

<研究課題> 交通事故における、回転外力脳損傷のメカニズムの検討

代表研究者	東京医科歯科大学 脳神経外科	講師	稲次基希
共同研究者	東京工業大学 情報理工学研究科	准教授	宮崎祐介
	東京医科歯科大学 脳神経外科	准教授	成相 直
	都立墨東病院 脳神経外科	医長	藤原一枝

【まとめ】

回転加速外傷によるびまん性脳損傷のメカニズムはいまだ不明であり、再現するモデルが無い。今回我々は、透過性頭部実体ダミーモデルを作成し、脳実質の挙動を観察、びまん性脳損傷を再現した。側片衝突により頭部は衝突側に強く回転し、最大側方屈曲の後に逆回転する。この間左右の脳はそれぞれ逆方向に回転し、脳梁に強いひずみが生じた。この結果は臨床例との整合性もあり、びまん性脳損傷の実態であると考えられた。

1. 研究の目的

1-1 背景

自動車工学の発達により、交通事故における直線加速外傷（脳挫傷、硬膜外血腫、穿通外傷など）は大きく減少した。このことは交通事故における死亡例の減少に大きく貢献している。その一方で回転加速によるとされる急性硬膜下血腫、びまん性脳損傷は減少していない。これは回転加速脳外傷のメカニズムそのものがいまだ解明されていないことにも起因していると考えられ、このために良い予防方法が確立できないものと推測される。

その原因として動物実験やダミーモデルの良いモデルが存在しなかったことが挙げられる。多くのげっ歯類での検討では脳の解剖学的構造の違いから、十分なびまん性脳損傷や急性硬膜下血腫の再現は得られていない。海外や過去にはヒト屍体実験やサルでの実験の報告があるものの、本邦においてこれらによる実験系の確立は倫理的な観点からも現実的ではない。

1-2 本実験の目的と意義

共同研究者の宮崎はこれらの問題を解決するために、脳実質の頭蓋内挙動を可視化できるダミーモデルを作成した。すでに乳児における頭部ゆさぶり時の頭蓋内脳挙動や架橋静脈伸展の評価を可能にし、報告している。

本実験ではこのモデルの成人タイプを作成、使用することで、回転加速外傷における脳実質の挙動や架橋静脈の挙動を観察し、回転外力脳損傷のメカニズムそのものを明らかにすることを目的としている。

どのような外力が増悪因子であるかが判明すれば、どのような予防措置が取りうるかという検討が可能になると考える。動物実験を含めた回転外力脳損傷の良いモデルがなかったことを考えれば、その意義は大きく、近年話題となっている柔道事故などのスポーツ外傷等々にも応用が可能である。

初年度である本年はびまん性脳損傷の発生メカニズムを明らかにすることとした。

2. 研究方法と経過

2-1 ダミー人形の作成

本実験では実人体の頭蓋骨、脳形状を忠実に再現した頭部実体モデルを構築している。頭部実体モデルは頭蓋骨、脳、脳脊髄液、大脳鎌および小脳テントから構成されている。

まず頭蓋骨は、実際の健常人 CT 画像から 3D 再構築し、頭蓋骨 3D ポリゴンモデルを作成、これに基づき透明ポリカーボネートにて作成した。これにより頭蓋内における脳実質の挙動が観察可能となっている。また、頭蓋骨内面形状も再現されている特徴を持つ。本実験では内部をより詳細に観察するため、眼窩部にカメラを装着する小孔を作成した。

(Fig1-c)

脳実質も MRI 画像により構築した 3D ポリゴンモデルを基に作成した。シリコンゲルを用いて作成したが、実人体脳と密度、動的粘弾性特性に大きな差が無いことが確認されている。本実験では脳深部のひずみを観察するために、脳実質の前頭側を透明に、後頭側を黒色にして、その接着面を計測面として全域に白色マーカーを置いた。なお、本モデルでは脳室の中空構造も忠実に再現されている。(Fig.1-b,c)

脳の変形に大きく影響する構造物として

大脳鎌と小脳テントが挙げられる。これらは人体硬膜と同等のヤング率を示すポリウレタンを使用した。これらは解剖書を基に作成したが、解剖学的にも個人差は比較的小さいことが知られている。これらはワイヤーにて頭蓋骨内面にけん引することで頭蓋骨に強固に固定させた。(Fig.1-d)

最後に髄液であるが、脳深部計測を可能とするように屈折率マッチングを行ったグリセリン水溶液を注入した。

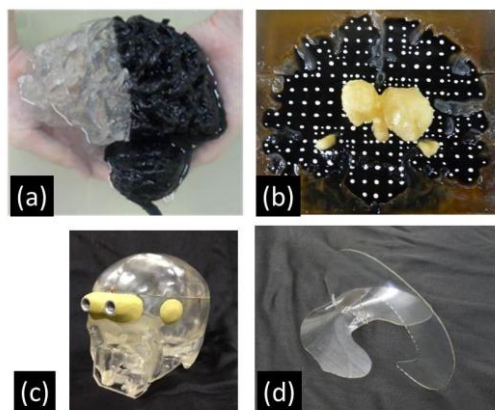


Fig.1 : (a) シリコンゲルにて作成した脳モデル。前頭部側を透明、後頭部側を黒色として、(b) 両者の接着面=計測面では、全域に白色マーカーを置いて、脳深部のひずみが計測できるようにした。(c) ポリカーボネートにて作成した透過性頭蓋骨モデル。眼窩部に小孔を穿ち、カメラにて内部を測定できるようにした。(d) ポリウレタンにて作成した大脳鎌と小脳テント。

2-2 衝撃加重方法と計測方法

直線衝撃実験装置は2本の弾性板にバネにより発射されるインパクトが頭部実体モデルをボルト締結した板に衝突することで衝撃を与える。

頭部実体モデルには角加速度計を設置し、頭部角加速度および加速度応答を計測した。また、眼窩部に設置したハイスピードカメラにて各マーカーの位置を計測し、特に脳梁近辺のマーカーの位置より剪断変形を計測、時間履歴を示した。

3. 研究の成果

3-1 計測結果

一例を示して結果を示す。インパクト衝突から 17ms において、頭部は負の角加速度が最大となる (Fig.2,3-①)。このとき、頸部下

部は移動を開始しているが、頭蓋骨には顕著な回転は見られない。そして脳もほとんど変形していない。

30ms では、頸部上部の可動域限界に到達し、正の頭部角加速度が最大となる。

(Fig.2,3-②) これ以降、頭蓋骨の急激な角度増加は抑制されるが、回転は継続する。またまた、脳梁のひずみが増大していくことが応答より明らかである。

そして 40ms で脳梁におけるせん断変形が顕著となりひずみが最大となる。(Fig.2,3-③) このとき、頸部全体で側屈挙動を示し、頭蓋骨は回転を継続している。

その後 54ms で頸部最大側屈となり、頸部剛性により頭蓋骨の回転が停止して反発し逆回転を開始します (Fig.2,3-④)。なお、脳梁における変形は回復し、ひずみが小さくなっていることがわかる。

それ以降は、頭蓋骨が逆回転を続け、頸部側屈が徐々に回復する (Fig.2,3-⑤)。頭蓋内では頭蓋骨-脳間の相対運動により脳深部が大きく変形し、80ms で右脳側が二次ピークを迎え 96ms で左脳側でもひずみピークを迎える。

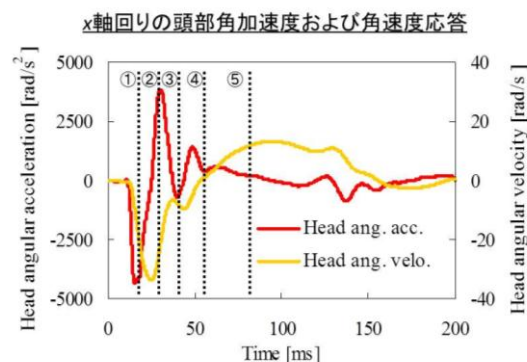


Fig.2 : 頭部角加速度および角加速度応答の時間履歴

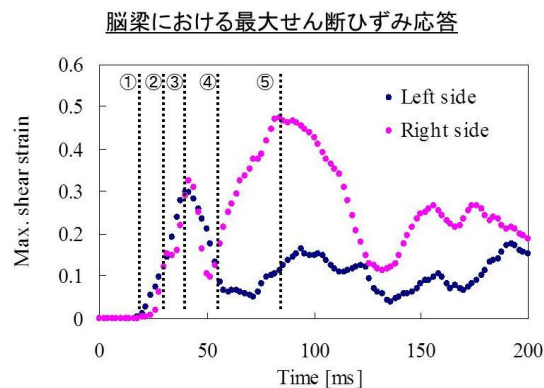


Fig.3 : 脳梁における左右剪断変形の時間履歴。①から⑤は Fig.2 と対応している。

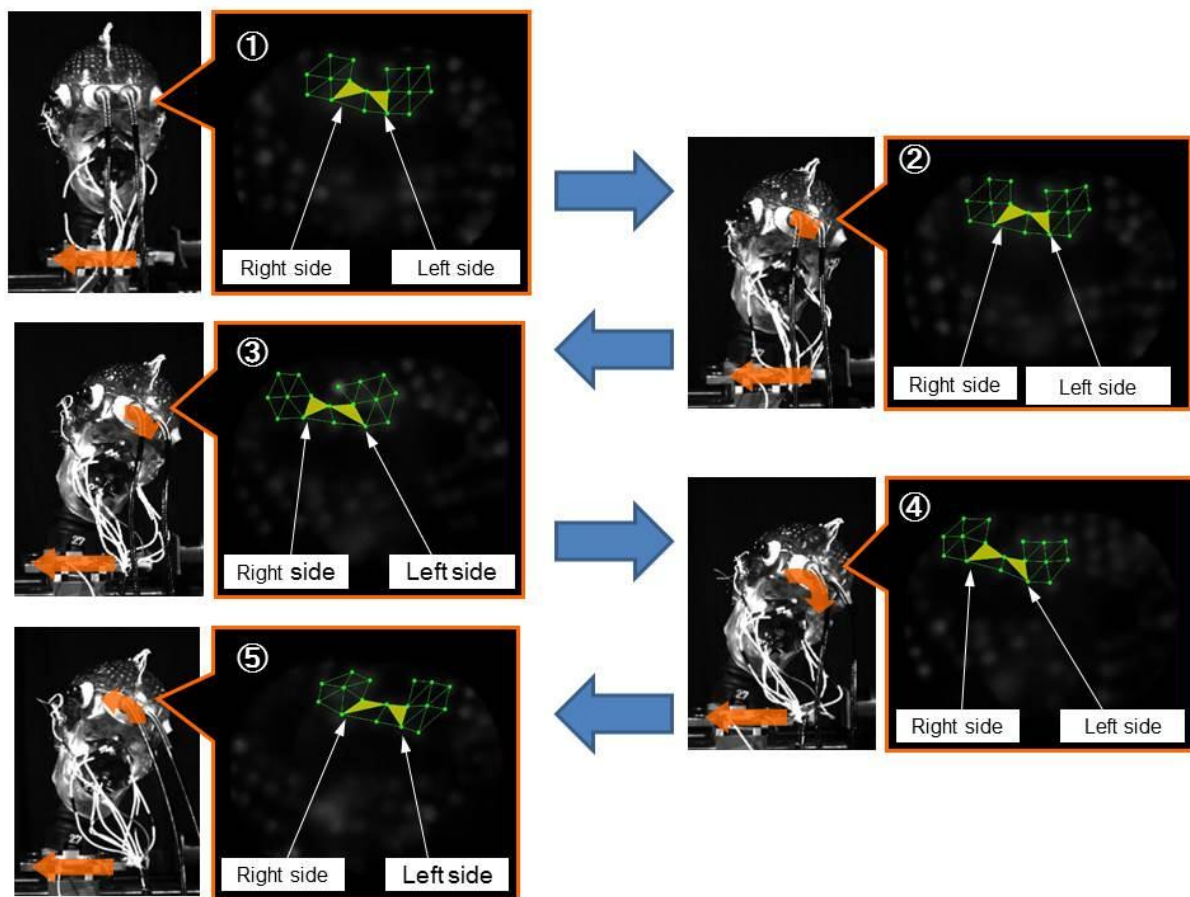


Fig.4 : 頭部の挙動と脳梁を含めた各マーカーの挙動。①から⑤は Fig.2,3 の時間履歴と一致している。

3-2 結果のまとめ

以上の結果より、脳深部変形挙動のメカニズムについて考察を行う。全体を二つのフェーズに分けて検討する。前半はインパクト衝突から頸部最大側屈までのフェーズになるが、インパクト衝突により、慣性で静止している脳に対して頭蓋骨が先に回転を始めている。これは、脳脊髄液により頭蓋骨—脳間で相対運動が生じるためと考えられる。このとき、頭蓋骨に付着している大脳鎌も頭蓋骨と同じ方向に回転し、膜構造の拘束効果により、左脳は脳深部へと潜行、右脳は外側へと変位するために、脳梁においてせん断変形が発生し、ひずみが大きくなる。

次に、頸部最大側屈後から反転するフェーズについて検討するが、このフェーズでは先ほどと逆の回転が起こっている。頭蓋骨が頸部剛性により反発し逆回転するのに対し、脳は慣性により同方向に回転し続ける。しかしながら、逆回転する大脳鎌の拘束効果により、右・左脳は前半のフェーズと逆の運動をし、脳梁のせん断変形が発生、

ひずみが大きくなったと考えることができる。

これらの結果から、側方衝突において頭蓋骨が衝突方向に大きく横回転し、戻る過程で、左右の脳実質が大脳鎌を挟んで逆向きに回転することで、脳梁と深部白質が引っ張られる形で変形していることがびまん性脳損傷の実態であると思われた。

3-3 臨床例との整合性

びまん性脳損傷の画像的特徴として、①頭蓋内に占拠性病変を認めないこと、②脳梁および深部白質に可逆性(時に不可逆性)の信号異常を認めること、③病理学的には神経軸索の断裂を認めること、が挙げられる。本実験の結果では、これらの臨床例との整合性を満たしているものと考えられる。脳表のひずみは小さく、脳実質が骨に直線的に衝突することは無いため、脳挫傷を合併しにくい。むしろ逆に回転する左右の脳を連絡する部位に最も大きなひずみが生まれる結果であり、脳梁、脳深部白質にのみ異常が生じる実態をよく説明しうる。

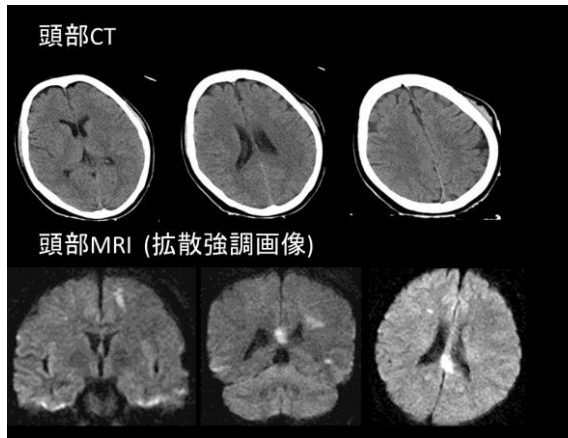


Fig.4 16歳女性、びまん性脳損傷患者のCT・MRI画像。CTでは占拠性病変を認めない。左側頭部に皮下血腫を認め、側方より衝突していることがわかる。MRIでは、拡散強調画像にて脳梁、深部白質が高信号となっており、本実験でひずみが大きい部位とよく一致していることがわかる。

本実験の結果は臨床像との整合性もあり、びまん性脳損傷のメカニズムと考えられると思われた。また、今後詳細な解明、予防法の確立を目指すうえで、優れたモデルであると考えられた。

4. 今後の課題

本実験では回転加速外傷のうちびまん性脳損傷を対象として検討した。これまでのコンピューターシミュレーションと異なり、

実体モデルでのびまん性脳損傷が視覚的に再現された意義は大きいものと思われる。これにより、将来具体的な予防方法の検討が可能となったといえる。また、実体シミュレーションであるため、自動車工学への応用も可能となった。

経験的にびまん性脳損傷は特に青年期の事故に多く、加齢と脳萎縮の影響が示唆される。今後はより脳萎縮のある、髄液腔の大きなモデルを作成し、加齢の影響を検討することを予定している。さらには衝撃の角度等を変えることによって、どのような変化が発生するかの検討を要している。

一方でもう一つのテーマである回転外力による急性硬膜下血腫発生のメカニズムに関しても検討を進めている。びまん性脳損傷と急性硬膜下血腫がなぜ起こるのか、そして両者にはどのような違いがあるのかを明らかにしていくことが今後の課題である。

5. 研究成果の公表方法

今回助成いただいた研究結果は、脳神経外科救急学会、日本神経外傷学会、日本脳神経外科学会等で発表予定である。なお、再現性の検討を終えた後、論文投稿を予定している。

以上