

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月13日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22591533

研究課題名（和文）：有限要素解析を用いた胸部大動脈瘤破断予測：ステントグラフト術後遠隔期予後への応用

研究課題名（英文）：Finite element analysis of thoracic aortic aneurysm and prediction of rupture: Application after TEVAR

研究代表者 熊谷 紀一郎

(KUMAGAI KIICHIRO)

東北大学・大学院医学系研究科・助教

研究者番号：80396564

研究成果の概要（和文）：胸部大動脈瘤の破断予測を行う目的で、大動脈瘤の有限要素モデルを作成し、胸部大動脈瘤切迫破裂例と予定手術例の比較から大動脈瘤破裂を起こしうる危険域の推定を行った。それにより最大相当応力値(MaxVMS)>0.5MPa が危険閾値と推定され、破裂する可能性のある胸部大動脈瘤を有限要素解析により抽出することが可能となった。さらに、本法を改良し2腔の大動脈瘤モデルを作成し、ステントグラフト術後遠隔期、大動脈解離などに応用する予定である。

研究成果の概要（英文）：To predict rupture potential risk for patients with thoracic aortic aneurysm, we calculated the maximal von Mises stress (Max VMS) of finite element models. Maximal von Mises stress were significantly different between two groups (groupA: impending rupture, groupB: elective repair). VMS values of most cases in impending ruptured group were larger than 0.5MPa. It may be possible to estimate a certain threshold of maximal von Mises stress which induces aortic rupture. This technique will be applied to aortic dissection model and post TEVAR model.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学、胸部外科学

キーワード：胸部大動脈瘤、有限要素法、ステントグラフト、大動脈解離

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 胸部大動脈瘤は、胸部の大動脈壁が瘤状に拡大し、やがて破裂する疾患である。胸部大動脈瘤の破裂は瘤壁にかかる応力が瘤壁の強度を超えた際に発生する。以前、当教室ではCT画像から胸部大動脈瘤の有限要素モデルを構築し、有限要素解析を行い、応力を推定する方

法を開発した。

(2) 有限要素解析は、このように臨床の現場で破断予測法として有用なものであった。しかし、従来までの方法では解離性大動脈瘤に対して応用することが不可能であるなどの限界も多く見られていたため、改良する必要がある。また、近年ステントグラフトが大動脈瘤

治療に利用されているが、ステントグラフト留置後に大動脈瘤が縮小するという興味深い現象が見られている。有限要素解析を用いてこのメカニズムを解明することが、今後の臨床応用にきわめて重要である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の有限要素解析を改良し以下を明らかにすることである。

(1) 大動脈瘤に伴う石灰化および壁在血栓の存在を考慮し、材料定数を変動させたより詳細な有限要素モデルを作成し、従来の症例を再評価することで破断危険度を推定する。

(2) ステントグラフト留置後の大動脈瘤にかかる力学的変化を有限要素モデル作成により推定し、大動脈瘤縮小の条件あるいはそのメカニズムを解明する。

(3) 解離性大動脈瘤の有限要素モデルを作成し、拡大、破裂などの予後を予測する。

## 3. 研究の方法

(1) 破断危険度の推定：胸部大動脈瘤患者の術前造影CTをDICOM形式でPC上に入力し、3次元構築ソフト3D-Doctorを用いて軸方向のCT画像の中の大動脈内腔を2次元的にトレースし、胸部大動脈瘤を3次元に構築する。大動脈壁はSurface dataとして処理され、石灰化した部位はこの時点で区別する。また、壁在血栓はsurface dataとは別にトレースし、volume dataとして3次元に処理する。3D-Doctor上でこれらの処理を追加することで、石灰化した動脈瘤や壁在血栓を伴った動脈瘤なども有限要素解析ソフト上で再現が可能となる。さらにパーソナルコンピュータ上で、有限要素解析ソフトANSYSに3次元データを入力し、弾性率(2.6MPa)、動脈壁厚(2mm)を設定した後メッシングを行う。これらの操作を行うことにより大動脈瘤は約30000のエレメントに分割される。大動脈壁の石灰化を考慮し、弾性率、動脈壁厚などの材料定数を局所により変動させる。Volume dataとしてあらかじめ処理しておいた壁在血栓データは重ねて入力し材料定数も別とする。この後、CT撮影時の血压データを入力し計算を行い、胸部大動脈全体のvon Mises stress(相当応力)の応力分布図を求める。

(2) ステントグラフト内挿術(TEVAR)症例は東北大学心臓血管外科にて胸部大動脈瘤と診断され、TEVARの方針となった症例を対象とするが、ステントグラフトとしてGore TAGを用いるものを対象とする。手術終了後1週で術後CTを撮影するが、これを同様にパーソナルコンピュータ上にDICOMフ

イルで入力する。ステントグラフトが挿入された部位は、内腔とステントグラフト外側の腔の2腔となるが、コンピューター上

(3D-Doctor)でも2つの閉鎖腔として別々にトレースする。ANSYS上であらたに構築されたデータを材料定数、壁厚、内圧をそれぞれ別に入力されるが、2腔のデータは重ね合わせて計算処理される。ステント外のExclusionされた大動脈内腔は血压測定が不可能であるが、推定圧として文献に基づいて収縮期血压の1/2を用いることとする。

(3) 解離性大動脈瘤患者を対象とする。急性大動脈解離患者では、急性期のCT所見を同様にパーソナルコンピュータ上に入力し、3D-Doctor上で真腔と偽腔を別としてトレースし、それぞれ3次元表面(surface data)として有限要素解析ソフトANSYSに入力する。大動脈壁厚はCT画像から正確な値を推定することは困難であるので、真腔壁2mm、偽腔壁1mmとする。偽腔壁の材料定数(弾性率)は、未知であるが従来のデータで問題ないと考えられる。真腔内圧としては収縮期血压を用いることで問題ないが、偽腔内圧を測定した報告は認められず、直接測定することは侵襲的であり危険を伴うため行わず、収縮期血压をそのまま用いるものとする。これらの条件をANSYS上にinputし有限要素解析法にて相当応力の分布を作成する。

## 4. 研究成果

(1) 大動脈瘤破断危険度の推定：平成15年から24年の間に東北大学心臓血管外科にて経験した胸部大動脈瘤例20例を2群

(A群：破裂例あるいは切迫破裂例8例、B群：待機的手術例12例)に分け、有限要素解析を行った(表1)。A群の切迫破裂群は胸背部痛などの症状を有する症例およびCT撮影後2ヶ月以内に破裂した症例とした。この解析では、大動脈瘤壁および弾性率を一定としたモデルを作成した。さらに、大動脈瘤の形態による破裂危険度を比較するため血压を一定(収縮期血压120mmHg)としてモデルを作成した。

	Group A	Group B
N	8	12
年齢	73±8.2	70±9.3
性別(M:F)	7:1	11:1

表1：対象症例の年齢および性別

図1はB群(64歳男性待機手術例)の相当応力分布図である。収縮期血压を120mmHgとし

た時の最大相当応力値(MaxVMS)は0.37MPaであり、その部位は大動脈瘤の辺縁部であった。

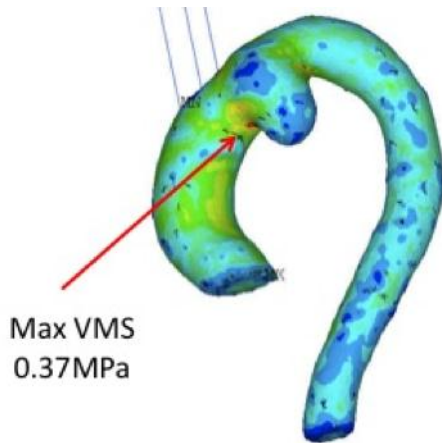


図 1：待機手術例の相当応力分布  
矢印は MaxVMS の部位を示す。

図2はA群（59歳男性切迫破裂例）の相当応力分布図である。血圧を120mmHgとした時の最大相当応力値(MaxVMS)は0.68MPaであり矢印はその部位となる。MaxVMS 部位は大動脈瘤の近位側辺縁に近く存在していた。

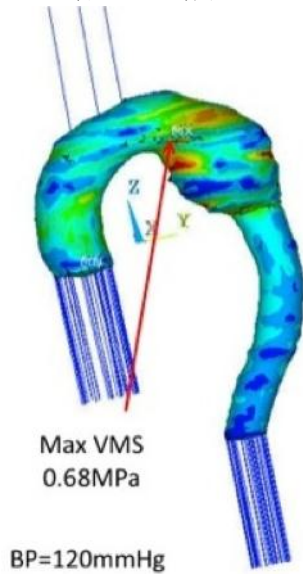


図 2：切迫破裂例の相当応力分布  
矢印は MaxVMS の部位を示す。

嚢状動脈瘤では、最大相当応力値となる部位は大動脈瘤の最大径となる部位ではなく、辺縁部に認めることが多かった。

表2には、A群とB群の相当応力最大値の(MaxVMS)の平均値を示す。

	N	MaxVMS(MPa)
A 群	8	0.66±0.24
B 群	12	0.47±0.08

表 2：最大相当応力値(MaxVMS)の平均値比較

図3aに各群の瘤径の平均値を示した。平均値はA群で73mmでB群で59mmであり、有意にA群が大きかった(P<0.05)。図3bには、同様に各群のMaxVMSの平均値を示した。表2に示される通り、平均値はA群で0.66MPaでB群で0.47MPaであり、有意にA群が大きかった(P<0.05)。

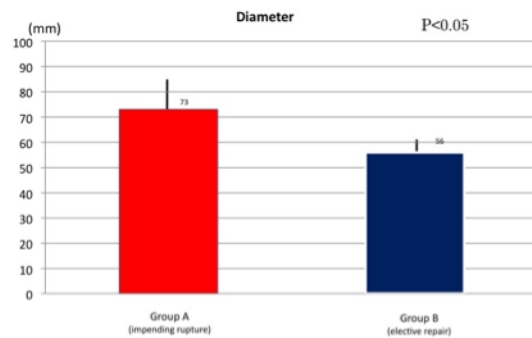


図 3 a：各群の瘤径の平均値の比較

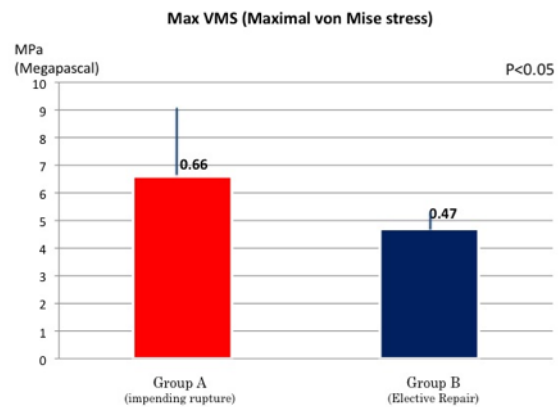


図 3 b：各群の MaxVMS の平均値の比較

また、図4には全症例20症例のMaxVMSと瘤径の関係を示した。切迫破裂群では、瘤径が大きくなるほどMaxVMSも大きくなる傾向が見られたが、待機手術群ではこの傾向ははっきりしなかった。また、切迫破裂群のほとんどが、大動脈瘤径>60mmまたは、MaxVMS>0.5MPaの範囲に収まっていた。これらの結果より、大動脈瘤破裂の相当応力閾値はMaxVMS>0.5MPaと推定した。

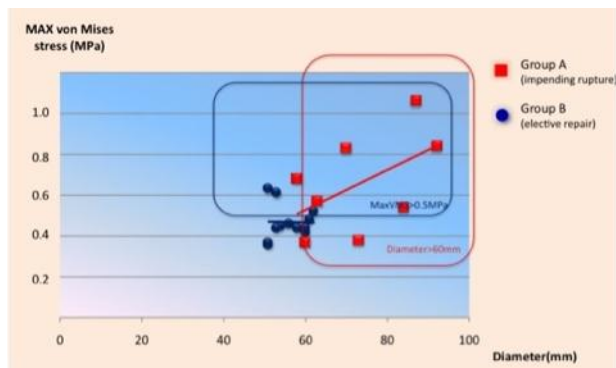


図 4 : MaxVMS と瘤径(diameter)の分布図

(2) TEVAR モデルおよび大動脈解離モデルの作成：すなわち大動脈二腔モデルであるが、DICOMfile を入手し、3D-Doctor 上で大動脈壁の別々のトレースを行った。IGESfile として ANSYS に取り込み 2 腔の 3 次元有限要素モデルの作成を試みた。要素数(現在 32,000 と制限されている)を拡張することにより構築できる可能性があり、今後の課題とする。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

(1); 熊谷紀一郎、本吉直孝、秋山正年、安達理、齋藤武志、川本俊輔、齋木佳克  
有限要素解析法を用いた胸部大動脈瘤破裂例の応力解析と破裂危険域の推定  
第 65 回日本胸部外科学会定期学術集会、  
2012 年 10 月 17 日~20 日：福岡市

(2); Kiichiro Kumagai, Shunsuke Kawamoto, Yumi Sugawara, Masatoshi Akiyama, Osamu Adachi, Takeshi Saito, Naotaka Motoyoshi, Yoshikatsu Saiki  
Finite Element Analysis for Thoracic Aortic Aneurysm: An Attempt to Predict a Risk of Rupture  
21th annual meeting of the Asian Society for Cardiovascular and Thoracic Surgery  
2013 年 4 月 4 日~7 日：神戸市

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

熊谷 紀一郎 (KUMAGAI KIICHIRO)  
東北大学・大学院医学系研究科・助教  
研究者番号：80396564

##### (2) 研究分担者

本吉 直孝 (MOTOYOSHI NAOTAKA)  
東北大学・病院・講師  
研究者番号：40375093

齋木 佳克 (SAIKI YOSHIKATSU)  
東北大学・大学院医学系研究科・教授  
研究者番号：50372298

渋谷 拓見 (SHIBUYA TAKUMI)  
東北大学・大学院医学系研究科・非常勤講師  
研究者番号：10526453

田林 暁一 (TABAYASHI KOICHI)  
東北大学・大学院医学系研究科・教授  
研究者番号：90142942

赤坂 純逸 (AKASAKA JUNETSU)  
東北大学・病院・講師

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：