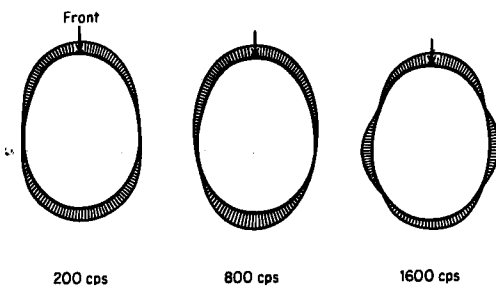


図6. Békésyの頭蓋骨振動様式模式図<sup>15)</sup>

頭蓋骨の振動様式について Békésy は図6の

ような模式図を示し、800 Hzまでの低音域では、頭蓋骨全体が一体となって振動しているが、1,600 Hzでは頭蓋骨の半分が或る方向に動くとき、他の半分はその反対の方向に動くときと述べた。また、頭蓋骨に当たった骨導音源の位置を移動させると、それによって節線も移動すると記載した。

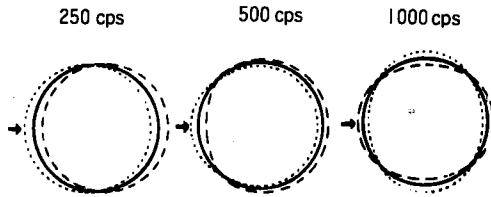


図7. 切替の頭蓋骨振動様式模式図<sup>12)</sup>

Bárányは前述のように Békésy 変法で435 Hzにおける頭蓋骨の振動を觀察し、頭蓋骨は全体として平行に mass-movement すると述べた。切替<sup>12)</sup>は図7のように250 Hzでは頭蓋骨は全体として平行に振動し、500 Hzでは加振部を中心として円形節線が1本現われ、1,000 Hzの頭蓋骨振動は加振方向では同位相の場所と逆位相の場所とが交互に存在し2本の円形節線が現われる。1,750 Hzないし1,800 Hzの固有振動数の場合も1,000 Hzと同じように2本の円形節線が現われるが、この際の節線の位置は加振部位に関係なく一定であった。

小倉、三木は初めてホログラフィ干渉法を用いて成人頭蓋骨の振動解析を行った。上述の諸家の行った実験が振動面の接触による一点一点の集成であるのに対し、ホログラフィ干渉法では、従来の写真技術のように非接触で振動物体全面の觀察が可能のため、結果の正確さは従来の方法と比較にならぬものであり、更にレーザ光の波長単位の微小・精確な定量的計測が行われることが、又最大の利点である。

現在まで、頭蓋骨の振動を定量的に示した報告は極めて少ない。Békésyは骨導域値における振幅の値を250 Hzで $3.5 \times 10^{-8}$  cm、400 Hzで $4.5 \times 10^{-9}$  cm、800 Hzで $1.8 \times 10^{-9}$  cmと述べた。小倉、三木は成人頭蓋骨での実験の計測値2,070 Hz-67 dB、2,850 Hz-62 dB加振でそれぞれ $4.355 \cdot 5.936 \times 10^{-5}$  cmと算出している<sup>1),2)</sup>。

乳児頭蓋骨は成人に比べて大きさ、骨壁の厚さ、重さに差があり、構造も未熟で、骨伝導の媒体として生理的条件が著しく相違している。従って、乳児頭蓋骨の生体における伝音状態には頭蓋内容などが関与すると思われ、殊に胎児の母体内における音響聴取は全体が羊水中に水没した状態で行われるので、更に特殊な条件下にあると考えられる。本研究で行った実験は、骨壁の脆弱なために試験音の加振に自由音場を用いるなど成人頭蓋骨の実験の場合とは条件が異なり、又乾燥頭蓋骨の振動実験なのでその結果は、上述の生理学的な現象の解明にどれ程の意義を持つかについては議論があると思われるが、得られた結果は、乳児頭蓋骨は低音域ではmass-movement、高音域では局所的な歪振動の2様式のあること、また干渉縞の形状、すなわち振動様式についても、成人頭蓋骨との類似性を示した。

## 結 語

乳児乾燥頭蓋骨の振動様式をホログラフィ干渉法により計測・解析した。

得られた振動パターンは形態的に小倉らの報告した成人頭蓋骨のそれとほぼ同様の結果を示した。

乳児頭蓋骨は、加振音 3 kHz の時に最大振幅を示し、その値は、110 phon で  $4.355 \times 10^{-5}$  cm, 120 phon で  $15.423 \times 10^{-5}$  cm であった。

稿を終るに臨み、御指導・御校閲を賜った恩師小倉義郎教授に深甚なる謝意を捧げます。

なお、本論文の要旨は、1981年6月第7回日本耳鼻咽喉科学会中国地方部会連合講演会において発表した。

## 参 考 文 献

1. 小倉義郎, 増田 游, 三木正己, 柴田四郎, 植村恒義 他: ホログラフィ干渉法による頭蓋骨振動様式の研究. *Audiol. Jpn.* 19, 163-167, 1976.
2. 三木正己: ホログラフィ干渉法による聴覚生理の研究. *日耳鼻*, 83, 46-54, 1980.
3. Gabor, D.: A new microscopic principle. *Nature* 161, 777-778, 1948.
4. Leith, E.N. and Upatnitsk, J.: Reconstructed wavefronts and communication theory. *J. Opt. Soc. Am.* 52, 1123-1130, 1962.
5. Tonndorf, J. and Khanna, S.M.: The role of the tympanic membrane in middle ear transmission. *Ann. Otol. Rhino. Laryngol.* 79, 743-753, 1970.
6. Tonndorf, J. and Khanna, S.M.: Tympanic membrane as a part of the middle ear transformer. *Acta Otolaryngol.* 71, 177-180, 1971.
7. 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. *耳鼻咽喉科*, 46, 83-88, 1974.
8. 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への応用. *岡山医学会雑誌*, 86, 215-219, 1974.
9. Gundersen, T. and Hogmoen, K.: Holographic vibration analysis of the ossicular chain. *Acta Otolaryngol.* 82, 16-25, 1976.
10. 村田和美: ホログラフィ入門. 朝倉書店, 東京, 1976.
11. 植村恒義編: 画像計測入門. 昭晃堂, 東京, 1979.
12. 切替一郎: 伝音機構と骨導に関する基礎的研究. *日耳鼻* 58回総会宿題報告前刷. 岡山, 1957.
13. Bárány, E.: A contribution to the physiology of bone conduction. *Acta Otolaryngol. Suppl.* 26, pp. 1-157, 1938.
14. 本間利美: 骨導聴覚とその検査法. *日耳鼻*, 78, 109-112, 1980.



15. Békésy, G.von.: *Experiments in Hearing*. Mc Graw-Hill Book Co, Inc, New York, 1960.
16. Guild, S.R.: Hearing by bone conduction. The pathways of transmission of sound. *Ann. Otol.* 45, 735—751, 1936.

**Experimental study on vibration analysis of the  
Infant skull by Holographic interferometry**

**Tsuneo TAKEDA**

**Department of Otolaryngology, Okayama University Medical School,**

**(Director: Prof. Y. Ogura)**

Vibratory mode of the infant skull was observed and analysed by holography to elucidate the mechanism of bone-conduction hearing in the childhood. Three dried human infant skulls, one of six months, two of eight months postnatal age, were used. As the cranial suture was incomplete with the wide fonticulus remaining and the composition was not so dense or strong as that of the adult, very careful manipulation was needed in the experiment with the infant skull. Consequently, an acoustic loud-speaker was utilized to make the infant skull vibrate in the free sound field, instead of using direct vibrator conventionally attached to the adult skull for the measurement of vibration.

An area around the foramen occipitale magnum was fixed by means of bolts, and the skull was stood on a table. Attempts were made to change the frequency and intensity of the test sounds during the experiment. The sound pressure level of the sound field was measured with a noise meter. The value measured at the site of the skull closest to the loud-speaker was regarded as the intensity of the test sound. The resulting pattern of vibration was recorded and reconstructed by holographic interferometry. As the light source for holography helium-neon laser was used.

Interference fringes were observed at 110 phon or more of the intensities of the test sounds. When frequency of the test tone was low such that 500 Hz or less, interference fringes of parallel lines were observed in the hologram. This meant the skull was found to vibrate as a whole, and the sound signal seemed to be transmitted by "inertia bone-conduction" in the mechanism of hearing when the frequency of the test sound was 500 Hz or less. on the other hand, at 1 kHz and more of the test frequency, the vibratory pattern changed into concentric fringes with multiple maximum points of amplitude. Then, it was clarified that when the frequency was 1 KHz or more, "compression bone-conduction" was added up in the hearing mechanism. At about 3 KHz of test sound, the vibratory amplitude was larger than any other frequencies used, suggesting that 3 KHz was the closest to the resonance frequency of the infant skull.