

M5STACK を用いた カヌースプリントカヤック艇挙動の測定システム

A Measurement System for Hull Behavior in Canoe Sprint Kayaking using M5STACK

中 垣 浩 平¹⁾

Kohei NAKAGAKI¹⁾

キーワード：パドリング, GPS, IMU, ストロークレート

【要 約】

本研究の目的は、9軸慣性計測ユニットを標準で備えた M5STACK-GRAY を用いて、カヌースプリントカヤック艇速度及び艇挙動を評価するための簡便かつ安価な測定デバイスを試験的に構築することであった。艇速度及び艇挙動を測定するために、本研究では M5STACK-GRAY に GPS モジュール及びバッテリーモジュールを組み合わせたデバイスを構築した。対象者（女子カヌースプリント選手）は、構築した M5STACK デバイスを艇に搭載し、約 50 m の全力パドリングを実施した。本研究の結果、進行方向への加速度波形からカヌースプリントカヤックパドリング中のストロークレートを評価できることが示唆された。また、艇のロール角及び加速度のデータは、リサージュ図形による技術評価に活用できる可能性が示された。今後は、構築した M5STACK デバイスから得られる艇速度及び艇挙動のデータの妥当性・信頼性を明確にする必要がある。

I. 緒言

カヌースプリント競技は、静水域に規定された直線コース（200 m - 1000 m）で着順を競う競技である。競技規則では、競技中に艇速度や艇挙動を記録するデバイスを搭載することが認められている（得られたデータを競技中にリアルタイムで選手にフィードバックすることは禁止）。艇速度や艇挙動のデータは、競技パフォーマンスの分析・改善に欠かせない。そのため、国際大会では、大半の選手が GPS/IMU センサを艇に搭載している。

国立スポーツ科学センターでは、2013 年度からナショナルチームの選手を対象に GPS/IMU (Global Positioning System/Inertial Measurement Unit) センサを利用したレース・艇挙動分析を実施している¹⁾。しかし、市販されている高精度の GPS/IMU センサ (Catapult 社, OptimEye や Minimax 等) は高価であり、国内の選手・コーチが活用・普及するには至っていない。国内の選手やコーチに GPS/IMU センサ（及びそのデータ分析）を普及させるためには、誰でも入手できる安価なデバイスを提案することが望まれる。

近年では、Arduino や Raspberry Pi 等の安価な小型マイコンボードが普及し、デジタル計測機器を手軽に製作できるようになった。特に、液晶ディスプレイや nanoSIM スロットを備えたマイコン (ESP32) モジュールである M5STACK は、GPS などの各種センサやバッテリー等のオプションモジュールを簡単（標準のピンヘッダを利用）かつ安価に追加することができる。また、M5STACK 上でプログラムを動かすための開発環境は、Arduino IDE, PlatformIO, UIFlow, MicroPython 等、複数用意されており、サンプルコードもオンライン (GitHub 等) にて豊富に公開されている。

そこで本研究では、9軸 IMU（加速度、ジャイロ及び磁気）センサを標準で備えた M5STACK-GRAY を用いて、カヌースプリントカヤック艇挙動を評価するための簡便かつ安価な測定デバイスを試験的に構築することを目的とした。

II. 方法

1. GPS/IMU

9軸 IMU を搭載した M5STACK-GRAY (M5Stack

¹⁾ 山梨学院大学スポーツ科学部

社製) に, GPS モジュール (M5Stack 社製, M5Stack-GPS-02) 及びバッテリーモジュール (M5Stack 社製, M5Stack-BATTERY) を組み合わせた (以下, M5STACK デバイス). GPS アンテナは, モジュールの内臓アンテナではなく, 外部アンテナを利用した. なお, 地軸センサへの影響を考慮し, M5STACK デバイス底面にあるネオジウム磁石及び GPS アンテナ底面の磁石は取り外した.

プログラムは, GitHub にて公開されているバイク用データロガーのソースコード²⁾ を利用した. 本研究では, このソースコードをベースに, カヌースプリント艇速度及び艇挙動の評価に関連するデータを表示・記録できるように改修した. ソースコードの主な変更点は, 1) IMU センサ測定範囲の変更, 2) GPS 速度 (m/s) 及び進行方向 (degree) の表示・記録, 3) バッテリー残量表示の3点である.

2. 艇速度及び艇挙動の評価

女子カヌースプリント選手1名を対象に, 本研究の目的及び意義を説明し, 研究参加の同意を得た. 対象者は, M5STACK デバイスを載せたカヌースプリント艇 (Nelo 社製, K1 7 M) に乗り, 静止状態から全力で約 50 m の全力パドリングを実施した. パドリング中は, GPS/IMU データ (艇速度, 進行方向, ピッチ角, ロール角及び進行方向への加速度) を 0.1 秒毎に microSD カードに記録した (ただし, GPS データのサンプリングは 1 Hz). また, パドリング中の映像をスマートフォン (Apple 社製, iPhone 8) を用いて撮影 (30 fps) した.

本研究では, 動作分析ソフト (Kinovea 0.9.3) を用いて, 動画データからストローク数及びストロークレート (SR) を算出した. 同じパラメータを IMU データ (進行方向の加速度波形) から求め, 動画から得られたデータとの比較をおこなった. なお, 1 ストローク (片側) 毎の SR は式 1, 2 ストローク (両側) 毎の SR は式 2 から算出した.

1 ストローク毎の SR (strokes/min) = $60 / 1$ ストローク間の時間間隔 (s) …式 1

2 ストローク毎の SR (strokes/min) = $60 / 2$ ストローク間の時間間隔 (s) $\times 2$ …式 2

映像データから SR を分析する際には, ストローク間の時間間隔をパドル入水時から次のストロークの入

水時までとした. 1 ストローク毎の場合は, 右ストロークから左ストローク, もしくは左ストロークから右ストロークまでの時間を, 2 ストローク毎の場合は, 右ストロークから右ストロークまでの時間を, それぞれストローク間の時間間隔とした.

進行方向の加速度波形から SR を分析する際には, ストローク間の時間間隔を波形のピーク間の時間間隔とした. 1 ストローク毎の場合は, 1 ピーク毎の時間間隔, 2 ストローク毎の場合は, 2 ピーク毎の時間間隔を, それぞれストローク間の時間間隔とした. なお, これらのデータの分析区間は, 漕ぎはじめから漕ぎ終わりまでの 26 ストローク分とし, 映像を基に判断した.

水上環境において, 妥当基準となる厳密な距離を測定することは困難であることから, M5STACK デバイスの速度データ (GPS 及び加速度の時間積分) は, 市販されている GPS 心拍計 (Polar 社製, Vantage V) のデータ (1 Hz) と比較した.

また, 艇のロール角 (x 軸) 及び加速度 (y 軸) のデータからリサージュ図形を描き, 艇挙動を評価した. なお, リサージュ図形には 7 - 16 ストローク目までの 10 ストローク分のデータを用いた.

3. 統計処理

映像及び IMU データから得られた SR を比較するため, Bland-Altman 分析を実施した. また, ピアソンの積率相関係数を算出し, 統計的有意水準は 5% とした.

Ⅲ. 結果

図 1A には進行方向の加速度波形を, 図 1B にはピッチ角及びロール角を示した. ピッチ角は艇首が上昇 (艇尾が下降) すると, ロール角は艇の左舷が上昇 (右舷が下降) すると, それぞれ+を示す. 図 2 には, 映像及び加速度波形から算出した SR を示した. 加速度波形のピークの数 (26) は, 映像のデータに基づくストローク数 (26) と同じであった.

1 ストローク毎の SR 及び 2 ストローク毎の SR の Bland-Altman Plot をそれぞれ図 3 及び図 4 に示した. 映像及び加速度波形から算出した 1 ストローク毎の SR には, 固定誤差及び比例誤差は認められなかったものの, 誤差の許容範囲が高値を示した (Bias = -0.68 ± 24.1 strokes/min). 映像及び加速度波形から算出した 1 ストローク毎の SR には, 両者の間に有意な正の相関関係が認められた ($r = 0.68, p < 0.05$).

映像及び加速度波形から算出した2ストローク毎のSRには、固定誤差及び比例誤差は認められなかった(図4)。1ストローク毎のSRと比較して、2ストローク毎のSRの誤差の許容範囲は約半分となった(Bias = -0.28 ± 13.9 strokes/min)。映像及び加速度波形から算出した2ストローク毎のSRには、両者の間に有意な正の相関関係が認められた($r = 0.87$, $p < 0.05$)。

加速度を時間で積分した速度、M5STACKデバイスのGPS速度及びGPS心拍計の速度を図5に示した。加速度で積分した速度は、速度が定常状態に近づく(約

6秒後)と、GPS速度及びGPS心拍計の速度よりも高値を示す傾向にあった。また、M5STACKデバイスのGPS速度は、加速局面ではGPS心拍計の速度よりも高値を示す傾向にあった。

図6は、艇のロール角(x軸)及び加速度(y軸)のデータから描いたリサージュ図形である。ロール角は、左右で差が認められた。右ストローク時に生じる右舷の下降と比較して、左ストローク時に生じる左舷の下降の方が、ロール角が大きくなった(左舷側にオフセット)。

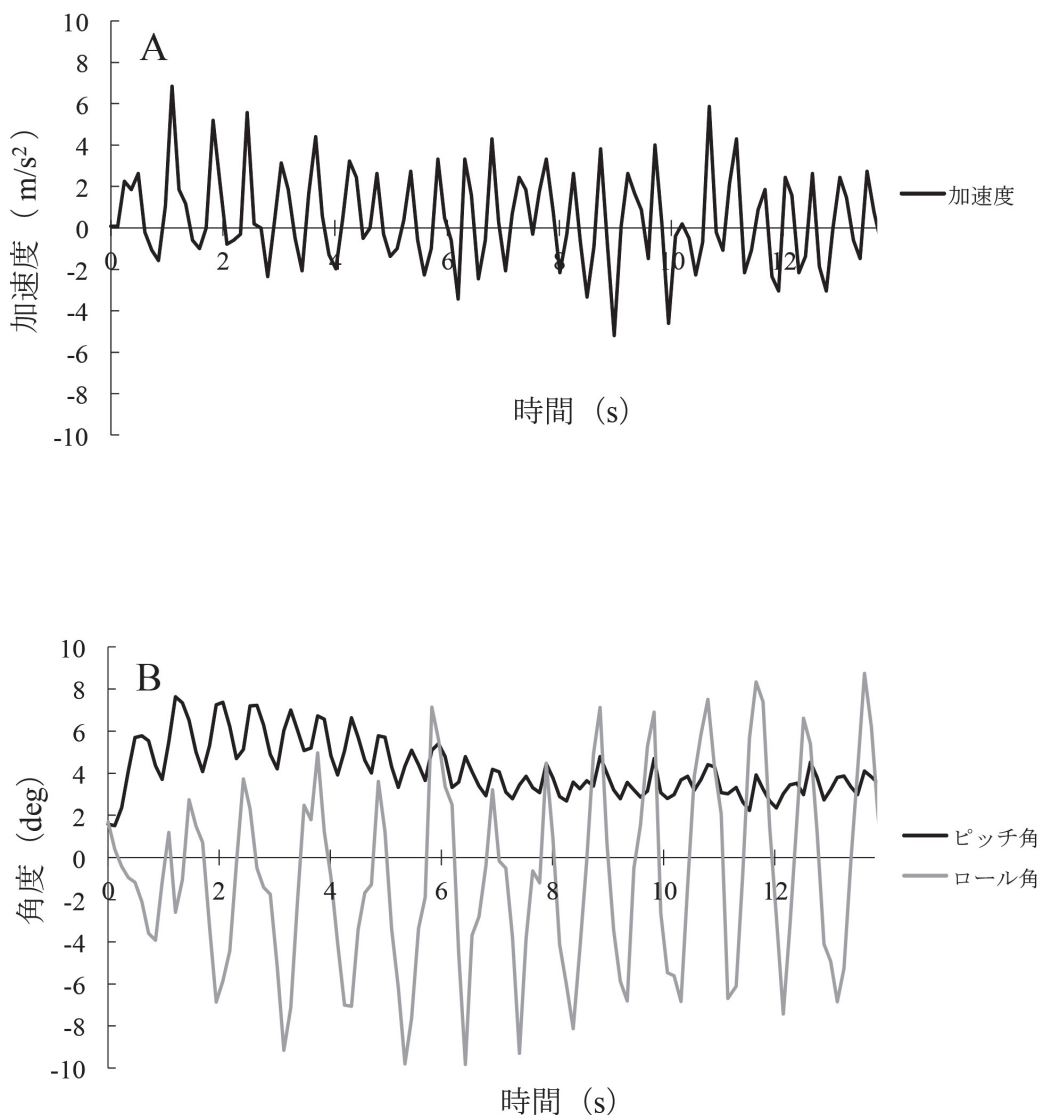


図1. カヤックパドリング中の加速度 (A), ピッチ角及びロール角 (B)

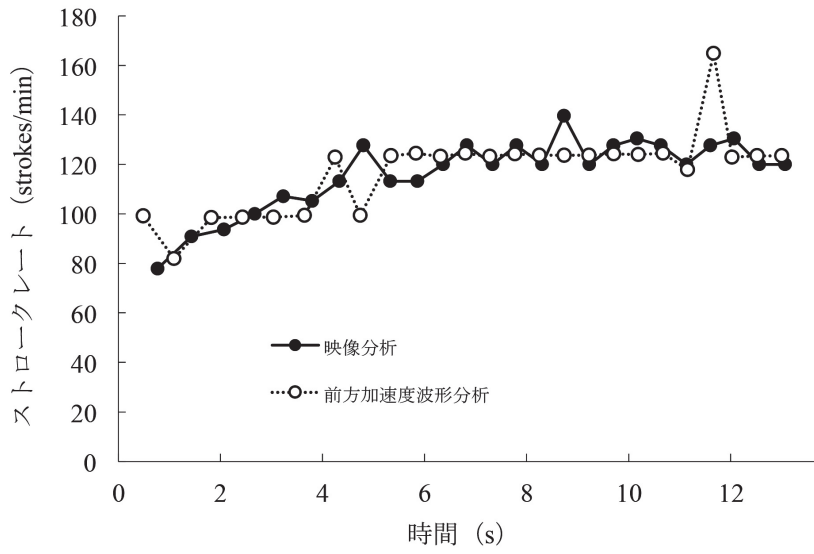
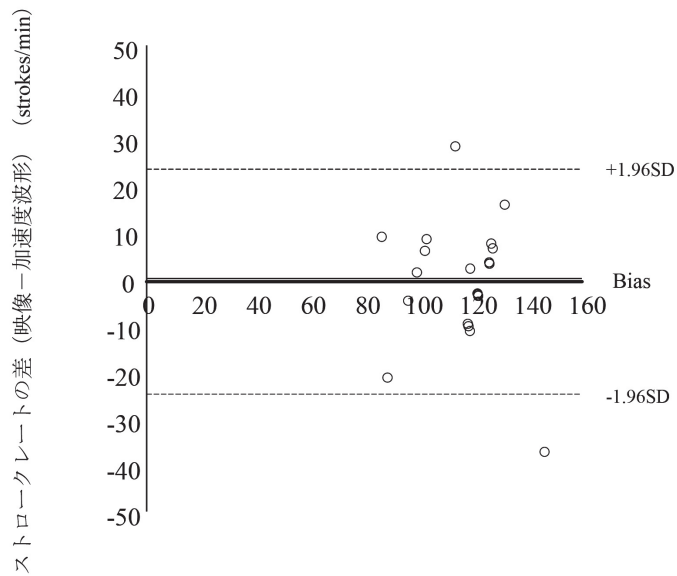


図2. 映像及び加速度波形から算出した1ストローク毎のストロークレート



映像及び加速度波形から算出されるストロークレートの平均値 (strokes/min)

図3. 1ストローク毎のストロークレートのBland-Altman Plot

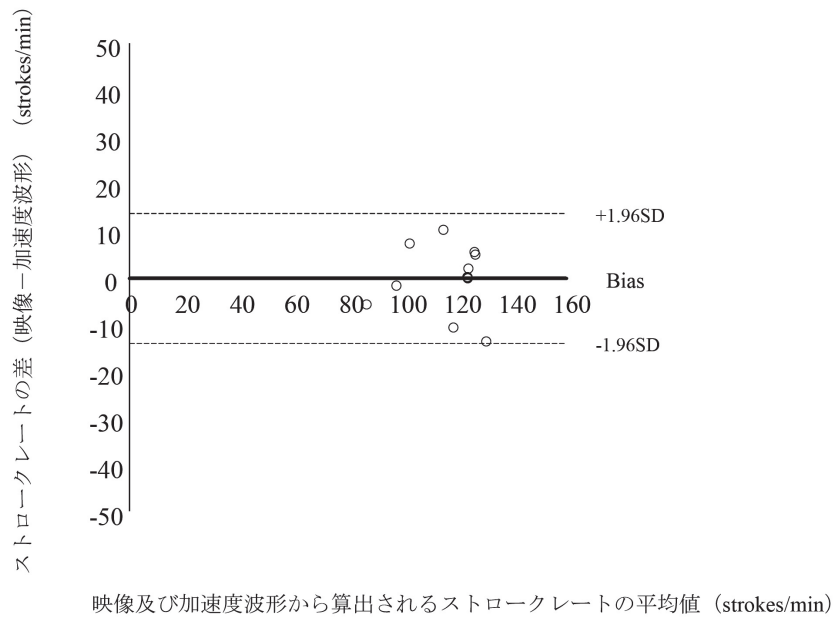


図4. 2ストローク毎のストロークレートのBland-Altman Plot

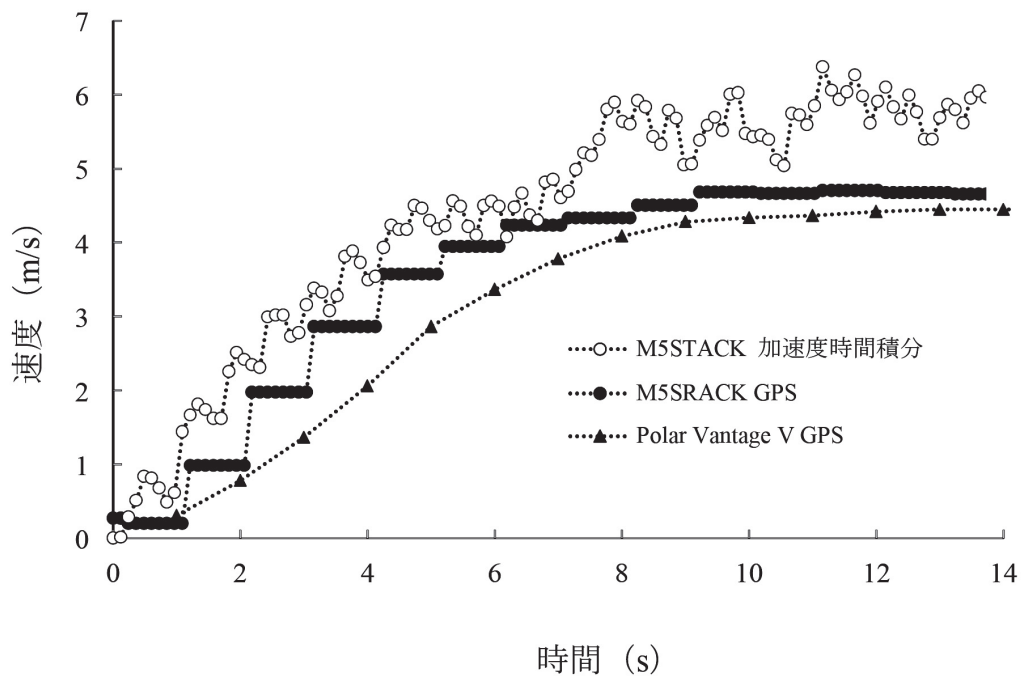


図5. 加速度を時間で積分した速度, M5STACK デバイスのGPS速度及びGPS心拍計の速度

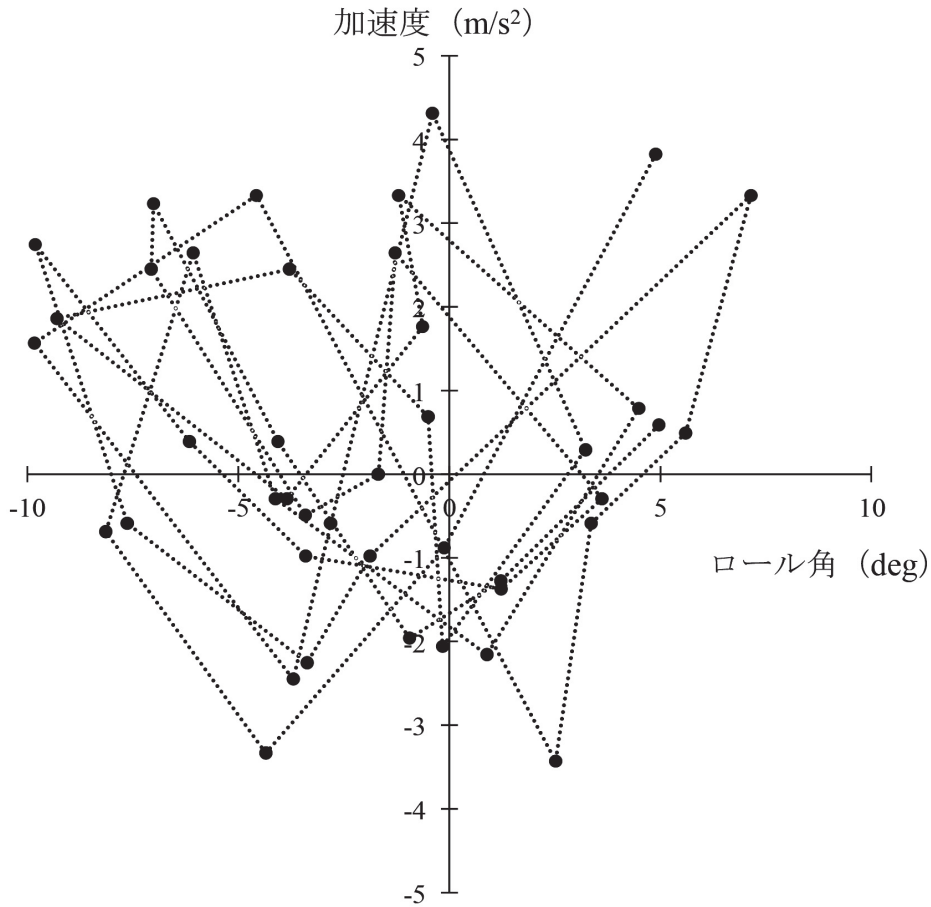


図6. カヤックパドリング中のリサーチ図形

IV. 考察

本研究の目的は、M5STACK を用いて簡便かつ安価（既製品の1/30 - 1/50）な艇速度及び艇挙動を評価するデバイスを試験的に構築することであった。カヌースプリント競技では、レースタイムとSRとの間に強い負の相関関係が報告されている^{3), 4)}。したがって、選手やコーチにとって、レースやトレーニング時のSRのデータは、競技パフォーマンスを改善するための重要な情報となる。

本研究では、M5STACK デバイスから得られる推進方向への加速度波形から1ストローク毎のSRを算出した。映像及び加速度波形から算出したSRには、固定誤差及び比例誤差は認められなかったものの、誤差の許容範囲が高くなった。誤差の許容範囲が高くなった原因は、本研究で撮影した映像のフレームレート（30 fps）及び加速度データのログレート（10 Hz）が何れも低く、両者に誤差が含まれていたことに起因すると推察される。すなわち、SRを算出するための

ストローク間の時間間隔は、映像の場合は0.033秒毎に、加速度データの場合は0.1秒毎に推移している。真のSRが100 strokes/min（1ストローク間の時間間隔が0.6秒）の時、映像の場合は分析フレームが1つ前後すると95あるいは106 strokes/minに、加速度データの場合はピーク波形の分析点が1つ前後すると86あるいは120 strokes/minに変化する。したがって、加速度データから妥当性の高い1ストローク毎のSRを算出するためには、加速度データのログレートを30 - 60 Hz程度まで高める必要がある。

一方、加速度データのログレートの増加は、データ数の増加をもたらす。トレーニング現場での活用・普及を目指すのであれば、データ精度と分析の負担のバランスを考える必要がある。そこで本研究では、2ストローク毎のSRを算出することによって、誤差の許容範囲がどの程度変化するかを検討した。映像及び加速度波形から算出したSRの誤差の許容範囲は、1ストローク毎の分析では-24.6—23.4 strokes/minで

あったのに対し、2ストローク毎の分析では、-14.1—13.6 strokes/min まで改善した。著者の経験では、トレーニング現場において、50 m あるいは 100 m 毎のタイム（平均速度）及び平均 SR に着目することが多い。このような区間平均の SR を求めるのであれば、10 Hz 程度の低いログレートであっても、その妥当性に著しい悪影響を及ぼさないものと推察される。SR 分析目的に応じた最適な加速度データのログレートについては、今後の検討課題としたい。

M5STACK デバイスの静止状態からの加速局面の GPS 速度は、加速度を時間で積分した速度よりも低値を示す傾向にあった。この差は、GPS データと加速度データのログレートの違いに起因する可能性がある。加速局面の GPS 速度のデータの妥当性を高めるためには、GPS データのサンプリングレートを増加させる必要があるかもしれない。ただし、加速度を時間で積分した速度のデータにも誤差が含まれることに留意する必要がある。陸上環境とは異なり、水上環境において妥当基準となる厳密な距離を測定することは困難であることから、本研究では M5STACK デバイスから得られる速度データの妥当性を検討することはできなかった。加速局面や定常局面における M5STACK デバイスの速度データ（加速度積分・GPS）の妥当性は、レーザー速度測定器等を利用して改めて検討する必要がある。

カヌースプリントの国内トップレベルの選手を対象とした研究では、艇のロール角（x 軸）と推進力（y 軸）のリサージュ図形を描くと、横 8 の字を示すことが報告されている⁵⁾。すなわち、左右のストロークを 1 パドリングサイクルと捉えると、ロール角（x 軸）の周波数 1 に対して、推進力（y 軸）の周波数は 2 となる。この両者の波形に位相がないと仮定した場合のリサージュ図形を示すと、図 7 のように横 8 の字を示す。本研究では、艇のロール角（x 軸）及び加速度（y 軸）のデータから、リサージュ図形を描いた（図 4）。本研究の被験者は、右ストローク時に生じる右舷の下降と比較して、左ストローク時に生じる左舷の下降の方大きくなり、ロール角に左右差が認められた。また、先行研究の国内トップレベルの選手の図形と比べて、ばらつきが大きかった（波形が不安定）。これまで、カヌースプリント選手におけるリサージュ図形の評価は、国立スポーツ科学センターに設置されている回流水槽を用いて実施されていた。そのため、この評価の実施はナショナルチームレベルの選手に限定されている。本研究で構築した M5STACK デバイスを用いる

と、このような技術評価をトレーニング現場において実施できる可能性が示された。ただし、本研究では、ロール角や加速度データの妥当性について検討できていない。リサージュ図形による技術評価に求められる M5STACK デバイスの IMU データの妥当性や最適なログレートについては、今後さらなる検討が必要である。

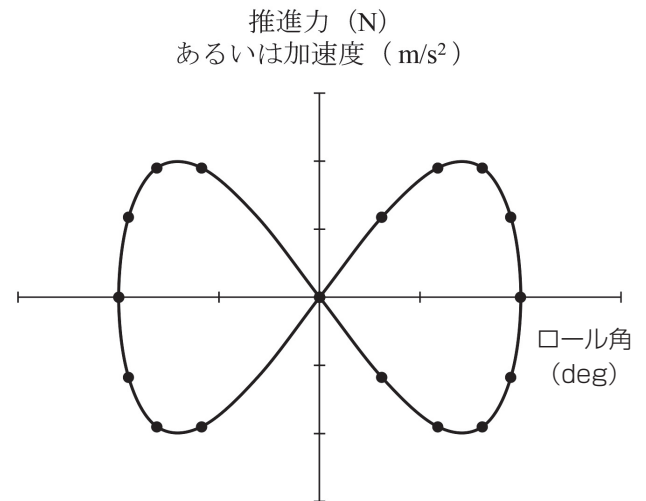


図 7. リサージュ模式図

V. まとめ

M5STACK を用いた簡便かつ安価なデバイスによって、カヌースプリントカヤックパドリング中の SR を加速度波形から評価できることが示唆された。また、艇のロール角及び加速度のデータは、リサージュ図形による技術評価に活用できる可能性が示された。今後は、艇速度及び艇挙動のデータの妥当性・信頼性を明確にする必要がある。

引用文献

- 1) 中垣浩平. バイオメカニクスによる競技サポート～カヌースプリント競技におけるバイオメカニクスサポート～. バイオメカニクス研究, (2014), 18(2): 109-115.
- 2) GitHub: m5-motorcycle-logger, <https://github.com/crowpilot/m5-motorcycle-logger>, 2021 年 10 月 21 日
- 3) McDonnell LK, Hume PA, Nolte V. A deterministic model based on evidence for the associations between kinematic variables and sprint kayak performance. Sports Biomech, (2013), 12(3): 205-220.

- 4) Pickett CW, Abbiss C, Zois J, Blazeovich AJ. Pacing and stroke kinematics in 200-m kayak racing. *J Sports Sci*, (2021), 39(10): 1096-1104.
- 5) 船渡和男, 浅見俊雄. 回流水槽を利用したボート・カヌー競技のトレーニングおよび研究環境の開発 (特集 水上競技の科学). *バイオメカニクス研究*, (2007), 11(2), 130-139.