

ADCP用中層係留系の設計及び実海域における挙動

伊藤 淳雄^{*1} 高尾 宏一^{*1} 米山 邦夫^{*2}
安藤健太郎^{*2} 河野 健^{*2} 黒田 芳史^{*2}

西部太平洋赤道域における長期間の海流変動を計測するため、音響式流速プロファイラーを取り付けた中層係留系の設計を行なった。ブイの挙動はランプドマス法を基にした係留系の挙動プログラムによって計算し、これにより得られた結果と実海域でのブイの挙動と比較検討した。このプログラムでは係留系の各ブイの深度、張力、安全率などを得ることができる。そして、その設計ではADCPを取り付けたトップブイが250m～300mの範囲にあること、係留系の各部位における安全率が4以上であることとした。この設計された係留系を1993年12月、0°、147°Eに設置し、翌年5月に回収した。この回収した係留系のデータからトップブイの深度が239～270mにあったことを示した。そして、トップブイは半日周期で変動し、変化の穏やかな時期ではその鉛直変位は9mであったが、最大の変化を示したときには30mに達した。また、トップブイに取り付けられたADCPの最大傾き角は5.5°であり、ADCPの計測可能範囲内にある。

キーワード：ADCP, 係留系, 西部熱帯太平洋, TOCS

Design for Subsurface Mooring with an Acoustic Doppler Current Profiler and Its Motions in the Open Sea

Atsuo ITO^{*3} Koichi TAKAO^{*3}
Kunio YONEYAMA^{*4} Kentaro ANDO^{*4}
Takeshi KAWANO^{*4} Yoshifumi KURODA^{*4}

A subsurface mooring with an acoustic Doppler current profiler was designed using a model simulating buoy motions, which mooring is for measuring long term current variabilities in the western equatorial Pacific. The buoy motion in the open sea was investigated and compared with simulated values. A model based on lumped mass method was used to derive cable catenary, tensions and safety factors. Through the design procedure, the following were taken into account. First, the top buoy with the ADCP will be in the range of 250–300 m depth. Second, the safety factors for each buoy

* 1 日本海洋事業株式会社

* 2 海洋観測研究部

* 3 Nippon Marine Enterprises Ltd.

* 4 Ocean Research Department

materials will be over four. The mooring was deployed at $0^{\circ}, 147^{\circ}\text{E}$ in 1993. The top buoy was in the range of 239–270 m depth in the sea. The top buoy fluctuated vertically about 9 m in quiet periods, but 30 m in the largest case with semi-diurnal cycle. The largest tilt angle of the ADCP was 5.5 degrees to the vertical axis which is within the measurable range of 15 degrees.

Key words : ADCP, mooring, western equatorial Pacific, TOCS

1 はじめに

西部熱帯太平洋は世界でも最も高温となる海域であり、 28°C 以上の海域は特に warm pool と叫ばれている。この warm pool の東進に伴いエルニーニョ現象が発生することが示されている。しかしながらこの warm pool の消長の機構は必ずしも明らかにされていない。当センターでは、熱帯赤道域の観測研究プロジェクト（平成5年～現在）においてこの海域のエルニーニョ現象に伴う海流変動を計測する目的で音響式流速プロファイラー（ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler）を係留し、長期測流を行うことを開始した。この係留系では赤道潜流（西太平洋では100～250m深に存在する）を含む表層の海流について日変化から年々変動を把握することを目標にしている。

本報告では、このADCP用中層係留系の設計について、その基本的な考え方と、既存の係留系挙動計算プログラムを用いた設計の結果について述べる。また、実海域設置後のブイの挙動について報告する。本報告は今後の係留系設計の向上のための資料として活用されることを目的とする。なお、この設計においては九州大学応用力学研究所、東海大学、フロリダ州立大学がTOGA COARE時に用いたADCP係留系（TOGA COARE Operations Plan, 1992¹⁾）を参考にした。

2 ブイの設計

2.1 設計の目標

係留系の設計の主眼は、観測機器であるトップブイに取り付けられたADCPを正確に目的の深度に入れることである。その理由としてはADCPの計測範囲が約300m以内であること（音響散乱強度のS/N比が流速計測に十分大きい必要があるため）、また3.2節で述べるようにサイドローブの影響で、メインローブの鉛直軸からの傾きを θ とすると、海表面からADCPの深度 $\times (1 - \cos \theta)$ の深度まで計測できずADCPの深度をあまり深く取ると、表層のデータが欠測されることになるためである。

また、設置後のトップブイの最浅深度は先に述べたように赤道潜流を計測できること、また漁労等による係留索の切断を避けるため250mより浅くならないように設計した。次に、使用する機材などで考慮すべき点として以下の4項目が挙げられる。

- ① 深度700mまではフィッシュバイトによる切断に弱い繊維ロープを避け必ずワイヤロープを使う。
- ② それ以下の深度では軽量、水の抵抗の軽減、複数回の使用可能、低い伸び率という長所を持つケブラーロープを使用する。
- ③ 係留系のより高い回収率を考え音響切り離し装置を2台（今回は並列）にする。
- ④ 着底した時の音響切り離し装置のオーバーシュートをなるべく軽減するため、直上にガラス玉ブイを取付け、音響切り離し装置の下にはアンカー投入時のショックを和らげるためナイロンロープを使用する。このガラス玉ブイはまた、ADCPが切れて流れたときにも、ワイヤー索以下の部分を回収するための浮力を有している。

以上が設計に関する重要な点であるが、これら以外にADCPの設置した深度を確認するため直下にSEA BIRD Electronics社のCTD SBE16を取り付けた（図1）。またADCPは直径1.2mのシンタックフォームブイ（水中での浮力520kg）に取り付けられており、ブイによる形状抵抗を小さくしている。“かいよう”船上での係留作業時のADCP付シンタックフォームブイを写真1に示す。

2.2 中層ブイ挙動解析プログラム

中層ブイ係留系の設計に際しては、日本飛行機株式会社の協力を得て作成された「海洋音響トモグラフィー係留システム挙動計算プログラム」（海洋科学技術センター, 1991²⁾）を使用した。その原理としてはランプドマス法（川建ほか1987³⁾）を用いている。これは、係留系を質点とバネ要素に分け、外力（流れ）を与えたとき

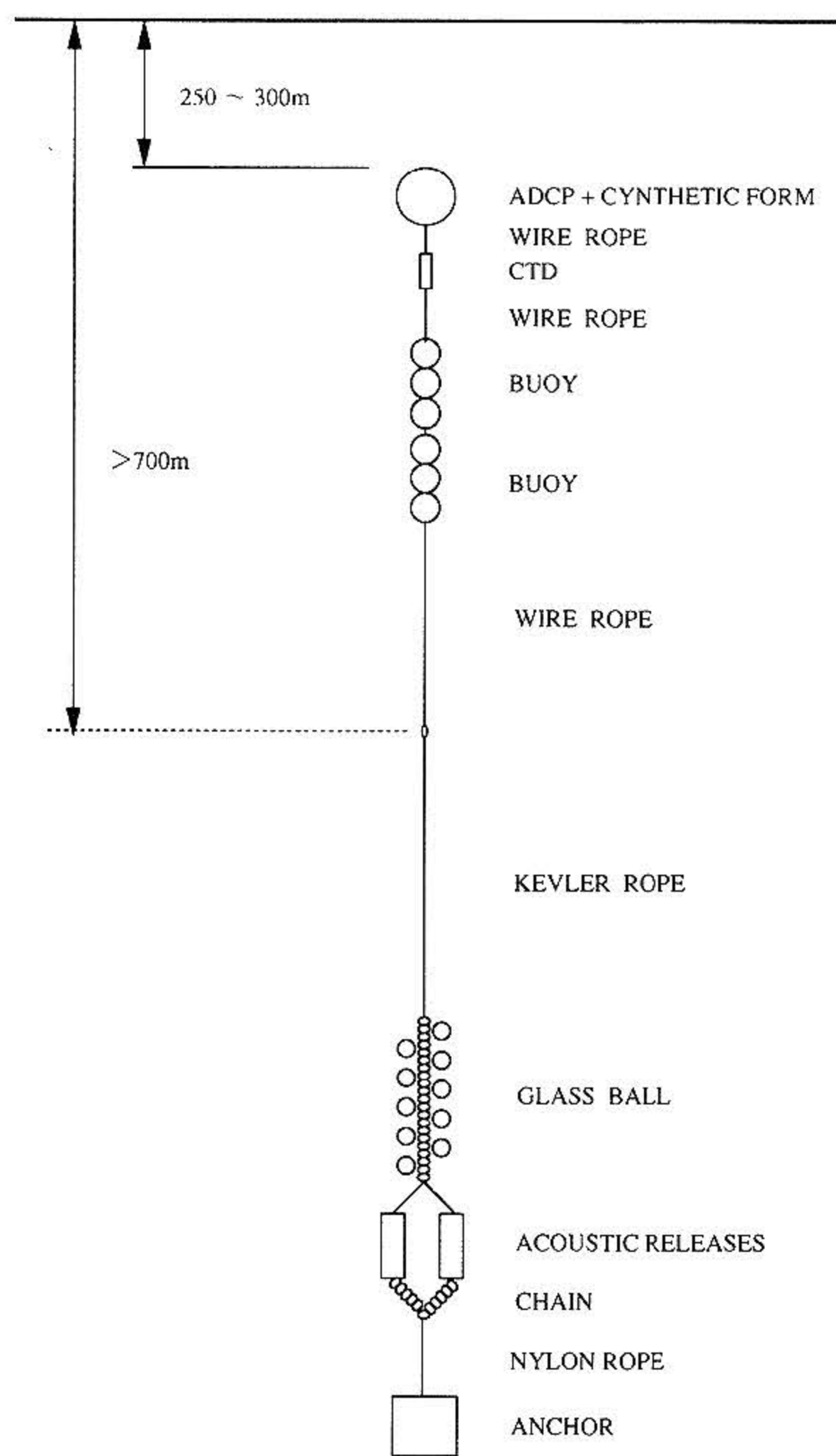


図1 ADCP 係留系模式図

Fig.1 Schematic diagram of the subsurface ADCP mooring.

の各要素における力のつり合いを調べるものである (図2)。

2.3 係留系入力データ

次に、この解析プログラムを使用したときの係留系入力要素は係留索の部分とジョイントの部分とに分けられ、それらの内容は以下の表のようになる (表1, 表2)。また、その時の係留系詳細は図3のようになる。各ラインにおける分割数はその長さに合わせて決めるが、最小で2分割、あとは約70m毎に1区切りとした。

2.4 外力

係留系の設計の段階における外力に関しては仮想の流速プロファイルを与え、系の傾き、測器の深度、各部分の張力などを計算した。この流速のプロファイルは以下

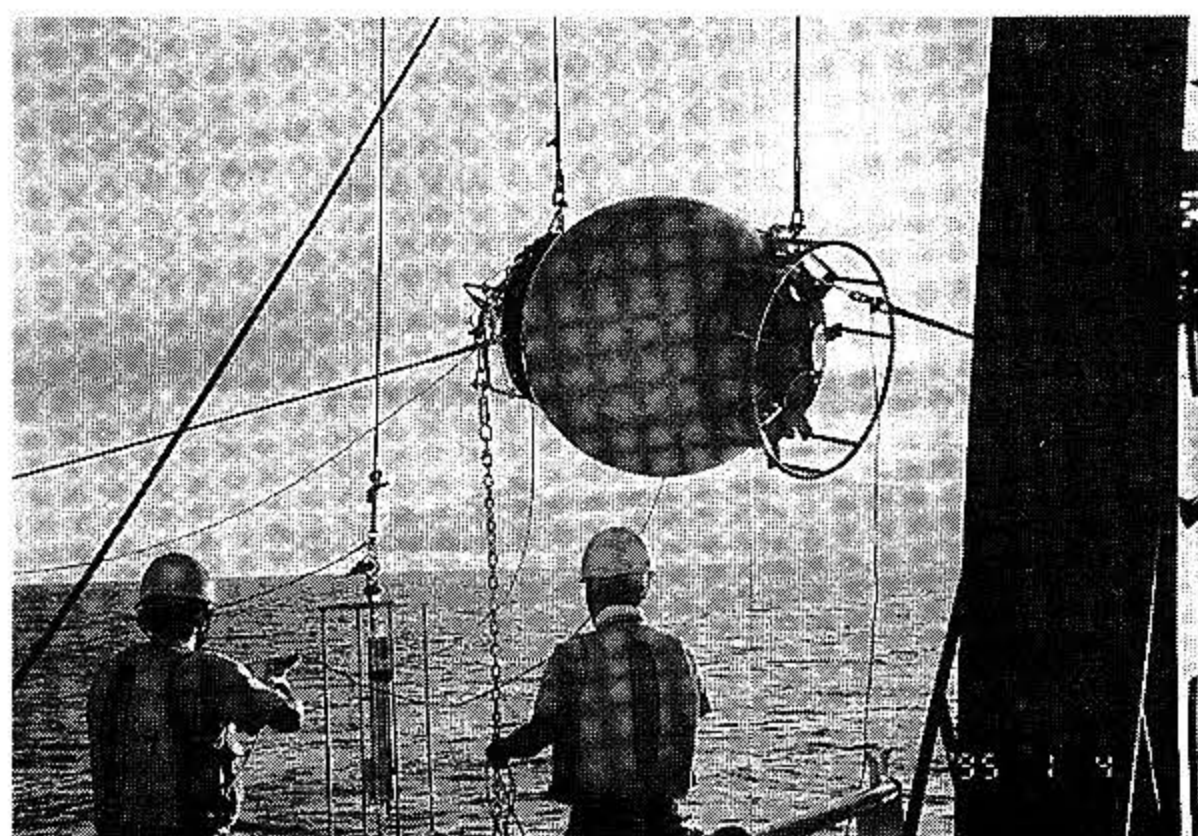


Photo 1 Top buoy mounted with ADCP.

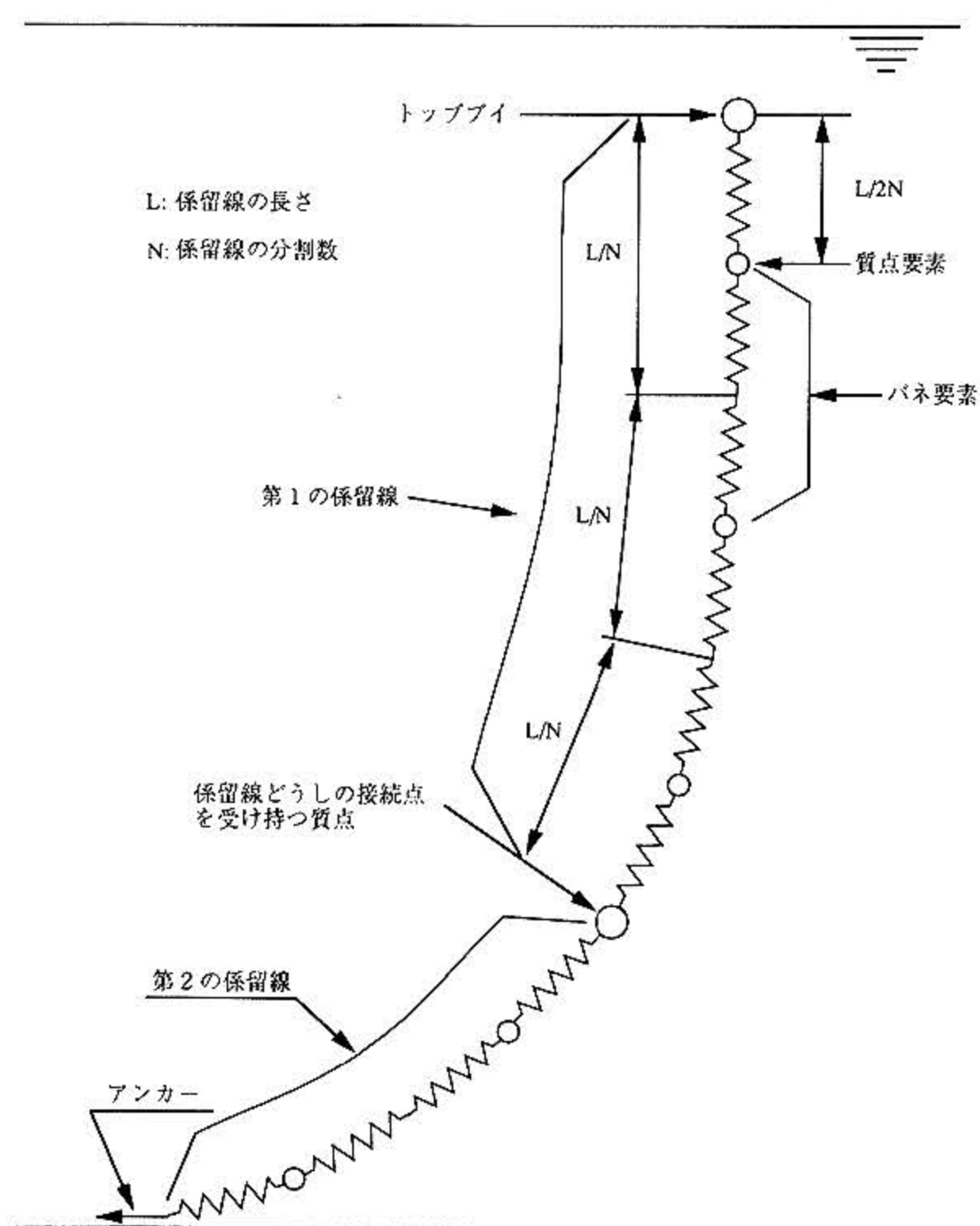


図2 要素分割方法

Fig. 2 Elements for the lumped mass model.

の図4のように仮定した。海水面から深度500mまでは一定の流速を与え (図では0.5m/sと記しているが、これを想定する海流の分布とした。), それ以下の深度では一定に減速し1,000mまでに流速が0 m/sになるように設定した。1,000m以深に関しては海底まで流速が無いものとした。

2.5 結果

(1) カテナリー (係留系の傾き形状)

以上の計算によって得られた係留系の傾き形状は各流

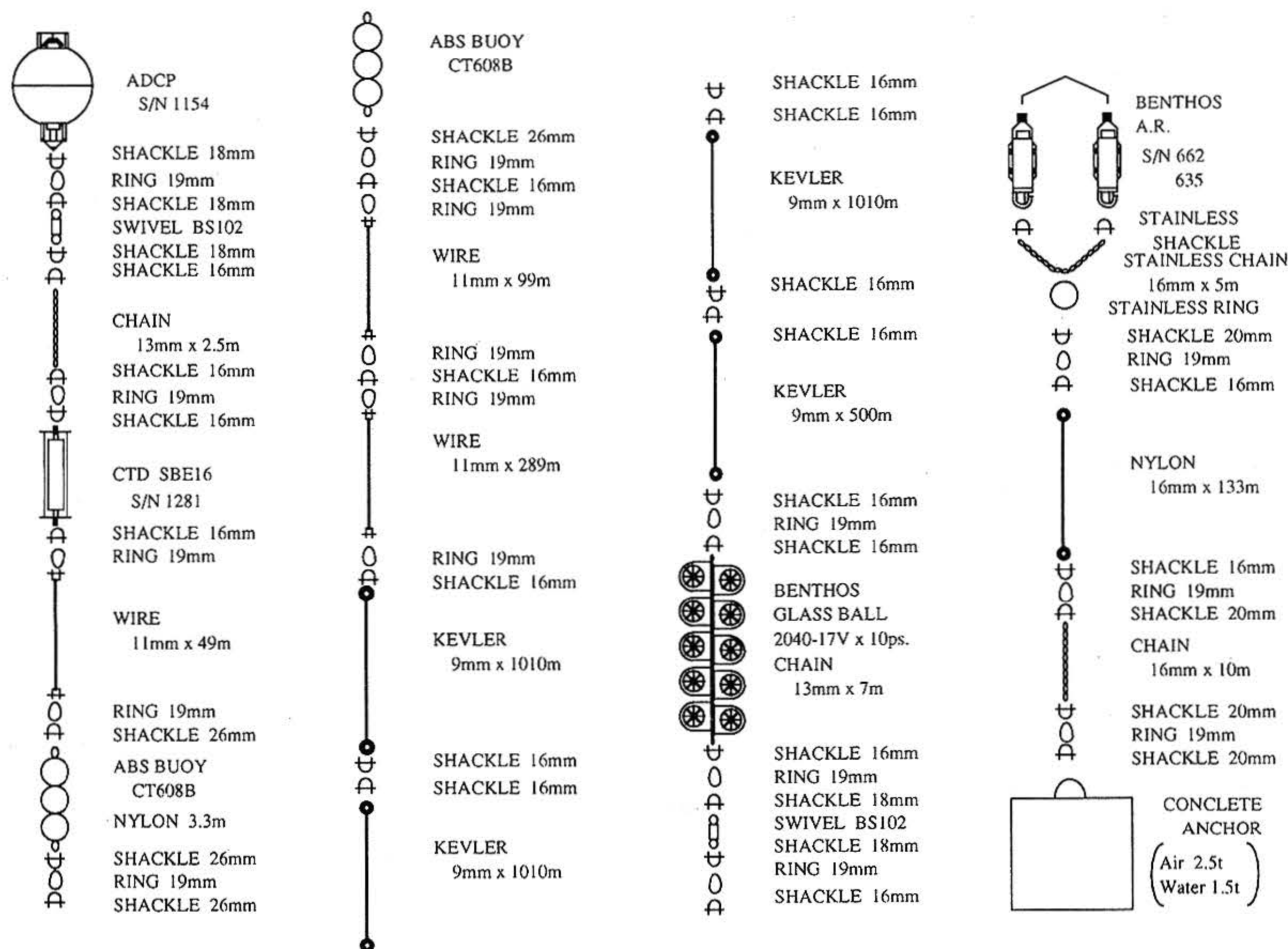


図3 係留系詳細図 (0°, 147°E, 水深 4495m)

Fig. 3 Detailed diagram of the subsurface ADCP mooring.

表1 ジョイント部諸元

(浮力は上向きを負とした。CDP は接続点の抵抗係数)

Table 1 Specifications of the joint parts for the simulation.

No	Name	直径 (m)	面積 (m ²)	重量 (kg)	浮力 (kg)	CDP	製品名
1	ADCP	1.2	1.13	204.0	-520.0	0.47	RDI 150kHz*
2	CTD	0.4	0.32	50.0	43.6	0.70	SBE 16
3	ブイ (3)	0.6	0.84	99.8	-236.8	0.47	ABS CT608B
4	ブイ (3)	0.6	0.84	102.7	-234.3	0.47	ABS CT608B
5	シャックル	0	0	5.6	4.7	0	
6	シャックル	0	0	2.7	2.2	0	
7	シャックル	0	0	2.3	1.9	0	
8	シャックル	0	0	2.3	1.9	0	
9	シャックル	0	0	2.3	1.9	0	
10	シャックル	0	0	2.3	1.9	0	
11	ガラスブイ (10)	0.4	1.26	218.0	-243.3	0.47	BENTHOS 2040-17V
12	リリーサー (2)	0.36	0.68	128.0	100.0	0.70	BENTHOS
13	シャックル	0	0	2.7	2.2	0	
14	シャックル	0	0	2.7	2.2	0	

注: No 1 の ADCP はシンタックフォームブイ (1.2m) に取付けられている。

速毎に表示され、それらを一つにまとめたものが図5である。この図では与えた流速が 0 m/s で外力が無く索が直立する状態から、最大 1 m/s の流速を与え、索が傾い

た時の状態を表しており、これらの図から系の傾きの度合を判断することができる。各流速におけるトップブイの深度及び直立状態から、傾いた状態になったときの

表2 係留索部諸元

(CDO は係留線の圧力抵抗係数, CDF は係留線の摩擦抵抗係数)

Table 2 Specifications of the mooring lines for the simulation.

No	Name	分割数	長さ (m)	直径 (mm)	水中重量 (kg/m)	ヤング率 (kg/mm ²)	CDO	CDF	破断荷重 (t)
1	チェーン	2	5.4	13	4.829	20,000	2.2	0.04	5.89
2	ワイヤー	2	50.9	11	0.258	14,000	1.1	0.02	3.75
3	ナイロン	2	3.6	16	0.015	24.85	1.1	0.02	5.24
4	ナイロン	2	3.8	16	0.015	24.85	1.1	0.02	5.24
5	ワイヤー	4	99.4	11	0.258	14,000	1.1	0.02	3.75
6	ワイヤー	6	289.2	11	0.258	14,000	1.1	0.02	3.75
7	ケブラー	15	1,010.1	9	0.019	790	1.1	0.02	4.18
8	ケブラー	15	1,010.1	9	0.019	790	1.1	0.02	4.18
9	ケブラー	15	1,010.1	9	0.019	790	1.1	0.02	4.18
10	ケブラー	7	500.3	9	0.019	790	1.1	0.02	4.18
11	チェーン	2	7.8	13	4.829	20,000	2.2	0.04	6.37
12	チェーン	2	4.0	13	4.829	20,000	2.2	0.04	6.37
13	ナイロン	3	133.2	16	0.015	24.85	1.1	0.02	5.24
14	チェーン	2	11.7	16	4.860	20,000	2.2	0.04	15.30

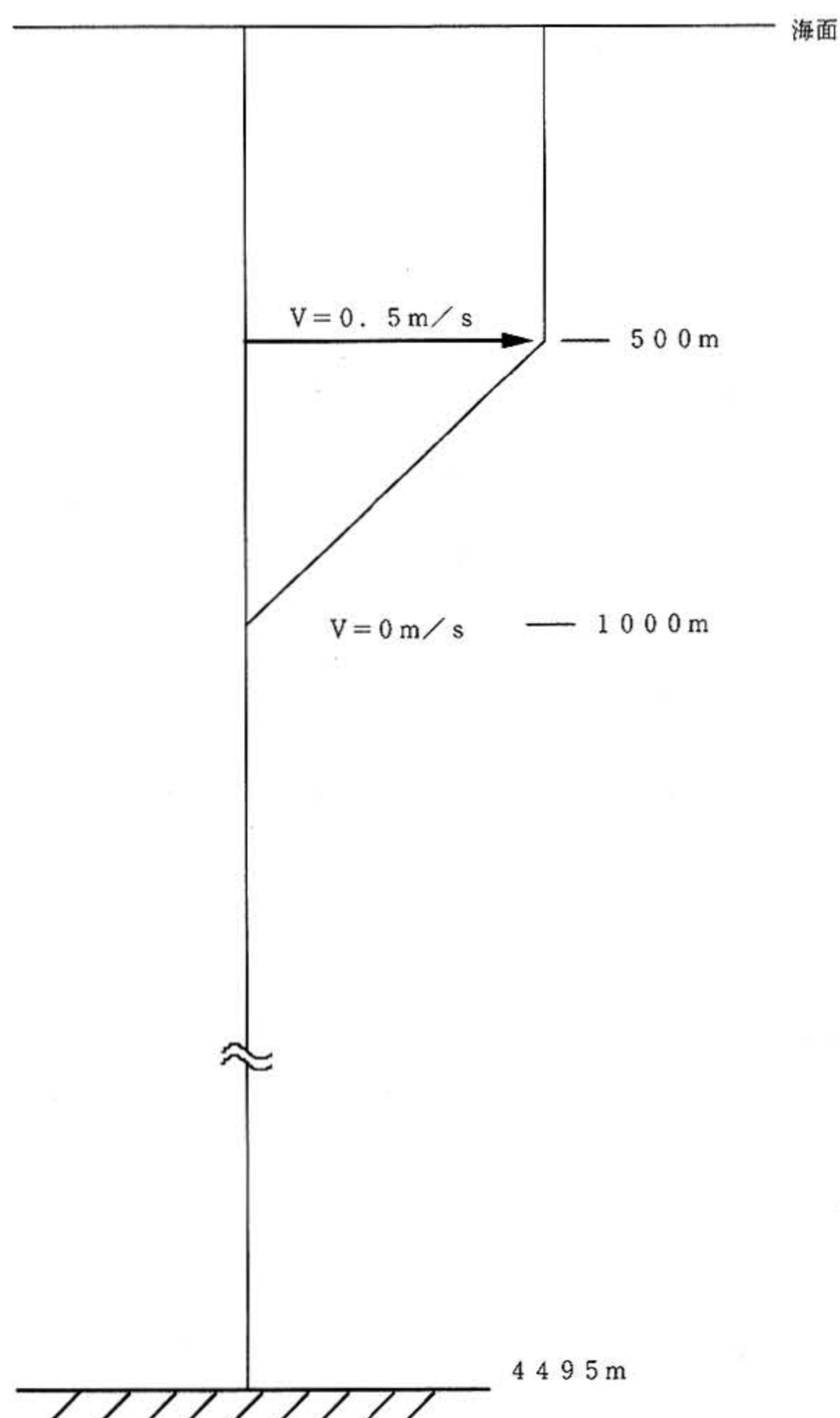


図4 流れのプロファイル

Fig. 4 Assumed profile of current velocity for model simulation.

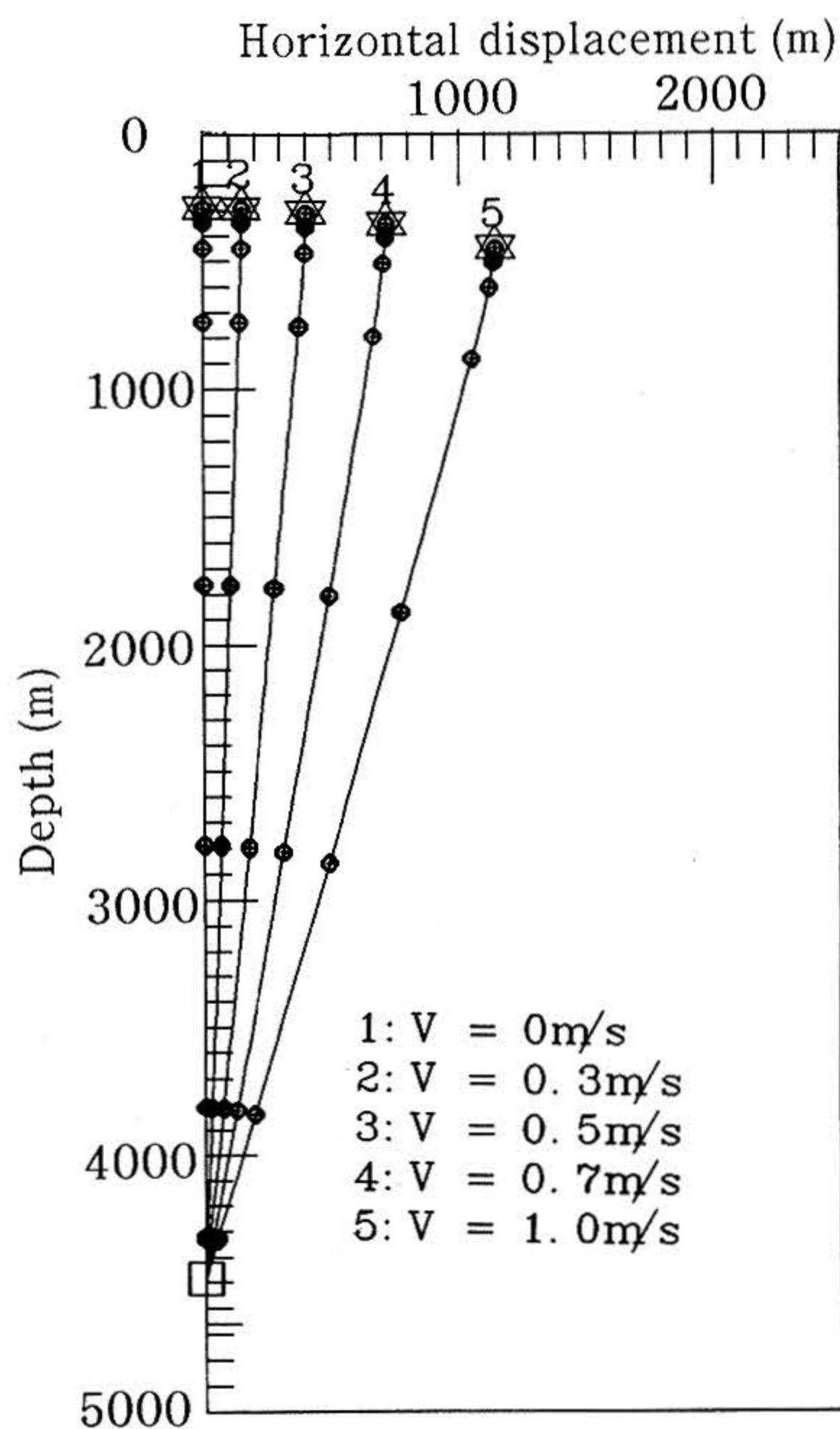


図5 シミュレーションにより得られた係留索の傾き

Fig. 5 Simulated displacements of mooring line under various current velocities.

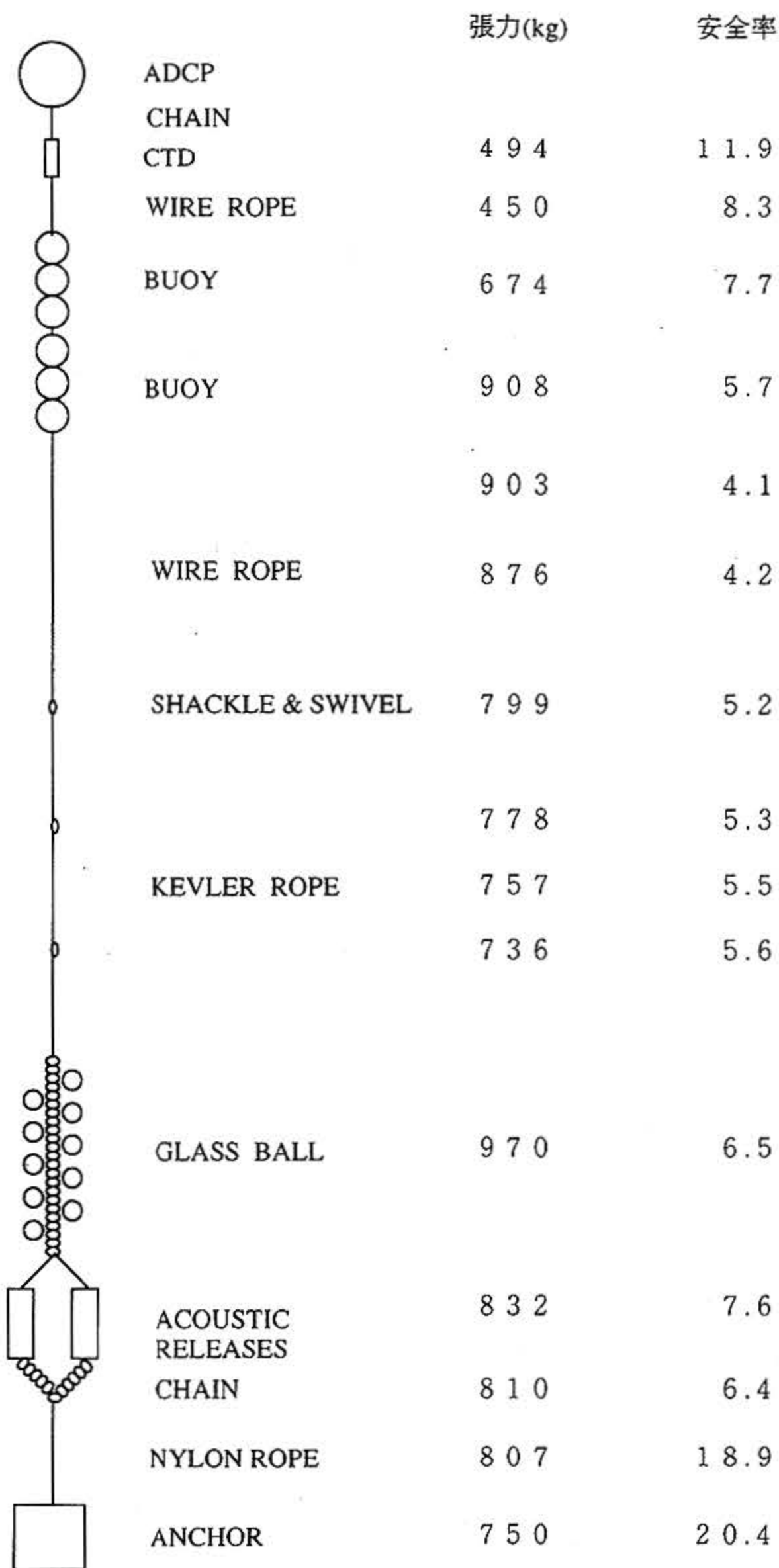


図6 シミュレーションで得られた係留索の各部位における張力および安全率

Fig.6 Obtained tension and safety factors at each element of the mooring by the model.

トップブイの深度及び水平移動距離をまとめたものが表3である。これを見ると流速0 m/sでトップブイの深度は277m, 想定0.5m/sの流速を与えたときに298mとなり, 設計条件の250~300mの範囲にADCPの深度が入っていることが判断できる。

(2) 張力, 安全率

シミュレーションのプログラムによって得られたものは以上の結果以外に, 使用する機材を選ぶうえで重要になってくる各ジョイント部分及びラインにかかる張力と

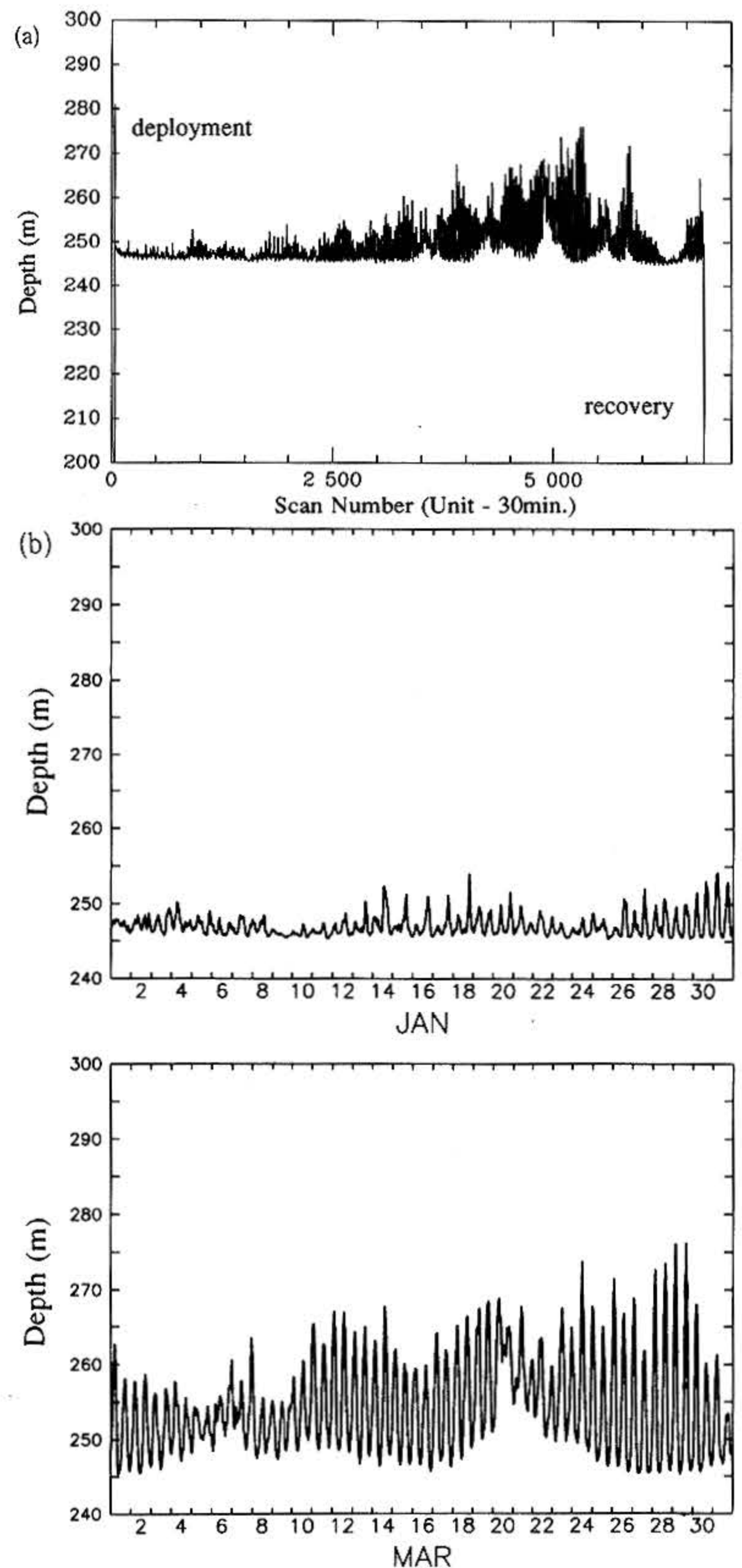


図7 CTD 深度 (a; 全期間, b; 1月, c; 3月)

Fig.7 Depth of a CTD just beneath the top buoy measured by the CTD itself.

(a : Total period, b : January, c : March)

それらの機材の破断荷重から得られた安全率とがある。ここでは, それらのうち主な部分だけを抜き出して図に表した (図6)。これらの結果を元にロープ類の破断強度, ブイの浮力, シャックル類のサイズを決めることができる。また, 各部の安全率は基本的にすべての部分が4以上となるようにした。シミュレーションの結果ABSブイ直下のワイヤ部分で張力が約900kgとなり, 安全率が4.1と最低となったが, これは流れが強くなっても係留系全体をなるべく垂直に保つため浮力を大きくした結果である。

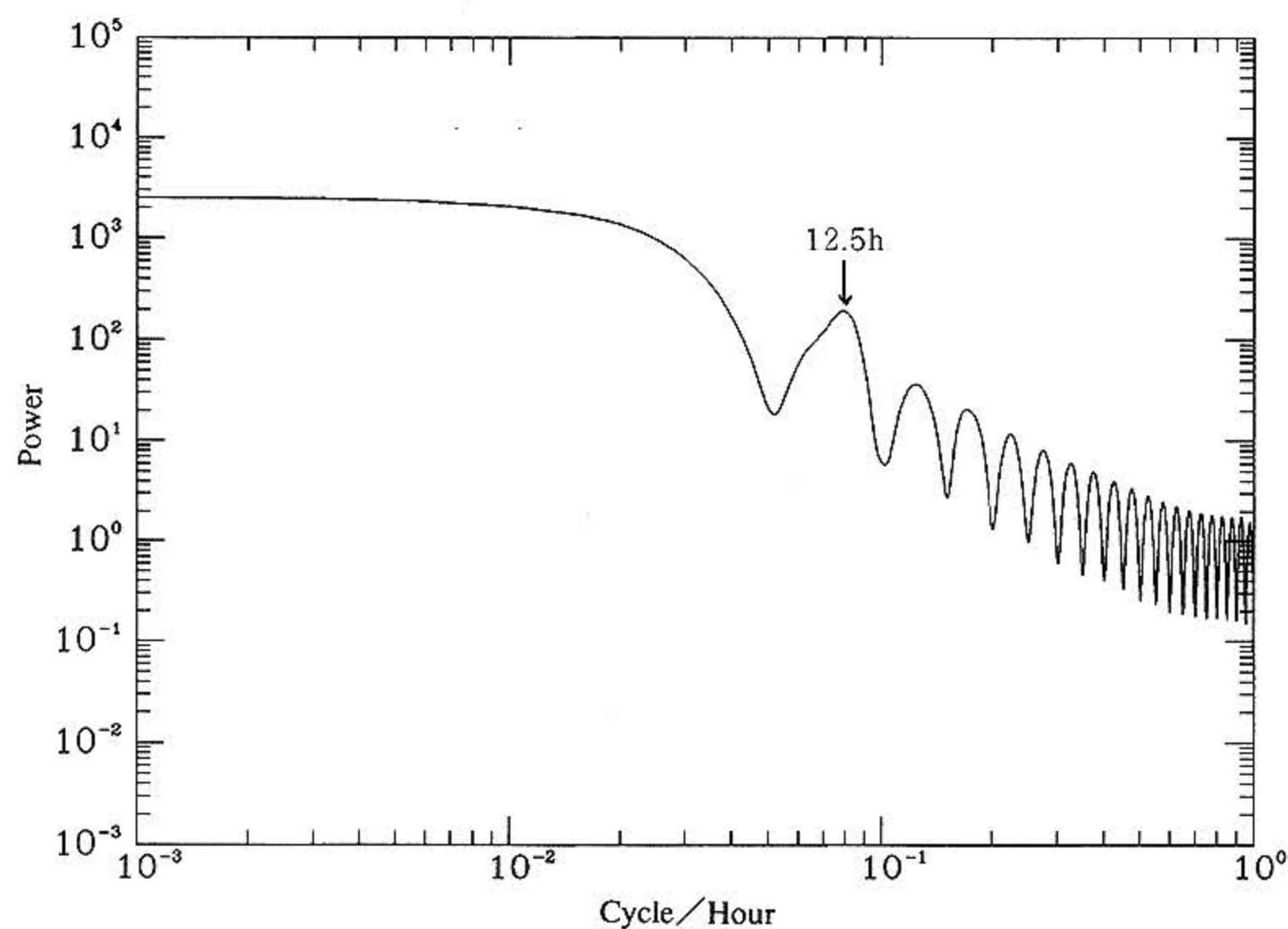


図8 CTD 深度のスペクトル解析
Fig. 8 Spectrum of the CTD depth.

3 現場の係留系の挙動

3.1 CTD で計測されたトップブイの深度

1993年12月9日、赤道上東経147°Eに設置した係留系のトップブイ直下に取り付けていたCTDから、係留した状態における実際のADCPの深度を調べた。1994年4月26日に回収し、深度データをグラフに示したものが図7aである。これは縦軸に深度と横軸に時間（データ個数）を表したもので、CTDの深度の変動を見ることができる。深度の変動の差が一番小さい時と一番大きい時とがそれぞれ1月と3月であることが解かり、その部分だけを拡大したものが図7b, cである。これら2つの図のうち1月では変動が最大でも9mであるが、3月では最大が31mと大きくなっていることが解かった。しかも2つの図をよく見ると深度の変動周期が約半日であることから潮汐の影響を強く受けているのではないかと考えられる。そして、図8にCTDの深度データから得られたパワースペクトルを示した。この図からも周期12.5時間に明瞭なピークが見られる。

CTD深度から6m浅くなったところがブイ先端ADCPの深度となる。239mが最も浅い場合の深度であり、外力の潮流が弱まったときと考えられ、シュミレーションの結果得られた277mより38m浅くなっている。この誤差の原因として設置時の測深の誤差（ここで使用されたマルチナロービームの誤差は±10m程度とされている）、ロープの長さの計測誤差（1,000m±5m）、索や係留した測器類のCd値において形状を理想化し仮定したものをを用いていることによる誤差が考えられる。

表3 シュミレーションにより得られたADCP（ブイ先端）の深度及び水平移動距離

Table 3 Simulated top buoy depth and horizontal displacement.

	流速 (m/s)	ADCP 深度 (m)	ADCP 水平移動 距離 (m)
Case 1	0.0	277.0	0
Case 2	0.3	279.6	155.4
Case 3	0.5	298.1	416.5
Case 4	0.7	344.1	740.8
Case 5	1.0	445.2	1,167.0

また、最大深度は270mであり、最浅深度239mとの差は31mである。これはシュミレーションの結果が21m（流速値0.5m/sの場合のADCP深度298mから流速値0m/sの場合の277mの差）であり、現実の流れはこの0.5m/sの想定値を上回ったと考えられる（表3）。流速値0.7m/sの場合はADCP深度は344mであり、流速値0m/sの場合との差は67mにもなる。実際の測定値31mから内捜し、対応する流速値を推定すると0.54m/sとなる。実際の流速プロファイルはより複雑であるが、この時は残念ながらADCPの流速測定回路にバグがあり、現場の流速値は得られていない（この流速値が得られても索に当たる流速値は得られていないので流速プロファイルの外捜しによることになる）。今後もデータを積み重ねてより現実的なシュミレーションにしていける必要がある。

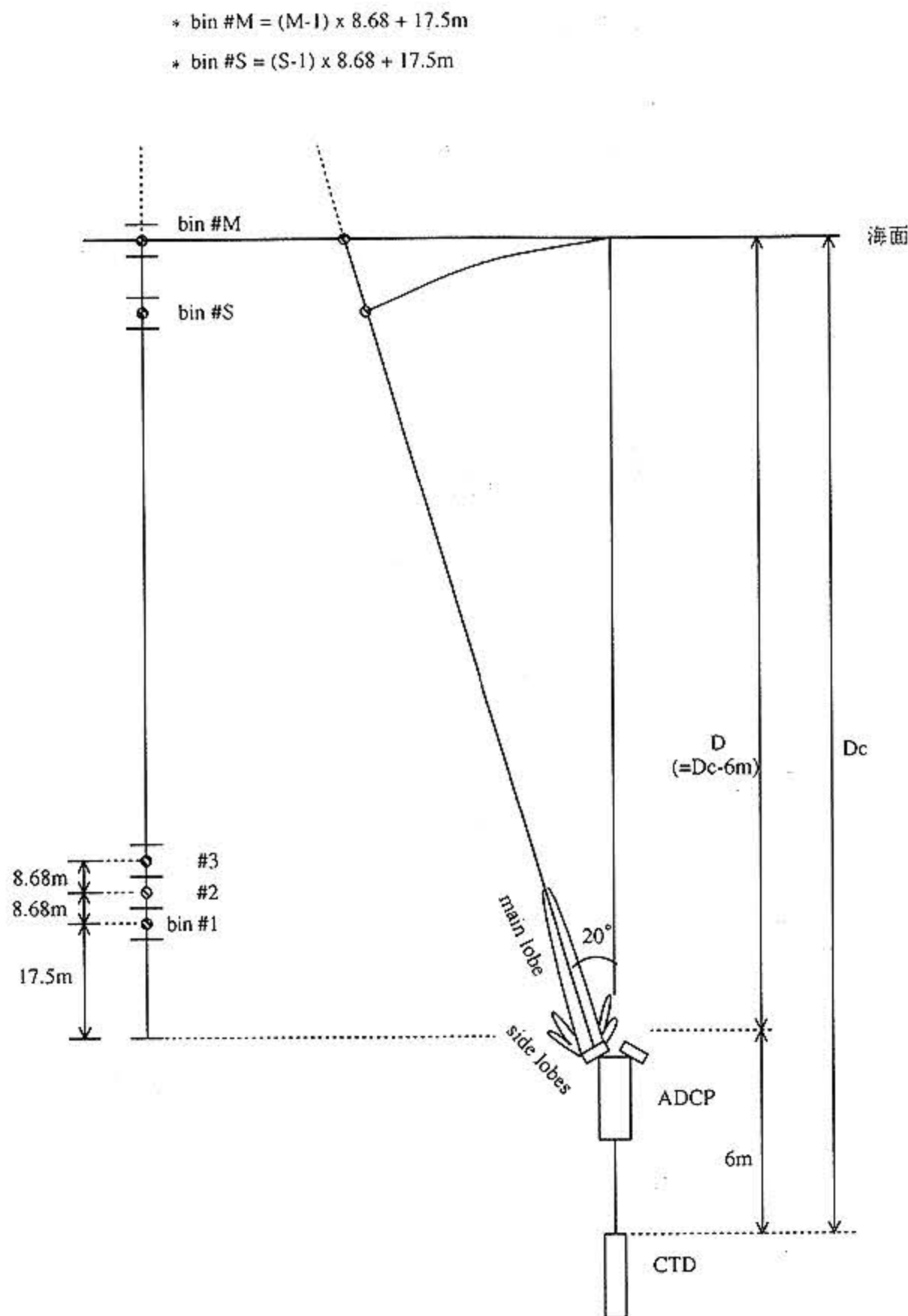


図9 ADCPのビーム概念図

Fig. 9 Schematic diagram of an ADCP beam and bin depths.

3.2 ADCPの音響散乱強度から得られた深度

ADCPの音響散乱強度 (Echo Intensity) は、海面にメインローブの音波が達したときに値が極大を示す。このことから得られた4ビーム、40層のデータから何層目が極大であるかがわかるので、CTDとは別にその時のADCPの深度を割り出すことができる (図9)。そして、ADCPから海面までの距離が最大つまりADCPの深度が一番深くなったときには極大値が現れる層の番号が最大になる。このときの音響散乱強度の鉛直プロファイルを図10aに示した。この図から32~33番目の層に極大値が現れることがわかる。また、ADCPの深度が一番浅くなったときは上記とは逆となり、極大値が現れる層の番号が最少となる (図10b)。この図から27番目であることが判断できる。なお、CTDから得られた深度が最大、最小となる時刻とADCPの音響散乱強度から得られた深度が最大、最小となる時刻とは一致している。

以上のデータの結果を図に表したのが図11a, bである。図11bではADCPの音響散乱強度から割り出した深度が243.2mとなり、CTDのデータから割り出した深度

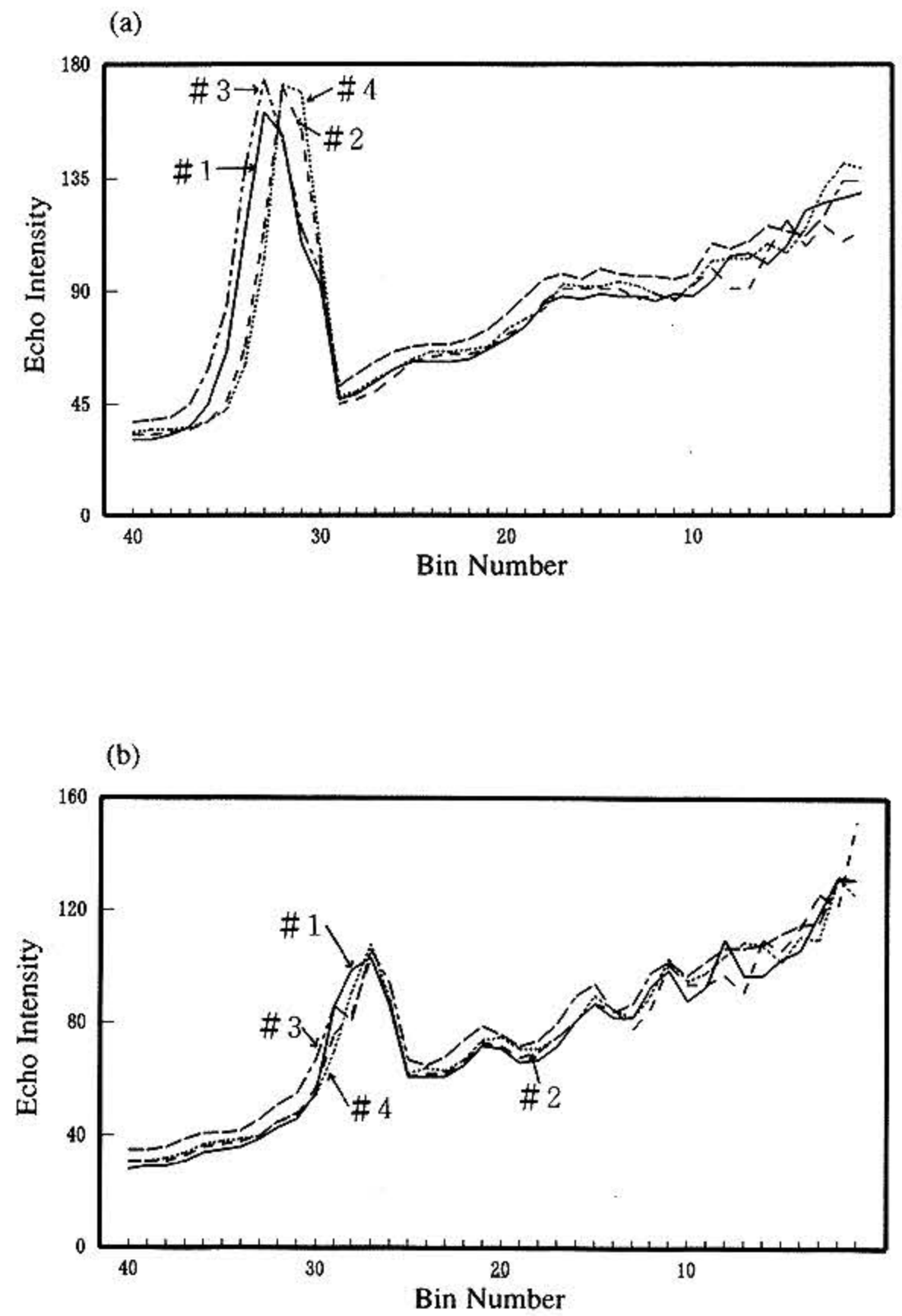


図10 ADCPの散乱強度 (a; ADCP深度が最も深くなった場合, b; ADCP深度が最も浅くなった場合)

Fig. 10 ADCP echo intensity at the sea. (a: the deepest case of the maximum echo intensity which may result from the reflection of main lobe at the sea surface, b: the shallowest case of it.)

は239mとなった。この差は約4mだけであり、層厚が8.68mであることを考えると、分解能の誤差の内に含まれ、双方は一致しているといっている。一方、図11aではADCPの音響散乱強度から割り出した深度が286.6mとなったが、CTDのデータから得られた深度は270mである。このADCPの音響散乱強度から出した深度の方が約17m深く出することは、ADCPの分解能の誤差では説明できない。ここでは、はっきりとした原因は不明であるが、CTDの深度の方が正確であると考えられるので、CTDからADCPの深度を決定し、その後、音響散乱強度の深度から、一定とした層厚が短くなると考え深度を調整することなどが考えられる。しかし、原因は不明確であり今後とも比較データを取り、よく検討していく必要がある。

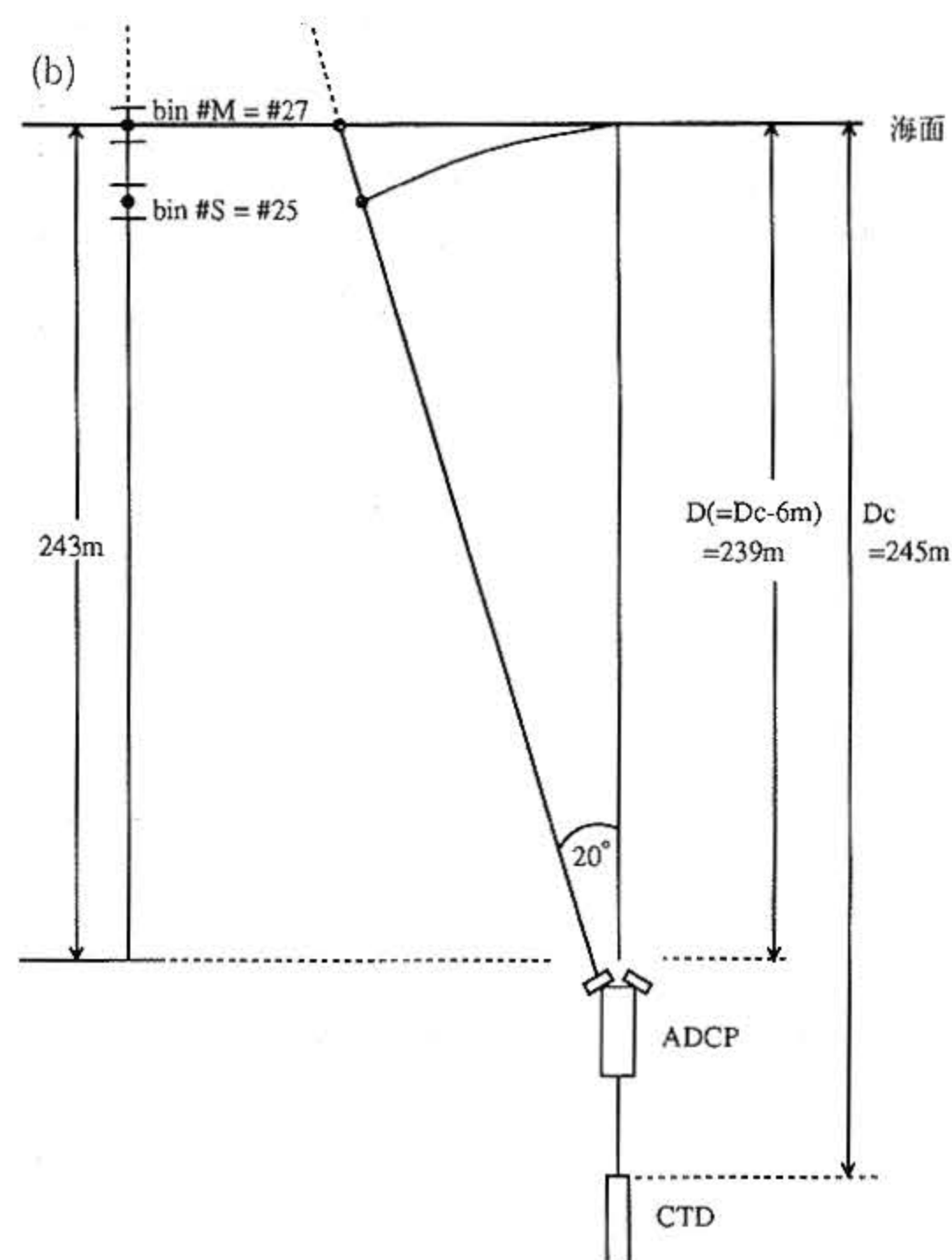
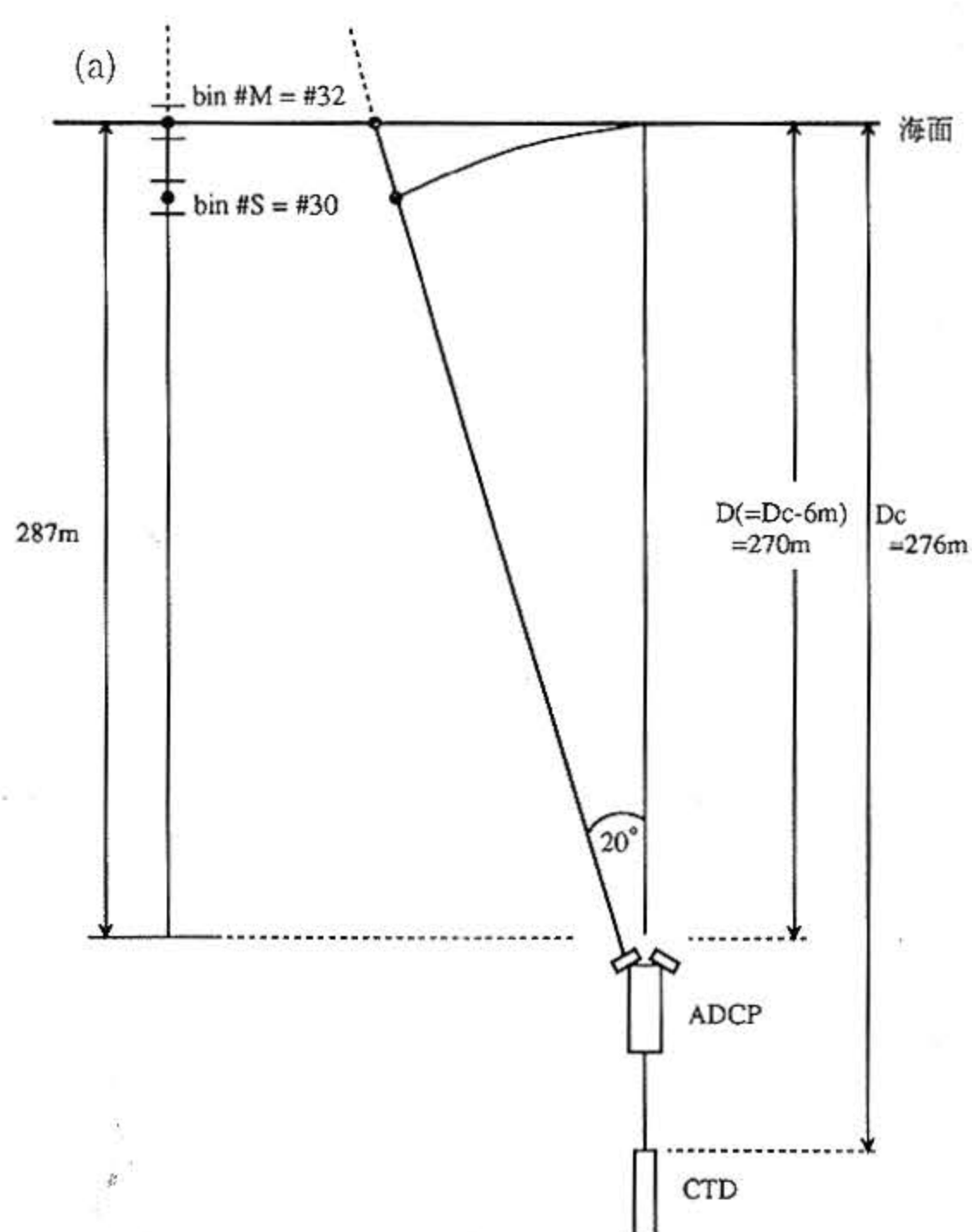


図 11 ADCP 深度が最も深くなった場合 (a) 及び ADCP 深度が最も浅くなった場合 (b) の ADCP のビーム概念図
Fig. 11 Depth of the ADCP, (a) deepest case, (b) shallowest case.

3.3 ADCPの動揺

ADCPに付けられているセンサーで計測されるピッチ、ロール、方位の各データを使って係留した時の ADCP の動揺を調べた。ADCP は 4 つの送受波器面 (#1, #2, #3, #4) を持っている。ピッチは対角線上に並ぶ #3, #4 のビームで形成される面の傾きであり、ロールはそれに直交する #1, #2 のビームで形成される面の傾きである。CTD のデータから判断した最も深度の変動が少なかった 1 月と最も変動の大きかった 3 月をそれぞれグラフに表したものが図 12, 13, 14 である。ピッチのデータは 1 月が $-0.2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 、3 月では $-0.7^{\circ} \sim 3^{\circ}$ であり、ロールのデータはそれぞれ $-2^{\circ} \sim 4.5^{\circ}$ 、 $-5.5^{\circ} \sim -2.5^{\circ}$ となっている。3 月にロールが -5.5° まで傾いたのが最大であるが、1 月と 3 月で傾き角に関しては大差ないといえる。これらの値も深度と同様半日周期の変動が卓越しており、深度が深くなる時傾き角の絶対値は大きくなる。しかし、先の傾き角の絶対値の最大となる時期と深度の最大となる時期は一致しておらず、傾き角は系の全体の傾きのみならず、局所的な流速プロファイルのシア等に影響されるものと考えられる。方位については、1 日の内では、 $\pm 30^{\circ}$ 程度であり、ADCP の鉛直変位が大きいときにも、鉛直軸のまわりを 1 回転するというのではなく、安定しているといえる。

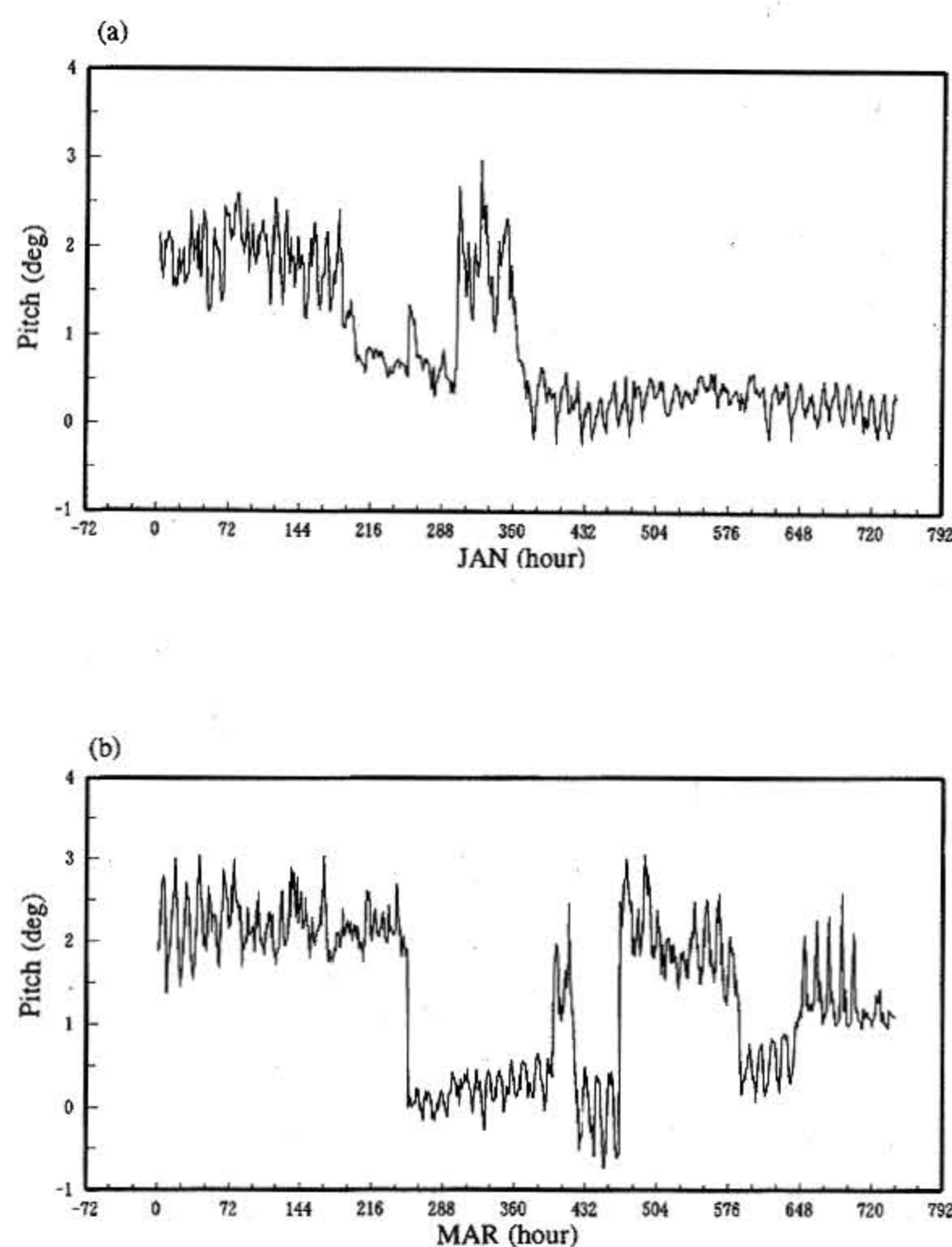


図 12 ADCP の鉛直軸からの傾き角 (ピッチ角 #3, #4 ビーム面の傾き. a; 1 月, b; 3 月)

Fig. 12 Pitch angle of the ADCP. (a: January, b: March)

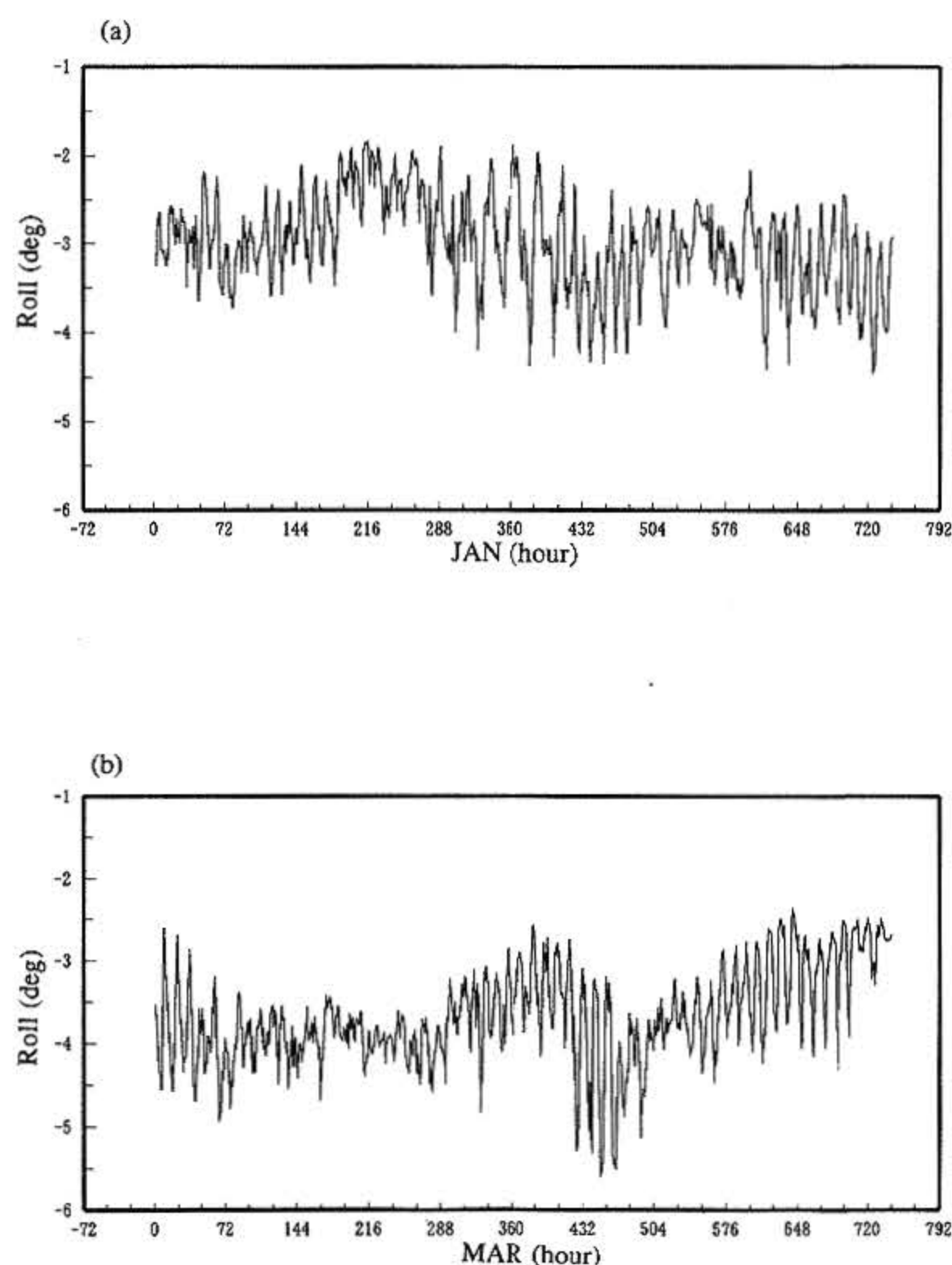


図 13 ADCP の鉛直軸からの傾き角（ロール角 #1, #2 ビーム面の傾き, a; 1 月, b; 3 月）

Fig. 13 Roll angle of the ADCP. (a: January, b: March)

これは球形ブイの利点と考えられる。

3.4 設置及び回収時の落下・浮上速度

設置及び回収した係留系にBENTHOS社の音響切り離し装置を使用しているが、これらは「かいよう」に積まれている音響装置（早川ほか, 1990⁴⁾, 新家富雄ほか, 1994⁵⁾）と同じ周波数のものが使われている。これにより音響切り離し装置の動き、つまり沈降時と浮上時の深度を知ることができる。今回、回収した係留系にはアンカーにコンクリートブロックを使用していたが、以後使用している鉄のアンカーと比較し、落下速度にどれだけの差が見られるか検討した。コンクリートブロックの時の設置時のデータをグラフに表したものが図15aである。そして、その後設置した係留系にはアンカーに古レール（水中重量1.5t）を使用し、そのデータをグラフに表したのが図15bである。また、別の地点で設置した係留系には前記と同じように古レールを使用した。この時のデータは図15cに表される。図15aの設置時のデータでは最初2.4m/sの速度で落下したが、4,000mを過ぎたあたりから着底までの360mは0.8m/sの速度で落下したこ

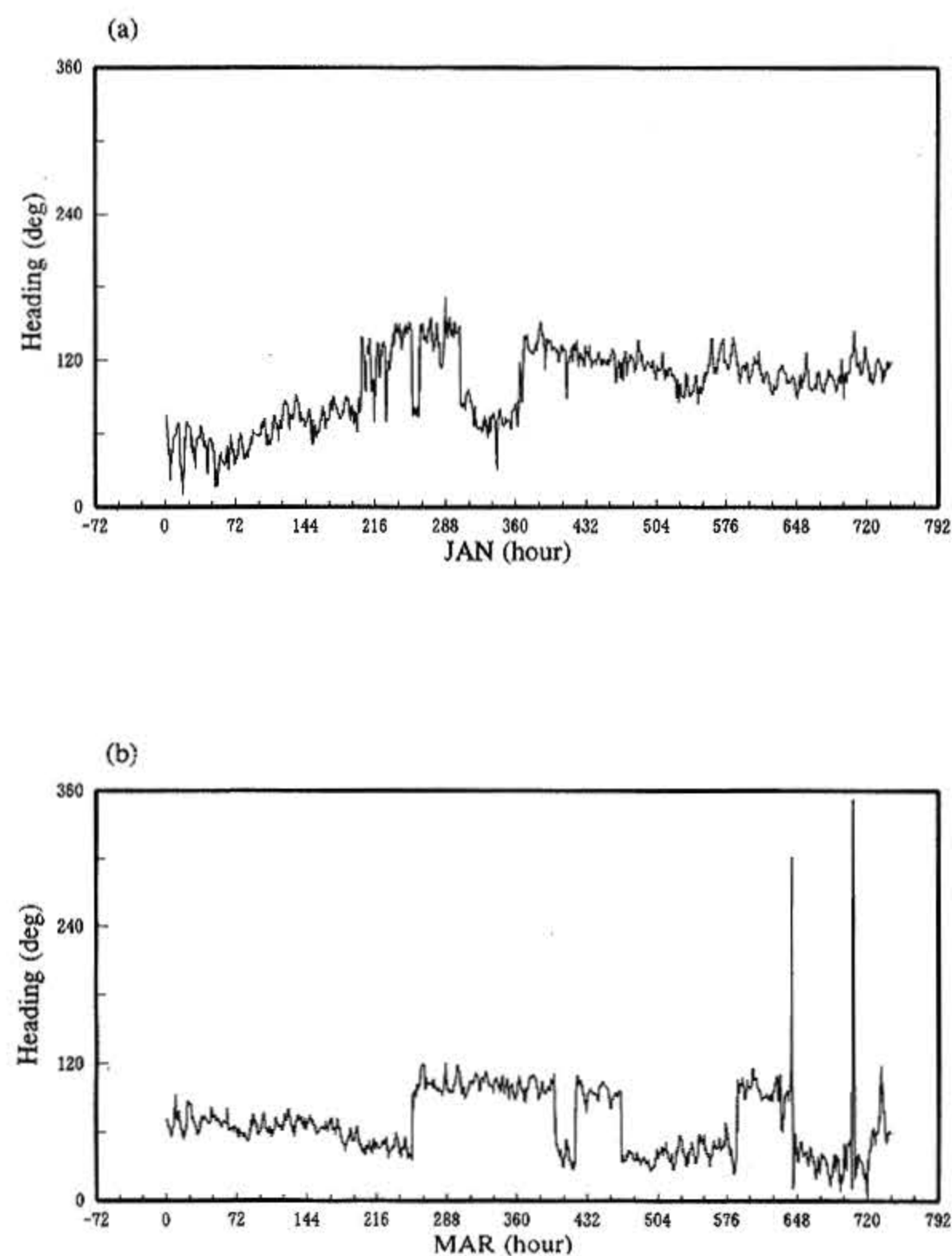


図 14 ADCP の方位 (a; 1 月, b; 3 月)

Fig. 14 Heading of the ADCP. (a: January, b: March)

とがわかる。この速度の差はトップブイが海面を引っ張られている状態と海中に引き込まれ沈んでいく状態との差であると思われる。図15bでは水深が異なっているが、深度2,100mまでは3.1m/sの速度で落下し、それから着底までは2.8m/sの速度で落下したことがわかる。コンクリートブロックのアンカーの場合と比較してみると明らかに鉄のアンカーの方が速く落下していることがわかった。そしてパラシュートを着けた図15cのデータを見ると約3,200mまでは1.1m/s、そして着底までの間は0.9m/sの速度で落下したことがわかる。このことからパラシュートを着けたときが他の時と比べ約1/3の速度であったことがわかった。これら3つのケースにおける音響切り離し装置の平均速度をまとめたものが表4である。これを見ると鉄のアンカーに比べコンクリートブロックのアンカーはトップブイが海面に沈み込むその前後では極端に速度が低下していることがわかる。

4 ブイの設計・運用におけるその他の技術的問題点

まず第一に挙げられるのが電触の問題である。ブイに取付けられるほとんどの測器類には鉄以外の錆にくい材質の金属が使用されている。しかし、シャックルなどに

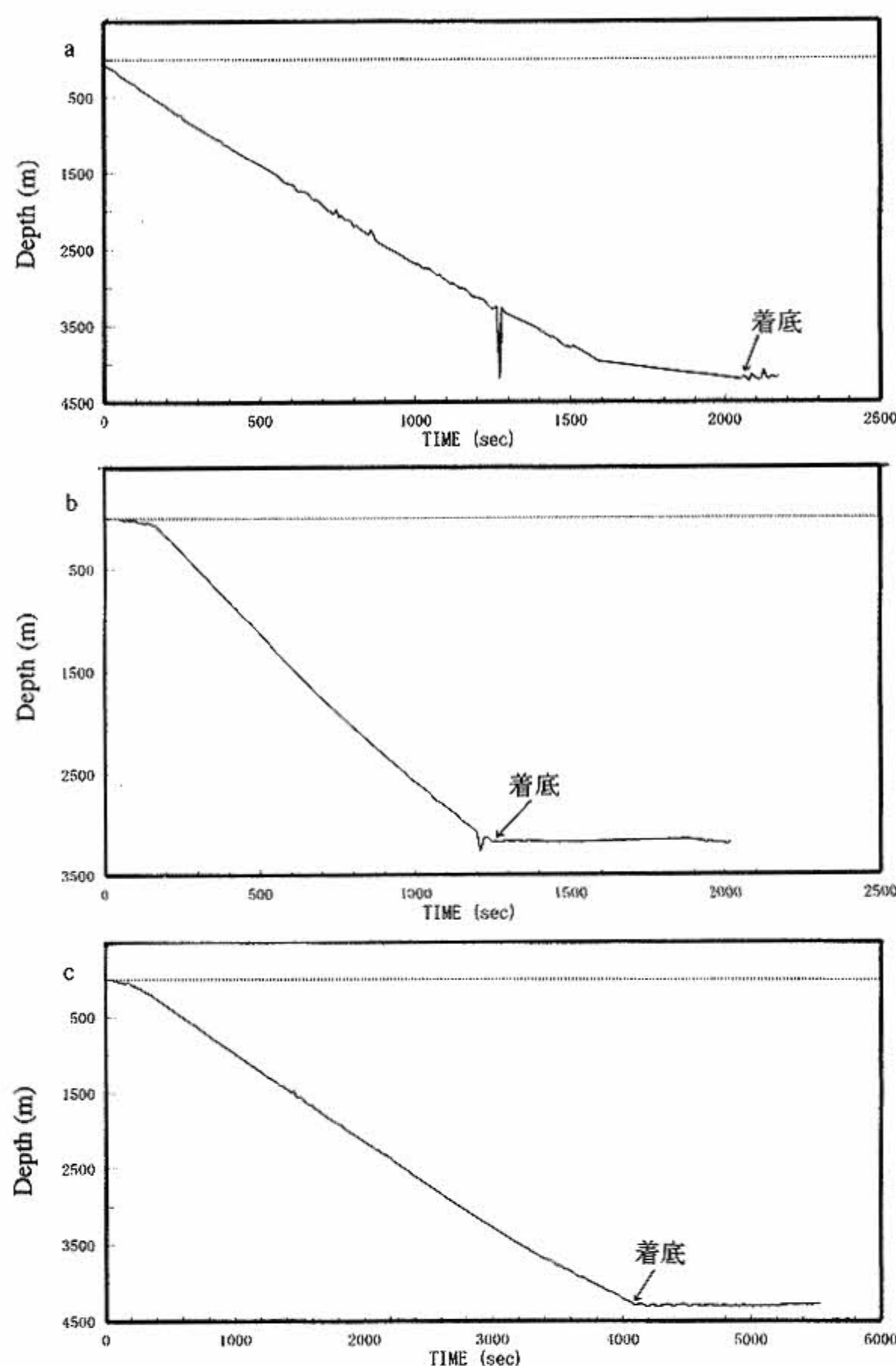


図 15 設置時の音響切り離し装置の深度の時間変化 (a; コンクリートブロック, b; 鉄レール, c; 鉄レール+パラシュート)
Fig. 15 Time-depth plots of acoustic release in three deployments. (a: concrete block, b: steel rail, c: steel rail and drag-parachute)

は鉄に亜鉛メッキなどの防錆処置を施した物が使用されていることから、それら異質金属間における接点に電触が生じてしまう。この電触を防ぐためには異質の金属が直接接触しないように金属以外のものをその間に入れなければならない。しかし、その方法がとれなくまた、どうしても触れなければならないところにはそれら2種類の金属よりもイオン化傾向の大きい金属を装着する必要がある。また、この方法に付け加えて、互いに接触する所をビニールホースなどで覆って、さらに電触の生じる割合を小さくしてやることができる。こうすることによって各金属間の電触を最小限に抑えることができる。今回、ステンレス板にアルミ塊を付けたものを電触が心配される部分に使用したが、約2/3程度のアルミが溶けていた。半年係留では十分であったが、より長期になった場合どのようなようになるか試験が必要と思われる。

次に挙げられるのがシャックルとシャックルもしくはは

表 4 各種アンカーによる平均落下速度の差
Table 4 Mean drop-velocities of moorings using three types of anchor measured by tracking acoustic releases.

コンクリート	0-4,000 m	4,000 m-4,360 m
	2.4 m/s	0.8 m/s
レール	0-2,100 m	2,100 m-3,200 m
	3.1 m/s	2.8 m/s
レール (パラシュート)	0-3,200 m	3,200 m-4,150 m
	1.1 m/s	0.9 m/s

リングとの間における磨耗である。係留系の索は流れによってたえず動揺していることから、各ロープの接続部分であるところが摩擦によってどうしても磨耗してしまう。この磨耗は互いの接点において必ず生じることなので、これをいかにして抑えるかが問題となってくる。今回の半年間の係留系では特に危険と見られる磨耗箇所は見られなかった。

そして、ケブラーロープの両末端のスウィベルについての問題が挙げられる。今回、回収したものにはスウィベルが測器のところにしか取付けられていなかったため、ケブラーロープに撚りがはいる、ケブラーロープ直下のガラスブイに絡んでしまった。そのことからロープに傷がついてしまった。このケブラーロープの撚りはおそらく投入時と回収時におけるロープの巻き出し、巻き揚げによって発生したと思われる。今後ケブラーロープを数回使用する、このような撚りによる破損が起きないようにしなければならない。その撚りを取り去るためにケブラーロープを使用する場所ではスウィベルが必要となってくる。今回使用したケブラーロープは直径9mmであったが、今後複数回使用するための耐久性を考えれば、直径を12mmにした方がより経済的かつ安全であると思われる。回収したケブラーロープは破断試験等により耐久性についてデータを収集していく必要がある。

5 まとめ

西部赤道海域の海流変動の計測を目的とするADCP係留系の設計を行なった。また、現場海域でのブイの挙動について調べ設計の妥当性を確かめた。設計においては、ランプドマス法を原理とする既存の係留系挙動計算プログラムを用い仮想の流速による索の傾き形状、各要素にかかる張力、及び安全率を求めた。この設計ではトップブイが250~300mの範囲にあること、また安全率が4以上であることを考慮した。この設計に基づき1993

年，東経147°，赤道上に設置した係留系のトップブイ深度は，238～270mの範囲にあった。静穏時にはトップブイは9 m程度の鉛直変位であったが，30mの半日周期の鉛直変位を示す時期もあった。ADCPの鉛直軸からの傾きは最大で5.5°であり，計測可能な範囲にあった。今後とも実海域のデータを積み重ね，設置深度についてより確度の高いそして安全性，信頼性の高い係留系を設計していきたい。

謝 辞

本稿をまとめる機会を与えていただくとともに終始激励をいただいた海洋科学技術センター海洋観測研究部の中西俊之部長，宗山 敬主幹，日本海洋事業(株)の加藤美志彦部長に感謝いたします。船上作業では日本海洋事業(株)の山本 博氏から数多くの実地的な助言を得ました。東海大学の稲葉栄生教授，轡田邦夫助教授，九州大学応用力学研究所の川建和雄教授，米国海洋大気庁太平洋海洋研究所のAndrew Shepherd氏からはデータ処理，ADCPの取り扱い，係留方法について助言をいただきました。株式会社エス・イー・エーの中川拓朗，高橋英晴，上田寛樹の各氏からはADCPの調整に協力をいただきました。また，「かいよう」船長をはじめ乗組員の

方々には赤道直下の炎天のもと係留作業を安全かつ確実にやっていただきました。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) TOGA COARE International Project Office, TOGA COARE Operations Plan, University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, CO. (1992).
- 2) 海洋科学技術センター，海洋音響トモグラフィー係留システム挙動計算プログラム. (1991).
- 3) 川建和雄・長浜智基・石井秀夫・篠崎高茂・田代昭正：海中で用いる索の二次元動的計算法，九州大学応用力学研究所所報，**63**，179～188. (1987).
- 4) 早川向海・高橋秀幸・海法宇治・茨田和生・高橋啓史：潜水調査船「しんかい6500」潜航支援音響システムの開発，沖電気研究開発，**146**，87～94. (1990).
- 5) 新家富雄・中村敏明・中野岩男：海洋音響トモグラフィー係留系の落下時における挙動解析，海洋調査技術，**6** (2)，1～11. (1994).

(原稿受理：1995年3月26日)