

外科手術を最小限に

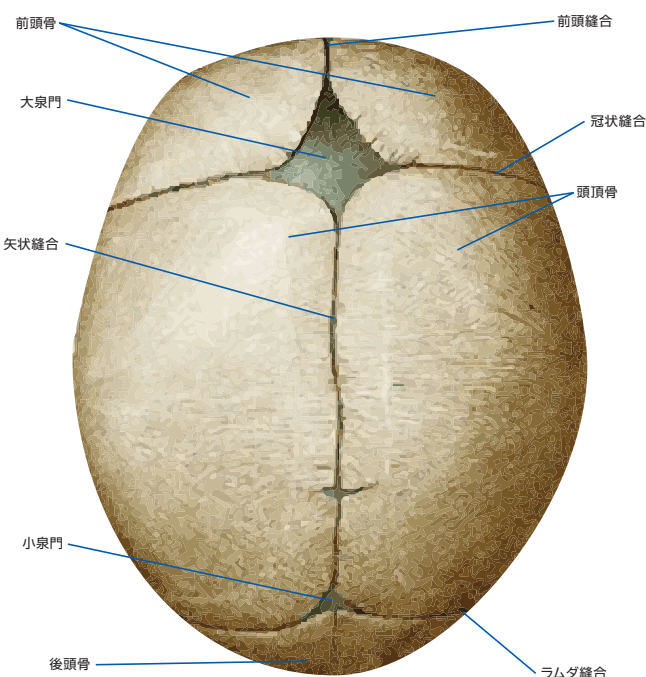
頭蓋骨疾患を患う幼児の治療でシミュレーションを活用し、手術時間の短縮と患者に対するリスクの低減を実現

Marek Gzik (ポーランド グリヴィーツェ, シレジア工科大学機械工学部応用力学科, 准教授),
Wojciech Wolanski (ポーランド グリヴィーツェ, シレジア工科大学機械工学部応用力学科)
Dawid Larysz (ポーランド カトビーツェ, シレジア医科大学, 小児脳神経外科)

脳が成長する前に頭蓋縫合が閉鎖してしまう代表的な小児疾患として、頭蓋骨癒合症があります。大半が頭蓋骨の奇形によるもので、発達障害につながることもあるこの疾患は、閉鎖した構造を切り離す手術によって治療できますが、骨切りの位置と箇所数を適切に判断する必要があります。ポーランドのシレジア工科大学では、ANSYS Multiphysics を使用して、骨の伸長に必要なこの骨切りの回数を減らす方法を研究しています。シレジア医科大学の脳外科医 Dawid Larysz 氏は、この方法を利用したことで、20 件の手術に成功しただけでなく、手術時間を短縮して患者の転帰を改善することもできました。

新生児の脳は急速に成長して発達し、脳の容積が生後9ヵ月で2倍に、3年後には3倍になります。頭蓋骨は、この成長に合わせて短期間で大きくなる必要があります。正常な幼児の頭蓋骨は、縫合と呼ばれる線維性関節で分離されたいくつかの骨板で構成されています。頭蓋骨が内部の脳に合わせて成長できるのは、この縫合が新生骨の伸長と生成によって脳の成長に対応する仕組みになっているからです。なお、この縫合が閉鎖すると、一体化した骨が形成されることとなります。

頭蓋骨癒合症では、縫合が早期に閉鎖して新生骨の伸長と生成が



幼児の頭蓋骨の縫合



頭蓋骨癒合症を患っている幼児に関しては、医学的評価を頻繁に行い、頭蓋骨、顔面骨、脳が正常に成長しているかどうかを確認する必要があります。なお、侵襲性が極めて低い治療法では、頭の隆起部に心地よくフィットしながらも、頭のくぼみや平らな部分を成長に合わせて徐々に大きくしていき、頭部を形成できる開口部を有するヘルメットやバンドが使用されている。

抑えられ、その結果、抵抗が最も少ない経路を辿って脳が成長していき、最終的に脳、頭蓋骨、顔面の形状が変形します。重度の場合には発育遅延や精神遅滞につながることもある頭蓋骨癒合症は、新生児2,000人に1人の割合で発症し、男児の発症率は女児の2倍とされています。

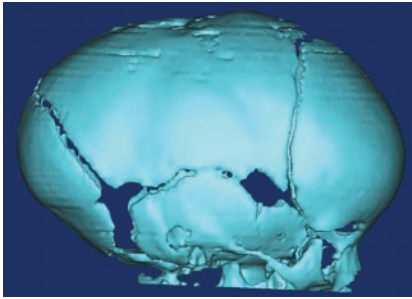
重度の場合は外科手術が必要になります。この手術では、脳の成長に合わせて前頭骨を意図的に変形させるために、前頭骨を平らにして弾性を高めてから、骨切り術によって前頭骨を放射状にカットし、前頭骨の強度を低下させます。この外科的矯正は生後3ヵ月から6ヵ月の間に行うのが望ましいとされています。

ただし、この手術を担当する外科医は、頭蓋骨の変形や強度低下を招くことなく脳が十分に成長できるようにするために、骨切りを最小限に抑えなければなりません。また、骨切りを行った頭蓋骨が正常な頭蓋骨の機械的性質を忠実に再現しているか確認する必要があります。

知識と経験に頼って術前計画を立てている多くの脳



矯正外科手術を受ける幼児



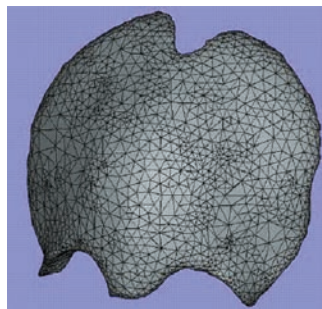
矯正前の頭蓋骨の3次元モデル

神経外科医は、安全性を過度に重視し、脳の成長を助けるには十分すぎるほどの骨切りを行っています。しかし、骨切りを必要以上に行くと、手術時間が長くなり、幼児が危険にさらされる機会が増えるだけでなく、頭蓋骨の強度が低下していく可能性もあります。

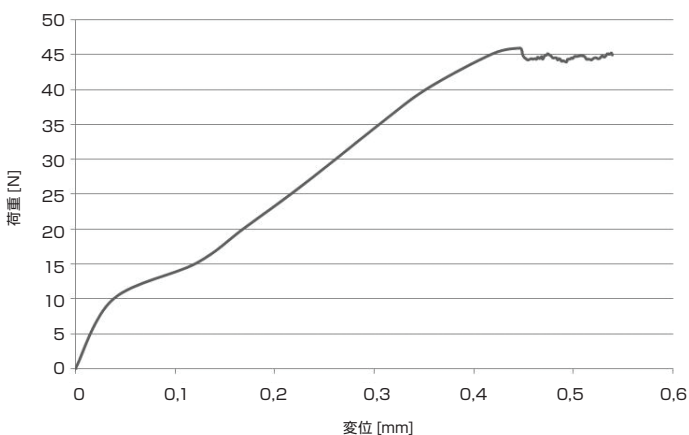
シレジア工科大学の研究グループでは、有限要素解析を他の大学に先駆けて導入し、脳の成長を助ける骨切りの最小数と位置の特定に取り組んでいます。その際には、幼児の頭蓋骨をCTスキャンして、この骨の3次元モデルを作成しています。具体的には、Materialise® NV社が開発した画像処理パッケージMimics®を用いて、CT画像を3次元モデルに変換してから、このモデルをANSYS Multiphysicsにエクスポートして解析を行っています。

このチームは以前の手術で除去した頭蓋骨を使ってMTS Insight 10 kN試験機で物理試験を実施し、頭蓋骨の材料特性を同定しました。

その後は、三角頭蓋症（前額部にある前頭縫合が閉鎖する特殊な頭蓋骨癒合症）を患う幼児の前頭骨の3次元モデルを5種類作成して、ANSYS Multiphysicsに取り込みました。これらのモデルはそれぞれ手術前の前頭骨、平らにした前額部、5カ所の骨切り、6カ所の骨切り、8カ所の骨切りを表現したものです。また、脳の成長に応じて頭蓋骨が20mmたわむことを多くの医師が明らかにしていた



前頭骨の有限要素モデル



物理試験で測定した材料特性



骨をたわませるのに必要な荷重と、たわんだ前頭骨の変形を示した構造解析結果

矯正の種類	たわみ量 (mm)	荷重 (N)
手術前の前頭骨	20	52
平らにした前額部	20	37
5カ所の骨切り	20	15
6カ所の骨切り	20	10
8カ所の骨切り	20	4

骨のたわみ量に対する荷重量の一覧表

ため、先の5種類の前頭骨モデルをANSYS Multiphysicsで構造解析を行い、20mmたわむのに必要な荷重量を求めました。その結果、この患者の頭蓋骨を矯正するのに最も効果があるのが8カ所の骨切りであることが分かりましたが、このシミュレーションを実行していなかったら、脳の成長を助けるはずの医師が必要以上の骨切りを行ってしまうところでした。

頭蓋骨は一人一人異なります。そこで、頭蓋骨癒合症を患っている20人の幼児の頭蓋骨を解析してみたところ、脳の成長を助けることができる骨切りの最小数を特定することができました。これらのシミュレーション結果を確認したDawid Larysz氏は、手術の準備を十分に整えて、手術手順を大幅に短縮することが可能になるとともに、骨切りの回数を減らして各幼児の手術をスムーズに進めることができました。しかも、いずれの患者の手術も成功し、術後の経過も良好に推移しています。

こうしたシミュレーションを行ったことで、予期せぬことに、年齢が矯正手術の結果に重大な影響を与えることも分かりました。たとえば、生後3カ月の幼児の頭蓋骨は、脳の成長を助けるために大量の骨切りを行わなければならないほど硬化していました。つまり、骨切りの必要数と手術の侵襲性を低減するには、可能な限り早い時期に手術を行う必要があります。

なお、この事例を参考にしてバイオメカニカルモデリングを行えば、外科手術の効率化を図ることができます。■

バイオメカニカル / 流れモデリングツールは、頭蓋骨の小児外科手術の他にも、整形外科用インプラントの埋植、脳動脈瘤手術、軟組織修復など様々な分野の手術計画に利用され、手術時間の短縮と最適な治療の実現に役立っています。