船舶搭載レーダーによるハシボソミズナギドリ (*Puffinus tenuirostris*) の飛翔速度の計測

伊藤 真*・小城 春雄*

Flight Speed Measurement of Short-tailed Shearwaters *Puffinus tenuirostris* Recorded by Ship-Loading Radar

Shin Ito* and Haruo Ogi*

Abstract. We measured the flight speed of Short-tailed Shearwaters (*Puffinus tenuirostris*) in Tsugaru Strait, northern Japan, using ship-loading radar. When sea conditions were calm, estimated flight speed and direction were unaffected by wind. The average flying speed was 14.3 ± 1.63 (SD) m/s ($n=7$), with a range of 12–16 m/s. Based on the above results, we calculated the theoretical values of V_{mp} (minimum power speed) and V_{mr} (maximum range speed), presented by Pennycuick (1975, 1987). The results were $V_{mp}=9.74$ m/s, and $V_{mr}=16.18$ m/s. Flight speeds estimated using radar were near the V_{mr} , suggesting that the Short-tailed Shearwaters observed in Tsugaru Strait during late April were on migration to northern sea areas.

Key words: Flight speed, Short-tailed Shearwater, Radar, Northward migration, Tsugaru Strait.

キーワード：飛翔速度，ハシボソミズナギドリ，レーダー，北上渡り，津軽海峡。

はじめに

ハシボソミズナギドリ (*Puffinus tenuirostris*) は、タスマニア島の周辺海域と太平洋亜寒帯海域の2海域間（片道約1万 km 程度）を毎年渡ることが知られ、その生態学的知見などが蓄積されてきた (Serventy 1953, Shuntov 1972, Ogi *et al.* 1980, 新妻・芝野 1983, Oka & Maruyama 1986)。しかしながら、それらは本種の分布、個体数、食性および栄養状態に関するものであり、渡り時の飛翔能力について調査した研究はない。飛翔能力を客観的に評価するには、まず本種の飛翔速度を実際に計測する必要がある。

鳥の飛翔速度の計測には、ストップウォッチ (Gill 1985)、経緯儀 (Tucker & Schmidt-Koenig 1971)、レンジファインダー距離計 (Alerstam *et al.* 1993)、飛翔速度計測器：ornithodolite (Pennycuick 1982a, 1982b, 1987)、ラジオテレメトリー (田中 1996)、人工衛星 (Jouventin & Weimerskirch 1990) およびレーダー (Alerstam *et al.* 1993) などが使用されてきた。船舶搭載レーダー

Received 14 July 1998, Revised 21 February 1999, 2nd Revision 10 May 1999, Accepted 25 May 1999.

* 北海道大学水産学部，〒041-8611 北海道函館市港町 3-1-1.

* Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate Hokkaido, 041-8611 Japan.

を使用した場合、対象生物の捕獲をしないで飛翔速度を計測できる他の計測方法（ストップウォッチ法、レンジファインダー法および飛翔速度計測器法）と同様に、個体に関しての形態的情報が得られない反面、以下の利点がある：1) 計測器機に関して特別な準備がいらない、2) 気象・海象条件が良ければいつでも計測が実施可能である、3) 対象とする鳥を捕獲する手間がない、および4) 海鳥に与える負担やストレスがない。

本研究では、ハシボソミズナギドリの北上渡り期である4月下旬、津軽海峡へ飛来する本種の飛翔能力を評価するため、船舶搭載レーダーにて飛翔速度を計測し、その結果を Pennycuik (1975, 1987) の飛翔速度理論と比較考察した。また、飛翔能力の評価をするなかで、本種は北上渡りにおいて津軽海峡をどのような海域として利用しているか考察した。

調査方法

調査日および海域

調査は1996年4月26日08:48～13:55時までの間、 $41^{\circ}34.5'N \sim 41^{\circ}47.8'N$, $140^{\circ}40.5'E \sim 140^{\circ}59.7'E$ で囲まれた津軽海峡の海上にて北海道大学水産学部研究調査船うしお丸（128トン、航海速力11ノット）船上で実施した。

レーダーおよび記録用諸機器

使用したレーダーはうしお丸搭載の JRC 社製 JMA-3727-6 であり、性能は以下の通りである。使用距離範囲：0.75 浬、送信周波数：9380～9440MHz、送信パルス幅：0.08 μs 、繰返周波数：3000 Hz、距離分解能：25 m 以下、最小探知距離：28 m 以下、方位分解能： 1.4° 、方位誤差： 1° 以内。追跡記録としてのレーダー映像は、JRC 社製熱転写式カラープリンタ NJW-99 + NQA-982 により記録した。風向・風速の計測には、海上電気社製 WA-200 超音波式を用いた。船位は JRC 社製 GPS (Global Positioning System) 航法装置 JLR-4200 により表示し、レーダー映像とともに記録した。

追跡方法

本調査は、最上船橋甲板における目視観測者と船橋内のレーダー映像観測者に分かれておこなわれた。目視観測者は、8倍と20倍の双眼鏡を使用し、接近してくるハシボソミズナギドリの発見情報をレーダー映像観測者に報告する。レーダー映像観測者は、ハシボソミズナギドリの映像が鮮明に映るようにレーダー操作パネルの Tuning（局部発振周波数を調節し、マグネトロンの発振周波数と同調させ 60 MHz の中間周波数を保つようにする）、Gain（映像の明るさを調節する）、STC (Sensitivity Time Control circuit: 海面反射防止回路) および FTC (Fast Time Constant circuit: 雨雪反射防止回路) の微調整をおこなう。これらの操作で映像を鮮明にし、レーダー映像観測者は、映像と実際のハシボソミズナギドリの動向と比較して整合性を確認する。以上の後に位置カーソルをハシボソミズナギドリの映像上に動かして固定し、時間計測を開始する。ハシボソミズナギドリの映像がある程度位置カーソルから離れたら、映像と時計を静止して追跡時間を記録した後、プリンターから映像を打ち出す。この時、同時にハシボソミズナギドリの飛翔状態、気象・海象の状態についても記録した。なお今回の調査では、ハシボソミズナギドリの映像は船から 500 m 程度の距離から映り始めた。飛翔高度は 0.5～1.5 m であり、無風状態 (0～2 m/s) のためにハシボソミズナギドリは直線的なはばたき飛翔をし、ダイナ

ミックソアリングによる上下、左右動は観察されなかった。さらに、船の動きに対する回避および誘引反応は観察されなかった。

飛行速度の計算

得られたレーダー映像データの自船速度、針路表示を用い、追跡時間から船の移動ベクトル A を求める。次に位置カーソル交点からハシボソミズナギドリの映像までの距離と方位を測り、これを鳥の相対移動ベクトル B とする。ハシボソミズナギドリの真の移動ベクトル C をとし、このベクトルのスカラー量と追跡時間の関係からハシボソミズナギドリの飛翔速度を求めた (Fig. 1)。 C のスカラー量は、次式の余弦定理による。

$$|C| = (|A|^2 + |B|^2 - 2|A||B|\cos\theta)^{1/2}$$

ただし、 θ : A , B の交角。

Fig. 1. Relationship between the radar reflection data and the actual movement of ship and shearwater. 1-1: Radar reflection image during the measurement flight speed of a Short-tailed Shearwater. A : Distance of ship traveled, B : Distance of bird traveled, X : the beginning point of measurement, y : the end point of measurement, θ : angle between bird course and ship course. 1-2: A is the vector of ship movement, B is the vector of bird flight recorded, C is the true bird vector. X is the beginning point of the flight speed measurement, y is the end point of doing it. Angle θ equals difference between the bird course and the ship course.

理論的飛翔速度の計算

本研究では、Pennycuick (1975, 1987) の理論計算式と、この時期のハシボソミズナギドリに関する形態学的情報(岡・他 1986, 吉田 1987) から、最大滞空時間速度 (V_{mp} : minimum power speed) と最大飛翔距離速度 (V_{mr} : maximum range speed) の理論値を求めて計測飛翔速度と比較した。理論値との比較は、計測されたハシボソミズナギドリの飛翔速度から得られる生態学的、形態学的特性を考察する手がかりとした。

V_{mp} を求める Pennycuick (1975, 1987) の理論計算式は以下の通りである。

$$V_{mp} = 4.19m^{1/3}g^{1/2}\rho^{-1/2}b^{-1/2}$$

ただし、 V_{mp} : 飛翔速度 (m/s), m : 体重 (kg), ρ : 空気密度 (kg/m³), b : 翼開長 (m), g : 重力加速度=9.81 (m/s²)。

また V_{mr} と V_{mp} の関係は以下の式により表せる。

$$V_{mr} = BV_{mp}$$

上記の関係式の V_{mr} : V_{mp} の比率 B は

$$\begin{aligned} X_1 \text{ (profile power ratio)} + X_2 \text{ (metabolic power ratio)} \\ = 1.2 + 6.03\alpha\eta\rho^{1/2}b^{3/2}m^{(6-5/3)}k^{-3/4}g^{-5/3} \end{aligned}$$

を求め、Pennycuick (1975, p 26, Table II) から B を算出した。

ただし、 α : 定数=3.79, η : 定数=0.23, ρ : 空気密度=1.24 (kg/m³), δ : 定数=0.723, k : 誘導パワー係数=1.20, g : 重力加速度=9.81 (m/s²), b : 翼開長 (m), m : 体重 (kg)。

結 果

調査時の海況

調査時の天候は曇り、風向は 180° (南風)、風力は 0~2 m/s、波高は 0.5 m 未満であった。Alerstam (1993) は風速 4 m/s 以下をほぼ無風状態としており、ハシボソミズナギドリの飛翔速度または飛翔方法に影響を与える風はなかったといえる。

ハシボソミズナギドリの飛翔状態

レーダー追跡時のハシボソミズナギドリは主にはばたき飛翔をし、滑空することは少なかった (7, 8 回はばたき、わずかに滑空する程度)。飛翔高度は 0.5~1.5 m とほぼ一定、飛翔方位も西方向で一定であった。この西方向への定位飛翔は津軽海峡を太平洋から日本海へ通過し、北上渡りするコース (Shuntov 1972) と一致した。また、ハシボソミズナギドリの初・次列風切はまだ換羽前であり、目視観測の限りでは通常の飛翔と思われない特別な行動は認められなかった。

以上のことから、この調査においてハシボソミズナギドリの基本的飛翔速度 (無風状態のはばたき飛翔速度) が計測できたといえる。

計測された飛翔速度

飛翔速度が計測できたのは、ハシボソミズナギドリ 7 個体であり、これらの飛翔速度の平均値は 14.3 ± 1.63 (SD) m/s、時速に換算すると 51.5 ± 5.9 (SD) km/h であった (Table 1)。

Table 1. Flight speed measurements of seven Short-tailed Shearwaters.

Bird No.	Chasing time (sec)	Ship speed (knot)	Length of ship vector $A(m)$	Length of relative bird vector $B(m)$	Angle of difference between A and B $\theta(deg)$	Length of true bird vector $C(m)$	Flight speed (m/s)
1	16.0	10.6	54.5	243.1	65.0	225.5	14.1
2	16.0	10.6	54.5	277.0	50.4	245.9	15.4
3	10.0	10.6	54.5	138.9	58.6	119.9	12.0
4	10.0	10.8	55.6	173.6	57.9	151.6	15.2
5	10.0	10.8	55.6	150.5	90.0	160.4	16.0
6	10.0	10.8	55.6	115.8	82.0	121.2	12.1
7	15.0	10.8	55.6	231.5	80.1	228.6	15.2

考 察

鳥がはばたいて水平飛翔する場合、効率の良い飛翔速度は二通りある。1つめは、飛翔にされる必要パワーが最小であり、エネルギー供給なしの連続飛翔で理論上最大の滞空時間をもたらす最大滞空時間速度 (V_{mp}) である。もう1つは、単位距離の移動に必要なエネルギーが最少であり、エネルギー補給なしで理論上最大飛翔距離をもたらす最大飛翔距離速度 (V_{mr}) である。多くの鳥類の飛翔速度を実際に計測すると、これら2つの飛翔速度の間で飛翔している (Pennycuick 1975, 1987, Alerstam 1993)。

そこで、5月初旬頃のハシボソミズナギドリ成鳥の形態的特性を考慮し、体重 0.515 kg ($n=34$) (岡・他 1986)、翼開長 0.94 m ($n=15$) (吉田 1987) を用い、観測時の空気密度は 1.24 kg/m^3 , $X_1+X_2=1.39$ より $B=1.66$ と測定した。以上のパラメータを用いて Pennycuick (1975, 1987) の理論式から V_{mp} , V_{mr} をそれぞれ求めると、 $V_{mp}=9.74 \text{ m/s}$, $V_{mr}=16.18 \text{ m/s}$ となった。今回の計測飛翔速度の平均値 14.3 m/s はこれら両値と比較すると、約 2 m/s ほど遅いが V_{mr} にほぼ近い。

Alerstam (1993) は、南極海と南大西洋の放浪性の強いミズナギドリ目を含む海鳥類について、無風状態でその飛翔速度を計測した。その結果、飛翔速度の実測値はほとんど V_{mp} の付近に集まり、海鳥類の放浪・索餌飛翔には最大飛翔距離よりも最大滞空時間の方が重要であることを示した。今回の結果はこれらと異なり、ハシボソミズナギドリは V_{mr} を目指して飛翔していたと評価できた。したがって、これらのハシボソミズナギドリは放浪・索餌飛翔をしていたとは考えられず、積極的な北上渡り中であると考えられた。

このように、津軽海峡に飛来するハシボソミズナギドリは飛翔速度 V_{mr} を無風状態で達成できる飛翔能力があり、積極的な北上渡りをおこなっていることが窺えた。また、これらのことから、津軽海峡は、ハシボソミズナギドリにとって北上渡りの中継点であり、太平洋から日本海を経て、餌が豊富と予想されるオホーツク海へと繋ぐ通路として利用されていることが考えられた。

謝 辞

本調査をすすめるにあたり、うしお丸の搭載計器類の使用および航路の選定を快く許可していただいたうしお丸船長、大越金蔵氏ならびにうしお丸の乗組員に深く御礼申し上げます。また、有益な助言と資料を下さった水産庁遠洋水産研究所の田中博之博士ならびに英文を校閲していただいた北海道大学水産学部助手 John Richard Bower 博士に深く感謝いたします。

摘 要

本研究は、4月下旬の津軽海峡においてハシボソミズナギドリの飛翔速度を船舶搭載レーダーにて計測し、この海域における本種の基本的飛翔能力を評価することを目的とした。ハシボソミズナギドリ7羽の平均飛翔速度は 14.3 ± 1.63 (SD) m/s であり、Pennycuick による理論的飛翔速度の計算結果との比較から、本種は最大飛翔距離速度 V_{mr} に近い速度で飛翔していたと評価できた。これらの結果から、4月下旬の津軽海峡に飛来するハシボソミズナギドリは1) 最大飛翔距離速度 V_{mr} を達成できる飛翔能力を持つ、2) 積極的な北上渡りの途中であるといえた。以上のことを踏まえ、ハシボソミズナギドリはさらに北に存在する良好な索餌海域へ至るための通路として津軽海峡を利用することが考えられた。

引用文献

- Alerstam, T. 1993. Flight tracks and speeds of Antarctic and Atlantic seabirds: radar and optical measurements. *Phil. Trans. R. Soc. Ser. B* **340**: 55–67.
- Gill, F. B. 1985. Hummingbird flight speeds. *Auk* **102**: 97–101.
- 新妻昭夫・芝野伸策 1983. ミズナギドリ北上群の観察と個体数推定の試み. *応用鳥学集報* **3**: 41–43.
- Jouventin, P. & Weimerskirch, H. 1990. Satellite tracking of Wandering albatrosses. *Nature* **343**: 746–748.
- Ogi, H., Kubodera, T. & Nakamura, K. 1980. The pelagic feeding ecology of the Short-tailed Shearwater *Puffinus tenuirostris* in the subarctic Pacific region. *J. Yamashina Inst. Ornithol.* **12**: 19–44.
- Oka, N. & Maruyama, N. 1986. Mass mortality of Short-tailed Shearwaters along the Japanese Coast. *Tori* **34**: 97–104.
- 岡 奈理子・丸山直樹・鈴木あき子 1986. ハシボソミズナギドリの栄養生態と大量死. トヨタ財団研究報告書 “ハシボソミズナギドリの大量斃死に関する総合研究”. 13–25 頁.
- Pennycuick, C. J. 1975. Mechanics of flight. In *Avian Biology*, Vol. 5 (ed. D. S. Farner & J. R. King), pp. 1–75. Academic Press, New York. 523 pp.
- Pennycuick, C. J. 1982a. The ornithodorolite: an instrument for collecting large samples of bird speed measurements. *Phil. Trans. R. Soc. Ser. B* **300**: 61–73.
- Pennycuick, C. J. 1982b. The flight of petrels and albatrosses (Procellariiformes), observed in South Georgia and its vicinity. *Phil. Trans. R. Soc. Ser. A* **300**: 75–106.
- Pennycuick, C. J. 1987. Flight of auks (Alcidae) and other northern sea birds compared with southern Procellariiformes: ornithodorolite observations. *J. exp. Biol.* **128**: 335–347.
- Serventy, D. L. 1953. Movements of pelagic sea-birds in the Indo-Pacific region. *Proc. 7th Pacific Sci. Congr.* **4**: 394.
- Shuntov, V. P. 1972. Seabirds and the biological structure of ocean. (Translated from Russian in 1974). NTIS, U. S. Dept. of Comm.: 74–72.
- 田中博之 1996. ラジオテレメトリーから推測した索餌海域におけるハイイロミズナギドリの日周行動日本生態学会誌 **46**: 1–7.
- Tucker, V. A. & Schnidt-Koenig, K. 1971. Flight speeds of birds in relation to energetics and wind directions. *Auk* **88**: 97–107.
- 吉田秀嗣 1987. ハイイロミズナギドリ (*Puffinus griseus*) およびハシボソミズナギドリ (*Puffinus tenuirostris*) の形態学的比較研究. 北海道大学修士論文 119 pp.