

NPPV 用鼻マスク装着時に作用する応力の計算力学的検討

Computational dynamics of stress to act on at the time for NPPV Nasal Mask

二宮敬一(正会員), 吉田祐介 (非会員), 半田俊弘* (非会員),

尾田雅文*** (正会員), 原利昭**** (非会員)

Keiichi Ninomiya, Yuusuke Yoshida, Toshihiro Handa*,

Masafumi ODA*** and Toshiaki HARA****

Abstract

In late years, the patient load of chronic respiratory failure disease, such as a Obstructive Pulmonary Disease (COPD) or Sleep Apnea Syndrome (SAS) increases. Chronic obstructive pulmonary disease (COPD) and sleep apnea syndrome (SAS), is increasing. For the patient, in whom such condition is comparatively serious, non-invasive positive pressure ventilation (NPPV) may be prescribed. Since this disposal method uses a nasal mask, a patient is treated non-invasively. Although, It is reported that skin obstacles arise, such as a pressure necrosis and compression gangrene, by the reason the mask pressed the face.

Consequently, it was created that the finite element model of the face portion based on a human body slice picture, and the stress which acts on the contact area of a nasal mask was calculated. And, It turned out that a nasal mask suitable for the form of an individual face is required, in order to reduce a skin obstacle.

Key Words

Medical and Welfare Assistance, Muscle and Skelton, Biomechanics, Medical Equipment, Medical Engineering, Finite Element Method

1. 緒言

近年, 慢性閉塞性肺疾患(COPD)や睡眠時無呼吸症候群(SAS)などの慢性呼吸不全疾患の患者数が増大している。例

2008年 6月 16日受理

2008年 9月 22日最終原稿受理

新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟県新潟市西区五十嵐 2
の町 8050 番地

※ キヤノンイメージングシステムズ株式会社

※※ 新潟大学地域共同研究センター

※※※新潟大学工学部

Graduate School of Niigata University, 8050 Ikarashi, 2no-cho,
Nishi-ku, Niigata-shi, Niigata 950-2181, Japan

※ Canon Imageing system technologies inc.

※※ Center for Cooperative Research, Niigata University

※※※Faculty of Engineering, Niigata University

えばCOPDは, 国内だけで患者数が約 530 万人おり⁽¹⁾, また, WHOは全世界の死亡原因の第 4 位であること, ならびに今後, 死亡原因に占める割合がさらに高まると予測されることを報告⁽²⁾⁽³⁾しており, 社会問題視されている。他方, SASの患者数は, 潜在患者を含めると国内で約 200 万人と推測⁽⁴⁾され, これもまた同様に解決すべき問題として挙げられる。

これらの慢性呼吸不全の疾患が, 比較的重度である場合の治療法の一つとして, 人工呼吸療法が適用される例が多い。ここで, 在宅医療患者に適用されている人工呼吸療法については, 図 1 に示すように 1998 年以降, 挿管下または気管切開下で行う侵襲的人工呼吸療法(TPPV)に代わり, 非侵襲的陽圧式人工呼吸療法(NPPV)が普及⁽⁵⁾しつつあり, その適用者数は以後増加している。これは, TPPV療法と比べてNPPV療法は, 簡便かつ早期導入が容易である特徴を有しており, 気管内手技上の血圧上昇や誤嚥がないこと, 挿管に伴う合併症

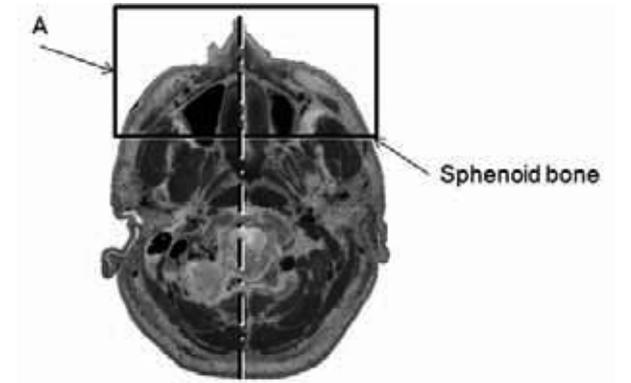
が回避できることの他、会話や食事の制限がなく患者の日常生活動作、すなわちADLの確保に寄与し、引いては生活の質すなわちQOL向上に寄与するものと考えられる。

一方、NPPV療法において、マスクが長時間顔を圧迫することにより、マスク接触部位で皮膚組織の圧迫壊死や、褥瘡が発生する事例⁽⁶⁾が多数報告されている。これは、空気漏れすなわちリークに対応するために、鼻マスクの締め付け力を大きくしていることにも起因すると考えられる。また、医療現場ではマスクの圧迫による痛みや皮膚損傷予防のために、ドレッシング材の塗布やビニルテープを貼付すること等に対応する一方で、リークについては、機器の供給圧の自動補正機能を利用する他、テープ材を用いて開口部の面積を縮小する等の処置を行っているものの、欧米人の顔形状に基づき開発された鼻マスクを、日本人に適用している現状を鑑みて、鼻マスクの導入および継続的使用の際には、医療スタッフの熟練度や症例に応じた個別の対応を要している。これに対し、鼻マスクの素材や機器の供給圧の補正機能に関する報告例⁽⁷⁾は存在するものの、顔形状を考慮したマスク形状に関する研究は見当たらず、未だ汎用性のある解決方法についての提案はされていないようである。

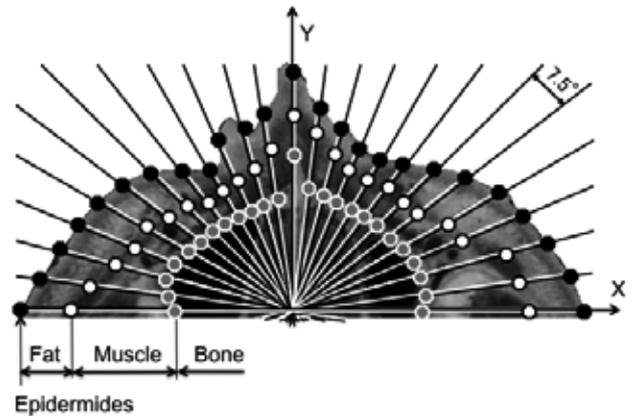
一方、人体の形態計測結果を生体力学的手法に基づいて生活器具設計に生かすための研究として、例えば、靴や衣類、メガネ等を対象として最適形状を求めるための研究が行われている。例えば矢原等⁽⁸⁾は、日本人の足を対象として、レーザ測長により3次元形態のデジタルモデルを多数構築し、これらの足型を4タイプに分類することで、最適形状の靴の提供とそれに伴う開発費用を最小限に留める提案⁽⁹⁾をしている。しかしながら、褥瘡等の皮膚障害を予測するためには、人体の表面形状のみならず脂肪層、筋肉等の軟部組織ならびに骨格形状を併せてモデル化し、装着する機器との接触問題を解いて各組織に作用する応力状態を明らかにすることが、より実用に即した解を得るうえで有利であると考えられる。

そこで本研究では、鼻マスク使用時における褥瘡等の皮膚損傷の問題を解決するための基礎的研究の一環⁽¹⁰⁾として、人体断面画像に基づき頭部有限要素モデルを作成するとともに、このモデルに鼻マスクを装着した際に作用する応力を有

限要素法により求めた。また、感圧導電ゴム法により計測した先行研究例と解析により得られた結果を比較検討し、本解析手法の妥当性を検討した。



(a) The measurement area



(b) The detail view of part A

Fig.2 The human body slice picture

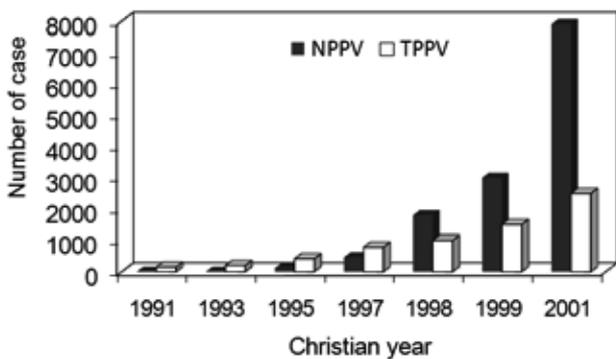


Fig.1 Respiratory therapy in home medical care

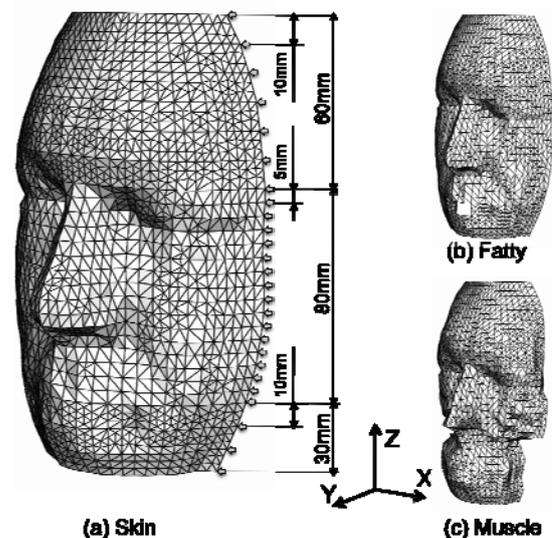


Fig.3 The FE model

2. FEモデルの構築と応力解析

2.1 FEモデルの作成

本研究では、鼻マスク装着部位近傍の人体FEモデルを作成するにあたり、図2中(a)に示すように人体断面画像⁽¹¹⁾を利用した。この画像の左右蝶形骨最前部を結ぶ中心位置を基準とし、同図中(a)内に示す四角の枠に示すような範囲を測定対象として定めた。さらに、同図中(b)の丸印で示すように、7.5度間隔に骨-筋肉境界面、筋肉-脂肪境界面、表皮における座標点をそれぞれ取得した。ここで、皮膚-脂肪境界面は、画像上で境界部が不鮮明であり、抽出することが困難であったことから、表面から2mm内側をその境界面と仮定し、得られた座標データに基づき、鼻マスク装着部位近傍の顔モデルを作成した。作成した鼻マスク装着部位近傍の顔モデルを図3に示す。ここで、モデルの座標系は人体スライス画像に基づき設定しており、解剖学的正位に対して、左右方向をX軸、前後方向をY軸、上下方向をZ軸とそれぞれ置いた。ここで、モデル構築の際に用いたスライス画像は水平面の断面画像であり、上下方向のスライス幅は、マスクの接触部近傍においては、応力勾配が大きくなることを考慮して5mmとする一方で、接触部遠位においては10mmとした。さらに、得られた各組織境界座標をRhinoceros Ver.3.0を用いて編集し、3次元モデルを作成した後に、メッシュサイズを5mmに設定して自動分割し、FEモデルを作成した。

図4は、本研究の解析対象として用いたフジ・レスピロニクス社製の鼻マスク Comfort Classic M サイズを示しており、同3次元モデルはSolidWorks2005を用いて作成した。上端ならびに下端に固定用ストラップを通すためのクリップ部が存在する。また、額と接触する部位においては、ブロック形状(33mm×22mm×19.2mm)のゲルパッドが設置され、接触圧力の分散に寄与している。なお、このゲルパッドはゲルを膜で覆う2層構造を有している。一方、頬等に接触する部位には、厚さ8mmのシリコンパッドが内側に折り曲げた状態で設置されており、装着時における接触圧力の分散と、圧縮空気のリーク防止の双方に対応している。なお、同図中に代表寸法を併せて記した。

2.2 解析条件および方法

実際の鼻マスク使用時に際し、圧縮空気のリークを防止する観点から、看護師は患者に対してマスク上部のストラップを強く絞めるように指導しており、先行研究⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾においては、看護師が装着した鼻マスクと皮膚間の接触圧力を評価している。本研究では同先行研究における結果等を考慮して、マスク上部のストラップ用クリップは0.4N、一方、下部のクリップは0.2Nの押し付け荷重がそれぞれクリップ部に一樣に作用するよう設定した。ここで、荷重を作用させる領域を図中矢印のクリップ部白抜き領域で示した。また、接触問題として本問題を扱うとともに、鼻マスクの設置位置については、片当たりしないことならびに出来るだけ接触圧力が一樣分布に近づくよう留意して設定した結果、図6中(a)に示すような

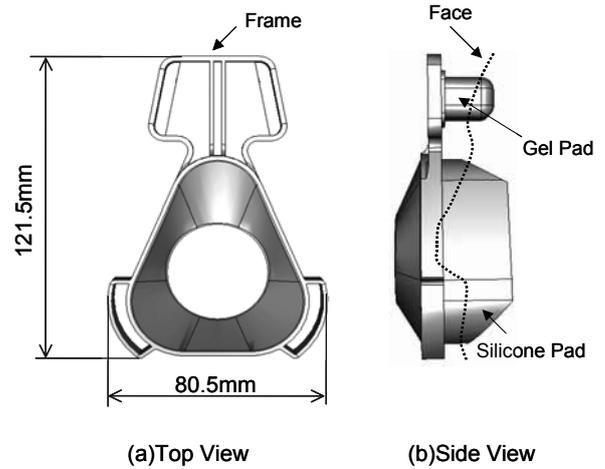


Fig.4 NPPV nasal mask

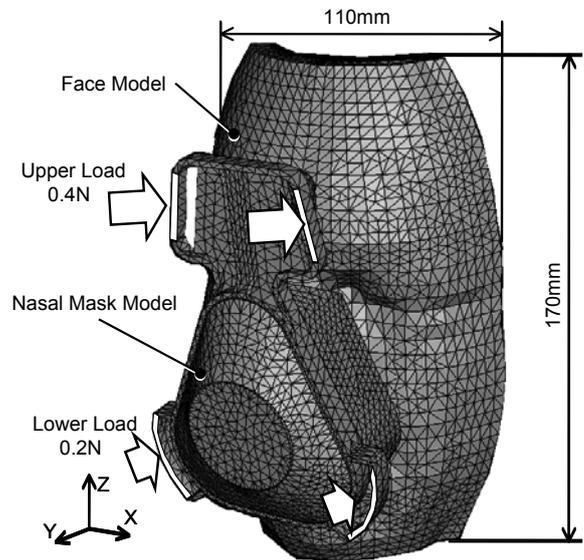


Fig.5 The analysis model and loading condition

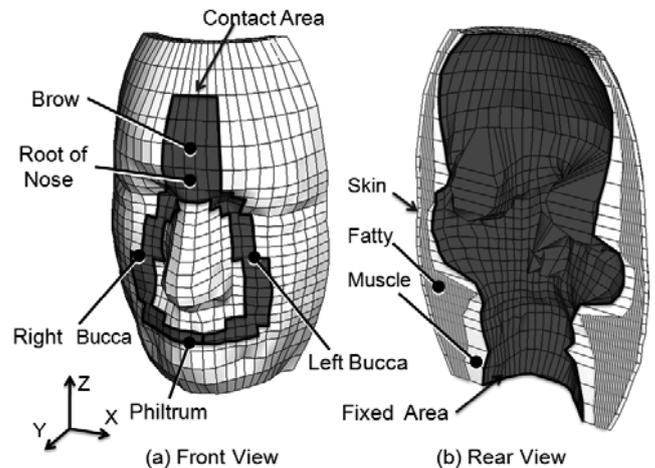


Fig.6 Contact Area and Boundary Condition

鼻マスクと皮膚との接触領域を得た。

一方、皮質骨の弾性係数を 14GPaから 18GPaの範囲として解析した例⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾が多く報告されており、軟部組織での値に比べてこの値は極めて大きい。よって、軟部組織に作用する応力解析を主たる目的とした場合、骨を準剛体として見なすことが可能であると考えられる。すなわち、本研究の目的は、軟部組織の応力状態ならびに、鼻マスク装着部の接触圧力を明らかにすることを目的としていることから、解析モデルの単純化を考慮し、骨部のモデリングは行わずに、図 6 中(b)に示すように、骨との境界面に位置する要素の節点のX,Y,Z方向のそれぞれの変位を拘束することとした。

表 1 は、解析モデルの要素数、物性値⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾をそれぞれ示している。なお、要素は全て四面体要素に分割した。また、有限要素応力解析に際し、皮膚、脂肪および筋肉の各組織の境界面については、それぞれ固着する条件を設定したことから、境界面を境にモデルの物性値は不連続となる。一方で、鼻マスクについては、マスクのクッション機能であるシリコン部、ゲルパッド部については、変形量大きいことから超弾性体として定義して解析した。なお、超弾性体⁽¹⁸⁾に関しては、簡略のため粘性項を省略し、線形近似した多項式モデルを使用している。また、マスクフレーム部はシリコン部、ゲルパッド部に比して剛性が比較的高いことから剛体として扱った。有限要素応力解析に際し、ABAQUS / Standard ver6. 5-1 を用い、弾性接触問題として解析を行った。

3. 結果と考察

図 7 に FEM 応力解析結果の一例であり、鼻マスクと顔表面を固着、すなわち摩擦係数を無限大として得られた Mises 応力分布である。同図中(a)は顔方面における Mises 応力分布を、応力値に応じて色分けで示している。額、鼻根、左右の頬にそれぞれ応力値の比較的大きな領域が存在し、特に額周辺ならびに鼻根周辺における応力値は大きい。これは、臨床における現状を考慮して、上部クリップにおける作用荷重が大きいことに起因する。

同図中(b)は A-A 断面の、一方同図中(c)は B-B 断面における Mises 応力の分布をそれぞれ示している。前者においては、鼻マスクに作用する応力も併せて示しており、ゲルパッド下端の額に接する領域ならびにシリコンパッド下端の人中に接触する領域において、特に応力が集中して作用していることが判る。この接触領域においては、皮膚層の一部に 3.25kPa 程度の Mises 応力が作用している一方で、脂肪の弾性係数が比較的小さいことから、応力集中が緩和する傾向を示している。そのまた一方で、鼻マスク接触部の深部である筋肉層においては、応力が集中して作用し、その値は最大で 0.67kPa 程度である。すなわち、筋肉層においても応力の集中が認められたことから、褥瘡発生を考慮する上で鼻マスク装着部の接触圧力のみならず深部に作用する応力についても検討対象とする必要があることが示唆された。

図 8 は、同様に摩擦係数を無限大として解析した結果の一

Table 1 Material properties

Element	Young's Modules	Poisson's Ratio	Number of Element	Number of Node
Skin	88kPa	0.495	12544	4247
Fat	1kPa	0.495	15082	4711
Muscle	0.1MPa	0.45	17174	5060
Silicone	0.3MPa	0.49	2457	2574
Gel Pad	10kPa	0.495	3012	3598

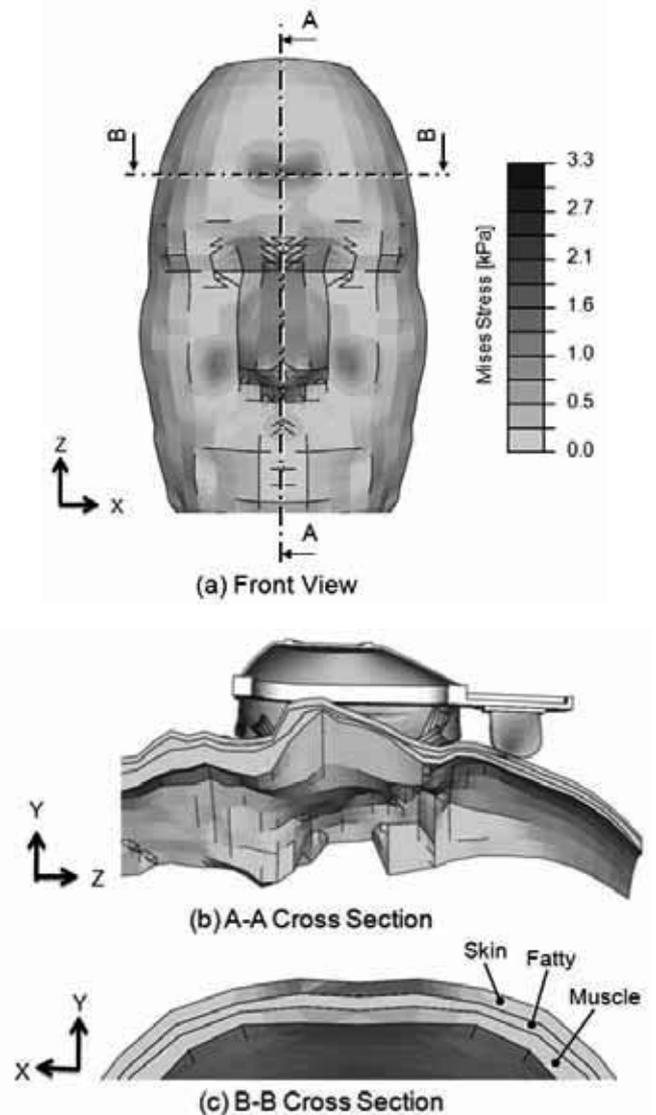


Fig.7 The distributions of Von Mises stress

例であり、顔表面の変位の分布を示している。A-A 断面における変位分布を同図中(b)に示す。図 7 の Mises 応力の分布図において比較的高い応力を示す箇所と、本分布図において大きな変形量を示す領域と一致している。また、同図中 A-A 断面における変形量の分布を同図中 (b) に鼻マスク断面の変形量分布を併せて示した。これらの図より、鼻マスクのシリコン部が接触する頬部ならびに鼻根部周辺において、比較的大

きな変形が生じていることが判る. ここで, 各部位の軟部組織の厚さは, 頬部が 26mm 程度に比して鼻根部は 6.67mm 程度で, 後者の厚さはうすい. 一方, 圧縮量は頬部が 0.254mm, 鼻根部が 0.08mm であることより, 歪みは頬部が 0.98%程度, 鼻根部が 1.2%程度であり, 特に鼻根部において大きな変形を生じていることが判る.

褥瘡の発生要因として, 一般的に外圧による血流障害⁽¹⁹⁾が知られている. 特に, 鼻マスク使用時における褥瘡の症例報告⁽²⁰⁾では, 鼻根部周辺での発生頻度が高く, 本解析結果におけるMises応力ならびに歪み量の大きい領域と一致している.

図9は, 鼻マスクと顔の接触部の摩擦係数を無限大, すなわち固着としてFEM応力解析し, この結果に基づいて鼻マスクと皮膚間に作用する接触圧力を求めた結果である. また併せて, 感圧導電ゴムセンサを用いて鼻マスクと皮膚間に作用する接触圧力を実測した吉田等⁽¹²⁾の結果を示している. 実測結果における被験者をモデルとしてFEM解析を行ってはならず, 従って, 顔の形状ならびに大きさは異なることから, 当然のことながら両者の結果は差異が生じているものの, 両者ともに, 額部周辺の接触圧力が他の領域より大きく, 人中周辺部は小さい値を示すなど, 定性的に一致していることから, 本FEM解析結果は妥当なものと考えられる. 一方, 額部および鼻根部における接触圧力値は, 実測値に比してFEM解析値の方が小さく接触圧力分布に差異が生じていることが判る. なお, 吉田等は日本人を被験者として計測したのに対して, 本研究のFEM解析に用いた顔モデルは, 欧米人の人体断面画像に基づいて構築している. よって, FEM解析結果と実測値の差は, 顔形状に基づくものであり, 特に, 日本人の顔形状の特徴である鼻根部分が未発達であることに起因しているものと考えられる. すなわち, 欧米人を対象として形状を最適化した鼻マスクを日本人に適用する例が多く, この場合, リーク防止の観点から上部ストラップを強く締め付けることから, 特に額部および鼻根周辺部における接触圧力が顕著に増加する傾向にあるものと考えられる.

図10は, 鼻マスクと皮膚間の摩擦条件について, 滑りなし, ならびに摩擦係数を 0.5 および 0.3 として応力解析を行った結果の一例であり, 鼻マスク接触域の各部位における接触圧力をそれぞれ比較して示している. 摩擦係数が接触圧力分布に与える影響は大きく, 特に, 頬よりも下方の領域においては, その傾向が顕著である. 一方, 摩擦係数を小さくすることで, 応力集中を緩和する効果があるものと予測されたが, 本解析結果では明確にこのような傾向は示されていない. 例えば, 摩擦係数が 0.5 の場合において, 鼻根部の接触圧力が他の摩擦条件に比べて, 最も大きい値を示している一方で, 他の領域では小さい値を示し, 最も接触圧力が分散して作用する傾向が得られた.

4. 結 言

本研究では, 鼻マスク使用時における褥瘡等の皮膚損傷の

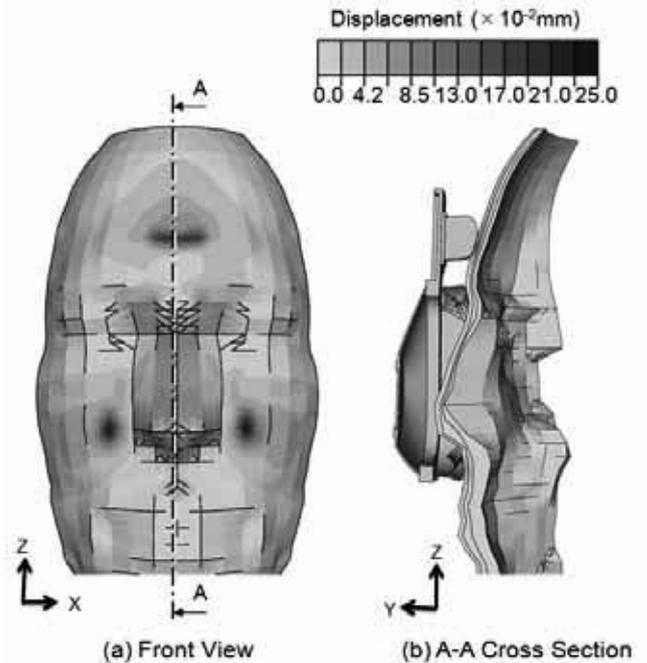


Fig.8 The distributions of Displacement

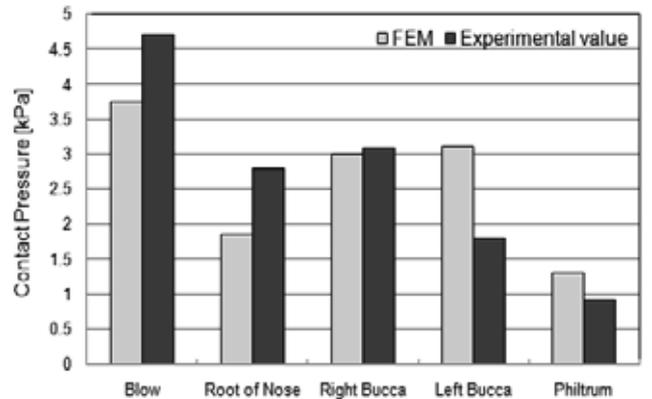


Fig.9 Comparison between FEM and Experimental Value

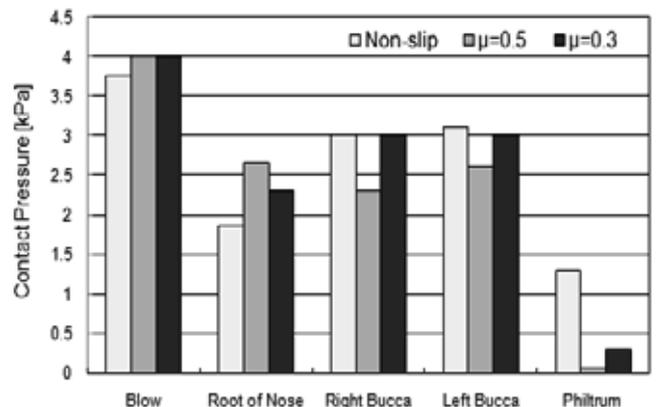


Fig.10 Influence of coefficient of friction in contact pressure

問題を解決するための基礎的研究の一環として、人体断面画像に基づき頭部モデルを作成するとともに、これを用いて鼻マスクを装着した際に作用する応力を有限要素法により求めた。また、接触圧力の先行研究例における実測値と本解析により得られた結果を比較検討し、本解析手法の妥当性を評価した。

- (1) 本FEM解析により得られた鼻マスク装着時の接触圧力分布と、先攻研究における実測値は、定性的に一致することから、本FEM解析の結果の妥当性が示された。
- (2) 本FEM解析結果と先行研究の実測値の差は、主に欧米人と日本人の顔の特徴である鼻根部の発達の程度によるものと考えられる。特に、褥瘡が発生しやすい額部および鼻根周辺部において、日本人の顔形状では接触圧力が顕著に増加する傾向がある。従って、日本人の顔形状を考慮した鼻マスク形状の検討が必要である。
- (3) 脂肪層は他の軟部組織よりも弾性係数が小さいことから、鼻マスク装着による応力集中を緩和する効果を有するものの、それよりも深部において応力が集中して作用する領域が存在し、この領域から褥瘡が発生する可能性の一致が示唆された。従って、理想的な鼻マスク形状を得るためには、鼻マスク装着部に作用する接触圧力のみならず、深部に作用する応力についても検討する必要がある。

参考文献

- (1)Y. Fukuchi et al. COPD in Japan:the Nippon COPD Epidemiology study. *Respirology* 2004;9:P.458-465.
- (2)World Health Organization, Statistical Annex,Annex table 2 and 3. *World Health Report* 2004;P.120-131.
- (3)Murray CJL, Lopez AD,eds, *The Global Burden of Disease: A Comprehensive Assessment of Mortality and Disability from Diseases,Injuries,and Risk Factors in 1990 and Projected to 2020*. Cambridge: Harvard University Press, 1996.
- (4)村田朗, 睡眠時無呼吸症候群の診断と治療. *日本医科大学医学会雑誌* 2007 ; 3(2) : P.96-101.
- (5)石原英樹, 木村謙太郎, 縣俊彦, 在宅呼吸ケアの現状と課題-平成13年度全国アンケート調査報告-. 平成13年度研究報告書 厚生省特定疾患呼吸不全研究班 2002 ; P.68-71.
- (6)城戸貴志, 他11名, 急性期に使用したNIPPVのインターフェイスによる鼻根部皮膚損傷の危険因子に関する検討. *日本呼吸管理学会誌* 2004 ; 14(2) : P.306-309.
- (7)本間達, 若松秀俊, 張曉林, 在宅老人のための小型補助呼吸装置の開発とその特性. *日本臨床生理学会雑誌* 1999 ; 29(4) : P.199-205.
- (8)矢原弘樹, 日隈直紀, 福井幸男, 西原清一, 持丸正明, 河内まき子, FFDを用いた3次元足部モデルの解剖学的特徴点抽出. *電子情報通信学会論文誌 D-II* 2004;J87(4):P.967-977.
- (9)持丸正明, 人体形状の変異と産業応用. *バイオメカニクス学会誌* 2005;29(2):P.90-94.
- (10)佐野毅, 他6名, 鼻マスクを用いたNIPPVによるヒト皮膚への生体力学的影響. *バイオエンジニアリング講演会講演論文集* 2004;2004(17):P.431-432.
- (11) M. Ackerman, *The Visible Human project*. *Proceedings of the IEEE* 1998 ; 86(3) : P.504-511.
- (12)吉田直子, 他8名, 経鼻持続陽圧呼吸療法の設定圧が皮膚にかかる圧と皮膚の血流に及ぼす影響. *日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌* 2007 ; 17(2) : P.167-170.
- (13)細川俊夫, 桑原貞之, 岡田圭太, 水野幸治, 車両との衝突における歩行者下肢負荷の解析. *デンソーテクニカルレビュー* 2007;l2(1):P.170-178.
- (14)福田幸久, 吉野信之, 渡邊信佳, 村瀬晃平, 高井信朗, 堤定美, 人工膝関節全置換術後の跪き動作における有限要素解析-第2報-. *日本臨床バイオメカニクス学会誌* 2006 ; 27 : P.187-191.
- (15)尾田雅文, 浅井協子, 花房昭彦, 原利昭, 超音波身体計測を考慮した軟部組織の応力解析手法の検討. 第18回ライフサポート学会大会講演論文集 2002;18:P.326-327.
- (16)池田義明, 藤田欣也, 指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示. *日本ヴァーチャルリアリティ学会論文誌* 2004;9(2):P.187-194.
- (17)木村竜司, 内山孝憲, 前野隆司, 把持力制御のための局面状ひずみ分布センサの開発. *日本機械学会論文集(C編)* 2004;170(689):P.83-88.
- (18)Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., *ABAQUS/Standard USER'S MANUAL Ver5.7* 1999. ; Vol. I : P.10.5.1-1 - 10.5.1-15.
- (19)矢野英雄, 飛松治基, 新妻淳子, 永川祐三, 褥瘡の発生機序に関する実験的検討. *整形外科* 1990;41(6):P.976-985.
- (20)Nicholas S.H, *Complications of Noninvasive Positive Ventilation*. *Respiratory Care* 1997;42(4);P.432-442.