

頸椎症性脊髄症における障害高位診断への  
拡散テンソルMRIの応用

氏名 末富 裕

所属 山口大学大学院医学系研究科

システム統御医学系専攻 整形外科学分野

平成27年11月

## 目 次

1. 要旨	1
2. 研究の背景	3
3. 目的	5
4. 対象および方法	6
5. 結果	10
6. 考察	11
7. 結語	16
8. 図表および注釈	17
9. 謝辞	26
10. 参考文献	27

## 要旨

### 【目的】

拡散テンソル画像 (diffusion tensor imaging、以下 DTI) は従来の MRI に比し、脊髄内の病理学的変化を敏感に反映し、従来の MRI 画像では変化が現れないような、初期の段階の頸椎症性脊髄症 (cervical spondylotic myelopathy、以下 CSM) の診断への有用性などが報告されている。一方、頸椎症性脊髄症の治療においては、その障害高位の診断が非常に重要である。電気生理学的検査は、脊髄神経の伝導障害を定量的に評価することが可能である。術中の脊髄誘発電位 (spinal cord-evoked potential、以下 SCEP) と DTI の相関について検討された報告はない。本研究の目的は、CSM の障害高位診断において、DTI が客観的な指標となりうるかどうかを検討することである。

### 【方法】

3.0 テスラ MRI を使用した。DTI パラメーターとして、apparent diffusion coefficient (以下、ADC)、fractional anisotropy (以下、FA) を使用した。一般的に、組織傷害部位では ADC 値は上昇し、FA 値は低下するとされている。健常者 11 例、CSM 患者 10 例を対象に、ADC および FA を C2/3 から C6/7 までの各椎間板レベルで測定した。従来の MRI 画像所見に基づいて、CSM 症例を単椎間狭窄群 (n=3) と多椎間狭窄群 (n=7) の 2 群にわけた。術中 SCEP は CSM 症例で

測定し、障害高位診断を行った。各症例の ADC 値および FA 値と SCEPTOR を比較した。

#### **【結果】**

単椎間狭窄群の全 3 例と多椎間狭窄群 7 例中 6 例において、SCEPTOR に基づく障害高位で ADC 値が最大となった。一方、障害高位で FA が最小値となった症例は、単椎間狭窄群の 2 例、多椎間狭窄群の 2 例であった。

#### **【結論】**

本研究の結果から、CSM の障害高位診断における補助的な診断指標として、ADC 値が有用である可能性が示唆された。



## 【研究の背景】

頚椎症性脊髄症（CSM）は神経学的理学所見や単純 X 線像、MRI などの画像検査に基づいて診断される。しかしながら、神経学的理学所見は常に典型的であるとは限らず、CSM の臨床症状もまた、個々の症例によって異なる。加えて、MRIT2 強調画像における髄内高信号の存在は、必ずしも脊髄症の程度とは相関しない。CSM の治療においては、その障害高位の診断が非常に重要であるが、しばしば、特に多椎間狭窄を呈する症例において、障害高位の決定に難渋することがある。電気生理学的手法による脊髄誘発電位（SCEP）は、脊髄神経の伝導障害の有無や程度を定量的に評価することが可能であり、障害高位診断においては、客観性の高い有用な検査法である。

拡散テンソル画像（DTI）は、組織内の水分子の拡散の大きさや方向性をもとにして得られる。DTI によって、微細構造の変化の客観的かつ定量的な評価が可能である。

有用な DTI パラメーターとして、apparent diffusion coefficient（ADC）と fractional anisotropy（FA）があげられる。ADC は水分子の拡散の大きさを反映し、拡散の方向とは無関係である。組織構造によって水分子の拡散は制限されているが、組織傷害を受けた部位では、一般的に ADC 値は上昇する。<sup>1</sup> 脊髄神経の軸索構造が水分子の拡散方向の制御に与える影響は大きい。FA は、このよ

うな構造によって制限された、水分子の拡散の異方性の強さを反映し、0 から 1 の値で示される。正常な白質は神経線維に富み、灰白質では疎である。したがって、白質よりも灰白質のほうが水分子の拡散の異方性は弱くなり、FA は低い値を示す。FA 値の低下は水分子の拡散異方性の低下を反映し、これは脊髄の圧迫部位における神経線維の損傷あるいは変性を示唆する。<sup>2</sup> 早期の CSM の診断や、手術予後との相関について、DTI パラメーター値を応用した報告が散見される。

3,4

## 【目的】

本研究の目的は、DTI パラメーター値が、CSM の障害高位診断における客観的な指標となりうるかどうかを検討することである。外科的治療を行う本症において、術前により正確に障害高位を診断することは非常に重要であり、DTI パラメーター値の有用性が示されれば、将来的に検討を重ねることで、手術の適切なタイミングの判断につながるような、組織傷害および機能障害の定量的な評価方法として位置付けることが可能かもしれない。

## 【対象および方法】

### <健常例>

11名（男性3、女性8）、平均年齢68.6歳（56-87）を対象とした。いずれも、自覚症状がなく、頸部の外傷や神経学的な障害がないもの、とした。また、MRIにて頸椎での脊髄圧迫所見がないことを確認した。

### <頸椎症性脊髄症症例>

臨床症状および神経学的異常所見を認め、慢性的な頸髄圧迫病変を認める10例（男性6、女性4）、平均年齢71.8歳（60-82）、を対象とした。

### <臨床評価>

脊髄症の診断は、深部腱反射の亢進、上肢知覚障害、運動障害に基づいて診断した。<sup>5</sup> 各CSM症例の神経学的所見を表1に示す。加えて、CSMの重症度を評価するため、筋力、歩行障害、膀胱機能の評価も行った。日本整形外科学会頸髄症判定基準（以下、JOAスコア）を使用した。JOAスコアは、上肢機能（4点）、下肢機能（4点）、知覚（6点）、膀胱機能（3点）を評価し、神経学的な機能障害を定量的に評価する。術前JOAスコアは平均8.75点（5.5-12）であった。

### <画像検査方法>

MRI 検査は Philips Medical System 社製 Achieva 3.0-T を使用し、2010 年から 2013 年に実施した。

T1 および T2 強調画像を用いて解剖学的な評価と脊髄圧迫の部位を判断した。DTI は、single shot echo-planar imaging 法にて撮影し、拡散テンソル解析を行い、ADC map 画像と FA map 画像を得た。ROI に含まれる全 pixel を平均して得られる 3 つの固有値 ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ) から、ADC 値 [ADC =  $(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) / 3 = \lambda$ ]、FA 値 (下記の式) を算出した。

$$FA = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{(\lambda_1 - \lambda)^2 + (\lambda_2 - \lambda)^2 + (\lambda_3 - \lambda)^2}}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2}}$$

これらのパラメーター値は C2/3 から C6/7 までの 5 椎間で、水平断画像を用いて測定した。DTI は一度に多方向のスライス画像を得ることができないため、各椎間レベルの画像は C4/5 椎間板に平行なスライスで作成した。(図 1)

< 関心領域 (Region of interest; ROI) の設定 >

T2 強調画像を解剖学的構造の参考として、DTI の適切な水平断画像を選択したのち、ROI の設定は一人の検者により手動で行った。ROI は白質と灰白質の両者を含み、かつ脳脊髄液を含まないように設定した。(図 2)

ROI は長方形とし、大きさは、とくに CSM 症例において、脊髄断面の形態により各々異なった。

### <術中脊髄誘発電位検査>

3 種類の SCEP、すなわち正中神経刺激 (MN-SCEPs)、経頭蓋刺激 (Tc-SCEPs)、脊髄刺激 (Sp-SCEPs) を術中に記録した。正中神経刺激は手関節で行い、陰極を中枢側に設置した (方形波、0.2ms、3Hz)。刺激強度は、短母指屈筋の単収縮が生じる強さの 1.5 倍とした。

経頭蓋刺激は頭蓋骨上に設置した針電極 (13R25, 長さ 8mm, 直径 0.8mm, Dantec 社, Denmark) を通して行った (方形波、0.2ms、100mA)。左右の外耳道をつなぐ線の頂点から右外側 7 cm の部位に陽極を、その対側に陰極を設置した。

脊髄刺激は硬膜外電極 (UKG-100-2PM, 直径 0.8mm, 長さ 900mm, Unique Medical corporation, Japan) を C7/T1 椎弓間から硬膜背側の空間に挿入した (方形波、0.2ms、3Hz)。C2/3 から C7/T1 の各椎弓間で黄色靭帯内に記録電極 (13R25) を設置し、椎弓形成を行う前にすべての SCEP を記録した。MN-SCEP と Sp-SCEP では、参照電極を頸部後方の皮下組織内に挿入した。すべての SCEP の信号は Nicolet Biomedical 社製 Nicolet Viking を使用し、増幅および帯域通過フィルター (20-3000Hz) を通して記録した。刺激回数は MN-SCEP で平均 100 から 200 回、Tc-SCEP で 40 から 60 回、Sp-SCEP で 20 から 30 回とした。

MN-SCEP では、negative peak の大きさが C6/7 椎間レベルと比較して 30% 以上の減少があれば異常と判定した。また、Tc-SCEP では 1 つ上の椎間レベルと比較

して 50%以上の減少、Sp-SCEP は 1 つ下の椎間レベルと比較して 50%以上の減少があるとき、異常と判定した。<sup>6-8</sup> 術中 SCEP の一例を図 3 に示す。

#### <統計>

Microsoft 社エクセル統計を使用した。2 群間の有意差の検定には Mann-Whitney U 検定を用いた。P 値 5%未満をもって統計学的に有意と判定した。

## 【結果】

### <健常者と CSM 症例での DTI パラメーター値の比較>

5 椎間の ADC および FA 値の平均および標準偏差を表 3 に示す。

全 5 椎間の ADC の平均値は、健常者 ( $1119 \pm 118 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ ) と CSM 症例 ( $1233 \pm 234 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ ) の間で有意差を認めなかった ( $p=0.205$ )。

FA 平均値は健常者 ( $0.66 \pm 0.06$ ) に対して、CSM 症例 ( $0.59 \pm 0.05$ ) で有意に低値であった ( $p=0.024$ )。

### <DTI パラメーター値と脊髄障害高位との関連>

従来の MRI にて、3 例が単椎間狭窄、7 例が多椎間狭窄であった。従来の MRI での脊髄圧迫高位、T2 強調画像での髄内高信号変化、各椎間板レベルでの ADC 値および FA 値を表 4 に示す。

単椎間狭窄、多椎間狭窄に関わらず、SCEP で判定された伝導障害はいずれの症例でも 1 椎間であった。障害高位は C3/4 が 5 例、C4/5 が 5 例であった。単椎間狭窄の全 3 例と、多椎間狭窄の 7 例中 6 例で、障害高位で ADC が最大値をとっていた。障害高位で FA が最小値をとっていたのは、単椎間狭窄の 3 例中 2 例と、多椎間狭窄の 7 例中 2 例のみであった (表 5)。



## 【考察】

単椎間狭窄の全3例と、多椎間狭窄の7例中6例において、術中SCEPに基づく脊髄障害高位と一致したレベルでADCが最大値となっていた。脊髄障害高位でFAが最小値となっていたのは、単椎間狭窄の3例中2例と、多椎間狭窄の7例中2例のみであった。

健常者から得られたDTIパラメーターの正常値は、年齢や測定環境、ROI設定などの要因によって異なる。<sup>9,10</sup> また、CSM症例では、症例ごとに組織傷害の程度は様々である。それゆえ、DTIパラメーター値を用いて個体間の比較や群間比較を行う場合には、測定値の標準的な個体差を考慮に入れる必要がある。本研究は、症例間の比較ではなく、症例ごとに、どの椎間板レベルでパラメーター値が最も大きく変化しているのかをみている。従って、測定値の個体差を考慮に入れる必要はない。

FA値の低下は一般的には軸索構造の障害を示唆する。すなわち、脳や脊髄における白質の変性などである。<sup>11</sup> 脊髄におけるDTI解析は、灰白質や白質、あるいは側索や後索など、部位別にROIを設定して行うことが理想的である。しかし、脳とは異なり、脊髄横断面は小さく、画像の解像度は決して良いとはいえず、細かいROIの設定が技術的に難しい。本研究では、過去の報告にあるように、灰白質と白質を含め、かつ脳脊髄液を含まないように、可及的に広い範囲

で ROI を設定し、脊髓横断面全体としての組織傷害の程度の評価を行うこととした。ROI は各椎間板レベルにつき 1 つとした。ROI の形や大きさは、各横断面の形状によって異なる。そのため、ピクセル数、合計のピクセル領域、灰白質と白質をどの程度含んでいるか、についても、各症例、各スライスによって違いがある。脊髓横断面の灰白質と白質全体を含めることが理想的であるが、現在の解像度を考えると、横断面の辺縁まで含むような ROI の設定では、脳脊髄液を含んでしまう危険性がある。<sup>4,9,12</sup>

圧迫性頸髄症において、組織におけるどのような変化が ADC 値を上昇させるのかについては、未だ明確になっていない。現時点では、脊髓の圧迫によって引き起こされる虚血や低酸素状態、細胞膜の傷害による膜透過性の亢進などが、ADC 値上昇の原因となっている可能性があると考えられている。<sup>3,13,14</sup>

T2 強調画像での髄内高信号変化に先立って生じる ADC 値の上昇は、脊髓症の早期の変化を示唆している可能性がある。<sup>10</sup> この変化は組織浮腫を反映していると考えられている。

圧迫された脊髓の ADC 値が、脊髓の各高位間で有意に異なるのかどうかについては、相反するデータが報告されている。<sup>3,12</sup> これらの報告の結果の違いは、対象となった症例群の脊髓組織傷害の程度の違いから生じている可能性がある。

ADC と FA は必ずしも相関しない。<sup>2</sup> 例えば、脳卒中患者の障害部位の神経組織

ではグリオースによる組織の安定化が生じている。この場合、FA 値は正常より低下しているが、ADC 値は上昇しないことがある。<sup>15,16</sup> 重度の圧迫性頸髄症の場合、FA は低下するが、時に ADC の上昇が伴わないことがある。そのため、過去にも報告されているが、ADC 値単独で脊髄障害の有無を判断するのは困難である。<sup>2,17</sup> 術中脊髄誘発電位は、CSM における障害高位や脊髄症の程度の客観的な評価を可能にする、と我々は考えている。<sup>18</sup> そこで、DTI パラメーターに基づく評価の客観性を高めるために、術前の DTI 解析と術中の脊髄誘発電位とを比較検討した。

圧迫部位の範囲（単椎間か多椎間か）を問わず、多くの症例において、障害高位で ADC が最大値となっていた。両者が一致しなかった症例 4 では、術中 SCEP から判断した障害高位は C3/4 であったが、ADC が最大、FA が最小であったのは C6/7 であった。これは、C6/7 にも重度の狭窄があったため、と考えられ、術中 SCEP で同レベルにも伝導障害がみられているが、脊髄障害の責任高位としては C3/4 という判断になる。

症例 10 では C3/4 と C5/6 に脊髄の圧迫所見を認め、SCEP による責任高位は C3/4 であったが、FA は C4/5 で最小となっていた。

FA 値の低下は、脊髄の圧迫が最も強い部位と、そこから離れた部位でも見られることがある、という報告がある。<sup>4</sup> さらには、特に多椎間狭窄のある場合は、

最も狭窄の強いレベルで必ずしも FA は最小とならない、ともいわれている。このような所見は、CSM に関連する脱髄性変化や軸索損傷が、疾患の経過のなかで、圧迫による直接的な傷害を受けた部位だけでなく、その遠位部にも影響を及ぼしているということを反映しているのかもしれない。<sup>19,20</sup>

4 症例（症例 2, 5, 6, 9）では、圧迫がなく、かつ責任高位から離れた C6/7 で FA 値が最小となっていた。後述するように、ADC map や FA map の作成段階、あるいは ROI の設定など、測定環境による影響は否定できないが、本研究の結果から、現時点では FA 値は脊髄症の責任高位の客観的な診断指標としては使用し難いと考えられた。

損傷部位で ADC 値が上昇する理由は明確ではない。しかしながら、仮に脊髄の慢性的な圧迫に伴う虚血や変性、炎症性変化の結果 ADC が上昇しているのであれば、最も組織学的な傷害の強い部位が責任高位である、というのは理にかなっていると考える。それゆえ、本研究の結果から、ADC は CSM の責任高位診断における補助的な手段となりうる可能性があると考えられた。

本研究にはいくつかの limitation があげられる。1 つ目は、サンプルサイズが小さいため、予備的な研究であるということである。さらなる結果には、より多くの症例数が必要である。2 つ目は、各椎間板レベルの水平断像が、C4/5 に平行なスライスであることである。これは DTI パラメーターの値に影響する可

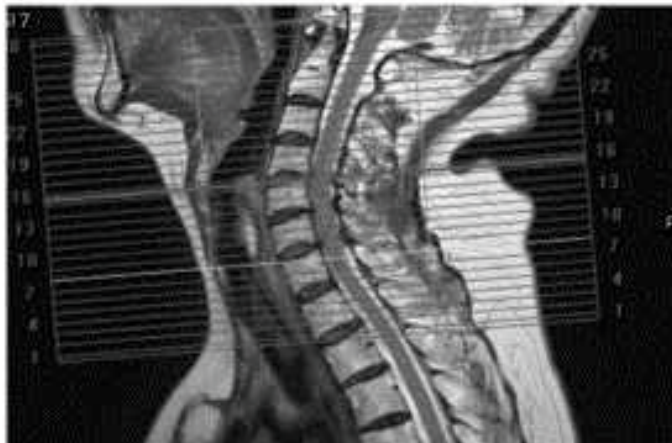
能性があり、とくに拡散異方性を表す FA への影響は検討を要する課題である。

3つ目として、各 ROI に灰白質と白質がそれぞれどの程度含まれるかは、各症例・各スライスで異なる、ということである。これにより、何らかのバイアスが生じる可能性がある。4つ目は、脊髄における ADC 値や FA 値の変化と病理組織学的な変化とを対比することができないことである。これらのパラメータ値の変化の原因についてはまだ推測の段階である。5つ目としては、術中の脊髄誘発電位は、頸髄の各髄節の完全な評価ができる、というところまでは証明されていない。理想的には、各筋節に対応した針筋電図を行うことが望ましい。症例 9 では、理学所見による障害高位診断は C5/6 であったが、SCEP と DTI の結果からは C4/5 であった。この症例は多椎間狭窄 (C4/5、5/6) で、これらのレベルで髄内に T2 高信号変化を認めた。多椎間狭窄例では、理学所見と従来の MRI 画像から障害高位を診断するのに難渋することがある。Seichi らは、正診率は 70% 以上と報告しているが、<sup>5</sup> 多椎間狭窄の CSM では、感度、特異度、正確性いずれも低くなる。そのような場合、針筋電図を用いることで、より正確な診断が可能である。

## 【結語】

本研究では、CSMにおける障害高位とADCが最大となる椎間高位との間に関連性がみられた。これは、CSMの障害高位診断にADCが補助的な指標として有用となる可能性を示唆するものと考えた。

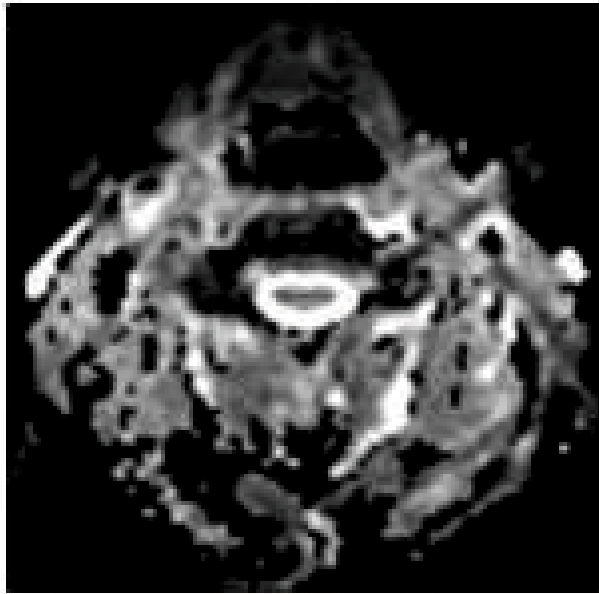
図 1 . DTI 解析の基本画像



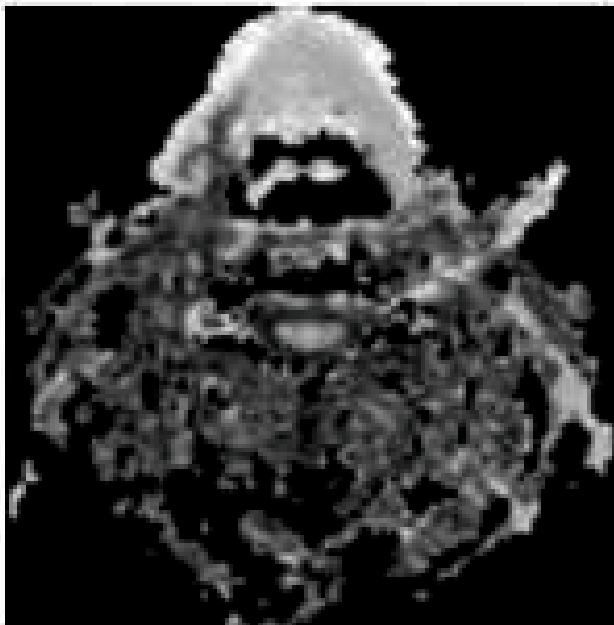
(a) T2 強調画像 (fast spin echo 法) . DTI は一度に複数の方向のスライスを得ることができないため、各椎間板レベルで C4/5 に平行なスライスを使用した.



(b) T2 強調画像水平断



(c)ADC map. CSF は高信号域として描出される.

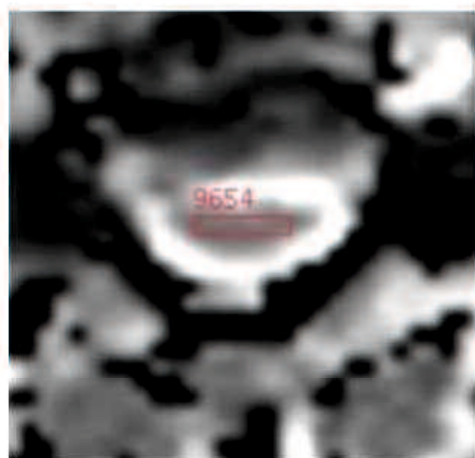


(d)FA map. CSF は低信号域として描出される.

従来の T2 強調画像に比べ、ADC map や FA map では脊髄の辺縁部の境界が不明瞭.

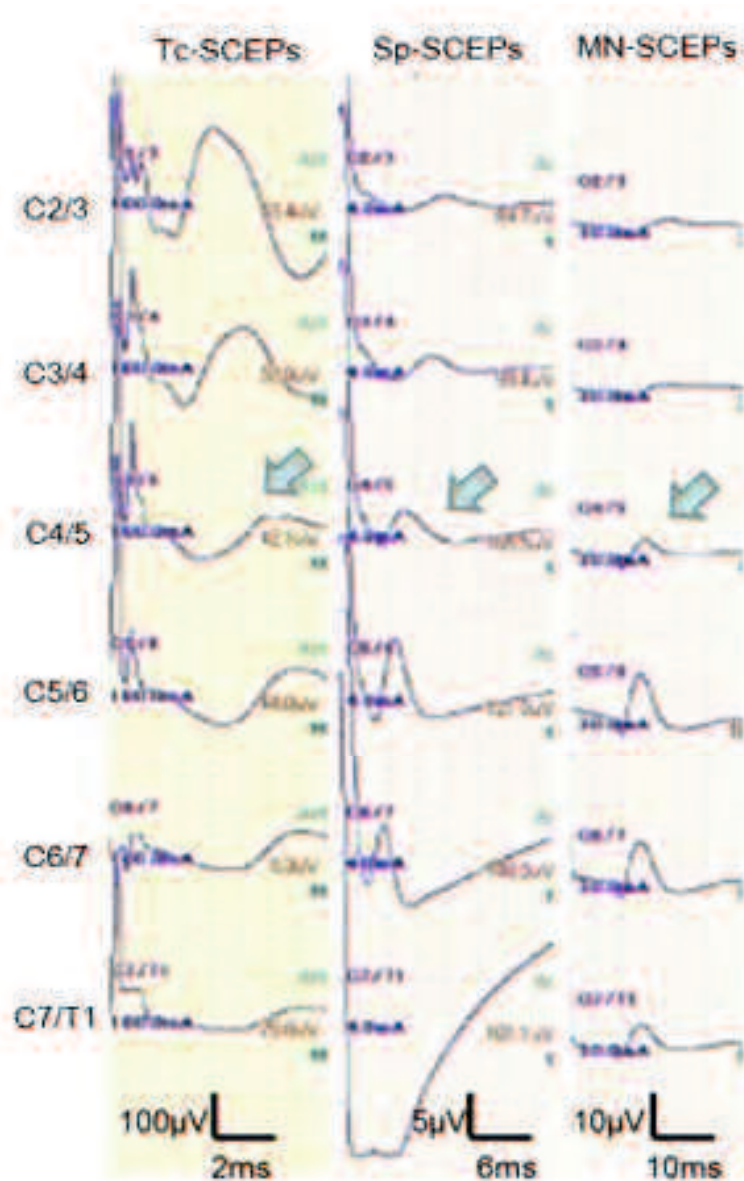


図 2. ROI の設定[ADC map (a) and in FA map (b)].



ROI は四角形で白質と灰白質を含み、CSF は含まないように設定する。

図 3. 術中脊髄誘発電位 (C4/5 頸髄症の 1 例) .



Tc-SCEPs では、C4/5 での振幅が C3/4 と比較して 50%以下に減少している。  
 Sp-SCEPs では、C4/5 での振幅が C5/6 の 50%以下に減少している。MN-SCEPs では、C4/5 での振幅が C6/7 の振幅の 30%以上減少している。[Tc-SCEP; 経頭蓋電気刺激脊髄誘発電位, Sp-SCEP; 脊髄刺激脊髄誘発電位, MN-SCEP; 正中神経刺激脊髄誘発電位]

表1. CSM各症例の神経学的理学所見

症例	BTR	TTR	筋力低下 (最上位)	知覚障害(皮膚分節)								理学所見からの 障害高位診断			
				触覚				痛覚							
				C5	C6	C7	C8	T1	C5	C6	C7		C8	T1	
1	→	↑	上腕三頭筋	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	+	C4/5
2	↓	↑	三角筋	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	C4/5
3	↓	↑	なし	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	C4/5
4	↑	↑	上腕二頭筋	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	C3/4
5	↑	↑	なし	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	C3/4
6	↑	↑	上腕二頭筋	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	C3/4
7	→	↑	三角筋	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	C4/5
8	↓	↑	三角筋	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	C4/5
9	→	→	上腕三頭筋	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	C5/6
10	↑	↑	なし	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	C3/4

BTR, 上腕二頭筋腱反射. TTR, 上腕三頭筋腱反射.

表2. 日本整形外科学会頸髄症判定基準 (JOAスコア)

---

(A) 運動機能
(I) 手指
0 自力では不能 (箸、スプーン、フォーク、ボタンかけすべて不能)
1 箸、書字不能、スプーン・フォークで辛うじて可能
2 箸で大きなものはつまめる、書字辛うじて可能、大きなボタンかけ可能
3 箸、書字ぎこちない、ワイシャツの袖のボタンかけ可能
4 正常
(II) 肩・肘 (三角筋または上腕二頭筋の徒手筋力検査)
-2 MMT≤2
-1 MMT3
0.5 MMT4
0 MMT5
(III) 下肢
0 独立、独歩不能
0.5 立位は可能
1 平地でも支持が必要
1.5 平地では杖なしで歩けるが、不安定
2 平地では支持不要、階段の昇降に手すり必要
2.5 平地では支持不要、階段の降りのみ手すり必要
3 ぎこちないが、速歩可能
4 正常
(B) 知覚機能
(I) 上肢
0 知覚脱失 (触覚、痛覚)
0.5 5/10以下の鈍麻 (触覚、痛覚)、耐え難いほどの痛み・しびれ
1 6/10以上の鈍麻 (触覚、痛覚)、しびれ、過敏
1.5 軽いしびれのみ (知覚正常)
2 正常
(II) 体幹
0 知覚脱失 (触覚、痛覚)
0.5 5/10以下の鈍麻 (触覚、痛覚)、耐え難いほどの痛み・しびれ
1 6/10以上の鈍麻 (触覚、痛覚)、絞扼感、しびれ、過敏
1.5 軽いしびれのみ (知覚正常)
2 正常
(III) Lower extremity
0 知覚脱失 (触覚、痛覚)
0.5 5/10以下の鈍麻 (触覚、痛覚)、耐え難いほどの痛み・しびれ
1 6/10以上の鈍麻 (触覚、痛覚)、しびれ、過敏
1.5 軽いしびれのみ (知覚正常)
2 正常
(C) 膀胱機能
0 尿閉、失禁
1 残尿感、怒責、尿切れ不良、排尿時間延長、尿もれ
2 開始遅延、頻尿
3 正常
合計 17点
MMT : 徒手筋力検査

---

**表3.** 健常群とCSM症例群の2群間における、5椎間全体の平均ADC値および平均FA値の比較

	健常群 (n=11)	CSM症例群 (n=10)	P value
平均ADC値	1119 ± 118	1233 ± 234	0.205
平均FA値	0.663 ± 0.06	0.598 ± 0.05	0.024

Mann-Whitney U test  
平均 ± SD

ADCの単位:  $10^{-6}$  mm<sup>2</sup>/s

ADC; apparent diffusion coefficient, FA; fractional anisotropy

表4. CSM症例におけるMRI T2強調画像での脊髄圧迫部位と髄内高信号変化、術前JOAスコア、DTIパラメーター値

症例	MRIでの脊髄 圧迫部位	髄内高信号 変化	JOAスコア (術前)	ADC値 ( $10^{-4} \text{mm}^2/\text{s}$ )						FA値					
				C2/3	C3/4	C4/5	C5/6	C6/7	C2/3	C3/4	C4/5	C5/6	C6/7		
1	C4/5	C4/5	11	1037	1008	1412	1374	1248	0.631	0.676	0.502	0.614	0.58		
2	C4/5	—	9	1024	853	1045	829	877	0.69	0.705	0.604	0.721	0.583		
3	C4/5	C4/5	10	859	860	1089	833	853	0.745	0.721	0.51	0.65	0.652		
4	C3/4, 6/7	C3/4	9	1183	1313	1214	1005	1829	0.595	0.545	0.6	0.569	0.412		
5	C3/4, 4/5	C3/4	9	1082	2106	1755	1182	1334	0.626	0.605	0.626	0.652	0.366		
6	C3/4, 4/5	C3/4	7	1101	1670	1594	1405	1292	0.684	0.685	0.681	0.48	0.417		
7	C3/4, 4/5	C3/4	6.5	1071	1139	907	1007	982	0.593	0.566	0.641	0.686	0.632		
8	C3/4, 4/5, 5/6	C4/5	8.5	1005	1188	1486	1427	1086	0.54	0.978	0.539	0.582	0.625		
9	C4/5, 5/6	C4/5, 5/6	12	1106	989	3155	1528	1259	0.721	0.639	0.593	0.685	0.574		
10	C3/4, 5/6	C3/4, 5/6	5.5	1227	1415	1093	1198	1143	0.531	0.488	0.435	0.503	0.548		

表5. 術中の各脊髄誘発電位の伝導障害の椎間高位とDTLパラメーター (ADC最大値、FA最小値) の関係

症例	①各SCEPによるCSM責任高位			②ADC最大値の椎間高位	①と②の一致の有無	③FA最小値の椎間高位		①と③の一致の有無
	MN-SCEPs	Tc-SCEPs	Sp-SCEPs			位	位	
1	C4/5	C4/5	C4/5	C4/5	あり	C4/5	あり	
2	C4/5	C4/5	C4/5	C4/5	あり	C6/7	なし	
3	C4/5	C4/5	C4/5	C4/5	あり	C4/5	あり	
4	C3/4	C3/4	C3/4	C6/7	なし	C6/7	なし	
5	C3/4	C3/4	C3/4	C3/4	あり	C6/7	なし	
6	C3/4	C3/4	C3/4	C3/4	あり	C6/7	なし	
7	C3/4	C3/4	C3/4	C3/4	あり	C3/4	あり	
8	C4/5	C4/5	C4/5	C4/5	あり	C4/5	あり	
9	C4/5	C4/5	C4/5	C4/5	あり	C6/7	なし	
10	C3/4	C3/4	C3/4	C3/4	あり	C4/5	なし	

SCEP: 脊髄誘発電位. MN-SCEP: 正中神経刺激脊髄誘発電位. Tc-SCEP: 経頭蓋電気刺激脊髄誘発電位. Sp-SCEP: 脊髄刺激脊髄誘発電位.



**【謝辞】**

本研究を進めるにあたり、ご指導を賜りました田口敏彦教授、寒竹司准教授をはじめ、山口大学整形外科教室の諸先生方に深く感謝申し上げます。



## 【参考文献】

- 1 Facon D, Ozanne A, Fillard P, Lepeintre JF, Tournoux-Facon C, Ducreux D. MR diffusion tensor imaging and fiber tracking in spinal cord compression. *AJNR Am J Neuroradiol* 2005; 26: 1587-1594.
- 2 Yoo WK, Kim TH, Hai DM, Sundaram S, Yang YM, Park MS et al. Correlation of magnetic resonance diffusion tensor imaging and clinical findings of cervical myelopathy. *Spine J* 2013; 13: 867-876.
- 3 Song T, Chen WJ, Yang B, Zhao HP, Huang JW, Cai MJ et al. Diffusion tensor imaging in the cervical spinal cord. *Eur Spine J* 2011; 20: 422-428.
- 4 Wen CY, Cui JL, Liu HS, Mak KC, Cheung WY, Luk KD et al. Is diffusion anisotropy a biomarker for disease prognosis of cervical spondylotic myelopathy? *Radiology* 2014; 270: 197-204.
- 5 Seichi A, Takeshita K, Kawaguchi H, Matsudaira K, Higashikawa A, Ogata N et al. Neurological level diagnosis of cervical stenotic myelopathy. *Spine* 2006; 31: 1338-1343.
- 6 Kaneko K, Kawai S, Taguchi T, Fuchigami Y, Ito T, Morita H. Correlation between spinal cord compression and abnormal patterns of median nerve somatosensory evoked potentials in compressive cervical myelopathy:

comparison of surface and epidurally recorded responses. *J Neurol Sci* 1998; 158: 193-202.

7 Kanchiku T, Taguchi T, Kaneko K, Fuchigami Y, Yonemura H, Kawai S. A correlation between magnetic resonance imaging and electrophysiological findings in cervical spondylotic myelopathy. *Spine* 2001; 26: 269-274.

8 Kaneko K, Taguchi T, Morita H, Yonemura H, Fujimoto H, Kawai S. Mechanism of prolonged central motor conduction time in compressive cervical myelopathy. *Clin Neurophysiol* 2001; 112: 1035-1040.

9 Uda T, Takami T, Tsuyuguchi N, Sakamoto S, Yamagata T, Ikeda H et al. Assessment of cervical spondylotic myelopathy using diffusion tensor magnetic resonance imaging parameter at 3.0 tesla. *Spine* 2013; 38: 407-414.

10 Mamata H, Jolesz FA, Maier SE. Apparent diffusion coefficient and fractional anisotropy in spinal cord: age and cervical spondylosis-related changes. *J Magn Reson Imaging* 2005; 22: 38-43.

11 Inano S, Takao H, Hayashi N, Abe O, Ohtomo K. Effects of age and gender on white matter integrity. *AJNR Am J Neuroradiol* 2011; 32: 2103-2109.

12 Hori M, Fukunaga I, Masutani Y, Nakanishi A, Shimoji K, Kamagata K et

al. New diffusion metrics for spondylotic myelopathy at an early clinical stage. *Eur Radiol* 2012;22: 1797-1802.

13 Demir A, Ries M, Moonen CT, Vital JM, Dehais J, Arne P et al. Diffusion-weighted MR imaging with apparent diffusion coefficient and apparent diffusion tensor maps in cervical spondylotic myelopathy. *Radiology* 2003; 229: 37-43.

14 Mamata H, Jolesz FA, Maier SE. Characterizaion of central nervous system structures by magnetic resonance diffusion anisotropy. *Neurochem Int* 2004; 45: 553-560.

15 Thomalla G, Glauche V, Koch MA, Beaulieu C, Weiller C, Röther J. Diffusion tensor imaging detects early Wallerian degeneration of the pyramidal tract after ischemic stroke. *Neuroimage* 2004; 22: 1767-1774.

16 Werring DJ, Toosy AT, Clark CA, Parker GJ, Barker G, Miller D et al. Diffusion tensor imaging can detect and quantify corticospinal tract degeneration after stroke. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2000; 69: 269-272.

17 Aota Y, Niwa T, Uesugi M, Yamashita T, Inoue T, Saito T. The correlation of diffusionweighted magnetic resonance imaging in cervical compression

myelopathy with neurologic and radiologic severity. *Spine* 2008; 33: 814-820.

18 Kanchiku T, Imajo Y, Suzuki H, Yoshida Y, Akashi K, Taguchi T. Correlation between spinal cord function assessed by intraoperative SCEPs and morphology of the compressed spinal cord on MRI. *J Spinal Disord Tech* 2013, e-pub ahead of print 6 November 2013.

19 Urakawa T, Matsuzawa H, Suzuki Y, Endo N, Kwee IL, Nakada T. Analysis of ascending spinal tract degeneration in cervical spondylotic myelopathy using 3D anisotropy contrast single-shot echo planar imaging on a 3.0-T system. *J Neurosurg Spine* 2011; 15: 648-653.

20 Fehlings MG, Skaf G. A review of the pathophysiology of cervical spondylotic myelopathy with insights for potential novel mechanisms drawn from traumatic spinal cord injury. *Spine* 1998; 23: 2730-2737.