

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24年5月31日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560107

研究課題名（和文） 事故による脊髄損傷メカニズム解明に向けての脊髄の高ひずみ速度試験

研究課題名（英文） Investigations of the mechanical properties of the spinal cord at high strain rates for computer simulation model of the spinal cord injury

研究代表者

櫻本 逸男（SAKURAMOTO ITSUO）

徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・教授

研究者番号：70225853

研究成果の概要（和文）：

本研究では、自動車事故等の衝撃が加わった際の解析を行うため、高い引張速度を有する自作の引張り試験装置を開発し、高ひずみ速度における脊髄軟膜（後外側溝、後正中中隔、歯状靭帯）や脊髄実質（灰白質、白質）の機械的性質の調査を行った。その結果、応力ひずみ曲線は非線形性を示し、ひずみ速度の上昇により応力が上昇する粘弾性特性を持つことが確認された。さらに、高ひずみ速度において、灰白質は白質と比較して、弾性率は高いが低いひずみで破断するという結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, we made the original high speed tensile equipment (Maximum crosshead speed 1,000mm/s), and investigated the mechanical properties of the pia mater (postero-lateral sulcus, posterior median septum, dentate ligament) and spinal parenchyma (gray matter, white matter), which are the important parts to analyze the stress distribution within the spinal cord. The results exhibit the characteristic nonlinear and viscoelastic stress-strain response, in which the stiffness of the material increases with strain and strain rate. Furthermore, the gray matter is stiffer but fails at a lower mechanical strain than the white matter at high strain rates.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2011年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：生体力学

1. 研究開始当初の背景

本研究では、応力がひずみ速度により変化をする粘弾性特性をもつ脊髄について、自動車事故等の衝撃が加わった際の解析を行うため、高い引張速度を有する強度試験装置を開発し、高ひずみ速度における脊髄軟膜や白質、灰白質の力学的性質の調査を行うことを目的としている。

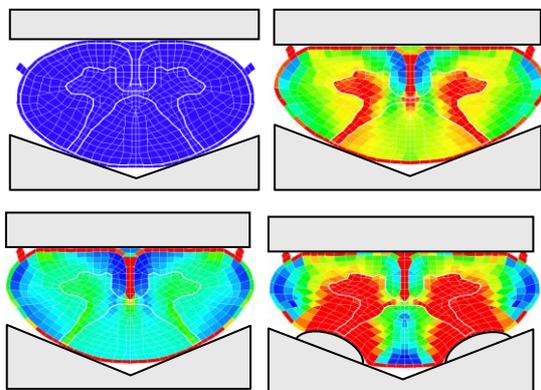
【脊椎・脊髄に関する研究の学術的背景】

現在までに、医工学手法を用いて、脊椎の衝撃時における挙動解析がさまざまな研究機関で行われ、脊椎や脊髄の受傷機序が報告されてきた。しかし、それらは椎骨単体やそれを取り巻く靭帯の力学的特性のみが用いられ、脊髄自体の力学的特性は考慮されていない。

脊髄の挙動解析に関しては、脊髄内部の応力等の変化を解明するために、Raynor や Panjabi らは数学的に、Tominaga らは光弾性実験で、Levine はコンピュータによる解析を行ってきた。しかし、これらは脊髄内部の白質、灰白質の機械的性質は考慮されず、解析も推測の域を出ていない。

【現在までの脊髄白質、灰白質に関する我々の研究結果】

我々は、過去に、合計80頭の牛の頸髄から脊髄白質と灰白質を完全に分離することに成功し、自作の専用の引張り試験装置を使用し、各々の機械的性質を測定した。その結果、白質と灰白質の機械的性質に差があることと応力緩和現象が存在することを明らかにした。さらに、これらの機械的性質を用いた構成式を構築し、以下の図のような計算機による脊髄圧迫シミュレーションを行い、脊髄内応力の変化を求めてきた。



これは、それまで信じられてきた白質と灰白質の力学的強度の関係を覆す結果であった。これらの結果より、脊髄は急性圧迫に対しては非常に障害を受けやすいが、慢性圧迫に対しては、高い耐性をもっていることが確認された。これは、脊髄が持つ応力緩和現象が大きく関与し、脊髄が大きく変形しても脊髄内圧が低く保たれ、脊髄内血行も途絶える可能性は低くなるものと考えられる。計算結果と頸髄症の病理学、臨床所見を比較したところ、その計算結果は症状を非常にうまく説明することができ、頸髄症と脊髄損傷のメカニズムが解明可能となった。

2. 研究の目的

【脊髄軟膜の機械的性質に関する研究】

脊髄の白質、灰白質の機械的性質については、我々の実験結果で明らかにされたが、脊髄実質を覆う軟膜についてのデータは 1980年代のもので、詳細な力学特性は未だ不明である。Nicholas (1988) は、ヒト脊髄の光学・電子顕微鏡による解剖学的観察で、軟膜は歯

状靭帯に連続し、肥厚しながら硬膜に付着すると報告した。したがって、軟膜と歯状靭帯は同じ素材であると言え、肥厚度合、繊維方向の違い、神経貫通孔の有無が力学的特性差を生み出していると考えられる。小澤 (2004) は、家兔脊髄を用いた引張り試験による力学的観察で、軟膜、歯状靭帯は脊髄実質に比べ非常に硬く、これが脊髄全体の弾性率を上昇させ、脊髄変形特性に影響を及ぼすと指摘した。そこで、より生体に近い解析を行い、脊髄の急性・慢性圧迫傷害の病態を検討するためには、脊髄軟膜の力学特性に関する実験が必要であると考えられた。我々は、過去の引張り試験装置を使用し、軟膜および歯状靭帯の詳細な力学的特性を調査した。その結果として、軟膜、歯状靭帯は脊髄実質に比べ弾性率が非常に高いことが確認できた。

【脊髄軟膜、実質等の高ひずみ速度試験】

過去の一連の実験で、脊髄実質および軟膜の静的・動的な力学的性質に関する調査を行った。しかしながら、それらの実験は、動的ではあるが比較的速度が遅いものである。衝撃が加わった際の解析を行うための更に高速度における力学的性質の調査を行うことは、工学的のみならず学術的にも有用なことである。

本研究では、自動車事故並みのひずみ速度による引張り試験が可能な試験装置を開発し、脊髄軟膜（後外側溝、後正中中隔、歯状靭帯）や脊髄実質（灰白質、白質）の粘弾性特性を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

【高ひずみ速度引張り試験装置の開発】

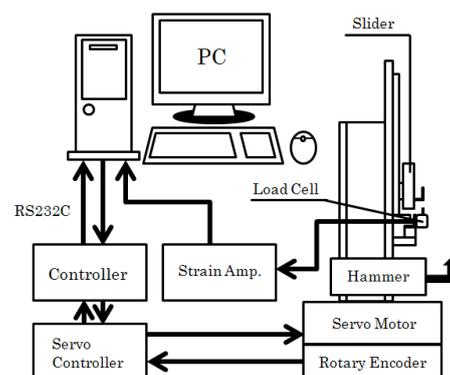
以下に、装置設計に関する重要ポイントを示す。

○引張り試験の最高ひずみ速度は 100/s とする。(交通事故を想定しての豊田中央研究所のアドバイスにより決定)

○試験サンプルの標点間距離は 10mm (サンプル長さは 20mm)、幅は 1mm~3mm とする。

○引張りの開始時に速度が変化しない荷重メカニズムを採用する。

次図に、試験装置のブロック図を示す。



【頸髄の高速引張試験および試験機の改良】

製作した引張り試験装置の改良を行いながら、頸髄軟膜および頸髄実質の引張り試験を行う。さらに、高速引張試験結果に関するデータ処理を行い、頸髄の粘弾性特性を確認する。

4. 研究成果

【高ひずみ速度引張り試験装置の開発】

比較的高ひずみ速度（クロスヘッド速度）による引張り試験が可能な試験装置の開発および製作を行った。以下に、製作した試験装置本体の写真を示す。

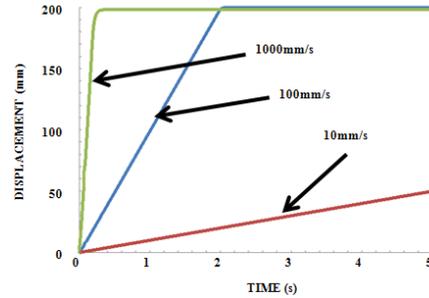


試験サンプルの長さ、ひずみ速度の制限から、本体のアクチュエータは、最高 1000 mm/s (100/s) の速度を出せるものとした。速度が非常に速いことから、試験サンプルをセットした状態から引張りを行うと、最初の加速が必要となるため、所定のひずみ速度を出すことができない。そこで、以下の写真のように、荷重メカニズムを工夫し、サンプルをセットした掴み部に移動体を当てることにより、荷重開始から大きな速度を与えることができる機構とした。



Before Collision Moment of Collision After Collision

空気圧式衝撃試験機では、そのような構造のものも見られるが、速度の精度はあまり高くなく、今回のような生体サンプルの引張り実験用には設計されていない。本試験装置は、高ひずみ速度でありながら速度精度も高い実験ができるものである。以下のグラフは、クロスヘッドの変位時間特性であるが、どのクロスヘッド速度においても直線的であり、一定の速度となっていることがわかる。



一方、高速であるための懸案事項として、衝撃による振動ノイズがあるが、装置全体の防振やセンサ付属ジグの工夫による固有振動数のシフトにより対処することにした。また、試験サンプルのすべりや引張り状況の確認は、高速カメラを使用した。

【頸髄の高速引張試験】

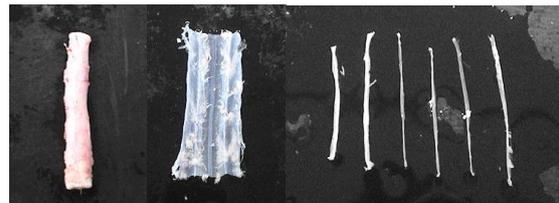
製作した試験機を使用し、頸髄の高速引張試験を実施した。

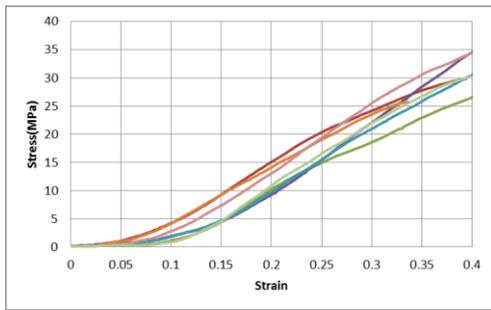
(1) 頸髄軟膜(後外側溝、後正中中隔、歯状韧带)の機械的性質調査

研究開始当初は、BSE の関係で試験サンプルとして牛頸髄は使用できなかったため、豚頸髄を使用した。サンプルの作成のため、試験から 2 時間前に屠殺された後に、筋肉を除去した豚頸椎（第 1 頸椎～第 1 胸椎）を用意した。

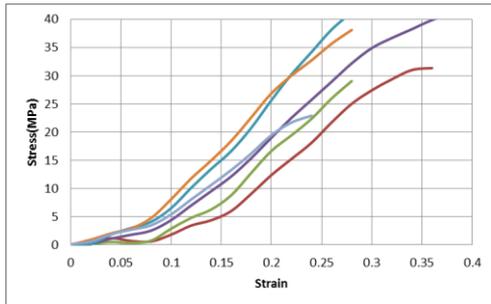
以下、軟膜のサンプル作成手順を写真とともに示す。

- ① 万力と電動ノコを用いて頸椎骨を背側から切断する。
- ② 硬膜管に入った脊髄を摘出する。
- ③ 摘出した脊髄を切開し、硬膜、クモ膜、白質、灰白質を取り除き、軟膜のみを摘出する。
- ④ 自作の軟膜切断用メスで測定部位(後正中中隔、後外側溝、歯状韧带)を切除、幅 1~3mm、長さ 20mm の均一な試料を作成する。





歯状靱帯の応力ひずみ特性(10/s)



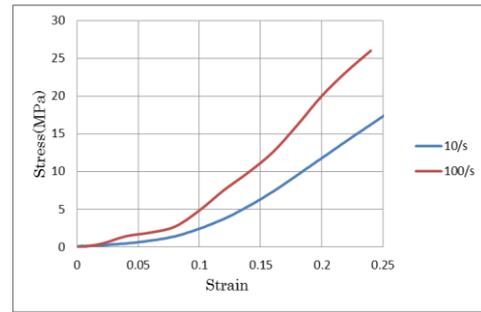
歯状靱帯の応力ひずみ特性(100/s)

豚頸髄の軟膜(後外側溝、後正中中隔、歯状靱帯)の機械的性質については、ひずみ速度 10/s および 100/s による高速引張試験から弾性率、最大応力、最大ひずみの試験結果を得ることができた。

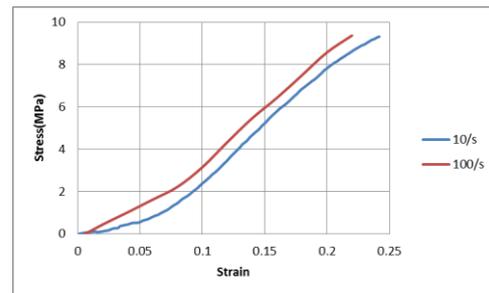
一例として、歯状靱帯のひずみ速度が 10/s および 100/s の応力ひずみ特性を示す。

次に、歯状靱帯、後外側溝、後正中中隔それぞれの結果を速度別に平均したものの比較を示す。弾性率に関しては、3種類の試料とも応力がひずみ速度により変化をする粘弾性特性の性質を示すことが確認できる。

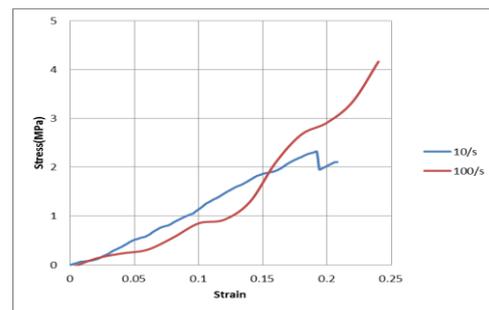
さらに、豚脊髄実質等の試料を使用して試料取付け部の作成と改良を実施中であったが、平成 22 年度中に発生した口蹄疫の影響により、食肉センターからの豚頸椎の供給が途絶えた。そこで、試料を急遽、牛頸髄に切り替え、研究体制等を一部変更した。BSE に関しては、県へ研究計画を申請し、神経部位の実験への使用許可を得た。そのことで、研究計画の遅延を余儀なくされたものの、22 年度末に試料採取方法の確立と試料取付け部の変更の目処がついた。



歯状靱帯のひずみ速度による特性の比較



後正中中隔のひずみ速度による特性の比較



後外側溝のひずみ速度による特性の比較

(2) 頸髄実質(灰白質、白質)の機械的性質調査

平成 23 年度は、試料採取方法の改善および試料取付け部の改良を行うとともに、実際にひずみ速度 1/s および 10/s による灰白質、白質の高速引張試験を実施した。

最初に、牛脊髄実質のサンプル作成方法を示す。

- ①牛頸椎の脊柱管に PET 材で製作した自作の取り出し器具を挿入し、神経根を切断しながら、軟膜ごと脊髄を取り出す。
- ②脊髄を 20mm 間隔に医療用メスで切断する。
- ③20mm 間隔に切断された脊髄の中心管に市販の釣糸を通し、スパイナル針の外筒に通す。外筒を釣糸にスライドさせ試料を移す。
- ④内筒を外筒へ通し、切断脊髄を内筒へと移す。次に、市販のフィルムケースおよび外筒を用いて作成した脊髄固定器具に内筒を通して、切断脊髄をスライドさせて設置する。



牛頸髄のサンプルの作成

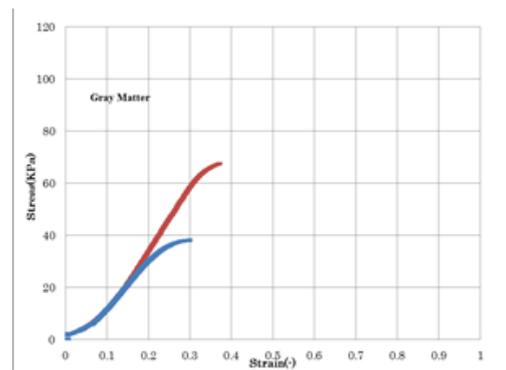
⑤試料を設置した固定器具に、水で溶解し発熱しない市販の型取り剤を流し込み、切断脊髄を完全に固定する。完全固定された切断脊髄から、医療用バイオシーガンを用いて脊髄実質（灰白質、白質）を打ち抜き、サンプルを得る。

⑥取得したサンプルの断面積を計測するため、透過型センサを用いて直径を測定する。

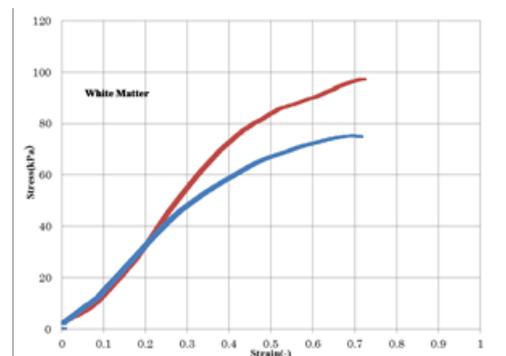
牛頸髄実質の機械的性質については、現在も試験が継続中であるが、今までの引張試験の結果では、どちらの速度でも白質の方が灰白質より引張強さが大きい傾向を示し、灰白質は白質に比べ、グラフの傾きが急で早く破断する傾向が得られた。これより灰白質は白質に比べ、硬く脆い特性があるということが確認できた。これは過去に行われた引張速度が非常に遅い準静的な実験結果と同じ傾向を示している。また、両者とも、ひずみ速度の上昇により引張強さも上昇していた。これより高速でも脊髄実質が粘弾性特性を持つことが確認された。

【今後の課題】

引張試験のひずみ速度については、100/sはS/N比が悪いため、現状では1/sと10/sの2とおろしか調べられていない。ノイズの周波数特性を調査したところ、原因はハンマがスライダに衝突した際の衝撃によるセンサ治具振動系の共振および交流電源のノイズであることが判明した。本実験装置が可能な最速のクロスヘッド速度1000mm/s(100/s)で引張試験を行うためには、衝撃ノイズを軽減するため、今後、出来る限り引張治具の軽量化を図る必要がある。



灰白質のひずみ速度による特性の比較



白質のひずみ速度による特性の比較

【研究データの有用性】

豊田中央研究所は、有限要素法の技術を用いたバーチャル人体モデル(THUMS)を開発し、コンピュータ上で車対車、車対ヒトの衝突実験を可能にしたが、現在、過去の一連の研究データは、このTHUMSに導入されている。

この技術は、自動車内安全空間の解析や安全装置の開発、最近では鞭打ち低減シートの開発・商品化に応用されている。しかし、エアバッグなどの車内安全装置が作動したにもかかわらず、頸椎、頸髄に障害をきたす例(Hanks:2003)、鞭打ち患者のなかにも、脊髄障害マーカーが髄液中に放出されている例があることが報告されている(Guez:2003)。特に、頸椎症や脊柱管狭窄症などの頸椎疾患患者は、健常者よりも容易に重度の脊髄障害を引き起こしやすい。健常者を参考に開発された自動車内安全装置は、今後修正の余地が十分にあり、将来的には乗員の身体的特徴も考慮したオーダーメイドの車内安全装置の開発が必要である。そのためには脊髄障害発生メカニズムの解明が必要であり、脊髄の力学特性を欠かすことはできないと思われる。

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)

〔雑誌論文〕(計1件)

①市原和彦, 大木順司, 陳献, 櫻本逸男(他2名), 脊髓の生体力学, 脊椎脊髓ジャーナル, 査読有, Vol.24, No.12, (2011), 1101-1107

〔学会発表〕(計7件)

①Itsuo Sakuramoto, Kazuhiko Ichihara, Junji Ohgi, Xian Chen(他2名), Mechanical properties of the pia mater in the spinal cord at high strain rates for computer simulation model of the spinal cord injury, The 41rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience, 2011.11.15, Walter E. Washington Convention Center (USA)

②Kazuhiko Ichihara, Itsuo Sakuramoto, Junji Ohgi, Xian Chen(他2名), The finite element analysis for the onset mechanisms of spinal cord injury and cervical spondylotic myelopathy, The 41rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience, 2011.11.15, Walter E. Washington Convention Center (USA)

③市原和彦, 森田英隆, 宮崎誠也, 大木順司, 櫻本逸男(他4名), 圧迫性頸髄障害の発症メカニズム解明, 第26回日本脊髄外科学会, 2011.6.9, 沼津市民文化センター

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

櫻本 逸男 (SAKURAMOTO ITSUO)
徳山工業高等専門学校・
機械電気工学科・教授
研究者番号: 70225853

(2)研究協力者

市原 和彦(ICHIHARA KAZUHIKO)
NPO 法人
日本運動器バイオメカニクス研究所・医師