

## 海洋混合層水温計測用ブイシステムの設計\*

小寺山 亘\*\*・水野信二郎\*\*・光易 恒\*\*

### Preliminary design of deep-sea surface buoy system for ocean mixed layer experiment\*

Wataru KOTERAYAMA\*\*, Shinjiro MIZUNO\*\* and  
Hisashi MITSUYASU\*\*

**Abstract:** A long term measurement of the water temperature in the upper mixed layer of the ocean is essential for the investigation of the underwater weather, atmospheric weather and the interaction between them. The surface buoy system is not so reliable as the submerged buoy system, because it is sometimes damaged in collision with ships. Observations by using research vessels can not be long term ones. The water temperature just under the sea surface is difficult to measure with the submerged buoy system. The surface buoy system should be a unique tool despite technical difficulties. In this paper a preliminary design of a buoy system for measuring the water temperature in the upper mixed layer of the ocean is attempted. All possible efforts are exerted to make the buoy system light-weighted and easy to handle on board a vessel. Three types of system are investigated and finally a system, which is the simplest one, is adopted because of its toughness in the collision with ships. Numerical simulations of the motion and tension of the buoy system in stages of deployment and operation are carried out by using Lumped Mass Method. The performance of the buoy system under the working condition and its safety under the survival condition are confirmed.

#### 1. 緒 言

海洋におけるデータ収集のためには種々の測器が開発され実用に供されている。比較的短期間の計測のためには観測船から測器を下すことで十分であるが数週間～1年以上の期間を通じてデータを収集する必要がある場合には係留ブイシステムに拠らざるを得ない。海面近くの計測が重要でない場合には海中ブイシステムが有効であり、信頼性も高い (KAWATAKE *et al.*, 1986)。

浮力の大部分を海面に置く海面ブイシステムは波浪、風による自然からの外力が大きい上に、船舶、漁撈等からの人為的なトラブルに遭遇しやすいのでやむを得ない場合以外には使用しない方が良くとされているが、混合層内の水温分布の測定を数週間～一年間にわたって行う

ためには、他に方法がないとも思われる。本報告では混合層内の水温計測用海面ブイシステムの設計法について述べる。

#### 2. ブイシステムの形態

ブイシステムの形態としては Fig. 1 に示すような3つの形態が考えられる。(a) は直立方式 (b) は中間ブイ方式 (c) は傾斜方式とも言うべきもので、大部分の海面ブイシステムはこの3種に分類される。図の状態はそれぞれの係留方式の理想的な状態であり、外力が小さい場合に実現されるものである。強い外力を受けてシステムが流されれば (a) 及び (b) も (c) に近い形となってしまう。外力による傾斜モーメントに釣合う復原モーメントがブイの浮力と横流れ量の乗算で発生する以上いかなる係留法も多かれ少なかれ横流れして (c) の形態に近くなることは避けがたい。

3種の係留方式にはそれぞれ長所と短所があり、用途及び環境条件によって使い分けることになる。(a) の方

\* 1986年3月28日受理 Received March 28, 1986

\*\* 九州大学応用力学研究所, 〒816 福岡県春日市春日公園 6-1

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasugakoen 6-1, Kasuga-shi, Fukuoka-ken, 816 Japan

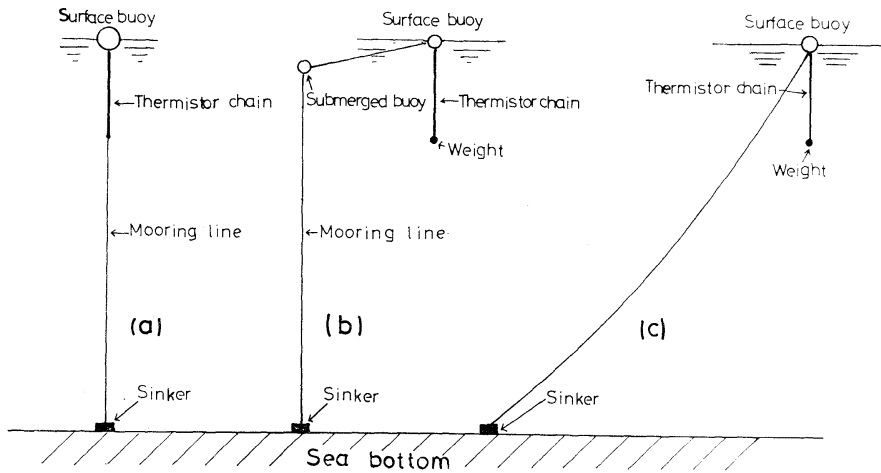


Fig. 1. Surface buoy systems.

式は最も横流れ量が小さく、計測対象の位置に関する誤差が小さい反面、海面ブイを海面に維持するためには最も大きな排水量を必要とする。(b)の方式は海面ブイに加わる波力を中間ブイの水平方向の運動で吸収できるために中間ブイ以下の係留線の変動張力を小さくできる。また中間ブイの排水量を十分に大きくすれば海面ブイの排水量を小さくできる等の力学的には優れた利点をもっている。しかしながら(b)の方式は中間ブイと海面ブイの間の係留線をできるだけ水平に張らなければこの特長を生かせないので船舶、漁撈の影響を受けやすい。また(b)及び(c)の方式では海面ブイ直下の係留線の傾斜が大きいため、測器の鉛直方向の位置保持性能を高めるためには水温計測用測器を図のように係留線とは別のラインに装着せざるを得ない。

このラインの傾斜を(a)の方式と同程度に小さくするためにはライン最下端に取り付けるウェイトの重量やラインの振り子運動と入射波の同調現象について慎重に検討する必要がある。さらにこのラインと係留線のからみつきを防止する工夫をしなければならないが、(c)の方式では極めて困難である。また(b)の方式では海面ブイと中間ブイの間の係留線を固いものにして、中間ブイと海面ブイが近よらないようにする方法があるが、この固い係留線の陸上での取り扱いが極めて困難であろう。

以上のように、それぞれの方式には長所、短所があるが、(b)の方式は船舶、漁撈に対する対策が困難であり、(c)の方式ではからみつきを防止することが困難である等の欠点をもっている。(a)の方式は大きな外力を受けた場合は海面ブイが沈んでもよとの条件を与えれば海面ブイの排水量が過大になることを防げるので本論

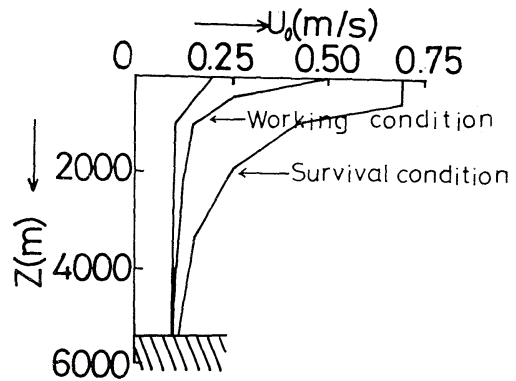


Fig. 2. Current profiles for design.

文ではこの方式について力学的な検討を行う。

### 3. 設計条件

システムの設計のために以下のような条件を与える。

#### 3.1. 基本条件

(i) ブイシステムは大学の観測船で設置できること、従って海面ブイ及びシンカーの重量はできるだけ小さく、取扱いが簡便であること。

(ii) 設置海域は、四国沖水深5,000 m級で、黒潮中を避けること。

(iii) 材料の安全率は3.0以上とすること。

#### 3.2. 環境条件

(i) 深海域での海流流速の鉛直分布については資料が少ないが、その中で比較的信頼性が高く、今回の設置海域の状態に近いと思われるウッズホール海洋研究所が海面ブイの設計に使用している速度分布 (Fig. 2,

CLAY, 1983) を採用する。図で最も速い流速分布を Survival condition に, 中程度のものを Working condition とする。

(ii) 風速及び波高

- Survival condition: 風速 50 m/s, 波高 30 m  
波周期 20 sec
- Working condition: 風速 15 m/s, 波高 6 m  
波周期 9 sec

ここで, Survival condition とは, ブイシステムは破壊されることはないが, 本来の機能の全部または一部を

時的に失わざるを得ない状態であり, 本システムの場合は海面ブイが海面下に没する状態を指す。また Working condition は, 正常の機能を保ち得る最悪の状態である。本システムの場合, 海上に露出する海面ブイの風圧面積は極めて小さく事実上風による直接の力学的な影響はないが, 風による表面吹送流の影響は大きい。

吹送流の大きさは EKMAN (1905) の考えに従って求めた。またその計算に使用する海面の抵抗係数は光易等の実験値 (MITSUYASU and KUSABA, 1985) を使用した。ブイシステムの運動には風方向の成分だけを使用

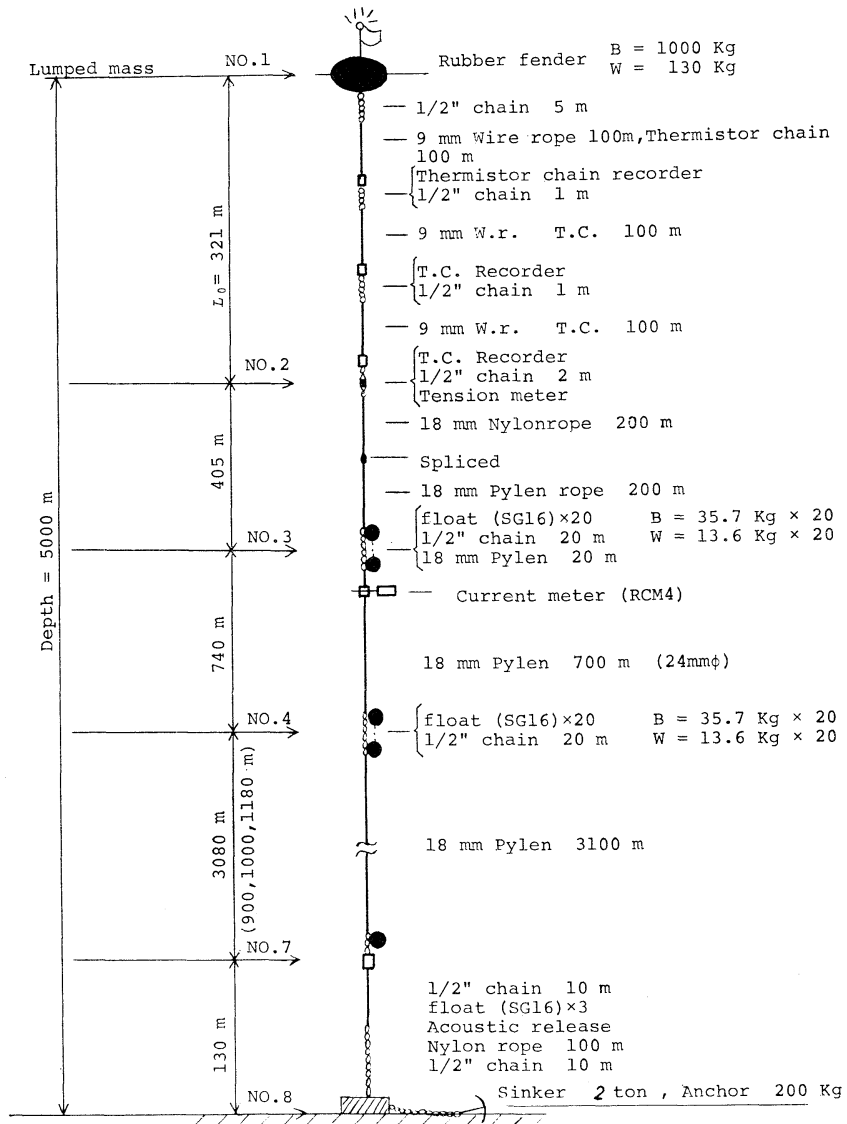


Fig. 3. A design of surface buoy system.

し、直角方向成分は影響が小さいので無視した。

#### 4. ブイシステムの概略

Fig. 3. に本研究で試設計した海面ブイシステムの概略図を示す。海面ブイとしてゴム製のフェンダーを選んだ理由は、

- 船舶等の衝突に極めて強いこと。
- 長さ 300 m のサーミスターチェーンを装着するためには、浮力は最低 1 ton 程度必要である。その程度の金属製ブイは重量も大きく、揚取時に困難が予想されるが、ゴム製の場合には容易であること。
- 今回の設計では Survival condition 時には海面下に没するが、剛体ブイの場合には完全な耐圧構造にする必要があり、ますます重量が大きくなる。ゴム製の場合には自重とサーミスターチェーンの重量に見合う浮力を確保することだけを考えておけば、変形してもよいこと。

等が挙げられる。

また、海面ブイ直下の係留線にはワイヤーロープを使用している。これはサーミスターチェーンを並行して装着するために、伸びるロープは使用できないこと、鎖は重すぎる、ケブラーは耐摩耗性が低いこと等の理由による。ケブラーは、ワイヤーロープに比べて軽量であることが利点であり、今後も検討を続けたい。

ワイヤーロープの下 200 m のナイロンロープと 200 m のパイレンロープはその下のフロート群とサーミスターチェーンが無負荷時(流れも、波もない状態)に接触することを防ぐためと、海面ブイの波浪による運動のフロート群への伝達を減衰させるためのものである。本システムは、5,000 m の水深に対して係留線の初期長さは 4,696 m であり、無負荷時に浮力で伸びてもフロート群とサーミスターチェーンが接触することは考えられないが、合成樹脂ロープはクリープする性質があるので、更に検討が必要である。

第 1 のフロート群の下に流速計が装着されているが、海面ブイの運動は 400 m の合成樹脂ロープ及びフロート群に吸収されるので、この位置がよいと思われる。これより下には 700 m のパイレンロープ、20 コのフロート群、3,100 m のパイレンロープに続き 3 コのフロート、切離装置があり、さらに 100 m のロープと 20 m のチェーンを介してシンカーにつながっている。

使用する材料についてはワイヤーロープは必ず非自転性のものを使用すること、さらに合成樹脂ロープについては非自転性で弾性係数がはっきりしていて、クリープ

することが少ないものを使用する。

その他疲労強度、腐蝕についても注意が必要である。

#### 5. ブイシステムの性能と強度の数値計算による検討

前節で概略設計したブイシステムが所期の性能と十分な強度を持っていることを確認する必要がある。確認の方法は実験によるか、数値計算によるかの 2 通りが考えられる。実験で確認しようとするれば模型と実機の相似性を保つ必要があるが、これは極めて困難である。実験用の波浪水槽の水深は数 m 程度であり水深 5,000 m の海域で使用する海面ブイの模型を作る場合の縮尺比は 1/1,000 にしなければならない。ロープ類の直径は 0.02 mm で海面ブイの浮力は 0.001 g のものを作らなければならない。これでは実験は不可能である。数値計算で確認する場合にはその精度が問題になる。Appendix に示した計算法はその精度を模型実験と実機実験(小寺山等, 1980)で確認しているので本論でも、この計算法によって計算する。以下投入時、係留時の 2 段階(海面ブイシステムの場合は回収時には問題はないので省略する)において数値シミュレーションを行う。各部の強度に関して設計に反映する量は各段階を通して最大の量である。

##### 5.1. 投入時

投入時には、波、風は殆んどなく、環境条件としては潮流のみを考えればよい。潮流分布として Fig. 2 の中で最大流速の場合を想定する。

Fig. 4 はシンカーが落下して行く途中の係留線の形状図である。この段階で留意すべきことは係留線が錯綜して互いからみつく可能性がないかどうかを検討するこ

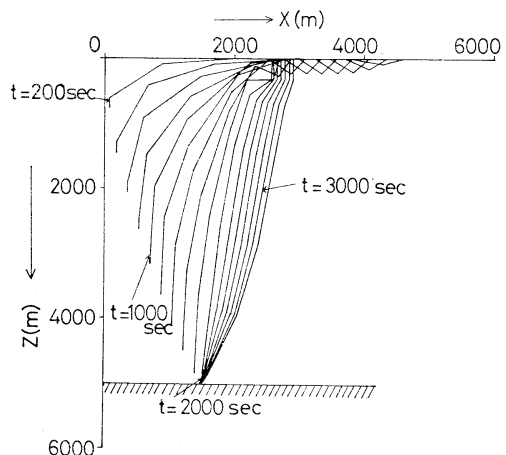


Fig. 4. Profiles of mooring line during deployment.

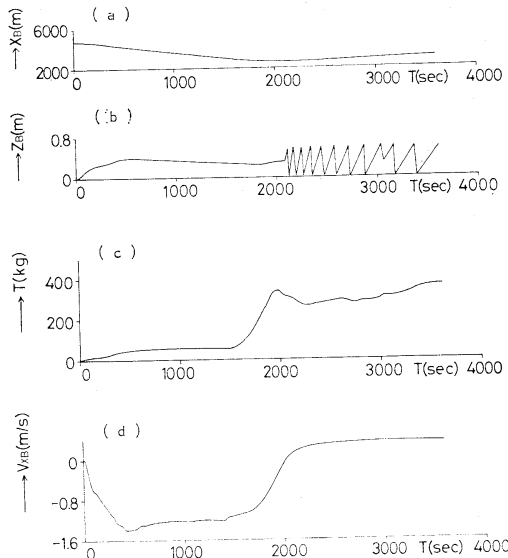


Fig. 5. Motions and tension of surface buoy during deployment. (a) Horizontal displacement of surface buoy. (b) Vertical displacement of surface buoy. (c) Dynamic tension at surface buoy. (d) Horizontal velocity of surface buoy.

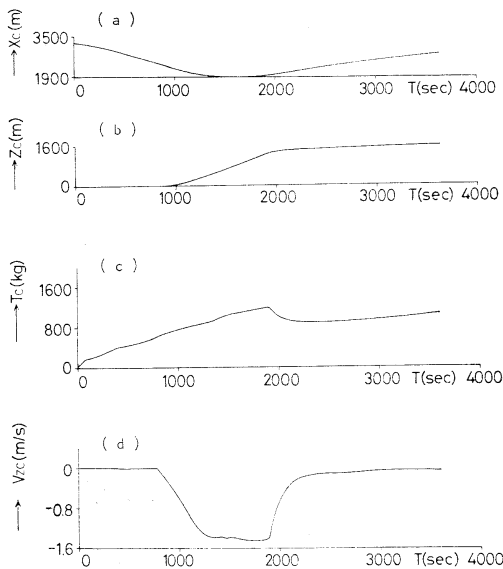


Fig. 6. Motions and tension of current meter during deployment. (a) Horizontal displacement of current meter. (b) Vertical displacement of current meter. (c) Dynamic tension at current meter. (d) Vertical velocity of current meter.

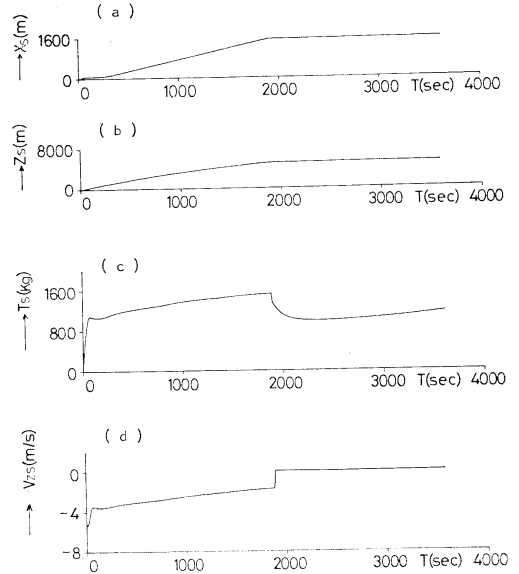


Fig. 7. Motions and tension of sinker during deployment. (a) Horizontal displacement of sinker. (b) Vertical displacement of sinker. (c) Dynamic tension at sinker. (d) Vertical velocity of sinker.

とであるが、Fig. 4はこのシステムにはその心配がないことを示している。またシンカー着底まで約 2,000 秒 (正確には Fig. 7 から 1,940 秒) の時間がかかることがわかる。

Fig. 5は海面ブイの運動と海面ブイ直下のワイヤーロープの張力変動を示している。海面ブイはシンカー投入時の状態から約 2,100 m 上流側に引き寄せられた後、下流に向かって流れ始める (a図)。また投入時には海面ブイのZ方向の運動は 0.6 m 程度で、水没する可能性はないことが b 図からわかる。海面ブイの水平方向の移動速度は最大 1.3 m/s 程度 (d 図) で対水速度は 2 m/s にも達するので、海面ブイシステムに測器を取りつける場合はこの速度から生ずる抗力に十分耐えるものでなければならない。

Fig. 6は流速計部分の運動と張力変動の図である。(c) 図からこの辺りでは投入時に約 1.2 ton の張力が加わることがわかる。また (d) 図から流速計のZ方向の最大速度は約 1.4 m/s であり、流速計のロータ及び方向指示用プレートがこれに耐えるかどうか検討する必要がある。もし、これに耐えられないようであれば、シンカーにパラシュートを装着して落下速度を下げるか、流速計を改造する必要がある。

Fig. 7 はシンカー部分の運動と張力変動の図である。(c) 図から最大張力は約 1.5 ton であることがわかる。またシンカーの落下速度の最大値は (d) 図から約 5.5 m/s でシンカー投入直後に現われることがわかる。

係留システムの形状によっては、次に述べる係留時ではなく投入時に最大の荷重が加わる場合があるから、この段階でも強度的な事を検討する必要がある。各部の相対流速によって生ずる抗力に対して測器等が耐えられるかどうかは使用する測器に関する詳しい情報が必要であるので本論では触れない。ワイヤに加わる最大張力は約 360 kg であり、使用したワイヤーの破断荷重が 7 ton で

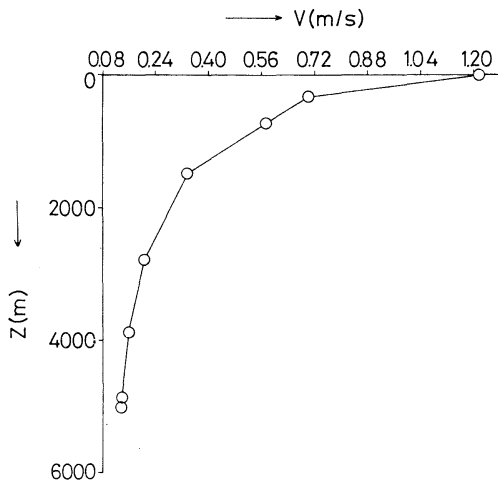


Fig. 8. Current velocity in working condition.

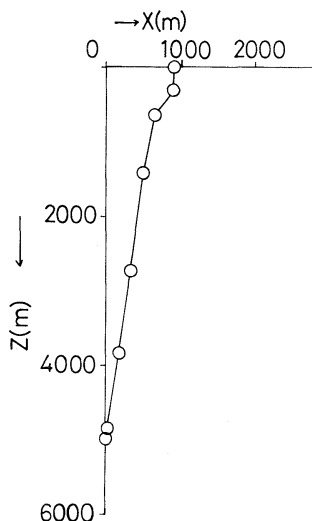


Fig. 9. Static profile of buoy system in working condition.

あるので十分な強度を有していることがわかる。またパイレンロープに加わる最大張力はシンカー部で約 1.5 ton である。使用した 18 mm のパイレンロープの破断荷重は 5.2 ton であるので安全率は約 3.5 である。安全係数は 3.0 程度を考えているので、投入時に加わる荷重に対しては十分な強度を持っていると考えてよい。

## 5.2. 係留時

係留時には 3 節で述べたように 2 つの状態について検討しなければならない。その 1 つは Working condition 下でのシステムの性能であり、もう一つは Survival condition 下におけるシステムの安全である。この場合のシステムの性能とは水温計がその所定の鉛直方向の位置をいかに精度よく維持するかである。

### 5.2.1. Working condition

Fig. 8 は Working condition 時の潮流及び風による吹送流の合成流速の鉛直分布である。Fig. 9 はこのよう

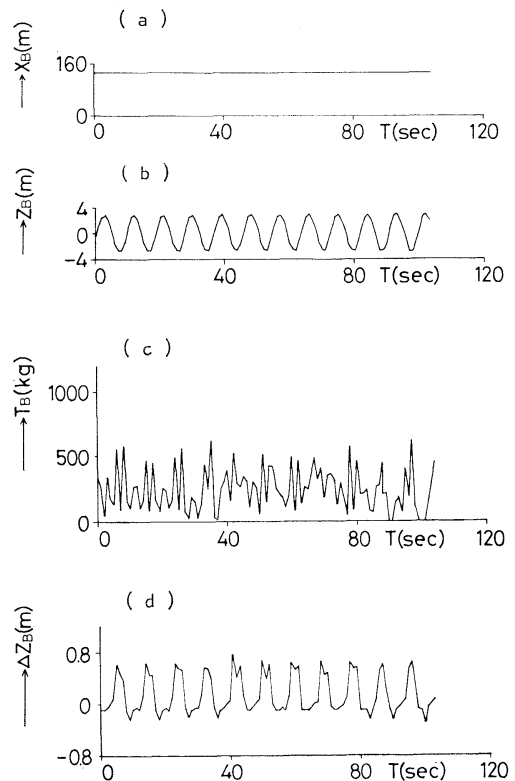


Fig. 10. Motions and tension of surface buoy in working condition. (a) Horizontal displacement of surface buoy. (b) Vertical displacement of surface buoy. (c) Dynamic tension at surface buoy. (d) Submerged depth of surface buoy.

な流れの中でのシステムの静的形状図である。形状図の1番上の○印は海面ブイ。2番目はサーミスターチェーンの下端部, 一番下はシンカーをそれぞれ表現している。Fig. 9 から海面ブイは海面上にある事がわかる。またサーミスターチェーンの下端部は流れがない状態よりも0.7 m だけ上方に変位したことが計算からわかる。

Fig. 10 は Fig. 9 の流速分布の上にさらに波高 6 m の波を受けた時の海面ブイの運動及びワイヤーの張力変動を示している。(a) 図は海面ブイの水平方向の運動, (b) 図は鉛直方向の運動, (d) 図は水面下を正とした海面ブイと水面との相対変位  $\Delta Z_B$  を示している。波と流れの相互干渉によって生ずる粘性漂流力によって海面ブイは Fig. 9 の状態からさらに水平方向に 140 m 程度流される。ブイの半径は約 0.6 m であり, 水面との最大相対変位は 0.8 m であるので海面ブイは水面上で見えかく

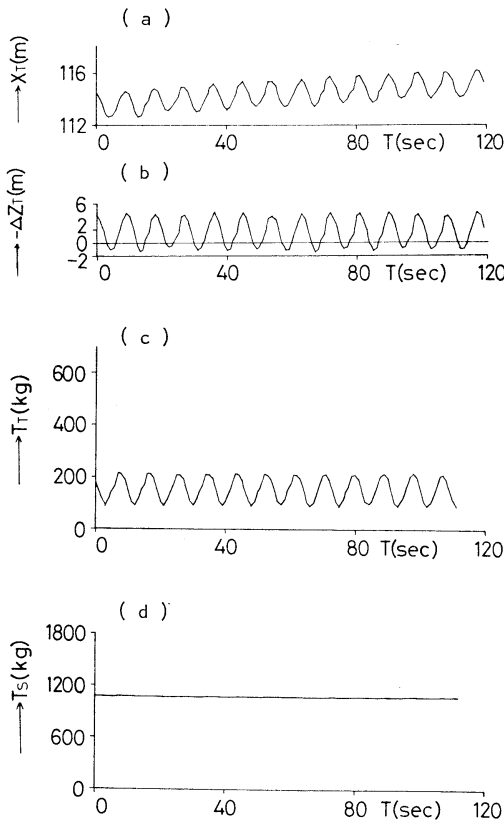


Fig. 11. Motions and tension of thermistor chain in working condition. (a) Horizontal displacement of thermistor chain. (b) Vertical displacement of thermistor chain. (c) Dynamic tension of thermistor chain. (d) Dynamic tension at sinker.

れている状態である。(c) 図はワイヤーの張力変動である。システムの軸方向の固有振動が現われている。

Fig. 11 はサーミスターチェーン下端部の運動と張力変動である。(a) 図から水平方向には海面ブイと同様に 113 m 程度流れている。(b) 図は Fig. 9 の状態からのサーミスターチェーンの鉛直方向への上昇  $\Delta Z_T$  を示す。振幅 5.5 m の変動成分と 1.2 m の定常上昇が認められる。変動成分は水温計の応答速度が記録形式を適当に操作することで測定精度への影響をなくすることができる。定常変位は Fig. 9 の状態での 0.7 m と合せて 1.9 m の上昇変位があることになる。この量を小さくするには海面ブイとワイヤーの間に弾性体を挿入する等の対策が必要となろう。(c) 図はサーミスターチェーン直下のナイロンロープの張力である。最高 200 kg の張力を示している。また (d) 図はシンカー部での張力であるが, 波浪の影響は殆んど認められない。強度上の検討は次の Survival condition の場合に行う。

### 5.2.2. Survival condition

Survival condition では性能よりもシステムの安全についての検討を主に行う。

Fig. 12 は Survival condition 時の吹送流と海流の合成流速の鉛直分布である。Fig. 13 はこの流れの中でのシステムの静的形状図である。図ではよく見えないが, 海面ブイは 8 m 水面下に没している。

Fig. 14 は Fig. 13 の状態の上にさらに波高 30 m の波が入射した時の海面ブイの運動とワイヤー張力である。(a) 図からわかるように, 海面ブイはもはや水平方向への波による漂流はほとんど行わず, Fig. 13 の状

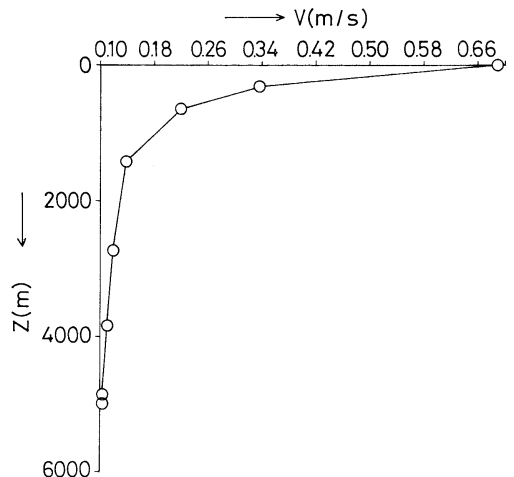


Fig. 12. Current velocity in survival condition.

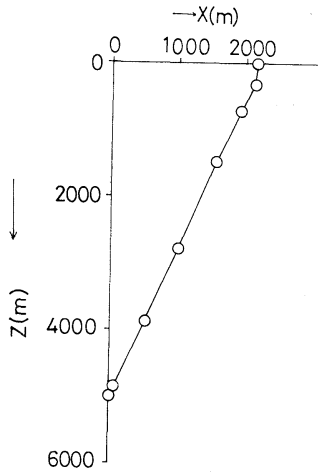


Fig. 13. Static profiles of buoy system in survival condition.

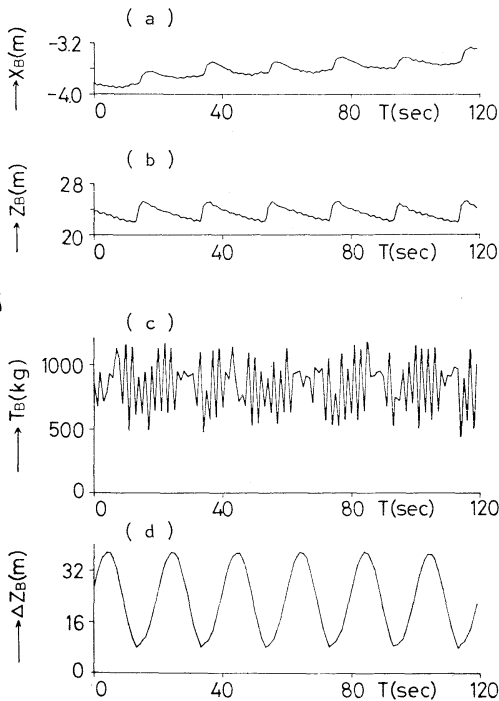


Fig. 14. Motions and tension of surface buoy in survival condition. (a) Horizontal displacement of surface buoy. (b) Vertical displacement of surface buoy. (c) Dynamic tension at surface buoy. (d) Submerged depth of surface buoy.

態とほぼ同じ位置にある。鉛直方向には平均位置が水面下 24 m の位置にあり、振幅 3 m の運動を行っている。

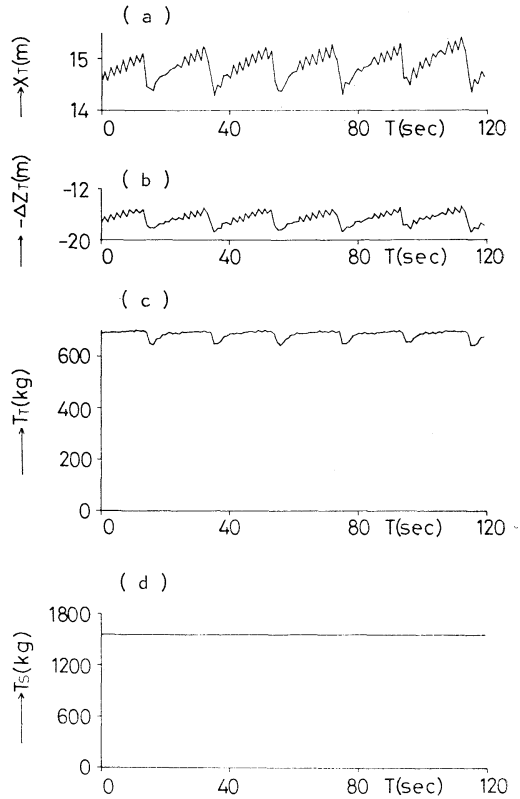


Fig. 15. Motions and tension of thermistor chain in survival condition. (a) Horizontal displacement of thermistor chain. (b) Vertical displacement of thermistor chain. (c) Dynamic tension at thermistor chain. (d) Dynamic tension at sinker.

また (d) 図から波面との相対変位は最高 38 m、最低でも 8 m 波面の下に海面ブイが没している事を示している。したがって海面ブイは与圧を行うことにより 5 気圧までは少なくとも耐圧能力を有する必要がある。(c) 図はワイヤーの張力変動である。軸方向の固有周期で振動しているが最高 1.2 ton 程度の張力が加わっている。使用したワイヤーの破断強度は約 7 ton であるので安全率は約 6 であり、十分の強度がある。

Fig. 15 はサーミスターチェーン最下端の運動と張力及びシンカー部の張力である。(a) 図を見ると Fig. 13 の状態からさらに 14.5 m 流れているが、波周波数の運動は振幅が 0.8 m 程度で極めて小さい。鉛直方向には外力のない状態よりも 20 m 程度沈下し、さらに振幅 3.6 m の運動を行っている。サーミスターチェーンの所での平均張力は 700 kg 程度で変動振幅はそれほど大きくない。



この部分のナイロンロープは 8.4 ton、パイレンロープは 5.2 ton の破断強度を有している。安全率は 7 以上で十分である。(d) 図はシンカー部での張力である。波の影響は殆んどなく一定である。張力は 1.6 ton であって、パイレンロープの破断強度が約 5.2 ton であるから安全率は約 3.3 であり、設計の目標値に達している。

6. ま と め

海洋混合層水温計測用ブイシステムの概略設計について述べた。今後詳細な設計を行うためには、さらに多くのデータを収集する必要がある。すなわち環境条件として

1. 現地の詳しい流速分布
  2. 設置海域のより正確な水深とその計測誤差範囲。
- 性能面からは
3. 水温計の鉛直水平方向の運動許容範囲
  4. 圧力センサーで水深を推定する場合の精度。
- 強度面からは、
5. ワイヤー、シャックル等の腐蝕疲労
  6. 合成樹脂ロープの疲労強度
  7. 高圧、低温下での合成樹脂ロープの性質
  8. 測器の部分的な強度。
- その他、さまざまなデータを基礎研究を通して得る必要があると考えられる。

終りに本研究の遂行に当り、終始有益な助言と討論を寄せて戴いた OMLET グループの方々に深く感謝いたします。また数値計算と図面の整理に協力していただいた応用力学研究所中村昌彦助手に感謝します。

本研究の一部は昭和60年度文部省科学研究費によることを付記し、関係者の方々に礼を申し上げます。

文 献

CLAY, P.R. (1983): The LOTUS disc mooring. Woods Hole Oceanogr. Inst. Contr. No. 5354, 1-6.

EKMAN, V. W. (1905): On the influence of the earth's rotation on ocean currents. Ark. f. math. Astr. Och. Fysik.

KAWATAKE, K., T. SUHARA, K. TAKAHASHI, M. OHKUSU, W. KOTERAYAMA and Y. TAKAO (1986): A subsurface buoy system for measuring the Kuroshio. Proc. 5th OMAE, Tokyo, Japan, 374-381.

小寺山 亘, 長浜智基, 石井秀夫 (1980): 海洋計測用ブイシステムの運動の数値計算法について. 九州大学応用力学研究所所報, 53, 19-36.

MITSUYASU, H. and T. KUSABA (1985): Drag coefficient over water surface under the action of strong current. Natural Disaster Science, 6, 43-50.

THRESHER, R.W. and J.H. NATH (1975): Anchorlast deployment simulation by lumped masses. J. Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, 101, Paper 11709.

友田好文, 高野健三 (1983): 「海洋」地球科学講座 4. 共立出版, 125-130.

Appendix 数値計算法

数値計算法としては有限要素法, ランプドマス法が考えられる。しかしながら, ブイシステムを構成する係留線の変形量は極めて大きく複雑であるために, 変位のモードを固定して考える有限要素法は適用が困難であり, ブイシステムの形状がランプドマス法の概念になじみやすいので, 計算はすべてランプドマス法によった。計算の詳細は, ブイシステムの形状, 対象となる運動の形態によって異なるが基礎的な考え方は共通しているので, まずそれを説明する。

A.1. 数値計算の基礎式

THRESHER ら (1975) はランプドマス法により, 海面ブイを係留するためのアンカーをアンカーラスト方式で投入する際の係留線の形状, 張力を計算した。本論でも計算法の基本的な考え方は同様であるが, 計算の対象の種類が多いのでより汎用的に拡張した。

Fig. 3 に示すようなブイシステムに加わる外力は地面からの反力と流体力(浮力, 抗力, 付加質量力), 重力で

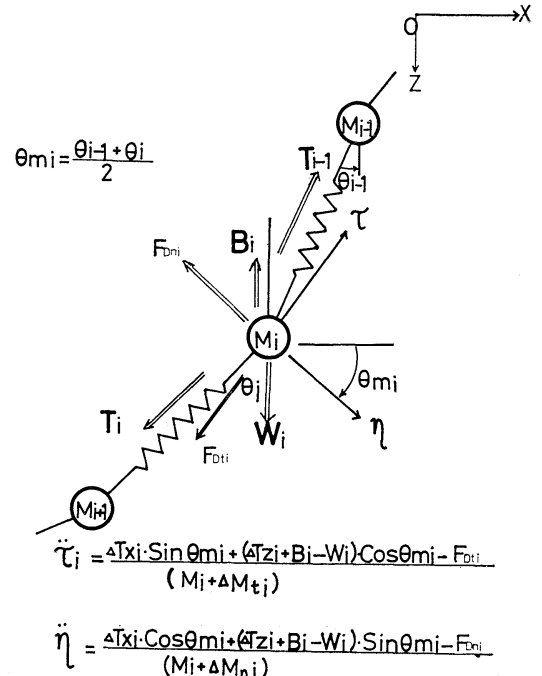


Fig. A-1. Concept of lumped mass method.

ある。それらを Fig. A-1 に示すようにブイシステムの何点かに集中的に加わると仮定して各点の運動を求める。ただし各計算点間は係留線によって結ばれているので各点に対する外力としては係留線の張力も加わる事となる。同時に係留線に加わる流体力、重力は計算点に加わると考える。各部の質量はすべて計算点に集中しているとするので、計算点としてはできるだけフロート、流速計、シンカーのようにもともと大きな質量をもつ部分を選ぶと実際のブイシステムと計算のモデルが近くなる。計算点に加わる流体力はそれを構成する種々の物体に加わる流体力の和として求められる。一般に物体の抗力係数、付加質量係数は流れに対する角度によって変化するので Fig. A-1 に示すように係留線の接線方向と法線方向に分けて考えると便利である。 $i$  番目の計算点に加わる接線方向の抗力  $F_{Dti}$  と法線方向の抗力  $F_{Dni}$  は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_{Dti} &= \frac{1}{2} \rho |v_{ti}| v_{ti} A_{ti} C_{Dti}, \\ F_{Dni} &= \frac{1}{2} \rho |v_{ni}| v_{ni} A_{ni} C_{Dni}. \end{aligned} \right\} \quad (A-1)$$

ただし  $\rho$ : 流体密度,  $v_{ti}$ : 計算点における流体に対するブイシステムの相対速度の接線方向成分,  $v_{ni}$ : 計算点における流体に対する相対速度の法線方向成分。

$A_{ti} C_{Dti}$  は以下のようにして求める。 $i$  番目の計算点がたとえば係留線、フロート、流向流速計からなるとすれば、

$$A_{ti} C_{Dti} = A_{tL} C_{DtL} + A_f C_{Df} + A_{tm} C_{Dtm} \dots (A-1)$$

ただし、 $A_{tL}, A_f, A_{tm}$  はそれぞれ係留線、フロート、流向流速計の接線方向投影面積,  $C_{DtL}, C_{Df}, C_{Dtm}$  は抵抗係数である。 $A_{ni} C_{Dni}$  も同様にして求める。

Fig. A-1 に示すように  $i$  番目の係留線の傾斜角を  $\theta_i$  とすれば計算点での係留線に対する接線の傾斜角  $\theta_{mi}$  は近似的に次式で求められる。

$$\theta_{mi} = (\theta_{i-1} + \theta_i) / 2. \quad (A-2)$$

ただし  $i=1$  の場合は以下のように定める。

$$\theta_{m1} = \theta_1 \quad (A-3)$$

空間に固定した座標軸を  $X-Z$  とし海流は  $X$  方向に  $u_0(z)$  の流速で流れているとすれば

$$\left. \begin{aligned} v_{ti} &= \dot{\tau}_i - u_{0i} \sin \theta_{mi}, \\ v_{ni} &= \dot{\eta}_i - u_{0i} \cos \theta_{mi}. \end{aligned} \right\} \quad (A-4)$$

ただし、 $\dot{\tau}_i, \dot{\eta}_i$ :  $i$  番目の計算点の接線、法線方向速度,  $u_{0i} = u_0(Z_i)$ 。

フロートのように流れに対する角度によって抵抗係数が変化しないものは (A-2) 式中においても接線方向と法線方向で同じ係数を用いる。付加質量力も抗力と同様に考えて各要素の付加質量を加えさせて

$$\left. \begin{aligned} F_{Mti} &= \rho \ddot{\tau}_i V_i C_{Mti} = \Delta M_{ti} \ddot{\tau}_i, \\ F_{Mni} &= \rho \ddot{\eta}_i V_i C_{Mni} = \Delta M_{ni} \ddot{\eta}_i. \end{aligned} \right\} \quad (A-5)$$

ただし  $F_{Mti}, F_{Mni}$ : 計算点  $i$  に加わる接線、法線方向の付加質量力,  $\ddot{\tau}_i, \ddot{\eta}_i$ : 計算点  $i$  の加速度の接線、法線方向成分,  $V_i$ : 排水体積,  $C_{Mt}, C_{Mn}$ : 付加質量係数,  $\Delta M_{ti}, \Delta M_{ni}$ : 付加質量。

また張力  $T_i$  は計算点間の係留線の伸びを  $\Delta l_i$  とすれば次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} T_i &= E_i S_i \frac{\Delta l_i}{l_i}, \quad (T_i \geq 0), \\ \Delta l_i &= \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2} - l_i. \end{aligned} \right\} \quad (A-6)$$

ただし  $E_i$ : 係留線の弾性定数,  $S_i$ : 係留線の断面積,  $l_i$ : 係留線の無負荷時の長さである。また  $\Delta l_i$  が負の場合には  $T_i = 0$  とする。

係留線の張力によって計算点  $i$  に加わる水平方向、鉛直方向の力  $\Delta T_{xi}, \Delta T_{zi}$  は結局次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{xi} &= T_{xi-1} - T_{xi} = T_{i-1} \sin \theta_{i-1} - T_i \sin \theta_i, \\ \Delta T_{zi} &= T_{zi-1} - T_{zi} = T_{i-1} \cos \theta_{i-1} - T_i \cos \theta_i, \end{aligned} \right\} \quad (A-7)$$

$i=1$  の場合は

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{x1} &= T_{x1} = -T_1 \sin \theta_1, \\ \Delta T_{z1} &= T_{z1} = -T_1 \cos \theta_1. \end{aligned} \right\} \quad (A-7)'$$

(A-1)~(A-7) 式を使って計算点  $i$  の運動方程式は

$$\left. \begin{aligned} (M_i + \Delta M_{ti}) \ddot{\tau}_i &= \Delta T_{xi} \sin \theta_{mi} \\ &+ (\Delta T_{zi} + B_i - W_i) \cos \theta_{mi} - F_{Dti}, \\ (M_i + \Delta M_{ni}) \ddot{\eta}_i &= \Delta T_{xi} \cos \theta_{mi} \\ &- (\Delta T_{zi} + B_i - W_i) \sin \theta_{mi} - F_{Dni}. \end{aligned} \right\} \quad (A-8)$$

ただし  $W_i, B_i$ : 計算点  $i$  の重量, 浮力,  $M_i = \frac{W_i}{g}$ 。

以上のようにして  $\tau_i, \eta_i$  が求まれば  $\ddot{X}_i, \ddot{Y}_i$  は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X}_i &= \ddot{\tau}_i \sin \theta_{mi} + \ddot{\eta}_i \cos \theta_{mi}, \\ \ddot{Z}_i &= -\ddot{\tau}_i \cos \theta_{mi} + \ddot{\eta}_i \sin \theta_{mi}. \end{aligned} \right\} \quad (A-9)$$

$\ddot{X}_i(t), \ddot{Z}_i(t)$  を与えて  $\ddot{X}_i(t+\Delta t), \ddot{Z}_i(t+\Delta t)$  を求める数値積分法は数多くあるが、ここでは予測子・修正法を用いた。予測子としては修正オイラーの公式、修正子として台形公式を用い、誤差の評価を行いながら積分を進め、誤差が制限値を越した場合は時刻  $\Delta t$  を  $\Delta t/2$  にして計算を進めた、また時刻  $\Delta t$  を変更する場合と、 $t=0$

における積分はルンゲ・クッタ・ギル法によった。

A.2. 投入の計算

A.2.1. 初期値

計算の初期値は船上のシンカー位置を  $X-Z$  座標系の原点とし、流速分布  $u_0(Z)$  と船速  $\dot{X}_s$  を与えれば、計算点に加わる水平方向の力  $F_H$ 、鉛直方向の力  $F_V$  は平衡状態であり、次式で表わされる。ただし今回の計算では鉛直方向の流速は 0 としている。またこの状態では係留線は概ね水面に浮かんでいる。

$$F_H = \Delta T_{xi} + \frac{1}{2} \rho A'_i C_{Di} |u_{0i} - \dot{X}_s| (u_{0i} - \dot{X}_s) = 0,$$

$$F_V = \Delta T_{zi} + B'_i - W_i = 0.$$

$\dot{X}_i$  は船速、 $u_{0i}$  は流速である。また  $B'_i$  は計算点の浮力であるが、水面に浮んでいる場合は次の関係が成り立つ。

$$B'_i = W_i - \Delta T_{zi}. \tag{A-11}$$

$B'_i < B_i$  の場合は有効投影面積  $A'_i$  は次式で求める。

$$A'_i = A_i \times \frac{B'_i}{B_i}. \tag{A-12}$$

また  $B'_i$ 、 $A'_i$  の上限値は  $B_i$ 、 $A_i$  である。(10) 式を使って  $i=1$  から次々に  $T_i$  を求めて、次に  $\theta_i$  を定め、以下くり返し計算で計算点の位置 ( $X_i$ 、 $Z_i$ ) と張力 ( $T_{xi}$ 、 $T_{zi}$ )、傾斜角  $\theta_i$  を求める。その場合に  $\theta_i$  の初期値として  $u_{0i} - \dot{X}_s > 0$  の場合は  $\pi/2$ 、 $u_{0i} - \dot{X}_s < 0$  の場合は  $-\pi/2$  を与える。

A.2.2. シンカー落下中

シンカー落下中は次々とフロート、流速計等を引き込んで行くから、各計算点の浮力と有効抵抗面積は変化する。また水面上にある時のフロート等に加わる造波抵抗もかなり大きいと思われるが、今回の計算では無視した。計算に使用する抵抗係数、付加質量係数等は各種便覧によって求め、複雑な形状のものは類似したものから推定した。

A.2.3. シンカー着底とそれ以後

計算点の数を  $N$  個とすれば、シンカーは  $N$  番目の計算点である。計算の過程で  $Z_n =$  水深となった瞬間から、 $Z_n$ 、 $X_n$  は固定し、 $\dot{X}_n$ 、 $\dot{Z}_n$ 、 $\ddot{X}_n$ 、 $\ddot{Z}_n$  は 0 とする。その他の計算点はそのまま計算を続行する。

A.3. 係留中のブイシステム

海面ブイシステムの場合は潮流変動の他に風、波による外力が加わる。海面ブイは風による力は受けにくい形をしているので風による吹送流の影響と波力を受けるとして計算を行う。その場合海面ブイに加わる外力は粘性

抗力、付加質量力、圧力勾配による力及び造波減衰力であるが、ブイに比較して波長が十分に長い場合は造波減衰力は他の力に比べて小さい。風と波の影響を受ける流場はシンカーの真上の水面上に原点をとって表わせば次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_x &= u_0(Z) + \frac{\omega H}{2} e^{-KZ} \text{sni}(KX - \omega t) \\ &+ \frac{\tau_w}{\rho \sqrt{Gf}} e^{-Z/D} \cos\left(\frac{Z}{D} + \frac{\pi}{4}\right), \\ u_z &= \frac{\omega H}{2} e^{-KZ} \cos(KX - \omega t). \end{aligned} \right\} \tag{A-13}$$

ただし、 $u_0(Z)$  は海流による流れであり、Fig. 2 で求められる。 $\omega$ ; 波の円振動数、 $H$ ; 波高、 $K = \omega^2/g$ 、 $X-Z$ ; 水面上に原点を置き、 $Z$  軸を downward とした座標軸、 $u_x$ ; 水平方向の流速、 $u_z$ ; 鉛直方向流速  $G$ ; 鉛直渦拡散係数、 $\tau_w$ : 風の応力、 $f$ ; コリオリのパラメーター、 $D$ ; 摩擦深度  $G$ 、 $\tau_w$ 、 $f$ 、 $D$  等の求め方は友田、高野 (1983) の方法によった。

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_y &= -\frac{\omega^2 H}{2} e^{-KZ} \cos(KX - \omega t), \\ \dot{u}_z &= \frac{\omega^2 H}{2} e^{-KZ} \sin(KX - \omega t). \end{aligned} \right\} \tag{A-14}$$

粘性抗力は  $u_x$ 、 $u_z$  を  $\tau$ 、 $\eta$  方向の流速  $u_t$ 、 $u_n$  に変換し、 $\dot{\tau}$ 、 $\dot{\eta}$ 、 $u_t$ 、 $u_n$  から  $v_t$ 、 $v_n$  を求めて (A-1) 式に代入し、計算する。その粘性抗力  $F_{Dti}$ 、 $F_{Dni}$  を (A-8) 式に代入して求めた  $\ddot{\tau}_i$ 、 $\ddot{\eta}_i$  を (A-9) 式を使って  $\ddot{X}'_i$ 、 $\ddot{Z}'_i$  に変換した後に、波粒子の運動による付加質量力と圧力勾配による力の影響を次のように取り入れる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X}_i &= \ddot{X}'_i + \frac{C_{MX} \rho V_i \dot{u}_x}{(M + \Delta M_{Xi})}, \\ \ddot{Z}_i &= \ddot{Z}'_i + \frac{C_{MZ} \rho V_i \dot{u}_z}{(M + \Delta M_{Zi})}, \end{aligned} \right\} \tag{A-15}$$

ただし、 $\Delta M_{Xi}$ 、 $\Delta M_{Zi}$ :  $X$ 、 $Z$  方向の運動による付加質量、 $C_{MX}$ 、 $C_{MZ}$ : 質量力係数

(A-15) 式は全部の計算点に適用されるが、波及び吹送流の影響を強く受けるのは海面ブイと海面付近のフロートだけである。また係留線の傾斜が大きくない場合、 $\Delta M_{Xi}$ 、 $\Delta M_{Zi}$  は  $\Delta M_{ti}$ 、 $\Delta M_{ni}$  でそれぞれ近似できる。

A.4. ブイシステムの揚収

揚収の計算は係留中の運動計算プログラムにおいて、シンカーの直上の係留線の張力を 0 とすればよい。さらに水面上に浮かび上がった部分の浮力及び有効抵抗面積は投入の計算で述べた方法で計算する。海面ブイシステムの場合には海面ブイが海面上にあるので揚収の計算はそれほど重要ではない。