K-GPSによるOP級ヨットの運動計測

平田 法隆*・松村 和昌**

Motion Measurement of Optimist Dinghy using K-GPS

Noritaka HIRATA and Kazumasa MATSUMURA

Abstract

Optimist Dinghy is one of the most popular sailing dinghies for children who are up to 15 years old. However, its performance has not been clarified so far. This time, the motions were measured using Kinematic GPS (K-GPS) of the Optimist Dinghy which actually sailed several times around the track including abeam, close hauled and running conditions at the sea where the influence of wave and tidal current is negligible. The relation between attitude (pitch and roll) and ship speed was captured. From the measurements, it was found that the even keel is the most suitable condition for Optimist Dinghy and the polar diagram is quite different from that of 470-class dinghy.

Keywords : Optimist Dinghy, Kinematic GPS, Polar Diagram, Measurement Position and Attitude

キーワード: OP 級ヨット, K-GPS, ポーラーダイアグラム, 位置姿勢計測

1. はじめに

Optimist Dinghy(OP 級ヨット、以下 OP 級)は、15 才以下の子供に使用されるもので、強風下でも姿勢が保たれ、容易に操縦できることから、ヨットの入門艇として活躍している。

これまでのヨット研究の中で、OP 級の研究はほとんど行われておらず、帆走性能が把握できていない状況にある。2007 年に広島県ヨット連盟から OP 級の推進性能向上を図りたいとの依頼により、姿勢を変化させた抵抗試験を実施し、船速 1.5m/s あたりから造波抵抗が増加することと、トリムなしでヒールさせると船体抵抗が小さくなることが分かった⁽¹⁾。そこで、更に帆走性能の把握を行うため、本研究では海上で実船試験を行って、風向、風速および姿勢と速力の関係が明らかになったので報告する。

Fig. 1 Optimist Dingy

2. OP 級の概要

OP 級は Fig.1 に示すように箱形の船型で、非常に大きな舵と出し入れできるセンターボードを持つ 1 枚帆のヨットである。本試験は実艇を用いて行った。OP 級の主要目を Table 1 に示す。

Table 1 Principal dimensions of Optimist Dinghy

$L(m)$	2.31
$B(m)$	1.13
Weight(kgf)	42.1

* 正会員 広島大学大学院工学研究院 nhirata@hiroshima-u.ac.jp

** 学生会員 広島大学大学院工学研究科 m096354@hiroshima-u.ac.jp

Fig. 2 Layout of Kan-non marina

3. 試験内容

3.1 海上試験

OP 級の帆走性能を把握するため、2008 年 9 月 22 日に Fig. 2 に示す広島市西区にある広島観音マリナーのヨットハーバー内で海上試験を行った。閉鎖された海域であるため、波・潮流の影響は少なく、風速は 2~5(m/s)であった。

レースと同様に風上・風下・サイドの 3 点にマークを打ち、操縦者がフラット・ヒール・トリムの 3 姿勢でそれぞれ 3 周ずつ(全 9 周)周回した。この 3 点のマークを周回することで、風上に向かって走るクローズホールド、後ろから風を受けて走るランニング、横から風を受けて走るアビームというヨットの基本的な帆走状態を測定した。なお、マークの間隔はハーバー内という制約のため、約 40m とした。また、操縦者による違いを調べるため、大学生 2 人の操縦者に帆走してもらった。2 人の操縦者の違いを Table 2 に示す。また、センターボードはアビームとクローズホールドでは完全、ランニングでは半分下ろした状態で航走している。

Table 2 Characteristics of Skipper

Skipper	A	B
Weight(kgf)	69.5	66.5
Experience(year)	1.5	0.5

3.2 実験機材

今回の実験では、運動計測に GPS アンテナを 3 個使用して姿勢が得られる K-GPS 受信機を使用した。基準点から計測地点までの基線長は 350m 程度であるので RTK-GPS も可能であったが、搭載する機器の軽量化を図ることと、補正情報を得るための通信に信頼性を確保することが困難である点から後処理方式の Kinematic GPS(K-GPS)を使用し、データは内蔵の CF カードに保存することによって、計測中は PC を使用しないシステム構成とした。そして、後処理によってそれぞれの GPS アンテナの位置と高さを求め、船速や 3 次元的なヨットの姿勢を求めた。また、Fig.3 に示すようにマストの上部に超音波式風向風速計(a)を設置し、GPS の時刻情報と共に PocketPC(b)に保存した。そして、マストの真下に防水パックに入れたビデオカメラ(d)、舵上部には操縦を妨害しないよう小型防水カメラ (e)を設置して、帆と舵の角度を映像によって計測した。

Fig. 3 Measurement equipments

GPS が出力する姿勢データと後処理の精度比較を行うため、GPS を広島大学工学部の屋上に設置し、1 時間定点観測を行った。GPS の姿勢データの誤差を Table 3、後処理で求めた姿勢データの誤差を Table 4 に示す。方位を求める解析方法が GPS は前後のアンテナ、後処理では左右のアンテナを基準にして方位を求めているため、角度の絶対値が異なっているが、標準偏差、誤差の最大値共に後処理の方が良いことがわかる。ただし、今回の計測は基線長が短い、基線長が長くなった場合、K-GPS ではすべての基線

長が長くなるが、GPS の姿勢データの方は Main アンテナと Aux1, 2 アンテナとの相対関係で決まるため基線長は短いままのため、精度が基線長に依存する K-GPS の方が精度は悪くなる可能性がある。ただし、Aux1, 2 は一周波であるため、長距離では K-GPS が使用できない。

Table 3 Accuracy of attitude by GPS

(deg)	Heading	Pitch	Roll
Average	90.824	-0.370	-0.036
Std. dev.	0.043	0.075	0.093
Min.	-0.289	-0.291	-0.387
Max.	0.088	0.369	0.216

Table 4 Accuracy of attitude by K-GPS

(deg)	Heading	Pitch	Roll
Average	90.143	0.300	-0.112
Std. dev.	0.020	0.057	0.071
Min.	-0.061	-0.191	-0.234
Max.	0.066	0.217	0.269

Fig. 4 Arrangement of GPS antennas

GPS アンテナは Fig. 4 に示すように、船首中央に 1 台(Fig. 3-c)、後方両サイドに 1 台ずつ設置した。また、後方のアンテナは Fig. 3-f に示すように船体より後方に張り出して取り付け、ブームに当たったり、操縦者を妨害したりすることのないようにした。そして、針路は右舷後方のアンテナを基準として、左舷後方のアンテナの向きを求め、それに 90° 加えることによって求めた。次に Table 5 に広島大学の屋上における精度検証時と OP 級に取り付けた実験中のアンテナ間距離の精度を示す。これより、静止時と比較して航海中は精度が悪化していることがわかる。

これは、アンテナが振動することによってアンテナ間隔が変動したり、操縦者やセールやブーム、マストが障害物となったり、マルチパスが増加したことが原因であると考えられる。それでも、標準偏差は 1cm 以下であるので運動計測に与える影響は小さい。

Table 5 Accuracy of distance between antennas

Case	Fixed		Sailing	
Antennas	F - R	L - R	F - R	L - R
Average(m)	5.518	5.461	2.575	1.029
Std. dev.(m)	0.002	0.002	0.007	0.007

Fig. 5 Coordinate Systems

4. 解析方法

Fig. 5 に座標系を示す。座標系は右手系で鉛直下向きに z 軸を取った。また、帆や操縦者の移動により重心が変化するため、船体固定座標系の原点は船体中央とした。 U は船速、 u は前進速度、 v は横速度、 β は斜航角(リーウェイ)、 W_A は相対風速、 γ_A は相対風向、 W_T は真風速、 γ_T は真風向、 δ は舵角、 τ は帆角、 ϕ はヒール角、 θ はトリム角を表す。

Table 6 Averaged values measured in abeam condition (Skipper A)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	P (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	τ (deg)	δ (deg)	U/W_T
2	4.0	0.4	1.2	-4.6	292	269	250	3.7	30	2.0	0.33
3	2.3	0.3	1.1	-2.8	297	252	229	2.5	35	3.0	0.42
5	5.5	0.5	1.2	-6.3	285	281	263	4.0	30	5.0	0.31
6	4.4	0.4	1.0	-5.5	295	272	251	2.7	35	5.0	0.36
7	0.6	0.3	1.5	-5.5	292	267	245	3.3	35	2.5	0.36
8	1.5	0.6	1.5	-4.1	292	276	255	4.1	40	2.5	0.36
9	2.3	0.3	1.2	-6.0	290	274	255	3.8	30	0.0	0.32

Table 7 Averaged values measured in close hauled condition (Skipper A)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	P (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	τ (deg)	δ (deg)	U/W_T
2	-3.7	0.5	0.8	-0.7	123	53	66	2.9	10	2.5	0.29
3	-3.5	0.2	1.2	0.8	138	44	57	3.5	20	0.0	0.34
4	-9.6	1.1	0.7	1.7	138	41	54	2.1	20	0.0	0.36
5	-10.2	1.0	0.8	1.1	139	43	54	2.7	15	0.0	0.29
6	-10.4	1.5	0.8	1.8	163	18	21	3.9	20	0.0	0.21
7	-4.3	0.3	0.9	-0.5	138	49	62	2.8	10	0.0	0.31
8	-6.7	0.7	0.6	-3.3	128	48	60	2.2	20	0.0	0.27
9	-6.3	0.1	1.3	1.1	140	45	61	3.4	15	0.0	0.39

Table 8 Averaged values measured in running condition (Skipper A)

No.	ϕ (deg)	θ (deg)	U (m/s)	β (deg)	P (deg)	γ_A (deg)	γ_T (deg)	W_T (m/s)	τ (deg)	δ (deg)	U/W_T
2	-1.6	0.8	1.4	-0.4	52	144	156	3.6	-60	-3.0	0.40
3	-1.3	0.4	1.2	-2.5	56	125	143	3.1	-60	0.0	0.39
4	-8.6	1.3	1.2	-3.6	42	153	163	3.3	-70	-5.0	0.37
5	-6.6	0.9	1.1	-2.9	53	156	164	3.0	-70	-5.0	0.38
6	-5.7	0.3	1.3	-3.5	46	146	161	2.9	-70	-3.0	0.44
7	-1.0	0.1	1.4	-3.5	51	142	157	3.3	-70	0.0	0.41
8	-3.7	0.0	1.2	-3.3	51	155	164	3.1	-60	0.0	0.38
9	-3.2	-0.1	1.2	-4.3	59	114	138	2.9	-65	0.0	0.44

3 点の GPS の緯度・経度・高度と風向風速計により計測された相対風向・相対風速のデータから、針路 P ・速力 U ・斜航角 β ・ヒール角 θ ・トリム角 ϕ ・真風向 γ_T ・真風速 W_T を算出する。また、セール・ラダーのカメラから、ブーム角 τ と舵角 δ を計測する。計算により得られたデータの中で、Fig. 6 のように直線

的に帆走している部分を取り出し、それぞれ平均値を求めた。

5. 解析結果

Table 6, 7, 8 に操縦者 A のアビーム、クローズホールド、ランニング帆走時のデータを示す。9 周して

Fig. 6 Approximation of three conditions

いるので本来なら各データは 9 組ずつ得られるが、

変動が大きく平均できない部分は除いた。また、いずれの場合も、 U は 1.5m/s 以下で、造波抵抗が増加し始めるより低い領域で帆走している。さらに、 δ は 5° 以下であるので操舵の影響は小さい。

Table 6 のアビームでは、3 周目を除き γ_T は 255° 前後、 β は -5.5° 前後、Table 7 のクローズホールドでは γ_T は 60° 前後、 β は 1° 前後、Table 8 のランニングでは 3 周目を除き γ_T は 160° 前後、 β は 3° 前後と変動が少ない。また、 ϕ は最大でも 10° 程度で、帆の投影面積に与える影響は 1.5% と小さい。そこで、舵角や帆のヒール影響は無視して姿勢と船速—真風

(a) Abeam condition

(b) Close Hauled condition

(c) Running condition

Fig. 7 Relation between speed and trim angle

(a) Abeam condition

(b) Close Hauled condition

(c) Running condition

Fig. 8 Relation between speed and heel angle

速比 U/W_T との関係について検討を行った。

Fig. 7 にトリム角 θ と U/W_T の関係、Fig. 8 にヒール角 ϕ と U/W_T の関係を示す。なお、各々の図において(a)は風を横から受けるアビーム、(b)は風を斜め前方から受けるクローズホールド、(c)は風を後ろから受けるランニングの状態の結果で、 U/W_T の値が大きい程、効率良く風速を船速に変換していることを表している。実線は A、破線は B のデータを最小自乗近似したものである。

Fig. 7 を見ると、操縦者 A(▲)はフラットか後ろトリム、B(■)はフラットか前トリムで帆走していることが分かる。Fig. 7(a)のアビームではトリム角 θ が 0° に近づくほど速度が速いことが見てとれる。また、A と B を比較すると後ろトリム気味の A の方が速いことが分かる。以上のことから、アビームでは、姿勢はフラットで帆走するのがもっとも良く、前トリムよりは後ろトリムの方が良いと言える。次に、(b)クローズホールド、(c)ランニングについても同じ解析を行ったところ、B のランニングでフラットの速度が特に遅いため近似直線が逆の傾向になっているものの、全体としては、どちらもアビームと同様に、フラットで帆走するのがもっとも良いという結果を得た。特に、アビームとクローズホールドではトリムの影響が大きいことがわかった。

Fig. 8(a)に示したアビームにおいて、操縦者 A(▲)はヒール角 ϕ が 0° に近づくほど効率が良くなっている。しかし、B の場合、 ϕ が大きくなるほど効率が良くなっているが、これは、 ϕ の大きい時にトリム角 θ が小さいためと考えられる。(b)のクローズホールドも同様にフラットの方が良いが、 -10° あたりでは同じ ϕ で値がばらついており、 U/W_T が小さくなっている時はトリム角が大きい時に相当するので ϕ より θ の影響の方が大きいと考えられる。次に、(c)のランニングの場合、A は線形近似ではヒールさせた方が遅くなるが、フラットより 5° 程度ヒールさせた方が U/W_T が大きくなっており、ランニングではヒールさせた方が良いことがわかる。B は θ の変化が小さいため、近似精度が悪い。

Fig. 9 に示す二人の航跡を比較すると、クローズホ

ールドでの航路が大きく異なることが分かる。1 人目は、風向に対し約 60° を保ち帆走しているのに対し、2 人目は、風向に対し常に 45° を保ち帆走している。この航路差が周回タイムにどれほど影響しているかを調べるため、1 周分の周回タイムを平均により求めた。周回タイムを Table 9 に示す。

Fig. 9 Comparison of 2 skipper's track log

Table 9 を見ると、B より A の方が、平均風速が遅いにもかかわらず平均船速は速く、1 年間の経験の差が現れていることがわかる。しかし、帆走距離が 18m 長いため、平均周回タイムが 14s 遅くなっている。そこで、今回計測したデータを基にポーラーダイアグラムを作成し、タイム差について考察する。

Table 9 Averaged values of lap, track length, speed etc.

Skipper	Lap(s)	Length(m)	SPD(m/s)	Wind(m/s)
A	145	152	1.04	3.1
B	131	134	1.03	3.3

6. ポーラーダイアグラム

ポーラーダイアグラムとは、一定の風向風速の下で、真風向から見た船の進行方向($\gamma_T + \beta$)により変化する船速を図で表したものである。Fig. 10 に OP 級と真風速 5m/s の 470 級⁽²⁾のポーラーダイアグラムを示す。Table 10 に示すように 470 級は全長が 4.7m と、OP 級の約 2 倍の大きさの 2 人乗りヨットである。

Fig. 10 を見ると、風を約 90° で受けるアビームでの帆走が 470 級に比べ OP 級は大きく凹んでいて、アビーム、クローズホールド、ランニングともに、

船速にあまり差がないことが分かる。

Fig. 10 Polar diagram

Table 10 Specifications of OP and 470

Class	OP	470
Loa(m)	2.31	4.7
Lpp(m)	2.165	4.4
Weight(kgf)	42.1	120
Mast(m)	2.35	6.76
Sail Area(m ²)	3.30	12.70
Jib(m ²)	-	3.58
Main(m ²)	3.30	9.12
Spinnaker(m ²)	-	13

今回の操縦者は、普段 470 級やスナイプ級を操縦している。そのため、OP 級を 470 級やスナイプ級と同じポーラーダイアグラムと考え帆走したと考えられる。特に 1 人目は、風向に対し約 60° を保ち帆走しており、これは 470 級のポーラーダイアグラムから分かるように、船速を上げる事を意識して取った航路と言える。470 級の場合、1 人目のように、風向に対し約 60° を保ち帆走すると、風向に対し 45° を保ち帆走した 2 人目に比べ距離は長くなるが、速度が速いため、これほど大きなタイム差は生じない。しかし、OP 級のポーラーダイアグラムは、470 級と大きく異なり、アビーム、クローズホールド、ラン

ニングともに、船速にあまり差がなかった。そのため、風向きを意識するより短い距離を帆走した B の方が経験は浅いが、速いタイムとなった。したがって、OP 級の特徴を知った上でのコース取りが重要となる事がわかる。

7. 結言

今回、海上試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 抵抗試験ではヒールさせた方が抵抗は小さくなったが、実船試験では、概して、姿勢はトリム、ヒールともにフラットにした方が速い。
- (2) 姿勢の影響はヒールよりトリムの方が大きく、特に前トリムになると速度が遅くなる。
- (3) クローズホールドは特にトリムの影響が大きい。
- (4) ランニングでは少しヒールさせた方が速い。
- (5) OP 級は、アビーム、クローズホールド、ランニングともに、船速にあまり差がない。

実船試験で、明確な姿勢変化を付けることができなかったため、姿勢に関する推定精度が良くなかった。また、今回はポーラーダイアグラムの作成を念頭に置いた実験を行っていないため、ポーラーダイアグラムは 60~100° や 180° 付近が欠けており、詳細な特徴をつかむためには、さらに多くの計測が必要である。また、今回計測できなかったセンターボードの影響についても検討する必要がある。

謝辞

本研究の実施に当たり、卒業研究として実船計測ならびに計測結果のとりまとめにご協力いただいた西村健氏、OP 級の手配や実験海域の確保にご尽力いただいた広島県ヨット連盟参与の寺西佳弘氏、ヨットを操縦していただいた広島大学ヨット部の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 平田法隆・安川宏紀：OP 級ヨットの抵抗性能について、舟艇技報, No.101, pp. 17-19, 2010.1.
- (2) 増山豊：470 級の帆走性能解析, JSAF 技術委員会, <http://www.jsaf.or.jp/gijyutu/2006/sim470/index.html>, 2006.4.

質疑応答

芳村康男（北海道大学大学院水産科学研究院）：

帆走性能を実艇で求める場合、風速、船速の計測精度が問題になる。本研究では精密な GPS を用いて、対地速度は正確であるが、対水流速はどの程度の精度になるのでしょうか。

平田法隆：

海上で実船試験を実施する場合、潮流や波の影響を考慮する必要がありますが、本実験は、防波堤に囲まれた、バースの奥まったところで実施しており、潮流等の影響は無いものと見なし、流速の計測は行っておりません。

疋田賢次郎（(独)海上技術安全研究所）：

Sailing Dinghy においては、直進中に於いても舵角 (Rudder Angle)、斜航角の影響が大きいと思うが、計測しているのか。また、その船速への影響は如何。

平田法隆：

斜航角は GPS より得られた方位角と運動ベクトルとの差、舵角はビデオ撮影により得ております。しかしながら、Table 6-8 に示しますように同じような状態で繰り返し計測を行っており、船速への影響が判断できるような明確な差は得られておりません。

これらの影響について検討するには、曳航水槽で斜航試験や舵角試験を実施する必要があります。