帆船日本丸の Leeway の測定結果について

磯 崎 道 利*

The Experimental Study on the Sailing Performance
of the Sail Training Ship Nippon Maru

—On the Measurement of the Leeway—

Michitoshi ISOZAKI

Abstract

Nippon Maru, 2570 tons, 4-masted bark, was built in 1984 as a sail training ship.

Experiments to measure her sailing performance by several researchers have been carried out, and her characteristics is gradually being clarified. The author measured the Leeway on her various conditions.

The summary of the results are as follows.

- (1) The Leeway mostly depends on ship's speed, angle of yards and apparent wind direction.
- (2) The Leeway also depends on sail condition.
- (3) The Leeway is able to estimate using some factors.
- (4) An ideal sailing method from the Leeway point of view is shown.

1. はじめに

日本丸の帆走性能に関する研究については、すでに多くの報告がある^{(1)~(7)}。

帆走性能には、一定の風の下でどれだけの速力が得られるかという速力率（真風速に対する船速の割合をいう、以下同じ）、風上にどれだけ上れるかという切り上がり角度、タッキング等の操帆性能などがある。

さて、帆船は必ずしも船体中心線の方角に進まずある横流れ角（以後 Leeway と呼ぶ）を持って斜航することが多い。

Leeway は、帆走性能の切り上がり角度に大きく影響を及ぼすばかりではなく、航海中に於いては船位推定上非常に重要な値となる。帆船の操船者は船体中心線と自船の航跡とのなす角度を目測してこの Leeway を決定することが多い。しかしこの Leeway について系統的に調査研究した例は少ない⁽⁸⁾。

今回日本丸の Leeway を測定し、若干の知見を得たので報告する。

2. 測定海域及び測定方法

測定は、昭和62年5月31日～昭和63年8月6日までの日本丸の3回の遠洋航海中に行った。日本～サンフランシスコ、日本～ビクトリア、日本～シドニー間の航路である。表1に日本丸の要目を、図1に一般配置を示す。船体コンディションとして、出港時と入港時を代表して表2に示す。3航海とも出港時及び入港時はほぼこれと同じ値であった。本測定においては、日本丸装備の音波ログ（古野電気 CI-20-HD）で測定される Drift 角を Leeway とした。これは、図2に示す通り、船体中心線方向の Speed と正横方向の Speed から求められる船の移動方向の船体中心線とのなす角度である。

* 正会員 運輸省航海訓練所（〒100 千代田区霞ヶ関2-1-3）

表1 日本丸要目

全長	110.09 m
垂線間長	86.00 m
型幅	13.80 m
型深	10.71 m
総トン数	2570 GT
満載排水量	4729.9 M.T.
帆装形式	4 檣バーク型
帆面積合計	2760 m ²
帆枚数	横帆 18 枚 縦帆 18 枚
マスト最大高さ(基線上)	55.52 m
ヤード最大長さ	25.50 m

表2 日本丸船体コンディション

	神戸発	Victoria着
排水量	4703.9 M.T.	4115.3 M.T.
喫水 F	6.36 m	5.44 m
A	6.66 m	6.40 m
M	6.51 m	5.92 m
トリム	0.30 B/S	0.96 B/S
GM	1.08 m	0.61 m

図1 日本丸一般配置

Leeway測定記録

年 月 日 時

初期条件

風向 風力 天候 気圧
 湿度 乾 湿 海
 うねり 方向 風浪
 高さ M 高さ M
 周期 sec 周期 sec

船位(NN55による)

N,S

E,W

ヤード tack point

セール

(展帆していないセール)

図2 Leeway 及び相対風向

測定回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
時刻											
Drift(Deg.)											
船首方位											
船速(前)	D.S.Log										
後方向)	E.M.Log										
相対風向(Deg.)											
相対風速(k't)											
傾斜角(Deg.)											
舵角(Deg.)											
有義波高(波高計より)											
出会い周期(")											
プロペラ回転数(r.p.m)											

注意

10回の測定の平均値を求める。(各測定は1分間隔とする)

波高計の値は10回目の測定値のみとする。

図3 測定記録用紙

測定は、図3に示す記録用紙を用いた。そして、Drift 角・船速(音波ログの表示する船体中心線方向のSpeed)・相対風向・相対風速(光電電気 KA101型 風向風速計の示す値)・傾斜角(クリノメータの示す値)・舵角(フード内舵角指示器の示す値)・有義波高・出会い周期(マイクロ波レーダー波高計の示す値)・プロペラ回転数を測定した。各項目ごとに毎1分の値を求め、10分間を平均して1回の測定とした。さらに、測定期間中のヤードの状態と展帆状態等も記録した。

全測定回数は324である。

図4、図5に風力及び有義波高の分布を示す。

3. ヤードの開き角度・相対風向・展帆状態

図6に示す通り、ヤードを船体中心線に対して正横とした状態を square yards と呼ぶ。そして、この状態からヤードを旋回していくことをヤードを開くと言う。さらに、開き角度を point で表わし 2 p'ts yards とか 3 p'ts yards などと言う。一杯に開いた状態を sharp up yards と言い 4.9 p'ts yards に相当する⁽⁵⁾。

日本丸では通常ヤードの開き角度は、メインマストのロアトップヤードを基準にしている。同じマストであれば、基準ヤードの下方のローヤードがわずかに開き角度が大きくなり、逆に基準ヤードより上方になるにしたがってわずかに開き角度が小さくなっている。また、フォアマストはメインマストよりわずかに開き角度が大きく、ミズンマストはメインマストよりもわずかに開き角度が小さくなっている。

相対風向 r_A は、図2に示す通り船体中心線と見掛けの風向とのなす角度を、船首方向を基準にして度数で示したものである。

日本丸では、昼間気象状況がよければ図1に示す36枚をすべて展帆する。この状態を All Sails と呼ぶ。この状態からなんらかの事情で縦帆を降ろした状態、つまり横帆についてはすべて展帆しているのだが縦帆については一部しか展帆していない状態を With Royal と呼ぶことにする。

さらに Royal など一部の横帆を絞帆したとき、つまり横帆・縦帆共一部しか展帆していない状態を Without Royal と呼ぶことにする。

図7 船速と Leeway

図4 風力分布

図5 有義波高分布

図6 ヤードの開き角度

図8 船速と Leeway (Sharp up yards)

4. 船速と Leeway について

帆船の Leeway については、船速を用いて整理される例が多い。このことは初代海王丸について報告されている⁽⁸⁾。今回もこれにならい船速を用いて整理した。図7に全測定値の船速と Leeway の関係を示す。大雑把に反比例の関係であることが分かる。

4.1 ヤードの開き角度を変化させた場合

図8は、Sharp up yards の時の船速と Leeway の関係である。Without Royal は■印及び点線で、With Royal は+印及び一点鎖線で、All Sails は*印及び実線で示した。ここで、点線、一点鎖線及び実線は、それぞれの測定値の最小自乗法による指数近似曲線を示す。各展帆状態に於いて、船速が大きくなれば、Leeway は減少することがわかる。この傾向は、他のヤードの状態でも同様であった。

図9 各ヤードの開き毎の船速と Leeway (Without Royal)

そして、Without Royal での各ヤードの開き角度毎に、船速と Leeway の関係を指数近似曲線で表わしたのが図9である。同じ船速でもヤードの開きが小さければ、Leeway は小さくなることがわかる。これは、All Sails でも With Royal でも同様であった。

4.2 相対風向を変えた場合

我々は、 r_A の変化にあわせて最も効率よく運航できるようにヤードの開き角度を調整している。しかし、必ずしも同じヤードの開き角度の時、同じ r_A となるわけではない。そこで、 r_A に着目して船速と Leeway の関係について調査した。

図10は r_A が 60° 以上 90° 未満の時の船速と Leeway の関係である。各展帆状態に於いて、船速が大きくなれば、Leeway は減少することがわかる。この傾向は他の r_A の範囲についても同様であった。

図10 船速と Leeway ($60^\circ \leq r_A < 90^\circ$)

図11 相対風向毎の船速と Leeway (Without Royal)

そして, Without Royal で, 各 r_A の範囲における船速と Leeway の関係の指数近似曲線を示したのが図11である。同じ船速でも r_A が大きければ, Leeway は小さくなることがわかった。これは, All Sails でも With Royal でも同様であった。

4.3 展帆状態を変えた場合

図8から, 展帆状態を変えた場合の船速と Leeway の関係が分かる。Sharp up yards で同じ速力であれば, Leeway は, With Royal < All Sails < Without Royal となる。

図10からは, $60^\circ \leq r_A < 90^\circ$ で速力が 6 k'ts 以下であれば, これと同じ結果になる。このように, 展帆状態を変えると, 船速と Leeway の関係も変わってくるのが分かった。

4.4 ヤードの開き角度一定で r_A を変えた場合

ヤードの開き角度一定の時の r_A は, Sharp up を除いてほぼ一定していた。Sharp up の時で, 風上にできるだけ切り上げようとする場合には r_A の値が小さくなることもある。この時の船速と Leeway の関係を示したのが図12である。これは, Without Royal の場合であるが, r_A が 40° 以下になると極端に Leeway が大きくなるのが分かる。

4.5 プロペラの遊転の影響

プロペラの遊転が帆走性能, 特に速力率, に大きな影響を与えることは明らかである⁽¹⁾⁽⁵⁾。しかし, これが Leeway にどう影響するのかわはいまだ明らかになっていない。そこで, 図8に示す二つの測定を行った。共に, Sharp up yards, Without Royal の状態であり, 風力は6であった。測定 No.102は, 日本丸を徐々に風上に切りあげてミズンマストのセイルにわずかに裏風が入るようにして船速を落としプロペラの遊転を止め, その後プロペラが遊転を開始しない程度の船速(約 4 k'ts)に針路を保った時の値である。測定 No.103は, 測定 No.102と同様にして船速を落としプロペラが遊転を停止しない船速(約 5 k'ts)に針路を保ったときの値である。

図8に示すようにプロペラ停止時の Leeway

は船速 4.1 k'ts で 15.4° , 遊転時は船速 5.1 k'ts で 14.5° であった。この図から, この Leeway 1° の違いは, プロペラが遊転しているか否かによるよりも, 船速が 1 k't 変化したことによって起こるものと考えられる。つまり, プロペラの遊転そのものは直接には Leeway に影響を及ぼさないとみられる。そこで, 船速と Leeway の関係をプロペラの遊転の有無によって整理した。図13は, Without Royal の時の関係である。プロペラが遊転している時は□印で, 遊転していない時は○印で示してある。さらに□印及び○印の最小自乗法による指数近似曲線を①及び②として示した。さらに, 両者を合わせた近似曲線を③として示した。

日本丸はプロペラの遊転が 7 k'ts 程度で始まり, 船速が落ちて 4 k'ts 程度になると遊転が停止することが多い。

①, ②の曲線で船速 4~7 k'ts を見ると Leeway はほぼ同じとなる。つまり, プロペラが遊転しているか否かということよりも, 船速で Leeway が決まることがわかるのである。このことは他の展帆状態に於いても同様であった。

4.6 r_A と展帆状態を変えた場合

以上のことから Leeway は, 船速と r_A と展帆状態によって大きく影響されることが分かる。ここで船速を一定にして, Leeway が r_A と展帆状態によってどう影響されるかを調べた。図14は, 船速が 4 k'ts の時の各 r_A と Leeway を極座標表示したものである。各 r_A の時, 半径方向の目盛が Leeway を示す。With Royal と Without Royal においては, r_A と Leeway とは反比例の関係にあることがわかる。しかし, All Sails の場

図12 ヤードの開き角度一定で相対風向を変えた場合
(Sharp up yards, Without Royal)

図13 プロペラの遊転と Leeway

Leeway 曲線 (Speed 4 k'ts)

図14 極座標による Leeway 曲線

(b) Royal を展帆していることによって All Sails の方が 4% 速力率は大きい⁽⁵⁾。Without Royal で V k'ts で航走している時、Royal を展帆することにより船速は $1.04 V$ k'ts になる。この時の Leeway の増加を α° とすると、風上への進出分が両状態で等しくなる時は

$$\cos \alpha = V / 1.04 V$$

を満足する時である。この場合 $\alpha = 15.9^\circ$ である。

したがって、 $\alpha < 15.9^\circ$ であれば速力率を大きくした方が、風上への進出分は計算上大きくなる。

(c) 両者の Leeway の差は実測で最大 4° である。

(d) (a) (b) (c) から Without Royal よりも All Sails の方が効率が良い。

(ii) $070^\circ \leq \gamma_A < 120^\circ$ について

(a) Without Royal の方が Leeway は小さい。

合は γ_A が小さくなくても他の二つの状態に比べるとそれほど Leeway は大きくならない。 γ_A の 50° 付近では All Sails と With Royal とでは同じ Leeway になる。これは、 γ_A が小さくなることによって縦帆の影響が大きく現われているものと考えられる。ここで、 γ_A の範囲毎に各展帆状態の時の Leeway の大きさを比較すると以下ようになる。

(1) $\gamma_A < 050^\circ$ では

All Sails < With Royal < Without Royal

(2) $050^\circ \leq \gamma_A < 070^\circ$ では

With Royal < All Sails < Without Royal

(3) $070^\circ \leq \gamma_A$ では

With Royal < Without Royal < All Sails

これらのことは他の船速の時も同様であった。

5. Leeway を加味しての帆船の効率運用

同じ船速であれば Leeway は小さい方がよい。しかし、展帆状態を変えることによって、Leeway は若干大きくなるがそれよりも船速が大きくなって、結果的により短時間に風上に進出できることがある。この時我々は、より効率良く帆船を運行しているという。図14から以下のことがいえる。

(1) With Royal と Without Royal について (Royal による影響)

(a) すべての γ_A に対して With Royal の方が Leeway は小さい。

(b) すべての γ_A に対して With Royal の方が速力率が大きい⁽⁵⁾。

(c) (a)(b)から Without Royal よりも With Royal の方が効率が良い。

(2) All sails と Without Royal について (Royal と stay s'ls による影響)

(i) $120^\circ \leq \gamma_A$ について

(a) Without Royal の方が Leeway は小さい。

- (b) All Sailsの方が, Royal を展帆していることにより4%, stay s'ls を展帆していることにより8%, 合計で12%速力率が増加する⁽⁵⁾。この時 $\alpha=26.7^\circ$ である。
- したがって, $\alpha<26.7^\circ$ であれば, 速力率を大きくした方が, 風上への進出分は計算上大きくなる。
- (c) 両者の Leeway の差は実測で最大 4° である。
- (d) (a) (b) (c) から Without Royal よりも All Sails の方が効率が良い。
- (iii) $\gamma_A<070^\circ$ について
- (a) All Sails の方が Leeway は小さい。
- (b) All Sails の方が Without Royal よりも速力率が大きい⁽⁵⁾。
- (c) (a) (b) から Without Royal よりも All Sails の方が効率が良い。
- (3) All Sails と With Royal について (stay s'ls による影響)
- (i) $120^\circ\leq\gamma_A$ について
- (a) With Royal の方が Leeway は小さい。
- (b) All Sails と With Royal との速力率は等しい⁽⁵⁾。
- (c) (a) (b) から With Royal の方が効率が良い。
- (ii) $050^\circ\leq\gamma_A<120^\circ$ について
- (a) With Royal の方が Leeway は小さい。
- (b) All Sails の方が stay s'ls を展帆していることにより8%速力率が大きい⁽⁵⁾。このとき $\alpha=22.2^\circ$ である。
- したがって, $\alpha<22.2^\circ$ であれば, 速力率を大きくした方が, 風上への進出分は計算上大きくなる。
- (c) 両者の Leeway の差は実測で最大 4° である。
- (d) (a) (b) (c) から With Royal よりも All Sails の方が効率が良い。
- (iii) $\gamma_A<050^\circ$ について
- (a) All Sails の方が Leeway は小さい。
- (b) All Sails の方が stay s'ls を展帆していることにより8%速力率が大きい⁽⁵⁾。
- (c) (a) (b) から With Royal よりも All Sails の方が効率が良い。

6. お わ り に

本研究により以下のことが分かった。

- (1) Leeway は, プロペラの遊転に直接には関係されずに, 船速と, ヤードの開き角度もしくは相対風向に主として依存する。
- (2) Leeway は, ヤードの開き角度が小さい (あるいは γ_A が大きい) ほど, また船速が大きいほど小さい。
- (3) Leeway は, 展帆状態に影響される。同じ船速であれば, Royal を展帆している方がしていない場合よりもこの値は小さい。縦帆を展帆することによる影響については, γ_A が小さい時には Leeway を小さくするようになり, γ_A が With Royal で 50° Without Royal で 70° より大きくなると Leeway を大きくするようになる。
- (4) Leeway の目安として,
- (a) Sharp up yards で γ_A が 60° 以上で効率よく帆走しているとき,
With Royal で, 3 k'ts で 5° , 6 k'ts で 4° , 9 k'ts で 3° ,
Without Royal 及び All Sails では, With Royal より $2\sim3^\circ$ 大きくなる。
- (b) Square yards の時
3 k'ts で 4° , 6 k'ts で 3° , 9 k'ts で 2° ,
と見ることができる。
- (5) Leeway を加味しての帆船の効率運用については,
- (a) Royal はできるだけ展帆した方がよい
- (b) Without Royal よりも All Sails の方がよい

- (c) γ_A が 120° 以下の時は stay s'l はできるだけ展帆した方が良く、 γ_A が 120° を超える時には stay s'l はできるだけ展帆しない方が良い。

7. 謝 辞

本研究において多くの御助言御協力をいただいた大杉勇船長・平井顕船長に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 田辺 穰, 練習帆船日本丸の航海性能概要, 日本航海学会誌第85号, 昭和60年9月
- (2) 田辺 穰, 練習帆船日本丸の航海性能概要—Ⅱ, 日本航海学会誌第90号, 昭和61年12月
- (3) 大杉 勇, 新“日本丸”その後, 日本船用機関学会誌, 第22巻, 第1号, 昭和62年1月
- (4) 田辺 穰・大杉 勇, 他, 日本丸航海実績の解析, 日本航海学会誌第94号, 昭和62年12月
- (5) 大杉 勇, 他, 練習帆船日本丸の帆走性能に関する研究(第1報), 航海訓練所調査研究時報第63号, 1987年3月
- (6) 大杉 勇, 他, 練習帆船日本丸の帆走性能に関する研究(第2報), 航海訓練所調査研究時報第64号, 1988年3月
- (7) 雨宮伊作, 他, 練習帆船日本丸の帆走性能実験について, 日本航海学会論文集第79号, 昭和63年9月
- (8) 磯崎道利, 帆船の Leeway 測定結果について, 航海訓練所調査研究雑報第83号, 1984年8月

質 疑 応 答

堀 晶彦(海技大学校): 相対風向と速力について Leeway の大きさを評価しているようだが, 各時点でのヤードの開き角度についてはどのようになっているのか。また, ヤードの開き角度毎の評価はされているのか。

磯崎道利(1) 我々は, 相対風向の変化にあわせて, 最も効率よく運行できるように, ヤードの開き角度を調整しています。実際には, 相対風向とヤードとのなす角度は $20^\circ \sim 40^\circ$ 程度となっています。

(2) ヤードの開き角度毎の評価については, 本文 4.1 の通りです。