

博士（人間科学）学位論文

ヒト前額部への機械的外乱に対する
頸筋応答における神経筋制御機序

Neuromuscular Control Mechanisms of Neck Muscle Responses
Induced by Mechanical Perturbations of the Human Forehead

2005 年 1 月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

倉持 梨恵子

Kuramochi, Rieko

研究指導教員： 鈴木 秀次 教授

目 次

第 1 章 序論	1
第 1 節 序	2
第 2 節 本論文の構成	4
第 2 章 研究背景および研究小史	5
第 1 節 頸部外傷の受傷要因と予測との関係	6
第 2 節 筋の固有感覚による運動の知覚と制御	8
第 3 節 前庭感覚による運動の知覚と制御	10
第 4 節 機械的外乱によって誘発される頸筋反射応答の神経生理学的特徴	13
第 3 章 本研究の目的	17
第 4 章 本論	19
第 1 節 外乱に抵抗しない運動課題における予測の可否が頸筋反射応答に与える影響	20
第 1 項 緒言	20
第 2 項 方法	22
第 3 項 結果	27
第 4 項 考察	30
第 2 節 頭部の物理的固定による頸筋反射応答の変化	33
第 1 項 緒言	33
第 2 項 方法	34
第 3 項 結果	37
第 4 項 考察	39

第3節 胸鎖乳突筋のタッピングによる短潜時伸張反射応答の誘発	40
第1項 緒言	40
第2項 方法	41
第3項 結果	43
第4項 考察	44
第4節 運動課題の違いが頸筋反射応答に及ぼす影響	46
第1項 緒言	46
第2項 方法	48
第3項 結果	51
第4項 考察	54
第5節 外乱に抵抗する運動課題における予測の可否が頸筋反射応答に与える影響	55
第1項 緒言	55
第2項 方法	56
第3項 結果	59
第4項 考察	62
第5章 総括論議	64
第1節 頭部への外乱による頸筋活動の反射起源と潜時との関係	65
第2節 前額部への機械的外乱に対する頸筋反射応答と予測との関係	68
第6章 結論	71
謝辞	73
引用文献	74
業績リスト	81

図のタイトル一覧

図 2-1-1 頭部の最大加速度と屈曲筋力，伸展筋力との関係	7
図 2-2-1 伸張反射経路の反射弓	8
図 2-3-1 前庭頸反射の経路図	11
図 2-3-2 右側の3つの半規管膨大部の神経を個々に刺激した時に起こる頭の運動	12
図 2-4-1 健常被験者と前庭機能不全患者における胸鎖乳突筋の反射応答と頭部加速度の典型例	13
図 2-4-2 前額部への機械的外乱による感覚入力と胸鎖乳突筋に現れる反射応答の模式図	15
図 2-4-3 前額部への機械的外乱刺激によって誘発される胸鎖乳突筋活動の時間的推移	15
図 4-1-1 実験のセットアップ図	23
図 4-1-2 前額部に機械的外乱を与えた際の頭部加速度および頸筋活動の生波形	25
図 4-1-3 胸鎖乳突筋の反射応答の典型例	26
図 4-1-4 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測可否による比較	27
図 4-1-5 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による5 msごとの比較	28
図 4-1-6 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による前半・後半成分ごとの比較	29
図 4-1-7 頭部位置変化の典型例	29
図 4-2-1 実験のセットアップ図	34
図 4-2-2 頭部固定の有無による頭部変位と胸鎖乳突筋の反射応答の典型例	36
図 4-2-3 前額部に機械的外乱を与えた際の全身の筋活動の生波形	36
図 4-2-4 胸鎖乳突筋における反射応答の頭部固定の有無による比較	37
図 4-2-5 胸鎖乳突筋における反射応答の頭部固定の有無による5 msごとの比較	38
図 4-3-1 胸鎖乳突筋の打腱部位	41
図 4-3-2 胸鎖乳突筋のタッピングによる30試行の加算平均波形	43
図 4-4-1 前額部に機械的外乱を与えた際の頭部加速度および頸筋の筋活動	49
図 4-4-2 胸鎖乳突筋の反射応答の典型例	50
図 4-4-3 胸鎖乳突筋における反射応答の運動課題の違いによる比較	51

図 4-4-4 胸鎖乳突筋における反射応答の運動課題の違いによる 5 ms ごとの比較	52
図 4-4-5 胸鎖乳突筋における反射応答の運動課題の違いによる前半・後半成分ごとの比較	52
図 4-4-6 頭部位置変化の典型例	53
図 4-5-1 実験 1・4 のまとめと実験 5 の位置づけ	55
図 4-5-2 前額部に機械的外乱を与えた際の頭部加速度および頸筋の筋活動	57
図 4-5-3 胸鎖乳突筋の反射応答の典型例	58
図 4-5-4 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による比較	59
図 4-5-5 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による 5 ms ごとの比較	60
図 4-5-6 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による前半・後半成分ごとの比較	61
図 4-5-7 頭部位置変化の典型例	61

表のタイトル一覧

表 4-1-1 胸鎖乳突筋の反射応答の開始潜時および終了時刻の平均値	26
表 4-1-2 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度の平均値	27
表 4-1-3 胸鎖乳突筋における各条件の前半および後半の反射応答の平均値	28
表 4-2-1 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度および頭部最大変位の平均値	37
表 4-4-1 胸鎖乳突筋の反射応答の開始潜時および終了時刻の平均値	50
表 4-4-2 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度の平均値	51
表 4-5-1 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度の平均値	59

第1章 序 論

第1節 序

スポーツ活動や交通事故における頸椎の損傷は重篤な障害につながる危険性があり，特に頭部への衝撃が不意に起こるために頸部を支える筋活動の準備が出来ないということが，重度の損傷をもたらす要因になることはよく知られている（Sturzenegger et al. 1994, 倉持ら 2000）．これらの事故に対する予防方法を模索するためにも，実験的にそのメカニズムを裏付ける基礎的資料を得ることはきわめて重要である．

ヒトの身体運動において四肢筋が外部刺激に対して応答する神経筋制御機序はこれまでの研究でかなり解明されている．四肢筋の伸張反射応答は運動開始前の準備状態によって大きく影響されることが知られており（Evarts 1973），外乱刺激の入力が予測可能な場合とそうでない場合において，予め指示された運動課題に応じた変化を示すことも明らかにされている（Yamamoto and Ohtsuki 1989）．

一方，頭部への外部刺激（機械的外乱）に対する運動課題の違いによって，頸筋の応答がどのような変化を示すか，現時点で十分明らかにされていない．頸筋の神経筋制御機序は，頭部姿勢を維持し，外眼筋と協調して固視点の保持に寄与することなどから，四肢筋を支配する神経筋制御機序と比べるとかなり異なることが報告されている（Wilson et al. 1995, Corna et al. 1996）．特に，頭部が動くと，頸筋には筋紡錘からの伸張刺激だけでなく，四肢よりも物理的に近距離にある前庭器官からの入力が強く影響する（Suzuki and Cohen 1964）．姿勢保持に重要な役割を果たす前庭脊髄反射のうち，半規管から頸筋運動ニューロンに投射する経路は，特に頭部姿勢の保持と直接的な回路を形成することから前庭頸反射と呼ばれている（Suzuki and Cohen 1964）．このように頸筋運動ニューロンは頭部が動く場面において複数の感覚入力からの制御を同時に受ける．これらは相互に影響しあって頭部姿勢保持に貢献していると考えられる．また，ヒトにおいて前庭頸反射は多シナプ的な伸張反射に先行することも報告されている（Ito et al. 1995, Munchau et al. 2001）．

頸筋の反射応答を調べた先行研究の多くは，自動車事故を想定し，被験者の下肢や体幹

部に外乱刺激を加え、慣性で頭部を揺らした際の頸筋の活動に着目している(Siegmund et al. 2000, Kumar et al. 2000, 2002)。しかしながら、これらの報告は外乱刺激の予測による頸筋の反射応答について一致した見解を得ていない。

また、Horak et al. (1994, 2001) は、同程度の頭部加速度を生じさせる外乱でも、頭部に直接外力を与えた場合と、慣性で頭部を揺らした場合には、前庭感覚による制御機構と体性感覚入力からの影響の相互作用によって、頸筋に現れる反射応答が変化することを報告している。具体的には頭部に直接機械的刺激を与えると頸筋に大きな応答が現れ、一方床面への外乱で頭部に間接的な刺激を与えると下腿筋の応答が大きく、頸筋の活動は減衰する。ヒト頸筋の反射応答を調べた先行研究の多くは自動車事故などを想定して後者の方法で多く調べられているが、前者の方法についてはほとんど知られていない。

そこで本論文ではこれまであまり調べられてこなかった頭部への機械的外乱によって得られる頸筋反射応答の特徴に着目し、その応答が外乱の予測の可否や運動課題の違いによってどのような変化を示すかについて明らかにし、その変化が身体にとってどのような機能的意義を有するかについて考察した。

本論文は機械的外乱に対する頸筋の働きについて、基礎的な方法を用いて科学的根拠を得たうえで、その結果を臨床場面に応用することを目的としている。特に本論文における実験の設定は、頭部への衝撃を受けるスポーツ活動の局面を実験的に再現することでもあり、指導者にとって安全なスポーツ活動を指導する上で有益な情報となり得ることが期待される。

第2節 本論文の構成

第2章は研究背景および先行研究のまとめとした。第1節は頸部外傷の受傷原因と予測との関係について、第2節では伸張反射の起源である筋の固有感覚による運動の知覚と制御について、また、第3節では前庭頸反射の起源である前庭感覚による運動の知覚と制御についてまとめた。そして第4節では機械的外乱によって誘発される頸筋反射応答の神経生理学的特徴について、これまでにわかっている事実をもとに本論文における頸部筋制御の理解について述べた。

第3章では第2章の研究背景を踏まえて本論文における課題と研究の目的を明記した。

第4章からは本論文の主題である、「ヒト前額部への機械的外乱に対する頸筋応答における神経筋制御機序」を明らかにするため、5つの実験を行い、詳細に検討した。第1章の実験1では、前額部への外乱に対して抵抗しないといた運動課題で、予測が有るか否かで頸筋がどのような応答を示すかを明らかにするために測定・解析を行った。2番目の実験では、実験1の課題で得られた筋活動が前庭器由来によるものかあるいは筋固有受容器由来によるものを明らかにするために体幹に対して頭部を固定し、頸筋への伸張刺激を制限して測定・解析を行った。3番目の実験では、実験2で記録された筋活動が単シナプス性の反射活動であるか、あるいは多シナプス性の反射活動であるかを明らかにするために胸鎖乳突筋にタップ刺激を与えて測定・解析を行った。4番目と5番目の実験では、前額部への外乱に対して抵抗するといった運動課題で、予測があったときと無かったときで頸筋の反射応答がどのように異なるかを明らかにするために測定・解析を行っている。

第5章では第4章での実験結果を踏まえて、本研究で得られた新しい知見について、第1節では頭部への機械的外乱による頸筋活動の反射起源と潜時との関係について整理し、第2節で前額部への機械的外乱に対する頸筋反射応答と予測との関係について議論を深めた。また、本論文での課題、および今後の展望についても述べた。

第6章では本論文の概要を簡潔にまとめた。

第2章 研究背景および研究小史

第1節 頸部外傷の受傷原因と予測との関係

Sturzenegger et al. (1994) は、自動車事故が起こった際の状況を詳細に調査し、その後の頸部外傷の重傷度にどのような要因が関わるのかについて報告している。そのうち、頸部外傷の重傷度と関連の強い項目の一つとして、衝突のタイミングが予測できないと頸部外傷の程度が重いことを明らかにしている。特に後方から衝突する自動車事故 (rear-end impact) を想定した実験を通して、頸部の外傷による症状の軽減を目的とした研究はこれまで多数行われてきた (Fox & Williams 1976, Tencer et al. 2001, Kumer et al. 2002)。

一方で頭部へのコンタクトを繰り返す、アメリカンフットボールやラグビーなどのスポーツ活動においても、頭・頸部の外傷による死亡・重症事故が多数記録されており、その予防については長年に渡って研究され、対策が施されてきた (Albright et al. 1985)。Torg et al. (1990) はアメリカンフットボールにおいて多発した頭・頸部の外傷予防のため、重篤な事故が発生した競技場を分析し、それらの原因となる動作を禁止するためのルール改正などを行うことで頸部外傷の劇的な減少に貢献した (Torg et al. 1993)。また、倉持ら (2000) はスポーツ現場における調査から、頭部へのコンタクトが予測できない状況では頸椎の損傷を引き起こしやすいとしているが、それに対する実験的証拠は得られていない。

青木ら (2003) は頭部への機械的外乱によって生じる加速度のピーク値は頸部筋力、特に屈曲筋力と相関し、筋力が高いほど前方からの衝撃による頭部の振動や頸部の伸展が防止されていることを報告している (図 2-1-1)。一方で交通・航空事故や宇宙飛行における体幹への衝撃を想定した報告 (Morris et al. 1999, Siegmund et al. 1999) では、頸部筋力と頭部の動きの間に明らかな関連を認めていない。

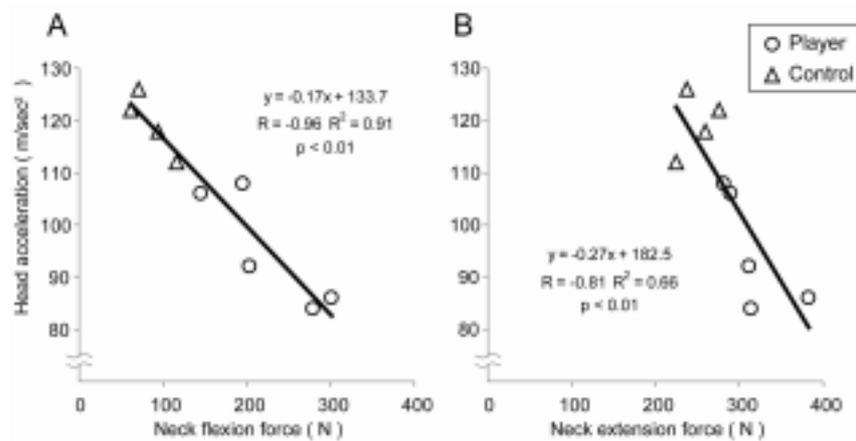


図 2-1-1 頭部の最大加速度と屈曲筋力との関係(A)
 伸展筋力との関係(B)
 (青木ら 2003を一部改変)

両者の相違は、頭部への機械的外乱と体幹部以下への間接的な頭部への外乱という、与える外乱の様式による違いによるものである可能性が高く、両者の状況で頸筋の活動の仕方も異なると考えられる。従って、頭部への機械的外乱によって生じる頸部損傷のメカニズムを解明するためには実際の事故が起こる場面を再現する手法を取る必要がある。本論文では青木ら(2003)のとした前額部への機械的外乱を与える手法を参考とした。

第2節 筋の固有感覚による運動の知覚と制御

伸張反射は筋に対する伸張刺激に対して伸ばされた筋が収縮し、その長さを一定に保とうとする反射である。生体においては様々な外力によって関節角度が急激に変化した際などに、それを元に戻そうという働きに置き換えられる。伸張反射の受容器は筋紡錘であり、筋の伸張にともなう長さや速度変化の情報は受容器に終末している α 群求心性線維に伝達され、スパイク発射頻度変化に変換される。 α 群線維は脊髄後根を經由して脊髄に入り、伸ばされた筋自体およびその協同筋の運動細胞と単シナプス結合して興奮作用を及ぼす。伸張反射は過剰な筋の伸張を防ぐためのサーボ機構であるだけでなく、拮抗筋の運動細胞には α 抑制細胞を介した相反神経支配が見られ、無意識のうちに主動筋、拮抗筋の張力を保って姿勢制御に貢献する。図 2-2-1 に伸張反射の反射弓を示した。

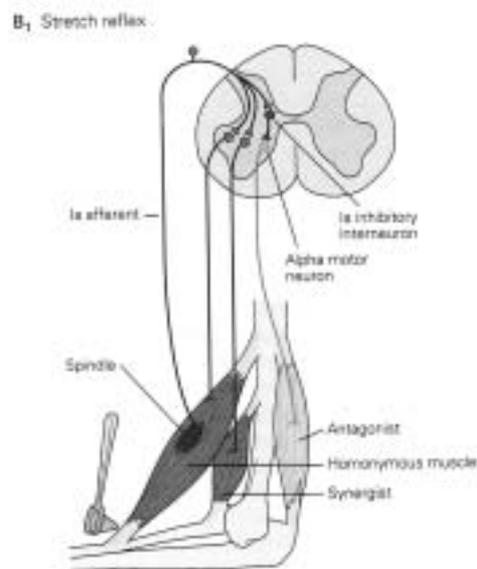


図 2-2-1 伸張反射の反射弓 (Pearson K and Gordon J 2001)

反射は一般には意図を持って自ら運動を生成する「随意運動」に対する概念として「不随意運動」と定義づけられ、特定の感覚入力に対する定型の応答と考えられていることが多い。しかしながら、伸張反射を含む種々の反射応答は運動の状況あるいは準備状態に応じて柔軟に変化することが知られており (Evarts 1973, Tanji & Evarts 1976), 意図する運動と反射応答とは目的に合致するよう、相互に影響し合うことが多くの研究によって報告されている。

そして、四肢筋においては刺激の予測に対して伸張反射応答が変化することも明らかにされている。Bonnet (1983) は合図に対して手関節を屈曲するような単純反応課題を被験者に課し、合図のタイミングが予測できるような状況においては、その約 400 ms 前から伸張反射応答の利得が増大していることを報告している。

また、Yamamoto & Ohtsuki (1989) は上腕の筋において、被験者が外乱に対して運動方向を補助するような課題を課せられた場合、外乱のタイミングが予測できることで主動筋に誘発される伸張反射応答が減衰し、逆に外乱に対して逆らうような運動を課せられた場合には予測によって伸張反射応答が増大することを報告しており、目的の運動を素早く行うために反射の調節が行われていることを報告している。

さらにこれらの変化は中枢の経路を介して機能的に変化するとされる長潜時伸張反射において顕著に見られる一方で、脊髄以下の経路を介して反射が出現する短潜時伸張反射では変化が見られないことも報告されている (Yamamoto & Ohtsuki 1989)。

しかしながら、頸筋の伸張反射応答について、四肢筋との対比あるいはその応答を詳細に検討した報告は見られない。主に頭部姿勢や固視点の保持を担う頸筋が四肢筋のように運動の予測や課題の違いによってどのように変化するかについては、客観的に評価する必要がある。

第3節 前庭感覚による運動の知覚と制御

前庭器には半規管と耳石器が備わっており，半規管は頭部（あるいは身体）の回転加速度を，耳石器は頭部（あるいは身体）の直線加速度もしくは重力加速度を適刺激として，姿勢制御において重要な役割を果たす．姿勢制御には前庭器官に加え，視覚や体性感覚入力が重要な役割を果たす．しかし，視覚入力を遮断して台上に起立したとき，前庭機能が正常であればその台が 20° 傾いたとしても起立位を保つことができるが，前庭機能に障害のある人ではわずかに数度の傾きにしか耐えられずに転倒してしまう（福田 1957）．このことから，前庭器が重力に対する頭の変位を検知して脊髄へその情報を送り，頸筋へ作用し頭の偏位を元に戻すように，また四肢・体幹の筋緊張を調節して身体平衡を保っていることがわかる．前庭器官を受容器とする反射の一つである前庭脊髄反射は頸・体幹・四肢などの主に抗重力筋を効果器とする身体の姿勢・平行に関与する反射である．

Nyberg-Hansen and Mascitti (1964) はネコの脊髄を下降する前庭神経核細胞，すなわち前庭脊髄路細胞は，外側核，下核および内側核に存在することを報告した．前庭脊髄路は脳幹および脊髄内で異なった部位を下降する二つの群に分かれる．そのうちの一つは脳幹では内側縦束を，脊髄では両側の前索内側部を通過する内側前庭脊髄路で，上部胸髄に達するまでにほとんどが終止する．他の一つは仙髄まで下降する群で外側前庭脊髄路と呼ばれ，一部は頸筋運動細胞とも結合しているが，下肢筋の運動細胞に対する影響が強い．これらの前庭器官による骨格筋の制御の影響は脊髄を下降するにつれて弱くなり，下肢筋では介在細胞が反射弓の間に存在する 3 シナプス性のシナプス電位が現れ，麻酔下においてはその多くが誘発されなくなる．一方，内側前庭脊髄路の主要起始核である内側・下核を刺激すると軸索が分岐し，一方は脊髄を下降して頸筋および背筋群に，他方は上行して外輪筋運動細胞と単シナプス性の興奮性および抑制性シナプス後電位が両側性に記録される．内側前庭脊髄路は細胞の 90 % 近くが前庭一次求心性線維と直接接合し，頭位変化にともなう頸部・体幹の筋を収縮あるいは弛緩させ，頭位を一定位置に自動的に保持する機能を

持つ。

前庭神経の膨大部を電気刺激すると両側の頸筋および背筋運動細胞で 2 シナプス性のシナプス後電位が記録される (Wilson and Maeda 1974, 図 2-3-1)。すなわち, 前庭一次求心線維 - 前庭神経核細胞 - 運動細胞という最小 3 つの細胞からなる前庭脊髄反射弓の経路が明らかにされている。このうち頸筋に及ぶ反射回路のことを前庭頸反射と呼ぶ。

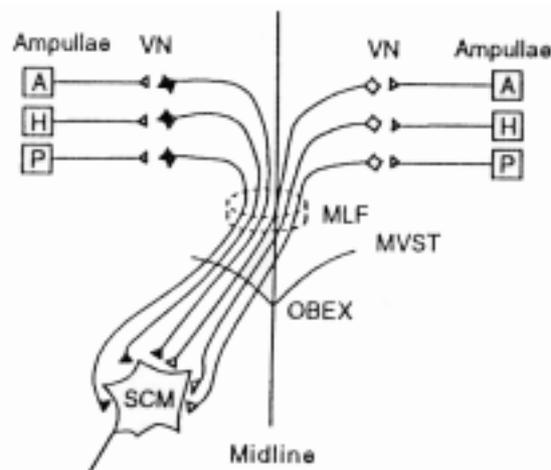


図 2-3-1 前庭頸反射の経路図 (Wilson and Maeda 1974 を一部改変)
(VN: 前庭神経核, A: 前半規管, H: 水平半規管, P: 後半規管,
MLF: 内側縦束, MVST: 内側前庭脊髄路, OBEX: 門,
SCM: 胸鎖乳突筋運動ニューロン)

前庭頸反射について, Suzuki and Cohen (1964) はネコの半規管に埋めた電極で半規管を別々に刺激すると各々に対応した頭部の運動が一定の法則に基づいていることを発見した。それはある半規管を刺激したときに引き起こされる頭部の動きが, その半規管の最適刺激方向と正反対の方向に起こるということである。すなわち, 前庭頸反射は外乱による頭位変化を元に戻すという機能的役割がある (図 2-3-2)。さらにその後の研究ではネコの半規管や耳石器からの神経枝を切断するなどの手法により, 頸部筋のみならず各々の前庭器官と外眼筋あるいは下肢筋との結合について, 解剖学的あるいは神経生理学的な観点から詳細に調べられている (Uchino et al. 1982, Wilson et al. 1995, Sugita et al. 2004)。このような動物において明らかにされた神経回路網を背景に, ヒトにおいては前庭器官の機能的役割に

ついて、主に運動や行動の評価をすることで研究が進められている (Allum et al. 1998, Bent et al. 2002)。

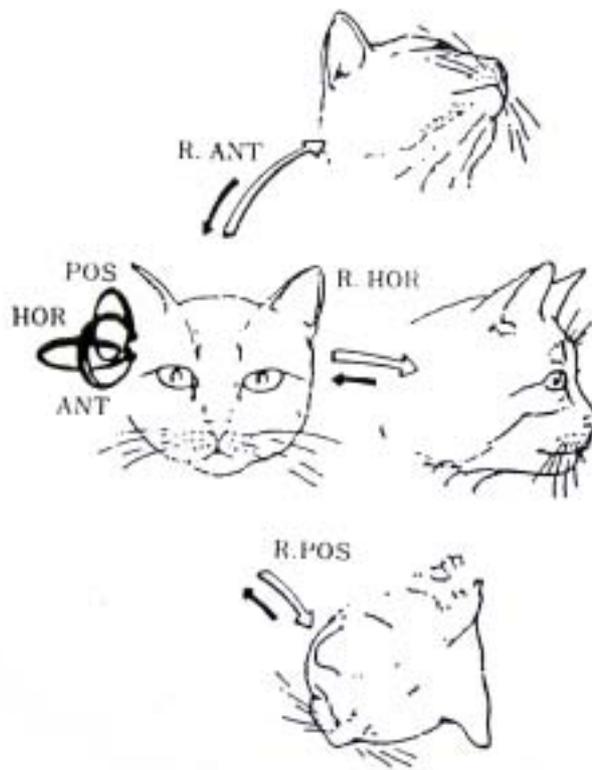


図 2-3-2 右側の3つの半規管膨大部の神経を個々に刺激したときに起こる頭の運動:白矢印 (Suzuki and Cohen 1964 を一部改変)
(ANT, HOR, POS : 前・水平・後半器官・黒矢印は各半規管に対する適刺激の方向を示す)

ヒトの頭部姿勢保持は、立位姿勢保持や運動全般にとって重要な役割を果たす。そして、電気刺激による前庭器官への感覚入力とは異なり、機械的な外乱によって頭部が揺らされるような自然刺激の場合には、同時に3つの半規管さらには直線加速度を感知する耳石器にも感覚入力に加わるとされる (平井 1986)。耳石器のうち卵形嚢と頸筋運動ニューロンとをつなぐ神経連絡の存在もネコを対象とした実験で明らかにされている (Ikegami et al. 1994)。これらの事実を踏まえると、頭位に急激な外乱が加わった際の頸筋の制御機構を考える際、前庭頸反射の影響を考慮することは不可欠である。

第4節 機械的外乱によって誘発される頸筋反射応答の神経生理学的特徴

頭部は運動の自由度が大きく、多数の頸筋によって制御されている。頭部の位置を地面に対して垂直に保つことは姿勢制御において重要であり、頭部に機械的外乱が加わった場合には、前節までに述べた通り、頸筋紡錘と前庭器官からの感覚刺激によって頸筋に反射応答が誘発され、これら二つの経路によって頭部の動きは制御されると考えられる。つまり、種々の運動課題に対する頸筋の神経筋制御は、これら二つの経路異なる応答を示す可能性が推測されるが、そのことを明らかにした報告はない。ただし、これら二つの反射についてヒトを対象とした先行研究で時間的に分離できる可能性が報告されている。Ito et al. (1995) は前庭機能不全の患者と健常被験者に仰臥位を取らせ、頭部を自由落下させて頸部伸展の外乱を与えた際、前庭機能不全患者において早い潜時の反射応答が欠落したことから、その潜時を境に二つの反射を分離したとしている(図 2-4-1)。彼らはこの結果をもとに、前庭頸反射は他の感覚器から誘発される反射応答に先行することを報告している。

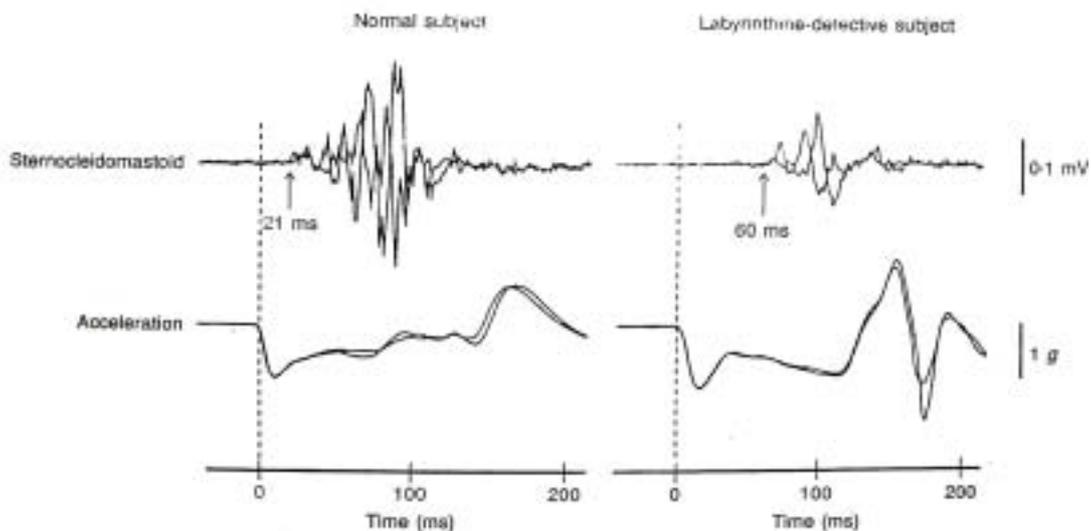


図2-4-1 健常被験者(左図)と前庭機能不全患者(右図)における胸鎖乳突筋の反射応答(上段)と頭部加速度(下段)の典型例 (Ito et al. 1995)

また、Aoki et al. (2001) は健常被験者を直線加速度負荷装置に設置した椅子に座らせ、急激に椅子を前方に動かし、慣性によって頸部を急激に伸展させるような外乱を与えて胸鎖乳突筋から反射応答を誘発した。次にネックカラーによって頸部伸展を制限した状態で同様に椅子を動かし、前庭器官にのみ応答が入力するような刺激を与えた場合に、誘発された応答の潜時が変わらなかったことから、胸鎖乳突筋に最初に誘発される応答は前庭器官由来であることを示唆した。

いずれの報告においても胸鎖乳突筋の前庭頸反射は伸張反射に先行するという点で一致した見解を示しており、これらの結果から、ある程度反射応答の現れる潜時によってその成分が分けられることが可能であると考えられる。

さらに頭部への機械的外乱によって誘発される応答の一つに驚愕反射がある。驚愕反射は通常大きな音刺激を不意に聞かせることで被験者が驚き全身に一過性の反射応答が誘発される反射で、胸鎖乳突筋には潜時 40.4 – 136 ms の範囲で現れるとされている (Brown et al. 1991)。また、ラットに頭部を殴打するような外乱を加えた場合にも驚愕反射が誘発されることをYeomans (2002) が報告しており、ヒトにおける実験的な証拠は少ないものの常にその影響は考慮すべきであると考えられる。

これらの感覚入力と誘発される反射応答を整理し、図 2-4-2に示した。

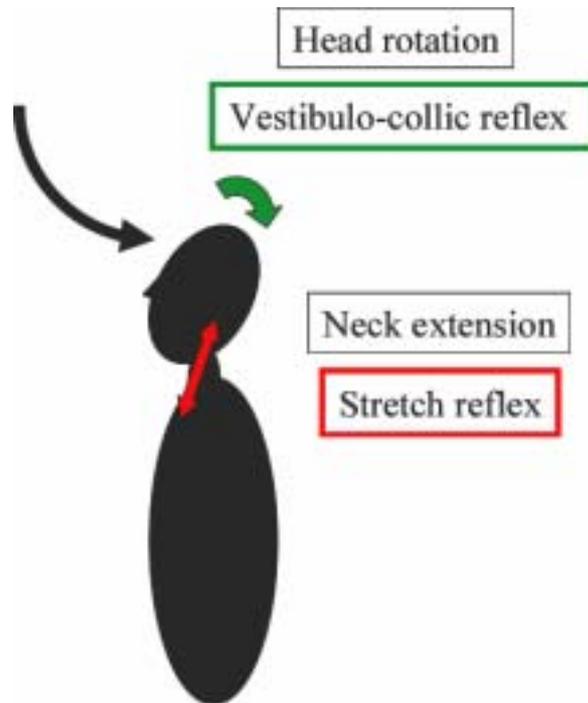


図 2-4-2 前額部への機械的外乱による感覚入力と胸鎖乳突筋に現れる反射応答の模式図

さらに先行研究をもとに、前額部への機械的外乱によって生じる可能性のある SCM の筋活動について、その潜時を図 2-4-3 に示した。頸筋特有の反応として、それぞれの反射で外乱予測の影響が異なる可能性は考えられ、その点に着目して報告された研究は存在しないことから、客観的評価方法を考慮して、その違いを検討することは新たな頸筋の神経筋制御機序の解明につながる。



図 2-4-3 前額部への機械的外乱刺激によって誘発される胸鎖乳突筋活動の時間的推移

また、頭部への外乱の与え方もその応答に影響することが知られている。Horak et al. (1994) は健常被験者において頭部に直達外力を与えた場合と、慣性で頭部を揺らした場合、同程度の頭部加速度が生じるような外乱であっても、下肢筋および頸筋に現れる反射応答が異なることを報告している。すなわち、頭部への外力を与えた場合には前庭脊髄反射経路が強く影響して、頸部に大きな応答が現れ、下肢に向かってその応答が減衰する。それに対して床面を揺らした場合には下腿の筋から頸筋に向かってその応答が漸減し、頸筋からの反射応答はほとんど記録されない。これは体性感覚と前庭感覚との相互関係 (interaction) による結果であると推測し、下肢筋を対象にしたその後の研究で明らかにしている (Horak et al. 2001)。

先行研究の多くは交通事故を想定し (Fox & Williams 1976, Tencer et al. 2001, Kumer et al. 2002) 体幹部以下に外乱を加えて慣性力で頭部を揺らして頸筋の活動を観察しているが、本論文で行った前額部への外乱によって得られる筋活動においては体性感覚の影響が少なからず制限された状況であることから、頸筋の制御機構の特徴をつかむために有効な方法である。

第3章 本研究の目的

本論文では前額部への機械的外乱に対する予測が頸部外傷の軽減につながるというメカニズムを明らかにするため、実験的に前額部に機械的外乱を与えて予測の可否状況を設定し、その際の頸筋活動を分析して頸筋の神経筋制御機序を探ることが目的である。また、機械的外乱に対して被験者が頭部姿勢を意識的に保持しない、もしくは保持するという運動課題の違いによる頸筋の応答から、機能的な反射の修飾についても検討した。

その際、頭部が動くことによって頸筋への伸張刺激だけでなく、前庭器官への加速度刺激によっても影響を受けるという頸筋の制御機構を考慮して、解析方法、実験方法を工夫した。具体的には、先行研究に基づいて各々の反射応答の相対的な時間的關係を把握し、時間間隔を細かく区切って条件間の応答を比較することで客観性を持たせたこと。また、頭部と体幹部を物理的に固定して頸筋への伸張刺激を制限することで、反射の入力経路を限定し応答の変化を確かめたこと、また、胸鎖乳突筋の伸張反射成分が単シナプス反射であるか否かを確認するために、タップ刺激を与えて応答の潜時を確認したことである。

以上のような手法を用いて、本論文は外乱の予測と頸筋の制御メカニズムについて、ヒト前額部への機械的外乱に対する頸筋応答における神経筋制御機序を明らかにすることを目的とした。

第4章 本論

第1節 外乱に抵抗しない運動課題における予測の可否が頸筋反射応答に与える影響

第1項 緒言

四肢筋において外部からの機械的外乱刺激の予測ができるか否かで伸張反射経路の興奮性が変化することについて第2章、第2節で述べた。そして近年、ヒト頸筋においても外乱の予測が反射応答を促進するあるいは抑制するかについて、いくつかの報告がある。Kumer et al. (2000, 2002), Blouin et al. (2003) は被験者が予め外乱のタイミングや大きさが予測できる場合、頸筋の応答は減衰することを報告している。一方で, Siegmund et al. (2002, 2003), Simoneu et al. (2003) は予測による頸筋応答の変化は見られなかったと報告している。いずれも体幹以下の身体各部位に後方から外乱刺激を与え、慣性で頭部を伸展させる方法をとっており、予測可能な条件として、被験者自らが外乱信号を発する方法などが取られている。これらの結果において、予測の可否による頸筋の活動の大小は一致した見解は得られておらず、その要因の1つとして、Blouin et al. (2003) は外乱の与え方の違いが影響をしていると述べている。例えば Simoneu et al. (2003) は立位姿勢の被験者に対して体幹を前方に動揺させて頭部を揺らしているのに対し、Blouin et al. (2003) は座位姿勢の被験者にプラットフォームごと外乱を与えている。どちらの方法も頸筋の反射応答を誘発するのに慣性を利用しているが、姿勢の違いや他部位からの体性感覚入力によって頸部の筋活動への影響のしかたが異なることは、頸筋の活動に変化を及ぼす重要な要素であると考えられる (Horak et al. 1994, 2001)。

さらに、頭部に直接機械的外乱を与える方法によって、外乱の予測の可否による影響を調べた報告は見られない。そこで、本節では実験1として前額部への機械的外乱に対して視覚の有無による予測の可否、つまり開眼を予測可能条件、閉眼を予測不可能な条件に設定し、頸筋に誘発される筋活動を比較・検討し、頸筋の神経筋制御における外乱予測との関係を明らかにすることを目的とした。

また頭部が揺れるような機械的外乱が与えられた場合、頸筋には前庭頸反射、伸張反射

が誘発されることを第 2 章，第 4 節で述べた．前庭頸反射が伸張反射に先行して現れることはいくつかの研究で報告されているが，それを分ける潜時は明確に示されていない．したがって本論文では，二つの反射応答が予測の可否によって異なる変化を示す可能性について，より客観的に評価するため，潜時を細かく区切って比較する解析方法を用いて，予測の可否による応答の差を検討した．

第2項 方法

被験者

被験者は過去に神経学的疾患歴および頸椎に既往歴のない健康な男性9名(22.6 ± 4.1歳, 平均 ± 標準偏差)とした。被験者に対しては実験前に研究の目的と方法を十分説明し, 被験者として実験に協力する旨の同意を得た。被検筋は両側の胸鎖乳突筋 (SCM: m. sternocleidomastoid), 僧帽筋 (TRP: m. trapezius) であった。

実験装置および実験手順

リハビリテーション用の組み立て式牽引フレームからロープで吊るされた錘を被験者の前額部に衝突させた。錘は金属円筒をクッション性素材で包んだものであり, 総重量は4 kgとした。被験者には錘が牽引フレームの真下にきた時に前額に当たるよう高さを調節して椅子に座らせた(図 4-1-1)。錘は前額部への衝突位置から4.5 cmの高さに相当する25°の角度から初速度0で離れた。なお, 高さや重量の決定には安全性を十分考慮し, 外乱によって生じる頭部の加速度が先行研究(Reid et al. 1981, Siegmund et al. 2000, 青木ら 2003)と同程度もしくはそれより小さいことを予め確認した。また, 錘が動き始めてから衝突するまでに要する時間は400 ms程度であることについても予め確認した。

被験者は安楽椅子に膝関節90°, 足関節中間位で足底が地面に接するように腰掛けた。外乱入力時に体幹が後方へ動揺しないよう, 背もたれに接して座らせた。実験中, 実験装置および実験室内の雑音を遮断し, 装置の操作による外乱の予測を避けるため被験者に耳栓を装着させた。

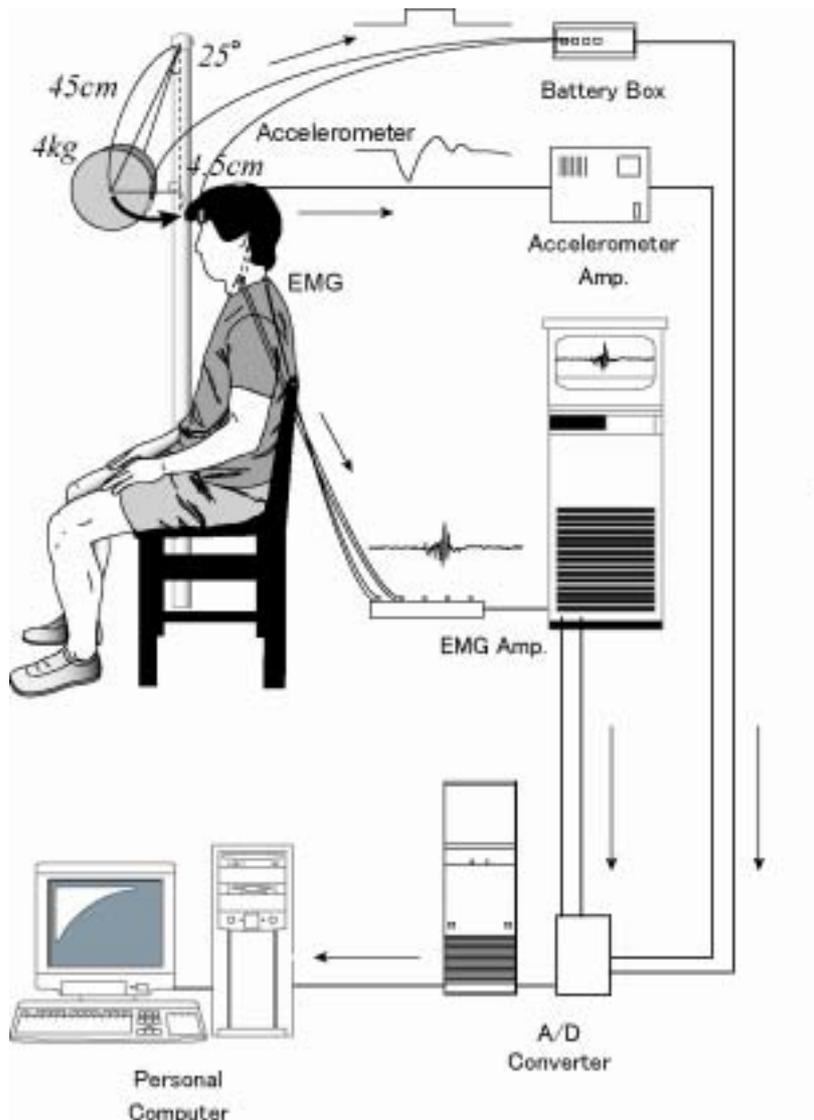


図 4-1-1 実験のセットアップ図

課題条件

被験者には前額部に衝突する外乱に対して抵抗しないよう指示した。前額部への機械的外乱の入力の予測可否は視覚の有無によって規定した。つまり、予測可能条件を開眼 (eyes-open: EO), 予測不可能条件を閉眼 (eye-closed: EC) とした。各条件において 10 試行ずつ実施した。試行順は被験者によって変更し, 5-10 秒間隔でランダムに外乱を与えた。被験者は実験前に設定より軽い負荷, および実験時に用いる負荷にて数回の練習をした後, 本実験に臨んだ。

データ記録

トリガー信号の記録

錘と被験者の前額部の接触部分に自作の亜鉛性接触スイッチを貼付し，両面粘着テープで固定した．自作の電池ボックスを介して接触時刻を矩形波のトリガー信号としてパーソナルコンピュータに記録した．

頭部加速度の記録

頭頂部に一軸加速度計（ASW-5A，共和電業）をサージカルテープで固定し，頭頂部の矢状面上の並進加速度を計測した．加速度信号は動ひずみ測定器（DPM-700B，共和電業）により帯域フィルター50 Hz-3 kHz で増幅し，PC ベース計測器（WE7000，横河電業）にてサンプリング周波数 1 kHz で A/D 変換した．錘と前額部の接触時刻のトリガー信号をもとに，外乱入力時点より前 500 ms，後 500 ms，合計 1 sec 間のデータをパーソナルコンピュータに記録した．また，加速度波形を 2 回積分処理し，頭部の位置変化を算出した．

筋活動電位（EMG）の記録

表面電極（Ag/AgCl，直径：6 mm）の双極誘導法により，筋活動電位を記録した．まず被検筋の電極貼付位置を決定した．SCM は胸骨柄の前面である胸骨頭と鎖骨内側 1/3 の上面である鎖骨頭から始まり，二つの筋頭が一緒になって乳様突起に停止する筋であり，胸骨頭と乳様突起を二等分した位置（おおよそ甲状軟骨の高さ）を電極貼付位置とした．SCM は皮下で容易に移動するため，頭位を一定にした状態で筋をつまんで確認し，位置を決定した．TRP は後頭骨と項靭帯を起始，鎖骨外側 1/3 を停止とし，頸部伸展に關与する上部線維を被検筋とした．電極貼付位置は頸肩移行部とした．被検筋上の皮膚表面をアルコール綿でよく拭き，生体用サンドペーパーを用いて皮膚表面の抵抗を 10 K 以下に落とし，電極間距離 15 mm にてサージカルテープで固定した．基準電極は右肩峰上の皮膚表面に貼付した．筋電信号は生体増幅器（AB-621B，日本光電）により，帯域フィルター50 Hz-3 kHz

で増幅し，サンプリング周波数 1 kHz で A/D 変換した．錘と前額部の接触時刻のトリガー信号をもとに，外乱入力時点より前 500 ms，後 500 ms 合計 1 sec 間のデータをパーソナルコンピュータに記録した（図 4-1-2）．

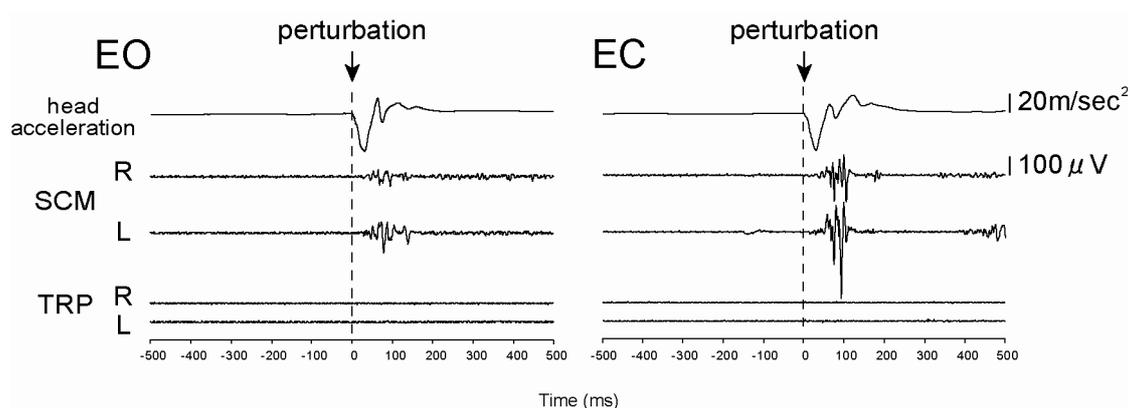


図 4-1-2 前額部に機械的外乱を与えた際の頭部加速度および頸筋活動の生波形
 左が予測可能 (EO) 条件，右が予測不可能 (EC) 条件．矢印は外乱の入力時刻を表す．
 (SCM：胸鎖乳突筋，TRP：僧帽筋，R：右，L：左)

データ解析

信号処理

デジタル信号化された EMG 信号は直流成分除去後に全波整流した（図 4-1-3）．背景筋活動量（Background activity: BGA）は全波整流された筋電図信号から，外乱の開始 50 ms 前の平均値を算出したものとした．トリガー信号をもとに外乱入力時点からの時刻を合わせ，課題ごとにそれぞれのデータを加算平均処理した．得られた加算平均波形をもとに，外乱入力時点からの SCM の反射応答の開始潜時および終了潜時を条件ごとに目視で読み取った．その結果，両条件間で開始潜時には差がなかったため被験者ごとにより早い潜時を採用した（表 4-1-1）．また，EO 課題における反射終了時刻の読み取りが目視では困難だったことから，EC 条件時の時刻を採用し，両条件における同区間の平均筋活動量を反射応答の振幅値として算出した．さらに，条件間の差を検出するため，外乱入力後から 5 ms ごとに反射

応答を区切って平均化した。TRP には反射性の応答が見られなかったため (図 4-1-2), 解析は SCM についてのみ行った。

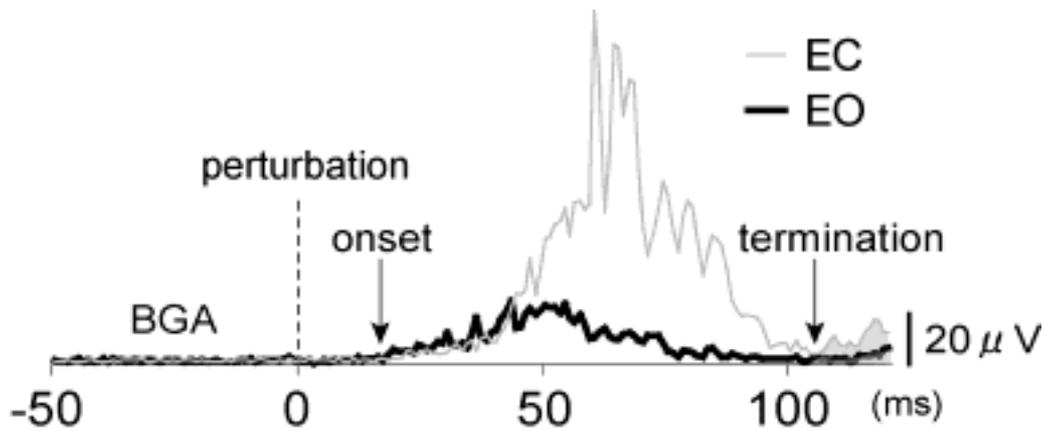


図 4-1-3 胸鎖乳突筋の反射応答の典型例(10試行の波形を加算平均)
 矢印は外乱の入力時刻および反射応答の開始, 終了時刻を表す。
 外乱開始前50 ms区間の平均筋活動量を背景筋活動量(BGA)として算出した。
 (EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

表 4-1-1 胸鎖乳突筋(左右)の反射応答の開始潜時および終了時刻の平均値
 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左, EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件, SE: 標準誤差)

	onset (msec)			termination (msec)	
	EO (SE)	EC (SE)	earlier (SE)	EC (SE)	
SCM-R	13.7 (1.4)	18.6 (2.6)	13.2 (1.6)	104.9 (5.7)	
SCM-L	14.9 (1.6)	18.3 (2.4)	12.9 (1.1)	104.9 (3.8)	

統計処理

予測の可否におけるそれぞれの変数に関する EO 課題と EC 課題の差の検定には, 関連二群の t-検定を用いた。有意水準は 5 %とした。

第3項 結果

前額部への機械的外乱によって生じた頭部の最大加速度と、頸筋のBGAの平均値に予測可否の条件間で差はなかった。つまり、入力の大きさと外乱入力時の脊髄運動ニューロンの活動レベルは条件間で同等であった(表 4-1-2)。

表 4-1-2 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度の平均値
(SCM: 胸鎖乳突筋, TRP: 僧帽筋, EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件, SE: 標準誤差)

	BGA of SCM (μV)		BGA of TRP (μV)		Head ACC (m/sec^2)	
	Right (SE)	Left (SE)	Right (SE)	Left (SE)	peak (SE)	(SE)
EO	1.9 (0.2)	2.0 (0.2)	1.5 (0.4)	1.5 (0.4)	-37.8	(3.3)
EC	1.8 (0.2)	1.8 (0.1)	1.5 (0.2)	1.6 (0.2)	-36.5	(2.4)

しかしながら、前額部への外乱刺激によって両側のSCMに現れた筋活動量はEOに比べてECで有意に大きかった($p < 0.05$, 図 4-1-4)。この応答は各条件の試行中、ほぼ一定の値を示し、条件ごとに前半5試行と後半5試行の振幅の平均値に有意な減衰は観察されなかった(表 4-1-3)。

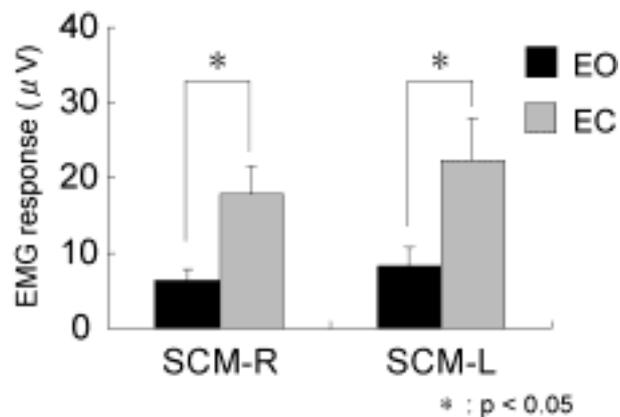


図 4-1-4 胸鎖乳突筋(左右)における反射応答の外乱の予測可否による比較
(SCM: 胸鎖乳突筋, TRP: 僧帽筋,
EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

表 4-1-3 胸鎖乳突筋(左右)における各条件の前半および後半の反射応答の平均値
 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左, EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件, SE: 標準誤差)

	former half (μV)				latter half (μV)			
	EO	(SE)	EC	(SE)	EO	(SE)	EC	(SE)
SCM-R	7.2	(1.5)	17.2	(4.0)	6.4	(1.8)	16.1	(4.3)
SCM-L	9.1	(2.8)	19.1	(4.3)	7.6	(3.0)	14.9	(2.4)

また, 応答の大きさを 5 ms ごとに条件間で比較すると, 40-45 ms 区間以降, 100-105 ms 区間までその差が見られた(図 4-1-5).

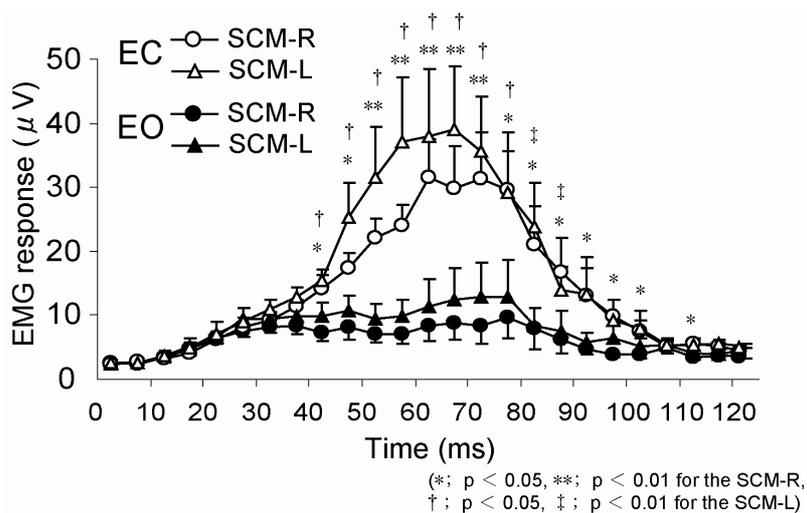


図 4-1-5 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による5 msごとの比較
 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左, EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

さらに、この差について前半成分 (onset-40 ms) と後半成分 (40 ms-termination) に区分して応答の大きさを比較したところ、前半成分は差がなく、後半成分はEO条件でSCMの応答が小さかった(図 4-1-6)。

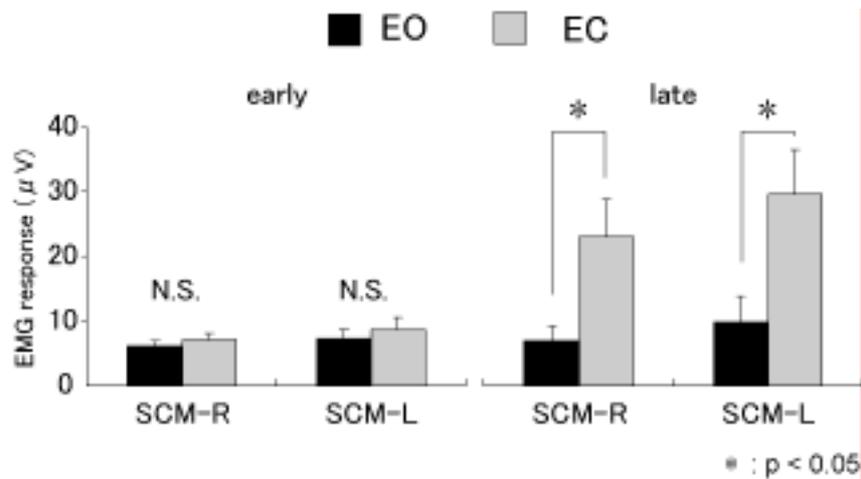


図 4-1-6 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による前半・後半成分ごとの比較 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左, EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

加速度波形の積分値から得られた頭部位置変化の典型例を図 4-1-7 に示した。頭部の伸展方向への移動量は予測可能条件の方が大きく、また、伸展位を保っている時間も長かった。

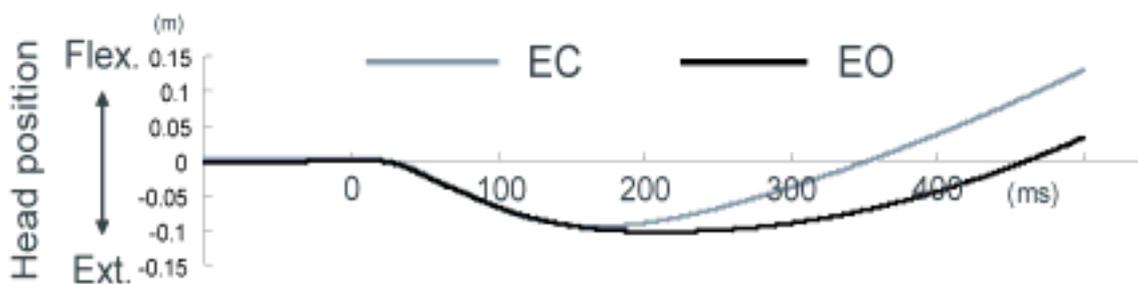


図 4-1-7 頭部位置変化の典型例 (Flex.: 屈曲, Ext.: 伸展, EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

第4項 考察

本実験では前額部に振り子様の錘を衝突させることで、頸部伸展の機械的外乱を被験者に与え、視覚の有無、つまり前方から近づく錘が見えるか否かによって衝突のタイミング予測の可否条件に設定し、頸筋に現れる筋活動に違いが生じるか否かを検討した。本実験において、予測の可否による外乱入力後の筋活動の違いを評価するにあたり、いくつかの項目において、外乱入力時の被験者の状態が同等であるかどうかを確認した。まず、BGAレベルはその量に比例して、動員される運動ニューロンの数が増大し、伸張刺激によって誘発される伸張反射応答も増大することが知られている (Matthews et al. 1986)。本実験においては EO, EC の両条件下で、前額部への機械的外乱直前の頸筋の BGA は同等レベルであったことから、頸筋の運動ニューロンレベルにおいて外乱前の安静状態は両条件で変わらなかった。次に、外乱によって生じた頭部への加速度のピーク値は、条件間で同等であったことから、外乱直前および入力時点の物理的刺激量は予測の可否に関わらず同程度であった。

次に前額部への機械的外乱後の頸筋の活動について、頸部屈筋である SCM には反射性の応答が誘発されたが、拮抗筋にあたる TRP にそのような応答は見られなかった。Ito et al. (1995) の報告においても、臥位で頸部伸展外乱を与えた際に TRP に一定の反射性応答は観察されなかったとしている。また、全身に一過性の応答が誘発される驚愕反射は、頭部への機械的外乱によって TRP に誘発されやすいことが知られているが (Brown 1991, Yeomans et al. 2002), 少なくとも本実験においては TRP に驚愕反射は誘発されなかった。さらに、予測不可能な条件において、前半と後半それぞれ 5 回の試行で SCM の応答の減衰が認められなかったため、SCM における驚愕反射の影響もなかった。

SCM には外乱後約 12-18 ms の潜時で明確な反射応答が誘発された。また終了時刻は EO 課題において目視での読み取りが困難だったため、EC 課題時の時刻を採用し、両条件で同じ区間の応答の振幅値を比較した。音刺激に対する頸部屈曲の単純反応時間は (Valls-Solé

et al. 1995) 本実験の終了時刻にほぼ相当することから、屈曲報告に動こうとする随意的な SCM の活動は起こっていなかった。

そして、外乱によって SCM に現れた筋活動は EO 条件つまり、外乱の予測ができる際に小さかった。この結果は四肢筋における Yamamoto and Ohtsuki(1989)らの報告と一致する。彼らは上腕の筋を対象に外乱に対する運動課題と外乱の予測可否を条件として、外乱後反射応答がどのように変化するか調べている。外乱の方向を積極的に補助するような課題時に外乱の予測ができると、伸張される側の筋の反射利得が低くなることを報告している。その現象は長潜時伸張反射成分で顕著であり、Aminoff and Goodin (2000) からも同様の報告をしている。一方頸筋においても Kumer et al. (2000, 2002), Blouin et al. (2003) が加速度負荷装置の外乱を予測することで頸部伸展時の SCM の反射応答が減衰することを報告しているが、その起源については検討されていない。

そして、SCM の筋活動を外乱入力後から時間を追って詳細に検討すると、図 4-1-5 で示したように、外乱入力後から 40-45 ms 区間以降、100-105 ms までの区間で条件間の差が見られた。つまり約 40 ms で SCM の反射応答は前・後半の二つの成分に分けられ、前半の成分では変化がなく、後半の成分で応答が変化した(図 4-1-6)。

先行研究では前庭反射は伸張反射成分に先行するとされている。例えば、健常被験者において、水平方向に頭部加速度刺激を与えた際、SCM の最も早い応答はネックカラーで頸部伸展を制限しても見られたことから前庭頸反射は伸張反射よりも早い潜時で現れているとしている(Aoki et al. 2001, Mazzini and Schieppati 1994)。同様に、Ito et al.(1995), Munchau et al.(2001) らは前庭機能不全患者において SCM の早い潜時の応答が欠損することから、その成分が前庭器官由来の応答であることを主張している。これらの研究で述べられている成分の分岐潜時は 40-60 ms であり、本研究での条件間の差が見られた時間ともほぼ一致する。したがって、本研究における前半の反射成分(onset-40 ms)は前庭頸反射、後半成分(40 ms-termination)は伸張反射に相当する可能性がある。

これを踏まえると、本実験で予測による頸筋反射の変化は主に伸張反射成分によるもの

であることが推定される．四肢筋での外乱予測による変化は運動方向を補助するように長潜時伸張反射経路の興奮性を調節することが知られている．これと同様に頸部屈筋の伸張反射は外乱の予測可能な条件時に外乱に抵抗しない課題を遂行しやすいように，つまり，「外乱による頸部伸展を妨げない」ように反射応答を抑制させるように修飾されているものと考えられた．

一方で前半成分の前庭頸反射と考えられる応答は予測によって変化しなかった．この理由として前庭頸反射と考えられる SCM の反射応答の前半成分は，伸張反射と考えられる後半成分に比べて両条件ともに明らかに振幅が小さかったことが挙げられる．つまり，そもそも前庭頸反射の利得が小さい前半成分の応答は，予測可否による影響が誤差範囲に埋没し，検出に至らなかった可能性が推測される．また，前庭頸反射は頭部が動かされることに抗して頭部の位置を元に戻す働きを持つが，本実験においては被験者に対して外乱に抵抗しないような指示を予め与えていたために応答が抑制されていた可能性もある．

このような予測の可否によって各々の経路が異なる変化を示すと考えられるが，本実験の限界として両者の反射応答の起源を直接特定することはできない．また，前半の区間を四肢筋同様に短潜時伸張反射，後半の区間を長潜時伸張反射と捉えてもその結果に矛盾がないため，それ以上の推察をすることも難しい．それを明らかにするためには，伸張反射あるいは前庭反射の感覚入力を物理的，神経学的に制限する，あるいは機能不全の患者を対象にし，健常被験者との差異によって確かめるなどの方法を取る必要がある．

第2節 頭部の物理的固定による頸筋反射応答の変化

第1項 緒言

実験 1 では頭部への機械的外乱の予測の可否による SCM の応答の違いについて、先行研究 (Ito et al. 1995, Aoki et al. 2001, Mazzini and Schieppati 1994) をもとに起源を推定した。そして、前半成分が前庭由来、後半成分が伸張反射由来である可能性が高いことから、予測による反射応答の合目的な変化は主に後半成分の伸張反射経路の興奮性の変化に由来するものであると結論づけた。しかしながら、実験 1 から経路の違いを直接説明する証拠にはならない。

そこで、本節の実験 2 では同様の外乱入力条件下で体幹と頸部を物理的に固定し、頸筋への伸張刺激を制限するという実験を設定して、それによる応答の変化から反射応答の起源を探ることを目的とした。つまり、予測不可能な条件下で大きな筋活動が誘発された区間の応答が、SCM への伸張刺激を制限することで減衰するか否かを確かめた。この手法は、Aoki et al. (2001) の先行研究においても行われている研究手法であり、報告によると頭部への加速度入力のみを外乱刺激に対し、最初に現れる反射応答の潜時が変わらず、その後の応答は減衰する。つまり頭部への外乱によって最初に現れる応答は加速度入力を求心性情報とする前庭頸反射であったとしている。このことから、本実験においても実験 1 同様、時間ごとにその応答を比較して客観的にその変化を比較した。

また、予測不可能な状況において、頭部を物理的に固定した際、SCM あるいは他の四肢筋において驚愕反射応答が誘発されるか否かを確認するために四肢の筋活動も同時に記録した。

第2項 方法

被験者

被験者は過去に神経学的疾患歴および頸椎に既往歴のない健康な男性7名(20.1 ± 1.3 歳, 平均 ± 標準偏差)とした。被験者に対しては実験前に研究の目的と方法を十分説明し, 被験者として実験に協力する旨の同意を得た。被検筋は左側の胸鎖乳突筋 (SCM: m. sternocleidomastoid), 僧帽筋 (TRP: m. trapezius), 咬筋 (MAS: m. masseter), 上腕二頭筋 (BB: m. biceps brachii), 前脛骨筋 (TA: m. tibialis anterior), ヒラメ筋 (SOL: m. soleus) であった。

実験装置および実験手順

実験装置は基本的に実験1と同様であった。被験者は安楽椅子に膝関節90°, 足関節中間位で足底が地面に接するように腰掛けた。頭部固定の条件時には外乱入力時に頸部が伸展しないよう, 背もたれ部分に頭部の高さまでのスプリントを設置し, 顎の部分をストラップで物理的に固定した(図4-2-1)。



図 4-2-1 実験のセットアップ図

課題条件

前額部への機械的な頭部伸展外乱の入力が予測できないよう閉眼条件で、頭部を固定しない試行 (Head-free) および頭部を物理的に固定する試行 (Head-fixed) を各々10 試行実施した。試行順は被験者によって変更し、5~10 秒間隔でランダムに外乱を与えた。被験者は実験前に設定より軽い負荷、および実験時に用いる負荷にて数回の練習をした後、本実験に臨んだ。

データ記録

トリガー信号の記録、頭部加速度の記録、筋活動電位 (EMG) の記録は SCM および TRP については実験 1 と同様であった。MAS の電極貼付位置は歯を食いしばらせて筋の前縁を確認し、そこから後方 1 横指、下顎骨下縁より頭側に 1 横指とした。BB は上腕中央部の筋腹とした。TA は脛骨粗面より 4 横指遠位部で脛骨稜より 1 横指外側とした。SOL は腓腹筋筋腹の遠位部でアキレス腱の内側前面とした。また、頭部伸展制限による頭頂部の位置を確認するため、加速度波形を積分し、位置情報を得た (図 4-2-2)。

データ解析

信号処理

デジタル信号化された EMG 信号は直流成分除去後に全波整流した (図 4-2-2)。背景筋活動 (BGA : Background activity) は全波整流された筋電図信号から、外乱の開始 50 ms 前の平均筋活動量を算出したものとした。トリガー信号をもとに外乱入力時点からの時刻を合わせ、課題ごとにそれぞれのデータを加算平均処理した。得られた加算平均波形をもとに、外乱入力時点からの SCM の反射応答の開始潜時および終了潜時を条件ごとに目視で読み取ったが、頭部固定条件における反射の開始、および終了時刻の読み取りが目視では困難だったことから、頭部を固定しない条件での開始、終了時刻をその被験者の反射応答の区間として採用し、区間全体の平均値を算出して条件間の比較を行った。条件間の差を詳細に

検出するため、外乱入力後から 5 ms ごとに反射応答を区切って平均化し比較した。TRP および他の四肢筋には反射性の応答が見られなかったため (図 4-2-3), 解析は SCM についてのみ行った。

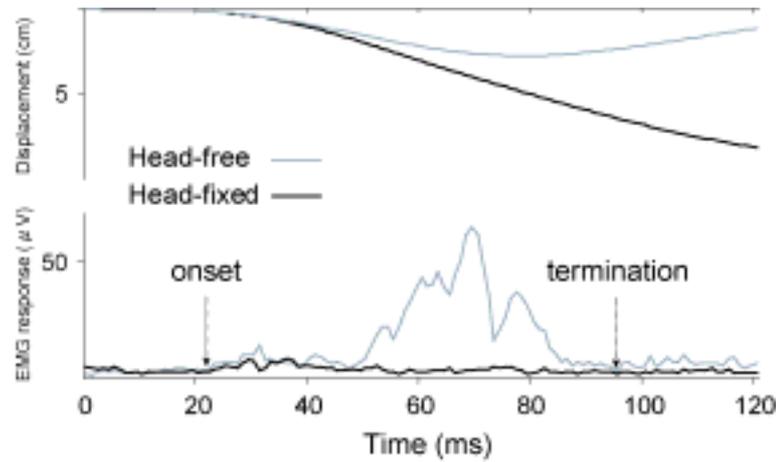


図 4-2-2 頭部固定の有無による頭部変位 (上段) と 胸鎖乳突筋の反射応答 (下段) の典型例
矢印は頭部固定なし (Head-free) 条件時の反射応答の開始、終了時刻を表す。

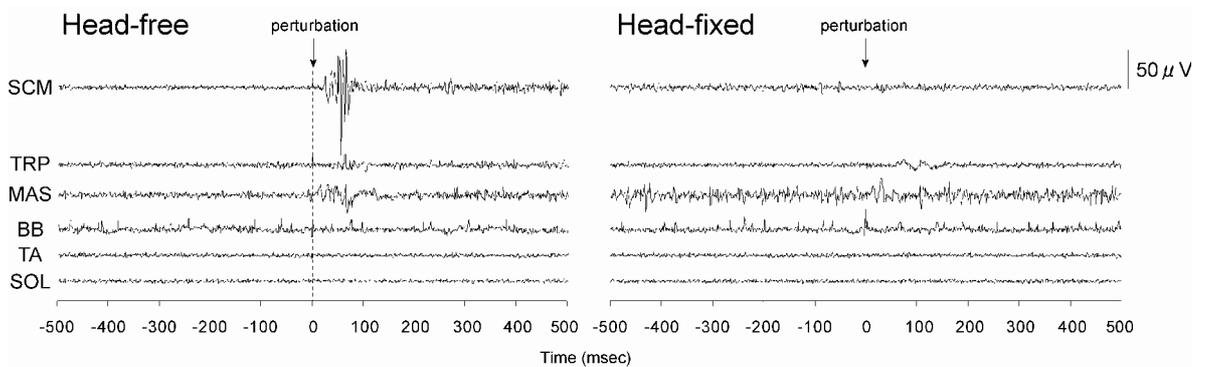


図 4-2-3 前額部に機械的外乱を与えた際の全身の筋活動の生波形
左が頭部固定なし (Head-free) 条件, 右が頭部固定 (Head-fixed) 条件。
矢印は外乱の入力時刻を表す。
(SCM : 胸鎖乳突筋, TRP : 僧帽筋, MAS : 咬筋, BB : 上腕二頭筋,
TA : 前脛骨筋, SOL : ヒラメ筋)

統計処理

頭部固定の有無による条件間の差の検定には、関連二群の t-検定を用いた。有意水準は 5 %とした。

第3項 結果

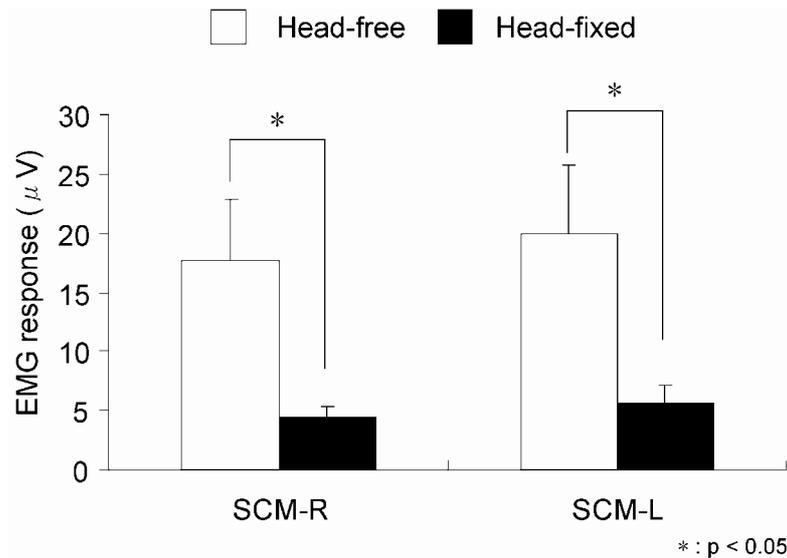
頸筋の BGA に条件間で差はなかった (表 4-2-1)。つまり, 入力の大きさと外乱入力時の脊髄運動ニューロンの活動レベルは条件間で同等であった。頭部の最大加速度と頭部位置については頭部固定条件で有意に小さかった。

表 4-2-1 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度および頭部最大変位の平均値 (SCM: 胸鎖乳突筋, TRP: 僧帽筋, SE: 標準誤差)

	BGA of SCM (μV)		BGA of TRP (μV)		Head ACC (m/sec^2)	Head position (m)
	Right (SE)	Left (SE)	Right (SE)	Left (SE)	peak (SE)	peak (SE)
Head-free	2.0 (4.7)	2.2 (0.4)	1.8 (0.5)	2.8 (1.1)	42.7 (1.8)	-0.11 (0.006)
Head-fixed	2.1 (0.4)	2.7 (0.5)	2.1 (0.5)	2.8 (1.2)	29.5 (2.8)	-0.03 (0.005)

*: $p < 0.05$

また, SCM に現れる反射応答を区間全体で平均すると, 頭部固定条件で有意に減衰した (図 4-2-4)。



*: $p < 0.05$

図 4-2-4 胸鎖乳突筋における反射応答の頭部固定の有無による比較 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左)

SCMにおける頭部固定の有無条件間の応答の大きさを5 msごとに比較すると、40-45 ms 区間以降にその差が見られた(図 4-2-5)。

四肢筋など、その他の筋において外乱による筋活動は見られなかった(図 4-2-5)。

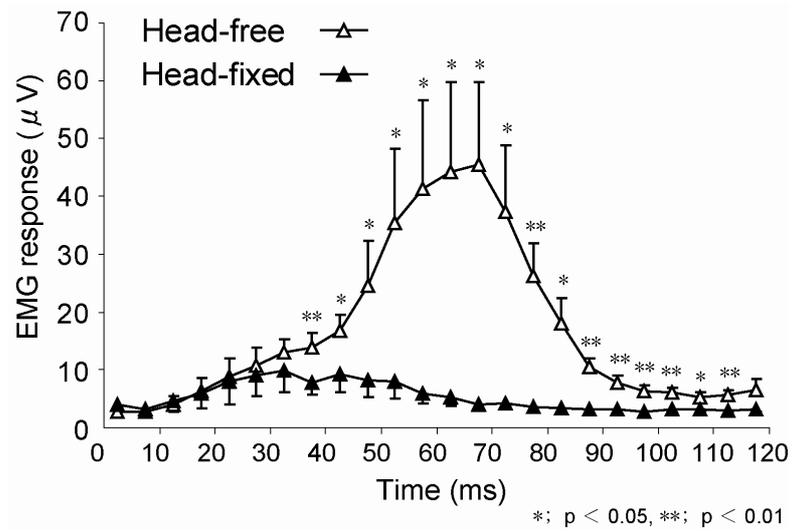


図 4-2-5 胸鎖乳突筋における反射応答の頭部固定の有無による5 msごとの比較

第4項 考察

本実験では、頭部を物理的に固定することで頸筋への伸張刺激を制限することを試み、伸張反射応答の変化が起こるか否かで、頭部への機械的外乱によって現れる SCM の反射起源を推定した。

まず本実験の設定として、SCM への伸張刺激を起こさないようにするため、顎の部分をスプリントとストラップで物理的に固定した。しかしながら、頭頂部の位置変化は頭部固定の条件においてもわずかながら見られた。一方で頭頂部の加速度は頭部固定しない場合よりは減衰したものの、7 割程度は保たれた。これは頭部への外乱の衝撃によって身体と頭部が一体となって動くことで発生した加速度であると考えられ、その衝撃によって頭部の位置もわずかに動いたが、そのことによる頸部の伸展は生じなかったと考えられる。

その結果 SCM の応答は頭部の物理的な固定によって、固定しなかった場合に比べて減少し、40 ms 以降でその差が見られた。つまり、実験 1 において予測の可否によって変化し、SCM の伸張反射応答であると考えられた区間とほぼ合致していた。このことは後半の成分が伸張反射応答由来の区間であることを支持する結果と考えられる。

一方で 40 ms よりも前で最初に応答が現れる応答には頭部固定による差がないことから、前庭頸反射に相当すると考えられる応答は変化しなかったと言える。頸部の伸張刺激がなく、頭部への加速度刺激が加わっている条件下での、この結果は、40 ms より前の応答が前庭器官由来、その後は伸張刺激による伸張反射応答である可能性が示唆された。

第3節 胸鎖乳突筋のタッピングによる短潜時伸張反射応答の誘発

第1項 緒言

実験 1 では前額部への機械的外乱によって胸鎖乳突筋に誘発される反射応答について、予測の可否による影響について検討した。また実験 2 では頸筋特有である前庭頸反射・伸張反射という異なる入力起源からの応答に着目して、頭部の物理的固定による影響を検討した。これら二つの実験から、本論文では頸筋の伸張反射の潜時はおよそ 40 ms 前後にあるとしてきた。また先行研究で伸張反射応答とされる潜時も約 40-60 ms とされている。しかしながら、脊髄反射の単シナプス応答の潜時は神経の伝導速度と脊髄までの距離に依存することから考えると、四肢筋のそれに比べて明らかに遅い (Matthews et al. 1990, Corna et al. 1995, Schieppati et al. 1995, Nakazawa et al., Kimura et al. 2003)。つまり実験 1 および 2 また、その他の報告で得られた伸張反射とされる応答は単シナプスではなく多シナプス反射である可能性が高いと思われる。

しかしながら、これまでに胸鎖乳突筋の単シナプスの伸張反射応答を示した報告はなく、この可能性を直接説明することはできない。したがって、本節の実験 3 では胸鎖乳突筋にタップ刺激を与えることで単シナプスの伸張反射の誘発を試み、その潜時を確認することを目的とした。

第2項 方法

被験者

被験者は過去に神経学的疾患歴および頸椎に既往歴のない健康な男性 4 名 (29.3 ± 2.2 歳, 平均 ± 標準偏差) とした。被験者に対しては実験前に研究の目的と方法を十分説明し, 被験者として実験に協力する旨の同意を得た。被検筋は両側の胸鎖乳突筋 (SCM: m. sternocleidomastoid), 僧帽筋 (TRP: m. trapezius) であった。

実験装置および実験手順

被験者はヘッドレスト付きの安楽椅子に腰掛け, 頭部をヘッドレストに接触させ, 安静位をとらせた。反射機能検査用の打鍵器を使用し, できるだけ一定の負荷で左側の SCM の胸骨停止部(図 4-3-1 参照)を叩いた。実験条件は頭部をヘッドレストに接触させた安静時, および, 頸部屈曲による SCM の背景筋活動発揮時とし, 両条件で 30 試行ずつ行った。

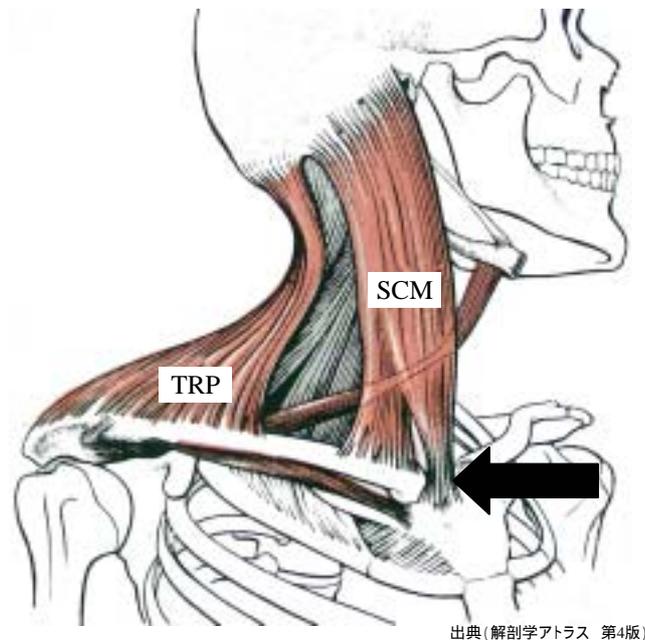


図 4-3-1 胸鎖乳突筋の打鍵部位(矢印)

データ記録

トリガー信号の記録

タッピング時刻を記録するため、SCM の胸骨停止部と打鍵器の接触部分に自作の垂鉛性接触スイッチを貼付し、両面粘着テープで固定した。自作の電池ボックスを介して接触時刻を矩形波のトリガー信号とし、その時刻を刺激入力時刻として前 500 ms、後 500 ms 合計 1 sec 間のデータをパーソナルコンピュータに記録した。

筋活動電位 (EMG) の記録は実験 1 と同様であった。

データ解析

信号処理

デジタル信号化された EMG 信号から直流成分を除去した。1 試行の波形からでは明確な応答が読み取れなかったため、トリガー信号をもとに外乱入力時点からの時刻を合わせ、課題ごとにそれぞれのデータを加算平均処理した。加算平均波形から、応答のピークが現れる潜時を目視で読みとった。

第3項 結果

図 4-3-2に一人の被験者の加算平均波形の典型例を示した。全ての被験者の刺激側(左側)のSCMにおいて安静時のピーク値が 14.8 ± 4.1 msに、背景筋活動発揮時のピーク値が 10.8 ± 3.3 msに確認された。また振幅の大きさは安静時では 6.4 ± 3.6 μ V、背景筋活動発揮時では 38.2 ± 25.3 μ Vであった。いずれの被験者においても、安静時より背景筋活動を発揮した際のピークを示す時刻が早く、ピーク値の振幅が大きかった。

この時、反対側のSCMおよびTRPには反射性の応答が見られなかった。

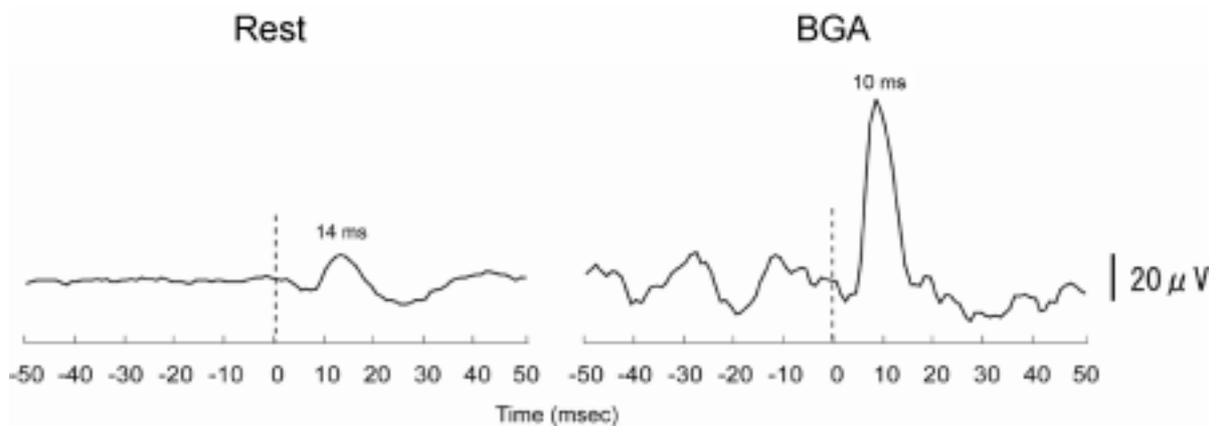


図 4-3-2 胸鎖乳突筋のタッピングによる30 試行の加算平均波形
安静時(右図)、背景筋活動発揮時(左図)。

第4項 考察

伸張反射は関節の急激な伸展や腱を叩くことで筋紡錘が伸張され、伸ばされた筋が関節の角度や筋の長さを元に戻すために収縮しようとする反射である。四肢の筋では伸張反射によって得られる応答を現れる潜時の違いから、脊髄以下の経路のみを介する単シナプス反射、その後、明らかに長い潜時で現れる応答を多シナプス反射として分離して評価する手法が用いられている (Yamamoto and Ohtsuki 1989, Nakazawa et al. 1997, Kimura et al. 2003)。そのうち単シナプス反射は、 α 群神経線維を介して脊髄運動ニューロンに達し、単シナプスで同名筋に応答が誘発されることから、その潜時は脊髄との距離および刺激が神経を伝わる神経伝導速度によってある程度規定されている。足趾を支配する筋の単シナプス伸張反射の潜時は約55 ms (Corna et al. 1995, Schieppati et al. 1995)、下腿三頭筋のうちヒラメ筋に見られる単シナプス反射の潜時は約40-45 msである (Schieppati et al. 1995, Kimura et al. 2003)。足趾に比べて下腿部の方がより脊髄に近いので潜時が短くなる。一方上肢の筋においては手関節の筋では約30 ms (Matthews et al. 1990)、上腕の筋では15-25 ms (Nakazawa et al. 1997) であり、下肢と同様、近位筋ほど単シナプスの伸張反射の潜時は短くなる。また、下肢に対して上肢と脊髄の距離が短いことから、より早く応答が得られる。また、Alexander and Harrison (2002) は頸椎の棘突起をタッピングすることによって上部、下部のTRPから約12 msの潜時で単シナプス性の筋活動電位が誘発されることを報告しており、頸筋と脊髄の距離から考えるとSCMの単シナプス反射もTRPと同程度の潜時で応答が得られると予測される。

実際に本実験においてSCMの腱部を叩くことで、安静時で約14 ms、背景筋活動時で約10 msにピークを持つ反射応答が誘発され、背景筋活動発揮時で応答の振幅値が大きかった。

SCM における単シナプスの反射応答は比較的振幅が小さく、1回の試行による生波形からは明確な応答が読み取れなかった。このことはTRPにおいても数十回の加算平均波形から単シナプス反射の存在を確認している Alexander and Harrison (2002) の報告とも一致す

る．この理由の一つとして，頸筋の以下のような解剖学的特徴が考えられる．

まず Richmond and Abrahams (1979) はネコにおける頸筋の感覚神経では伝導速度 20-60 m/s の 群感覚神経が圧倒的に多く， a 群感覚神経 (伝導速度 72 m/s 以上) はごくわずかであったとしている．このことはその後 Bakker and Richmond (1982) による組織学的手法によって，頸筋の筋紡錘の約 3 分の 1 において，1 型核袋錘内筋線維が欠損していることが明らかにされており，このことによって頸筋においては a 群感覚神経線維の特徴が欠落し，速い筋の伸張に対するスパイク発射頻度が少ないと考えられる．

さらに，頸筋を支配する運動ニューロンと筋紡錘からの感覚神経との接合部の特徴として，頸筋内の筋紡錘からの感覚神経はその運動ニューロンの樹状突起先端にシナプスを作ることが報告されている (Abrahams and Richmond, 1988) ．四肢の反射回路では筋紡錘からの感覚神経は運動ニューロンの細胞体近くにシナプス接合する．このことは機能的に四肢の反射が速い運動に寄与しているのに対して，頸筋は速く動く必要がないからと説明されている (Abrahams and Richmond, 1988) ．

以上のことから，本実験において，約 10-14 ms にピークを持つ単シナプス性の伸張反射応答を記録することができたが，その振幅は解剖学的特徴から通常速い動きにおいては貢献度が低い可能性が十分に考えられた．それらが，先行研究において，また，本実験においても SCM における単シナプスの伸張反射応答が記録されなかった理由として考えられる．ただし，本研究では表面筋電図による筋活動の記録が方法の限界であったため，埋入電極を用いて直接運動単位の活動を記録するなどが，今後の研究課題として考えられる．

第4節 運動課題の違いが頸筋の反射応答に及ぼす影響

第1項 緒言

実験 1 では頭部への機械的外乱に対して抵抗しない運動課題を被験者に課し、予測と頸筋反射応答の関係について議論した。また実験 2・3 では機械的外乱によって得られる SCM の応答が潜時の違いによって意味を持つ応答であるか否かについて検証した。それらの結果から、頭部への外乱が予測できることで頸筋多シナプス性の伸張反射経路の興奮性が変化し、運動の方向を妨げないように応答が減衰することが示唆された。これは四肢筋の長潜時伸張反射で見られる結果と同様の傾向を示し、頸筋においても反射経路の興奮性が予測の可否によって運動の目的に見合った修飾を受けるということが明らかになった。

そして、外乱に対する運動課題を予め教示した場合、つまり外乱後の運動に対する事前の準備状態が異なる状況にある時、四肢筋では伸張反射の長潜時成分が合目的的に変化するように調節されることが多くの研究によって明らかにされている (Sullivan and Hayes 1987, Yamamoto and Ohtsuki 1989)。

四肢筋では随意的な運動の準備状態として、反射を誘発するための利得が変化し、随意運動に対する反射の興奮性は達成する運動の目的に合わせて柔軟に変化すると捉えられている。特にそのような変化は長潜時伸張反射と呼ばれる四肢の多シナプス反射において顕著であり (Sullivan and Hayes 1987, Yamamoto and Ohtsuki 1989)、長潜時伸張反射は中枢からの随意的な指令が脊髄反射に修飾されることによって、より機能的な変化を遂げていると考えられる。

一方で、これまでに頭部への外乱の予測可否に関する報告はいくつか見られるが (Siegumund et al. 2002, Kumer et al. 2002, Blouin et al. 2003)、外乱後の頭部姿勢に対して運動課題を教示するような報告はこれまでにない。Siegumund et al. (2001) は被験者が音刺激に反応して頭部を屈曲しようとする準備状態にある場合、急激に大きな音を聞かせると頸筋に現れる驚愕反射が増大することから、運動の準備状態が頸筋運動ニューロンの興

奮性を高めてと報告しているが、機械的外乱を与えた場合の応答については、そのような調節が行われているか検討されていない。

そこで実験 4 では、外乱に対して頭部姿勢を保持しようとする課題を教示した場合、頸筋の反射応答に変化が現れるか否かについて明らかにすることを目的とした。また、その変化が前庭頸反射と伸張反射とで異なる応答を示すか否かについて、実験 1 と同様に反射応答を 5 ms ごとの細かい時間に区切って評価した。

第2項 方法

被験者

被験者は過去に神経学的疾患歴および頸椎に既往歴のない健康な男性健常男性 11 名 (23.3 ± 4.1 歳, 174.5 ± 3.9 cm, 77.5 ± 11.7 kg) とした。被験者に対しては実験前に研究の目的と方法を十分説明し, 被験者として実験に協力する旨の同意を得た。被検筋は両側の胸鎖乳突筋 (SCM: m. sternocleidomastoid), 僧帽筋 (TRP: m. trapezius) であった。

実験装置および実験手順

実験装置および, 実験手順は実験 1 と同様とした。

課題条件

被験者には閉眼にて安静座位を取らせ, 前額部からの機械的外乱が予測不可能な条件において, 前額部への機械的な外乱に対して頭部姿勢を保持する (resist) もしくはしない (not-resist) 課題を予め教示し, 10 試行ずつ実施した。試行順は被験者によって変更し, 5 ~ 10 秒間隔でランダムに外乱を与えた。被験者は実験前に設定より軽い負荷, および実験時に用いる負荷にて数回の練習をした後, 本実験に臨んだ。

データ記録

トリガー信号の記録, 頭部加速度の記録, 筋活動電位 (EMG) の記録についても実験 1 と同様とした (図 4-4-1)。

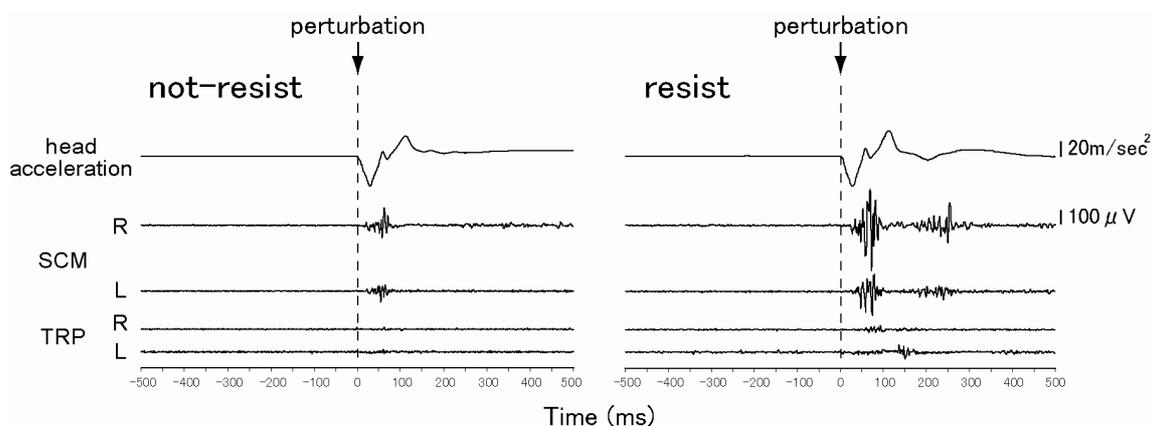


図 4-4-1 前額部に機械的外乱を与た際の頭部加速度および頸筋の筋活動
外乱に抵抗しない課題(左図)と外乱に対して頭部姿勢を保持する課題(右図)。
(SCM：胸鎖乳突筋, TRP：僧帽筋, R：右, L：左)

データ解析

信号処理

デジタル信号化された EMG 信号は直流成分除去後に全波整流した。BGA は全波整流された筋電図信号から、外乱の開始 50 ms 前の平均筋活動量を算出したものとした。トリガー信号をもとに外乱入力時点からの時刻を合わせ、課題ごとにそれぞれのデータを加算平均処理した。得られた加算平均波形をもとに、外乱入力時点からの SCM の反射応答の開始潜時および終了潜時を条件ごとに目視で読み取った(図 4-4-2)。resist 課題における反射終了時刻の読み取りが困難だったことから、not-resist 課題時の時刻を採用し(表 4-4-1)、両条件における同区間の平均筋活動量を反射応答の振幅値として算出した。さらに、条件間の差を検出するため、外乱入力後から 5 ms ごとに反射応答を区切って平均化した。TRP には反射性の応答が見られなかったため、解析は SCM についてのみ行った。

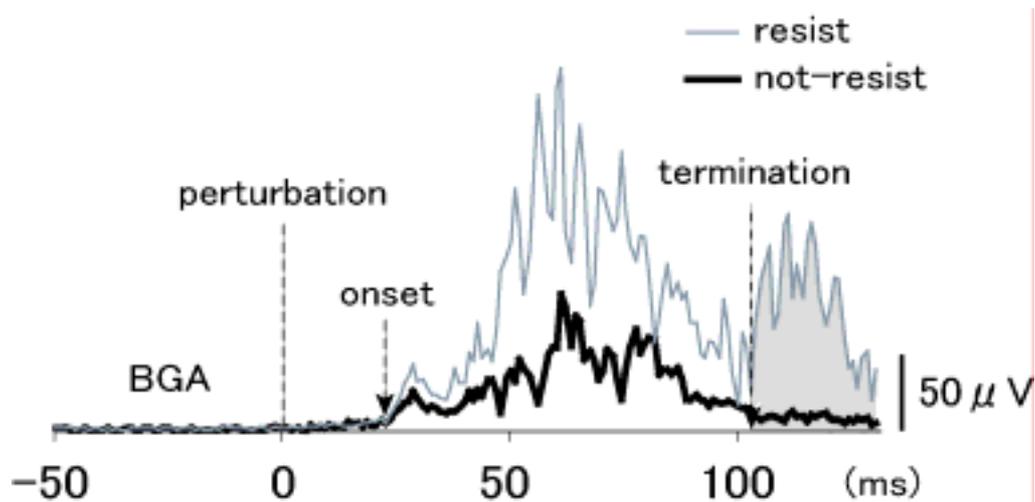


図 4-4-2 胸鎖乳突筋の反射応答の典型例

表 4-4-1 胸鎖乳突筋の反射応答の開始潜時および終了時刻の平均値
(SCM：胸鎖乳突筋, R：右, L：左, SE：標準誤差)

	onset (msec)			termination (msec)
	not-resist (SE)	resist (SE)	earlier (SE)	not-resist (SE)
SCM-R	16.1 (2.1)	19.0 (1.4)	15.2 (1.8)	104.5 (4.7)
SCM-L	16.2 (1.8)	17.1 (1.3)	14.1 (1.1)	105.1 (3.1)

統計処理

前額部への機械的外乱に対する resist 課題と not-resist 課題の差の検定には、関連二群の t-検定を用いた。有意水準は 5 %とした。

第3項 結果

頭部の最大加速度と、頸筋の背景筋活動量の平均値に条件間で差はなかった（表 4-4-2）。つまり、入力の大きさと外乱入力時の脊髓運動ニューロンの活動レベルは条件間で同等であった。しかしながら、外乱入力後の SCM の筋活動を区間全体で平均すると、resist 課題で大きかった（図 4-4-3）。

表 4-4-2 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度の平均値
（SCM：胸鎖乳突筋，TRP：僧帽筋，SE：標準誤差）

	BGA of SCM (μV)				BGA of TRP (μV)				Head ACC (m/sec^2)	
	Right	(SE)	Left	(SE)	Right	SE	Left	SE	mean	SE
not resist	1.8	(0.2)	1.6	(0.1)	1.5	(0.2)	1.7	(0.3)	-45.8	(2.1)
resist	2.3	(0.5)	2.3	(0.4)	1.5	(0.2)	1.8	(0.4)	-44.8	(2.6)

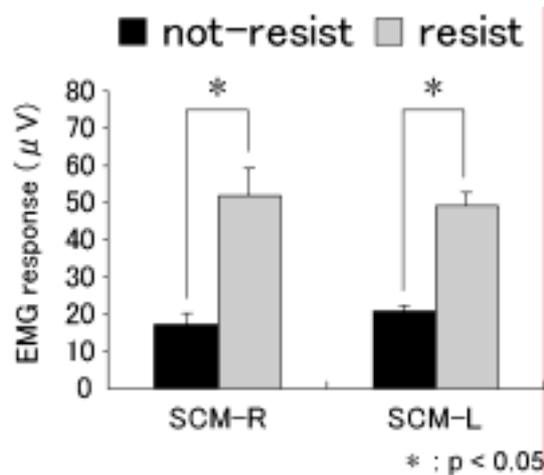


図 4-4-3 胸鎖乳突筋における反射応答の運動の準備状態の違いによる比較
（SCM：胸鎖乳突筋，R：右，L：左）

また、応答の大きさを 5 ms ごとに条件間で比較すると、右側の SCM では 25-30 ms 区間以降、左側の SCM では 20-25 ms 区間以降で resist 課題字の応答が大きかった (図 4-4-4)。

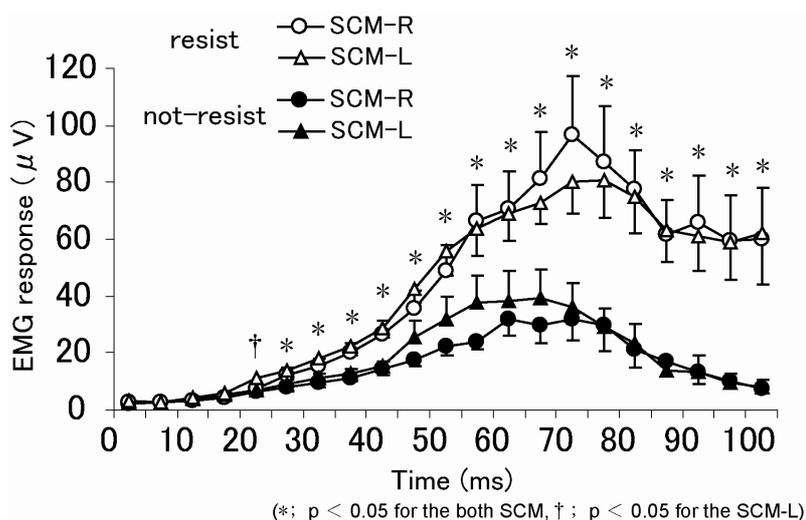


図 4-4-4 胸鎖乳突筋における反射応答の運動の準備状態の違いによる 5 ms ごととの比較 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左)

さらに、反射応答を前半成分 (onset-40 ms) と後半成分 (40 ms-termination) に区分して応答の大きさを比較したところ、どちらの区間においても resist 課題の応答が有意に大きかった (図 4-4-5)。

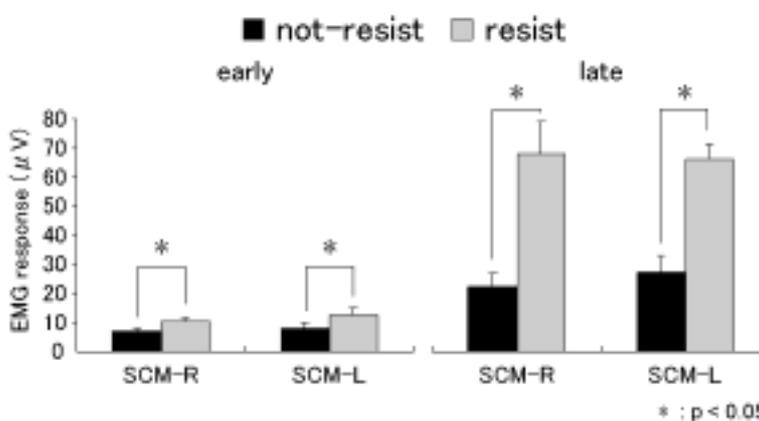


図 4-4-5 胸鎖乳突筋における反射応答の運動の準備状態の違いによる前半・後半成分ごとの比較 (SCM: 胸鎖乳突筋, R: 右, L: 左)

加速度波形の積分値から得られた頭部位置変化の典型例を図 4-4-6 に示した。頭部の伸展方向への移動量は resist 課題の方が小さく、また、伸展元の位置に戻るまでの時間が短かった。

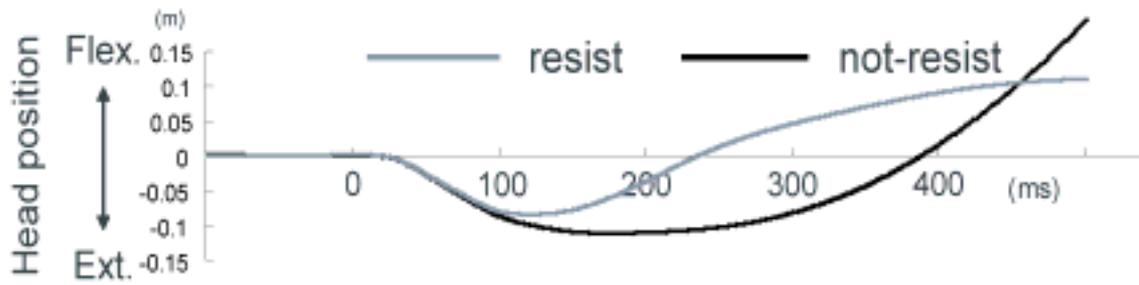


図 4-4-6 頭部位置変化の典型例
(Flex. : 屈曲, Ext. : 伸展)

第4項 考察

実験1と同様、外乱入力前のBGAおよび頭部への外乱刺激によって生じた頭頂部の加速度ピーク値は、条件間で差がなかった。つまり、本実験における外乱入力前の安静状態は筋の活動レベルから評価して、条件間で同等であり、外乱入力の大きさも同程度であった。

しかしながら、外乱が与えられた後の筋活動は予め頭部姿勢を保持するように教示されると、頸部屈筋であるSCMの反射応答が増大した。このような反射応答の変化は運動課題の目的と一致する。つまり、頭部姿勢を素早く元に戻すために有利な反射応答の変化がもたらされたと言える。

さらに、応答を詳細に検討するため、実験1と同様、外乱入力後から5msごとに反射応答を区切ってそれぞれの区間ごとに比較した結果、頭部姿勢の保持課題において、実験1では変化しなかった20-40ms区間においても応答の増大が見られた。その後、単純反応課題において、随意運動の開始潜時とされる100ms以降でも筋活動が大きかった。

四肢筋では本実験と同じように外乱に対して関節位置を保持する課題において、伸張反射応答が事前に大きくセットされるという報告がある(Bonnet 1983)。そしてそれらの変化は上腕の筋で約50ms以降の長潜時伸張反射と呼ばれる区間でのみ顕著であるとされている(Yamamoto and Ohtsuki 1989)。本実験では少なくとも反射応答の開始直後から反射応答の変化が見られる点で、四肢筋よりもさらに効率よく、関節位置を元に戻すために有利な神経系の調節が起こり、頸筋運動ニューロンに投射している。また機械的外乱によって最初に現れる頸筋の反射応答が前庭頸反射由来であるというこれまでの仮説を踏まえると、前庭器官からの影響を強く受ける頸筋において、頭部姿勢の保持という課題に対しその貢献度が高かったと推測される。

したがって、本章の実験から、頸筋の反射経路には、前庭頸反射と伸張反射両方の興奮性を運動課題に応じて合目的的に変調させる機序が存在することが示唆された。

第5節 外乱に抵抗する運動課題における予測の可否が頸筋反射応答に与える影響

第1項 緒言

本論文のこれまでの結果を整理すると、運動準備状態によって外乱後の頭部姿勢を素早く変化させるためのSCMの活動の変化が前庭・伸張両反経路で起こり(第4章,第4節),外乱に抵抗しない場合,予測可能な状況では円滑に運動が行えるように伸張反射経路の抑制によってSCM応答が減衰していた(第4章,第1節).このことから,外乱に対して頭部の姿勢保持を課せられた場合には,外乱が予測できることによって,頸筋の応答がさらに増大するような反射応答の調節が行われ,さらに素早く頭部の位置を元に戻すことができる(図4-5-1).

そこで実験5では被験者に前額部への機械的外乱を与えた際に,頭部姿勢を意識的に保持するような運動課題を与え,外乱の予測可否によって頸筋の活動が増大するか否かについて明らかにすることを目的とした.

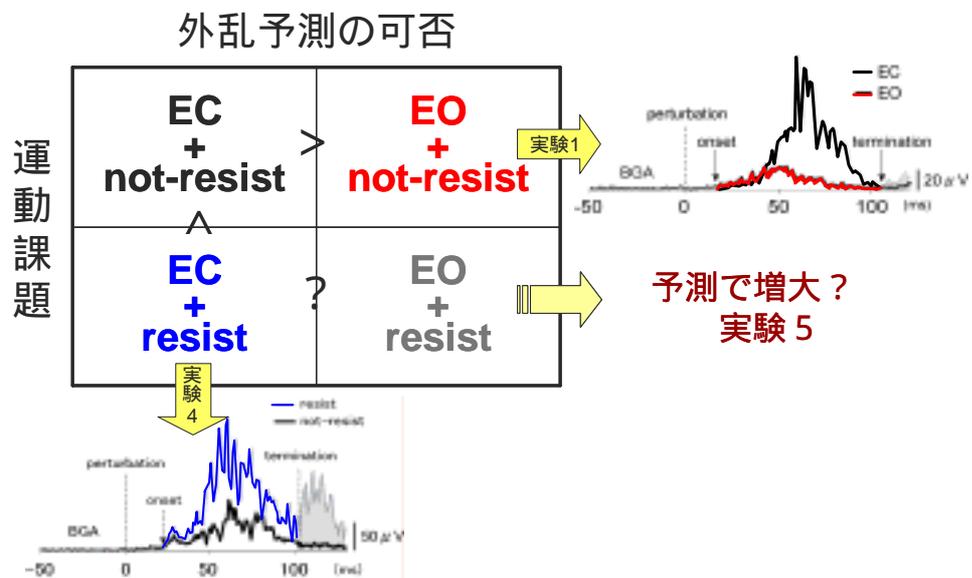


図 4-5-1 実験1・4のまとめと実験5の位置づけ
(EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

第2項 方法

被験者

被験者は過去に神経学的疾患歴および頸椎に既往歴のない健康な男性健常男性 8 名 (21.1 ± 2.0 歳, 173.0 ± 6.5 cm, 78.5 ± 15.8 kg) とした。被験者に対しては実験前に研究の目的と方法を十分説明し, 被験者として実験に協力する旨の同意を得た。被検筋は両側の胸鎖乳突筋 (SCM: m. sternocleidomastoid), 僧帽筋 (TRP: m. trapezius) であった。

実験装置および実験手順

実験装置および, 実験手順は実験 1 と同様とした。

課題条件

被験者には前額部に衝突する外乱に対して頭部姿勢を意識的に保持するよう指示した。前額部への機械的な頭部伸展外乱の入力の予測の可否は実験 1 と同様に視覚の有無によって規定した。予測可能条件を開眼 (EO), 予測不可能条件を閉眼 (EC) とし, 10 試行ずつ実施した。試行順は被験者によって変更し, 5 ~ 10 秒間隔でランダムに外乱を与えた。被験者は実験前に設定より軽い負荷, および実験時に用いる負荷にて数回の練習をした後, 本実験に臨んだ。

データ記録

トリガー信号の記録, 頭部加速度の記録, 筋活動電位 (EMG) の記録についても実験 1 と同様とした (図 4-5-2)。

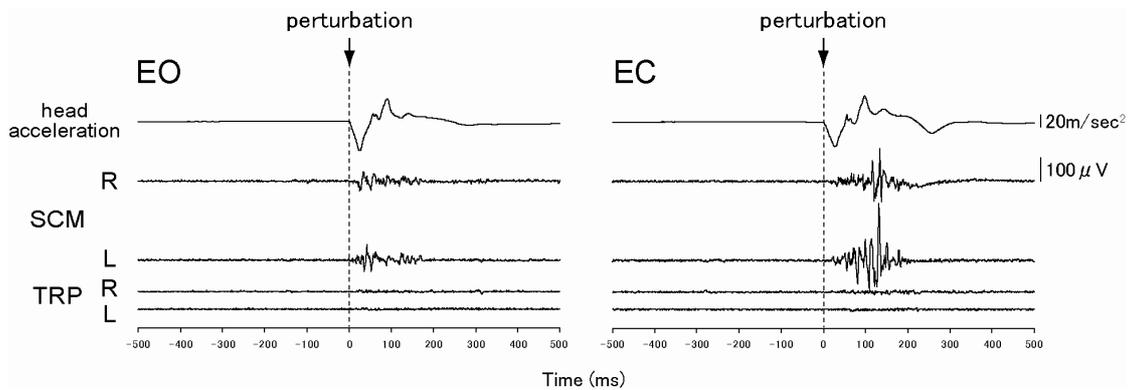


図 4-5-2 前額部に機械的外乱を与えた際の頭部加速度および頸筋の筋活動
 左が予測可能 (EO) 条件, 右が予測不可能 (EC) 条件. 矢印は外乱の入力時刻を表す.
 (SCM : 胸鎖乳突筋, TRP : 僧帽筋, R : 右, L : 左)

信号処理

デジタル信号化された EMG 信号は直流成分除去後に全波整流した (図 4-5-3). BGA は全波整流された筋電図信号から, 外乱の開始 50 ms 前の平均筋活動量を算出したものとした. トリガー信号をもとに外乱入力時点からの時刻を合わせ, 課題ごとにそれぞれのデータを加算平均処理した. 得られた加算平均波形からは, SCM の反射応答の開始潜時および終了潜時を目視で読み取ることが困難だったため, 前の実験を参考に 20 ms を開始潜時, 100 ms を終了時刻と定義して, 両条件における同区間の平均筋活動量を反射応答の振幅値として算出した. さらに, 条件間の差を検出するため, 外乱入力後から 5 ms ごとに反射応答を区切って平均化, および 20-40 ms を前半成分, 40-100 ms を後半成分に区切って平均化し, 条件間の差を比較した. TRP には反射性の応答が見られなかったため, 解析は SCM についてのみ行った.

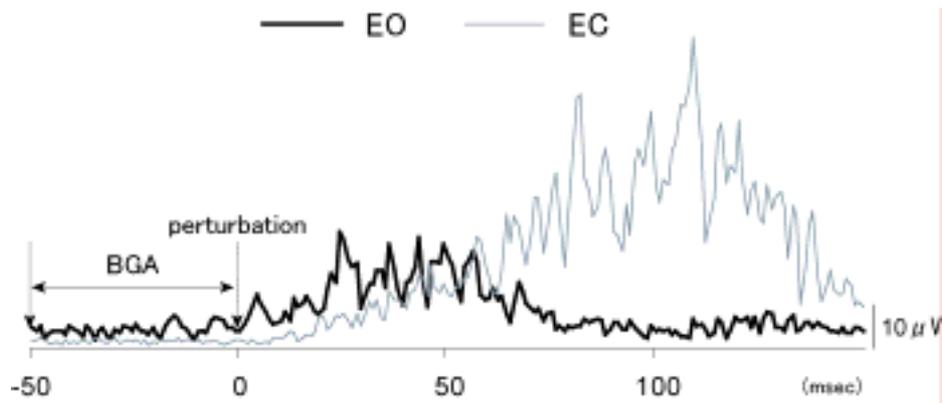


図 4-5-3 胸鎖乳突筋の反射応答の典型例
(EO：予測可能条件, EC：予測不可能条件)

統計処理

予測の可否におけるそれぞれの変数に関する EO 課題と EC 課題の差の検定には、関連二群の t-検定を用いた。有意水準は 5 %とした。

第3項 結果

頭部の最大加速度と、SCMのBGAはEO条件で有意に大きかった(表4-5-1)。一方TRPのBGAは予測の可否で変わらなかった。つまり、入力の大きさと外乱入力時の頸部屈筋の脊髄運動ニューロンの活動レベルは予測可能条件の方が大きかった。

表4-5-1 頸筋の背景筋活動量と頭部最大加速度の平均値
(SCM：胸鎖乳突筋, TRP：僧帽筋, EO：予測可能条件, EC：予測不可能条件, SE：標準誤差)

	BGA of SCM (μV)		BGA of TRP (μV)		Head ACC (m/sec^2)
	Right (SE)	Left (SE)	Right (SE)	Left (SE)	peak (SE)
EO	8.0 (1.8) *	9.1 (1.4) *	1.8 (0.2)	2.0 (0.4)	49.2 (3.6) *
EC	2.1 (0.4)	2.2 (0.3)	1.4 (0.1)	1.8 (0.4)	42.2 (2.2)

*: $p < 0.05$

次に反射応答の条件間の差を検出するため、これまでの実験結果を参照してSCMの反射応答の区間であると考えられる20msから100msまでのSCMの筋活動を平均化した。その結果、EO課題で有意に応答が小さかった(図4-5-4)。

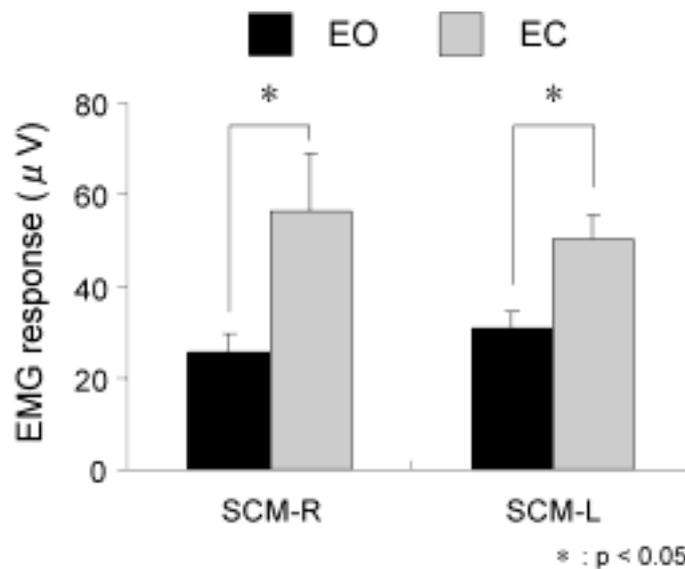


図4-5-4 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による比較
(SCM：胸鎖乳突筋, EO：予測可能条件, EC：予測不可能条件)

さらに、条件間の差を時間ごとに評価するため、外乱入力後 5 ms ごとに反射応答を区切って平均化し、条件間で比較した結果、外乱入力後 20-35 ms の区間では EO 課題で SCM の活動が大きく、その後は、60 ms 以降では応答の大きさが逆転し、EC 課題で大きかった(図 4-5-5)。

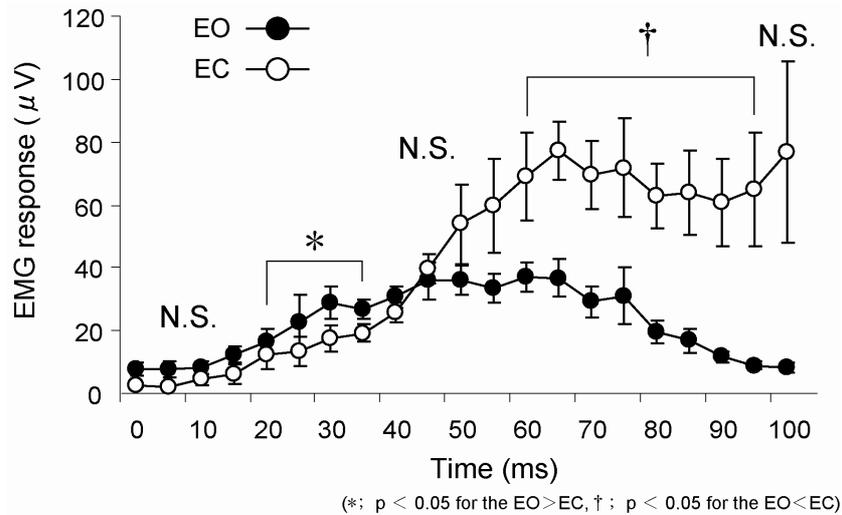


図 4-5-5 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による5 msごとの比較 (EO: 予測可能条件, EC: 予測不可能条件)

さらに、これまでの実験結果を参照し、外乱入力後 20-40 ms、および 40-100 ms で反射応答を区切って平均化して比較したところ、前半成分は左の SCM のみ EC より EO が大きく、後半成分は両側の SCM で EC の方が大きかった(図 4-5-6)。

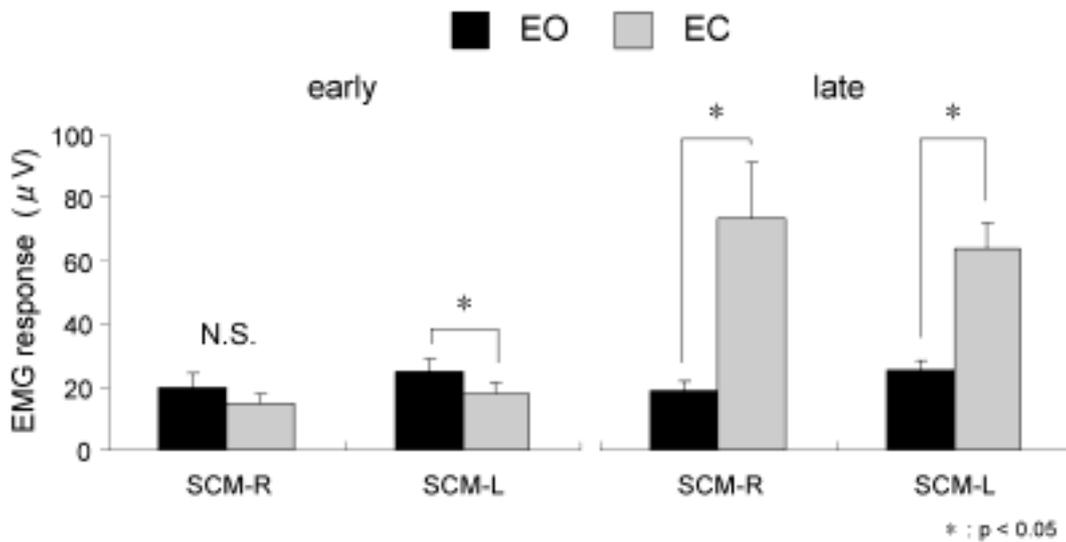


図 4-5-6 胸鎖乳突筋における反射応答の外乱の予測の可否による前半・後半成分ごとの比較 (SCM : 胸鎖乳突筋, R : 右, L : 左, EO : 予測可能条件, EC : 予測不可能条件)

加速度波形の積分値から得られた頭部位置変化の典型例を図 4-5-7 に示した。予測可能条件において、外乱入力前から屈曲方向への頭部位置の変化が起こっていた。また外乱入力後の伸展量は予測可能条件で小さかった。

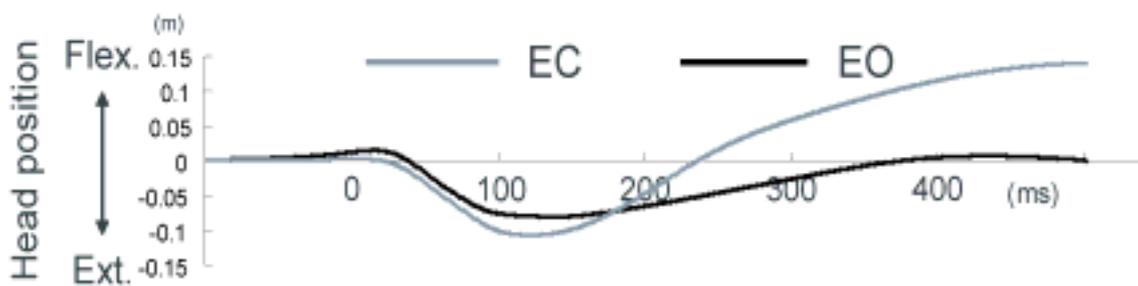


図 4-5-7 頭部位置変化の典型例 (Flex. : 屈曲, Ext. : 伸展, EO : 予測可能条件, EC : 予測不可能条件)

第4項 考察

実験5においては、被験者に前額部への機械的外乱に対する頭部姿勢保持課題を課し、外乱の予測が頸筋活動にどのような影響を与えるかについて検討した。

これまでの実験1・4で整理した運動課題の違いと予測との関係が、機能的な反射応答の変化を引き起こすと考えた場合、本実験において予測可能な条件で外乱後のSCMの応答が減少していたことは矛盾した現象であると言える。また、外乱入力後の応答を時間ごとに比較すると外乱入力直後は予測可能な課題で大きく、その後応答の大小関係が逆転していた。この結果を解釈するに当たって、これまでの実験において条件間で同等であったBGA、および頭部への加速度入力の大きさが予測可能条件において増大していたことが重要な鍵となる。また、Yamamoto and Ohtsuki (1989)の報告では肘関節を伸展させる外乱に抗して屈曲使用とする際、主動筋である上腕二頭筋の背景筋活動は変わらずに応答は予測できる条件時でより増大するとしている。本実験では、被験者にはこれまで同様外乱入力前の安静を指示したものの、被験者の安静状態を保とうとする意志と乖離して、外乱入力直前に筋活動が増大していた。予備的な筋活動が発現されている状況下で感覚器に刺激が入力するとBGAの増大に応じて誘発される反射活動も増大するとされている(Matthews et al. 1986)。しかしながら、本実験で前額部に与えた外乱によって得られたSCMの活動は応答全体として捉えると、よりも小さかった(図4-5-3参照)。

本実験の結果を解釈するために、四肢筋の随意運動からこの現象を鑑みると、外乱に対して抗するような運動を行おうとするとき、主動筋は事前に筋活動を高めて外乱に効率良く力を伝えられるよう調節されることで目的の運動を達成しやすくする(Aminoff and Goodin 2000)。この時外乱によって生じる関節角度の変化はより小さく抑えられ、対象物への力の伝達が効率良く行われている。また台からの着地前の下腿三頭筋の収縮にみられるような筋活動も、足関節の剛性を高めて着地後の姿勢を安定させるための(McDonagh, 2002)予備的プログラムであるとされている。これらの報告による知見は本実験の状況およ

び結果と類似しており，予備的な頸部屈筋活動の増大により，外乱入力時の頭部姿勢はわずかに屈曲位にあった．外乱入力時の SCM の短縮と，その後頭部が大きく伸展することなく保持されたことで SCM の伸張量が物理的に減少し，伸張反射応答の区間の活動著しく減衰するという結果が示されたと考えられる．

つまり，本実験で得られた外乱後の SCM の応答減衰は実験 1・4 で見られた頸筋反射経路の興奮性変化に起因する予測や運動課題の影響ではなく，事前の予備的筋活動による頸部の剛性の違いであると説明される．

頭部姿勢を保持するという随意指令に対して，外乱の予測ができることで，SCM の応答が結果として小さかったことは，伸展方向にかかる外乱に対して，筋活動が頸椎に及ぼす剪断力の減少につながる．つまり，外乱の予測による頸椎外傷の重傷度を軽減させるメカニズムを明らかにするための可能性を示唆する結果であった．しかしながら，これらの調節がどのような経路を通して修飾されているかについては，今後の研究テーマとして，明らかにする必要がある．

第5章 総括論議

本論文においては、これまで十分に明らかにされてこなかったヒト前額部に機械的外乱を与えた際の頸筋の制御機構について、外乱の予測との関係、および運動課題との関係から、頸筋外傷の重傷度に寄与する神経生理学的メカニズムを明らかにすることを目的として実験を行った。本章ではまず第 1 節で頭部への外乱による頸筋活動の反射起源と潜時との関連について本論文の実験 1・2・3 で得られた知見をもとに整理したうえで、第 2 節で頭部への外乱の予測の可否が頸筋反射応答に及ぼす変化について主に実験 1・4・5 の結果をもとに総合的に議論する。

第1節 頭部への外乱による頸筋活動の反射起源と潜時との関係

Ito et al.(1995)は頭部への機械的外乱によって健常被験者において最初に現れる SCM の活動が前庭機能不全患者で現れなかったことから、その区間を前庭器官由来の前庭頸反射とし、その後患者において最初に現れた応答を筋由来の応答であるとした。

本論文では、ヒト前額部への機械的外乱によって現れる応答の予測可否による変化を捉えるにあたってこの報告をもとに時間ごとの変化を追ってその差を検証した。

まず実験 1 において、被験者に前額部への機械的外乱に抵抗しない課題を課し、予測の可否による頸筋活動の違いを検討したところ、外乱入力直後の前半成分では SCM の応答の大小関係に変化がなかったものの 45 ms 以降で予測によって減衰した。この時刻は先行研究における前庭頸反射と伸張反射を分離する時刻に相当することから応答の差異が経路の違いを反映していると推定した。しかしながら、この実験からだけでは神経学的根拠に乏しいことから、実験 2 では直接経路を推定する手法を考案した。

実験 2 では実験 1 において、予測できなかった課題で大きかった後半成分の応答が筋由来の伸張反射応答であることを確認するために、頭部と体幹部を物理的に固定した場合と固定しなかった場合の両条件で実験 1 と同様の機械的外乱を前額部に与え、反射応答が変化するか否かを検討した。その結果、頭部を物理的に固定することで SCM の 40 ms 以降の反射応答は固定しなかった条件に対して減衰した。顎を固定することにより、少なくとも

SCM への伸張刺激は起こっていないことから、応答の減衰は伸張刺激の制限に起因する変化でると考えられる。実際には頭頂部の移動がわずかに記録されたが、これは頭部と体幹全体が外乱の衝撃で移動したことによるものであると思われる。そして、頭頂部の加速度は固定しない場合の 7 割程度の入力があったこと、さらに頭部を固定しなかった場合に誘発される外乱後 20-40 ms 区間の応答は頭部を固定しても変化がなかったことから、反射応答の前半部分は前庭器官由来の応答であると考えた。しかしながら、実際には加速度入力についてもその大きさや方向が両条件で同等ではなかった。この問題に対しては、外乱入力時に頭部と体幹が一体となって自由に移動するような装置を用い、頭部を固定しなかった場合と同等の加速度入力に加わるような方法を用いることで解決することが考えられる。しかしながら、本論文ではそれを検証するまでに至らなかったため、今後の検討課題としてさらに実験を進めたい。

そして、実験 1・2 において伸張反射とされる SCM の応答が 40-45 ms であったこと、また、これまで先行研究で述べられてきた SCM の伸張反射応答とされる潜時もが 40-60 ms であることは、脊髄の距離から考えて単シナプス性の伸張反射としては明らかに潜時が遅いことに疑問を持った。そこで実験 3 では実際に SCM の腱にタップ刺激を加え、単シナプス性の伸張反射応答の誘発を試み、その潜時を確認した。その結果、1 回のタッピング刺激からは明確な応答が得られなかったものの、30 試行分の波形を加算平均処理することで、10-14 ms に比較的小さなピークをもつ応答を確認した。Alexander and Harrison (2002) が頸部の拮抗筋である TRP で誘発した単シナプス反射の潜時も 12ms であったことからその潜時には大きく相違がなく、この結果が SCM の単シナプス反射であることは明らかである。

しかしながら、Ito et al. (1995) の実験においては、健常被験者、および前庭機能不全患者ともにこのような早い潜時での反射応答はみられなかった。本論文からこの理由を直接検証することはできないが、頸筋においてはネコにおける解剖学的研究をもとに、核袋線維に結合する a 群神経線維が欠落し、相対的に 群線維の支配領域の割合が高くなってい

るという事実が報告されており (Bakker and Richmond 1982), 速い筋の伸張に対するスパイク発射頻度が少ないことによる単シナプス反射の消失が考えられる .

いずれの結果においても本研究で前額部への機械的外乱によって誘発され伸張反射応答と評価した応答,あるいは先行研究でSCMの伸張反射と定義されている反射応答の多くは, タップ刺激によって得られた単シナプス性の伸張反射応答の潜時から時間的に遅延し,乖離しているため,多シナプス性の伸張反射応答であるとみなすことが妥当であろう .

すなわち,これらの結果をまとめると,前額部への機械的外乱によって得られる反射応答は,頸筋の単シナプス反射が表出しないことにより,前庭器官由来の前庭頸反射が最初に現れ,その後約40-45 msを境に頸筋の多シナプス性の伸張反射応答が現れると示唆された .

第2節 前額部への機械的外乱に対する頸筋反射応答と予測との関係

本論文では被験者の前額部に与える機械的外乱の予測の可否，さらに，外乱に対する運動課題の違いによって頸筋に現れる反射応答の変化を捉えた．本章ではそれらをまとめ，機能的な意義を考察する．

まず，実験 1 において前額部への機械的外乱に抵抗しない運動課題では，SCM に現れた筋活動は外乱を予測することによって減衰した．先行研究においては Kumer et al. (2002)，Blouin et al. (2003) らが，慣性による急激な頭部伸展外乱に対する予測が屈筋の反射活動を減少させるという同様の結果を報告している．

彼らはその結果に対して，頭部伸展の運動を妨げないような反射の減衰が，頸椎への圧力や剪断力を減少させることにつながるため，予測による頸部外傷の軽減のメカニズムにつながることを結論づけている．本論文の実験 1 における外乱に抵抗しない運動課題遂行時と反射応答の関係はこの結果と矛盾しないことから同様のメカニズムによって頸部外傷と予測との関係が説明される．本来は頸筋伸張反射および前庭頸反射の役割として頸部伸展を強制する外乱に対し，頸部屈筋群を収縮させることで頭部の位置変化を小さくするような防御機構が重要な役割である．しかしながら，実験的に外乱に抵抗しないような課題を与えられた場合においては，頸部屈筋群の大きな活動は頸部伸展動作の妨げと捉えることもできる．外乱の予測ができることで，防御機構である反射的な筋の活動も目的に見合った変化を遂げ，より運動をスムーズに達成することを可能にしていることが本研究の結果から明らかになった．

また，時間を追ってその大小関係を比較することで，頸筋における多シナプスの伸張反射応答の興奮性その変化に起因しているという知見が得られた．これは四肢筋の長潜時反射応答においても機械的外乱を外乱方向に補助する際，伸張される側の筋の反射応答の利得が減衰することから (Yamamoto and Ohtsuki 1989)，同様の現象であると捉えることができる．これまで四肢筋に比べて複雑な制御を受けるとされていた頸筋が，四肢筋と同じ

ような制御機序によって反射利得を調節し、外乱に対して運動目的に見合うような修正機能を持つことは重要な知見である。

さらに、実験 4 において前額部への機械的外乱が予測できない状況において、外乱に対して頭部姿勢を保持する、あるいはしないという課題を被験者に予め課すと、反射応答の開始直後、つまり前庭頸反射および伸張反射両方の区間で頭部姿勢を保持する課題において SCM の活動が増大した。両反射経路の興奮性が反射応答の増大をもたらす変化を遂げたことは、頸部の素早い立ち直りに有利に働く。したがって、頸筋反射経路には外乱の予測ができない場合においても前庭反射と伸張反射両方の興奮性を運動準備状態に応じて合目的に変調させる機序が存在することが明らかにされた。この結果は特に四肢筋との比較において、四肢筋では機械的外乱によって最初に誘発される短潜時の伸張反射応答が運動課題の違いによって変わらないことから、頸筋における制御機構が特に頭部の保持課題において発揮されたものと考えられる。そして前半の区間は前庭頸反射経路の興奮性をより反映していると考えられ、入力する感覚器の特性の違いが、四肢筋の短潜時伸張反射に相当する時刻で異なる傾向を示したと考えられる (Yamamoto and Ohtsuki 1989, Aminoff and Goodin 2000)。

これらの二つの実験結果を踏まえると、外乱に抵抗する課題でそのタイミングが予測できると、運動の目的をより効率良く達成するために、頸筋に誘発される反射応答はさらに増大するものと推測された。しかしながら実験 5 において外乱後の SCM の活動は全体として予測できる条件で小さかった。これは Yamamoto and Ohtsuki (1989) らが上腕の筋で示している、機能的な長潜時伸張反射の利得変化の結果とは逆の現象であった。しかしながら、この一見矛盾した結果を解釈するにあたって、被験者には安静を指示していたにも関わらず外乱入力前に SCM の活動が増大していたことを踏まえる必要がある。これはジャンプ着地前の下腿三頭筋の収縮にみられるような (McDonagh, 2002) 予備的にプログラムされたものであると捉えることができる。本研究では事前の練習によって外乱が加わるという情報、さらにその大きさについて予め被験者が知っていることから、そのタイミングが予

測出来る際の運動は、ある程度決められたプログラムによって遂行されることが十分考えられる。このような SCM の予備的な活動増大は外乱入力時の頸部の屈曲を促し、外乱入力時の SCM の長さを短縮させると同時に、外乱による頸椎の位置変化に対する抵抗力、すなわち頸椎の stiffness を増大させていると推測される。その結果、外乱による頭部の伸展量、つまり筋紡錘に加わる刺激量が制限され、結果として筋への伸張刺激によって誘発される反射応答が減衰したものと考えられる。つまり、この現象は反射経路の興奮性の利得変化のみでは説明されず、実験 1, 4 で見られた反射応答の変化を裏付ける機序とは異なる。

頸筋のどの反射経路の変化によってこのような事前のプログラムが組み込まれているかについて、本研究の結果から推察することは困難である。これら起源やメカニズムをより詳細に知るための手段として、事象関連電位など外乱入力前の脳の活動を評価すること、さらに各反射経路の興奮性を評価することが有効であり、今後の研究課題としたい。

最後に、本研究では一貫して視覚入力の有無を外乱予測の可否条件として用いた。視覚と頭位変化はともに前庭器官による制御を強く受けることから、密接な関係があることは既に知られており (Ivanenko et al. 1999)、前庭動眼反射など両者が関連する精緻な制御機構が本論文の結果に少なからず影響を及ぼしている可能性は否めない。しかしながら、本論文では前額部への機械的外乱に対する予測の可否情報として、視覚がそれを的確に捉えられる要因であると考え、利用した。特にスポーツの場面における視覚情報からの入力は大きな役割を果たし、外傷発生の場면을想定するためにも欠かせない要素であることから、それらを包括的に捉えることによって臨床場面への応用につながれると考えた。今後、視覚以外の情報、たとえば音刺激、あるいは自らが外乱入力の開始信号を発するなどの方法によって外乱の予測を設定した時、その際の頸筋の応答の仕方を検証することで「視覚による予測」が頸筋に及ぼす影響を明らかにする可能性は十分に考えられる。このことは本論文における「視覚」という予測の可否課題に特化した特徴の解明につながる可能性から、非常に興味深いテーマであると考え、今後の研究課題として挙げられる。

第6章 結 論

本論文は、スポーツ活動における頭部へのコンタクトによって起こる頸椎の損傷を予防するための資料を得るために、神経生理学的手法を用いて「ヒト前額部への機械的外乱に対する頸筋応答における神経筋制御機序」について定量的・体系的にまとめた。

そして、5つの実験結果より、1) 頭部への外乱に対する頸筋活動は姿勢保持として運動課題を達成しやすくするための修正機能がある、2) 外乱入力情報として前庭器と筋紡錘が関与し、胸鎖乳突筋活動の前半は前庭器由来の、そして後半が筋由来の多シナプス性の反射活動である、3) 外乱の予測で頸筋活動を減衰させる機能が存在することが頸椎損傷の機序につながる現象である、ことが明らかにされた。今後、本研究で示された結果は、主にスポーツ場面における頸椎の損傷のメカニズムとその予防に大きく貢献し、また、頭部姿勢の制御が関与する多くの運動場面においても貴重な資料になると考えられる。

謝 辞

本論文は早稲田大学大学院人間科学研究科鈴木秀次教授，鳥居俊助教授ならびに国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所運動機能研究部中澤公孝室長の指導の基に行われたものであり，稿を終えるにあたり適時助言，指導して下さった諸先生に深く感謝の意を表す．さらに，早稲田大学大学院人間科学研究科教授福林徹教授，彼末一之教授にはご多忙の中，審査員として親身なご指導，ご指摘を賜り心より感謝の意を表す．

また，国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所運動機能系障害研究部赤居正美部長をはじめとする，同研究部に在籍する研究員の皆様ならびに芝浦工業大学大学院の皆様，NTT コミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部の木村聡貴氏には研究全般に渡って，貴重なご意見やご指導を賜り，また被験者を快諾して頂くなど多大なるご協力を頂いたことに心より感謝する．そして，研究活動を進めるにあたり，励まし支えて頂いた早稲田大学運動器スポーツ医学研究室の皆様に感謝の意を表す．

最後に，これまで長きに渡った学生生活を常に支えて下さった父勝久と母泰子に，この場を借りて心より感謝する．

引用文献

Abrahams VC and Richmond FJ (1988) Specialization of sensorimotor organization in the neck muscle system. *Prog Brain Res* 76: 125-135.

Albright JP, McAuley E, Martin RK, Crowley ET and Foster DT (1985) Head and neck injuries in college football: an eight-year analysis. *Am J Sports Med* 13: 147-152.

Alexander CM and Harrison PJ (2002) The bilateral reflex control of the trapezius muscle in humans. *Exp Brain Res* 142: 418-424.

Allum JH and Honegger F (1998) Interactions between vestibular and proprioceptive inputs triggering and modulating human balance-correcting responses differ across muscles. *Exp Brain Res* 121: 478-494.

Aminoff MJ and Goodin DS (2000) Studies of the human stretch reflex. *Muscle & nerve* Supplement 9: S3-S6.

Amonoo-Kuofi HS (1982) The number and distribution of muscle spindles in human intrinsic postvertebral muscles. *J Anat* 135: 585-599.

Aoki M, Matsunami Ki, y.Han X, Yamada H, Muto T and Ito Y (2001) Neck muscle responses to abrupt vertical acceleration in the seated human. *Exp Brain Res* 140: 20-24.

青木陽介, 鳥居俊, 倉持梨恵子, 内藤健二, 渡邊裕之, 鳥居直美 (2003) 頸部筋力による頭・頸部外傷の発生防止機構に関する実験的研究. *臨床スポーツ医学* 20: 85-89.

Bakker DA and Richmond FJ (1982) Muscle spindle complexes in muscles around upper cervical vertebrae in the cat. *J Neurophysiol* 48: 62-74.

Bent LR, McFadyen BJ and Inglis JT (2002) Visual-vestibular interactions in postural control during the execution of a dynamic task. *Exp Brain Res* 146: 490-500.

Blouin JS, Descarreaux M, Belanger-Gravel A, Simoneau M and Teasdale N (2003) Self-initiating a seated perturbation modifies the neck postural responses in humans. *Neurosci Lett* 347: 1-4.

Bonnet M (1983) Anticipatory changes of long-latency stretch reflex responses during preparation for directional hand movements. *Brain Res* 280: 51-62.

Brown P, Rothwell JC, Thompson PD, Britton TC, Day BL and Marsden CD (1991) New observation on the normal auditory startle reflex in man. *Brain* 114: 1891-1902.

Corna S, Grasso M, Nardone A and Schieppati M (1995) Selective depression of medium-latency leg and foot muscle responses to stretch by an alpha 2-agonist in humans. *J Physiol* 484: 803-809.

Corna S, Ito Y, Brevern Mv, Bronstein AM and Gresty MA (1996) Reflex 'unloading' and 'defensive capitulation' responses in human neck muscle. *J Physiol* 496: 589-596.

Evarts EV (1973) Motor cortex reflexes associated with learned movement. *Science* 179: 501-503.

Fox JC and Williams JF (1976) Mathematical model for investigating combined seatback-head restraint performance during rear-end impact. *Med Biol Eng* 14: 263-273.

福田精 (1957) 運動と平衡の反射生理. 医学書院 東京: 209-210.

平井直樹 (1986) 前庭脊髄反射系. めまい その基礎と臨床 医薬ジャーナル社 大阪: 51-81 .

Horak FB, Shupert CL, Dietz V and Horstmann G (1994) Vestibular and somatosensory contributions to responses to head and body displacements in stance. *Exp Brain Res* 100: 93-106.

Horak FB, Earhart GM and Dietz V (2001) Postural responses to combinations of head and body displacements: vestibular-somatosensory interactions. *Exp Brain Res* 141: 410-414.

Ikegami H, Sasaki M and Uchino Y (1994) Connections between utricular nerve and neck flexor motoneurons of decerebrate cats. *Exp Brain Res* 98: 373-8.

Ito Y, Corona S, Brevern Mv, Bronstein A, Rothwell J and Gresty M (1995) Neck muscle responses to abrupt free fall of the head: comparison of normal with labyrinthine-defective human subjects. *J Physiol* 489: 911-916.

Ivanenko YP, Grasso R and Lacquaniti F (1999) Effect of gaze on postural responses to neck proprioceptive and vestibular stimulation in humans. *J physiol* 519: 301-314.

Kimura T, Nozaki D, Nakazawa K, Akai M, Ohtsuki T (2003) Gradual increment/decrement of isometric force modulates soleus stretch reflex response in humans. *Neurosci Lett* 347: 25-28.

Kumar S, Narayan Y and Amell T (2000) Role of awareness in head-neck acceleration in low velocity rear-end impacts. *Accident Analysis and Prevention* 32: 233-241.

Kumar S, Narayan Y and Amell T (2002) An Electromyographic Study of Low-Velocity Rear-End Impacts. *Spine* 27: 1044-1055.

倉持梨恵子, 鈴木秀次, 鳥居俊, 渡邊裕之(2000) 大学生アメリカンフットボール選手の頸部外傷とその発生要因. *ヒューマンサイエンスリサーチ* 9: 285-297.

McDonagh MJ and Duncan A (2002) Interaction of pre-programmed control and natural stretch reflexes in human landing movements. *J Physiol* 544: 985-994.

Matthews PB (1986) Observations on the automatic compensation of reflex gain on varying the pre-existing level of motor discharge in man. *J Physiol* 374: 73-90.

Matthews PB, Farmer SF and Ingram DA (1990) On the localization of the stretch reflex of intrinsic hand muscles in a patient with mirror movements. *J Physiol* 428: 561-577.

Mazzini L and Schieppati M (1994) Short-latency neck muscle responses to vertical body tilt in normal subjects and in patients with spasmodic torticollis. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 93: 265-275.

Morris CE and Popper SE (1999) Gender and effect of impact acceleration on neck motion. *Aviat Space Environ Med* 70: 851-856.

Nakazawa K, Yamamoto SI and Yano H (1997) Short- and long-latency reflex responses during different motor tasks in elbow flexor muscles. *Exp Brain Res* 116: 20-28.

Nyberg-Hansen R and Mascitti TA (1964) Sites and Mode of Termination of Fibers of the Vestibulospinal Tract in the Cat. An Experimental Study with Silver Impregnation Methods. *J Comp Neurol* 122: 369-383.

Pearson K and Gordon J (2001) *Principles of Neural Science* Fourth Edition. (Ed Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM) 716.

Popov KE, Lekhel H, Faldon M, Bronstein AM and Gresty MA. (1999) Visual and oculomotor responses induced by neck vibration in normal subjects and labyrinthine-defective patients. *Exp Brain Res* 128: 343-352.

Reid SE, Raviv G and Reid SE (1981) Jr. Neck muscle resistance to head impact. *Aviat Space Environ Med* 52: 78-84.

Richmond FJ and Abrahams VC (1979) Physiological properties of muscle spindles in dorsal neck muscles of the cat. *J Neurophysiol* 42: 604-617.

Richmond FJ and Bakker DA (1982) Anatomical organization and sensory receptor content of soft tissues surrounding upper cervical vertebrae in the cat. *J Neurophysiol* 48: 49-61.

Schieppati M, Nardone A, Siliotto R and Grasso M (1995) Early and late stretch responses of human foot muscles induced by perturbation of stance. *Exp Brain Res* 105: 411-422.

Siegmund GP, brault JR and Wheeler JB (2000) The relationship between clinical and kinematic responses from human subject testing in rear-end automobil collisions. *Accident analysis and prevention* 32: 207-217.

Siegmund GP and Heinrichs BE (1999) The influence of head restraint and occupant factors on peak head/neck kinematics in low-speed rear-end collisions. *Accident Analysis and Prevention* 31: 393-407.

Siegmund GP, Inglis JT and Sanderson DJ (2001) Startle response of human neck muscles sculpted by readiness to perform ballistic head movements. *J Physiol* 535: 289-300.

Siegmund GP, Sanderson DJ and Inglis JT (2002) The effects of perturbation acceleration and advance warning on the neck postural responses of seated subjects. *Exp Brain Res* 144: 314-321.

Siegmund GP, Sanderson DJ, Myers BS and Timothy Inglis J (2003) Rapid neck muscle adaptation alters the head kinematics of aware and unaware subjects undergoing multiple whiplash-like perturbations. *J Biomech* 36: 473-482.

- Simoneau M, Tinker W, Hain C and Lee A (2003) Effects of predictive mechanisms on head stability during forward trunk perturbation. *Exp Brain Res* 148: 338-349.
- Sturzenegger M, DiStefano G, Radanov BP and Schnidrig A (1994) Presenting symptoms and signs after whiplash injury: the influence of accident mechanisms. *Neurology* 44: 688-693.
- Sugita A, Bai R, Imagawa M, Sato H, Sasaki M, Kitajima N, Koizuka I and Uchino Y (2004) Properties of horizontal semicircular canal nerve-activated vestibulospinal neurons in cats. *Exp Brain Res* 156: 478-486.
- Sullivan SJ and Hayes KC (1987) Changes in short and long latency stretch reflexes prior to movement initiation. *Brain Res* 412: 139-143.
- Suzuki JI and Cohen B (1964) Head, Eye, Body and Limb Movements from Semicircular Canal Nerves. *Exp Neurol* 10: 393-405.
- Tanji J and Evarts EV (1976) Anticipatory activity of motor cortex neurons in relation to direction of an intended movement. *J Neurophysiol* 39: 1062-1068.
- Tencer AF, Mirza S and Benseal K (2001) The response of human volunteers to rear-end impacts: the effect of head restraint properties. *Spine* 26: 2432-2440.
- Torg JS, Vegso JJ, O'Neill MJ and Sennett B (1990) The epidemiologic, pathologic, biomechanical, and cinematographic analysis of football-induced cervical spine trauma. *Am J Sports Med* 18: 50-57.
- Torg JS, Sennett B, Pavlov H, Leventhal MR and Glasgow SG (1993) Spear tackler's spine. An entity precluding participation in tackle football and collision activities that expose the cervical spine to axial energy inputs. *Am J Sports Med* 21: 640-649.

Uchino Y, Hirai N and Suzuki S (1982) Branching pattern and properties of vertical- and horizontal-related excitatory vestibuloocular neurons in the cat. *J Neurophysiol* 48: 891-903.

Valls-Solé J, Solé A, Valldeoriola F, Muñoz E, Gonzalez LE and Tolosa ES(1995) Reaction time and acoustic startle in normal human subjects. *Neurosci Lett* 195: 97-100.

Wilson VJ and Maeda M (1989) Connections between semicircular canals and neck motorneurons in the cat. *J Neurophysiol* 37: 346-357.

Wilson VJ, Boyle R, Fukushima K, Rose PK, Shinoda Y, Sugiuchi Y and Uchino Y (1995): The vestibulocollic reflex. *J Vestib Res* 5: 147-170.

Yamamoto C and Ohtsuki T (1989) Modulation of stretch reflex by anticipation of the stimulus through visual information. *Exp Brain Res* 77: 12-22.

Yeomans JS, Li L, Scott BW and Frankland PW (2002) Tactile, acoustic and vestibular systems sum to elicit the startle reflex. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 26: 1-11.

業績リスト

本論文の内容の一部は以下の雑誌に掲載されている。

1. 倉持梨恵子, 鈴木秀次, 鳥居俊, 渡邊裕之 (2000) 大学生アメリカンフットボール選手の頸部外傷とその発生要因. *ヒューマンサイエンスリサーチ* 9: 285-297.
2. 青木陽介, 鳥居俊, 倉持梨恵子, 内藤健二, 渡邊裕之, 鳥居直美 (2003) 頸部筋力による頭・頸部外傷の発生防止機構に関する実験的研究. *臨床スポーツ医学* 20: 85-89.
3. Kuramochi R, Kimura T, Nakazawa K, Akai M, Torii S, Suzuki S (2004) Anticipatory modulation of neck muscle reflex responses induced by mechanical perturbations of the human forehead. *Neuroscience Letters* 366: 206-210.

本論文の内容の一部は, 以下の学会において発表されている。

1. Kuramochi R, Kimura T, Nakazawa K, Akai M, Torii S, Suzuki S (2003) Effects of anticipation on the neck muscle reflex responses induced by forehead impact. *Neuroscience Research, Abstracts of the 26th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society*, 46, Supplement 1, S100. The 26th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (June 23-25, Nagoya, 2003).
2. 倉持梨恵子, 木村聡貴, 中澤公孝, 赤居正美, 鳥居俊, 鈴木秀次 (2003) 前額部への機械的外乱に対する運動の準備状態が頸部筋の反射応答に及ぼす影響. 第18回生体・生理工学シンポジウム論文集, 113-114. 第18回生体・生理工学シンポジウム (2004年10月6-8日, 新潟).