

アルゴフロートの滞在深度における 流速とその誤差の見積もり

市川 泰子*¹ 高槻 靖*² 水野 恵介*²
四竈 信行*¹ 竹内 謙介*¹

アルゴ計画によって投入されるフロートの滞在深度における流速は、フロートが海面を漂流している間に測定される位置／時刻によって見積もることが出来る。しかし、見積もられた流速はARGOSシステムの位置測定精度に起因する誤差、位置が取得されるまでに海面を漂流することによる誤差、フロートの上昇／下降中に流速の鉛直分布の違いによって生じる誤差を含んでいる。海面、海洋中の流れの水平分布を一樣と仮定してこれらの誤差を評価したところ、現在のフロートでは海面における誤差と上昇／下降中の誤差は同程度と見積もられ、滞在深度の流速は10%～25%過大評価されていることが分かった。ただし、位置が取得されるまでに海面で漂流することによる誤差を補正することによりこの誤差は半分程度にすることができる。

キーワード：ARGO計画, 漂流速度, プロファイリングフロート, 誤差評価

Estimation of drifting velocity and error at parking depth for Argo float

Yasuko ICHIKAWA*³ Yasushi TAKATSUKI*⁴ Keisuke MIZUNO*⁴
Nobuyuki SHIKAMA*³ Kensuke TAKEUCHI*³

We estimate the error of drifting velocity for Argo float at parking depth. The drifting velocity is calculated by surface position of the float fixed by ARGOS system. ARGOS satellites occasionally fly over the float, we rarely obtain the exact positions where surfacing first occurs and descent begins. Therefore the drifting velocity at parking depth may be overestimated by the surface drift. Moreover the vertical current shear may be also affected the estimated velocity, because of the slow ascent/descent rate of the floats. Our estimation shows that the drifting velocity at parking depth may be overestimated between 10 to 25 percent for the present floats. The estimated error due to the vertical current shear has the same order of the error due to surface drift.

Keywords : Argo project, drifting velocity, profiling float, error estimation

*1 地球観測フロンティア研究システム気候変動観測研究領域
*2 海洋観測研究部
*3 Frontier Observational Research System for Global Change
*4 Ocean Observation and Research Department

1. はじめに

海洋の循環像や水塊の形成過程を解明していく上で、流速の測定は水温/塩分などの観測とともに重要な役割を果たす。これまで、流速を測定するために様々な測器が開発されてきたが、特に海洋中層の測流のために、海洋の中層を漂流してラグランジェ的測流を行う中層フロートが開発された。初期の中層フロートは音波を用いてフロートの位置を求め、漂流速度を見積もっていたが、音源が必要なために観測可能な海域が限定される弱点があった。しかし、1980年代になって、ALACE (Autonomous Lagrangian Circulation Explorer) フロート (Davis, et al, 1992) が開発され、音源無しで中層の流れを測定できるようになった。そして海洋大循環観測計画 (WOCE) などの枠組みで様々な海域においてALACEフロートをはじめとする中層フロートが展開され、測流がなされるようになった (Davis, 1998, Riser, 1998等)。日本でも科学技術振興調整費「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究 (SAGE)」において北太平洋中層水の展開過程と中層水の季節・経年変動の把握のためにALACEフロートが用いられている (四竈, 1998)。

2000年に開始された国際プロジェクトであるアルゴ計画により、ALACEフロートと同じタイプのフロートが全球で約3,000本展開される。これにより、年間約10万点における水温/塩分の鉛直プロファイルが得られるばかりでなく、浮上毎のフロートの位置を用いて滞在深度における流速の分布が得られることになる。この流速と鉛直プロファイルから計算される滞在深度を無流面とする地衡流を組み合わせれば絶対流速が得られることが期待される。このため、滞在深度の流速を出来るだけ正確に求めることが必要となる。しかしながら、これまで展開されてきた多くのALACEフロートの滞在深度は400~1000mであるのに対し、アルゴ計画によって展開されるフロートの滞在深度は2000mと深いため、漂流速度の推定の際に誤差が大きくなる可能性がある。

海洋科学技術センター海洋観測研究部/地球観測フロンティア研究システムでは、2000年2月よりアルゴ計画に対応した中層フロートを投入してきた。本報告では、このようなフロートをアルゴフロートと呼び、これまでに我々が投入したものについて、漂流速度の推定方法及び推定速度に含まれる誤差について述べる。

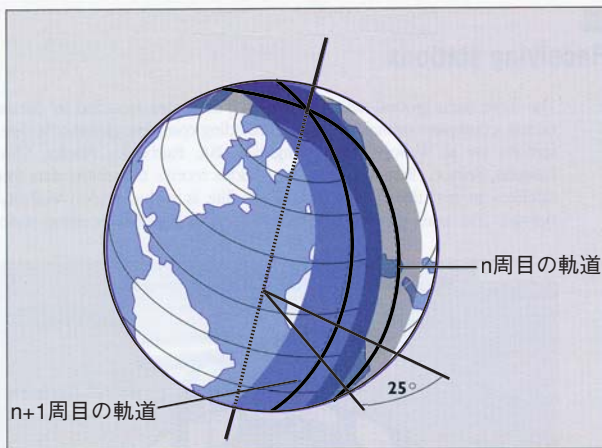


図1 衛星軌道

Fig. 1 As schematic drawing of the ARGOS satellite orbit.

2. 漂流速度の算出

アルゴフロートは、通常10日毎に滞在深度から海面まで浮上し、半日程度海面を漂った後、再び滞在深度まで沈降するサイクルを繰り返す。また、滞在深度から海面に浮上する際には、あらかじめ決められた圧力値毎に水温・塩分を測定する。フロートは海面に浮上後直ちに観測データ及びフロート情報の送信を開始し、海面を漂流している間データを送信し続ける。データの通信にはARGOSシステム (CLS/Argos, 1996) を使用している。ARGOSシステムでは、衛星が海面を漂流中のアルゴフロートの上空を通過するときにフロートからのデータを受信し、衛星から地上局にデータを送信する。地上局ではデータ受信周波数のドップラーシフト量の時間変化からフロートの位置を算出し、受信データ、データ受信時刻等と共にユーザーに送信する。

アルゴフロートは滞在深度において周囲の水と共に移動しているとみなせるので、海面漂流中にARGOSシステムによって得られる位置とその時刻を用いて滞在深度における流速を推定できる。すなわち、沈降前の位置 (x_0)、時刻 (t_0) と次回の浮上後の位置 (x_1)、時刻 (t_1) から距離 $L(x_0, x_1)$ と、時間 $t = (t_1 - t_0)$ を求めれば、滞在深度における流速は $v = L(x_0, x_1) / t$ と表現できる。ただし滞在深度における流路は不明なため、 L は通常2点間の最短距離を用いている。

2.1. ARGOSシステムによる位置の決定

ARGOSシステムは現在5機の衛星により運用されている。これらの衛星は地球の極軌道を102分で一周し、一周毎に地球の経度で約25度ずれながら地球を周回している。衛星は、地球上で直径約5,000kmの範囲を一度に見渡すことが出来る。極軌道であるため、極付近では周回毎に飛来するが、赤道線上は最も薄くなる。しかし、赤道線上における経度25度の幅は約2,800kmであり、最も監視が薄くなる赤道線上においても、2,200km (= 2800 - (2800 - 5000 / 2) × 2) の視野の重なりをもって周回していることが分かる (図1, 図2参照)。

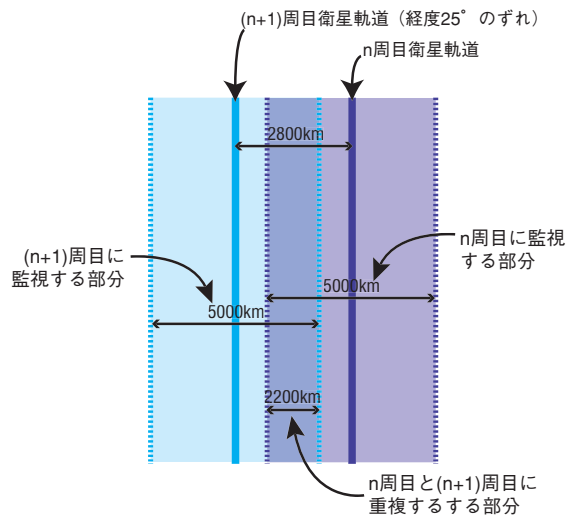


図2 赤道付近における衛星軌道

Fig. 2 Overlaps of the visibility area at equator.

衛星によるアルゴフロートの位置決定は、緯度・経度共0.001度の解像度で算出される。ただし、衛星がフロートの直上近くに飛来したときは衛星の進行方向の相対速度差が大きくなるのでドップラーシフトが大きくなり位置の精度は高く、フロートから見た衛星の軌道の俯角が低い場合にはドップラーシフトが小さく、位置の精度は相対的に悪くなる。このような精度を表すためARGOSシステムによりClassと呼ばれるフラグ(表1)がつけられる。

表1 位置測定精度(Class)一覧

Table 1 Positioning accuracy classes of the ARGOS system.

Class	精度
3	精度 < 150m
2	150m ≤ 精度 < 350m
1	350m ≤ 精度 < 1000m
0	1000m ≤ 精度

なお、赤道において150mは、約0.002度であることから、Class = 3である場合の精度は、±0.002度程度であり、同様に1000mは、約0.010度であることから、Class = 1の場合は、±0.010度程度の精度であると言える。

つまり、アルゴフロートの位置データとして上記のClass = 1~3のデータを用いた場合、最大で1kmの誤差があるため、滞在深度における流速を求める際にもこの分の誤差が含まれることになる。

図3は、ARGOSシステムにより測定された位置情報を元に、漂流の軌跡をプロットしたものである。海面漂流中に何度か位置を測定されていることがわかる(図3(b)の黒丸及び白丸)。フロートの沈降前最後の測定位置と浮上後最初の測定位置を用いて滞在深度における流速($v = L(x_0, x_1) / t$)の分布を求めると図4、図5のようになる。

しかしながら、衛星の飛来頻度を考えるとフロートが海面に浮上した直後に衛星が上空を通過するとは限らず、また同様に、沈降開始直前に通過するとも限らないことから、海面浮上位

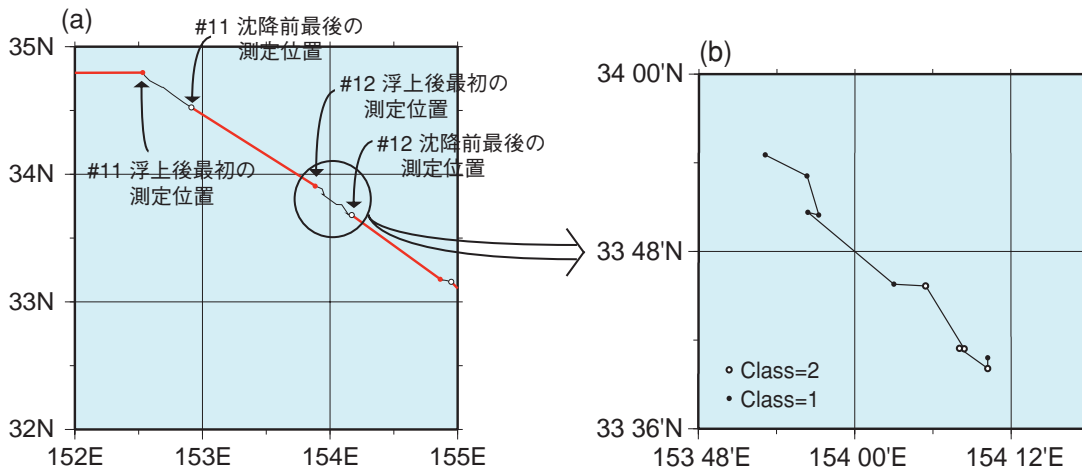


図3 ARGOSシステムによるアルゴフロートの位置測定

Fig. 3 Sample of Argo float positions fixed by ARGOS system.

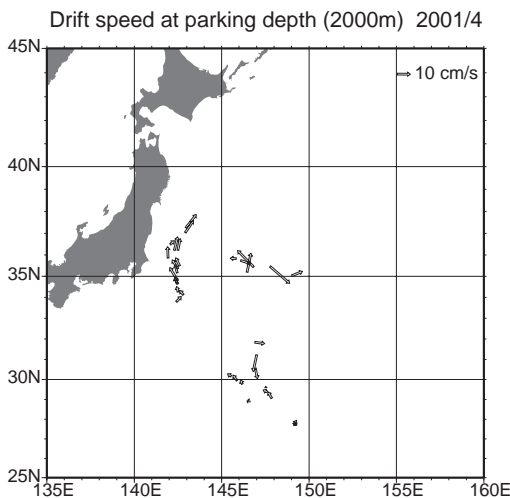


図4 滞在深度(Parking depth)における流速分布例(2001/4)
Fig. 4 Distribution of the drifting velocity at the parking depth (2000m) for April 2001.

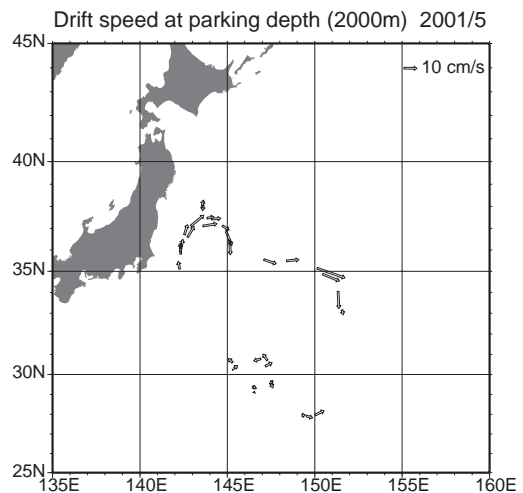


図5 滞在深度(Parking depth)における流速分布例(2001/5)
Fig. 5 Same as fig. 4 but for May 2001.

置・沈降開始位置は共に不明である。従って、浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間と、沈降前最後の位置測定時刻から沈降開始時刻までの時間に海面でフロートが漂流するために滞在深度流速に誤差が生じると考えられる。図4、図5を見ると、一部10cm/secを越える早い流れが認められるが、図6を見て分かるように海面での漂流速度も早いために上記の誤差が影響している可能性がある。なお、図6はARGOSシステムにより測定された位置情報を元に、海面漂流中のフロートの平均漂流速度つまり海面平均流速を求めた結果である。

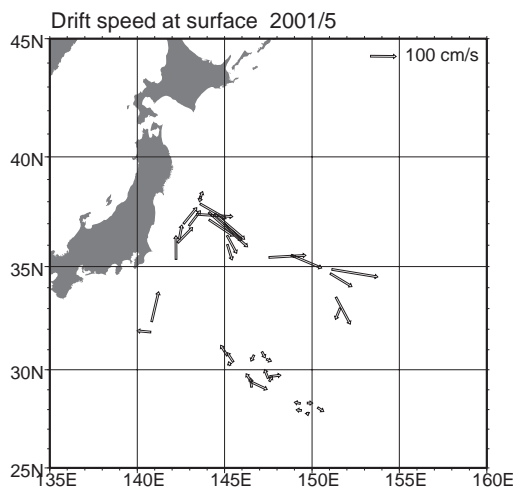


図6 海面流速分布例(2001/5)
Fig. 6 Same as fig. 5 but for the sea surface.

2.2. 海面における漂流による誤差の評価

滞在深度の流速の推定に関して、フロートが位置取得前/後に海面で漂流することによる誤差は、フロートの浮上時刻と沈降開始時刻が分かれば評価できる。フロートの沈降開始時刻は、アルゴフロートの浮上・沈降サイクルを制御するプログラムにおいて次のパラメータが設定されているため算出可能である。

- 1) First Down Time: アルゴフロートの電源投入時刻から第1回目沈降開始までの時間(以下 FDT と記す)
- 2) Down Time: 沈降開始時刻から浮上開始時刻までの時間(以下 DT と記す)
- 3) Up Time: 浮上開始時刻から沈降開始時刻までの時間(以下 UT と記す)

アルゴフロートは電源投入時刻からFDT後に第1回目の沈降を開始し、滞在深度まで沈む。沈降開始からDT後に浮上を開始し、水圧・水温・塩分を測定しながら海面まで浮上する。海面に浮上すると観測データの送信を開始し、浮上開始時刻からUT後に沈降を開始、再び滞在深度まで沈む。2度目の沈降からはDTとUTを繰り返す(図7参照)。フロートの浮上・沈降サイクルはフロート内部の時計で管理されている。フロートの電源投入時刻を t とすると、第 n 回目沈降開始時刻、第 n 回目浮上開始時刻は次のように求められる。

$$n \text{ 回目浮上開始時刻} = t + \text{FDT} + (\text{UT} + \text{DT}) \times (n - 1) + \text{DT}$$

$$n \text{ 回目沈降開始時刻} = t + \text{FDT} + (\text{UT} + \text{DT}) \times (n - 1)$$

一方、フロートの浮上時刻はアルゴフロートより送られてくるデータに含まれる情報により算出する事が出来る。アルゴフロートは、取得した観測データ及びフロートステータス情報を「ARGOSメッセージ(以後、単にメッセージと記す)」という

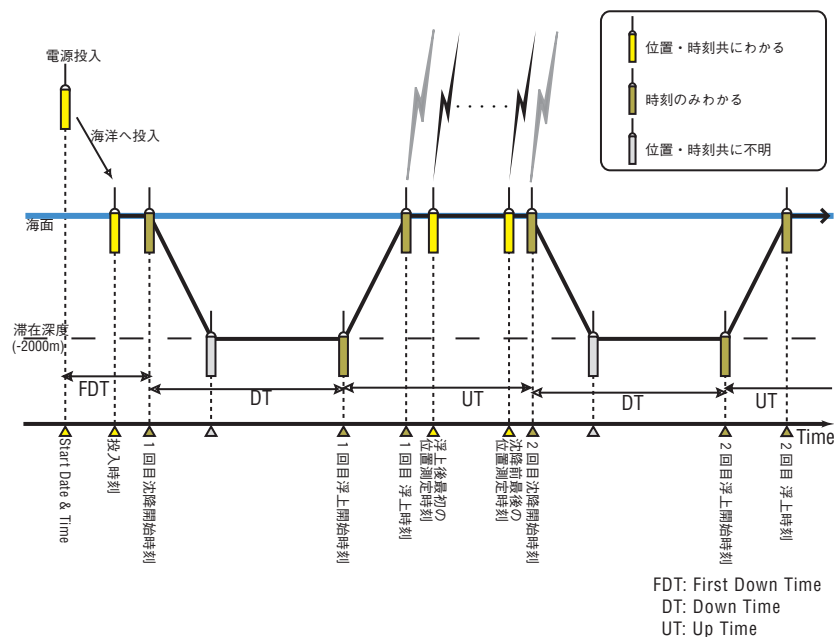


図7 アルゴフロートの浮上・沈降サイクル
Fig. 7 Cycles in the mission of an Argo profiling float.

単位(1メッセージは32バイト)に分割してデータを送信している。これはARGOSシステムが一度に受信できるデータ量が32バイトであるためである。このため、1回の観測分のデータを送信するにあたり12~14メッセージ(観測する圧力層の数による)を必要とする。それぞれのメッセージには「メッセージ番号」と呼ばれる連番がつけられている。アルゴフロートは海面に浮上するとメッセージ番号 "1" のメッセージから順に送信を開始し、一定時間(ARGOS送信周期)毎にメッセージ番号順に送信する。一通りのメッセージを送信後は再度メッセージ番号 "1" から順に送信を繰り返す。なお、メッセージ番号 "1" のメッセージには、何回目のメッセージ番号 "1" の送信であるかを示す項目である「メッセージブロック番号」がつけられている(図8参照)。従って、次の式により

送信開始時刻すなわち浮上時刻を算出することが出来る。メッセージ番号 "1", メッセージブロック番号 "m"であるメッセージを受信した時刻: t_m
1メッセージブロックのメッセージ数: n
ARGOS送信周期: τ とすると

$$\text{浮上時刻} = t_m - (\tau \times n) \times (m-1)$$

この方法で算出した浮上時刻は、±1秒程度の誤差で算出できる。表2にARGOS送信周期が90秒であるフロートの浮上時刻算出例を示す。なお、観測層が浮上毎に異なることがあるため1メッセージブロックを構成するメッセージ数も異なることがある。

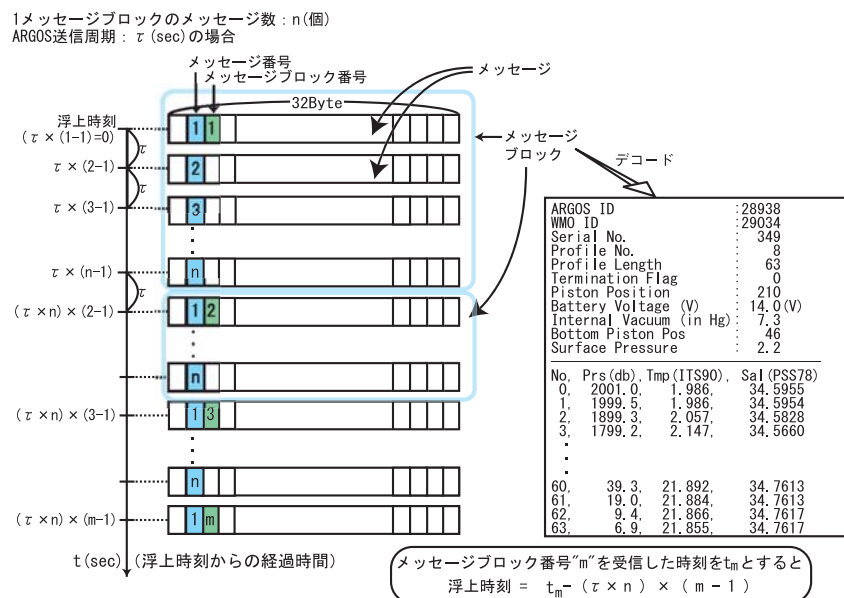


図8 浮上時刻算出方法

Fig. 8 Concept of the calculation the surfaced time from ARGOS messages.

表2 浮上時刻算出例

Table 2 Estimation of the surfacing time.

Profile No.	1メッセージブロックに含まれるメッセージ数	メッセージブロック番号	受信時刻(UTC)	見積もられた浮上時刻(UTC)
1	12	4	4/4/2000 08:32:58	4/4/2000 07:38:58
		10	4/4/2000 10:20:58	4/4/2000 07:38:58
		13	4/4/2000 11:14:58	4/4/2000 07:38:58
		40	4/4/2000 19:20:57	4/4/2000 07:38:57
		45	4/4/2000 20:50:57	4/4/2000 07:38:57
		51	4/4/2000 22:38:56	4/4/2000 07:38:56
2	13	1	4/18/2000 07:35:47	4/18/2000 07:35:47
		3	4/18/2000 08:14:47	4/18/2000 07:35:47
		9	4/18/2000 10:11:46	4/18/2000 07:35:46
		34	4/18/2000 18:19:16	4/18/2000 07:35:46
		39	4/18/2000 19:56:45	4/18/2000 07:35:45
		41	4/18/2000 20:35:45	4/18/2000 07:35:45
		47	4/18/2000 22:32:45	4/18/2000 07:35:45
		52	4/19/2000 00:10:15	4/18/2000 07:35:45
		57	4/19/2000 01:47:45	4/18/2000 07:35:45

以上のパラメータについて現在までに我々が投入したアルゴフロートの設定を表3に示す。

ここで、算出された浮上時刻、沈降開始時刻を用いて、浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間(図9の①、以降①と記す)、沈降前最後の位置測定時刻から沈降開始時刻までの時間(図9の②、以降②と記す)について調べたところ、図10、図11の結果が得られた。これより、①、②はそれぞれ約1時間であることが分かる。なお、図10、図11はUT、DT、ARGOS送信周期、滞在深度が同一に設定されているWMO ID 29042~29054のフロートについて示した。

次に上記①、②において海面でフロートが漂流するために生じる誤差の評価を行う。ただし、ここでは誤差を簡便に見積もるため、海面の流れがすべて同じ方向に流れているものと仮定

表3 現在までに海洋科学技術センター/地球観測フロンティア研究システムで投入したアルゴフロートの仕様

Table 3 Specification of the Argo floats deployed by JAMSTEC / FORSGC.

WMO ID	FDT (hour)	DT (hour)	UT (hour)	ARGOS 送信周期 (sec)	滞在深度 (m)
29032	6	649	23	90	1500
29033	6	313	23	90	1500
29034	6	213	27	90	2000
29035	6	213	27	90	2000
29042	6	225	15	44	2000
29043	6	225	15	44	2000
29044	6	225	15	44	2000
29045	6	225	15	44	2000
29046	6	225	15	44	2000
29047	6	225	15	44	2000
29048	6	225	15	44	2000
29049	6	225	15	44	2000
29050	6	225	15	44	2000
29051	6	225	15	44	2000
29052	6	225	15	44	2000
29053	6	225	15	44	2000
29054	6	225	15	44	2000
2900055	6	213	27	90	2000
2900056	6	225	15	44	2000
2900057	6	225	15	44	2000

し、流速を1次元で評価することにする。この場合、流向を含めた2次元で評価するより誤差を大きく見積もることになる。

まず、①のフロートが海面で漂流するために生じる誤差について考える(前出の図9参照)。ここで、海面でのフロートの漂流速度を v_s 、滞在深度における仮の漂流速度を v_p' とする。すなわち、 $v_s = L_s / t_s$ 、 $v_p' = L_p / t_p$ である。ここで、浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間を Δt 、その間の移動距離を ΔL とすると、フロートはこの時間に海面において速度 v_s で漂流するから、 $\Delta L \sim v_s \Delta t$ である。

Δt は滞在深度における漂流時間 t_p に比べて十分に小さいので、

$$\begin{aligned} v_p &\sim (L_p - \Delta L) / (t_p - \Delta t) \\ &\sim (L_p - v_s \Delta t) / (t_p - \Delta t) \\ &\sim (L_p - v_s \Delta t) / t_p \quad (\because \Delta t \ll t_p) \\ &= v_p' - v_s \Delta t / t_p \end{aligned}$$

となる。従って、誤差は $\epsilon_1 = v_s \Delta t / t_p$ と見積もることが出来る。 t_p はほぼ一定と言えるので、 Δt 及び v_s の値が小さいほど ϵ_1 が小さくなる。なお②に生じる誤差も①と同様に求められる。

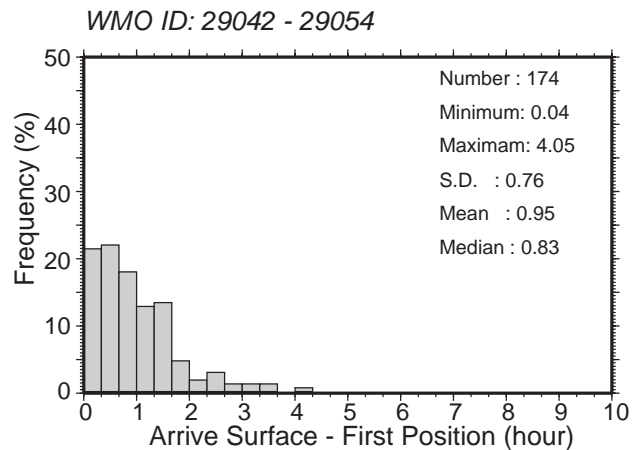
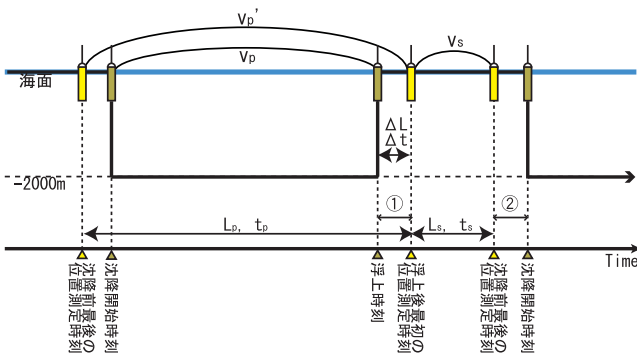


図10 浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間分布
Fig.10 Histogram of the time between surfacing first occurs and first position fixed.



※ ここでは、浮上時間、沈降時間はないものとする。

図9 浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間に生じる誤差
Fig.9 Concept of the error estimation for the period from the float surfaced and first position fixed.

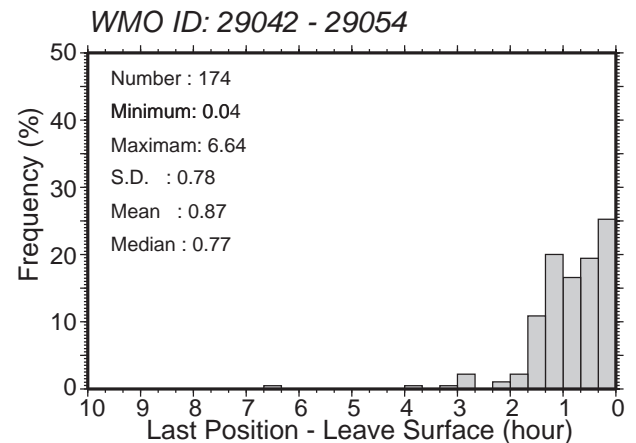


図11 沈降前最後の位置測定時刻から沈降開始時刻までの時間分布
Fig.11 Histogram of the time between last position fixed and descent begin.

2.3. 浮上中・沈降中にフロートが漂流するために生じる誤差

フロートは滞在深度から海面に浮上している間も周囲の水と共に移動している。しかしながら、すべての深度において流速が等しいことはまれであり、一般に海面に近づくにつれて流速は大きくなる。このため、正確な浮上・沈降の位置及び時刻から滞在深度の流速を推定しても浮上途中における移動分が過大評価されていることになる。ここではフロートが浮上／沈降途中に漂流速度が変わることによって生じる誤差について評価をする。まず、浮上開始時刻と浮上時刻から浮上に要する時間を求めた。前節と同様にWMO ID 29042～29054のフロートを対象に調査したところ、図12の結果を得た。浮上開始時刻から浮上時刻までの浮上時間(図13の③、以降③と記す)はこれらのフロートについては約6.5時間である。

誤差を簡便に見積もるため、海面、海洋内部の流れがすべて同じ方向に流れているものと仮定し、流速を1次元で評価することとした。また、フロートは深度(z)に対し一定の速度で浮上すると仮定(z = at(a:浮上速度))、海面での流速をv_s、滞在深度における仮の流速をv_p'とする(図13参照)。

ここで流速の鉛直分布をV(z) + v_pと表すと(図14)、浮上開始時刻から浮上時刻までの時間Δtの間に移動する距離ΔLは次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta L &= \int_0^{\Delta t} (V(z) + v_p) dt \\ &= \int_0^{\Delta t} V(z) dt + v_p \Delta t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_p &\sim (L_p - \Delta L) / (t_p - \Delta t) \\ &= 1 / (t_p - \Delta t) \times (L_p - \int_0^{\Delta t} V(z) dt - v_p \Delta t) \end{aligned}$$

と近似できるので、これを展開して整理すると、

$$\begin{aligned} v_p + (1 / (t_p - \Delta t)) \times v_p \Delta t &= 1 / (t_p - \Delta t) \times (L_p - \int_0^{\Delta t} V(z) dt) \\ v_p \times \left\{ (t_p - \Delta t) + \Delta t \right\} / (t_p - \Delta t) &= 1 / (t_p - \Delta t) \times (L_p - \int_0^{\Delta t} V(z) dt) \\ t_p \times v_p &= L_p - \int_0^{\Delta t} V(z) dt \\ v_p &= (1 / t_p) \times (L_p - \int_0^{\Delta t} V(z) dt) \\ &= v_p' - (1 / t_p) \times \int_0^{\Delta t} V(z) dt \end{aligned}$$

従って、誤差はε₂ = (1 / t_p) × ∫₀^{Δt} V(z) dt となる。
 ところで、z = at (a:定数) であるため、dt = (1 / a) dz。
 従って、ε₂ = (1 / a) (1 / t_p) ∫₀⁻²⁰⁰⁰ V(z) dz と表記できる。
 ∫₋₂₀₀₀⁰ V(z) dz はフロートの上昇速度によらず、流速の鉛直分布V(z)により決まるので、∫₋₂₀₀₀⁰ V(z) dz = (v_s - v_p') × R (R:定数)と表せるとすると、ε₂ = (1 / a) (1 / t_p) (v_s - v_p') × R (∵ (v_s - v_p') ~ (v_s - v_p')) である。

この場合もt_pはほぼ一定と考えて良いのでε₂には影響しない。すなわちε₂は海面流速と滞在深度流速の差が同じであっても流速の鉛直分布によって異なることが分かる。また浮上速度aが早くなるほど、また海面流速と滞在深度流速の差(v_s - v_p')が小さくなるほどε₂は小さくなる。

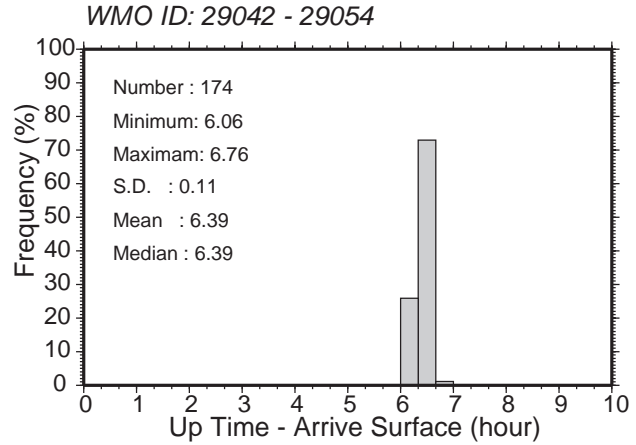


図12 浮上時間の分布図
 Fig.12 Histogram of the ascent time.

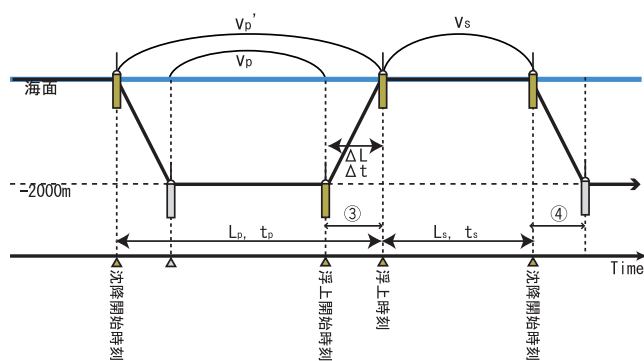


図13 浮上開始時刻から海面浮上時刻までの浮上時間に生じる誤差
 Fig.13 Same as fig. 11 but for the ascent time.

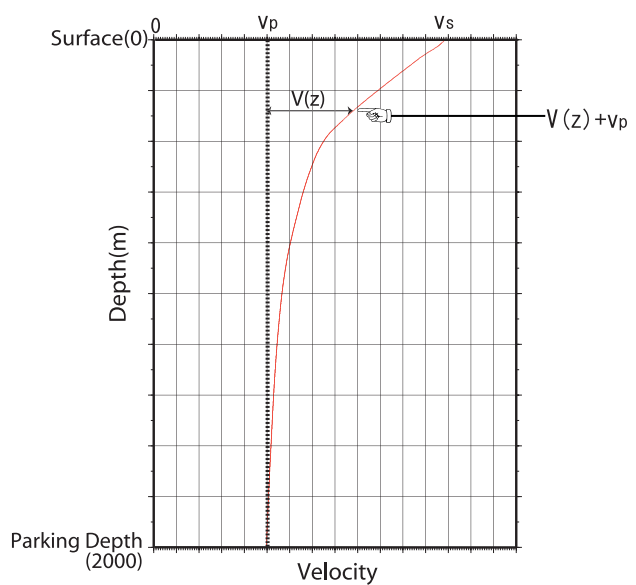


図14 流速鉛直分布
 Fig.14 Conceptual drawing of the velocity profile.

沈降開始時刻から滞在深度到着時刻までの沈降時間(図13の④,以降④と記す)に生じる誤差は,現在のフロートでは正確な沈降時間が不明であるため,仮に③と同じ程度の時間を要するとすると,発生する誤差は③で発生する誤差と同じ程度であると考えられる。

ところで, R は流速差の鉛直分布 $V(z)$ により異なる。そこで,我々のフロート展開海域で流速差の大きさを見積もるため,過去のWOCEのCTD観測結果から比較的大きい流速差のものを選んで,2000db基準の地衡流を計算した(図15,図16)。この流速鉛直分布から,それぞれの流速分布の定数 R を求めてみた。ただし,積分の際には海面での流速差で正規化した。すなわち, $V(0m) = v_s - v_p$, $V(-2000m) = 0$ である。すると図15の場合 $R_{15} = 65527[cm]$, 図16の場合, $R_{16} = 38461[cm]$ という値になる。定数 R の値は,図15の場合は図16の場合の約1.5倍となる。

3. 全体の評価

以上の誤差の評価式を用いて実際のフロートのデータから誤差を算出してみた(表4)。 ε_2 は図15の流速鉛直分布を持つ場合と,図16の流速鉛直分布を持つ場合の2通りを算出した。また,上昇速度は8.6cm/sec(=2000m/6.5hour)とした。

ところで,2.1で示したARGOSシステムにおける位置測定誤差は,滞在深度流速に,最大で $1km \times 1000m \times 1000cm / ((225hour - 6.5hour) \times 3600sec) = 0.1cm/sec$ の誤差を生じさせる。この誤差を ε_0 とする。

海面,海洋内部の流れがすべて同じ方向に流れていると仮定しているため,誤差 ε_1 と ε_2 は同じ向きの値となり,単純に加算して $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ である。 ε_0 と $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ は,独立した事象の誤差の和であるため, $\sqrt{\varepsilon_0^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}$ であると見積

もることが出来る。また,浮上時と沈降時の両方に誤差が生じるが,浮上時,沈降時の流れの向きも同一方向であると仮定すると,滞在深度流速に与える誤差全体は $\varepsilon = \sqrt{2 \times \{\varepsilon_0^2 + (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2\}}$ であると評価できる。

従って,真の滞在深度流速は $v_p = v_p' - \varepsilon$ と見積もることができ,ここで求められた真の滞在深度流速に対する誤差の割合を求めると表5を得る。なお,表5における ε_2 の評価には R_{15} (=65527)を用いた。この結果によるとARGOSシステムから得られた位置をそのまま用いると滞在深度の流速を10%~25%過大評価していると言いうことが出来る。また,浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間が1.5時間程度の場合,浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間に海面で漂流してしまうために生じる誤差 ε_1 と,浮上中に漂流してしまうために生じる誤差 ε_2 は同じ程度であると考えられる。すなわち,海面で漂流してしまうために生じる誤差 ε_1 を取り除くことによって,誤差の約半分を除くことが出来る。

ところで,誤差 ε_1 には,海面流速と,浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間が影響するが,海面流速は変えることはできないため,誤差 ε_1 を左右するのは浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間である。ここで,浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間を0にするには,浮上位置が測定できれば良い。しかし,現在のARGOSシステムでは浮上位置を測定できる可能性は低いので,フロートが海面漂流中にARGOSシステムにより測定された位置情報を元に位置の外挿を行うことで浮上位置を推測することができれば浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間を0に近づけることができる。また,今後もしARGOSシステムに使用する衛星数が増えることになれば,衛

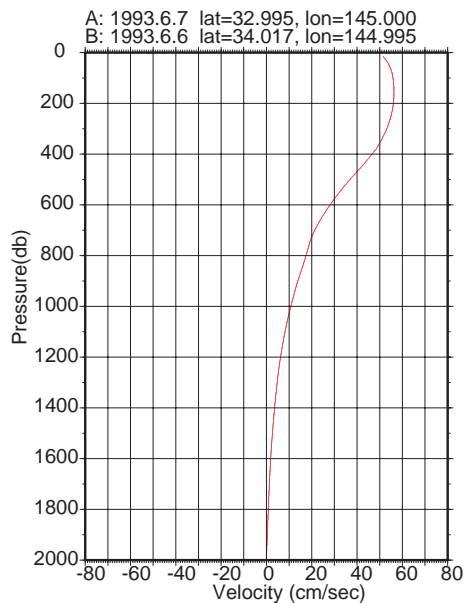


図15 (33N, 145E), (34N, 145E)間の流速鉛直分布(2000db基準)
Fig.15 Geostrophic velocity distribution referred to 2000db depth between the stations at 33N, 145E and 34N, 145E.

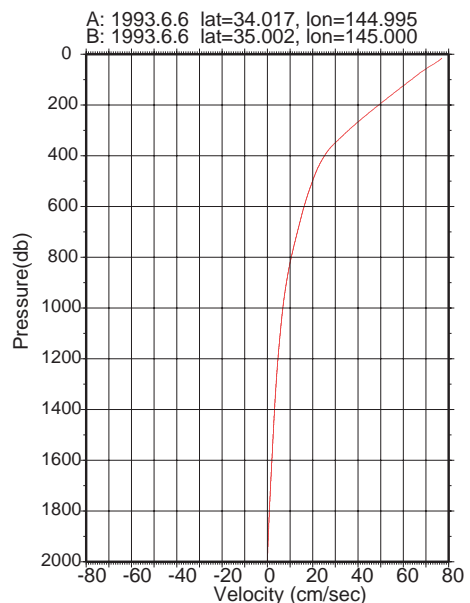


図16 (34N, 145E), (35N, 145E)間の流速鉛直分布(2000db基準)
Fig.16 Same as fig.15 but for the stations at 34N, 145E and 35N, 145E.

星がフロートの上空を飛来する頻度が高くなり、現在約1時間かかっている浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間を少なくすることができるため、位置の外挿精度を良くすることができるであろう。さらに、フロートにGPSを搭載することができれば、フロートがGPSにより浮上位置・沈降開始位置を得て、それを観測データと共に送信することで、浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間をなくすることができる。すなわち誤差 ϵ_1 が発生しなくなる。

また、誤差 ϵ_2 については、海面流速と滞在深度流速の差、及び、海洋中の流速鉛直分布は人工的に変えることができないが、浮上速度を早くすることができれば、浮上にかかる時間が短くすることになり、誤差を少なくすることが可能である。さらに、同化システムの利用、及び、海洋中のフロート数の充実などにより海洋内部の流速鉛直分布が分かるようになれば、浮上中にフロートが漂流した距離を算出することができ、誤差を減らすことが可能となる。

4. まとめ

現在のARGOSシステムではフロートの海面浮上直後および沈降開始直前に衛星が位置測定を行わない限り浮上位置、沈降開始位置は不明である。また、フロートの浮上中・沈降中にフロートが流される距離も海洋内部の流速鉛直分布がわからないため不明である。このことから分かるように、滞在深度における流速には誤差が含まれてしまうのはやむを得ない。しかし、現在のARGOSシステム及びアルゴフロートの仕様においてこの誤差をなるべく小さくするには、位

置の外挿により浮上位置・沈降開始位置を推測することが最も有効な手段である。ARGOSシステムにより測定された位置情報を用いて浮上位置・沈降開始位置を外挿する手法の検討を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) Davis, R. E., Webb, D. C., Regier, L. A. and Dufour, J., "The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE)", J. Atm. And Oceanic Technol., 9 (3), 264-285 (1992).
- 2) Davis, R. E., "Preliminary results from directly measuring middepth circulation in the tropical and South Pacific", J. Geophys. Res., 103 (11), 24,619-24,639 (1998).
- 3) Riser, S. C., "An Examination of the North Atlantic Circulation Using PALACE Floats", 1998 U.S. WOCE Report, 10 22-25 (1998).
- 4) 四電信行, 岩尾尊徳, 金子郁雄, "中層フロートによる西部亜熱帯域の中層循環観測", 2000年度海洋学会秋季大会講演要旨集, 72(2000)。
- 5) 水野恵介, "高度海洋監視システム(ARGO計画)について", 日本造船学会誌, 854, 485-490(2000)。
- 6) CLS/Service Argos, Users Manual 1.0. (CLS/Service Argos, Inc., January 1996).

(原稿受理:2001年8月9日)

表4 実際のデータから算出した誤差

Table 4 Estimated errors in case of the large drifting velocity at the sea surface and small drifting velocity.

WMO ID	Prof No.	浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間 (hour)	海面流速(v_s) (cm/sec)	滞在深度流速(v_p^*) (cm/sec)	ϵ_1 (cm/sec)	$\epsilon_2(R_{15}$ の場合) (cm/sec)	$\epsilon_2(R_{16}$ の場合) (cm/sec)
29043	12	1.45	182.0	13.4	1.2	1.3	0.7
29043	11	0.06	161.9	9.2	0.0	1.1	0.7
29051	6	1.50	41.0	5.2	0.3	0.3	0.2
29051	12	0.05	33.1	2.9	0.0	0.2	0.1

表5 滞在深度流速に対する誤差の割合

Table 5 Error ratio for the cases listed in table 4.

WMO ID	Prof No.	浮上時刻から浮上後最初の位置測定時刻までの時間 (hour)	海面流速(v_s) (cm/sec)	滞在深度流速(v_p^*) (cm/sec)	$\epsilon = \sqrt{2 \times \{\epsilon_0^2 + (\epsilon_1 + \epsilon_2)^2\}}$ (cm/sec)	真の滞在深度流速(v_p) (cm/sec)	ϵ/v_p (%)	ϵ_0/v_p (%)	ϵ_1/v_p (%)	ϵ_2/v_p (%)
29043	12	1.45	182.0	13.4	2.5	10.9	23	1	11	12
29043	11	0.06	161.9	9.2	1.2	8.0	15	1	1	14
29051	6	1.50	41.0	5.2	0.6	4.6	12	2	6	6
29051	12	0.05	33.1	2.9	0.3	2.6	10	4	0	9