

くも膜下腔構造を考慮した脳神経外科手術シミュレータのための 血管温存シミュレーション

Vessel Dissection Simulation for Neurosurgery Simulators Considering Subarachnoid Space Structure

2181017



研究代表者

弘前大学 理工学部

助教

陳 曉 帥

[研究の目的]

脳外科手術では皮膚切開，開頭，硬膜切開，脳裂の開放の手順を追い脳底部に到達する。脳外科手術には高度な技術が必要となるが，トレーニングに実際の手術を利用するには危険が伴うため，脳外科手術シミュレータの開発が求められている。

脳腫瘍摘出時，よく脳のシルビウス裂を開放し腫瘍部まで到達するが，シルビウス裂はくも膜によって拘束されており，血管はくも膜小柱で拘束されている（図1）。血管を温存して脳裂を開放し腫瘍部まで到達するには，くも膜小柱を切断する繊細な技術が必要になる。

くも膜小柱は血管よりコラーゲン線維の割合が高く，血管よりも壊れにくい。医者がくも膜小柱を意識せずに脳組織を引張った場合，或いはくも膜を引っ張るときに過大な力を加えた場合，血管がくも膜小柱に引張られ，血管の鈍的損傷をもたらす。血管損傷は患者に深刻な後遺症を残す可能性があり，若手医師の最も一般的な失敗であると考えられる。したがって，脳血

管温存を訓練することができる脳神経外科手術用シミュレータを開発する必要がある。

過去の研究で脳外科シミュレータのための血管の鈍的破壊モデル^[1]とくも膜モデル^[2]が報告されているが，くも膜下腔を考慮したモデルは報告されていない。

本研究ではくも膜下腔構造を考慮した簡易的なモデルを作成し，血管の温存に関する条件の明確化を目的とし，血管剥離シミュレーションを行った。また，血管解剖シミュレーションのために，血管の損傷破壊モデルを提案し，それに関する物性値を同定した。

[研究の内容，成果]

1. 脳血管の損傷破壊モデル

損傷破壊モデルのメカニズムを図2に示す。

血管壁を四面体要素に離散化する。損傷破壊は各四面体要素の中で3段階で進行する。(i) マイクロ損傷の生成，(ii) マイクロ損傷の成長，と(iii) 破壊である。

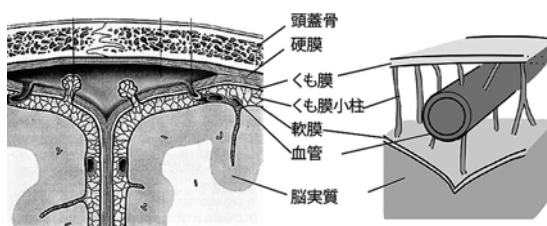


図1 くも膜下腔構造^[3]

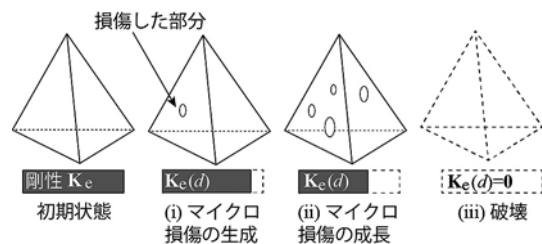


図2 血管の損傷破壊モデル

(i) マイクロ損傷の生成

ミーゼス応力は損傷生成の指標パラメータとして使用される。要素のミーゼス応力がある閾値より大きい場合、要素は初期状態からマイクロ損傷になる。

(ii) マイクロ損傷の成長

マイクロ損傷は要素の変形とともに成長し、要素の剛性は次第に弱くなる。

(iii) 破壊

要素の剛性がゼロに近くなると、マイクロ損傷が結語して要素が破壊すると考えられる。損傷は要素を削除することによって表される。

2. 血管単体の損傷破壊シミュレーション

ブタ脳血管の引張実験の結果を用い、応力-ひずみ線図を再現することで血管の物性値の同定を行い、提案した血管の損傷破壊モデルを検証した。

脳血管の引張シミュレーションの様子を図3に示す。図4に引張試験の応力-ひずみ線図と

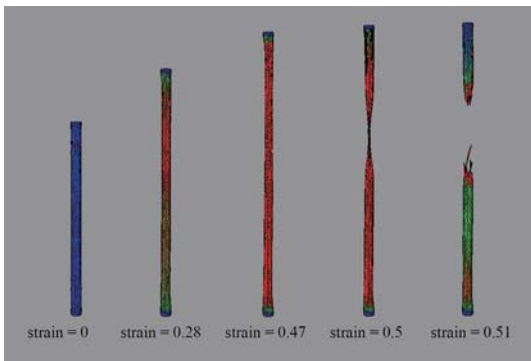


図3 脳血管の引張シミュレーション

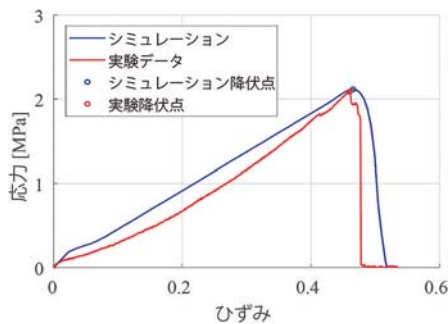


図4 脳血管を用いた引張試験の応力-ひずみ線図と同定されたパラメータを用いたシミュレーション結果

同定されたパラメータを用いたシミュレーション結果を示す。

図4に示すように、実験結果の応力-ひずみ線図はシミュレーションによって正確に再現することはできない。この研究では、すべての組織が等方性線状物質であると仮定されています。しかし、血管は非線形のため、シミュレーションで実験結果を完全に一致させることは困難である。本研究では、血管の損傷を強調するために、降伏点におけるひずみと応力の相対誤差を求めた。シミュレーション結果と実験値との間の相対誤差は小さく、許容範囲内である。したがって、提案した損傷破壊モデルで血管の破壊を再現できる。

3. くも膜下腔構造を考慮した血管剥離シミュレーション

くも膜下腔構造の簡易モデルを図5に示す。くも膜に変位を与える。血管が損傷した場合を失敗、血管が損傷せずくも膜小柱のみが断裂した場合を成功とする。z, y 軸に沿って正の向きに変位を与える二つの条件で行った。各条件でサンプリングタイムを固定し速度で比較する。サンプリングタイムは2通り、速度は11通りで行った。

図6と図7に成功例と失敗例を示す。z, y 軸方向どちらも速度の遅い条件のときに成功していることが分かる。簡易的に模したモデルであっても血管の温存に成功する基準があり、その基準が速度であると推測できる。

また実際の手術では速度の小さいときに成功

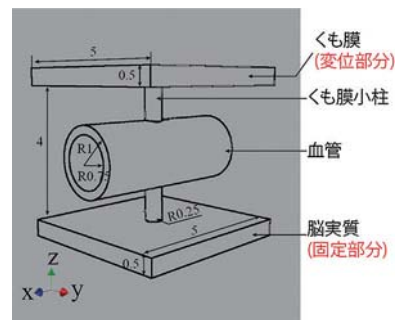


図5 くも膜下腔簡易モデル

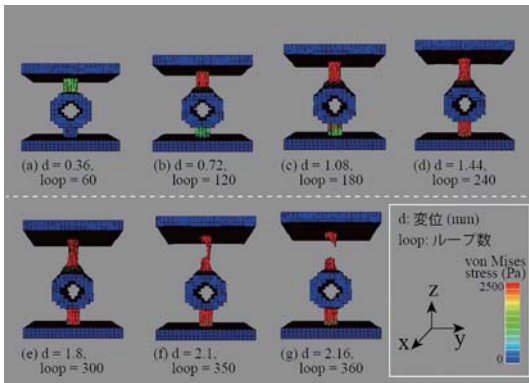


図6 成功例（引張方向：z軸，引張速度：0.3 mm/s）

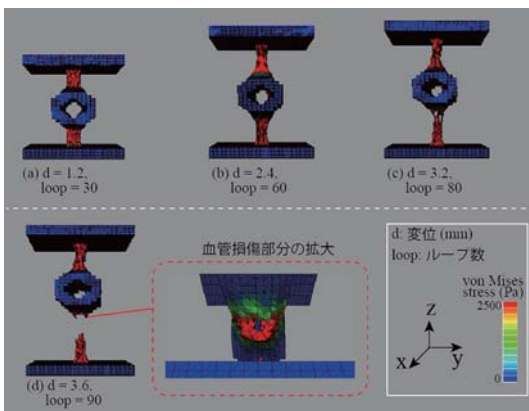


図7 失敗例（引張方向：z軸，引張速度：2 mm/s）

すると言われているが、シミュレーションで再現できていることが確認できた。本研究で作成したモデルでは基準が速度だけであったが、くも膜下腔の構造及び血管等脳組織の力学的特性を詳細に再現したモデルを作成することで血管温存の基準をより明確なものにすることができると考えられる。基準が明確になることで技術の定量化にも繋がるだろう。

また、サンプリング時間がシミュレーション結果に影響を及ぼさないことが示された。つまり、サンプリング時間が長いシミュレーションでも安定した正確な結果が得られる。これは長時間を要する脳神経外科手術用シミュレータには望ましいことである。したがって、提案した血管破壊モデルは脳神経外科手術シミュレータに適している。

[今後の研究の方向，課題]

今後の課題，展望として，以下のことが挙げられる。

・よりリアルなモデルの使用

本研究では簡単化されたくも膜下腔モデルを用いてシミュレーションを行ったが，よりリアルな詳細なモデルを作成し，図8に示すような手術シミュレータに組み込む。

・他指標での血管温存の基準の明確化

本研究では速度を指標としてシミュレーションの比較を行ったが，他の指標，例えば変位や加速度などを指標としても同様のシミュレーションを行うことで血管温存の基準を明確化することができるだろう。

・非線形性物体としてのモデル化

血管は応力-ひずみ関係において下に凸の非線形性をもつが，本研究では線形性物体としてモデル化した。より正確に血管の物性値の同定を行うには非線形性物体としてのモデル化が必要であろう。

・術者の技術力の定量化

血管の温存に成功する基準を明確にすることで，技術力の定量化ができると考えられる。技術力の定量化ができれば，個人の技術力が明らかになるためトレーニングの指標とすることができるだろう。



図8 研究グループが開発した脳神経外科手術シミュレータ^[4]

[成果の発表, 論文等]

- (1) Xiaoshuai Chen, Ryosuke Shirai, Ken Masamune, Manabu Tamura, Yoshihiro Muragaki, and Atsushi Konno, "Presenting a Simple Method of Brain Shift Estimation for Neuronavigations and Considering its Practicality," Proceedings of the 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration Paris, France, January 14-16, 2019, pp. 112-117.
- (2) Xiaoshuai Chen, Kazuya Sase, Teppei Tsujita, and Atsushi Konno, "Numerical Model of Connective Tissue for Splitting Brain Fissure Simulation," Proceedings of the 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration Paris, France, January 14-16, 2019, pp. 118-123.

[参考文献]

- [1] H. Azarnoush, G. Alzhrani, A. Winkler-

Schwartz, F. Alotaibi, N. Gelinias-Phaneuf, V. Pazos, N. Choudhury, J. Fares, R. DiRaddo, and R. F. Del Maestro, "Neurosurgical virtual reality simulation metrics to assess psychomotor skills during brain tumor resection," International journal of computer assisted radiology and surgery, vol. 10, no. 5, pp. 603-618, 2015.

- [2] C. Ma, X. Jin, J. Zhang, and S. Huang, "Development of the piaarachnoid complex finite element model," in 2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, IEEE, 2008, pp. 1717-1720.
- [3] R. Drake, A. W. Vogl, and A. W. Mitchell, Gray's Anatomy. Elsevier Health Sciences, 2007.
- [4] K. Sase, A. Fukuhara, T. Tsujita, and A. Konno, "GPU-accelerated surgery simulation for opening a brain fissure," ROBOMECH J., vol. 2, no. 1, pp. 1-16, 2015.