

アルゴスブイの移動速度の見積り誤差について†

石井春雄*

Estimation Error of Traveling Velocity of ARGOS Drifters †

Haruo ISHII*

Abstract

In order to estimate the errors in positioning and determining the velocity of ARGOS platforms, the records of latitude and longitude of nine platforms which were located in the office of Hydrographic Department are statistically analyzed. Data of distance between satellite-determined position and the located position are also analyzed. It is shown that both histograms of latitude-deviation and longitude-deviation from those of the located position are agreed well with the normal distribution, respectively. Probability density functions for velocity as well as distance, therefore, are subjected to χ (kai)-distribution with second degrees of freedom. Obtained histograms of velocity and distance are likely similar to such χ -distributions.

For the data of this study, averaged error of spurious velocity of motionless ARGOS platforms, which are caused by satellite-positioning error itself and irregularity of time-interval for positioning, is estimated to be about 7cm/sec with standard deviation of 7.4cm/sec. Thus, individual drifting velocity of surface drifter in adjacent sea to Japan, is considered to include above order of velocity error.

1. はじめに

水路部では1980年以来、海流の実態調査のためにアルゴスシステムを利用した海面漂流ブイ調査を行って来ている (Ishii *et al.*, 1982; 道田, 1997). 漂流ブイの移動速度が海水の速度を示すことを前提にしているが、必ずしもこの前提が妥当とは言えない。当初使用された短冊型ドロークが常に流れに対して垂直の状態ではないことから、近年の“holey-sock (穴空き靴下)”型に改良されたのも、その一例である (Michida and Yoritaka, 1995). しかし、アルゴス漂流ブイの移動速度そのものの誤差の見積りが最も重要である。当然ながら、移動速度の誤差は人工衛星 (NOAA シリー

ズ) を利用したアルゴスシステムによる位置決定誤差に依存している。また、位置決定時刻が等間隔でないため、連続する2つの測定値 (緯度・経度と時刻) から計算した移動速度をそのまま時間軸に対してプロットすると、速度のばらつきが大きい (例えば、石井・道田: 1996)。本稿では、これらの時間間隔の異なって決定される漂流ブイの位置の誤差に起因する、移動速度の誤差について報告する。

2. 方法

アルゴスシステムにおいて、人工衛星により決定されるブイ (発信器) の位置の誤差と、これに起因する移動速度の誤差を見積もるのに最も良い

† Received 1998 December 24th; Accepted 1999 February 2nd.
* 海上保安大学校 Maritime Safety Academy.

方法は、長期間一定の場所に置いたブイの緯度・経度を調べることであろう。このとき、不動のブイが或る程度の見かけの移動速度を持つことになろう。Ishii *et al.*は、水路部の構内に置いた漂流ブイの緯度・経度の精度について報告しており、緯度・経度の真値からの偏差の散布図と、設置点からの距離（すなわち測定誤差）の頻度分布図を示した。しかし、それ以上の考察はなされていない。ここでは、これらの水路部構内で測定されたブイの位置データを再度とりあげて、統計的解析を行った。なお、統計論・誤差論については『統計解析』（高橋ら：1992）を参照した。

3. 結果

1979年12月から1981年1月までの間で、水路部構内に置かれた9個のアルゴスブイの位置測定の結果を Table 1 に示す。ただし、原データの中で明らかに緯度あるいは経度の誤差が大きい6個については除外した。Fig. 1 は、ブイの設置位置を基準にしたときの測定位置（緯度・経度）の偏差をプロットした図である。ここで、設置位置とは、各ブイについての測定位置の平均値とした。また、同じブイを何回かにわたって構内に置いた場合があり (Table 1)、それらが全く同地点とは限らないため、それぞれの期間（以下、シリーズと呼ぶ）について平均位置（設置位置）を計算した。例え

ば、Table 1 で ID.No. が 2026 と 2027 のブイは、各々 4 シリーズに分割されているため、1 シリーズの期間は 1 ~ 2 日と短い。

Table 1 及び Fig. 1 からわかるように、測定された設置位置からの距離のばらつき（標準偏差）は、東西方向の方が南北方向のその1.9倍となっているが、これは東京付近での人工衛星の軌道がほぼ南北方向のためと考えられる。現時点で稼働中のノア14号・15号の赤道における傾斜角 (inclination) は 88 ~ 89 度である。傾斜角が 89 度の場合の北緯 35.5 度における軌道は、南北方向から約 11 度ずれる (佐々木稔氏の私信) が、Fig. 1 における回帰直線の傾きは 0 度であり (相関係数は 0.07)、人工衛星のアジマス方向に直交する傾向は見られない。

Fig. 2 は、測定された緯度・経度の設置点のそれらからの差について、0.001 度の分割幅で頻度分布をとった結果である。図中の σ は設置位置からの

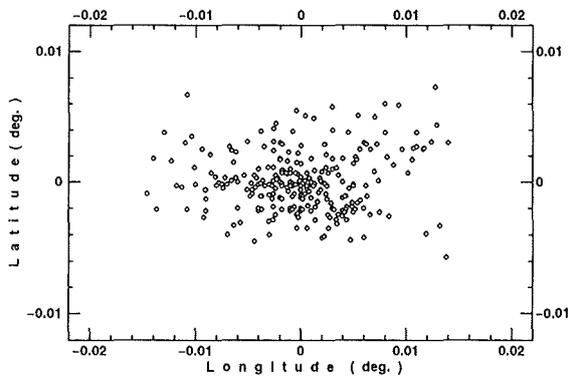


Fig. 1 Scattering diagram of differences of latitude and longitude from those of located ARGOS platforms at the office of Hydrographic Department.

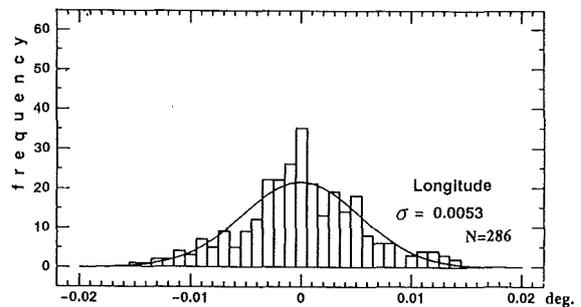
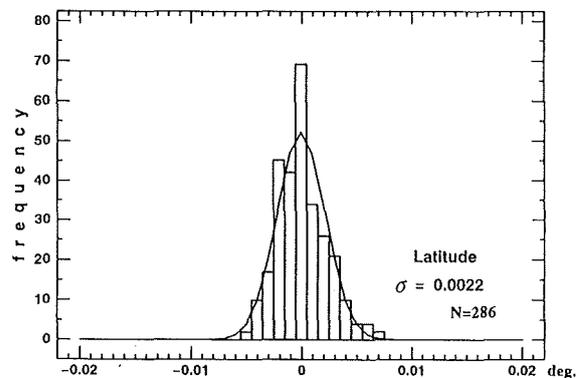


Fig. 2 Histogram for the differences of latitude (upper panel) and longitude (lower panel) from those of ARGOS platforms located at the office of Hydrographic Department. Solid curve is the normal distribution with 286 samples.

Estimation Error of Traveling Velocity of ARGOS Drifters

Table 1 Satellite-determined positions of ARGOS platforms which were located at the office of Hydrographic Department.

ID. No.	No. of data	P E R I O D (J S T)	L A T I T U D E		L O N G I T U D E	
			mean	σ (s. d.)	mean	σ (s. d.)
2020	38	17 Dec. '79 - 26 Dec. '79	35.6652° N	0.0023°	139.7650° E	0.0053°
2021	33	17 Dec. '79 - 26 Dec. '79	35.6649° N	0.0023°	139.7656° E	0.0049°
2022	28	18 Dec. '79 - 26 Dec. '79	35.6655° N	0.0027°	139.7654° E	0.0054°
2023	33	17 Dec. '79 - 26 Dec. '79	35.6650° N	0.0024°	139.7650° E	0.0049°
	10	19 Jan. '80 - 21 Jan. '80	42	26	45	64
	4	18 Feb. '80 - 19 Feb. '80	40	08	50	47
2024	36	17 Dec. '79 - 26 Dec. '79	35.6651° N	0.0022°	139.7658° E	0.0042°
	11	19 Jan. '80 - 21 Jan. '80	34	24	75	65
	6	18 Feb. '80 - 19 Feb. '80	43	34	67	74
2025	14	20 Oct. '80 - 22 Oct. '80	35.6633° N	0.0024°	139.7648° E	0.0071°
	12	8 Nov. '80 - 10 Nov. '80	44	21	63	74
2026	6	20 Oct. '80 - 21 Oct. '80	35.6633° N	0.0018°	139.7625° E	0.0055°
	8	8 Nov. '80 - 10 Nov. '80	43	15	54	52
	4	9 Dec. '80 - 10 Dec. '80	62	29	65	54
	4	7 Jan. '81 - 8 Jan. '81	58	17	73	17
2027	5	20 Oct. '80 - 21 Oct. '80	35.6636° N	0.0023°	139.7596° E	0.0065°
	10	8 Nov. '80 - 10 Nov. '80	43	14	60	60
	7	9 Dec. '80 - 10 Dec. '80	56	14	50	45
	3	7 Jan. '81 - 8 Jan. '81	63	15	57	46
2029	7	20 Oct. '80 - 21 Oct. '80	35.6619° N	0.0023°	139.7641° E	0.0072°
	7	9 Nov. '80 - 10 Nov. '80	46° N	21°	71° E	79
Total	286		35.6647° N	0.0024°	139.7654° E	0.0055°

差の標準偏差を表すが、Table 1の最下段に示すシリーズに分けない全データの標準偏差よりも僅かに小さくなる。また、図中の実線は、サンプル数286個の場合に、所定の平均値と標準偏差値を与えたときの正規分布である。緯度・経度の偏差が正規分布をしているか否かについて、すなわち、適合度の χ^2 (カイ2乗)検定を行ってみた。緯度の方は分割幅を5グループにまとめ、経度の方は20グループにまとめて検定したところ、両方とも

に5%の有為水準で正規分布とみなすことができる。Fig. 2を見ると、正規分布曲線から外れている部分もあるが、以後、アルゴスシステムで測定される緯度・経度は真値を中心に正規分布していると仮定する。

水路部構内でのブイの測定位置と設置点との距離を計算し、分割幅100mで頻度分布をとったものが、Fig. 3の中の棒グラフである。平均は442.5mであり、当時の公称精度2 km内にはおさまってい

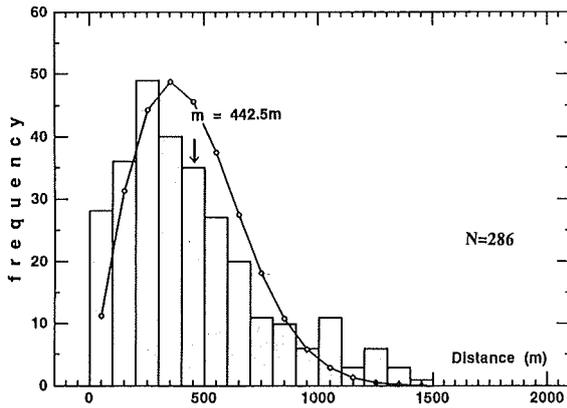


Fig.3 Histogram of the distance between the satellite determined position and the located position for ARGOS platforms at the office of Hydrographic Department. Solid curve is χ -distribution (freedom degree is 2) with 286 samples.

るが、現在のGPSの精度に比べれば位置測定誤差はかなり大きい。図中の実線は、Fig.2と同様に、サンプル数286個の場合に所定の平均値と標準偏差を与えたときの自由度2の χ （カイ）分布を示す。これは、2組のデータセットuとvが、それぞれ正規分布にしたがうとき、これらの自乗和(u^2+v^2)は自由度2の χ^2 -分布にしたがうという統計学の定理に基づく。Fig.1と2に示した緯度差dyと経度差dxが互いに独立であって、また正規分布にしたがえば、距離に換算するための適当な定数をかけて、これらの自乗和を計算したものは χ^2 -分布にしたがう。距離はこの自乗和の平方根であるから、結局、距離の確率密度関数（頻度分布）は χ -分布にしたがう。Fig.3の棒グラフと χ -分布曲線の間には、Fig.2と同様に一致しない部分もあるが、距離の頻度分布が χ -分布にしたがっていると言える。

次に、移動速度であるが、連続する2点の距離を時間差で割って求めるのであるから、その頻度分布（確率分布）は、当然、自由度2の χ -分布にしたがうことになる。ただし、時間差によって、移動速度の誤差の大きさも異なってくる。一般に、アルゴシステムを使用した位置測定回数は、日本周辺においては多い場合で1日あたり7~8回であり、時間間隔も不均等である。したがって、

個々に計算される移動速度の誤差の大きさはそのつど異なる。Fig.4は、2点の測定時間差が100分、150分、200分、300分及び500分としたときの移動速度の頻度分布（単位は%）を示す。なお、 χ -分布はFig.3のそれと同じとした。図中の各印でマークした点は、縦軸に示す頻度（%）で横軸に示す移動速度を取ることを表している。例えば、最大頻度17.1%での移動速度（の誤差）は、時間間隔が長くなるにしたがい、5.8cm/sから1.2cm/sまで減少していく。

水路部構内のパイの位置データから、測定時間差が1日より短く、5分より長い場合のものを抽出して移動速度を計算した。サンプル数255個について、時間間隔の頻度分布（分割幅は1時間）をFig.5に示す。ほぼ半数が1~2時間の差であるが、5時間以上の場合も多い。移動速度の頻度分布（分割幅は1cm/s）は、Fig.6の棒グラフのとおりであり、平均値は7.1cm/sとなった。また、正規分布ではないが、標準偏差の値は7.4cm/sである。静止しているパイだが、位置の決定誤差と不均等な測定時間差によって、この程度の移動速度誤差が出現する。実際に日本周辺海域で表層を漂流するパイの速度（海流の速度）には、波浪等による動揺の影響を除いても、平均的には5~10cm/sの誤差が含まれていると推測される。なお、Fig.6中

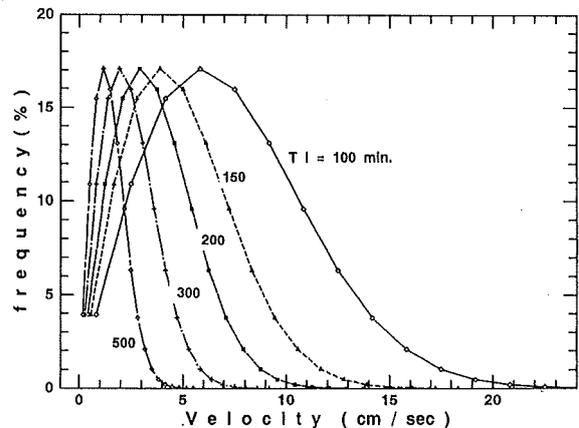


Fig.4 χ -distribution same as in Fig.3 for calculated velocity of ARGOS platforms at the office of Hydrographic Department, in the case of time-interval are 100, 150, 200, 300 and 500 minutes, respectively.

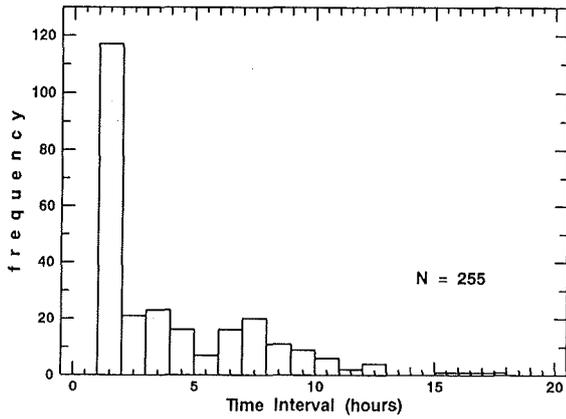


Fig. 5 Histogram of the time-interval (hours) between two successive satellite positioning of ARGOS platforms at the office of Hydrographic Department.

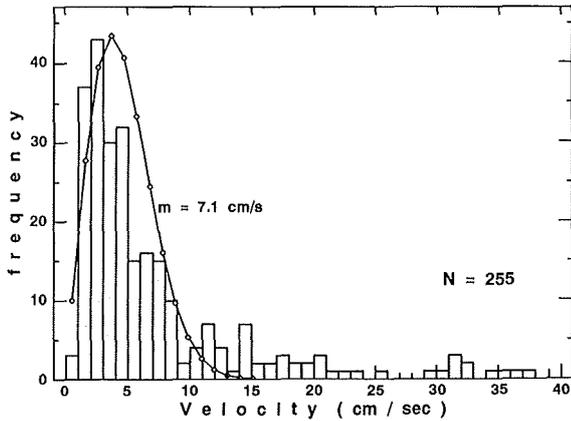


Fig. 6 Histogram of velocity of ARGOS platforms at the office of Hydrographic Department. Solid curve is averaged velocity calculated by using time-interval when the histogram of distance is subject to the χ -distribution as shown in Fig. 3.

の曲線は、Fig. 3 に示したような距離の χ -分布を仮定して、実際の時間差から求めた移動速度の分布である。両者を比べて見ると、傾向としては合致していると言えよう。

上記の移動速度を計算した際の、時間差と位置の差（距離）をプロットしたのが Fig. 7、測定時間差と移動速度をプロットしたのが Fig. 8 である。Fig. 7 には等速度線を併せて示す。移動速度が 29cm/s 以上となる 11 例は、いずれも時間差が 2 時間以内の場合に現れている。これら 11 例を除くと、

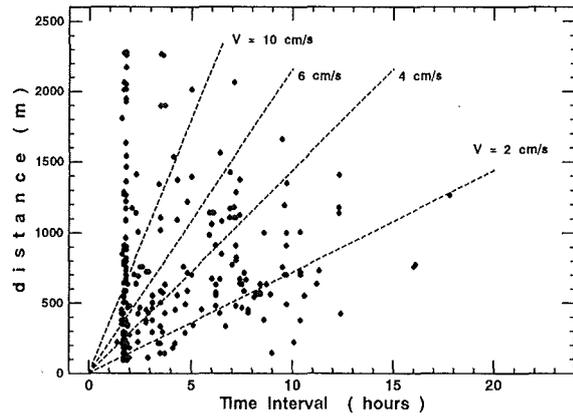


Fig. 7 Scattering diagram of time-interval (hours) and distance (meters) between two successive positions of ARGOS platforms at the office of Hydrographic Department. Dashed lines show velocity of 2, 4, 6 and 10cm/sec, respectively.

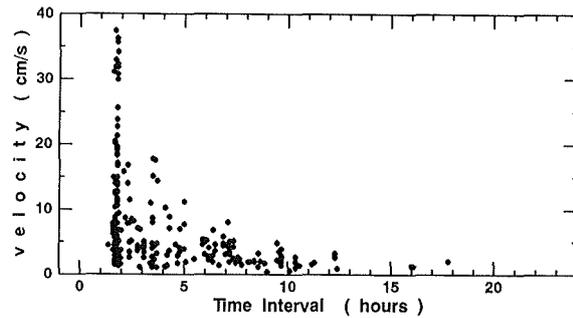


Fig. 8 Same as Fig. 7 except for velocity (cm/sec) on the vertical axis.

速度の平均値は 5.9cm/s となる。また、時間差が 2 時間以上の 142 例をとった場合、速度の平均・標準偏差はそれぞれ、4.3cm/s、3.5cm/s まで減少する。さらに、時間差を 5 時間以上とすれば、3.1cm/s、1.8cm/s と、速度誤差を 5 cm/s 以内とすることができる。

4. まとめ

水路部構内に置かれた 9 個のアルゴスブイの緯度・経度データの統計解析を行った。期間は 1979 年 12 月～1981 年 1 月の間で、各ブイの設置日数は 1 日から 9 日間にわたる。ブイの設置位置を基準にしたとき、測定された緯度・経度の設置位置からの差の頻度分布は、それぞれ独立な正規分布と

みなすことができる。このことから、水路部構内でのブイの測定位置と設置点との距離の頻度分布(確率分布)は、自由度2の χ (カイ)-分布にしたがうことになるが、今回の解析結果はこれを支持している。

構内に設置されたブイであるから、当然静止しているが、緯度・経度の測定誤差により見かけの移動速度が出現する。速度は距離を時間差で割って求めるため、移動速度の頻度分布も自由度2の χ -分布にしたがう。

アルゴシステムによる位置測定の時間間隔は不均等であるから、時間差によって、移動速度の誤差の大きさもそのつど異なる。構内設置ブイのデータから、測定時間差が5分以上で1日以下の場合の255個の移動速度の平均値と標準偏差値は、それぞれ7.1cm/sec, 7.4cm/secであった。静止したブイにおけるこの程度の大きさの移動速度誤差が、少なくとも当時の測定精度の範囲においては、位置測定誤差と不均等な測定時間間隔によって生ずると考える。やはり、本稿で示した距離の確率分布(χ -分布)を仮定して、位置測定の時間差を用いた構内の移動速度の頻度分布は、実際のそれと合致する傾向にある。移動速度計算の際の時間間隔を5時間程度以上とれば、速度誤差を5 cm/sec以内とすることができる。以上の移動速度誤差は、陸上だけではなく、日本周辺海域で海洋表層を漂流するブイの速度(海流の速度)にも同様に含まれていると考えられる。

5. おわりに

位置が知られているブイ、あるいは静止しているブイについては、位置あるいは移動速度の誤差の見積りは可能であるが、外洋を漂流しているブイの場合は難しい。少なくとも、速度を求めるうえで、時間的に離散した緯度・経度値を平滑化する必要があろう。高緯度域、特に水路部が漂流ブ

イ調査をしている南極周極流が流れる海域では、1日に20回にも及ぶ位置測定がなされる。筆者が当海域を漂流したブイの生の計算速度の時系列をプロットした経験では、極めてばらつきが大きいとの印象がある。高緯度域に限らず、海洋を漂流したブイの平滑化した緯度・経度、及びそれらから計算した移動速度を仮の真値(基準値)として、生の測定値の基準からの分散の大きさを見積もることも意味があると考ええる。

最後に、人工衛星の東京付近での軌道傾斜角については、海上保安大学の佐々木稔教授にご教示いただきました。また、匿名の査読者からは、適切かつ建設的な多くコメントをいただきました。ここに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- Ishii H., R. Saruwatari, Y. Ueno, S. Kuramoto and H. Nishida : Application of drifting buoys in ocean research, *Rep. Hydrogr. Res.*, 17, 347-365, (1982).
- 石井春雄・道田 豊 : 漂流ブイによる対馬暖流第一分枝のトラッキング, 水路部研究報告 (with English in abstract and legends), 32, 37-48, (1996).
- Michida Y. and H. Yoritaka : Survivability of the surface drifters deployed by Hydrographic Department of Japan for the period from 1988 to 1994, *J. Japan Soc. Mar. Surv. Tech.*, 7 (2), 21-28, (1995).
- 道田 豊 : 漂流ブイによる亜熱帯反流の観測, 水路部研究報告 (with English in abstract and legends), 33, 21-30, (1997).
- 高橋磐郎・小林竜一・小柳芳雄 : 統計解析 (改訂工科の数学5), 培風館, pp232, (1992).