

Relationship Between Cauda Equina Conduction Time  
and Type of Neurogenic Intermittent Claudication  
due to Lumbar Spinal Stenosis

(腰部脊柱管狭窄症における  
神経性間欠跛行と馬尾伝導時間との関係)

氏名 永尾 祐治  
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  
人体機能統御学分野(整形外科)

令和1年6月

## 目次

1. 要旨	1
2. 研究の背景	2
3. 目的	2
4. 方法	2
(1) 対象	2
(2) 方法	3
(3) 解析	4
5. 結果	5
6. 考察	8
7. 結語	10
8. 謝辞	10
9. 参考文献	11

# 1. 要旨

【目的】磁気刺激運動誘発電位における馬尾伝導時間(cauda equina conduction time: CECT)の遷延が腰部脊柱管狭窄症(lumbar spinal stenosis: LSS)による神経性間欠跛行(neurogenic intermittent claudication: NIC)の機能別分類に関連するかを検討した。

【方法】2005～2016年の期間にNICを愁訴として手術加療を施行されたLSS患者149例を対象とした。男性86例、女性63例、手術時平均年齢は70.0歳(50～86歳)であった。全ての患者はNIC分類別に馬尾型67例、混合型53例、神経根型29例に分類された。術前に全例においてCECTを計測した。皿電極をbelly-tendon法に準じ母趾外転筋(Abductor Hallucis: AH)に貼付した。足関節部で脛骨神経を電気刺激しAHより複合筋活動電位(compound muscle action potentials: CMAPs)とF波を導出し末梢運動伝導時間(peripheral motor conduction time: PMCT)を算出した。磁気刺激装置に繋いだ円形シングルコイルを用いて腰仙部に磁気刺激を行い、安静時の運動誘発電位(motor evoked potentials: MEPs)を記録した。CECTはPMCTから腰部磁気刺激によるMEPsの潜時を差し引くことで算出した。また全例においてMRIもしくはCTミエログラフィを用いて硬膜管面積(dural sac cross-sectional area: DSCA)の測定と馬尾弛緩(redundant nerve roots: RNR)の有無を評価した。DSCAはaxial planeを用いて手術を施行した最狭窄部の一椎間の面積を計測した。RNRはsagittal planeを用いて馬尾のredundancyの有無を評価した。

【結果】CECTは馬尾型では $5.6 \pm 1.1$ msec、混合型では $5.1 \pm 0.9$ msec、神経根型では $4.0 \pm 0.9$ msecであった。DSCAは馬尾型では $42.8 \pm 18.7$ mm<sup>2</sup>、混合型では $49.6 \pm 20.9$ mm<sup>2</sup>、神経根型では $75.3 \pm 19.1$ mm<sup>2</sup>であった。馬尾型、混合型、神経根型の順にCECT遷延とDSCA狭小を認めた。下肢のしびれや灼熱感などの多根性の神経症状(馬尾症状)を有する馬尾型と混合型LSSでCECTは有意に遷延し、CECTとDSCAの間には負の相関があった。

【結論】CECTはLSSのNIC分類別に異なった。CECT遷延は馬尾の脱髄によって引き起こされると考えられる。CECTはLSSにおいて神経根障害は反映されず馬尾障害を反映するため、馬尾の機能障害を評価するための有用な手段となり得る。

## 2. 研究の背景

腰部脊柱管狭窄症(lumbar spinal stenosis: LSS)は主に腰椎の加齢性変化に伴う疾患で高齢者の脊椎手術の中で最も一般的な疾患であり、LSSに対する手術件数は世界的に近年増加している(1-3)。それゆえ、LSSを診断する機会と必要性は高まっている。

LSSを診断するための最も一般的な放射線学的検査はMRI、CTや脊髄造影検査等であり、その所見として馬尾レベルでの硬膜管面積(dural sac cross-sectional area: DSCA)の狭小(4-7)や馬尾弛緩(redundant nerve roots: RNR)(8-13)などが知られている。しかしMRI等の画像所見で脊柱管の狭窄を認めていても時に無症候性である場合があり、その病態を定量的に評価することは困難である。

神経性間欠跛行(neurogenic intermittent claudication: NIC)はLSSの特徴的な症状であり、立位・歩行動作により下肢のしびれや疼痛などの神経症状が生じ、立位・歩行継続により下肢症状の悪化を認め、安静や体幹前屈等の休息によって症状は直ちに軽減される。LSSによるNICは下肢の症状別に3種類に分類される(14)。下肢のしびれや灼熱感および感覚異常などの多根性症状を呈する馬尾型、下肢の神経根性疼痛である単根性症状を呈する神経根型、多根性・単根性の両症状を呈する混合型である。

我々は過去に腰部磁気刺激運動誘発電位を用いた馬尾伝導時間(cauda equina conduction time: CECT)が馬尾障害の診断に有用であることを報告(15-16)したが、LSSのNIC分類別にCECTを検討した報告は無い。

## 3. 目的

本研究の目的は、腰部磁気刺激運動誘発電位によるCECTの遷延はLSSのNIC分類別に関連しているかどうかを検討することである。

## 4. 方法

### (1) 対象

2005～2016年の期間に、NICを愁訴に手術加療を行ったLSS患者149例を対象とした。性別は男性86例、女性63例で手術時年齢は $70.0 \pm 8.6$ 歳(50～86歳)であった。全症例において腰椎MRI、CT、脊髄造影検査等の放射線学的検査を施行し脊柱管の狭窄を確認した。また、全症例において歩行負荷試験と神経根ブロック検査により下肢の症状を確認しLSSのNIC分類別に3群に分類したところ、馬尾型67例、混合型53例、神経根型29例に分類された。血管性間欠跛行の合併例は除外された。すなわち足関節上腕血圧比(ankle brachial pressure index: ABI)を計測し、0.9未

満である患者はこの研究から除外された。また慢性炎症性脱髄性多発ニューロパチーやギランバレー症候群などの四肢のしびれを生じる神経疾患の合併例や、足根幹症候群などの絞扼性神経障害を合併した症例も本研究からは除外された。また糖尿病 (DM) による末梢神経への潜在的な影響を検討するため、空腹時血糖が 126mg/dl 以上、HbA1c が 6.5% 以上の患者を DM 合併例として DM の病歴を調査した。149 例中の 36 例が DM を合併し、NIC 分類別に馬尾型 16 例、混合型 13 例、神経根型 7 例に DM 合併を認めた。全患者が本研究のインフォームド・コンセントを受けており、本研究は山口大学医学部の施設内倫理委員会にて承認された (登録番号: H29-043)。

## (2) 方法

### 【CECTの計測】

記録電極として皿電極を belly-tendon 法に準じ母趾外転筋 (Abductor Hallucis: AH) に貼付した。足関節部で脛骨神経を電気刺激し AH より複合筋活動電位 (compound muscle action potential: CMAPs) と F 波を導出し末梢運動伝導時間 (peripheral motor conduction time: PMCT) を算出した。PMCT は CMAPs と F 波の潜時の和から 1msec を差し引いた値を 2 で割ることで求めた。磁気刺激装置に繋いだ外径 14cm の円形シングルコイルを用いて下位腰椎～仙骨レベルの腰仙部に磁気刺激を行い、安静時の運動誘発電位 (motor evoked potentials: MEPs) を記録した。CECT は PMCT から腰部磁気刺激による MEPs 潜時を差し引くことで算出した。Imajo らの報告 (16) から CECT の正常値は  $3.4 \pm 0.8$  msec として参考値とした。

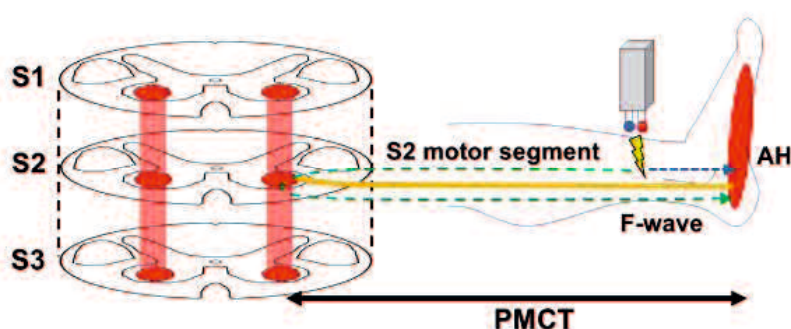


図1. 複合筋活動電位 (PMCT) 計測:  $PMCT = (CMAPs \text{ 潜時} + F \text{ 波潜時} - 1) \div 2$

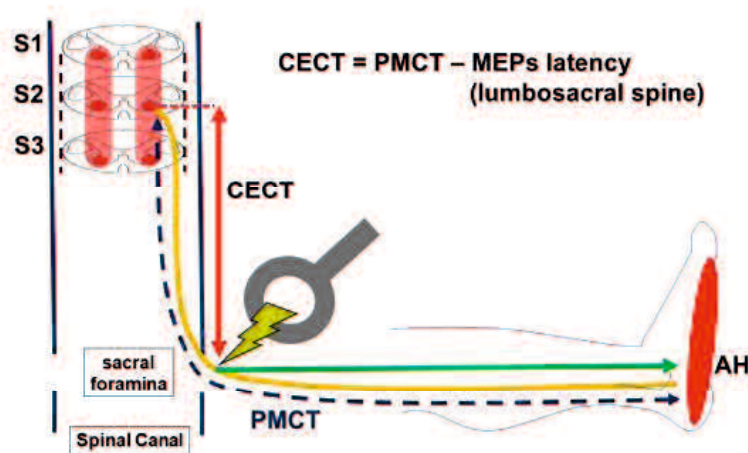


図2. CECT計測：CECT= PMCT-MEPs潜時（腰部磁気刺激）

### 【DSCA、RNR測定】

全症例において術前にMRIもしくはCTミエログラフィを用いて硬膜管面積 (dural sac cross-sectional area: DSCA) の測定と馬尾弛緩 (redundant nerve roots: RNR) の有無を評価した。DSCAはaxial planeを用い手術を施行した最狭窄部の一椎間の椎間板レベルの面積を計測した。RNRはsagittal planeを用い馬尾のredundancyの有無を評価した。DSCAは検者内誤差無くすためを同一検者が2回計測し平均値を記録した。

## (3) 解析

CECTとDSCAがLSSのNIC分類別に違いがあるかに関してTukeyの多重比較検定を使用し検討した。またLSSのNIC分類別にCECTとDSCAとの相関関係を調べるために単回帰分析を行った。また年齢、性別、身長、DM有無、NIC分類がCECT遷延と関連するかを検討するために重回帰分析を行った。これらの統計解析を実行するために、統計ソフトウェアStatFlex Ver 6.0 (Artech Co. Osaka, Japan) を使用した。

## 5. 結果

### 【CECT】

CECTは馬尾型で $5.6 \pm 1.1$ ms、混合型で $5.1 \pm 0.9$ ms、神経根型で $4.0 \pm 0.9$ msであり3群間で有意に異なっていた ( $P < 0.001$ ) (表1)。下肢のしびれや灼熱感等の多根性症状である馬尾症状を有する分類、すなわち馬尾型および混合型LSSのCECTは、神経根型LSSや正常値と比較して有意に遷延した (図3)。

		馬尾型	混合型	神経根型	P値
症例数 (男性 / 女性)		67 (47 / 20)	53 (24 / 29)	29 (15 / 14)	
年齢	(y. o.)	$70.3 \pm 8.7$ (50 - 86)	$69.5 \pm 8.3$ (51 - 83)	$70.3 \pm 9.0$ (51 - 83)	0.781
CECT	(ms)	$5.6 \pm 1.1$	$5.1 \pm 0.9$	$4.0 \pm 0.9$	<0.001
DSCA	(mm <sup>2</sup> )	$42.8 \pm 18.7$	$49.6 \pm 20.9$	$75.3 \pm 19.1$	<0.001
RNR (+)	(%)	95.5	92.5.	62.1	

表1. LSSのNIC分類別のCECT、DSCA、およびRNR.

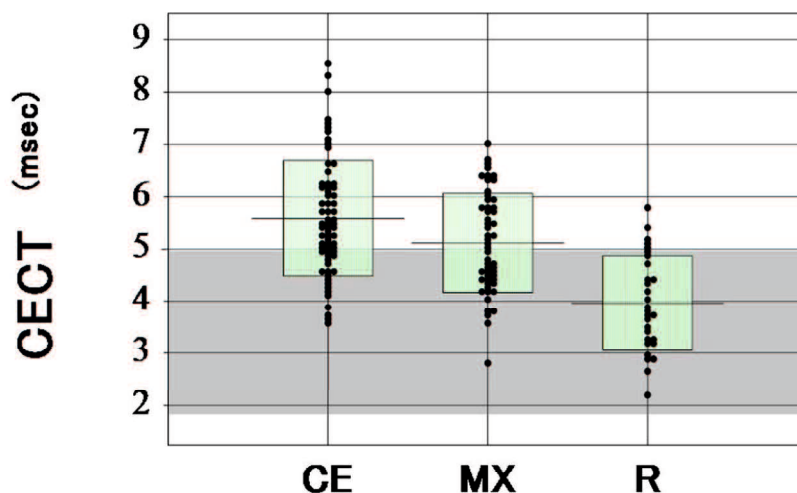


図3. CECT (CE:馬尾型、MX:混合型、R:神経根型)

### 【DSCA, RNR】

全症例149症例のなかで131例(88%)にRNRを認めた。NIC分類別には馬尾型で64例(95.5%)、混合型で49例(92.5%)および神経根型で18例(62.1%)にRNRを認めた(表1)。DSCAの平均値は全LSSでは $54.0 \pm 19.6 \text{ mm}^2$ であった(表1)。NIC分類別には馬尾型で $42.8 \pm 18.7 \text{ mm}^2$ 、混合型で $49.6 \pm 20.9 \text{ mm}^2$ 、神経根型で $75.3 \pm 19.1 \text{ mm}^2$ であり3群間で有意に異なっていた( $P < 0.001$ )。馬尾症状を有する馬尾型および混合型LSSのDSCAは神経根型LSSのDSCAよりも有意に小さかった(図4)。

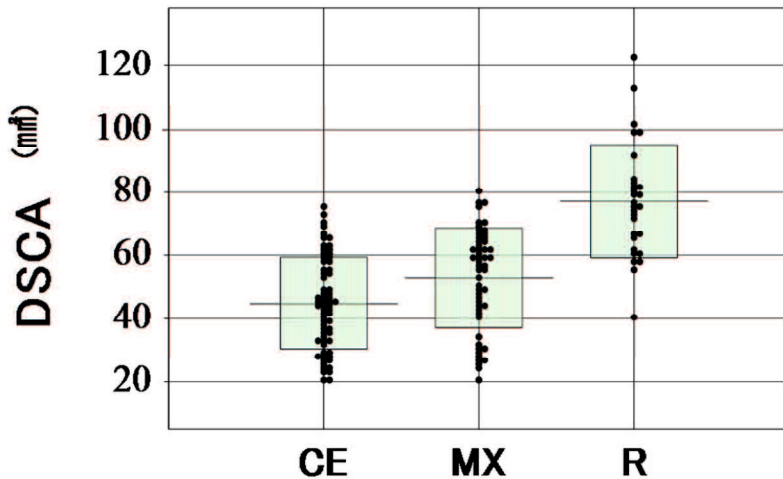


図4. DSCA (CE:馬尾型、MX:混合型、R:神経根型)

### 【CECTとDSCAの関係】

LSSのNIC分類別にCECTとDSCAの関係を調べた。馬尾症状を有する分類群においてCECTとDSCAの間に有意な負の相関を認めた(馬尾型:  $P < 0.01$ ,  $R = -0.44$ および混合型:  $P < 0.01$ ,  $R = -0.49$ )。神経根型では有意な相関は認められなかった( $P = 0.66$ ) (図5)

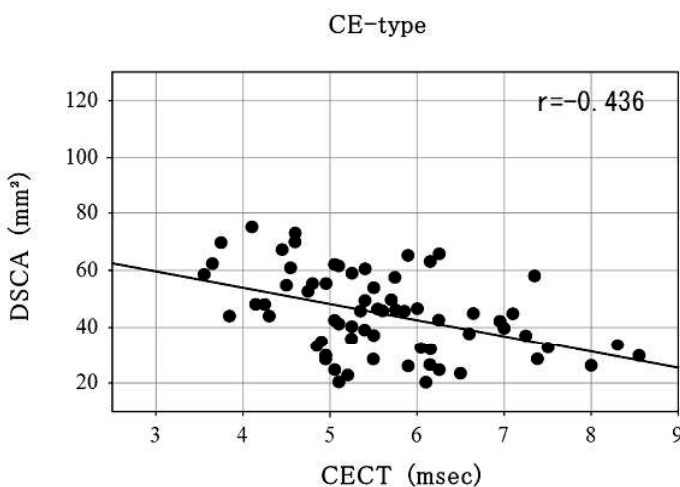


図5-A. 馬尾型: CECTとDSCAに負の相関を認めた( $P < 0.01$ )



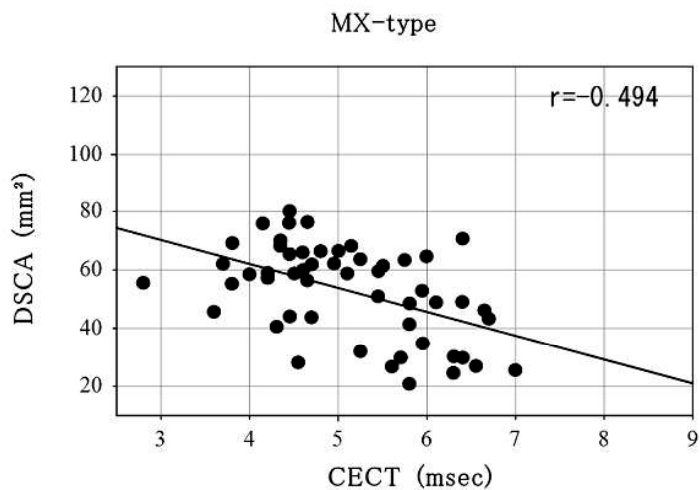


図5-B. 混合型：CECTとDSCAに負の相関を認めた ( $P < 0.01$ )

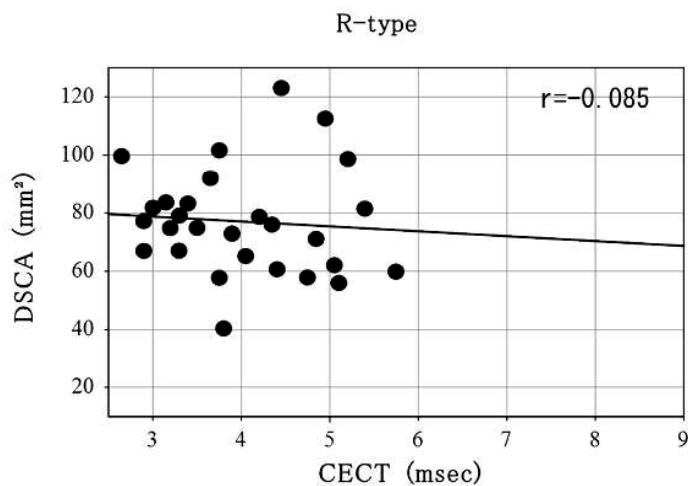


図5-C. 神経根型：CECTとDSCAに相関は認められなかった ( $P = 0.66$ )

### 【CECT重回帰分析】

CECTを目的変数にしてLSSのNIC分類の神経根型を基準とし馬尾型と混合型をダミー変数として年齢、性別、身長、およびDMの有無、馬尾型、混合型、DSCAに対する重回帰分析を行った。CECTと有意に関連する変数はDSCA ( $r_p = -0.4299$ ;  $P < 0.0001$ )、馬尾型 ( $r_p = 0.3270$ ;  $P = 0.0048$ )、混合型 ( $r_p = 0.2205$ ;  $P = 0.0334$ )であった。性別、年齢、身長、およびDMの有無は、CECTと有意な関連は認められなかった(表2)。

表2. 目的変数CECTに対する重回帰分析

目的変数: CECT

説明変数	$\beta$	SE( $\beta$ )	std $\beta$	t	df	P
年齢	0.0007	0.0106	0.0055	0.0703	141	0.9440
性別	-0.1726	0.2442	-0.0728	-0.7069	141	0.4808
身長	-0.0018	0.0132	-0.0156	-0.1405	141	0.8884
DM	-0.0460	0.1826	-0.0168	-0.2521	141	0.8013
馬尾型	0.7694	0.2687	0.3270	2.8634	141	0.0048
混合型	0.5391	0.2509	0.2205	2.1483	141	0.0334
DSCA	-0.0257	0.0050	-0.4299	-5.1155	141	<0.0001

$\beta$ : partial regression coefficient, SE: standard error,

std  $\beta$ : standardized partial regression coefficient, df: degree of freedom

## 6. 考察

本研究においてCECTはLSSのNIS分類別によって異なり、馬尾型は最もCECTが遷延し、続いて混合型そして神経根型の順に続いた。馬尾症状を有するLSSすなわち馬尾型および混合型LSSでは、CECTとDSCAとの間に負の相関を認めた。RNRは馬尾型の96%、混合型の90%において認められた。CECT遷延は脊柱管内で馬尾が局所のおよび慢性的に圧迫されることで、馬尾の脱髄が生じることにより引き起こされると考えられる。

RNRはLSSとの関連が報告されており硬膜内の馬尾の神経の蛇行や湾曲などのredundancy所見である(12, 13)。CressmanらはLSSの手術中における馬尾のRNRを報告し、同部位で硬膜の圧迫所見が重度であったと報告している(8)。Suzukiらは人屍体を用いた解剖学的および病理組織学的研究において、主にS1, S2の神経根にRNRが生じその病理学的変化は神経線維の脱髄であったと報告した(9, 10)。Tsujiらは術中RNRの神経伝導速度を計測した結果26.0~36.8 m/s (平均29.9±4.4 m/s)であり、同一患者のRNRとなっていない馬尾の伝導速度は45~55 m/sであったと報告し、この結果より電気生理学的にRNRは馬尾の脱髄であることを報告した。

Fuchigamiらは健常人16人のCECTは3.2±0.9msであったのに対して、LSS患者7人のCECTは6.0±2.5msであったと報告した(15)。我々は過去に172人の健常人のCECTを計測し3.4±0.8msであることを報告した(16)。Secilらは腰部磁気刺激を用いてL1~L5レベルの馬尾の伝導時間を計測しており、その中でLSSでは健常人と比較して有意に遷延していたことを報告した(18)。本研究においてもLSS全体のCECTは、過去に我々が報告した正常値よりも有意に遷延していた。さらにLSSのNIC分類別に比較した結果、CECTは3群間で有意に異なっていた。CECT遷延はLSSのなかでも単根障害である神経根症の評価ではなく馬尾障害の評価に有用であると考えられた。

CECTは馬尾の中でも主にS2神経の障害を評価していると考えられる。LiguoriらはL3-S2神経根を刺激し下肢の筋肉から誘発電位を記録することによって腰仙部領域の神経支配を報告しており、その中でAHの支配神経は主にS2神経であると報告した(19)。ZhuらもAHIに記録電極を置きL5-S3に電気刺激した結果、S2のCMAPs振幅のみが有意に高くなったことでAHの支配神経はS2神経であると報告した。Wallらは人屍体を用いて馬尾の断面解剖学の研究を行い、各腰椎椎間板レベルから分岐する神経根は硬膜内の最も外側に位置し、外側から中央に向かって神経高位順に配列していることを報告した(21)。LSSはL1/2~L5/S1レベルでの狭窄が生じる病態であるため硬膜内の中央に位置するS2神経が障害される場合は、その外側の神経根も含む多根性の障害であると考えられる。また、FuchigamiらはL5/S1椎間板ヘルニアで生じるS1神経根障害では、CECTは遷延しなかったことを報告している。これらの解剖学的研究や電気生理学的研究より、CECTは馬尾の中でもS2神経障害の評価をしていると考えられる。

MRIやCTを用いて腰部脊柱管内の硬膜管面積の大きさを評価することは、LSSを診断する最も一般的な放射線学的方法である。WillenらはL3/4レベルより尾側の相対的狭窄を示唆するDSCAのカットオフ値は100mm<sup>2</sup>であると報告している。Schonstromらは人屍体を用いた研究において、LSSの平均DSCAは75mm<sup>2</sup>未満であったと報告した。本研究における手術加療を要したLSS149例のDSCAは全体平均で75mm<sup>2</sup>未満であった。また本研究では、馬尾型および混合型LSSは神経根型LSSよりもDSCAが有意に小さいことが認められた。小林らは腰痛のみのLSSのDSCAは136±42.7 mm<sup>2</sup>で、神経根性疼痛を伴うLSSのDSCAは85.0±32.1 mm<sup>2</sup>で、馬尾症状を伴うLSSのDSCAは68.7±20.2mm<sup>2</sup>であったと報告した。これより、LSSにおいて馬尾症状はDSCAの狭小に関連していることが示唆された。

CECTは馬尾の運動路を評価するための非侵襲的な客観的かつ定量的検査方法であり、従来のMRIやCTによる放射線学的診断を補助する新しい診断ツールになり得る。MRIは硬膜の形態異常を評価するのに最も有用であるが、画像上の硬膜圧迫は臨床症状と必ずしも関連するとは限らない。一方、CECTは馬尾の運動路の脱髄を評価する機能的なパラメータであり定量的診断ツールとなり得る。また、LSSに変形性関節症や関節リウマチを合併した患者で合併疾患の下肢痛の影響により歩行負荷試験が十分に施行できない場合や、認知症によるコミュニケーションが困難な場合においてもCECTは容易に行うことができる。

LSSの臨床像は他の疾患としばしば混同され易い。例えば下肢のしびれはDM性末梢神経障害の一般的な症状であり、間欠跛行はASOなどの末梢動脈疾患でも認められる。これらの疾患を合併していた場合には類似症状のために、下肢症状の主因がLSSによるものであるか合併疾患によるものであるか鑑別が困難となる可能性がある。しかし、変形性関節症や関節リウマチ、末梢動脈疾患が馬尾の脱髄を引き起こすことは考えられない。DM性末梢神経障害は、末梢神経の軸索変性だけでなく脱髄も引き起こし得るため、CECTに影響を及ぼす可能性も考慮する必要があるが本研究においては、重回帰分析の結果よりDM合併の有無に関してはCECTに影響を与えないことが確認できた。

以上より、本研究結果からCECTはDSCAで診断される形態的異常と、LSSのNIC分類で分類さ

れる機能的異常の双方に関連が認められた。したがってGECTはLSSの鑑別診断のための有用な補助ツールとなり得ると考えられる。

本研究の限界として、対象患者が外科的治療を必要とする中等度から重度のLSSのみを対象としていることであった。硬膜内中央に存在するS2神経にまで脱髄が生じない程度の軽度の狭窄に対してはGECTの有用性が低くなる可能性が考えられる。

## 7. 結語

LSSのNIC分類別に最もGECTが遷延したのは馬尾型であり、混合型、神経根型の順に続いて遷延した。DSCAが最も小さかったのも馬尾型であり、混合型、神経根型の順に続いて小さくなった。馬尾型や混合型の様な下肢のしびれや灼熱感等の馬尾症状を有するLSSではGECTとDSCAは負の相関を認めた。脊柱管内の狭窄に伴う局所的、慢性的な圧迫により馬尾の脱髄が生じ、馬尾の中でも特にS2神経が脱髄を生じることがGECT遷延に反映していると考えられた。LSSを診断する機会と必要性は高まっており、GECTは神経根障害とは区別して馬尾の機能障害の評価に有用な情報をもたらす新しい補助診断手段となり得る。

## 8. 謝辞

本研究に際しデータ分析や論文作成にご尽力頂いた今城靖明先生、船場真裕先生、本研究にあたりご指導ご鞭撻頂いた田口敏彦先生、坂井孝司先生に深謝致します。また、本研究内容に同意し参加して頂いた全患者に感謝致します。

本論文は下記雑誌にてアクセプトされた論文を和訳したものである。  
Journal of Clinical Neurophysiologyより学位論文としての投稿を許可されている。

Yuji Nagao, Yasuaki Imajo, Masahiro Funaba, Hidenori Suzuki, Norihiro Nishida, Tsukasa Kanchiku, Takashi Sakai, Toshihiko Taguchi. Relationship between cauda equina conduction time and type of neurogenic intermittent claudication due to lumbar spinal stenosis. Journal of Clinical Neurophysiology doi:10.1097/WNP.0000000000000607

## 9. 参考文献

1. Imajo Y, Taguchi T, Yone K, Okawa A, et al. Japanese 2011 nationwide survey on complications from spine surgery. *J Orthop Sci* 2015; 20: 38-54.
2. Melloh M, Staub L, Aghayev E, et al. The international spine registry SPINE TA NGO: status quo and first results. *Eur Spine J* 2008; 17: 1201-1209.
3. O' Lynnger TM, Zuckerman SL, Morone PJ, Dewan MC, Vasquez-Castellanos RA, Cheng JS. Trends for Spine Surgery for the Elderly: Implications for Access to Health care in North America. *Neurosurgery* 2015; 77 (Suppl 4): S136-S141.
4. Willen J, Danielson B, Gaulitz A, Niklason T, Schonstrom N, Hansson T. Dynamic effects on the lumbar spinal canal: axially loaded CT-myelography and MRI in patients with sciatica and/or neurogenic claudication. *Spine (Phila Pa 1976)* 1997; 22: 2968-2976.
5. Schonstrom NS, Bolender NF, Spengler DM. The pathomorphology of spinal stenosis as seen on CT scans of the lumbar spine. *Spine (Phila Pa 1976)* 1985; 10: 806-811.
6. Abbas J, Hamoud K, May H, et al. Degenerative lumbar spinal stenosis and lumbar spine configuration. *Eur Spine J* 2010; 19: 1865-1873.
7. Kobayashi T, Kikuchi S, Hasue M. Pathology of cauda equina intermittent claudication. *Seikei Geka* 1991; 42: 1695-1699 (in Japanese).

8. Cressman MR, Pawl RP. Serpentine myelographic defect caused by a redundant nerve root. Case report. *J Neurosurg* 1968; 28: 391-393.
9. Suzuki K, Ishida Y, Ohmori K, Sakai H, Hashizume Y. Redundant nerve roots of the cauda equina: clinical aspects and consideration of pathogenesis. *Neurosurgery* 1989; 24: 521-528.
10. Suzuki K, Takatsu T, Inoue H, Teramoto T, Ishida Y, Ohmori K. Redundant nerve roots of the cauda equina caused by lumbar spinal canal stenosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 1992; 11: 1337-1342.
11. Tsuji H, Tamaki T, Itoh T, et al. Redundant nerve roots in patients with degenerative lumbar spinal stenosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 1985; 10: 72-82.
12. Hakan T, Celikoglu E, Aydoseli A, Demir K. The redundant nerve root syndrome of the Cauda equina. *Turk Neurosurg* 2008; 18: 204-206.
13. Ono A, Suetsuna F, Irie T, et al. Clinical significance of the redundant nerve roots of the cauda equina documented on magnetic resonance imaging. *J Neurosurg Spine* 2007; 7: 27-32.
14. Kikuchi S, Hoshika I, Matsui T, Hasue M. Neurogenic intermittent claudication in lumbar spine disease. *Seikei Geka* 1986; 37: 1429-1439 (in Japanese).
15. Fuchigami Y, Kawai S, Oda H, et al. Noninvasive measurement of cauda equina dysfunction. *Recent Advances in human Neurophysiology*. Elsevier Science BV, Amster

dam: 1998: 1027-1033

16. Imajo Y, Kanchiku T, Suzuki H, et al. Cauda equina conduction time determined by f-waves in normal subjects and patients with neurogenic intermittent claudication caused by lumbar spinal stenosis. *J Clin Neurophysiol* 2017; 34: 132-138.
17. Mano Y, Nakamuro T, Ikoma K, et al. Central motor conductivity in aged people. *Intern Med* 1992; 31: 1084-1087.
18. Secil Y, Ekinci AS, Bayram KB, et al. Diagnostic value of cauda equina motor conduction time in lumbar spinal stenosis. *Clin Neurophysiol* 2012; 123: 1831-1835.
19. Liguori R, Krarup C, Trojaborg W. Determination of the segmental sensory and motor innervation of the lumbosacral spinal nerves. An electrophysiological study. *Brain* 1992; 115: 915-934.
20. Zhu L, Lin HD, Chen AM. Accurate segmental motor innervation of human lower-extremity skeletal muscles. *Acta Neurochir (Wien)* 2015; 157: 123-128.
21. Wall EJ, Cohen MS, Massie JB, Rydevik B, Garfin SR. Cauda equina anatomy I: intrathecal nerve root organization. *Spine (Phila Pa 1976)* 1990; 15: 1244-1247.