

実時間ホログラフィ干渉法による中顔面骨の変形解析

奈良県立医科大学口腔外科学教室

土田 雅久

MEASUREMENT OF DISPLACEMENT OF MID-FACIAL BONE BY REAL TIME HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

MASAHISA TSUCHIDA

Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Nara Medical University

Received January 30, 1996

Abstract: The displacement of human dried facial bone was measured and considered by real time holographic interferometry, when the loads of various directions and amounts were applied on the zygomatic bone and maxilla. The relations between places subjected to the loads and their deformations were discovered from consideration of the fringe pattern. The fracture patterns of maxilla and zygomatic bones were classified into 12 groups according to the loading areas. For the orbital floor, the fracture patterns were summarized in 4 groups. These results give suitable aspects for surgical treatment of the fracture of mid-facial bone.

Index Terms

biomechanics, real time holography, facial bone, fracture, human dried skull

緒 言 方 法

中顔面骨への外力は、頬骨または上顎骨等の単一な骨にとどまらず隣接骨へ伝達され、広範囲に破損することが多い。そのため頬骨骨折や頬骨上顎複合骨折など種々の呼称が用いられ、その処置にあたって苦慮するところである。また、骨折好発部位に関する研究として、上顎骨では、Le Fort¹⁾、頬骨に対しては Knight & North²⁾(以下 K & N と略す)や Rowe & Williams³⁾は、治療の一助とするため、その骨折様態を骨の回転軸を想定して rotation axis をふまえて分類している。しかし、必ずしもその分類に症例が適合するまでに至っていない。本来、骨折様態を解明するには、荷重部位および荷重量を考慮に入れ、また中顔面骨を一体とした骨折様式について検討がなされるべきであるが、これについての報告はすくない^{4)~14)}。そこで、様態の把握には中顔面骨を一体として考え、顔面骨を構成する上顎骨および頬骨の荷重による変形測定を実時間ホログラフィ干渉法により行い、中顔面骨に加わる外力と骨折様式との関係について検討した。

1. 実験装置および被検試料

測定対象物として、解剖学的に異常の見い出されなかった人乾燥頭蓋骨を3体用い、各々について、下顎骨を外した頭蓋骨について実験をおこなった。測定にはアルゴンレーザー(GLG 3260, 2 W, NEC)を用いた光学系のシステムを使用している。

2. 光学系

アルゴンレーザーから出た光は、半透過鏡 HM で2分される。透過波はレンズ L で広げられた後、物体照明波 IL として頭蓋骨の顔面骨部 0 に入射する。試料 0 より反射された光波はプロセスカメラ(TPC 200, Steinbichler GmbH)のフィルム面 P に到達する。他方、半透過鏡 HM で反射された光波は、参照波 R として鏡 M を経てレンズ L により平面波となりフィルム面 P で物体反射波と重なる。濃度フィルター D は、顔面骨から反射波と参照波の強度を調節するために用いられる。顔面骨の変形前のホログラム作成に先だって荷重方向、荷重量を定め、

その後、プロセスカメラのコントローラを操作してシャッター S の開口時間を設定し、無荷重で1回目の露光および現象処理を行いホログラム H を作成する。このホログラムに参照波および物体からの反射波を入射させることにより、その透過波は前者による再生波と重ね合わされることになる。この状態で顔面骨が荷重を受けることにより変形すれば、再生波との干渉でしまが観察される。この強度分布をビデオカメラ(キャノン、LX-1 T)で記録した。荷重の増加と共にしまの移動の方向が実時間で観察できる。本光学系では、干渉しま一本当たり約 0.27 μm の面外変位に対応している(Fig. 1)。

このようなシステムで撮影された実時間ホログラムから Fig. 2 に示すように、4枚のホログラムを抽出した。まず、無荷重の状態より始めて、15秒後に1.5 Nを加えた時に得られた物体上の干渉しまを A と呼ぶ。つぎに30秒後に1.5 Nの荷重を増加して3.0 Nに達した干渉しまを B とし、以下同様にして荷重を増し、得られたしまを C および D とした。荷重の増加と共にしまの移動の状態が実時間で観察できる(Fig. 2)。

3. 試料の固定および荷重方法

頭蓋骨 D を固定するために Fig. 3. に示すように、枳形ブロック SP を枠にして、中空部に練和した超硬石膏を入れ、硬化する前に後頭部を眼耳平面とブロックの側面とが平行になるように約 4 cm だけ埋没した。荷重方法は竿の途中に 1 : 3 の関係になる位置に支点 S を設定し、短い側の端に荷重針を固定した。他端に糸を固定し

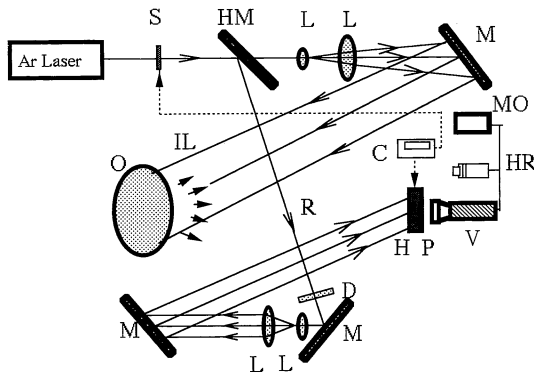


Fig. 1. Setup for measuring deformation of the object.

O : Skull, IL : Illuminating wave, R : Reference wave, M : Mirror, L : Lens, HM : Half Mirror, D : Density filter, P : Process camera for thermoplastic film, S : Shutter, H : Hologram recorded on the thermoplastic film, C : Controller for process camera, HR : Hard printer, MO : Monitor, V : CCD camera.

て滑車 PU を介して水を入れた容器を吊すことにより 3 倍の荷重を作用させた。この容器には、注水パイプを通して 50 cc の注射筒を 4 本接続し、これらに水を満たし所定の荷重になるように給水弁を切り換えて連続注水を行うことにより経時的な荷重を負荷した。荷重の方向は荷重針が骨体面に垂直になるように荷重機構と骨の相対位置を調整することにより設定した。

また、荷重針の材質は真鍮を使用し、曲率半径が 535.5 μm であり、骨の表面粗さよりも大きいものを使用した(Fig. 3)。

4. 荷重点

荷重部位は、Fig. 4 に示すように上顎骨および頬骨を中心として合計 22 部位の荷重点を定めた(Fig. 4)。

このような実験装置、対象を用いて、各荷重点に経時的な荷重を負荷することにより、荷重の増加とともにしまの移動の方向が実時間で観察される。この観察された実時間ホログラムの再生像をビデオカメラで撮影し、その再生像から中顔面骨における外力と骨折様式との関連、各縫合部での緩衝作用の働きについて検討するとともに、各荷重点の違いによる推測される骨折様式の種類をおこなった。また、ホログラムの再生像から眼窩内のみ拡大し、同部における骨の変形様式について検討した。

実験結果

1. 中顔面骨における骨の変形

(1) 荷重点を上顎骨の No. 2 に設定した時得られた実時間のホログラムの再生像

Fig. 5-1 に示すように荷重量を増加させると荷重点付近では、同点を中心に同心円状の干渉しまの発生が観察された。実時間的に観察を続けると Fig. 5-1, A で荷重点から発生したしま(→)が荷重の増加と共に縦方向のしまになり、頬骨方向に移動し Fig. 5-1, D に示すように荷重量が 6.0 N の時得られた干渉しまでは、頬骨弓付近に同じしま次数の干渉しまが生じている様子が観察された。また、荷重点と反対側の顎骨、頬骨では上顎骨正中中部から発生したしまは、荷重の増加と共に水平方向の密度の低いしまになり矢印で示すように上方に移動していく様子が観察された(Fig. 5-1)。また、荷重点 No. 1, No. 4 および No. 7 においても同様の干渉しまの移動傾向が観察された。

(2) 上顎骨の正中中部の No. 10 に荷重点を定めた場合に得られた再生像

この場合、Fig. 6-1 において、左右の上顎骨、頬骨共に水平方向に密度の高い干渉しまが観察され、上方に経時的に移動し、しまの密度は低くなり、前頭骨との縫合

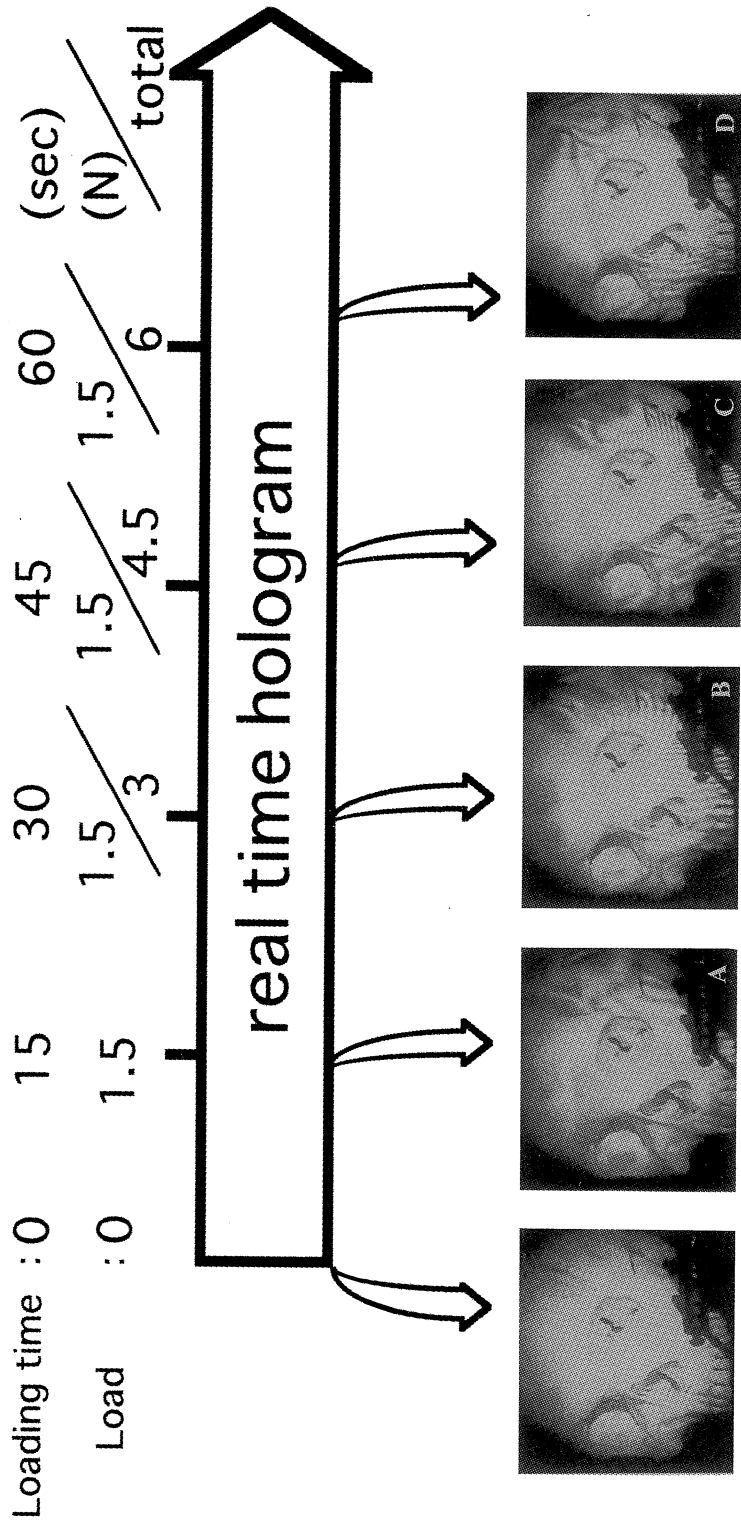


Fig. 2. Extraction method of real time holographic interferograms obtained under the loads 1.5, 3.0, 4.5, and 6.0 (N), respectively.

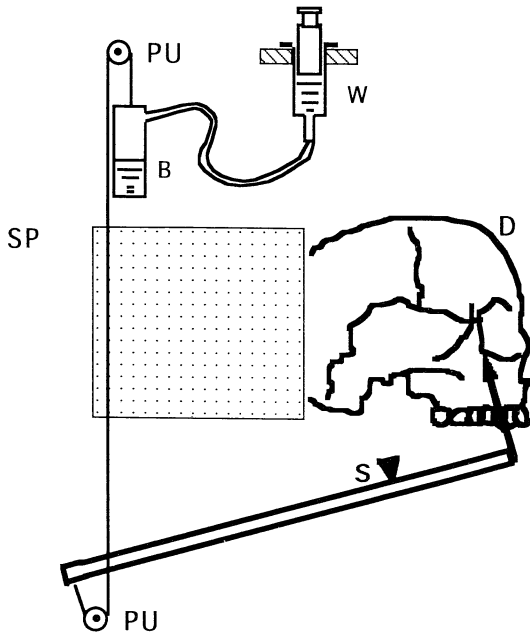


Fig. 3. Loading method.
 S : Fulcrum, PU : Pulley, W : Water,
 SP : Box type block, D : Skull
 B : Bottle

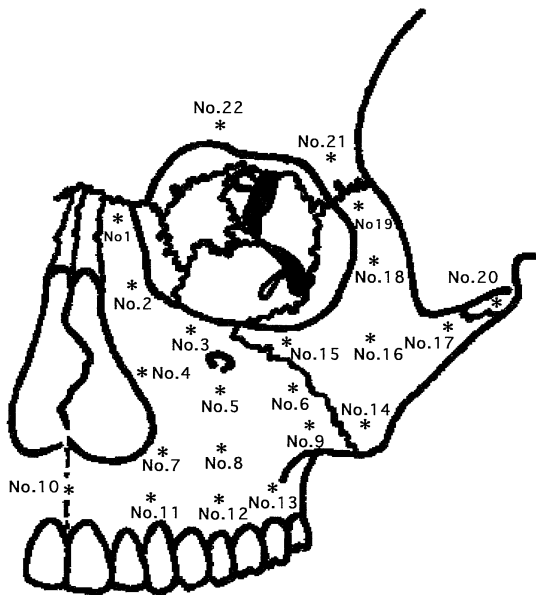


Fig. 4. Loading points.
 No. 1-13 : maxillary bone
 No. 14-19 : zygomatic bone
 No. 20 : temporal bone
 No. 21, 22 : frontal bone

部を境に、さらに干渉じまの密度は低くなった(Fig. 6-1). 荷重点 No. 11, においても同様の干渉じまの移動傾向が観察された.

(3) 荷重点として上顎骨の No. 5 に設定した時、荷重の増加と共に得られた再生像

Fig. 7-1 に示されているように、荷重点を中心に同心円状のしまの発生が観察された. 矢印(→)の干渉じまに

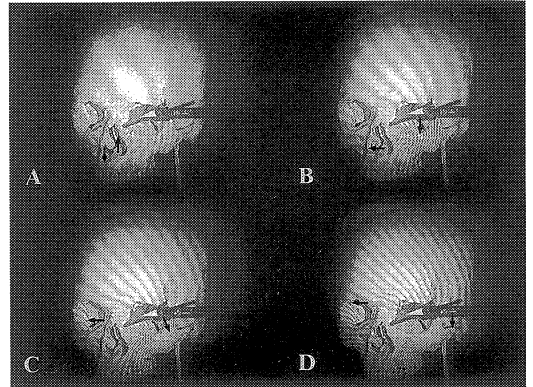


Fig. 5-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N B : 3.0N, C : 4.5N and D : 6.0N). Loading point (<<): No. 2 in Fig. 4 (←): Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 1.

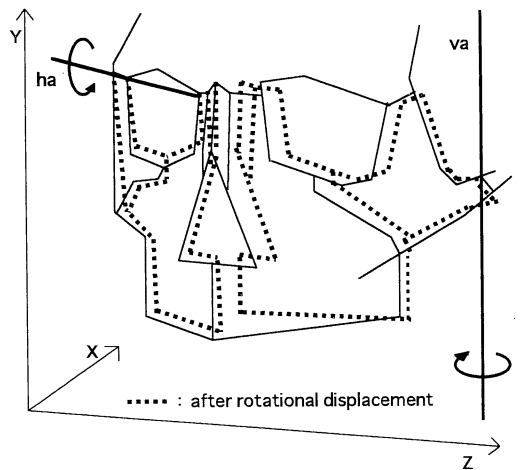


Fig. 5-2. Rotational displacement of the maxilla and zygoma induced by the load to the loading point (No. 2).
 ha : Horizontal axis of rotation,
 va : Vertical axis of rotation.

着目し荷重の増加と共にその移動を追って行くと、3.0 Nの荷重では Fig. 7-1, Bのように頬骨上で生じており、6.0 Nの荷重では、Fig. 7-1, Dに示すように頬骨前頭縫合部付近で見いだされた。反対側の上顎骨および頬骨におけるしまの変化は、Fig. 5に示した荷重点が No. 2の場合と同様であった。すなわち、上顎骨の正中部

で発生したしまは水平方向のしまとして上方に移動していく様子が観察され、上顎前頭骨縫合部を境に干渉じまの方向が変化した(Fig. 7-1)。また、荷重点 No. 5, No. 8および No. 13においても荷重点を中心に同心円状の干渉じまが観察され干渉じまの移動方向、密度は Fig. 7-1と同じ傾向であった。

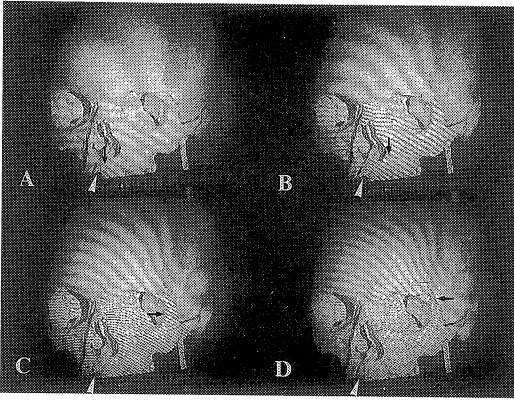


Fig. 6-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5N and D : 6.0N). Loading point ($\langle \rangle$) : No. 10 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : dried human skull of No. 1.

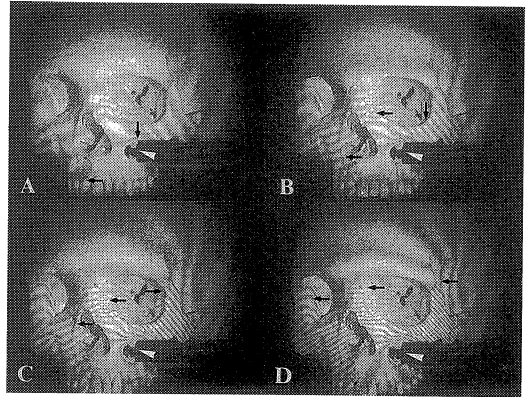


Fig. 7-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5N and D : 6.0N). Loading point ($\langle \rangle$) : No. 5 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 3.

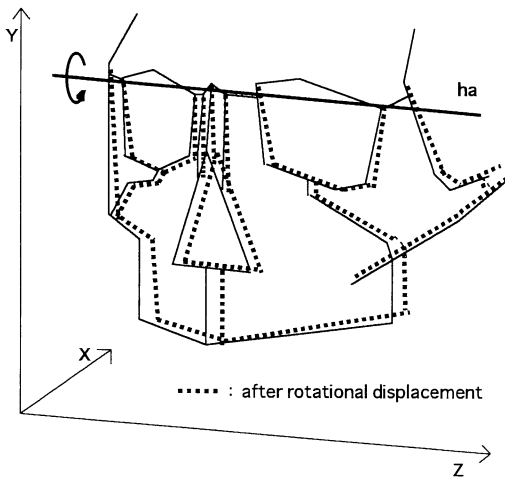


Fig. 6-2. Rotational displacement of the maxilla and zygoma induced by the load to the loading point (No. 10). ha : Horizontal axis of rotation.

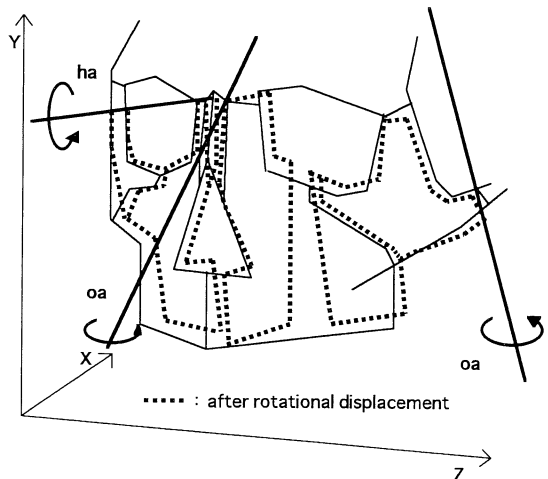


Fig. 7-2. Rotational displacement of the maxilla and zygoma induced by the load to the loading point (No. 5). ha : Horizontal axis of rotation, oa : Oblique axis of rotation.

(4) 上顎大臼歯根尖部付近に荷重点 No. 13 を定めた場合に得られた再生像

Fig. 8-1 に示すように荷重点から発生したしまは、上顎骨においては鼻骨方向にしまの移動が観察され、しまの移動と共に密度は低くなっていた。また頬骨上顎骨縫合部、上顎骨正中縫合部を境に干渉じまの方向が変化し、

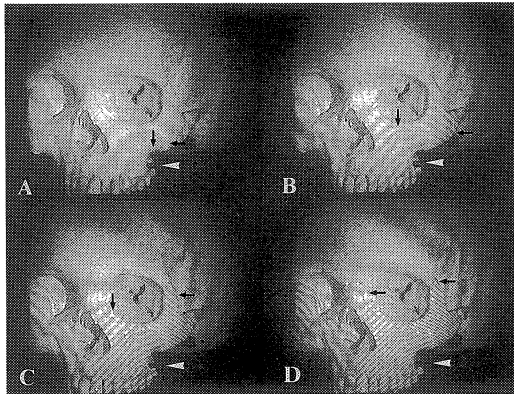


Fig. 8-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5N and D : 6.0N). Loading point (<<) : No.13 in Fig. 4 (←) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 3.

荷重点からの距離が離れるほど密度の低い干渉じまが観察された(Fig. 8-1).

荷重点 No. 12 においても同様の干渉じまの移動傾向が観察された。

(5) 荷重点として上顎骨の No. 6 に設定した時の実時間ホログラムより得られた再生像

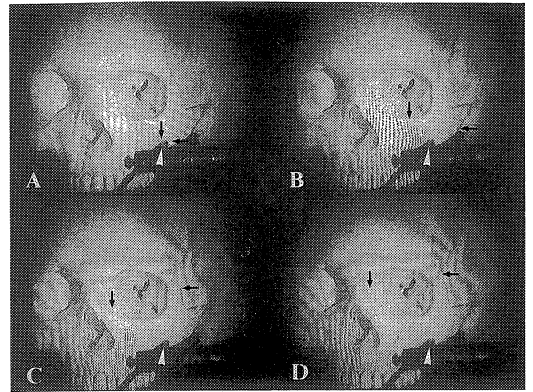


Fig. 9-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5N and D : 6.0N). Loading point (<<) : No. 6 in Fig. 4 (←) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 3.

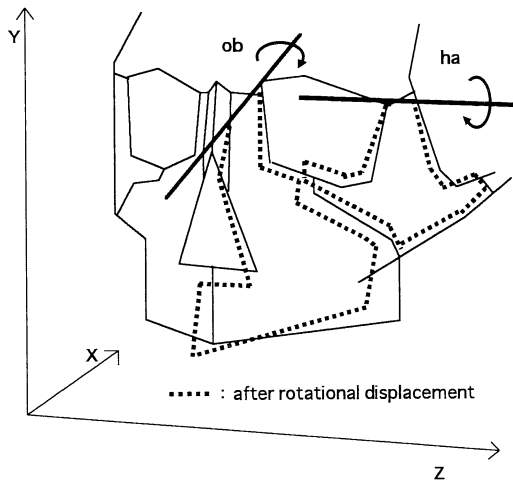


Fig. 8-2. Rotational displacement of the maxilla and zygoma induced by the load to the loading point (No. 13). ha : Horizontal axis of rotation, ob : Oblique axis of rotation.

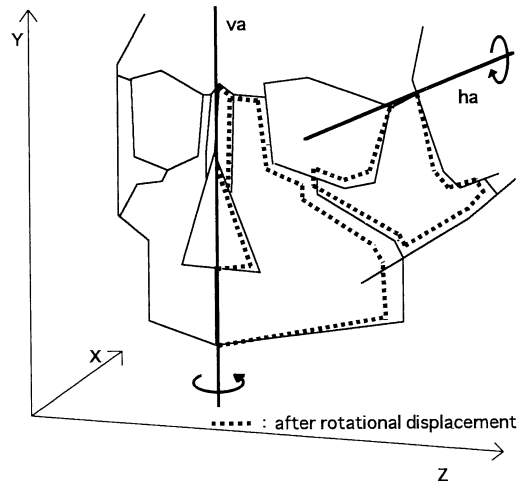


Fig. 9-2. Rotational displacement of the maxilla and zygoma induced by the load to the loading point (No. 6). ha : Horizontal axis of rotation, va : Vertical axis of rotation.

Fig. 9-1 に示すように、上顎骨内では縦方向の干渉じまが観察され、荷重点からの距離が離れるほど低い密度のしまに変化した。上顎骨正中縫合部を越えるとさらに低い密度のしまが観察された。また、頬骨上顎骨縫合部を境にしまの方向が変化し、しまの密度も低くなった (Fig. 9-1)。荷重点 No. 9 においても同様の干渉じまの

移動傾向が観察された。

(6) 荷重点として頬骨の No. 15 に設定した時の実時間ホログラムより得られた再生像

Fig. 10-1 に示すように、頬骨の縦方向の干渉じまが観察され、荷重点からの距離が離れるほど低い密度のしまが観察された。上顎骨ではかなり低い密度の干渉じま

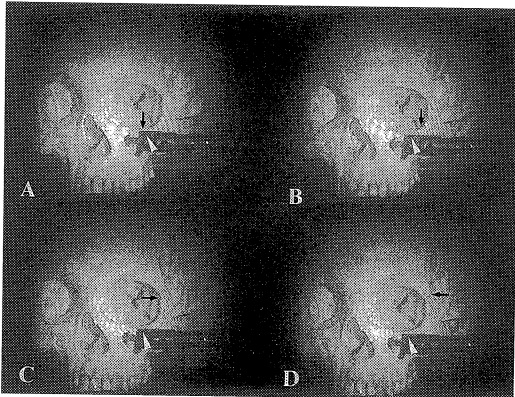


Fig. 10-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5 and D : 6.0N). Loading point (\llcorner) : No. 15 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 1.

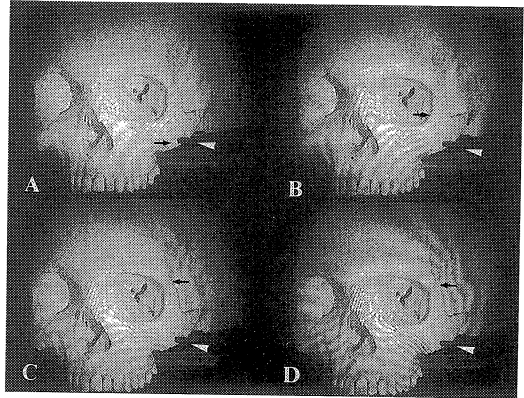


Fig. 11-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5 and D : 6.0N). Loading point (\llcorner) : No. 14 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 3.

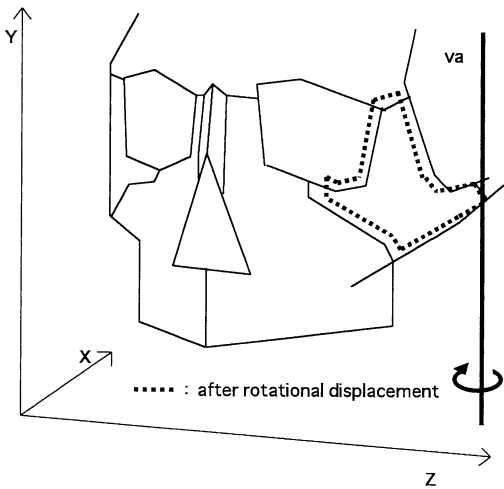


Fig. 10-2. Rotational displacement of zygoma induced by the load to the loading point (No. 15).
va : Vertical axis of rotation.

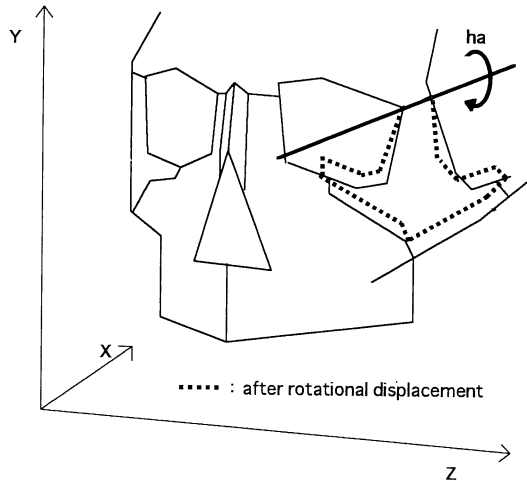


Fig. 11-2. Rotational displacement of zygoma induced by the load to the loading point (No. 14).
ha : Horizontal axis of rotation.

が現れた(Fig. 10-1).

(7) 荷重点として頬骨の No. 14 に設定した時の実時間ホログラムより得られた再生像

Fig. 11-1 に示すように、頬骨に水平方向の干渉じまが観察され、干渉じまは頬骨の上方へ移動し、しまの移動と共に密度は低くなった。また、頬骨上顎骨縫合部を

境に干渉じまの方向に若干の変化が認められ、頬骨よりも低い密度のしまが観察された(Fig. 11-1).

(8) 荷重点として頬骨の No. 16 に設定した時の実時間ホログラムによる再生像

Fig. 12-1 に示すように、頬骨骨体にはほぼ水平方向に近い等間隔の干渉じまが観察されたが、前頭骨および側

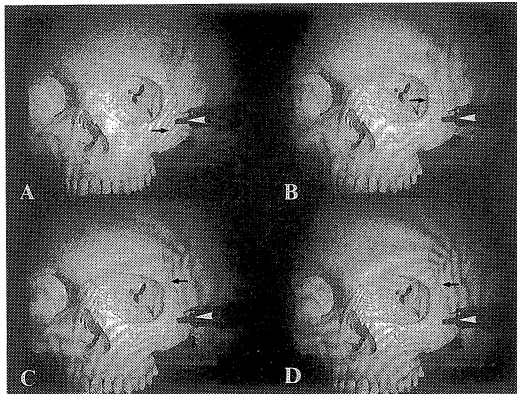


Fig. 12-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5N and D : 6.0N). Loading point (<<) : No. 16 in Fig. 4 (←) : Movement of the same fringe order on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 3.

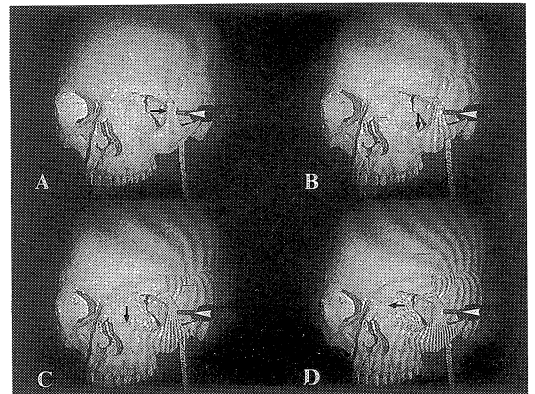


Fig. 13-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5 and D : 6.0N). Loading point (<<) : No. 18 in Fig. 4 (←) : Movement of the same fringe order on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 1.

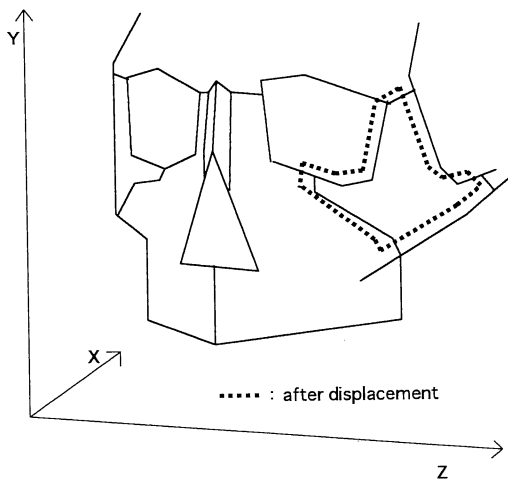


Fig. 12-2. Displacement of zygoma induced by the load to the loading point (No. 16).

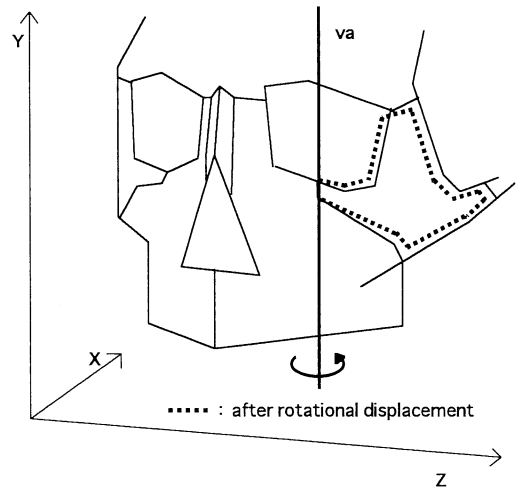


Fig. 13-2. Rotational displacement of zygoma induced by the load to the loading point (No. 18). va : Vertical axis of rotation.

頭骨の干渉じまは、縫合部を境に密度の低い干渉じまとして観察された。また、上顎骨に対しては縫合部を境に、密度の低い干渉じまが表われ、上顎骨中央付近より縦方向のしまに変化した(Fig. 12-1)。

(9) 荷重点として頬骨の No. 18 に設定した時の実時間ホログラムより得られた再生像

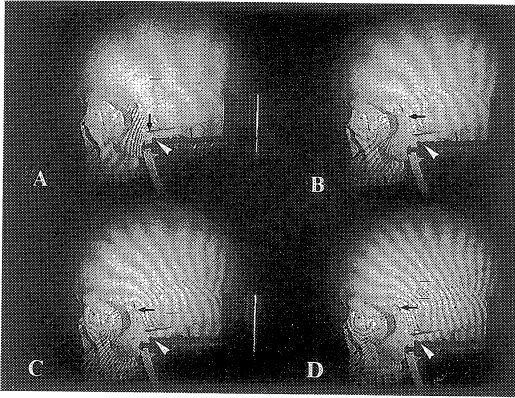


Fig. 14-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5 and D : 6.0N). Loading point (\triangleleft) : No. 17 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 2.

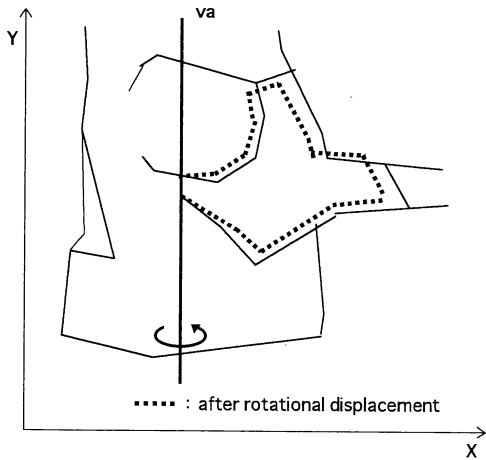


Fig. 14-2. Rotational displacement of zygoma induced by the load to the loading point (No. 17).
va : Vertical axis of rotation.

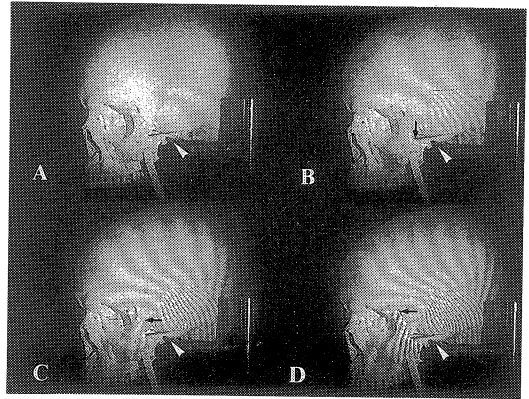


Fig. 15-1. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5 and D : 6.0N). Loading point (\triangleleft) : No. 20 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 2.

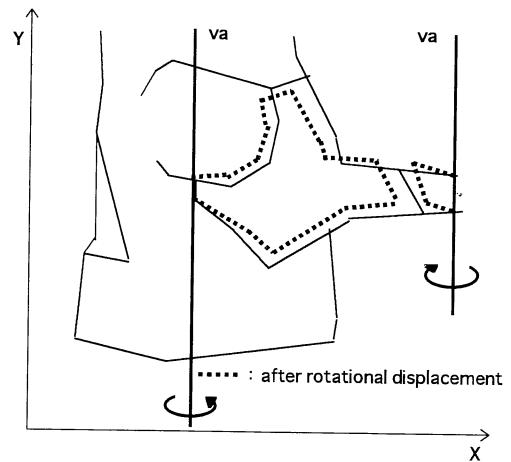


Fig. 15-2. Rotational displacement of zygoma induced by the load to the loading point (No. 20).
va : Vertical axis of rotation.

(Fig. 13-1).

(10) 荷重点として頬骨の No. 17 に設定した時の実時間ホログラムより得られた再生像

Fig. 14-1 に示すように、頬骨骨体の縦方向の干渉じまが観察され、荷重点からの距離が離れるほど低い密度のしまに変化した、またか重点 No. 18 における干渉じまよりも高い密度のしまが観察された(Fig. 14-1).

(11) 荷重点 No. 20 に対して得られたホログラム再生像

Fig. 15-1 に示すように、側頭骨頬骨突起部(頬骨弓)

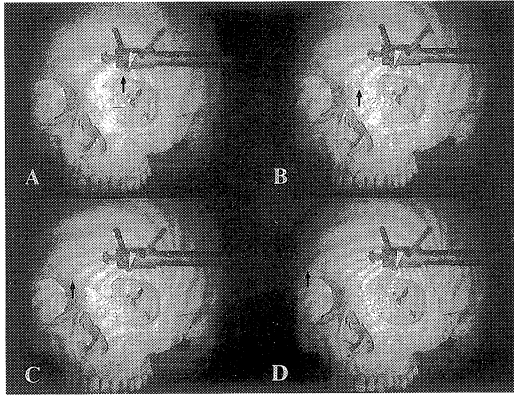


Fig. 16. Real time holographic interferograms obtained for various loads. (A : 1.5N, B : 3.0N, C : 4.5 and D : 6.0N). Loading point (\triangleleft) : No. 22 in Fig. 4 (\leftarrow) : Movement of the same fringe order number on the real time holographic interferogram. Material : Dried human skull of No. 3.

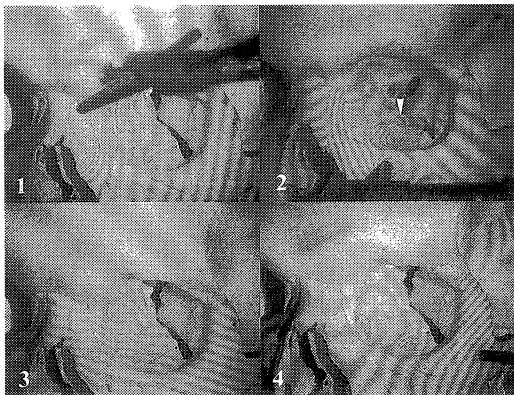


Fig. 17. Real time holographic interferograms of the orbital region obtained for various points (1 : No. 1, 2 : No. 3, 3 : No. 10, 4 : No. 16 in Fig. 4) under the load of 3.0N. (\triangleleft) : Concentric circular fringes.

の縦方向の密度の高い干渉じまが観察され、頬骨へは縫合部を境に干渉じまの方向には変化がないものの、しま密度が低くなった。また、側頭骨では関節結節付近を越えるとしまの密度は低くなり、ほぼ頬骨部のしま密度と同程度であった(Fig. 15-1).

(12) 荷重点を前頭骨上 No. 22 に設定した場合に対して実時間ホログラムより得られた再生像

Fig. 16 に示すように、前頭骨で発生した干渉じまと等間隔のほぼ水平方向のしまが上顎骨および頬骨でも観察されしま密度、方向性に変化はないものの、しま密度は頬骨荷重時よりかなり低かった(Fig. 16).

2. 眼窩内における骨の変形

荷重部位 No. 1~No. 22 において眼窩内に生じた変形パターンは、Fig. 17, 1~4 に示すように4つのタイプに分類された。これらは No. 1, 3, 10 および 16 の各荷重点で得られた再生像の眼窩部分の拡大図を表している。(Fig. 17, 1~4). 荷重量は、すべて 3.0N である。タイプ1は Fig. 17-1 に示し、縦方向の干渉じま、タイプ2は Fig. 17-2 に示し、眼窩下壁に同心円状の干渉じまが観察された。タイプ3は Fig. 17-3 に示しており、水平方向の干渉じま、タイプ4は Fig. 17-4 に示し、半円型の干渉じまが観察された。また、どのタイプのホログラムにおいても視神経管を含めた蝶形骨および前頭骨の変形量は、縫合部を境に、他の眼窩内の骨のしま密度に比べて低かった。

考 察

本研究では、顔面骨を構成する上顎骨および頬骨の荷重による変形を把握するための中顔面骨を一体として考えた。その測定方法として実時間ホログラフィ干渉法を用いた。得られた干渉じまより中顔面骨における外力と骨折様式との関連について検討した。また、眼窩壁骨折についても同様の観点から考察をおこなった。

撮影されたホログラムから各荷重部位の違いにより推定される骨折様式はとして Fig. 18 に示すように①~⑫の12タイプに分類できると考えられる(Fig. 18).

1. 中顔面骨における骨の変形(1)

(1) 荷重領域①

荷重部位 No. 2 のホログラムの再生像(Fig. 5-1)に代表されるように、荷重点を中心に同心円状の干渉じまが発生した。荷重の増加と共にこのしまは、荷重方向に向かって吸い込まれるような様子が観察された。このことから荷重方向に向かって面外変位をおこしており、陥没骨折が疑われ、また、同部から発生したしまが経時的に密度の高い縦しまとして頬骨方向に移動して行くこと

から、Fig. 5-2 に示すように頬骨骨体部で縦方向に回転軸として荷重点位側の上顎骨が面外変位していると考えられる。さらに、反対側では、上顎骨正中部から発生したしまが水平方向のしまとして上方に移動していくことにより頬骨前頭骨縫合部、上顎骨前頭骨縫合部を結ぶ水平方向の線を回転軸として面外変位していると考えられる(Fig. 5-2)。このことから左右の上顎骨、頬骨では、それぞれ別方向への面外変位をおこし、正中でのずれが考えられる。すなわち荷重側でしまの密度が高く、変位勾配が大きいことを示しており、Le Fort II, IIIおよび縦骨折が疑われる。また、反対側で生じたしまは、密度が低いいため骨折を起こすには至っていないと考えられる。

(2) 荷重領域②

荷重点位 No. 10 のホログラムの再生像(Fig. 6-1)に代表されるように、左右の上顎骨、頬骨共に水平方向の干渉じまが観察された。このことから、上顎骨前頭骨縫合部、頬骨前頭骨縫合部を結ぶ水平方向の線を回転軸として、Fig. 6-2 に示すように荷重方向に面外変位していると考えられる(Fig. 6-2)。このことから両側性の Le Fort 型骨折が疑われるが、②の領域内でも正中から離れるほど干渉じまの連続性は保たれているものの、方向に変化が認められることから、左右の骨折様式が違うことが推測される。

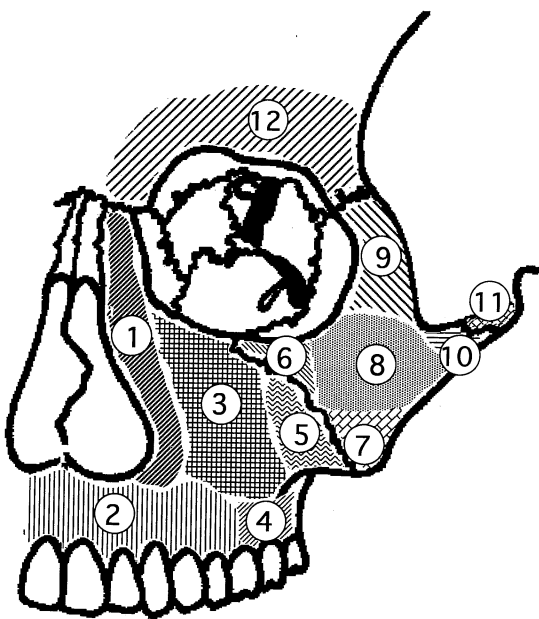


Fig. 18. Loading areas (①~⑫) obtained for the maxillary and zygomatic fracture patterns.

(3) 荷重領域③

荷重点位 No. 5 ホログラムの再生像(Fig. 7-1)に代表されるように、荷重領域①と同様、荷重点を中心に経時的に同心円状の干渉じまが観察された。これは、上顎骨前壁の骨の厚みが薄いため荷重方向に向かって面外変位をおこしており陥没骨折が疑われる。また、荷重量の増大と共に放物線状に干渉じまは増大するが、前頭骨および側頭骨との縫合部を境にしまの密度が減少しその方向も変化することから、側頭頬骨縫合部、前頭骨上顎骨縫合部を通る斜めの回転軸を中心に、それぞれ荷重方向に回転していると考えられる。このことから、荷重点をとる縦方向の骨折と上顎骨正中部での縦骨折および Le Fort II, IIIの骨折が疑われ、また荷重点と反対側の上顎骨では、前頭骨上顎骨縫合部、前頭骨頬骨縫合部を結ぶ水平方向の線を回転軸として荷重方向に向かって面外変位していると考えられる。このことから、反対側の上顎骨では、Le Fort IIIの骨折が疑われる(Fig. 7-2)。

(4) 荷重領域④

荷重点位 No. 13 のホログラムの再生像(Fig. 8-1)に代表されるように、荷重点から発生したしまは、上顎骨においては鼻骨方向に干渉じまの移動が観察され、しまの移動と共に密度は低くなっていくため、鼻骨付近を中心とした斜め方向を回転軸として荷重方向に面外変位していると考えられる。また、頬骨体では頬骨上顎骨縫合部を境に干渉じまの方向がほぼ水平方向に変化し、荷重点からの距離が離れるほど密度の低い干渉じまが観察されることから前頭骨頬骨縫合部を通る水平方向の回転軸を中心に荷重方向に面外変位していると考えられる。このことから、荷重側の Le Fort II, 縦骨折および頬骨の K & N. V型が疑われる(Fig. 8-2)。

(5) 荷重領域⑤

荷重点位 No. 6 のホログラムの再生像(Fig. 9-1)に代表されるように、荷重点から発生したしまが上顎骨内では縦方向の干渉じまが観察され、荷重点から離れるほどしまの密度が低くなった。上顎骨正中縫合部を越えるとともに低い密度のしまが観察された。また、頬骨部上顎骨縫合部を境にしまの方向が変化し、しまの密度も低くなった。これらのことから、上顎骨においては正中部の縦方向の回転軸を中心に荷重方向に面外変位していると考えられる。また、頬骨においては荷重領域④と同じ様に K & N. V型が疑われる(Fig. 9-2)。

(6) 荷重領域⑥

荷重点位 No. 15 のホログラム再生像(Fig. 10-1)に代表されるように、頬骨に縦方向に干渉じまが観察され、荷重点からの距離が離れるほど低い密度のしまが表われ

た。さらに上顎骨では、低い密度の干渉じまが観察されたことから、側頭骨頬骨縫合部を通る縦方向の回転軸を中心に荷重方向に回転していると考えられる(Fig. 10-2)。また、上顎骨における干渉じまの密度がかなり低いので、上顎骨骨折を合併する可能性はないと考えられる。

(7) 荷重領域⑦

荷重部位 No. 14 のホログラムの再生像(Fig. 11-1)に代表されるように、頬骨に水平方向の干渉じまが観察され、干渉じまは頬骨の上方へ移動し、しまの移動と共に密度は低くなった。また、上顎骨では頬骨上顎骨縫合部を境に干渉じまの方向に若干の変化が観察され、頬骨よりも低い密度のしまが観察された。このことから、前頭骨頬骨縫合部を通る水平方向の回転軸を中心に荷重方向に面外変位していると考えられ、K & N. V型が疑われる(Fig. 11-2)。

(8) 荷重領域⑧

荷重部位 No. 16 のホログラムの再生像(Fig. 12)に代表されるように、頬骨上ではほぼ水平方向に近い干渉じまが観察された。しかし、縫合部を境にしまの密度は低くなり、特に上顎骨においては上顎骨中央付近より縦方向のしまが観察された。頬骨を中心に水平方向を軸として、回転骨折が疑われるが、No. 16 では、頬骨での干渉じまが等間隔であることから、頬骨全体が回転せず荷重方向に陥没する K & N. III型が疑われる(Fig. 12-2)。また、荷重領域⑧の領域内において、荷重点 No. 16 の上方では水平方向を回転軸として、反時計回りの回転骨折する K & N. IV型が疑われ、下方では時計回りに回転骨折する K & N. V型が疑われる。

(9) 荷重領域⑨

荷重部位 No. 18 のホログラムの再生像(Fig. 13-1)に代表されるように、頬骨を中心に縦方向の干渉じまが観察され、その軸を中心に回転骨折が疑われる。また、干渉じまの間隔が後方に高い密度を示すため回転軸は頬骨骨体の前方に存在するものと考えられる(Fig. 13-2)。さらに、荷重部位周辺の干渉じまの密度が高いことから、頬骨前頭突起が単独で骨折する可能性もあると考えられる。

(10) 荷重領域⑩

荷重部位 No. 17 のホログラムの再生像(Fig. 14-1)に代表されるように、荷重領域⑩と同様に頬骨を中心とした縦方向の干渉じまが観察され、その軸を中心に回転骨折が疑われる。また、干渉じまの間隔が後方に高い密度を示すため、回転軸は頬骨骨体の前方に存在するものと考えられる(Fig. 14-2)しかし、荷重領域⑨よりも荷重量の増大に伴い、しまの密度の増大傾向が大きいこと

から、荷重領域⑩よりも面外変位量が大きく、骨折しやすいと考えられる。さらに、荷重部位周辺の干渉じまの密度が高いことから側頭骨頬骨突起が単独で骨折する可能性もあると考えられる。

(11) 荷重領域⑪

荷重部位 No. 20 のホログラムの再生像(Fig. 15-1)に代表されるように、側頭骨頬骨突起部の上下方向のしまの密度がかなり高かった。頬骨へは縫合部を境に干渉じまの方向には変化がないものの、しまの密度が低くなり、側頭骨側では、関節結節を越えるとしまの密度は低くなった。このことから、頬骨弓の前方、後方に2つの縦方向の回転軸をもつものの、頬骨弓単独で面外変位していることが疑われ、頬骨弓単独骨折(K & N. II型)が疑われる。

(12) 荷重領域⑫

荷重部位 No. 22 のホログラムの再生像(Fig. 16)に代表されるように、他の荷重領域における荷重量の変化による干渉じまを比較すると、しま密度が低く、縫合部を介して頬骨、上顎骨への干渉じまの方向およびしま密度には変化は認められなかった。このことから、荷重領域⑫では、縫合部での力の緩衝作用は働かず、前頭骨を含め中顔面骨全体が一体として骨折を起こすものと考えられる。

2. 眼窩内における骨の変形様式

各荷重部位 No. 1, No. 3, No. 10 および No. 16 に代表されるホログラムから眼窩内に生じた変形パターンは Fig. 17 に示すように1~4の4タイプに分類される。

タイプ1は眼窩内の縦方向の干渉じま、タイプ2は眼窩下壁に同心円状の干渉じま、タイプ3は眼窩内の水平方向の干渉じま、タイプ4は半円型の干渉じまが観察された。このことから、タイプ1, 3, 4では、骨折の方向は違うものの、眼窩周囲骨と連続性に骨折が発生すると考えられ、一方タイプ2では、眼窩下壁単独の骨折が発生すると考えられる。また、どのタイプのホログラムにおいても視神経系管を含めた蝶形骨および前頭骨の干渉じまのしま密度は、縫合部を境に他の眼窩内の骨のしま密度に比べて低かった。これらのことから、眼窩内の各縫合部の外力に対する緩衝作用が働き蝶形骨や前頭骨の変形を抑えていると考えられる(Fig. 17)。

3. 縫合部の外力に対する緩衝作用

次に中顔面骨の各縫合部(前頭骨上顎骨縫合部、前頭骨頬骨縫合部、側頭骨頬骨縫合部、頬骨上顎骨縫合部)の外力に対する緩衝作用について検討する。検討方法は荷重部位から発生した干渉じまが、骨縫合部を越えて隣接骨上へ移動するまでに骨縫合部に吸収されたしまの数を測

Table 1. Absorbed fringe order numbers counted at of the bone suture
(Loading points 1-22 are shown in Fig-4)

Bone suture	Loading point											
	Dry skull	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
fronto-maxillary s	No. 1	2	4	3	3	3	3	3	2	3	3	2
	No. 2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2
	No. 3	2	3	4	3	2	3	3	3	4	3	4
fronto-zygomatic s	No. 1	※	5	5	5	6	4	5	6	4	5	※
	No. 2	3	2	3	3	3	2	3	3	2	2	2
	No. 3	7	7	8	6	5	5	3	4	5	3	4
temporo-zygomatic s	No. 1											
	No. 2											
	No. 3											
zygomatico-maxillary s	No. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	No. 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	No. 3	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
Bone suture	Loading point											
	Dry skull	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
fronto-maxillary s	No. 1	2	4	3	5	2	2	2	※	※	1	1
	No. 2	2	2	3	2	2	2	1	2	※	1	1
	No. 3	4	5	3	6	3	7	6	5	※	2	1
fronto-zygomatic s	No. 1	※	6	4	6	3	4	4	3	3	1	1
	No. 2	3	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1
	No. 3	6	6	5	7	6	7	2	4	3	2	1
temporo-zygomatic s	No. 1						9			10		
	No. 2						5			7		
	No. 3						9			12		
zygomatico-maxillary s	No.1	0	0	0	0	0	0	0	0	※	0	0
	No. 2	0	0	0	0	0	0	0	0	※	0	0
	No. 3	1	1	0	1	0	1	1	1	※	0	0

定した。吸収しま次数が多いほど縫合部での緩衝作用が働いていると考えられる。それらの結果を Table 1 に示す。表より各 Dry skull ととも側頭骨頬骨縫合部での吸収しま次数が最も多く、頬骨上顎骨縫合部での吸収しま次数は他の部位に比べてかなり少なかった。また、眼窩内においても緩衝作用が働いていることなどから中顔面骨に外力が加わった場合、頭部、特に頭蓋底方向への外力の伝達を避けるために各縫合部での緩衝作用が働いていると考えられる (Table 1)。

結 語

顔面骨を構成する上顎骨および頬骨の荷重による変形測定を実時間ホログラフィ干渉法により行い干渉じまのパターンから、荷重領域の違いにより中顔面骨の骨折様式は 12 タイプ、眼窩内の変形パターンは 4 タイプに分類できると考えられた。このことは、今後の中顔面骨骨折の診断および治療の一助となると考えられる。

本論文の要旨は第 2 回顎顔面骨バイオメカニクス学会 (1994 年 12 月, 東京), 第 49 回日本口腔科学会総会 (1995

年 4 月, 岐阜) において発表した。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御懇篤なる御指導と御校閲を賜りました口腔外科学講座杉村正仁教授に心より感謝の意を表しますとともに、御校閲、御助言を賜りました第 2 外科学教室榑 寿右教授ならびに眼科学教室西信元嗣教授に深謝申し上げます。さらに本研究の遂行にあたって終始御指導戴いた近畿大学生物理工学部機軸会制御工学科松本俊郎助教授に心より感謝いたします。

文 献

- 1) **Le Fort, R.** : Etude experimentale sur les fractures de la machoire superieure. Revue Chirurgica 1 : 238-250, 1901.
- 2) **Knight, J. S. and North, J. F.** : The classification of malar fractures An analysis of displacement as a guide to treatment. Brit. J. Plast Surg. 13 : 325-339, 1960.
- 3) **Rowe, N. L. and Williams, J. L.** : Maxillofacial

- injuries. Churchill Livingstone Edinburgh London Melbourne and New York, p456-462, 1985.
- 4) **Matsumoto, T., Uemura, K., Tsuchida, M., Yabuuchi, H., Sugimura, M. and Iwata, K.** : Deformation measurement of midfacial bones by holographic interferometry. *in* Optics in Medicine, Biology and Environmental Research(Von. Bally, G. and Khana, S., eds.). Elsevier. p31-33, 1993.
 - 5) **Matsumoto, T., Watanabe, T., Tsuchida, M., Yabuuchi, H., Eguchi, Y., Uemura, K., Sugimura, M., Shigei, N. and Iwata, K.** : Holographic measurement on the displacement of facial bone. *in* Optical Methods in BioMedical and Enviromental Sciences(Ohzu, S. and Kamatsu, S., eds.). Elsevier, p184-187, 1994.
 - 6) **Naruse, F., Ichikawa, Y., Mizutani, H. and Kineda, T.** : Biomechanial study on mid-third facial fracture -stress analysis using a finite element method(FEM). *Jpn. J. Oral Biol.* **35** : 297-311, 1993.
 - 7) 葦沢 健, 嶋田 淳 : 眼窩下壁骨折の発生機序に関する研究. *日口外誌.* **39** : 684-695, 1993.
 - 8) **Aono, H., Hiranuma, Y., Kohgo, A., Yamamoto, Y., Sumida, H., Kawamoto, T. and Goto, H.** : Experimental study of behavior of craniofacial bone sutures under external force. *Bull. Josai Dent. Univ.* **15** : 313-329, 1986.
 - 9) 夫馬嘉昭 : 顔面骨骨折に関する力学的研究. *歯科学報.* **72**(No. 3) : 534-603, 1972.
 - 10) **Fujino, T. and Makino, K.** : Entrapment mechanism and ocular injury in orbital blowout fracture. *Plast. Reconstr. Surg.* **65** : 571-576, 1980.
 - 11) 藤野豊美, 田島定夫, 谷野隆三郎, 杉本智透, 青柳文也, 佐藤 武 : 眼部モデルによる眼窩床骨折の発生機序に関する研究. *形成外科* **17** : 427-434, 1974.
 - 12) 藤野豊美, 原科孝雄, 吉村陽子, 大島 恵, 佐藤 武 : 2次元眼窩モデルによる眼窩床骨折の発生機序と骨折耐性, その理論解析. *形成外科* **19** : 43-48, 1976.
 - 13) 藤野豊美, 中島竜夫, 丸山 優, 森部義裕, 佐藤 武 : 2次元眼部モデルによる眼窩床骨折の耐性. *形成外科* **18** : 244-248, 1975.
 - 14) 豊田裕介, 石川雅夫, 高 徳松, 志水和弘, 坂本栄一, 松田 清, 嶋田 淳, 山本美朗, 角田豊作 : 頬骨弓骨折の実験的研究. *城歯大紀要* **9** : 223-229, 1980.