

脳・神経系の可塑性と身体能力に関する研究
パラリンピックアスリートのシューティング解析から

The Study of Plasticity of Neuro-muscular System
and Human Performance in Paralympic Athletes
during Archery Shooting

西菌 秀嗣

脳・神経系の可塑性と身体能力に関する研究 パラリンピックアスリートのシューティング解析から

The Study of Plasticity of Neuro-muscular System and Human Performance in Paralympic Athletes during Archery Shooting

西菌 秀嗣

要約

生まれながら上肢のない34歳アーチャー (Matt Stutzman) のシューティング (コンパウンド競技) を筋電図、弓と矢の動きについてモーションキャプチャー技術、高速度ビデオシステムにより解析し、健常者 (S選手) と比較検討した。

下肢筋群と体幹筋を使う Matt は他と比較できない独自のシューティング技術をもつ。Matt は下肢筋 (下腿囲、大腿囲: 内転筋が肥大) が発達し、大腿周径位は S選手と比較し16cm 大きく、最大筋力での余裕力を有し、強いポンドの弓を引ける有利性がある。Matt のリリース時のボウの安定性 (左右、上下方向) は、健常者の日本のトップ選手より優れていた。体幹筋 (腹筋、背筋) との張力平衡 (テンションループ) を安定してリリースする合理的なメカニズムをトレーニングで獲得できたと考えられる。

両手が使えないというハンディキャップを克服し、約15年の集中的トレーニングにより、健常者を上回る驚異の身体能力、脳・神経系のメ

カニズムを獲得した。この神経・筋系の可塑性、トレーナビリティ (トレーニングの可能性) を高める個人のレベルでの取り組みに加えて、社会をあげて環境づくりを構築する必要がある。

緒言

身体能力向上のための脳・神経筋機能に関する研究領域は広く、脳科学、医療福祉、スポーツ科学、情報科学、ロボティクス等、連携した研究が進んでいる。近年、神経科学にもとづくリハビリテーションは Neuro Rehabilitation として研究と臨床を結ぶ研究が支配的になっている。例えば特定の神経筋疾患である ALS (筋萎縮性側索硬化症) 患者を対象にしたサイボーグ型ロボット (HAL) が病院で採用され、その使用は医師・理学療法士等の管理のもとに実施されている。

我々は虚弱高齢者や歩行障害者に対し、機能回復を試み (Nishizono et al. 1991, 1992, 1993)、さらに介護予防、健康寿命伸延のため、立位・

歩行支援ロボットを開発・試作し、支援を行ってきた (Sakaki et al. 2017a, b, 松崎ら 2017)。歩行動作には脳内の神経ネットワークが関わり、相当の可塑性 plasticity を有すると考えられている。歩行の調整 (適応) については反応的機能として感覚系にもとづくフィードバック適応 (feedback adaptation) と、予測的機能に関わるフィードフォワード適応 (feedforward adaptation) が関係している。歩行適応に関する研究は2000年に入り split-belt treadmill の登場により急速に発展し、ストライド長、立脚期時間、ステップ長、両脚支持時間等の重要な評価基準が提案されている。

本研究では脳・神経系の可塑性と身体能力向上の観点からトレーニング効果が現れた例について、パラリンピックアスリートに焦点を当てた。弓を射る動作は静的動作であり脳波や筋電図等の生体情報、地面反力の計測に有利であり、多くの研究がある (Nishizono et al. 1987, 1988, 1995)。そこで、米国生まれの両腕のない34歳アーチャーのシューティングを動作、筋電図、弓と矢の動きから分析し、身体能力、脳・神経系のメカニズムを分析し、困難な条件を克服する身体能力、可塑性、トレーナビリティに関して検討を加えようとした。

方 法

弓を射る動作は全身の緊張性頸反射を背景とする生理学的に安定した静的動作から、弦を離す (リリース) により付加の急速な開放を経て遂行される (西園ら 1984)。本研究では解析はアーチャーの主局面である弓を十分に引き切り (フルドロー) 狙いを定め、弦を離すリリースについて限定的に行い、つがえた矢が的方向に進み、弓の弦を離れるまでの時間までの約10 msec 以内の身体、弓の安定性、筋活動を検証し、関連する脳機能について分析する。

被験者：Matt Stutzman (34歳 男性 2012年 ロンドンパラリンピック コンパウンド個人 銀メダル、2015年 世界選手権 団体戦金メダル 同年 健常者を含めたギネス世界記録更新 (283.47 m の最も遠い距離からの的を射る) 米国人：生まれながら神経疾患により肩関節より上腕骨以下の上肢が欠損) として。さらに坂本貴和選手 (30歳 男性 日本人：健常者 コンパウンド部門 トップアーチャー、以下 S 選手) をコントロールとして協力を得た。

被験者の身体的特徴及び筋力特性

身長、体重、左右の下腿囲、大腿囲、指極について計測する。

試技：50m の射場でコンパウンドボウにより1セット6射を3セット行う。

Matt のシューティング：胸にリリーサを付けたバンドを巻き、リリーサの先のフックに弦に取り掛け、80cm の矢をつがえる。右脚と上体でバランスを取りながら右足の第1趾 (拇趾) と第2趾間に弓を挟み、フルドローし、照準装置によりエイミングし、顎を前に押す動作で弓射する (図1参照)。

計測項目：

弓と矢の挙動分析

コンパウンドボウの4ヶ所に反射マーカを付着し、光学反射式3次元動作分析装置 (VICON 社製 英国 London) により、移動計測 (XYZ 方向) を行った。コンパウンドボウの前面3箇所反射板を貼る。矢には先端と尾部の3箇所反射板を貼り、矢の動きの3次元方向での変位を観察する。

動作分析

同じく3次元動作分析装置により、10台のカメラを配置した。ソフトウェアは Polygon 4、反射マーカは身体各部に34箇所両面テープで固定した。

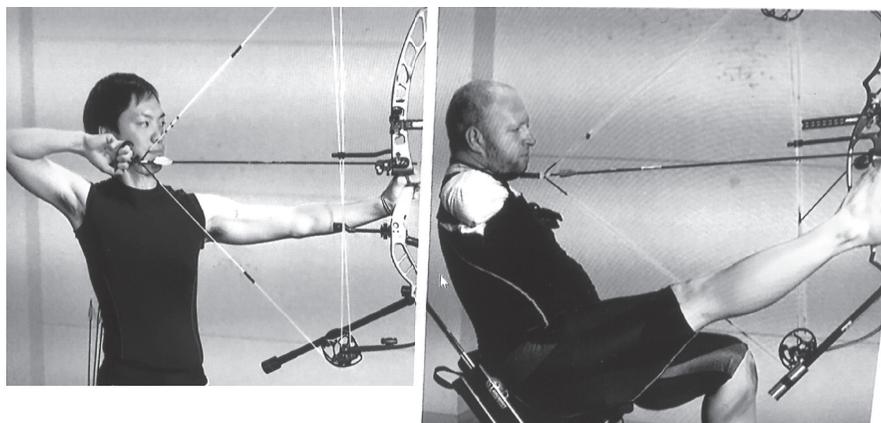


図1 左：S選手（2017年社会人2位）のコンパウンドボウによるフルドロー姿勢 右：Matt Stutzman（2012年ロンドンパラリンピック コンパウンド個人 銀メダル）のフルドロー姿勢 右下肢と体幹について股関節を中心に扇型に開き、肩と胸に巻いたバンドにフックを付け、顎を押し出すことによりリリースする。両者で使う筋は全く異なる。

撮影条件：コマ数、計測カメラの画素数、高速度撮影は毎秒200コマとした。

筋電図測定

筋電計測は加速度内臓型電極（DELSYS Trigno 米国 DELSYS 社）による16ch ワイヤレスシステムを用いた。

EMG 電極位置

Matt 右脚：①第一背側骨間筋 (m. dorsal interossei of foot: DI) ②腓腹筋内側頭 (m. gastrocnemius medialis: MG) ③前脛骨筋 (m. tibialis anterior : TA) ④ハムストリングズ humstrings (H) ⑤大腿四頭筋内側広筋 (QM)

体幹部 右側：⑥僧帽筋 ⑦背筋 (L9,10部分) ⑧僧帽筋（上部）⑨外腹斜筋 ⑩腹直筋 ⑪心電図：HR

坂本選手（健常者）押し手：左側

①上腕三頭筋長頭 ②三角筋 中部 ③僧帽筋横部 ⑩上腕二頭筋短頭

引き手：右側 ④上腕二頭筋短頭 ⑤上腕三頭筋長頭 ⑥三角筋中部 ⑦僧帽筋横部 ⑧総指伸筋 ⑨肩甲挙筋 ⑪心電図：HR

以上の筋について、筋収縮と筋放電の低下(抑制)、筋活動の再現性について分析した。また、各選手のシューティング得点の記録を行った。

結果

身体的特徴及び筋力特性

Matt の記録は 身長：167.6 cm 体重：88.0 Kg BMI: 31.6 大腿囲 L: 65.2cm R: 62.0cm 下腿囲 L: 42.0cm R: 40.7cm であった。

坂本選手は身長 174.0 cm 体重：63.5Kg BMI: 21.0 大腿囲 L: 49.1cm R: 49.2cm 下腿囲 L: 35.1cm R: 35.3cm 指極：177.5cm であり、テンションが57ポンドのボウを使用した。

大腿囲について、Matt の右側は坂本選手より、12.8cm 大きく、左側はさらに3.2cm 大きい。下腿囲についても同様に太く、しかも左側が右側より太い。下腿部の筋肥大が認められ、下腿三頭筋 m. triceps surae 特に腓腹筋 m. gastrocnemius 内側の隆起が著しい。

Matt の左足写真を図2に示す。第2趾は第1趾と同様に太く、長い。また、両指間に6~7 mm 程度の隙間が認められ、手の親指と人差し指のように対向して作用し、ボルトを回し、箆も操作できる。4趾も太い。



図2 Mattの左足上からみた写真 第2趾(手の人指し指に相当)は第1趾(親指)と同程度太く、長い。4趾も太い。両指間に隙間を認め、手の親指と人差し指のように対向して作用する。モーションキャプチャーのための直径4mmの反射マーカを足部の背側に、筋電図用のミニ電極を第2基節骨の内側の第一背側骨間筋上に貼付した。

リリース時の弓の空間的変位

弓(コンパウンドボウ)のブレを示した(図3 横軸の1マス:10ms 縦軸は1mm)。約100ms前からの記録である。的に向かって弓の上下方向のブレが上段、左右方向が下段でリリースまでの変位(mm)である。的に向かって前後方向については両者でほぼ同程度であった。

坂本選手は上下方向のブレが、2mm以内、左右方向が1.5mmであった。Mattは上下方向のブレが、0.5mm以内、左右方向が0.2mmであり、コンパウンドボウのブレが非常に少ないことがわかる。

矢のつがえられた位置からの的方向に移動し、弦から離れるまでの時間(Release time)、両者とも10ms以内と観察され、リカーブの8ms(西菌未発表データ)とほぼ同じであった。

筋電図分析

コンパウンドボウにかかる力の変動は、引き始めから力が上昇し最大に達するまで(ピーク)、最大からプラトーを経て低下し谷(バレー)を経過し、再度上昇する(ウオール)3サイクル(fx曲線)によって大きく変化し、動作中の筋活動を観察する上で重要である。今回

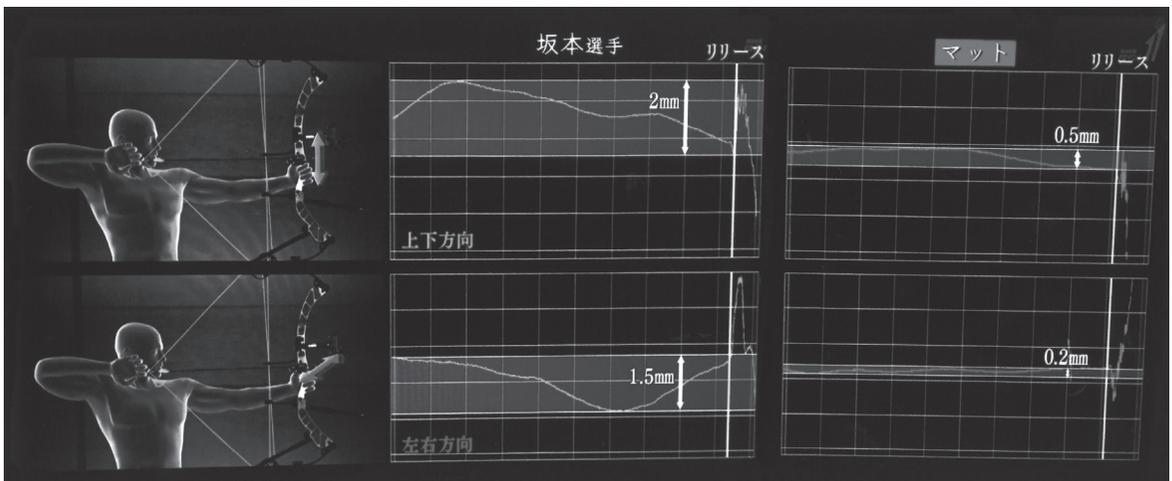


図3 S選手のシューティング時のイラストレーションと弓の上下及び左右方向の変位を示す。Mattは下肢と体幹によるシューティング時の弓の上下及び左右方向の変位を示す。横軸の1マスは100ms、縦軸は1マス1.0mm

の研究では両者に同じボウを使用できなかった。

Matt の筋電図について、下肢筋 ②腓腹筋内側頭 (MG) ③前脛骨筋 (TA) ④ハムストリングズ (H) ⑤大腿四頭筋内側広筋 (QM) に筋活動の顕著な振幅変化はなかった。ただ、⑨外腹斜筋はピーク時に大きな筋活動がみられた。前脛骨筋 (TA) 及び大腿四頭筋内側広筋 (QM) に活動の低下を観察した。図4に TA のリリース0.1秒前から出現した活動低下を示し、下段に比較のため他の被験者の Silent Period の例を図示した。リリース時、背筋の後傾と急激な放電が認め、心電図の R - R 波の間に出現している。

S 選手では、引き始めから力が上昇し最大に達するまで (ピーク)、最大からプラトーを経て低下し谷 (バレー) を経過し、再度上昇する (ウォール) までの3サイクルで筋活動はやや複雑な振幅変化を呈する。

押し手の左側 ②三角筋中部 (DT)、⑦僧帽筋横部で活動の低下を観察した。Matt 同様にリリースは心電図の R - R 波の間に出現した。

考 察 機能解剖学的特長

Matt の大腿周径囲が高い値を示した。右股関節の動きはシューティングのみならず、彼の日常生活全般にとり、機能解剖学的に大きな役割を持つ。内転筋群でも近位部の恥骨筋 *m. pectineus* から、最も強い力を発揮する大内転筋 *m. adductor magnus*、長内転筋 *m. adductor longus*、短内転筋 *m. adductor brevis*、薄筋 *m. gracilis* の全般的な肥大が想定できる。さらに大内転筋は *humstrings* と付着しているため、股関節の伸展にも大きく貢献すると考えられる。

足関節の底屈は後脛骨筋 *m. tibialis posterior* 長腓骨筋 *m. peroneus longus* 短腓骨筋 足底筋 *m. plantaris* が担い、筋張力に応じ協調して作用するが、これらの足関節の底屈筋のいずれか

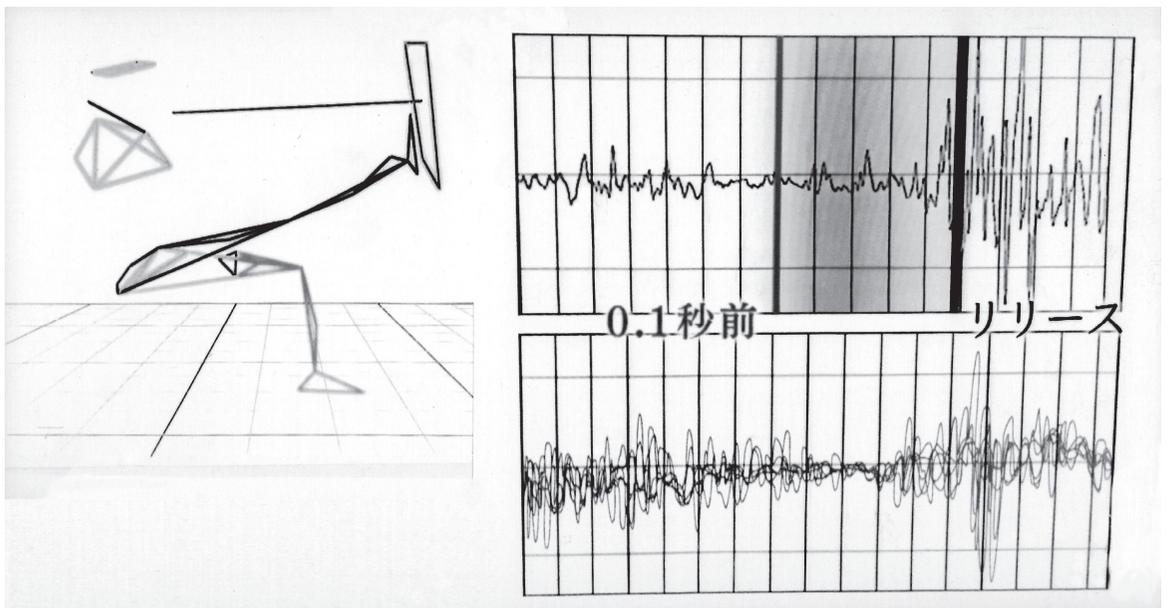


図4 Matt のシューティング時の線画 (左図)、前脛骨筋 (*m. tibialis anterior*) の筋電図 (上段)。横軸の1マスは 20 ms、縦軸は mV (任意単位) 下段は筋活動の抑制現象として健常者の三角筋中部の例を示している。0.1 秒 (100 ms) 前後で筋活動の低下がみられる。

が、前脛骨筋の活動抑制期に興奮し、活動を増やすことが考えられる。

足裏部の最も表層にある内在筋の短趾屈筋 *m. flexor digitorum brevis*、深層に位置する短母趾屈筋 *m. hallucis brevis* 等の活動が高まり、弓を精度高く支えることに貢献しているであろう。

筋電図分析

動作中の筋活動を観察する上で発揮された力との関係で評価することが大切であるが、今回の研究では両者に同じコンパウンドボウで試射することは不可能であった。Larry Wise (2016) によると、コンパウンドボウの特徴として弓の偏心カムによる3段階のドロースイクルが (fx 曲線) 認められている。① 引き始めから力が上昇し最大に達するまで (ピーク) ② 最大からプラトーを経て低下し谷 (バレー) を迎えるまで ③ 再度、上昇する (ウオール) この過程はカムの大きさ (デザイン) 等で異なる。なお、リカーブについて fx 曲線は、ほぼ直線的に増加する。

Matt の前脛骨筋 (TA) のリリース0.1秒前から活動低下を認めた。この現象はさらに例数を増やすことが重要であるが、リリース時の弓の安定のため Matt の身体全体の筋でテンション (約27kg) を維持するための合理的メカニズムが働いたといえよう。この協調は長期的な意識の集中と試行錯誤によるトレーニングによった脳機能の適応能力により獲得されたと考えられる。(西菌, 1980.)

Nishizono et al. (1987) はヒトの上肢・上肢帯の運動として洋弓の弓射動作を選び、長期にわたるトレーニングによる巧緻性の獲得過程について検討し、技術レベルの異なる男子大学生17名を被験者とし、上肢、上肢帯、体幹筋についてシューティング動作の表面筋電図記録と高速映画撮影を実施した。その結果、特に素早い

運動が熟練していく過程で筋・神経系の興奮・抑制に対応する筋群に活動の休止現象が形成されることを検証した。

本研究では TA と他の下肢筋群との協調により、TA の抑制現象が出現し、逆に他の下肢筋等において活動が高まったと考えられる。

Matt の一連のリリース動作は複雑であり、頭部 (下顎を前に出す動作)、頸 (右外旋) の動きについて今後、さらに分析すべきである。

矢 (や) 速について、コンパウンドが速いと一般的にいわれているが、本研究でコンパウンドの Release Time は10 ms 以内を観察しているが、リカーブは10 ms 以下であり、今後、矢の最高速度や加速度 (速度変化) を計測する必要があるだろう。

Matt の高得点は以下の理由が考えられる。

- ① 座位のため身体の重心が立位より低く、弓射の安定性がよいこと。
- ② 下肢全体で弓を支えるため上肢より筋量が多く、最大筋力が高いので持久性についても余裕ができる。
- ③ 身体の質量が大きく外乱に対するブレに強い。

Matt の弓射動作は独自のもので、本研究において、他者、健常者としての坂本選手との比較は困難であった。

パラリンピックアスリートの筋活動と脳再編機能、ヒトの脳機能の再編

中澤 (2017) は Matt の脳機能を fMRI (functional magnetic resonance imaging) で調べた。右足の屈曲動作を60秒繰り返す際の脳活動部位について健常者をコントロールとして比較した。その結果、Matt の運動野は通常手を支配する左脳の部分に足の活動部位が広がっていたという (図5)。これは長年のトレーニングによって脳に再編能力が高まったことによると

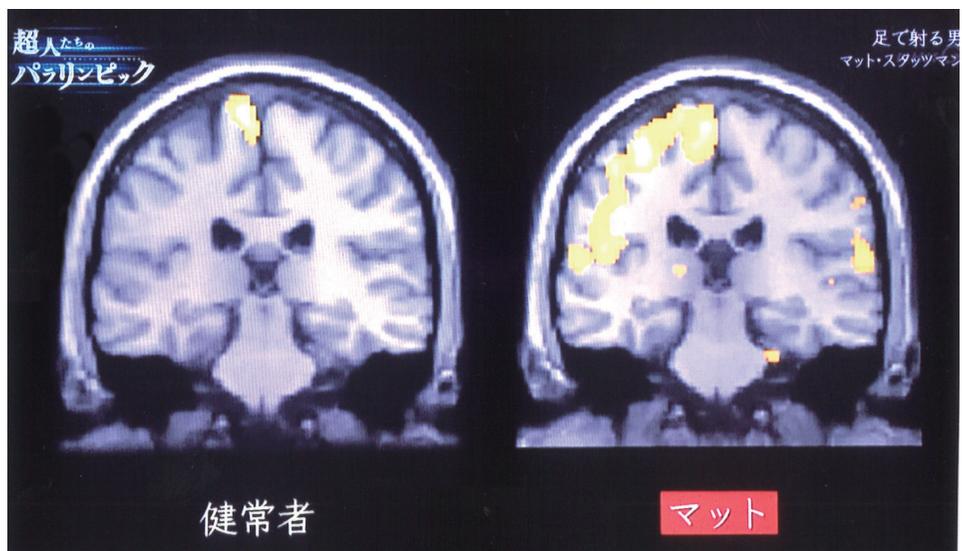


図5 Matt (右図)と健常者(左図)のfMRI画像で、脳の後方からみた運動野の冠状断面図を示す。課題は右足指の屈曲動作(90秒)、脳の後部からみた図で運動野に脳血流量が多い。Mattは左運動野の広範囲にわたり活動していることがわかる(東京大学、中澤公孝教授の許可を得て掲載)。

している。この脳の特異性の神経機序については今後の研究を待たなければならないが、神経系が本来有する再生能力をいかに最大限に引き出すかは重要な研究テーマだと考えられる。(中本ら, 2009.)

今後のデータを増し、さらに詳細な実験が必要で、3段階のドローサイクル: Fx 曲線に対応した筋活動を明らかにし、シューティング指導理論を構築することが望まれる。矢(や)速について、コンパウンドが速いと一般的にいわれているが、検証する必要がある。今後、車イスアーチャーのシューティングを支援する研究とサポート体制作りが急務である。

1990年頃から、脳の可塑性(脳の働きが変わるシステム)についての研究報告がみられるようになり、身体活動(エクササイズ)によりシナプスの形態(解剖学的)、機能(生理学的)、物質的(生化学的)変化が起きることが示された(Zhang et al. 1993)。特に海馬はヒトの記憶に関わる領域で、老化で萎縮し易く病的変化が起りやすい。Erickson et.al (2011)によると歩

行群(最大心拍数60-75%強度の歩行)のトレーニング後の海馬の容量が左右で約2%増加し、ストレッチコントロール群では、逆に左右で約1.4%減少した。また空間認知機能や持久能力(最大酸素摂取量)が向上したという。これらの要因として脳由来神経栄養因子(BDNF: Brain-Derived Neurotrophic Factor)が神経細胞膜に作用し、神経細胞の成長、生存、機能増大に関わり、脳シナプスの可塑性が上昇したと考えられている。

さらに非侵襲的方法としてfMRIにより、機能の回復過程を脳の血流量増加や脳容量で説明する報告が増えてきた。ニューロリハビリテーションの領域では、これまで中枢神経系を構成する神経は再生しないという考えが支配的であったが、神経機能ネットワークは環境や集中力、トレーニングによって代償的に働くという研究成果が認められるようになった。機能的な再編集が起きるといえるものである。特にパラリンピックの選手たちの驚異の運動能力は健常者を上回ることがある。今後、ヒトのもつ神経系

の再生能力を最大限に引き出す方策が求められているといえよう。

Matt は fx 曲線のどこでリリースしているか。健常者はどのタイミングでリリースしているかは張力ゲージを貼付したコンパウンドボウを製作し計測しなければならない。健常者シューティングの EMG 分析の例数を増やすと共に、フォロースルー時の筋活動を観察したい。最大のドローイング力の比較検討も重要である。

謝辞：なおこの研究は NHKBS 「超人たちのパラリンピッカー Matt Stutzman、両腕なきアーチャーの 1 ミリ秒の静止を実現した驚異の身体能力」の企画・実験によるものであり、NHK・テレビマンユニオンの斉藤久剛、琢磨修一氏に謝意を表すものである。コンパウンドボウについては長崎国際大学の金相勲先生から教示いただき、実験データの分析についてはインターリハ(株) 堀真太郎氏にお世話になった。また、脳の MRI 図は東京大学の中澤公孝教授の許可を得て掲載した。記して謝意を表す。

文 献

- 1) 西菌秀嗣 表面筋電図による投・打に関する類似動作の分析、北海道大学教育学部紀要、35, 183-195, 1980.
- 2) 西菌秀嗣、中川功哉、須田、斎藤勝政 アーチェリーのシューティングにおける筋の作用機序及びリリース時の筋放電休止の出現 体力科学33:17-26, 1984.
- 3) 西菌秀嗣 巧みな腕の動きと筋活動 J. Sports Sci. 2 (2) :52-58. 1985.
- 4) Nishizono,H., Kato,M. Inhibition of muscle activity prior to skilled movement Biomechanics X (ed. Jonsson,B) :455-45, 1987.
- 5) Nishizono,H. The Vertical reaction force during the sudden releasing movement (Archery shooting) Annals of fitness and sports sciences 3:53-60,1988.
- 6) Nishizono,H., Fowler, E. Dopkin,B., Edgerton,V.R.Coordination of motor pools in synergist and antagonist during body weight support locomotion in human. Society of Neuroscience. 18:1403, 1992.
- 7) Zhang, A.A., Nishizono, H., Edgerton, V.R. et al. Cinematographic analysis of hindlimb stepping modulated by quipazine and strychnine in the adult spinal rat. Eleventh Annual Neurotrauma Symposium. Washington, DC.1993
- 8) 西菌秀嗣 筋電図からみた歩行機能の向上：筋・神経系の可塑性を中心に．鹿児島大学医学部研究会 1993.
- 9) 西菌秀嗣 脊髄疾患の kineology. 第6回臨床神経生理研究会．九州大学 医学部 脳研臨床神経生理部門，1994.
- 10) Nishizono, H., Fujimoto, T., Kurata, H., Shibayama, H. Non-invasive method to detect motor unit contractile properties and conduction velocity in human vastus lateralis muscle. Medical & Biological Engineering & Computing, 33:558-562.1995.
- 11) 中本浩揮、畝中智志、荒武祐二、西菌秀嗣、森司朗．コーチは何を師範するべきか？—ミラーニューロンの活性から見た師範に必要な情報源— スポーツトレーニング科学 10, 17-24, 2009.
- 12) Fujita, T., Kanehisa, H., Yoshitake, Y., Fukunaga, T. Nishizono, H. Association between knee extensor strength and EMG activities during squat movement.Fujita,

Medicine Science and Sport Exercise.,
43,12:2328-2334, 2011.

- 13) Larry Wise Core Archery 山口諒訳 JP アーチェリー 2016
- 14) 中澤公孝 パラリンピックブレインーパラアスリートに見る脳の再編能力ー 計測と制御 56,8 :595-598, 2017.
- 15) 松崎俊樹、榎 泰輔、能田由紀子、西菌秀嗣、阿部大樹、田代真一. せき損患者用立位保持訓練ロボット (第12報 : NIRS による脳賦活の調査3) LIFE 2017, 2017.
- 16) Sakaki ,T., Tsuruta,K. Yong-Kwun Lee, Nishizono,H. et al. Concept, results and future topic for the Human Research Center at Kyushu Sangyo University. (ICCAS 2017) in Proc: 1513-1518, 2017a. USB memory.
- 17) Sakaki ,T., Ichinose, Y., Lee, Yong-Kwun, Nishizono, H. et al. Rehabilitation Robot in Primary Walking Pattern Training for SCI Patient at Home (Brain Activity Tests) in Proc. ICNR 2017b, USB memory.