

エリートパラリンピック泳者のクロール泳中に働く牽引力の計測

角川隆明

鹿屋体育大学スポーツ・武道実践科学系

キーワード: 障がい, 推進力, 左右対称性, 牽引泳, 回流水槽

【要 旨】

本研究では, エリートパラリンピック泳者を対象としてクロール泳の牽引泳を行い, 計測された牽引力と泳動作との関係を明らかにすることを目的とした. 本研究には, 身体に障がいを有する 5 名の国際大会出場レベルの競泳選手が参加した. 牽引力の計測は先行研究で報告された牽引抵抗計測法を改良し, 回流水槽にて実施した. 泳者はワイヤを介してロードセルに接続され, 10 秒間の全力泳中にワイヤに生じる牽引力を計測した. その結果, 左右非対称な牽引力の変動や, 上肢の水上でのリカバリー動作から再び入水する動作において牽引力が増大する傾向が見られた. これらの結果から, 本研究で用いた牽引力計測法によって, 障がいを有する泳者を対象とした場合でも泳動作を評価できることが明らかとなった. 障がいを有する泳者の泳動作中に生じる力に関する知見は乏しいのが現状であったことから, 本研究で得られた知見は障がいを有する泳者が動作改善をする際の指標として活用できる資料と考えられる.

スポーツパフォーマンス研究, 9, 345-358, 2017 年, 受付日: 2017 年 2 月 3 日, 受理日: 2017 年 8 月 21 日

責任著者: 角川隆明 〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町 1 番地 t-tsunokawa@nifs-k.ac.jp

* * * * *

Evaluation of the force exerted during front crawl tethered swimming of elite Paralympic swimmers

Takaaki Tsunokawa

National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

Key words: disability, propulsive force, asymmetry, towing swimming, swimming flume

【Abstract】

The present study aimed to clarify the relationship between measured exerted force and swimming motion in front crawl swimming by elite Paralympic swimmers. The subjects were 5 swimmers with disabilities who had participated in international

Paralympic competitions. Exerted force was measured in a water circulating pool with an improved method from previously published studies. After the swimmers were connected by wires to a load cell, they swam at full power for 10 seconds, so that the force exerted could be measured. There was a tendency for their force to vary left-right asymmetrically. Also, the athlete's force increased when their upper arm went into the water after a recovery motion in the air. These results suggest that the tethered force-measuring method used in this study can be used to evaluate the swimming motions of swimmers with disabilities. Since knowledge of the swimming force of swimmers with disabilities is limited at present, the findings from this study can be a useful reference for improving the swimming motion of swimmers with disabilities.

I. 緒言

これまで、スポーツ科学に関する研究や調査は身体的に健常なアスリートを対象としたものが多く行われてきたが、近年になりパラリンピック選手のように身体的に障がいのあるアスリートを対象とした研究も多く発表され始めている (Keogh, 2011). そのような中で、パラリンピック泳者を対象とした研究も比較的多く発表されている (Burkett et al., 2010; Daly et al., 2001; Daly et al., 2003; Fulton et al., 2009a; Fulton et al., 2009b; Malone et al., 2001; Osborough et al., 2009; Satkunskiene et al., 2005). これらの研究では、競泳のレースにおけるストロークパターンやコーディネーション、身体的特徴とキネマティクスの関係について調査している. しかしながら、身体に障がいのある泳者を対象として泳動作中の身体に働く流体力や抵抗力といったキネティクスを調査した研究は見当たらない. 特に、身体に障がいを有し左右非対称な身体的特徴を有する泳者にとって、泳ぎの左右対称性を評価することは健常泳者よりも重要であるが、障がいを有する泳者の泳動作中に生じる抵抗力に関する知見は乏しいのが現状である.

競泳競技は速く泳ぐことを競う競技であり、泳者はより高い泳速度を達成するために様々なトレーニングや泳フォームの改善を行っている. 特に、泳速度は推進力と抵抗力によって決定することや、水泳におけるエネルギー消費の大部分が抵抗力に打ち勝つために費やされることから (Prampero, 1986), 泳者には推進力を増加させるとともに、抵抗力を削減することが求められる. そのため、水泳に関する研究では古くから泳動作中の推進力や抵抗力を推定し、泳動作を評価する試みがなされてきた (Hollander et al., 1986; Kolmogorov & Duplisheva, 1992; Xin-Feng et al., 2007). 近年では、Formosa et al. (2011) が泳者を牽引して抵抗力を推定する Assisted Towing Method (以下 ATM と略す) を考案し、健常な泳者を対象とした研究論文を発表している. ATM では、泳動作中の抵抗力の変動や左右の対称性について調査することができるため、この手法を用いて身体に障がいを有する泳者の泳動作中に生じる抵抗力の変動を評価することができれば、コーチや選手が泳動作を評価する際や泳技術を改善する際に有益な情報が得られると考えられる.

しかしながら、Formosa et al. (2011) が報告した ATM では、定常状態を前提とした流体力に関する一般式が用いられており、泳動作中の抵抗力の変動を正確に評価できているとは言えない. その一方で、ATM では泳者の最大泳速度よりも高い速度で泳者を牽引するため、泳動作中に生じる牽引力の変動を経時的に計測できるという利点がある. このようにして計測された牽引力は、泳者が発揮する推進力と、泳者の身体に働く抵抗力の差によって決定するため、計測された牽引力は泳動作を評価する際の定量的な指標として利用できると考えられる. 特に、トレーニングやコーチングの実践場面においては、抵抗力や推進力の正確な絶対値を得ることよりも、動作の具体的な改善点を簡便かつ定量的に評価できる指標が必要とされる. これらのことから、計測された牽引力が泳動作の評価に利用できることが確認されれば、実践場面で利用可能な指標となると考えられる.

そこで本研究では、エリートパラリンピック泳者を対象としてクロール泳の牽引泳を行い、計測された牽引力と泳動作との関係を明らかにすることを目的とした.

II. 方法

1. 対象者

本研究には 5 名のエリートパラリンピック泳者が参加した(男子 3 名, 女子 2 名, 年齢 27.0 ± 10.8 歳, 競技歴 12.4 ± 6.2 年, 身長 175.8 ± 3.5 cm, 体重 65.2 ± 8.1 kg). すべての泳者はパラリンピックの日本代表経験を有しており, 4 名はパラリンピックでのメダル獲得経験を有していた. それぞれの泳者の障がいと, 国際パラリンピック委員会水泳部門が定めたクラス分け, 性別, 競技レベルを表 1 に示す. なお, 国際パラリンピック委員会水泳部門では, 障がいの種類や程度によって身体障がいを S1 から S10, 視覚障がいを S11 から S13 にクラス分けしており, 数字が小さいほど障がい重いクラスとなっている. 対象者には実験の趣旨と危険性について事前に説明し, 書面にて参加の同意を得た. 本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て実施された.

表 1 対象者の障がい, クラス分け, 性別, 競技レベル

対象者	障がいの種類	クラス	性別	競技レベル(過去最高成績)
A	頸椎損傷	S5	女	パラリンピック1位
B	左脚機能障がい	S10	女	パラリンピック出場
C	右上下肢麻痺	S6	男	パラリンピック2位
D	左前腕欠損	S9	男	パラリンピック3位
E	全盲	S11	男	パラリンピック2位

2. 実験設定と手順

本研究では, Formosa et al. (2011) が報告した ATM を用いた抵抗計測法を応用し, 泳動作中に働く牽引力を計測した. 測定では, 事前に 50 m 室内プール(水深 1.35 - 3.80 m, 水温 28.5 度)にて泳者の最大泳速度を決定するための試技を実施し, その後に回流水槽にて泳動作中の牽引力の計測を実施した.

泳者の最大泳速度を決定する試技では, 水中から壁を蹴ってスタートするプッシュオフスタートからクロールで 30 m の最大努力泳を行った. 試技では, 15 m から 25 m までの 10 m 区間の泳タイムを 2 名の熟練した水泳指導者がストップウォッチを用いて手動で計測し, 2 名が計測した泳タイムの平均値から泳速度を算出した.

牽引力の計測は泳者の左側方に観察用窓を有する実験用回流水槽(五十嵐工業, 長さ 5.5 m, 横幅 2.0 m, 水深 1.2 m, 水温 28.0 度)にて実施した. 泳者は, 伸縮性のないスチール製ワイヤ(長さ 2.5 m, 直径 1.5 mm)につながれたベルトを腰部に装着し, 泳者前方に設置されたロードセル(LUX-B-2KN-ID, 共和電業)に接続された. 試技では, クロールで 10 秒間の全力泳を行い, 泳者前方に設置したロードセルによってワイヤに生じる牽引力を計測した. 回流水槽の流速は, ワイヤのたるみを防ぎ, ロードセルにて常に牽引力を計測するため, 先行研究(Formosa et al. 2009)に倣い事前に計測した各泳者の最大泳速度よりも 10%高い速度に設定した. ワイヤに生じる牽引力は, センサインターフェース(PCD330B-F, 共和電業)を経由してパーソナルコンピュータに接続されたロードセルにて 200 Hz で計測した. なお, 牽引力は泳者が発揮する推進力と, 泳者の身体

に働く抵抗力の差によって決定するため、牽引力が小さいことは推進力が大きい抵抗力が小さいことを表し、牽引力が大きいことは推進力が小さい抵抗力が大きいことを示す。図 1 に実験設定の概要図を示す。

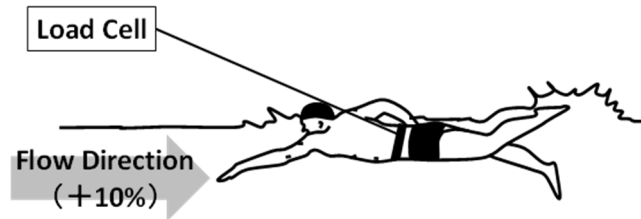


図 1 実験設定の概要図

回流水槽で実施した牽引力の計測試技は、デジタルビデオカメラ (Stylus TG-4, オリンパス) を用い、フレーム数 30 fps で泳者の左側方から撮影した。撮影した映像とロードセルにて計測した牽引力との同期は、デジタルビデオカメラに映し込んだ LED を点灯させるために出力された電気信号をセンサインターフェースに取り込み、牽引力データの集録開始トリガとすることで図った。

計測された牽引力と泳動作との関係を検討するため、本研究では左右それぞれの上肢のストローク動作を以下の 3 局面に分けた。なお、泳者 C については右側の上肢と下肢が麻痺しており、右側でのストローク動作を行うことができなかったため、左側の動作についてのみ記述した。

グライド局面: グライド局面は、手部が入水してから後方に水を掻き始めるまでの局面とした。

プッシュ局面: プッシュ局面は、手部が後方へ水を掻き始めてから出水するまでの局面とした。

リカバリー局面: リカバリー局面は、手部が出水してから再び入水するまでの局面とした。

3. 分析項目

計測された牽引力は、ストローク動作 1 周期中の平均値と最大値、最小値として示した。さらに、牽引力の変動を各局面にて撮影された映像の静止画像とともに図示した。また、回流水槽での牽引力計測時に撮影した映像のフレーム数をカウントしてストローク頻度を算出し、事前に測定した全力泳時の泳速度と、算出したストローク頻度からストローク長を算出した。

III. 結果

表 2 に各泳者の最大泳速度、ストローク頻度、ストローク長、牽引力の平均値、最大値、最小値を示した。その結果、高い泳速度の泳者が高い牽引力の平均値を示す結果とはならず、男子と比較して女子が低い牽引力の平均値を示した。また、対象者 A は泳速度と牽引力の平均値が最も低い値を示したが、牽引力の最大値は対象者 B よりも高い値を示し、牽引力の変動が大きくなっていた。対象者 D と E は泳速度が等しい値を示したが、牽引力の平均値や最大値、最小値は対象者 D が高く、同じ泳速度であっても牽引力の変動には違いが見られた。

表 2 各泳者の最大泳速度, ストローク頻度, ストローク長, 牽引力

対象者	泳速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	ストローク頻度 (stroke s^{-1})	ストローク長 (m)	牽引力 (N)		
				平均値	最大値	最小値
A	1.09	0.81	1.34	15.4	47.6	1.1
B	1.52	1.00	1.52	17.3	35.9	2.2
C	1.35	1.25	1.08	22.9	48.1	2.6
D	1.69	1.20	1.41	36.4	85.9	4.9
E	1.69	1.07	1.58	27.1	69.5	1.1

また, 図 2 から図 6 に対象者 A, B, C, D, E の牽引力の変動と撮影された映像の静止画像を示す. その結果, 全ての泳者がリカバリー局面からグライド局面で牽引力がピーク値を示すことが明らかとなった. 対象者 C を除く 4 名の対象者においては, 左右それぞれのストローク動作でのリカバリー局面からグライド局面においてピーク値を示したが, ピーク値の大きさには左右で差が見られた. 対象者 C については, 右上下肢麻痺のため左側のストローク動作のみを行う泳動作を行っていたが, 左側のストローク動作 1 周期中に牽引力が 2 回のピーク値を示した.

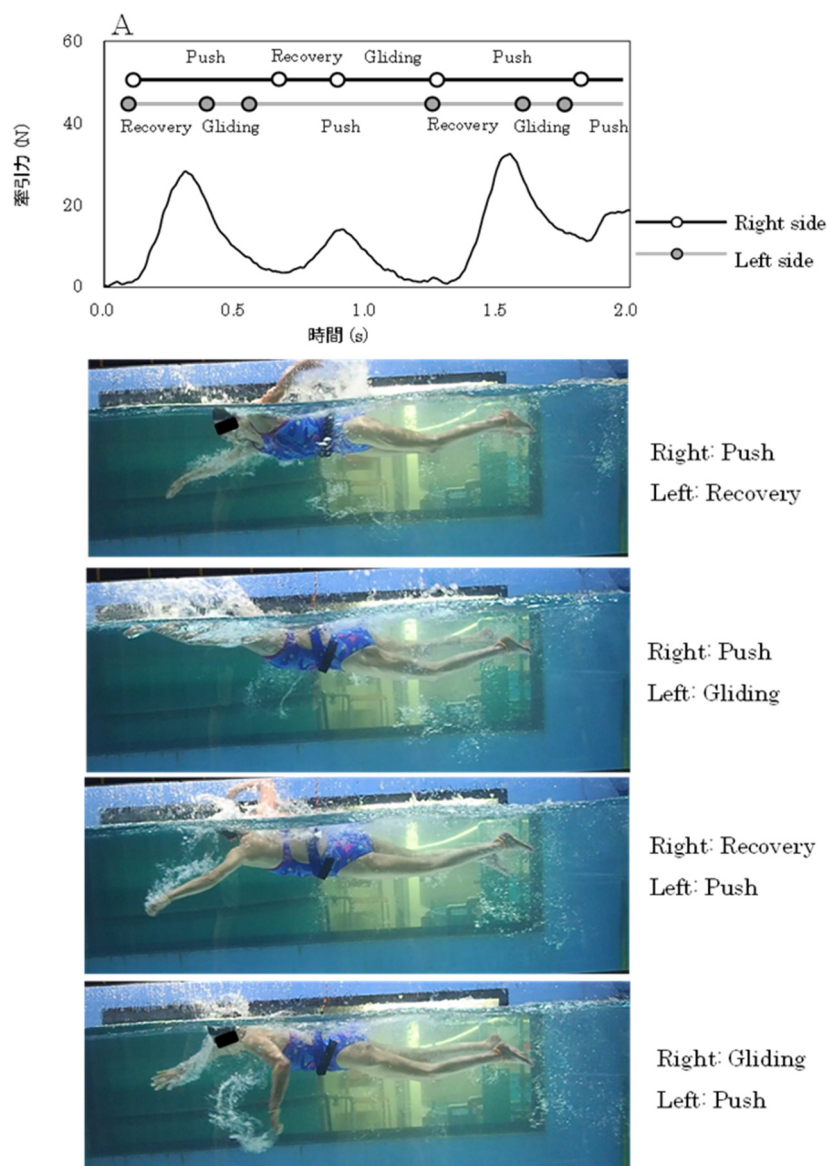


図 2 対象者 A の牽引力の変動

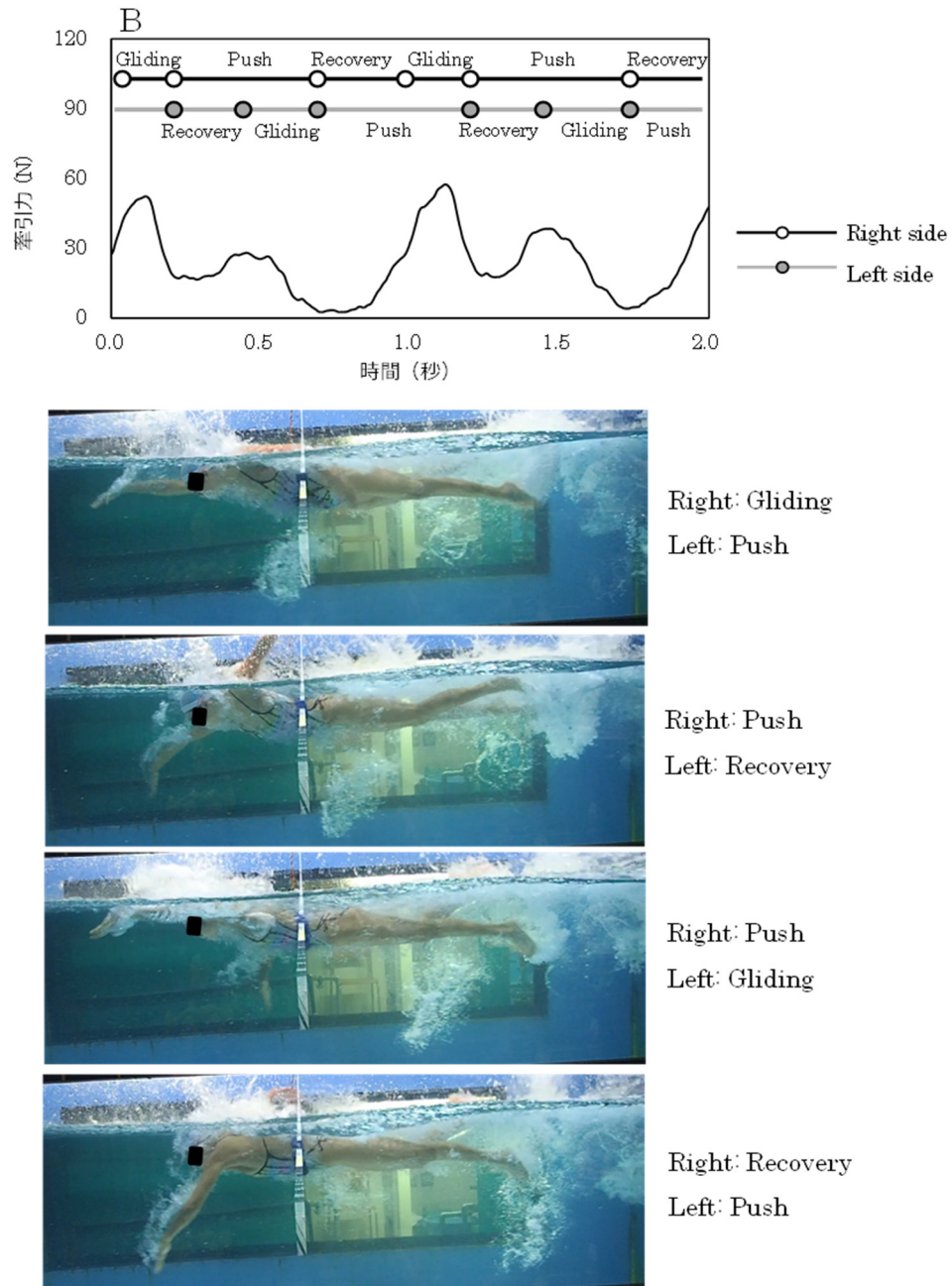


図 3 対象者 B の牽引力の変動

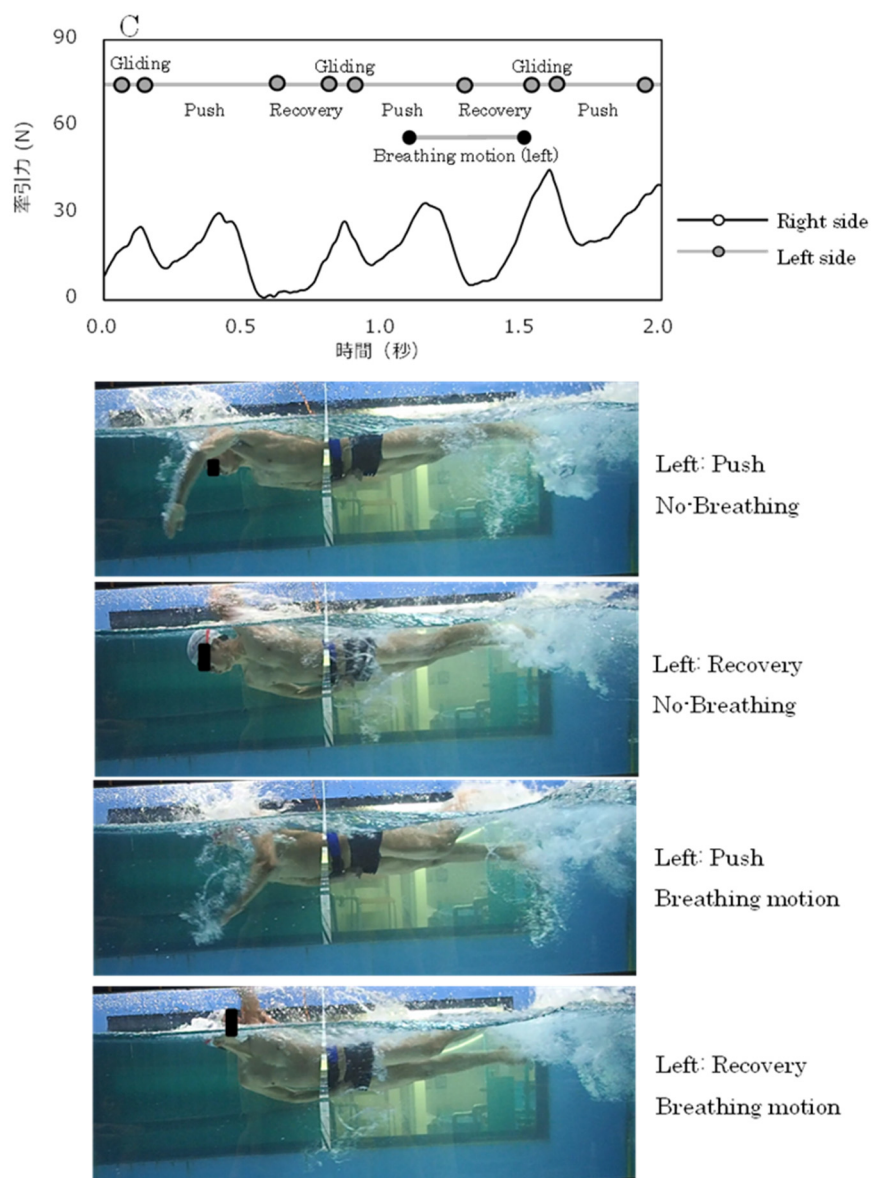


図 4 対象者 C の牽引力の変動

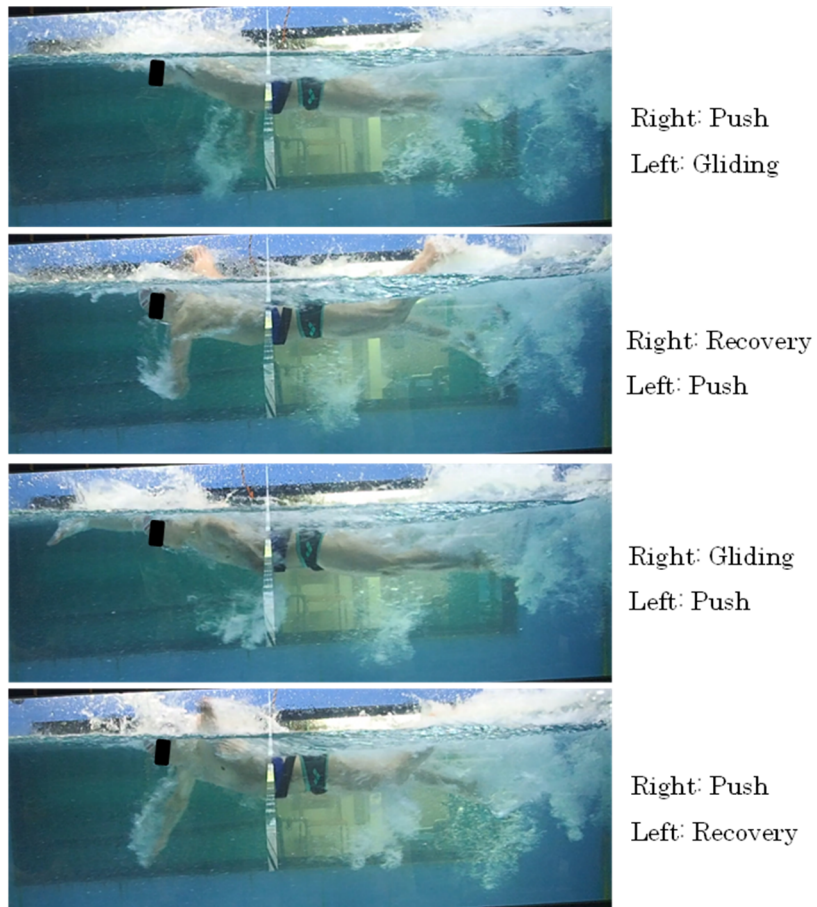
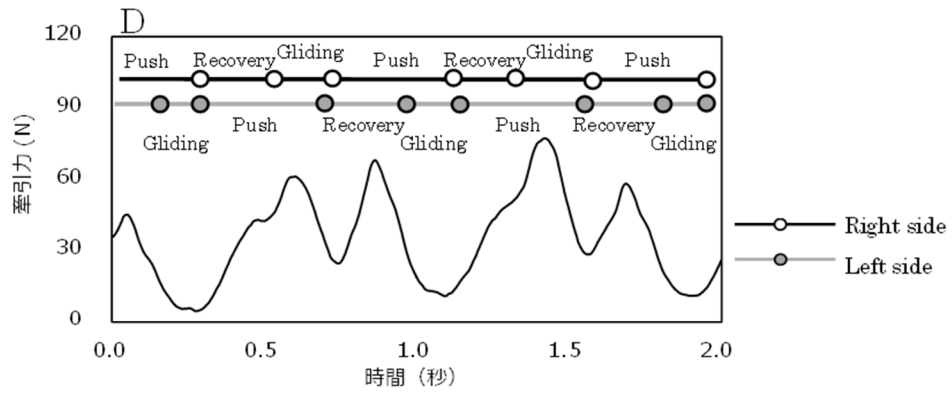


図 5 対象者 D の牽引力の変動

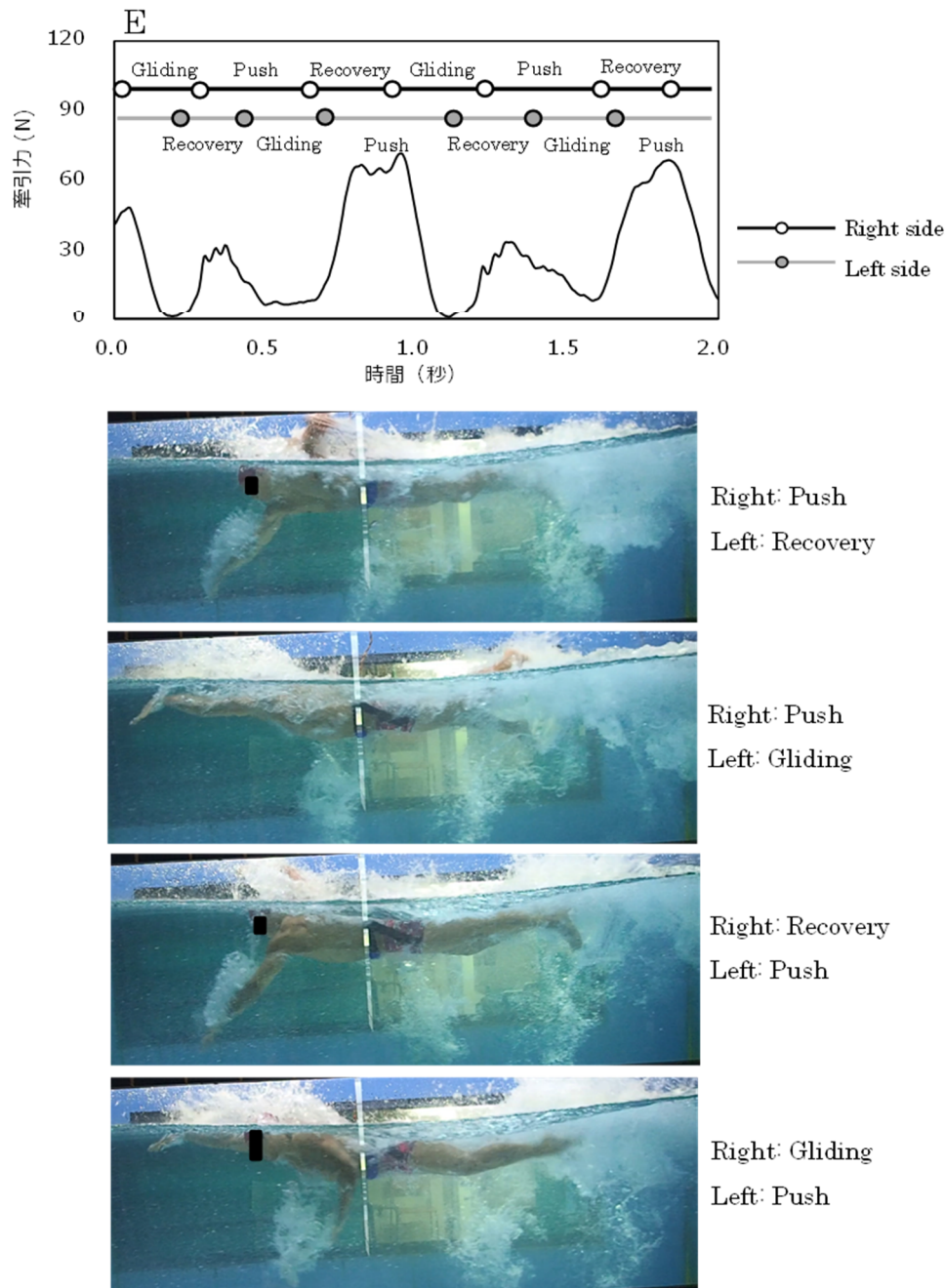


図 6 対象者 E の牽引力の変動

IV. 考察

本研究では、エリートパラリンピック泳者を対象としてクロール泳の牽引泳を行い、計測された牽引力と泳動作との関係を明らかにすることを目的とした。その結果、身体に障がいを持つ泳者が対象であっても問題なく牽引力を計測することができ、Formosa et al. (2011) が健常泳者を対象とした研究と同様に、周期中の牽引力の変動や左右の非対称性を評価することができた。本研究に参加した 5 名の泳者はそれぞれが異なる障がいを持っており、牽引力の変動には違いが見られたが、いくつかの共通点があることも明らかとなった。特に、牽引力がピーク値を示すタイミングは対象者 C を除いて一致しており、左右それぞれのリカバリー局面からグライド局面においてピーク値を示

した。

各対象者の牽引力に着目すると、脊椎損傷による障がいを持つ対象者 A は、左側のリカバリーからグライド局面にかけて牽引力がピーク値を示した。これは、脊椎損傷によって右上肢の動きに制限があり、右側のストローク動作で水を後方へ押し出すことができなかったためと考えられる。左側のストローク動作については、4 枚目の静止画像にあるように肘から手がほぼ垂直になって水を押ししている様子が見え、右側のリカバリーからグライド局面での牽引力のピーク値も小さくなっている。

対象者 B については、他の対象者と同様に牽引力の変動に左右差が見られたが、表 2 に示すように牽引力の最大値は小さかった。また、泳速度が $1.52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ で男子泳者と同程度であったが、牽引力の平均値は低く、抵抗力の小さな効率的な泳動作であったと言える。これは、障がいのクラスが S10 と最も軽いクラスであったことに加え、障がいの部位が左脚であったことから、上肢動作による推進力が大きな割合を占めるクロール泳では障がいの影響が小さかったことが要因と推察される。

対象者 C については、右側の上肢と下肢の麻痺により左側のストローク動作のみを行っていたが、牽引力は左側のストローク動作 1 周期中に 2 回のピーク値を示した。1 回目のピーク値はリカバリー動作中であるため、推進動作を行うことができずに牽引力が増加したと考えられるが、2 回目のピーク値は推進動作を行うプッシュ局面で観察された。対象者 C の特徴として、グライド局面が短く、手の入水後すぐにプッシュ動作を行っていたが、牽引力がピーク値を示したことからプッシュ局面前半では推進力を得られていなかったと推察される。対象者 C と同じ右側の上肢と下肢が麻痺した泳者を対象として泳動作の最適化を行ったシミュレーション(根本ほか, 2016)によると、ストローク周期を長くし、しっかりと水をかくことで泳速度を高められると報告されており、本研究でも同様の結果が得られた。また、対象者 C は試技中に呼吸動作を行っており、呼吸動作中の牽引力が増加する傾向が見られた。3, 4 枚目の静止画像を見ると、呼吸動作によって頭部が持ち上げられて抵抗力を受けやすい姿勢となっていることから、呼吸動作を短縮するか、頭の持ち上げを小さくすることで、抵抗力を低減させることができると考えられる。

対象者 D は、左前腕欠損のため、左側のストローク動作によって推進力を得ることは難しいと考えられるが、牽引力の変動ではあまり大きな左右差は見られなかった。これは、2 枚目の静止画像からうかがえるように、左上腕で水を押ししているためと考えられ、障がいのある側であっても推進動作を行うことができることを示している。また、4 枚の静止画像を見ると、抵抗力を低減するために理想的な水平姿勢を保っていた。本研究の結果からは、どのような要因によって水平姿勢が保たれていたか明らかにすることはできないが、同様の障がいを持つ泳者にとって理想的な泳動作であると考えられる。

対象者 E は、本研究の参加者で唯一の視覚障がいを持つ泳者であり、四肢に障がいは有していなかった。しかしながら、牽引力は最大値、平均値ともに最も高い値を示し、最大泳速度が同じであった対象者 D と比較しても牽引力が大きいことが明らかとなった。静止画像からも回流水槽内に大きな水しぶきや波が生じていることがうかがえ、これらの抵抗力を小さくすることが泳記録向上に繋がると考えられる。

以上のように、牽引力の計測結果と撮影した映像により、泳動作と牽引力の関係を検討することができ、どのような動作が推進を妨げる抵抗力を生じさせるか明らかにすることができた。本方法では、牽引力を計測することができれば抵抗力や推進力を評価することができ、泳者は腰部にベルトを装着して泳ぐことができれば実施可能である。また、試技は短時間で行うことができ、フィードバックに時間を要さずトレーニング中に実施することも可能である。今後は、より多くの泳者のデータを蓄積するとともに、トレーニングの進行や泳動作の変化によって牽引力がどのように変化するか明らかにすることで、泳動作改善時の指標として活用することができるようにと考えられる。

V. まとめ

本研究では、エリートパラリンピック泳者を対象としてクロール泳の牽引泳を行い、計測された牽引力と泳動作との関係を明らかにすることを目的とした。その結果、身体に障がいを持つ泳者が対象であっても問題なく牽引力を計測することができ、泳動作と牽引力の関係を検討することができた。また、計測試技やデータのフィードバックに時間を要さずに実施可能であったことから、トレーニングや泳動作改善に活用できる方法であることが確認された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K16487 の助成を受けたものです。また、日本身体障がい者水泳連盟の桜井誠一様を始め、本研究にご協力頂きました選手、コーチ、関係者の皆様に心からお礼申し上げます。

【文献】

- ・ Burkett, B., Mellifont, R., & Mason, B. (2010). The influence of swimming start components for selected Olympic and Paralympic swimmers. *Journal of Applied Biomechanics*, 26 (2): 134-141.
- ・ Daly, D., Malone, L., Smith, D., Steadward, R., & Vanlandewijk, Y. (2001). The contribution of starting, turning and finishing to total race performance in male Paralympic swimmers. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 18 (3): 316-333.
- ・ Daly, D., Djobova, S., Malone, L., Steadward, R., & Vanlandewijk, Y. (2003). Swimming speed patterns and stroking variables in the Paralympic 100-m freestyle. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 20 (3): 260-278.
- ・ Formosa, D. P., Mason B. R., & Burkett B. (2009). Measuring propulsive force within the different phases of backstroke swimming. In A. J. Harrison, R. Anderson, & I. Kenny (Eds.), *Proceedings of the XXVII International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 98-101). Limerick: University of Limerick.
- ・ Formosa, D. P., Mason, B., & Burkett, B. (2011). The force-time profile of elite front crawl swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 29 (8): 811-819. doi: 10.1080/02640414.2011.561867.
- ・ Fulton, S. K., Pyne, D. B., & Burkett, B. (2009a). Quantifying freestyle kick-count and kick-

- rate patterns in Paralympic swimming. *Journal of Sports Sciences*, 27 (13): 1455-1461. doi: 10.1080/02640410903062936.
- Fulton, S. K., Pyne, D. B., & Burkett, B. (2009b). Validity and reliability of kick count and rate in freestyle using inertial sensor technology. *Journal of Sports Sciences*, 27 (10): 1051-1058. doi: 10.1080/02640410902998247.
 - Hollander, A.P., De Groot, G., van Ingen Schenau, G.J., Toussaint, H.M., De Best, H., Peeters, W., Schreurs, A.W. (1986). Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 4: 21-30.
 - Keogh, J. W. L. (2011). Paralympic sport: an emerging area for research and consultancy in sports biomechanics. *Sports Biomechanics*, 10 (3): 234-253.
 - Kolmogorov, S.V., & Duplishcheva, O.A. (1992). Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of Biomechanics*, 25, 311-318.
 - Malone, L. A., Sanders, R. H., Schiltz, J. H., & Steadward, R. D. (2001). Effects of visual impairment on stroke parameters in Paralympic swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (12): 2098-2103.
 - Mason, B. R., Formosa, D. P., & Raleigh, V. (2009). The use of passive drag to interpret variations in active drag measurements. In A. J. Harrison, R. Anderson, & I. Kenny (Eds.), *Proceedings of the XXVII International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 452-455). Limerick: University of Limerick.
 - 根本千恵, 中島求, 岸本太一, 寺田雅裕, 生田泰志 (2016) シミュレーションによる片麻痺スイマーのための自由形最速ストローク解明の試み. 2016 年日本水泳・水中運動学会年次大会論文集. 26-29.
 - Osborough, C. D., Payton, C. J., & Daly, D. J. (2009). Relationships between the front crawl stroke parameters of competitive unilateral arm amputee swimmers, with selected anthropometric characteristics. *Journal of Applied Biomechanics*, 25 (4): 304-312.
 - Prampero, P. E. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *International Journal of Sports Medicine*, 7: 55-72.
 - Satkunskiene, D., Schega, L., Kunze, K., Birzinyte, K., & Daly, D. (2005). Coordination in arm movements during crawl stroke in elite swimmers with a loco-motor disability. *Human Movement Science*, 24 (1): 54-65. doi: 10.1016/j.humov.2005.04.001.
 - Xin-Feng, W., Lian-Ze, W., Wei-Xing, Y., De-Jian, L., Xiong, S. (2007). A new device for estimating active drag in swimming at maximal velocity. *Journal of Sports Sciences*, 25: 375-379.