

中枢運動伝導時間と脊髄誘発電位を用いた頸部圧迫性脊髄症の電気生理学的評価

氏名 藤本 和弘

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 28 年 12 月

目次

1.	要旨	1
2.	研究の背景	3
3.	目的	5
4.	方法	6
	(1) 対象	6
	(2) 方法	6
	(3) 解析	9
5.	結果	11
6.	考察	13
7.	結語	16
8.	図表・説明文	17
9.	参考文献	21

1 【要旨】

2 【はじめに】 一般的に頸部圧迫性脊髄症 (CCM) は上下肢ともに皮質脊髄路障害を反映
3 する中枢運動伝導時間 (CMCT) の遷延を認めるが、上肢優位 CMCT 遷延例や胸椎部
4 CMCT (下肢 CMCT - 上肢 CMCT) 遷延例も存在する。【目的】CCM での上肢および胸椎部 CMCT
5 を用いた重症度評価の有用性を検討すること。【対象と方法】術前上肢 CMCT が
6 Mean+2SD (6.6ms) 以上に遷延し、術中脊髄誘発電位 (SCEPs) を施行した 94 例 (男 61 例、
7 女 33 例、平均年齢 68 歳) を対象とした。胸椎部 CMCT: 6.6 ± 1.2 ms を正常値とし、上
8 肢優位 CMCT 遷延群 (U 群) 14 例 (胸椎部 CMCT が Mean - 2SD: 4.4ms 以下)、上下肢同等
9 CMCT 遷延群 (E 群) 43 例 (胸椎部 CMCT が Mean \pm 2SD 未満)、下肢優位 CMCT 遷延群 (L 群) 37
10 例 (胸椎部 CMCT が Mean + 2SD: 9.0ms 以上か下肢 CMCT 測定不能) に分類した。術前神
11 経学的所見、術中 SCEPs、臨床成績を検討した。【結果】U 群は PTR 亢進 13 例 (93%)、
12 Romberg 徴候陽性 4 例 (29%)、母趾位置覚異常 2 例 (14%)、正中神経刺激 (MN)-SCEPs 異
13 常 14 例 (100%)、経頭蓋電気刺激 (TCE)-SCEPs 異常 14 例 (78%)、脊髄刺激 (Sp)-SCEPs
14 異常 5 例 (28%)、術前頸椎 Japanese Orthopedic Association (JOA) スコア 10.0 ± 1.8 、
15 術後 1 年時 14.6 ± 1.5 、平均改善率 67%であった。E 群は PTR 亢進 43 例 (100%)、Romberg
16 徴候陽性 30 例 (70%)、母趾位置覚異常 11 例 (26%)、MN-SCEPs 異常 14 例 (100%)、
17 TCE-SCEPs 異常 40 例 (93%)、Sp-SCEPs 異常 29 例 (67%)、術前頸椎 JOA スコア 9.7 ± 2.5 、
18 術後 1 年時 13.8 ± 2.1 、平均改善率 58%であった。L 群は PTR 亢進 36 例 (97%)、Romberg

1 徴候陽性 36 例 (97%)、母趾位置覚異常 27 例 (73%)、MN-SCEPs 異常 37 例 (100%)、
2 TCE-SCEPs 異常 37 例 (100%)、Sp-SCEPs 異常 28 例 (76%)、術前頸椎 JOA スコア 8.9 ± 2.4 、
3 術後 1 年時 12.8 ± 2.2 、平均改善率 46%であった。Romberg 徴候陽性率は 3 群間で有意
4 差を認め、母趾位置覚異常は L 群と他群間で有意差を認めた。SCEPs 異常は U 群と他
5 群間で有意差を認めた。術後頸椎 JOA スコアと改善率は L 群と他群間で有意差を認め
6 た。【考察】下肢優位 CMCT 遷延例では、広範な外側皮質脊髓路障害ならびに後索障害
7 を認める例が多く、術後成績不良であった。術後成績および ADL の改善度予測に、術
8 前胸椎部 CMCT 評価は有用である。

9

1 【研究の背景】

2 頸部圧迫性脊髄症 (Compressive Cervical Myelopathy : CCM) は高齢化社会において
3 増加傾向にあり、また医療機器の進化に伴い診断能力も進化している。CCM の手術適
4 応指標として、臨床症状に基づいた頸髄症スコアリング (Lesoin1985, Holly2009,
5 Tetreault2014) や、Magnetic Resonance Imaging (MRI) による脊髄圧迫の程度
6 (Ogino1983, Fujiwara1988, Mizuno2003) の報告がある。

7 MRI は、脊髄の圧迫性病変の同定が可能であるため、圧迫性脊髄症の診断に非常に
8 有用である。しかしながら、MRI ではしばしば無症候性の脊髄圧迫像を認めることが
9 あり (Tani 2003)、脊髄の形態異常評価は可能でも脊髄機能評価は困難である。電気
10 生理学的評価は脊髄機能評価が可能であるため、このような場合に非常に有用な検査
11 方法である。経頭蓋磁気刺激 (Transcranial Magnetic Stimulation : TMS) は、疼痛の
12 無い非侵襲的な、外側皮質脊髄路評価方法である (Baker 1985, Kaneko 1996)。中枢
13 運動伝導時間 (Central Motor Conduction Time : CMCT) の測定は、CCM での外側皮質
14 脊髄路の電気生理学的機能評価に有用であり、過去様々な報告がある (Funaba 2015,
15 Ofuji 1998, Takahashi 2008, Mazur 2014, Imajo 2012)。CCM では一般的に、上肢、
16 下肢ともに CMCT の遷延を認め (Funaba 2015, Nakamae 2010, Nakanishi 2014)、上
17 肢 CMCT、下肢 CMCT はそれぞれ術前の CCM 重症度指標として有用である (Takahashi
18 2008, Mazur 2014, Kadanka 2005)。しかしながら、上肢優位の CMCT 遷延を認める場

- 1 合や下肢優位の CMCT 遷延を認める場合も存在するが、それらに関する報告は渉猟し
- 2 得ない。
- 3

1 【目的】

2 CCMで術前上下肢CMCTを用いて、上肢優位CMCT遷延、上下肢同等CMCT遷延、下肢
3 優位CMCT遷延の3群に分類し、各群の病態生理を神経学的所見および電気生理学的
4 所見、臨床成績を用いて検討し、CMCTの術前評価指標としての有用性を検討したので
5 報告する。

6

1 【方法】

2 <対象>

3 対象は、2008年から2014年に山口大学医学部附属病院で頸椎椎弓形成術を施行し
4 た CCM94 例（男性 61 例、女性 33 例、平均年齢 68 歳 [28-87 歳]、平均身長
5 159cm [138-185cm]）である（表 1）。CCM 診断はホフマン徴候陽性を含む深部腱反射
6 の亢進、上下肢の感覚障害、および明らかな MRI における頸髄圧迫所見に基づいて行
7 った。全例で術前に CMCT、術中に脊髄誘発電位（Spinal Cord Evoked Potentials：
8 SCEPs）を計測した。脳疾患や末梢神経障害の既往例、頸椎再手術例、胸椎や腰椎部
9 での圧迫性病変合併例は除外した。

10 ・MRI

11 全例で 1.5-T MRI（MAGNETOM Avanto; SIEMENS, Munich, Germany）を用いた。T1
12 および T2 強調の矢状断と水平像を撮影した。断面は 3mm 厚で 0.3mm 間隔とした。

13 <方法>

14 術前神経学的所見、術前 CMCT、術中 SCEPs、術前頸椎 Japanese Orthopedic
15 Association (JOA) スコア、術後 1 年時頸椎 JOA スコア、JOA スコア改善率を評価し
16 た。

17 ・術前 CMCT

18 CMCT 計測には、Nicolet Viking Select NCS システム（Nicolet Biomedical, Madison,

1 WI, USA) を用いた。11mm 径の皿電極を belly-tendon 法に準じて小指外転筋 (abductor
2 digit minimi : ADM) と母趾外転筋 (abductor hallucis : AH) に設置し、誘発筋電位
3 (motor evoked potentials : MEPs) を計測した。TMS は Magstim 200 (The Magstim
4 Company Ltd, Carmarthenshire, UK) 、140mm の円形コイルにて行った。TMS は被検
5 者に ADM と AH の自発的な筋収縮を指示した状態で行った。コイルは ADM からの MEPs
6 計測時には Cz 点に置き、AH からの MEPs 計測時にはやや前方へ移動させて行った。4
7 回の TMS を行い、最短の MEPs 潜時を記録した。複合筋活動電位 (Compound muscle
8 action potentials : CMAPs) 潜時と F 波潜時は手関節部の尺骨神経最大上刺激もしくは
9 は足関節部の脛骨神経最大上刺激を 16 回行い最短の潜時を記録した。末梢運動伝導
10 時間 (peripheral motor conduction time : PMCT) は、CMAPs 潜時と F 波潜時を加え
11 1 を引いたものを 2 で除して算出した。上肢 CMCT は ADM の MEP 潜時から ADM の PMCT
12 を引いて算出した。下肢 CMCT は AH の MEPs 潜時から AH の PMCT を引いて算出した。
13 胸椎部 CMCT は下肢 CMCT から上肢 CMCT を引いて算出した (Kimura 1984)。胸椎部 CMCT
14 を用いて CCM を 3 群に分類した (図 1)。上肢優位 CMCT 遷延群 (U 群) : 上肢 CMCT が
15 正常値+2SD 以上かつ胸椎部 CMCT が正常値-2SD 以下。上下肢同等 CMCT 遷延群 (E 群) :
16 上肢 CMCT が正常値+2SD 以上かつ胸椎部 CMCT が正常値±2SD 未満。下肢優位 CMCT 遷
17 延群 (L 群) : 上肢 CMCT が正常値+2SD 以上かつ胸椎部 CMCT が正常値+2SD 以上もしくは
18 は下肢 CMCT 計測不能。

1 ・CMCT 正常値

2 過去の当科での検討より CMCT は身長と年齢に影響を受けることが明らかとなって
3 いる (Imajo 2015)。そこで身長と年齢を適合させた健常者 53 例 (平均年齢 62 歳 [50-85
4 歳]、平均身長 160cm [145-184cm]) において CMCT を計測し、正常値とした。

5 ・術中 SCEPs

6 SCEPs は正中神経刺激 (MN)-SCEPs、経頭蓋電気刺激 (TES)-SCEPs、脊髄刺激 (Spinal)
7 -SCEPs を術中に記録した。正中神経は手関節で近位に陰極を当て刺激した。刺激は短
8 形波で持続時間 0.2ms、頻度 3Hz で行った。刺激強度を母指が運動する状態の 1.5 倍
9 に設定した。TES は針電極 (13R25, 8mm 長, 直径 0.8mm, Dantec Dynamics A/S,
10 Skovlunde, Denmark) を頭蓋骨に刺入し、刺激強度は 100mA で、持続時間 0.2ms の短
11 形波で行った。陽極は外耳を結ぶ線上で Cz 点の右に 7cm、陰極は左に 7cm に設置した。
12 Sp-SCEPs は T11/12 椎間から硬膜外腔背側に硬膜外カテーテル電極を挿入して刺激し
13 た。刺激強度は 15-20mA で、持続時間 0.2ms、頻度 3Hz の短形波で刺激を行った。椎
14 弓形成術前にすべての SCEPs は各椎間の黄色靭帯に記録電極を挿入して記録された。
15 基準電極は MN-SCEPs と Sp-SCEPs の記録のため、頸部の皮下組織に挿入された。
16 TES-SCEPs の記録は双極性記録方式とした (近位に活性電極、遠位に基準電極を設置
17 した)。SCEPs のすべての信号は増幅され 20-3000Hz のバンドパスフィルタリングを
18 された。MN-SCEPs では平均 100-200 回、TES-SCEPs は平均 40-60 回、Spinal SCEPs

1 は平均 20-30 回の加算を行った。MN-SCEPs 異常は当科の過去の報告に基づき C6/7 椎
2 間を基準とした振幅比を用いて判定した (Kaneko 1998)。TES-SCEPs と Spinal-SCEPs
3 異常は、50%以上の陰性波減少を指標とした (Tani 2000, Kanchiku 2001)。

4 ・術前神経学的所見

5 術前神経学的所見は、膝蓋腱反射 (patellar tendon reflex:PTR)、Romberg 徴候、
6 母趾位置覚異常を評価した。PTR は亢進、正常、低下、消失に分類し、後 3 者を非亢
7 進と定義した。Romberg 徴候陽性は、被検者が両足をそろえて起立し、手を体側につ
8 け、閉眼した際にふらつきや転倒を来すものと定義した。母趾位置覚異常は、母趾の
9 他動による上下運動の判別が困難なものと定義した。神経学的検査は全例、脊椎外科
10 専門医である執刀医が行った。

11 ・JOA スコア (Holly 2009, Satomi 1994, Yonenobu 2001)

12 術前頸椎 JOA スコア、術後 1 年時頸椎 JOA スコアおよび JOA スコア改善率を評価し
13 た。JOA スコア改善率は、術後 JOA スコアから術前 JOA スコアを引いたものを、17 か
14 ら術後 JOA スコアを引いたもので除し、100 を乗じた値とした (Hirabayashi 1981)。
15 JOA スコアは全例、執刀医でない脊椎外科専門医によって評価を行った。

16 ・統計解析

17 統計解析には The software JMP® 11 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) を用
18 いた。3 群間の PTR 亢進率、Romberg 徴候陽性率、母指位置覚異常率、SCEPs 異常率に

- 1 関して Bonferroni 法を用いた χ^2 検定を行った。3 群間の術前頸椎 JOA スコア、術後
- 2 頸椎 JOA スコア、頸椎 JOA スコア改善率に関して、Bonferroni 法を用いた Mann-Whitney
- 3 U 検定を行った。P<0.05 を統計学的に有意差ありと判断した。

1 【結果】

2 <CMCT 正常値>

3 健常群の上肢 CMCT 平均値は 5.2 ± 0.7 ms、下肢 CMCT 平均値は 11.8 ± 1.1 ms、胸椎部 CMCT
4 は 6.6 ± 1.2 ms であった。U 群は 14 例、E 群は 43 例、L 群は 37 例であった。各群の
5 CMCT を表 1 に示す。

6 <SCEPs>

7 U 群では、MN-SCEPs 異常 14 例 (100%)、TES-SCEPs 異常 14 例 (78%)、Sp-SCEPs 異常 5
8 例 (28%) であった。E 群では、MN-SCEPs 異常 14 例 (100%)、TES-SCEPs 異常 40 例 (93%)、
9 Sp-SCEPs 異常 29 例 (67%) であった。L 群では、MN-SCEPs 異常 37 例 (100%)、TES-SCEPs
10 異常 37 例 (100%)、Sp-SCEPs 異常 28 例 (76%) であった。症例は、MN-SCEPs 異常のみを
11 認める上肢知覚障害型、MN-SCEPs と TES-SCEPs 異常を認めるが Sp-SCEPs は正常の後
12 外側障害型、全ての SCEPs 異常を認める横断障害型の 3 型に分類可能であった (図 2)。
13 U 群と他群間での SCEPs 異常型は有意差を認めた (図 3)。また、各群での障害高位を
14 表 1 に示す。

15 <術前神経学的所見>

16 U 群では、PTR 亢進 13 例 (93%)、Romberg 徴候陽性 4 例 (29%)、母趾位置覚異常 2 例 (14%)
17 であった。E 群では、PTR 亢進 43 例 (100%)、Romberg 徴候陽性 30 例 (70%)、母趾位置
18 覚異常 11 例 (26%) であった。L 群では、PTR 亢進 36 例 (97%)、Romberg 徴候陽性 36 例

1 (97%)、母趾位置覚異常 27 例 (73%) であった。PTR 亢進率は各群間で有意差を認めな
2 かった。Romberg 徴候陽性率は各群間で有意差を認めた。母趾位置覚異常率は L 群と
3 他群間で有意差を認めた (図 4)。

4 <JOA スコア>

5 U 群では、術前頸椎 JOA スコア 10.0 ± 1.8 、術後 1 年時 14.6 ± 1.5 、平均改善率 67% で
6 あった。E 群では、術前頸椎 JOA スコア 9.7 ± 2.5 、術後 1 年時 13.8 ± 2.1 、平均改善
7 率 58% であった。L 群では、術前頸椎 JOA スコア 8.9 ± 2.4 、術後 1 年時 12.8 ± 2.2 、
8 平均改善率 46% であった。術前頸椎 JOA スコアは各群間で有意差を認めなかった。術
9 後頸椎 JOA スコアと改善率は、L 群と他群間で有意差を認めた (図 5)。

10

1 【考察】

2 CMCTは、CCMでの中枢運動系、特に外側皮質脊髄路の客観的評価に有用である (Mazur
3 2014, Nakanishi 2014)。TMSによって大脳が刺激され、descending volleyが下向路
4 に生じる。そして前角細胞が発火し末梢神経に伝達し筋肉が反応してMEPsが記録さ
5 れる。CCM患者において、CMCTが遷延してもTES-SCEPsの潜時延長はなく振幅低下を
6 来していたことから、CMCT遷延の機序は、大径の速い単シナプス線維が早期に障害さ
7 れることで生じる伝導ブロックを反映しdescending volleyの減少により時間的空間
8 的加算が延長し前角細胞の発火遅延によると報告されている (Kaneko 2001, Nakanishi
9 2006, 2007)。

10 通常、CCMでは上下肢ともにCMCTが遷延し、(Funaba 2015, Nakamae 2010, Nakanishi
11 2014)、我々の研究でも同様の結果であった。CCMで上下肢CMCTが遷延していない例
12 は外側皮質脊髄路の障害が軽度であり、保存的加療を推奨する報告もある (Kadanka
13 2005)。しかしながら、本研究や過去の報告のCCMの中にも、上肢のみCMCTが遷延し
14 た例や、下肢よりも上肢優位のCMCT遷延例、上肢よりも下肢優位のCMCT先例が存在
15 する (Chang 1996, Deftereos 2015)。しかしながら、このような病態に関する報告は
16 過去にない。

17 当科では過去に、C3/4単椎間障害CCM例でのmultimodal SCEPs所見より、まず楔
18 状側が障害され、続いて外側皮質脊髄路、最後に薄束の順で障害が生じると報告した

1 (Imajo 2011)。本研究において下肢優位 CMCT 遷延例の大半が、MN-SCEPs、TES-SCEPs、
2 Sp-SCEPs 全てで異常を認める横断型であった。また、神経学的所見においても、
3 Romberg 徴候陽性率や母趾位置覚異常率は L 群で有意に高い結果であり、SCEPs 所見
4 と神経学的所見を併せると、下肢優位 CMCT 遷延例では薄束の障害が強いことが明ら
5 かとなった。

6 CCM の障害進展様式に関して、一般的には初期には前角と中間体における萎縮と神
7 経脱落を含み、外側と後方の伝導路に及んでいくと報告されている (Ito 1996)。更に、
8 当科では過去に脊髄バイオメカニズムによる研究で、外側皮質脊髄路のより中心から
9 応力上昇が進むことを報告しており (Nishida 2016, Ichihara 2004)、上肢優位の CMCT
10 遷延の病態として、前角と楔状側、外側皮質脊髄路のより中心の頸髄成分のみが主体
11 として障害された状態が考えられた。

12 先述の如く、CMCT 遷延の機序は、大径の速い単シナプス線維が早期に障害されるこ
13 とで生じる伝導ブロックにより時間的空間的加算が延長し前角細胞の発火遅延によ
14 る (Kaneko 2001, Nakanishi 2006, 2007)。外側皮質脊髄路のシェーマを図 6 に示す
15 が、上肢優位 CMCT 遷延時には、外側皮質脊髄路のより内側に位置する頸髄成分の大
16 径単シナプス線維のみが障害された状態にある。そして外側皮質脊髄路全体の大径単
17 シナプス線維が減少してくると、上下肢同等 CMCT 遷延の状態となる。更に、大径単
18 シナプス線維の障害が高度で、小径の伝導が遅い単シナプス線維主体となった状態で

1 は、下肢の方が上肢に比べて脊髄伝導距離が長いため、相対的に下肢 CMCT の遅延程
2 度が大きくなる。また、小径の単シナプス線維まで障害された場合には、前角での時
3 間的加重が不能となり、MEPs が導出不能となる。

4 すなわち、上肢優位 CMCT 遷延例では、灰白質、楔状束と外側皮質脊髄路の頸髄成
5 分が主に障害され、上下肢同等 CMCT 遷延例では、そこに外側皮質脊髄路全体と、薄
6 束の障害が加わり、下肢優位 CMCT 遷延例では、その障害が高度となり脊髄全体へ及
7 ぶと考えられた。術後成績に関して、上肢優位 CMCT 遷延例および上下肢同等 CMCT 遷
8 延例では一般的な CCM の術後成績 (Kawaguchi 2003, Suzuki 2009, Tanaka 2009) と同
9 等であったが、下肢優位 CMCT 遷延例では有意に劣っていた。一般的には頸椎 JOA ス
10 コアが 12 点未満であった場合に頸椎手術が推奨される (Kadanka 2000, Matsunaga
11 2004) が、本研究では、術前の頸椎 JOA スコアに有意差はなかったにも関わらず、術
12 後成績は下肢優位 CMCT 遷延例で有意に劣っていた。術後成績が良好であるため、脊
13 椎外科医は、上肢優位 CMCT 遷延例や上下肢同等 CMCT 遷延例での手術を検討すべきで
14 ある。下肢優位 CMCT 遷延を認めるような重症の CCM 例においても手術が必要である
15 が、その術後成績は不良であるかもしれない。胸椎部 CMCT による評価は、非侵襲的
16 で、術後予後予測可能な有用な評価方法であることが、本研究により明らかとなった
17 (Fujimoto 2016)。

18

19

1 【結語】

2 CCMで術前上肢および胸椎部CMCTを用いて、上肢優位CMCT遷延、上下肢同等CMCT遷
3 延、下肢優位CMCT遷延の3群に分類し、各群の病態生理を神経学的所見、電気生理学
4 的所見、および臨床成績を用いて検討した。下肢優位CMCT遷延群では、広範かつ重度
5 の外側皮質脊髄路障害ならびに後索障害を認める例が多く、術後成績不良であった。
6 術後成績およびADLの改善度予測に、術前胸椎部CMCT評価は有用である。

7

1 【図表・説明文】

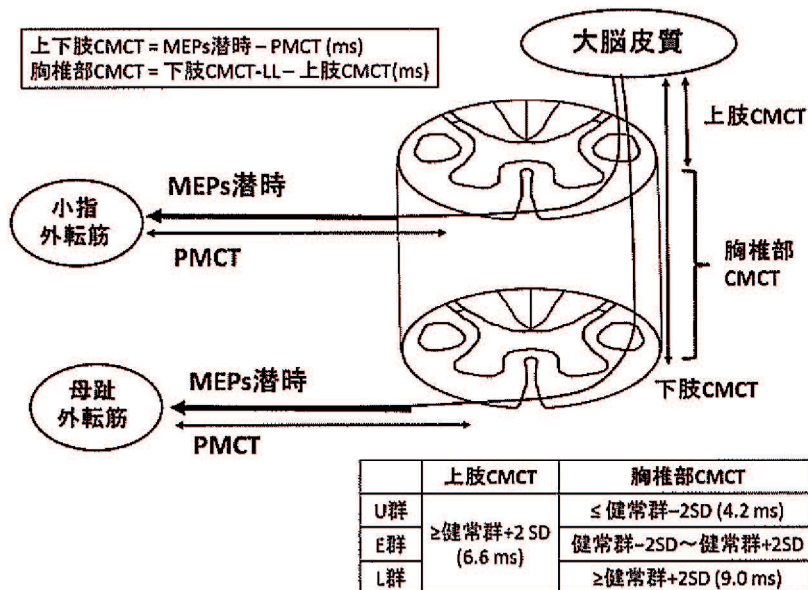
2 表1：対象要約およびCMCT値

	男/女	年齢 (歳)	身長 (cm)	SCEPs 障害高位	CMCT (ms)		
					上肢	下肢	胸椎部
U群 n=14	8/6	66±12	159±11	C3-4: 5	12.6±2.3	15.3±2.4	2.7±1.2
				C4-5: 7			
				C5-6: 2			
E群 n=43	28/15	70±11	159±8	C3-4: 18	10.6±2.6	16.9±2.4	6.4±1.3
				C4-5: 17			
				C5-6: 8			
L群 n=37	25/12	68±12	158±9	C3-4: 17	11.4±3.4	21.6±3.7	11.3±2.2
				C4-5: 14			
				C5-6: 5 C6-7: 1			

3 CMCT, central motor conduction time

4

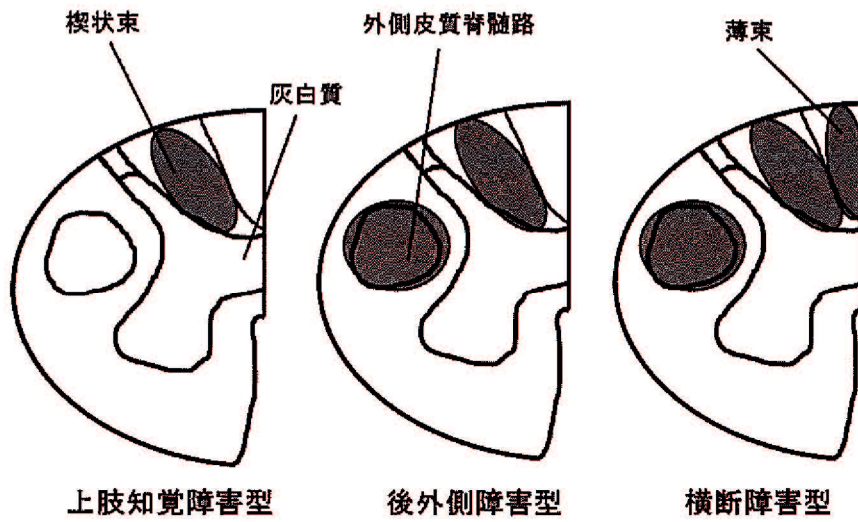
5 図1



6

7

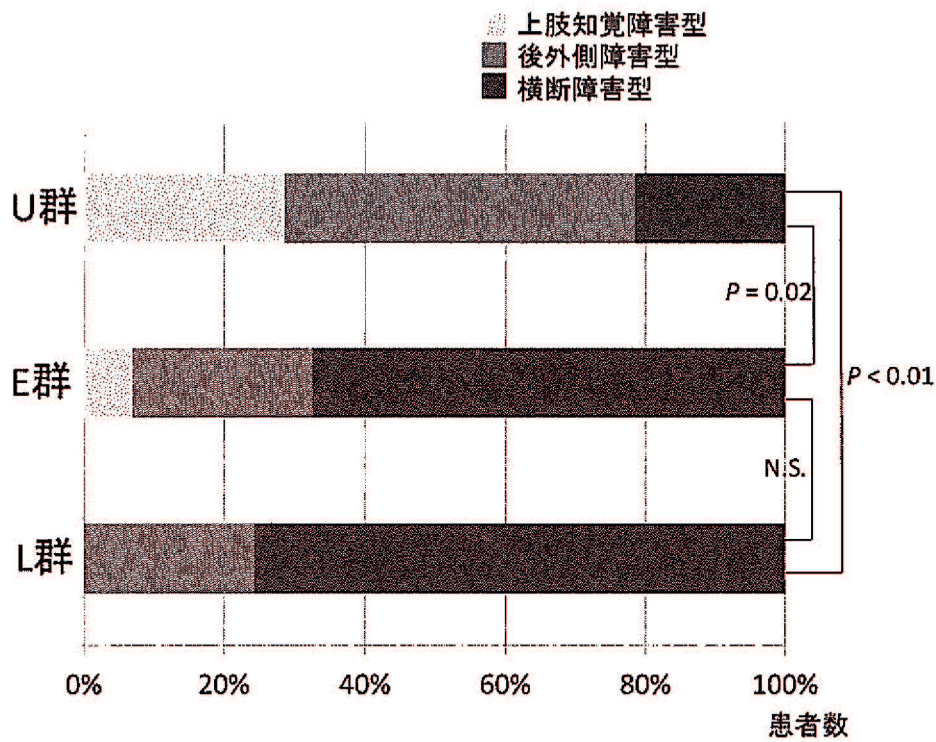
1 図2



2

3

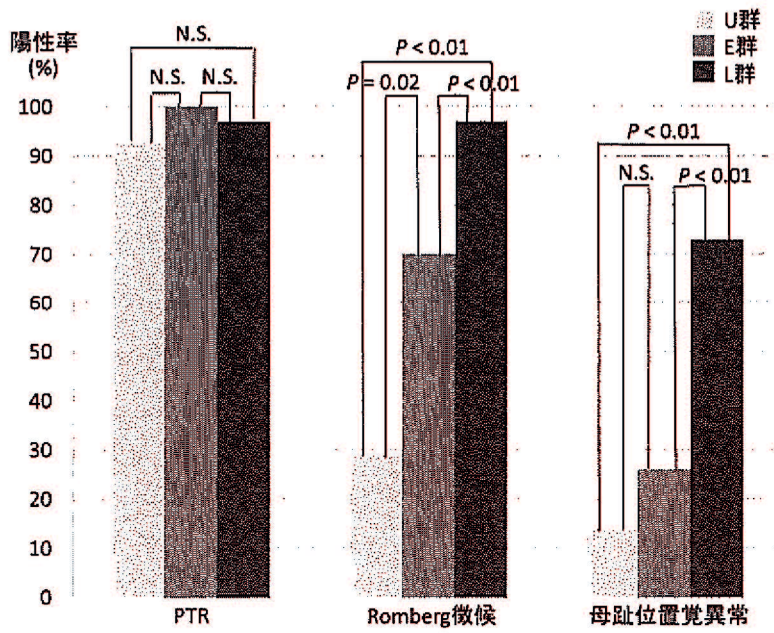
4 図3



5

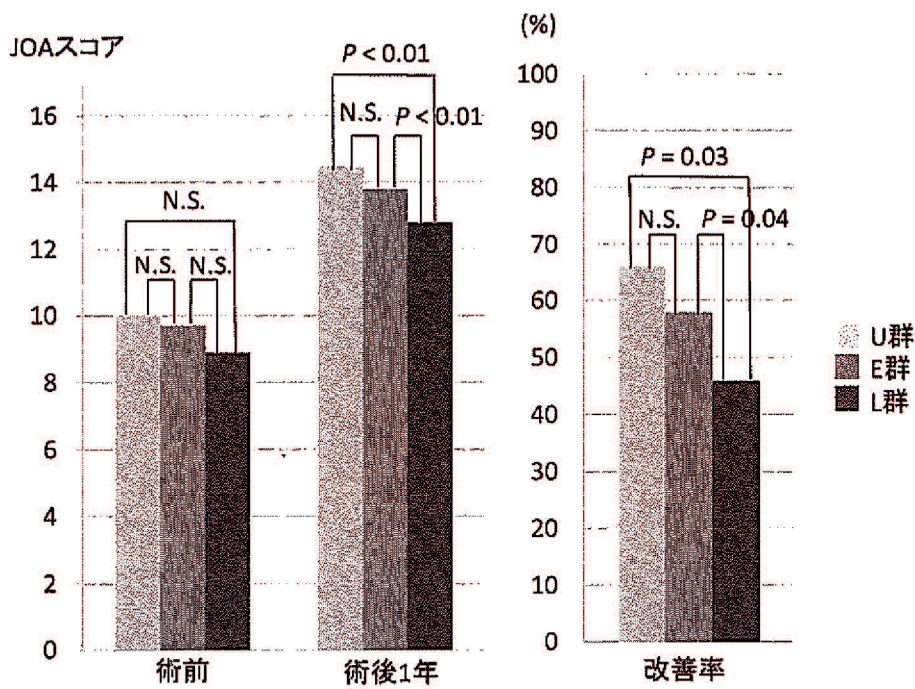
6

1 図4



2

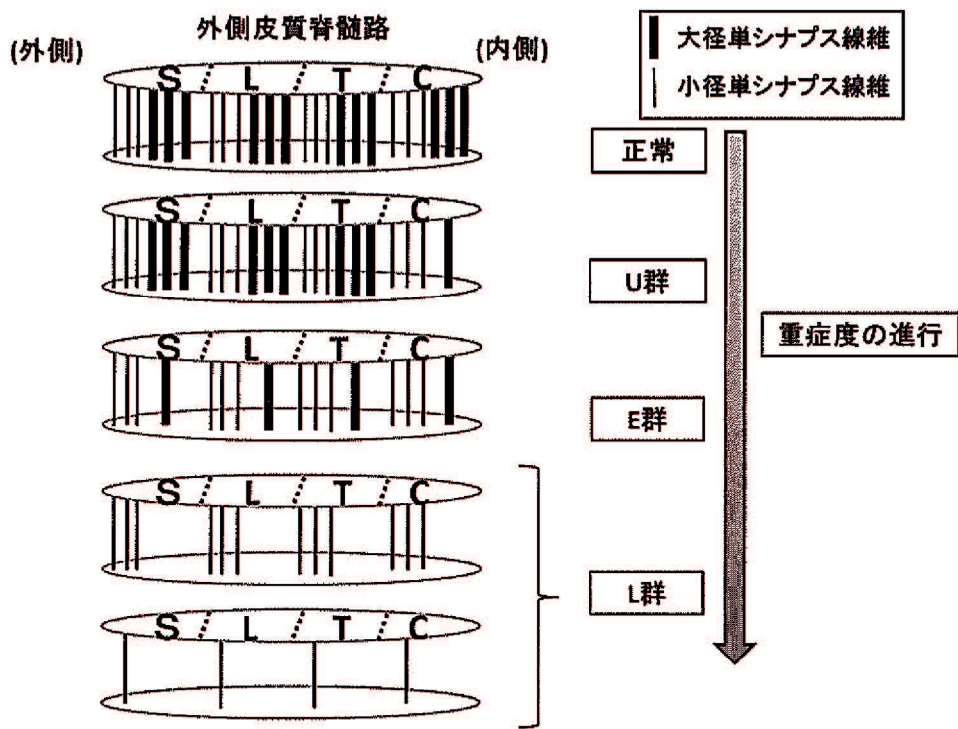
3 図5



4

5

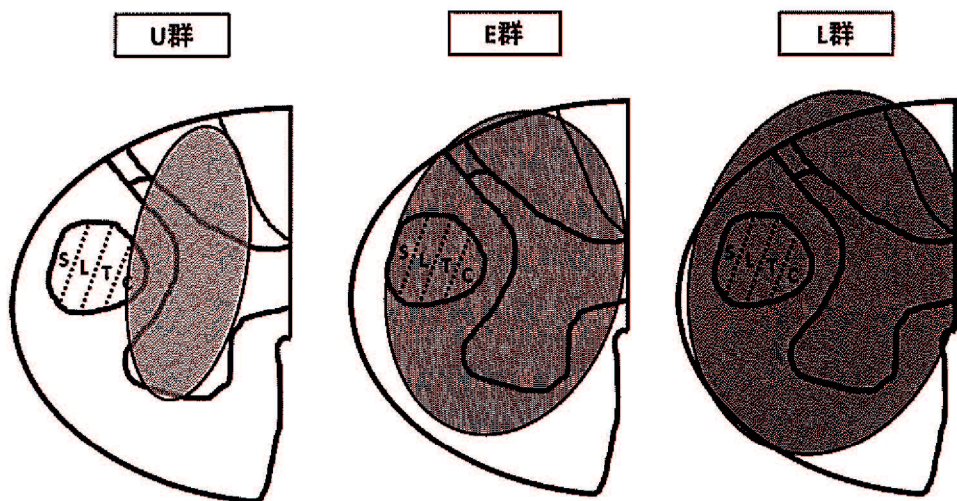
1 図6



2

3

4 図7



5

6

7

1 【参考文献】

- 2 1. Lesoin F, Bouasakao N, Clarisse J, et al. Results of surgical treatment of
3 radiculomyelopathy caused by cervical arthrosis based on 1000 operations. *Surg Neurol*
4 1985;23:350-5.
- 5 2. Holly LT, Matz PG, Anderson PA, et al. Functional outcomes assessment for cervical
6 degenerative disease. *J Neurosurg Spine* 2009;11:238-44.
- 7 3. Tetreault LA, Nouri A, Singh A, et al. Predictors of outcome in patients with cervical
8 spondylotic myelopathy undergoing surgical treatment: a survey of members from AOSpine
9 International. *World Neurosurg* 2014;81:623-33.
- 10 4. Ogino H, Tada K, Okada K, et al. Canal diameter, anteroposterior compression ratio,
11 and spondylotic myelopathy of the cervical spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 1983;8:1-15.
- 12 5. Fujiwara K, Yonenobu K, Hiroshima K, et al. Morphometry of the cervical spinal cord
13 and its relation to pathology in cases with compression myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)*
14 1988;13:1212-6.
- 15 6. Mizuno J, Nakagawa H, Inoue T, et al. Clinicopathological study of "snake-eye
16 appearance" in compressive myelopathy of the cervical spinal cord. *J Neurosurg*
17 2003;99:162-8.
- 18 7. Tani T, Kawasaki M, Taniguchi S, et al. Functional importance of degenerative

- 1 spondylolisthesis in cervical spondylotic myelopathy in the elderly. *Spine (Phila Pa 1976)*
2 2003;28:1128-34.
- 3 8. Baker A, Jalinous, R., Freeston, IL. Noninvasive magnetic stimulation of human motor
4 cortex. *Lancet* 1985;1:1106-7.
- 5 9. Kaneko K, Kawai S, Fuchigami Y, et al. Effect of stimulus intensity and voluntary
6 contraction on corticospinal potentials following transcranial magnetic stimulation. *J Neurol*
7 *Sci* 1996;139:131-6.
- 8 10. Funaba M, Kanchiku T, Imajo Y, et al. Transcranial magnetic stimulation in the
9 diagnosis of cervical compressive myelopathy: comparison with spinal cord evoked potentials.
10 *Spine (Phila Pa 1976)* 2015;40:E161-7.
- 11 11. Ofuji A, Kaneko K, Taguchi T, et al. New method to measure central motor conduction
12 time using transcranial magnetic stimulation and T-response. *J Neurol Sci* 1998;160:26-32.
- 13 12. Takahashi J, Hirabayashi H, Hashidate H, et al. Assessment of cervical myelopathy
14 using transcranial magnetic stimulation and prediction of prognosis after laminoplasty. *Spine*
15 *(Phila Pa 1976)* 2008;33:E15-20.
- 16 13. Mazur MD, White A, McEvoy S, et al. Transcranial magnetic stimulation of the motor
17 cortex correlates with objective clinical measures in patients with cervical spondylotic
18 myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)* 2014;39:1113-20.

- 1 14. Imajo Y, Kato Y, Kanchiku T, et al. Prediction of surgical outcome for proximal-type
2 cervical spondylotic amyotrophy novel mode of assessment using compound action potentials
3 of deltoid and biceps brachii and central motor conduction time. *Spine (Phila Pa 1976)*
4 2012;37:E1444-9.
- 5 15. Nakamae T, Tanaka N, Nakanishi K, et al. Quantitative assessment of myelopathy
6 patients using motor evoked potentials produced by transcranial magnetic stimulation. *Eur*
7 *Spine J* 2010;19:685-90.
- 8 16. Nakanishi K, Tanaka N, Kamei N, et al. Electrophysiological evidence of functional
9 improvement in the corticospinal tract after laminoplasty in patients with cervical
10 compressive myelopathy: clinical article. *J Neurosurg Spine* 2014;21:210-6.
- 11 17. Kadanka Z, Mares M, Bednarik J, et al. Predictive factors for mild forms of spondylotic
12 cervical myelopathy treated conservatively or surgically. *Eur J Neurol* 2005;12:16-24.
- 13 18. Kimura J. Principles and pitfalls of nerve conduction studies. *Ann Neurol*
14 1984;16:415-29.
- 15 19. Imajo Y, Kanchiku T, Suzuki H, et al. Effects of differences in age and body height on
16 normal values of central motor conduction time determined by F-waves. *J Spinal Cord Med*
17 2015 Dec 14:1-7. DOI: 10.1080/10790268.2015.1117193. [Epub ahead of print].
- 18 20. Kaneko K, Kawai S, Taguchi T, et al. Correlation between spinal cord compression and

- 1 abnormal patterns of median nerve somatosensory evoked potentials in compressive cervical
2 myelopathy: comparison of surface and epidurally recorded responses. *J Neurol Sci*
3 1998;158:193-202.
- 4 21. Tani T, Ishida K, Ushida T, et al. Intraoperative electroneurography in the assessment of
5 the level of operation for cervical spondylotic myelopathy in the elderly. *J Bone Joint Surg Br*
6 2000;82:269-74.
- 7 22. Kanchiku T, Taguchi T, Kaneko K, et al. A correlation between magnetic resonance
8 imaging and electrophysiological findings in cervical spondylotic myelopathy. *Spine (Phila*
9 *Pa 1976)* 2001;26:E294-9.
- 10 23. Satomi K, Nishu Y, Kohno T, et al. Long-term follow-up studies of open-door expansive
11 laminoplasty for cervical stenotic myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)* 1994;19:507-10.
- 12 24. Yonenobu K, Abumi K, Nagata K, et al. Interobserver and intraobserver reliability of
13 the japanese orthopaedic association scoring system for evaluation of cervical compression
14 myelopathy. *Spine (Phila Pa 1976)* 2001;26:1890-4.
- 15 25. Hirabayashi K, Miyakawa J, Satomi K, et al. Operative results and postoperative
16 progression of ossification among patients with ossification of cervical posterior longitudinal
17 ligament. *Spine (Phila Pa 1976)* 1981;6:354-64.
- 18 26. Kaneko K, Taguchi T, Morita H, et al. Mechanism of prolonged central motor

- 1 conduction time in compressive cervical myelopathy. *Clin Neurophysiol* 2001;112:1035-40.
- 2 27. Nakanishi K, Tanaka N, Fujiwara Y, et al. Corticospinal tract conduction block results in
3 the prolongation of central motor conduction time in compressive cervical myelopathy. *Clin*
4 *Neurophysiol* 2006;117:623-7.
- 5 28. Nakanishi K, Tanaka N, Kamei N, et al. Significant correlation between corticospinal
6 tract conduction block and prolongation of central motor conduction time in compressive
7 cervical myelopathy. *J Neurol Sci* 2007;256:71-4.
- 8 29. Chang CW, Lin SM. Measurement of motor conduction in the thoracolumbar cord. A
9 possible predictor of surgical outcome in cervical spondylotic myelopathy. *Spine (Phila Pa*
10 *1976)* 1996;21:485-91.
- 11 30. Deftereos SN, Kechagias E, Ioakeimidou C, et al. Transcranial magnetic stimulation but
12 not MRI predicts long-term clinical status in cervical spondylosis: a case series. *Spinal Cord*
13 2015;53 Suppl 1:S16-8.
- 14 31. Imajo Y, Kato Y, Yonemura H, et al. Relative vulnerability of various spinal tracts in
15 C3-4 cervical spondylotic myelopathy: multi-modal spinal cord evoked potentials. *Spinal*
16 *Cord* 2011;49:1128-33.
- 17 32. Ito T, Oyanagi K, Takahashi H, et al. Cervical spondylotic myelopathy.
18 Clinicopathologic study on the progression pattern and thin myelinated fibers of the lesions of

- 1 seven patients examined during complete autopsy. *Spine (Phila Pa 1976)* 1996;21:827-33.
- 2 33. Nishida N, Kanchiku T, Imajo Y, et al. Stress analysis of the cervical spinal cord: Impact
3 of the morphology of spinal cord segments on stress. *J Spinal Cord Med* 2016;39:327-34.
- 4 34. Ichihara K, Taguchi T, Sakuramoto I, et al. Mechanism of the spinal cord injury and the
5 cervical spondylotic myelopathy: new approach based on the mechanical features of the
6 spinal cord white and gray matter. *J Neurosurg* 2003;99:278-85.
- 7 35. Kawaguchi Y, Kanamori M, Ishihara H, et al. Pathomechanism of myelopathy and
8 surgical results of laminoplasty in elderly patients with cervical spondylosis. *Spine (Phila Pa*
9 *1976)* 2003;28:2209-14.
- 10 36. Suzuki A, Misawa H, Simogata M, et al. Recovery process following cervical
11 laminoplasty in patients with cervical compression myelopathy: prospective cohort study.
12 *Spine (Phila Pa 1976)* 2009;34:2874-9.
- 13 37. Tanaka N, Nakanishi K, Fujimoto Y, et al. Clinical results of cervical myelopathy in
14 patients older than 80 years of age: evaluation of spinal function with motor evoked potentials.
15 *J Neurosurg Spine* 2009;11:421-6.
- 16 38. Kadanka Z, Bednarík J, Vohanká S, et al. Conservative treatment versus surgery in
17 spondylotic cervical myelopathy: a prospective randomised study. *Eur Spine J* 2000;9:538-44.
- 18 39. Matsunaga S, Sakou T, Taketomi E, et al. Clinical course of patients with ossification

1 of the posterior longitudinal ligament: a minimum 10-year cohort study. *J Neurosurg*
2 2004;100:245-8.

3 40. Fujimoto K, Kanchiku T, Imajo Y, et al. Use of Central Motor Conduction Time and
4 Spinal Cord Evoked Potentials in the Electrophysiological Assessment of Compressive
5 Cervical Myelopathy. *Spine* 2016 Oct 25 DOI: 10.1097/BRS.0000000000001939 [Epub
6 ahead of print].