

電動車いす操作のための Duchenne 型筋ジストロフィー者の 上肢機能調査

Analysis on the upper extremities to persons with Duchenne Muscular Dystrophy For the operation of electronic wheelchair

○ 沈眞用（東大院） 小竹元基（東大院） 井上剛伸（国リハ研）
三方崇嗣（下志津病院） 鎌田実（東大院）

Jinyong SIM, The University of Tokyo
Motoki SHINO, The University of Tokyo
Takenobu INOUE, Research institute of NRCD
Takatsugu MIKATA, Shimoshizu National Hospital
Minoru KAMATA, The University of Tokyo

Key Words: Supports for Persons with Disabilities, Human Interface, QOL, Muscular Dystrophy

1. はじめに

筋ジストロフィーは、進行性の筋委縮を来す疾患であり、筋力低下や関節拘縮により歩行が困難になる。そのため、筋ジストロフィー者は車いすを主な移動手段として利用している。その中でも Duchenne 型筋ジストロフィー（以下 DMD）は、最も発症率が高く、早期に歩行障害を呈するため、DMD 患者の多くは電動車いすを利用することとなる。また、電動車いすを利用する筋ジストロフィー者の支援技術利用効果の調査⁽¹⁾では、電動車いすが単純に移動における効用を与えるだけでなく、QOL の向上も図れる重要な移動支援機器として評価されている。

しかし、DMD 患者は上肢にも機能障害が現れ、ジョイスティック等の標準的な電動車いすの操作系の利用が困難となる。そのため、DMD 患者の操作に適した新しい操作系への要求が高まっている。

本調査では、DMD 患者の電動車いす操作が困難になる身体機能の低下要因を明確にし、DMD 患者の操作に適した操作系の要求機能を具体化することを目的に、手指機能に注目した上肢機能調査を行った。

2. 調査対象者

文献調査により、表 1 に示す DMD 患者の上肢機能の低下基準（以下上肢 Stage）を把握した。そこで、作業療法士 1 名、神経内科専門医 1 名の立ち会いの下、上肢 Stage の stage7 以上を電動車いすの操作が困難な人と設定し、調査対象者とした。調査対象者 5 名の各々の属性を表 2 に示す。

Table 1 Functional classification of the upper extremities⁽²⁾

Stage 1	Lift up more than 500g weight right overhead
Stage 2	Lift up more than 500g weight to the front (until 90 degrees)
Stage 3	Raise one's hand right overhead (without weight)
Stage 4	Raise one's hand to the front (until 90 degrees)
Stage 5	Bend one's elbow more than 90 degrees
Stage 6	Move hands ahead by stretching elbow on the desk
Stage 7	Move hands ahead by stretching elbow and bouncing body on the desk
Stage 8	Move hands ahead by stretching elbow, bouncing body, and ulnar flexion on the desk
Stage 9	Move hands ahead by ulnar flexion on the desk

Table 2 Attribute of subjects

Subject	Age	stage	Experience in operation of electronic wheelchair
A	29	7	Using
B	26	7	Using
C	24	8	Used 12 years ago
D	25	More than 9	Used 9 years ago(for 2 years)
E	28	More than 9	Used 9 years ago(for 5 years)

3. 上肢機能調査

調査対象者 5 名に対し、電動車いすの操作が困難になる要因を把握するため、上肢機能に関するインタビュー調査を実施した。この調査では、上肢機能評価に基づいた動作と変形の様子を確認した。また、臨床系で DMD 患者の身体運動機能の残存程度を調べるために用いられる関節可動域（Range Of Motion, 以下 ROM）を測定することで身体機能の状態を明確にし、電動車いすの操作を困難にする要因を整理した。

3.1 日常生活に関係する上肢機能動作の観察

表 1 の上肢 Stage に基づいた動作を行ってもらい、動作の特徴を観察した。具体的には、櫛で髪をとかず（Stage 3）、テーブル上に手を乗せる（Stage 4）、テーブル上のものを手前に持ってくる（Stage 6~8）、リモコンを操作する（Stage 9 以上）等の動作を行ってもらった。その結果、自分の上肢 Stage より上位に該当する行動を体幹の反動や首の筋力を使うなど代償運動を行うことで達成する様子が見られた。例えば、Subject A がテーブル上に手を乗せるとき、まず指の尺屈運動で手をテーブルに近づけ、袖を口で噛んで手を挙げていた。

しかし、筋力低下や関節拘縮が原因で、肘を曲げる、前腕を回転させる、手首を曲げるといった動作は出来なかった。そのため、対象者が電動車いすを操作する場合、手が操作位置から外れて元の位置に戻せない、既存の操作系であるジョイスティックを握れない、倒せないことが考えられる。即ち、上肢の筋力低下と関節拘縮が電動車いすの操作を困難にする主な要因であると考えられる。

一方、対象者の 1 日の生活の内容をみると、図 1 のように、テレビやパソコン利用の時間の割合が最も高かった。そこで、テレビやパソコンを操作する様子を観察した。全対象者の共通点としては、微弱であるが指先の動きを使っ

てテレビのリモコンボタンを押す動作やマウスボールを転がす様子が見られた。

既存の研究で DMD 患者の手指機能が残存することが知られていることや本調査の結果から、操作に対する有効な身体機能として手指機能に注目する必要がある。

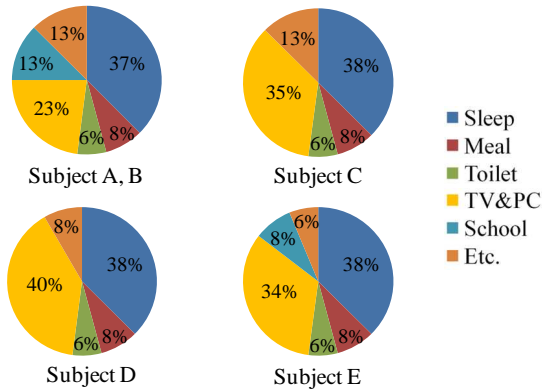


Fig. 1 Daily life of subjects

3.2 手指変形の観察

関節拘縮による手指変形を観察するため、握る状態と開く状態に分けて手指運動を観察した。その様子を表 3 に示す。

変形状態は個人差があるが、Subject D のように指の関節が伸展位で拘縮されるスワンネックのような変形パターンがあり、段々握ることができなくなる特徴が見られる。

よって、変形によって操作系を手に納められないことも電動車いすの操作における困難要因として考えられる。

Table 3 Deformation of hand

Subject Pose	A	B	C	D	E
Grasping					
Opening					

3.3 ROM 測定

ROM 測定は、関節の可動域を測定し、関節における異常を発見するための検査法である。測定する軸心（関節の中心）にゴニオメータを当て、固定バーを固定軸の骨軸、移動バーを移動軸の骨軸に合わせ、動かす前後の関節角度を測定する。測定時には最大可動域まで 5° 刻みで他動運動させる⁽³⁾。

今回は作業療法士 1 名により上肢関節における ROM 測定を行った。表 4 にその結果を示す。

対象者によって制限される関節部位と可動域の範囲は異なっているが、全対象者に対して前腕と手根における ROM 制限が見られた。特に、手首の動きに関係する手関節の拘縮は上肢機能障害度 Stage が高くなるほど強く現れ、電動車いすの操作の中でもレバーを倒す動作に制約を与えていると考えられる。

電動車いすを操作していない Subject C, D, E の場合は、母指における外転、内転においても拘縮傾向が見られた。特に、Subject E は、変形に伴い、ROM 測定の基準軸の位置が大きくずれる等の特徴が見られた。

Table 4 Results of ROM measurement

Measuring Part	Moving direction	Reference	ROM					
			Standard	A	B	C	D	E
Forearm	Pronation		90	90	90	70	90	60
	Supination		90	65	0	15	-20	-20
Hand	Parmar flexion		90	55	20	25	75	90
	Dorsal Stretch		70	40	45	20	-20	-60
	Radial flexion		25	0	0	-5	0	-20
	Basilic flexion		55	30	30	20	45	60
	Radial abduction		60	45	45	35	25	0
Thumb	Basilic adduction		0	0	0	30	0	15
	Palmar abduction		90	45	50	35	35	10
	Palmar adduction		0	0	0	5	0	-10
	MP flexion		60	60	90	80	80	10
	MP Stretch		10	0	0	0	0	30
	IP flexion		80	60	60	70	75	50
	IP Stretch		10	0	0	-10	0	30
Index	MP flexion		90	70	70	80	90	80
	MP Stretch		45	0	0	25	25	-60
	PIP flexion		100	100	90	110	120	40
	PIP Stretch		0	0	0	-20	0	20
	DIP flexion		80	70	50	70	40	70
	DIP Stretch		0	0	0	0	-10	30

 : Slight Joint-contracture
 : Severe Joint-contracture
 : Severe Joint-contracture+Shifted standard axis

3.4 調査結果

本調査を通じて、電動車いすを操作するための困難な要因が、上肢の筋力低下、関節可動域の制限、上肢の変形である可能性を確認した。また、日常生活の観察からパソコンなどの操作行動に注目し、電動車いす操作における有効な身体機能として手指機能を考えた。

しかし、手指機能を評価する既存の方法では、機能障害について定性的に評価することはできるが、力と関節可動域にどの程度の低下が現れ、どの範囲であれば操作ができるか等の操作における評価はできない。

そこで、手指機能を定量的に評価する新たな手法を提案することとし、その方法が満たすべき要求項目を以下のよう整理した。

- 定性的ではなく定量的に評価し、客観性を持たせる
- 操作行動の評価は能動的動作から評価する
- 電動車いすを前進・旋回・左右折・停止させる等の操作行動を考え、手指機能の自由度を高く考慮する
- 手を机の上に置けない等、DMD の症状として現れる対象者の上肢機能の特徴も考慮する

4. 手指機能の定量評価

調査結果から、上肢機能の中で電動車いすの操作における重要な要素を手指機能に定め、これらを実測するための要求項目を整理した。そこで、手指機能を考慮した操作系の設計パラメータを明確にするための定量評価を行う。

手指は、解剖学的観点から図 2 のように簡単なリンク構造で表現できる⁽⁴⁾。そこで、リンクモデル化した手指関節の角度変化を考慮し、外転、内転、屈曲、伸展の手指関節の複合動作によって発揮できる指先力とその可動範囲を測定することで定量評価を行う。ただし、その評価は、図 2 のように、指の動作の始発点となる関節を原点とする関節座標系を考え、x, y, z 方向に対して行う。母指は CM 関節を、その他の指は MP 関節を原点とする。

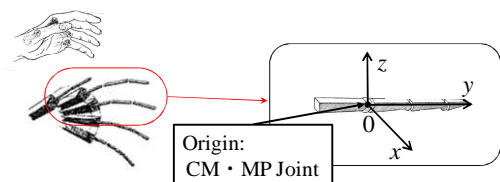


Fig. 2 Link model of finger⁽⁴⁾

4.1 測定方法及び結果

母指，示指，中指の関節座標系における x , y , z 方向の指先力と可動範囲を測定した。ただし，DMD 患者の指先力がどの程度低下しているかを比較するため，健常者 1 名（以下 Subject T）に対して同様に測定し，以下で考察する。

尚，本測定は，国立障害者リハビリテーションセンター，下志津病院，東京大学の倫理審査を受け，測定についてインフォームドコンセントを得た上で行った。

4.1.1 指先力

指先力を測定する際の測定器は対象者の手指変形を考慮する必要がある。そこで，図 3 のような小型の 3 軸力覚センサを導入し，さらにユニバーサルアームを用いることで，関節拘縮によって測定部に手を置けない等の測定上の問題を解決した。

測定する力は x , y , z の各方向に対する最大力を取得した。また，電動車いすの操作時の力のかけ方を考慮し，瞬間的に発揮した力の 10 回分の平均値（以下瞬間力，Test 1）と 10 秒間連続的に発揮する力の中で持続できた 7 秒間の力（以下持続力，Test 2）の平均値に分けて評価した。

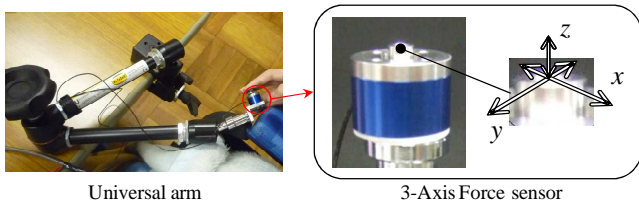


Fig. 3 Experimental equipment to measure a fingertip force

Test 1 の結果を図 4 に，Test 2 の結果を図 5 に示す。各グラフの横軸は各々の x , y , z 方向と対象者を，縦軸は指先力を表し，各方向に対する値は母指，示指，中指に分けてまとめている。また，Subject T の指先力の範囲を各グラフの右下に示す。

これらの結果から，対象者は健常者の 1/3 以下である $-8.3 \sim -6.1$ N の範囲の指先力しか発揮できないことが確認できた。特に，Subject D と E は，他の対象者に比べて著しく低下しており，変形や関節拘縮が強いという症状も指先力の低下と関連性があるのではないかと考えられる。また，対象者の指ごとに比較してみると，母指が最も大きく，示指と中指の間に大きな差は見られなかった。

図 4 から Test 1 の結果をみると，図 4 a のように，母指では Subject B の x -, y -, z -方向の力が他の対象者と違って強く表れた。これは，この方向の力に大きく関与する母指の対立筋が残存していることが要因として考えられる。一方，図 4 b と c を見ると，示指と中指では， $+$ 方向と $-$ 方向の値の間に大きな差は見られず，母指に比べて小さいことが見られた。特に，Subject E の示指と中指で，指先力が最も小さく表れたことから，重度の DMD 患者のための力を入力する操作系を考える際には，母指の力に注目する必要があると考えられる。

次に，図 5 から Test 2 の結果をみると，全体的に指先力が図 4 の Test 1 に比べて大きく表れた。これは，持続力では対象者が持つ最大の力に達することができ，その後もそれが維持できたため，大きな力が表れたと考えられる。また，図 5 a の Test 1 と同様に，示指と中指に比べて母指の指先力が大きく表れたことから，持続力が必要な操作系の場合も母指の力に注目する必要があると考えられる。

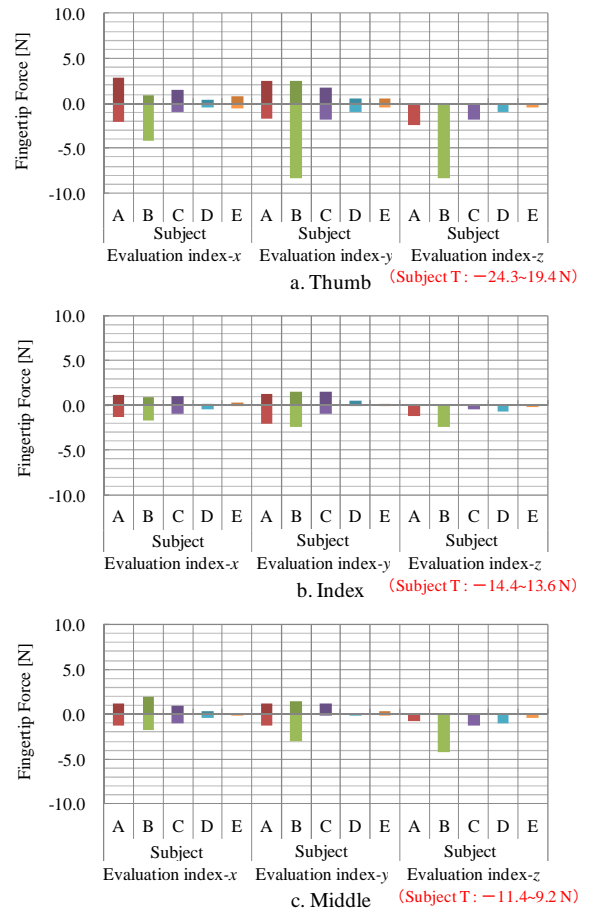


Fig. 4 Results of fingertip force measurement (Test 1)

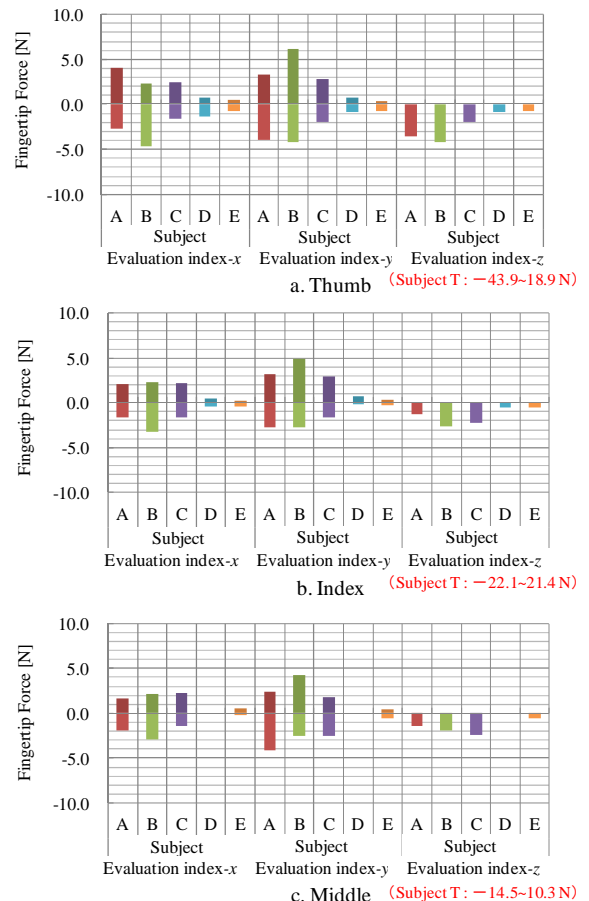


Fig. 5 Results of fingertip force measurement (Test 2)

4.1.2 指先の可動範囲

対象者の手指における筋力が微弱であることを考慮し、測定時の動きに対する負担を軽減させるため、3次元の画像解析を用いた。画像解析では、図6のように、5台のビデオカメラで撮影した画像をパソコン上の仮想マーカーに変換し、データを抽出した。撮影時は仮想マーカーの位置を特定するため、簡易マーカーを手指の各関節部位に付着した。



Fig. 6 Experimental situation to measure a fingertip motion

指先の可動範囲の測定結果を図7に示す。各グラフの横軸はx, y, zと対象者を、縦軸は指先の可動範囲を表し、母指、示指、中指に分けてまとめている。ただし、Subject Eは示指と中指が動かなかったため、可動範囲を0とした。また、Subject Tの可動範囲を各グラフの右下に示す。

これらの結果から全体的に、指先力に比べて上肢機能Stageによる可動範囲の低下程度は少なく、Subject Eを除くと、健常者の4/5以下である-56~32 mmの範囲で指先を動かせることが確認できた。

図7aに注目してみると、x, y, z方向における母指の可動範囲が全対象者において最も均一に表れ、対象者間の差も小さく表れた。一方、図7bをみてみると、示指と中指の結果ではy, z方向の値が他の方向に比べて大きく表れた。これは、示指と中指の屈曲筋が残存しており、関節拘縮傾向も低いことが要因として考えられる。

よって、重度のDMD患者を対象とした操作系では、母指の動きと示指と中指の屈曲動作に注目する必要がある。

4.2 対象者間的手指機能比較

上肢Stage7のSubject AとBの結果を図8に、上肢Stage8以上のSubject C, D, Eの結果を図9に表し、対象者間的手指機能の差を比較した。各グラフは横軸に指先の可動範囲を、縦軸に指先力を表している。

図8から、同じ上肢StageでもSubject Bの指先力が大きく表れた。また、図9から、上肢Stageが上位になる程、指先力が小さくなることが確認できた。さらに、最も上肢機能が落ちていると考えられるSubject Eでは、可動範囲においても著しく低下していることが分かった。

よって、手指機能の中でも低下傾向の大きい指先力をより考慮した入力装置が必要になると考えられる。特に、Subject Dの場合は、指先力は小さいが、可動範囲は広いことから、大きな可動範囲を要しても小さな力で利用可能な入力装置が適していると考えられる。

5. まとめ

日常生活を考慮した上肢機能調査を行い、DMD患者の電動車いす操作を困難にする要因が、上肢の筋力低下、関節可動域の制限、上肢の変形にあることを抽出した。

また、電動車いすの操作能力として手指機能に注目し、手指機能を指先力と可動範囲に分類して整理することにより、電動車いすの操作に手指機能を用いる場合における制約条件を明確にした。

6. 謝辞

本調査においてご協力頂いた下志津病院の職員及び利用者の皆様に感謝の意を表します。

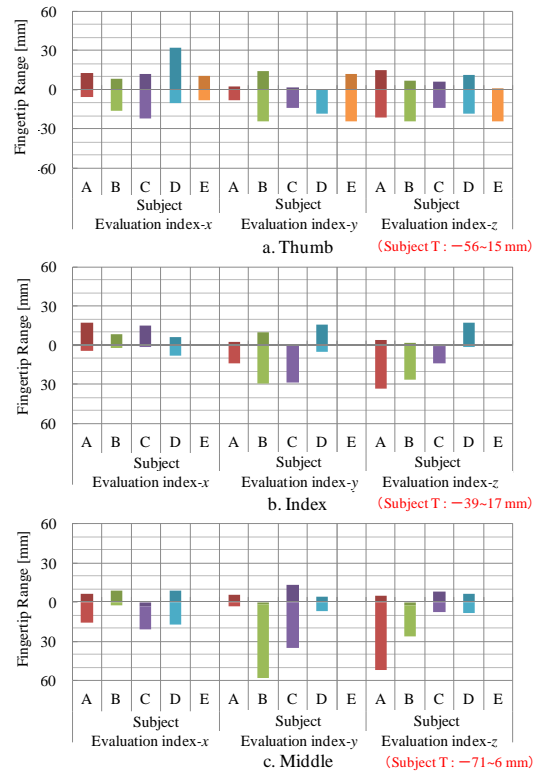


Fig. 7 Results of movable fingertip range measurement

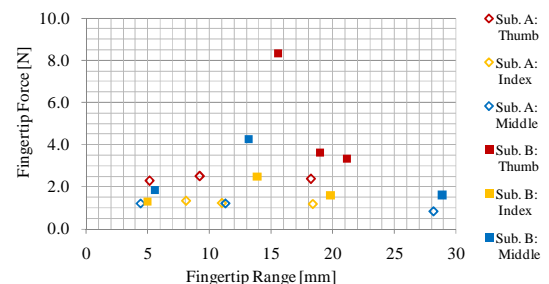


Fig. 8 Results of measurement on Subject A and B

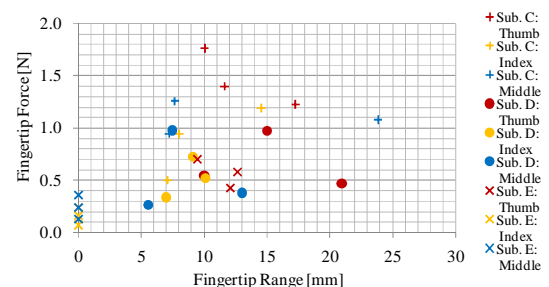


Fig. 9 Results of measurement on Subject C, D, and E

参考文献

- (1) 中邑 賢龍, 平林 ルミ, パソコン及び電動車椅子を利用する筋ジストロフィー者の支援技術利用効果の評価, 厚生労働科学研究補助金(障害保健福祉総合研究事業)総合研究報告書, pp. 49-74, 2008.
- (2) 松家 豊, Duchenne型筋ジストロフィー症のリハビリテーション, 総合リハ, vol. 15, pp. 783-789, 1987.
- (3) 石川 齊, 武富 由雄 編集, 図解理学療法技術ガイド, 文光堂, pp. 55-62, 1999.
- (4) J.CASTAING・J.J.SANTINI 共著, 関節・運動器の機能解剖(上肢・脊椎編), 共同医書出版社, pp70-102, 1996.