

三次元有限要素モデルによる眼窩骨折発生機序の検討

滝澤 裕一¹⁾, 高橋 邦弘²⁾

¹⁾東邦大学医学部第2眼科学教室

²⁾慶應義塾大学理工学部機械工学科

要 約

眼窩骨折発生機序には諸説があるが、骨折時における眼窩の力学的特性については不明な点が多い。そこで、三次元有限要素モデルを用いた眼窩骨折のシミュレーションにより、負荷による眼窩の応力状態について、応力の大きさ、応力集中の二者を指標として解析した。その結果、眼窩下縁への直達外力で下壁が高応力となり、眼窩内圧上昇で眼窩下溝鼻側部に応力集中が認められるという、負荷条件と応力状態の関係が認められた。これらを骨折好発部位など実際の臨床像を考慮して検討する

と、眼窩下縁への直達外力および眼窩内圧上昇の両者が同時に作用した場合に応力状態と臨床像の関係が最も合理的に説明ができることから、眼窩骨折発生には眼窩下縁への直達外力および眼窩内圧上昇の両者が複合的に関与していると考えられた。(日眼会誌 99:972-979, 1995)

キーワード：眼窩骨折、応力集中、三次元有限要素モデル

Three-dimensional Finite Element Analysis of Blowout Fractures

Yuichi Takizawa¹⁾ and Kunihiro Takahashi²⁾

¹⁾Second Department of Ophthalmology, Toho University School of Medicine

²⁾Faculty of Science and Technology, Keio University

Abstract

There are a number of theories as to how orbital fractures come about, but there are still a lot of unanswered questions regarding the dynamic characteristics of the orbit at the time of the fracture. To answer these questions, we analyzed the degree and concentration of stress within the orbit depending on the loads placed upon it. We used a computer to create a three-dimensional finite element model which could simulate the orbital fracture process. We found that direct force applied against the inferior orbital rim by forces outside the eye results in increased stress within the lower wall of the orbit, and that stress tends to concentrate in the thin

nasal side of the orbital groove as pressure within the orbit mounts. When we compared these findings with clinical cases of orbital fracture, it became clear that the best way to explain the clinical data is by reference to the combined effect of direct force applied against the inferior orbital rim by elements outside the eye and the buildup of internal pressure within the orbit. (J Jpn Ophthalmol Soc 99:972-979, 1995)

Key words: Orbital fracture, Stress concentration, Three-dimensional finite element model

I 緒 言

眼窩縁の骨折を伴わない純型の眼窩骨折は、通常の骨折発生機序では理解し難い骨折であり、眼球運動障害など特徴的な臨床症状を呈する。この特異な骨折の発生機序について、眼窩内圧上昇を原因とする説(眼窩内圧上昇説)¹⁾と眼窩縁への直達外力による座屈が原因とする

説(眼窩床座屈骨折説)^{2)~4)}の2つの説が報告されている。

しかし、その後の追試では報告者により結果が異なっており^{5)~7)}、臨床像との関係についても、前者は、受傷機転、内壁での発生頻度、眼球損傷および骨折の形状、後者は、骨折線の方角および眼球運動障害の発生などの点での疑問があり⁸⁾⁹⁾、両説の正当性に対する評価は定まっ

別刷請求先：245 神奈川県横浜市戸塚区汲沢町 56 西横浜国際総合病院眼科 滝澤 裕一

(平成7年1月31日受付, 平成7年3月30日改訂受理)

Reprint requests to: Yuichi Takizawa, M.D. Department of Ophthalmology, Nishiyokohama International Hospital, 56 Gumisawa-cho, Totuka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa-ken 245, Japan

(Received January 31, 1995 and accepted in revised form March 30, 1995)

ていない。

また、眼窩骨折は多くの臨床統計により、特定の好発部位があげられ、下壁、中でも眼窩下溝鼻側部は特に発生頻度が高い部位であるとされている^{10)~13)}。しかし、その理由についても、臨床像から推論した報告はあるものの¹²⁾、不明な点が多い。

過去において著者らは、小児における眼窩骨折の骨折形態として、眼窩下溝鼻側部に沿った線条骨折が多く認められることから⁸⁾¹⁴⁾、同部の幾何学的形状の特異性(図1)に起因する応力集中が眼窩骨折発生に関与している可能性を報告⁹⁾¹⁴⁾してきた。眼窩骨折発生に応力集中が関与するという仮説は、眼球に大きな損傷を与えない程度の外力でも応力集中部位に骨折が生じることが力学的に予測されることから、臨床的にも眼窩骨折発生機序を説明しやすいと考えられたが⁹⁾、生体において直接測定することが困難な応力状態などの力学的特性については、通常の実験的な手法で検討することが難しく、従来の報告では十分に解明されていない。

本研究では、眼窩を構成する頭蓋骨の力学的特性から眼窩骨折発生機序を解明することを目的として、三次元有限要素モデルを用いた眼窩骨折のシミュレーションを行い、負荷による応力状態と眼窩骨折の好発部位との対比から、眼窩骨折発生における直達外力と眼窩内圧上昇の作用および特定の好発部位が存在する理由について力学的に検討した。

II 方 法

1. モデルの作成

モデルの形状データ作成には、通法により腐敗、乾燥を行ったと思われる乾燥ヒト頭蓋骨標本1体を参考にした。同標本のコンピューター断層撮影(CT)装置(TCT-900 S/200, 東芝社製)による前額断コンピューター断層撮影(CT)画像(5 mm Slice)(図2 a)をもとに、眼窩など形状の変化が大きい部分が密になるように有限要素法のメッシュ分割を設定、デジタイザー(T 012, オリンパス社製)を使用してメッシュの各要素を結合する節点の座標、厚みを計測し、外耳孔中心から前方の眼窩を含む頭蓋骨を、570 要素、448 節点に分割した三次元有限要素モデルを作成した(図2 b~d)。

2. 有限要素法によるシミュレーション

有限要素法は構造力学的な数値解析方法の一つで、対象となる構造体を、有限な大きさを有する要素の集合体で置き換えた後に、エネルギー原理を用いて構造全体の剛性マトリクスを導出し、外力を加えた際の各要素の応力・歪などを解析する方法であるが¹⁵⁾、今回は汎用の有限要素法プログラム(MARC Ver. K 3®, Mark 社製)を用いた。有限要素法によるシミュレーションの実施には、対象となる構造体の形状データ以外に材料定数、境界条件、負荷条件が必要である。このうち材料定数は、

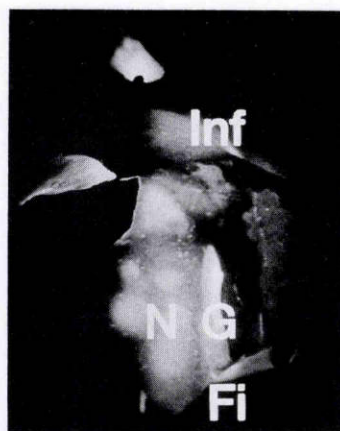


図1 上方からみた右眼窩下壁(上顎洞内光源による透光像)。

眼窩下溝鼻側部(N)で、眼窩下溝の走行に沿うように肥厚部と菲薄部が連続して認められた⁹⁾¹⁴⁾。G: 眼窩下溝上部, Fi: 眼窩下裂, Inf: 眼窩下縁

従来の報告よりヤング率(Young's modules)を24.5 GPa(ギガパスカル)、ポアソン比(Poisson's ratio)を0.34の均質等方性とし¹⁶⁾¹⁷⁾、また、境界条件は、モデルの外耳孔中心を通りドイツ水平面に垂直な面(基準面)上の節点を支持点として与え、両者とも一定とした。負荷は質量150 gの野球硬式球による打撲を想定、直達外力を眼窩縁の節点への集中荷重: 負荷条件(A~F)、眼窩内圧上昇を眼窩内面全体への等分布荷重: 負荷条件(P)として表現した。負荷量は衝突速度10 m/秒、負荷によるモデルの移動量および変形量が合計15 mmである場合の運動エネルギーと等価である集中荷重980 N(ニュートン)および等分布荷重0.78 MPa(メガパスカル)の一定とし、外力の作用点である負荷点(図3 a, b)が異なる7通りの負荷条件(A~F, P)を設定した(表1)。計算は慶應義塾大学理工学部機械工学科計算機室のワークステーション(DN 10000, Appolo 社製)上で行い、7通りの負荷条件の各々の場合について、引張り、剪断応力を合成して絶対値で表現したMises応力(von Mises stress)¹⁵⁾に換算した値を尺度とした、三次元モデル上の応力分布として表示した。解析要素は4節点を有する面に厚さを加味し、構成される四辺形厚肉線形シェル要素(#75要素)を用いた。

表1 負荷条件

	負荷点	負荷量	負荷の方向
直達外力	(A) 眼窩内壁縁上方	980 N	基準面に垂直
	(B) 眼窩内壁縁下方	同上	同上
	(C) 眼窩下縁鼻側	同上	同上
	(D) 眼窩下縁耳側	同上	同上
	(E) 眼窩外側壁縁下方	同上	同上
	(F) 眼窩外側壁縁上方	同上	同上
眼窩内圧上昇(P)	眼窩内面全体	0.78 MPa	眼窩内面の各要素に垂直

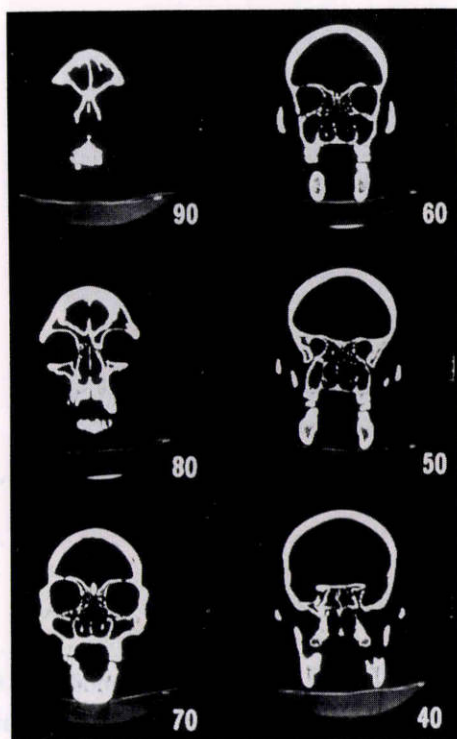


図2a 頭部コンピューター断層撮影 (CT) 画像 (眼窩を含む部位の前額断).

右下の数字は基準面からの距離 (mm).

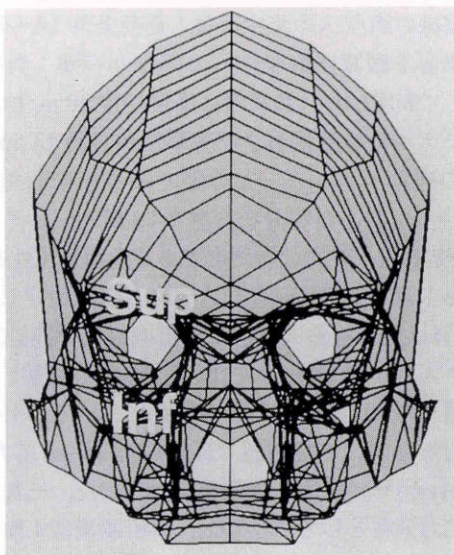


図2c 三次元モデル (正面).

Sup: 眼窩上縁, Inf: 眼窩下縁

3. 負荷条件と応力状態の関に基づく眼窩骨折発生機序の検討

検討項目ごとに応力状態の評価対象領域を設定し、負荷点を変化させたシミュレーションにより得られた三次元モデル上の応力分布をもとに、最大応力の大きさ、最大応力の部位、全節点の応力値および応力集中の有無を求め、構造力学的に高応力部、応力集中部位が骨折の発端となることを前提として¹⁵⁾、負荷条件と応力状態の関

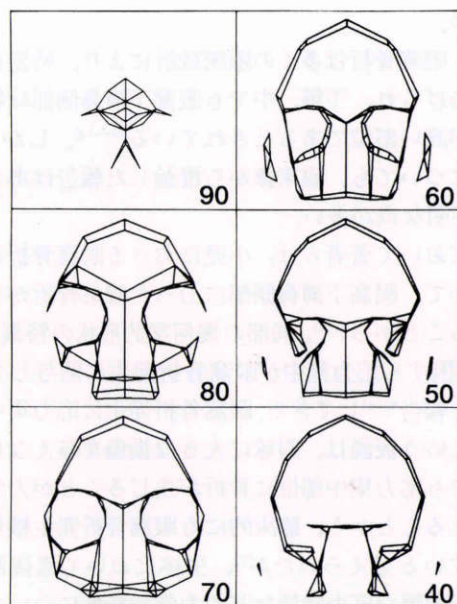


図2b 三次元モデル (眼窩を含む部位の前額断).

右下の数字は基準面からの距離 (mm) (図2aと同一部位を示す).

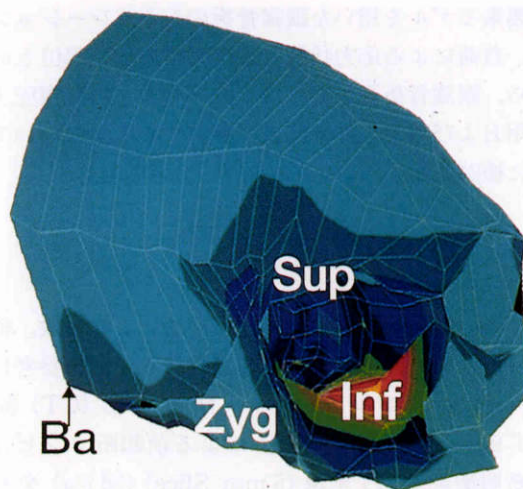


図2d 三次元モデル (右斜正面).

Sup: 眼窩上縁, Inf: 眼窩下縁, Zyg: 頬骨弓, Ba: 基準面 (後述の負荷条件 (C) の応力分布も併せ示す).

係について検討した.

検討項目

1) 下壁が高応力となる負荷条件

実際の受傷機転からみた眼窩縁への負荷は分布荷重として面状に加えられるが、本研究では一点に加わる集中荷重として扱っている。そのため、負荷点から近い部位では実際より応力値が高くなる傾向が認められる。この影響を受け難い下壁、内壁、上壁各々の中央部を評価対象領域に設定し、最大応力の部位、全節点の応力値を評価指標として下壁が内壁および上壁よりも高応力となる

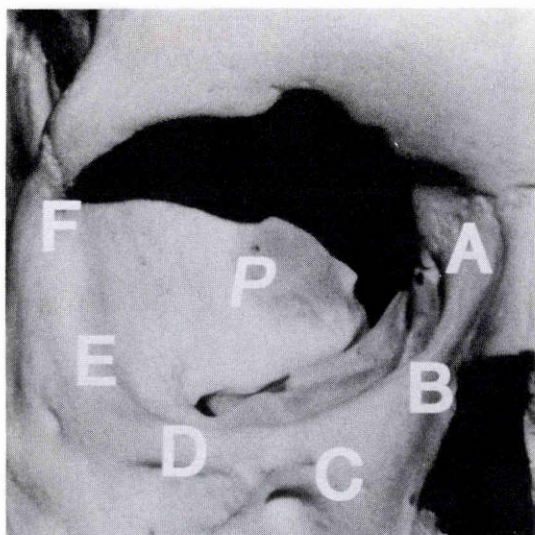


図 3a 負荷点の位置 (正面からみた右眼窩)。

A: 眼窩内壁縁上方, B: 眼窩内壁縁下方, C: 眼窩下縁鼻側, D: 眼窩下縁耳側, E: 眼窩外側壁縁下方, F: 眼窩外側壁縁上方, P: 眼窩内面全体

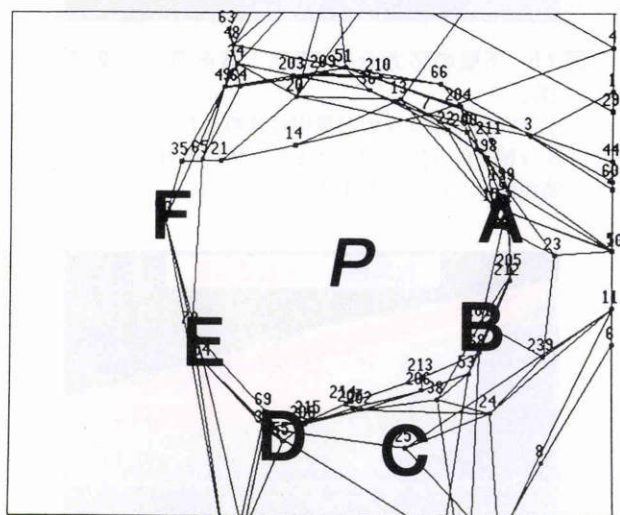


図 3b 計算モデル上の負荷点。

直達外力は眼窩縁の節点 (A~F) への集中荷重とし, 眼窩内圧上昇は眼窩内面全体 (P) への等分布荷重とした (図 3a と同一部位を示す。図中の数字は節点番号)。

負荷条件について検討した。

2) 評価対象領域 (N, G, M) の応力状態が骨折時の応力状態に近い負荷条件

自験例⁹⁾の骨折部位として最も多く認められた眼窩下溝鼻側部 (N), Johns ら⁶⁾により眼窩壁の中で骨の厚みが最も薄いと報告された眼窩下溝上部 (G) および内壁中央部 (M) の 3 領域を評価対象領域とし (図 4), 最大応力の部位が眼窩下溝鼻側部 (N) に一致する負荷条件について検討した。

3) 眼窩下溝鼻側部に応力集中が認められる負荷条件
前述の眼窩下溝鼻側部を評価対象領域とし, 同部への

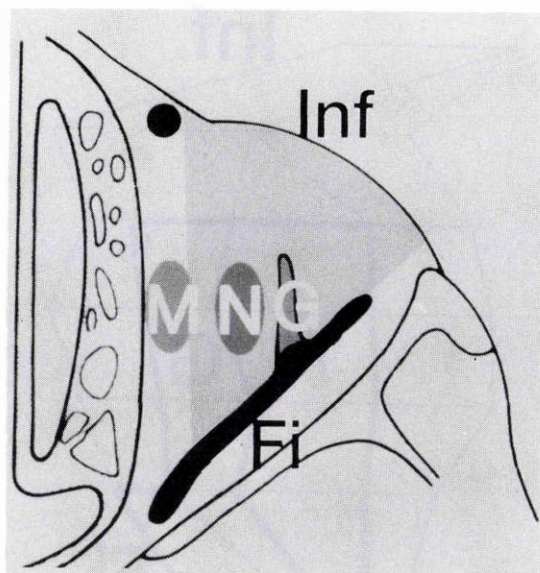


図 4 評価対象領域 (N, G, M)。

N: 眼窩下溝鼻側部, G: 眼窩下溝上部, M: 内壁中央部, Fi: 眼窩下裂, Inf: 眼窩下縁 (図 1 と同一部位を示す)

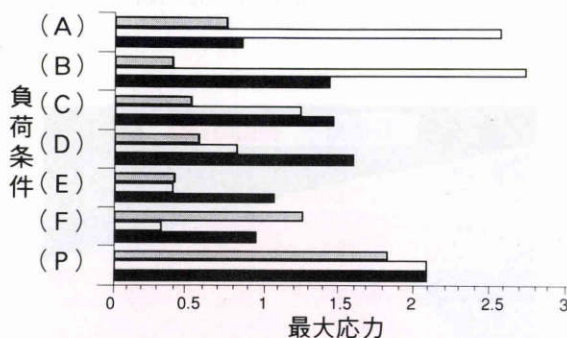


図 5 眼窩壁中央部の最大応力。

薄網: 上壁, 白: 内壁, 黒: 下壁

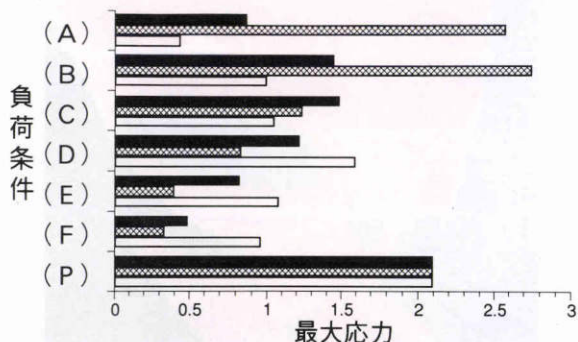


図 6 評価対象領域 (N, G, M) の最大応力。

黒: 眼窩下溝鼻側部 (N), 網: 眼窩下溝上部 (G), 白: 内壁中央部 (M)

明らかな応力集中の有無を指標として, 応力集中が生じる負荷条件について検討した。

4) 直達外力と眼窩内圧上昇の同時作用

直達外力の中で, 評価対象領域の応力状態が骨折時の

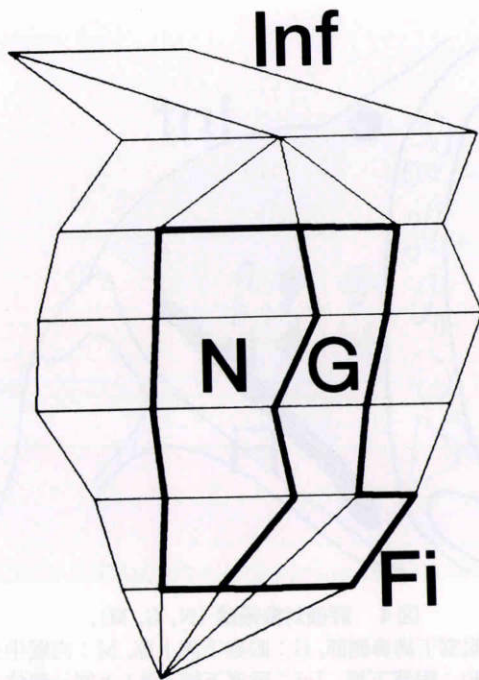


図7a 上方から見た三次元モデルの右眼窩下壁。
N：眼窩下溝鼻側部，G：眼窩下溝上部，Fi：眼窩下
裂，Inf：眼窩下縁（図7b，図8と同一部位を示す）

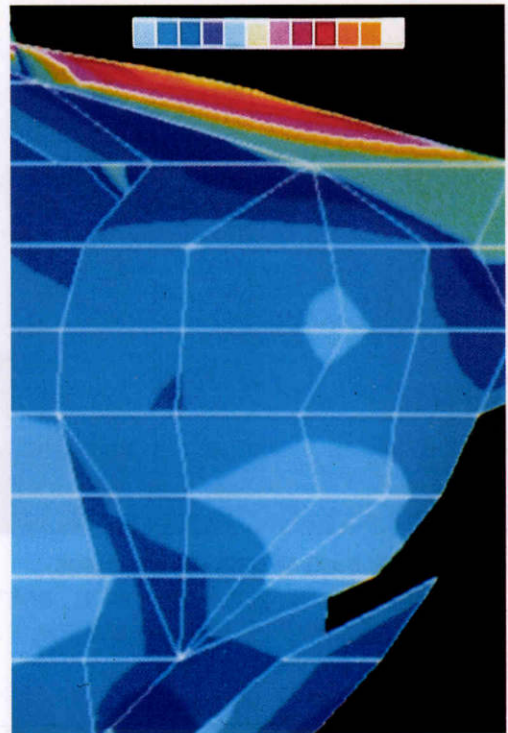


図7b 下壁の応力分布（眼窩下縁鼻側への直達外力）。

下壁内部に顕著な応力集中は認められない。スケールは相対的な応力の大きさを示し、青色部は低応力部、黄色部は高応力部を示す。

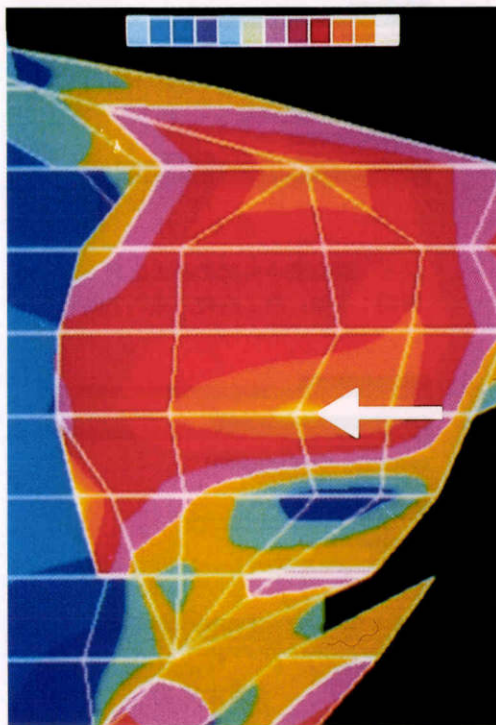


図7c 下壁の応力分布（眼窩内圧上昇）。

下壁中央部ほぼ全域で応力が高く、眼窩下縁より20 mm 後方の眼窩下溝鼻側部（矢印）を中心とした応力集中が認められた。スケールは相対的な応力の大きさを示し、青色部は低応力部、黄色部は高応力部を示す。

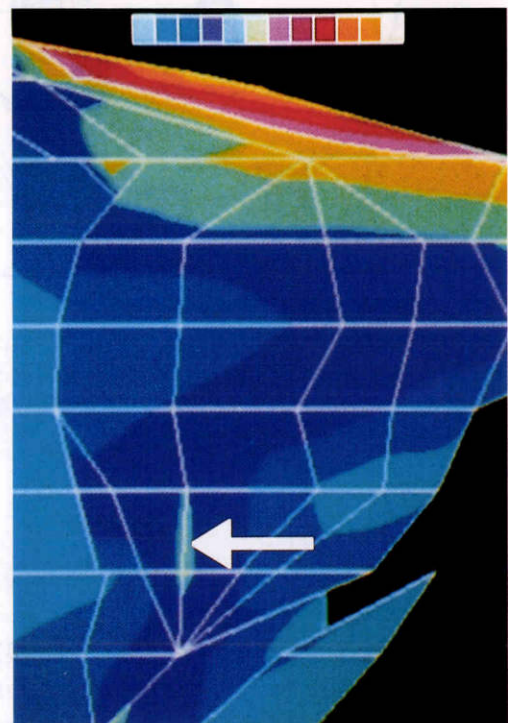


図8 下壁の応力分布（眼窩内圧上昇および直達外力の同時作用）。

下壁中央部に応力の高まりがあり、眼窩下縁より25 mm 後方の眼窩下溝鼻側部（矢印）に応力集中が認められた。スケールは相対的な応力の大きさを示し、青色部は低応力部、黄色部は高応力部を示す。

応力状態に近い負荷条件 (C) と、負荷条件 (P) が同量で同時に使用した場合の応力状態を、最大応力の部位と応力集中の有無を評価指標として検討した。

III 結 果

1. 下壁が高応力となる負荷条件

直達外力について、最大応力の部位を指標とすると、負荷条件 (C, D, E) の場合に下壁が内壁、上壁よりも相対的に大きく (図 5)、全節点の応力値を指標とすると、負荷条件 (C, D) の場合に下壁が内壁、上壁よりも有意に大きいことから (表 2, 3)、負荷条件 (C, D) すなわち、眼窩下縁への直達外力の場合に、下壁が内壁および上壁よりも高応力となる両指標の条件を満たしていた。しかし、負荷条件 (P) すなわち、眼窩内圧上昇では、両指標とも内壁と下壁に差を認めなかった (図 5, 表 2, 3)。

2. 評価対象領域 (N, G, M) の応力状態が骨折時の応力状態に近い負荷条件

評価対象領域の応力状態が骨折時の応力状態に近いのは、負荷条件 (C) すなわち、眼窩下縁鼻側への直達外力の場合だけであった (図 6)。

3. 眼窩下溝鼻側部に応力集中が認められる負荷条件

評価対象領域の応力状態が骨折時の応力状態に近い負荷条件 (C) (図 7b) を含む負荷条件 (A~F) すなわち、直達外力では、眼窩下溝鼻側部への顕著な応力集中は認めなかったが、負荷条件 (P) (図 7c) すなわち、眼窩内圧上昇では、同部への明らかな応力集中が認められた (表 4)。

4. 直達外力と眼窩内圧上昇の同時作用

応力の大きさについて最大応力の部位を指標とすると、下壁が内壁、上壁よりも、眼窩下溝鼻側部が眼窩下溝上部、内壁中央部よりも相対的に大きくなっていった (表 5)。また、応力集中の有無を指標とした場合には、眼窩下溝鼻側部への明らかな応力集中が認められた (図 8)。

IV 考 按

これまで眼窩骨折発生機序についての実験的検討は少なく、主なものとして 1957 年に Smith ら¹⁾により報告されたヒトの頭部を用いた実験と、1974 年に藤野ら^{2)~4)}により報告された眼窩モデルによるシミュレーションがある。ヒトの頭部を用いた実験は直接人体に外力を作用させることから、生体現象に近く、骨折部位や骨折線の方角など臨床像の検討には適していると考えられるが、外力作用時の誤差および個体差の影響が無視できない。一方、眼窩モデルによるシミュレーションは、前者で問題となる外力作用時の誤差および個体差による影響を軽減できること、同一条件の再現が容易であり結果を数値化できることなどから²⁾、客観性、定量性に優れ、力学的な検討には適しているが、臨床像の再現という点で問題が

表 2 眼窩壁中央部全節点の応力値

負荷条件	上壁 (n=7) (平均値±標準偏差)	内壁 (n=11) (平均値±標準偏差)	下壁 (n=17) (平均値±標準偏差)
(A)	0.71±0.26	1.49±0.82	0.47±0.10
(B)	0.35±0.09	1.42±0.47	0.71±0.22
(C)	0.42±0.10	0.65±0.30	0.95±0.29
(D)	0.42±0.10	0.41±0.24	0.84±0.19
(E)	0.43±0	0.28±0.13	0.46±0.22
(F)	0.75±0.23	0.33±0	0.52±0.11
(P)	1.49±0.30	1.28±0.38	1.33±0.39

表 3 眼窩壁中央部全節点の応力値についての有意差検定 (Mann-Whitney U test)

負荷条件	上壁：下壁	内壁：下壁
(A)	ns	p<0.001
(B)	p<0.001	p<0.01
(C)	p<0.001	p<0.05
(D)	p<0.001	p<0.001
(E)	ns	p<0.01
(F)	p<0.001	p<0.001
(P)	ns	ns

ns：有意差なし

表 4 眼窩下溝鼻側部への応力集中

負荷条件	応力集中
(A)	(-)
(B)	(-)
(C)	(-)
(D)	(-)
(E)	(-)
(F)	(-)
(P)	(+)

表 5 直達外力と眼窩内圧上昇の同時作用時の最大応力

評価対象領域	上壁中央部	内壁中央部	下壁中央部
最大応力	0.86	0.70	0.98
評価対象領域	眼窩下溝鼻側部 (N)	眼窩下溝上部 (G)	内壁中央部 (M)
最大応力	0.98	0.78	0.70

あり、両者とも完全な方法とはいえない。

本研究では従来の検討方法の欠点を補うため、三次元有限要素モデルを用いた計算機シミュレーションにより応力状態を求め、その解析に際して臨床像と対比するという方法を用いた。

有限要素モデルを用いた計算機シミュレーションは、モデルの構成および条件設定に際して自由度が高く、また力学的な挙動が正確に再現できることから、臨床像を反映させやすく、弾性範囲における応力の推定に際して精度が高い方法である。この利点を生かした報告として、眼窩壁の偏位量あるいは応力の大きさを指標とした

眼窩骨折の二次元解析がある³⁾¹⁸⁾。しかし、骨のような脆性材料では破壊を来す降伏応力の大きさを明確に定義し難いため¹⁹⁾、これらの指標のみを用いた解析では信頼性に疑問がある。

そこで、著者らは特定の領域に好発するという眼窩骨折臨床像の特徴に注目した。多くの臨床統計により、眼窩骨折は下壁、中でも眼窩下溝鼻側部に好発することが報告^{10)~13)}されているが、骨折部位について力学的な観点で考えると、骨に限らず物体の破壊は応力集中部位を発端として生じる事実が知られている¹⁹⁾。また、正林²⁰⁾は骨折が引張り歪の生ずる最大応力の部位を発端として起こるとし、Evansら²¹⁾も引張り歪の部位から正確に骨折部位を予測できるとしており、最大応力の部位と骨折の発端部位とは直接の関係がある。これらのことから、シミュレーションで得られた負荷条件に対応する応力集中部位、および最大応力の部位の各々から推定される骨折部位と、実際の骨折部位とを対比させることにより、力学的に骨折を来しやすい負荷条件についての推定が可能であり、眼窩骨折発生要因についても直達外力と眼窩内圧上昇の作用の比較に応用出来ると考えた。

眼窩骨折の発生機序はSmithら¹⁾により初めて報告され、眼窩内圧上昇により、眼窩壁の最も弱い下壁が骨折を起こすとした。その後、藤野ら^{2)~4)}は眼窩下縁への直達外力による座屈で下壁に骨折を起こすことを実証しているが、力学的に両者を比較した報告は少ない。下壁に好発するという臨床像からのアプローチとして、下壁と上壁との比較から、葦沢ら²²⁾は乾燥ヒト頭蓋骨標本の歪測定から、直達外力では上壁よりも下壁の歪が大きいこと、大野ら¹⁸⁾は眼窩壁の厚みを一定とした有限要素モデルを用いたシミュレーションにより、眼窩内圧上昇の場合には下壁の変位が常に上壁よりも大きいことを実証している。しかし、上壁と下壁の比較では眼窩壁の厚み、眼窩壁の形状および隣接臓器、構成骨数などの差異により、下壁の方が骨折を来しやすいことが報告¹⁾⁶⁾²²⁾されており、直達外力、眼窩内圧上昇のいずれの場合も、上壁よりも下壁に骨折を来しやすいという結果からは、両者の優劣を判断することは難しい。

そこで本研究では、下壁と骨折部位として下壁に次いで多い内壁を対象として⁸⁾¹⁴⁾、直達外力と眼窩内圧上昇の作用について検討した。その結果、応力の大きさを指標とすると、眼窩下縁への直達外力では最大応力、全節点の応力値の両指標とも下壁が内壁よりも高応力であるのに対して、眼窩内圧上昇では両指標とも下壁と内壁で差を認めず、眼窩下縁への直達外力の方が下壁への骨折集中を説明しやすいと考えられた。一方、応力集中を指標とした場合、直達外力では眼窩下溝鼻側部に顕著な応力集中が認められず、下壁の中で眼窩下溝鼻側部への骨折集中を説明することが難しいと考えられた。このように、直達外力および眼窩内圧上昇各々単独の作用では、指標

により相反する結果となることから、骨折部位の力学的説明が難しく、また、両者の優劣についても判断できない。しかし、眼窩下縁鼻側への直達外力および眼窩内圧上昇が等量作用すると仮定して両者の同時作用を考えると、眼窩下溝鼻側部に最大応力部位および応力集中の両者が一致し、各々単独では満たしていなかった眼窩下溝鼻側部に骨折が好発する応力状態の条件を満たし、両者の複合効果を示唆する結果が得られた。

以上から眼窩骨折発生機序を力学的に推察した場合、眼窩下縁への直達外力により下壁が高応力となり、同時に眼窩内圧上昇により眼窩下溝鼻側部に応力集中が生じ骨折を生ずるとすると、眼窩骨折発生機序と骨折好発部位の両者が理論的に説明され得ると思われた。また、臨床像と対比しても、眼窩縁に大きな損傷を与えない程度の直達外力と眼球に大きな損傷を与えない程度の眼窩内圧上昇の同時作用で骨折が生じると考えれば、骨折発生機序と臨床所見の一元的な説明に際し、矛盾しないと考えられた。

眼窩骨折の発生を複数の外力作用機序で説明した報告²⁾⁵⁾はすでにあり、著者ら⁹⁾も直達外力と眼窩内圧上昇が同時に作用することにより、骨折発生機序と臨床所見を一元的に説明し得ることをすでに報告している。しかし、両者の関与を力学的に実証したのは今回が初めてであり、眼球および軟部組織の存在について考慮していない点で問題があるものの、負荷条件と応力状態の関係からの推察した結論は、眼窩骨折発生機序を解明する上で十分に意義があると考えられた。

最後に、今回検討対象とした条件以外に、生体側および外力側のいくつかのパラメーターも大きく応力状態に影響している可能性が考えられる。この点に関しては、受傷機転が多彩な外傷のシミュレーションの限界とも考えられるが、今までは困難であった眼窩骨折の力学的な解析について、一つの方法を示したことは意義のあることと考えられた。今後は感度解析などの手法により、前述のパラメーターの影響を含め検討を行っていく予定である。

稿を終えるに当たり、御指導を賜りました東邦大学医学部第2眼科学教室矢部比呂夫助教授に深謝致します。

本論文の要旨は第97回日本眼科学会総会(平成5年6月、札幌)、第47回日本臨床眼科学会(平成5年10月、横浜)において発表した。

文 献

- 1) Smith B, Regan WF: Blowout fracture of the orbit. Mechanism and correction of internal orbital fracture. *Am J Ophthalmol* 44: 733-739, 1957.
- 2) 藤野豊美, 田嶋定夫, 谷野隆三郎, 杉本智透, 青柳文也, 佐藤 武, 他: 眼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.

- 3) 佐藤 武, 藤野豊美, 中島英雄, 森部義裕: コンピューターによる眼窩床骨折発生機序の理論解析. 形成外科 17: 550—556, 1974.
- 4) 藤野豊美, 中島英雄, 吉村陽子, 佐藤 武, 大島 恵, 中島竜夫: 3次元モデルによる眼窩床骨折の発生機序に関する研究. 日形会誌 1: 10—18, 1981.
- 5) Dodick JM, Galin MA, Kwitko ML: Concomitant blowout fracture of orbit and rupture of the globe. Arch Ophthalmol 84: 707—709, 1970.
- 6) Jones DEP, Evans JNG: Blowout fractures of orbit. J Laryng Otol 81: 1109—1120, 1967.
- 7) McCoy FJ, Chandler RA, Magnan CG, Moore JR, Siemsen G: An analysis of facial fractures and their complications. Plast Reconstr Surg 29: 381—392, 1962.
- 8) 滝澤裕一, 矢部比呂夫, 木村肇二郎: 小児の眼窩骨折21例の検討. 眼紀 44: 355—358, 1993.
- 9) 滝澤裕一, 矢部比呂夫: 眼窩壁形状についての検討. 眼紀 44: 1532—1536, 1993.
- 10) Greenwald HS, Keeney AH, Shannon GM: A review of 128 patients with orbital fractures. Am J Ophthalmol 78: 655—664, 1974.
- 11) 木村肇二郎, 平形寿孝: Blowout fracture の手術例, 非手術例についての検討. 眼紀 32: 1074—1079, 1981.
- 12) 尾崎真由美, 中村泰久: 眼窩壁骨折の臨床像. 眼紀 37: 456—462, 1986.
- 13) 稲富 誠: 眼窩顔面骨折. 中村泰久(編): 眼科 Mook, 32, 眼の形成外科. 金原出版, 東京, 144—154, 1987.
- 14) 矢部比呂夫: 眼窩底吹き抜け骨折と眼窩. 田野保雄(編): 眼科診療プラクティス 5. 眼科手術に必要な局所解剖. 文光堂, 東京, 236—241, 1993.
- 15) 朝田泰英, 飯田国広, 石田 誠, 今井兼一郎, 鶴戸口英善, 植村益次, 他: 機械工学便覧. 改定第6版, 分冊4, 日本機械学会, 東京, 10—20, 1976.
- 16) 嶋田 淳: 下顎頰部骨折の発生機序に関する構造力学的研究. 口科誌 32: 1362—1381, 1986.
- 17) 中島 功, 近藤潤一, 藤原道夫: 下顎骨の力学的特性に関する研究. 歯科学報 84: 1951—1961, 1984.
- 18) 大野 仁, 伏屋陽子, 蒲山俊夫, 滝沢英夫, 松崎 浩: 眼窩底骨折の発生機序. コンピューターによる解析. 眼紀 39: 1997—2003, 1988.
- 19) 高橋幸伯, 町田 進: 基礎, 材料力学. 培風館, 東京, 30—32, 1991.
- 20) 正林陽高: 骨模型の光弾性実験. 日整会誌 28: 37—58, 1953.
- 21) Evans FC, Lissner HR: “Stresscoat” deformation studies of the femur under static vertical loading. Anat Rec 100: 159—190, 1948.
- 22) 葦沢 健, 嶋田 淳, 向後 彰, 山本美朗, 角田豊作: 眼窩床骨折の発生機序に関する構造力学的研究. 城西歯大紀要 16: 400—429, 1987.