海流による係留系の運動の実海域計測と解析

正員 竹内 倶佳* 李 節 青**
永井 豊* 正員 小寺山 亘***

Measurements of Mooring System Motions in Tidal and Oceanic Currents and Their Analysis

by Tomoyoshi Takeuchi, *Member* Li Jie Qing,
Yutaka Nagai, Wataru Koterayama, *Member*

Summary

Mooring motions works on oceanographical measurements such as acoustical position fixing, acoustical tomography, and so on. Therefore, acoustical measurements of mooring motions are required to obtain good accuracy on acoustical oceanographical measurements. In this paper, a drag coefficient of chained glass balls to get a buoyancy force of a mooring system are determined on the basis of experimental data in the sea. Mooring motions are investigated with lumped mass method using its drag coefficient. A taut mooring motion draws a circle in a rotating current, on the other hand it draws a track like a numeral of 8 in an elliptically rotating current. Displacements of a taut mooring system can be estimated from current velocities based upon two kinds of simple dynamical equivalent models. This makes easier to measure mooring motions than acoustical method.

1. はじめに

海洋観測において係留系は重要な観測手段として使われている。近年、海中における音響を利用した位置決定や測距は地震観測などに関連してより精度の向上が求められているが、係留系の動揺が測定精度に影響する。海洋音響トモグラフィのための係留系の展開においては係留系の運動が問題になるので、同時に運動の測定が行われている¹⁾。更に、inverted echosounder を利用すると海流流量の直接測定が可能になるが²⁾、これにも係留系の運動が影響する。

海洋観測用係留ブイの運動については単純なモデルを使った基礎的な検討がある³⁾。また、海面係留系の設計の立場から、係留系の投入時のダイナミックスや係留線の傾き等については、小寺山等^{4),5),6)}によってランプドマス法を使って詳細に検討されているが、音響利用の立場からの係留後の運動等についての検討はあまり行われていない。海洋音

響トモグラフィ観測においては、係留系の展開の際にはトランスポンダによって送受波器の海流による運動が測定され、その影響を補正するようにしている。その結果によると、海流流速より位相が約 90° 遅れた動きをすることが観測され、それについての考察が報告されている⁷⁾。

本論文では、まず、実海域で計測した実測データから係留系のガラス玉ブイの抗力係数を決定し、小寺山等が汎用的に使うことができるように開発したランプドマス法を使った係留系の運動解析から力学的定数と運動モードの関係を明らかにする。更に、音響利用による位置決定や海洋観測で問題となる係留系の運動の流速データから簡単な 1 点集中定数の等価力学モデルに基づいた推定法について検討する。

2. 係留系の構成と海域実験

係留系は御蔵島と三宅島間の水深約 1100 m の海域に約 10 km 離して 3 系設置した。この海域は黒潮が流れており、海底付近でもかなりの海流と潮流流がある。係留系の構成は Fig. 1 a) に示すように、アンカーから 20 m 立ち上げた位置に音響切り離し装置を置き、更に、80 m 立ち上げた位置に音波の送受波器を置いている。従って、送受波器は海底から 100 m の位置に係留されていることになる。そ

* 電気通信大学

** 電気通信大学大学院

*** 九州大学応用力学研究所

の点から2 m上の位置にアンデラ流速計を置き、更に、20 m 離して浮力用のガラス玉を6個梯子型に連結し、その点から20 m 離して1個のガラス玉を繋いでいる。6個と1個のガラス玉を繋ぐロープのみが12φのパイレンロープで+の浮力にし、他は全て12φのナイロンロープを係留索として使っている。音波の送受波には10 kHzの周波数を位相変調によって符号化されたM系列信号を使い、相関処理することにより伝搬時間の測定誤差は0.2 ms以下になるようにしている。これは距離にして0.3 m以下である。Fig. 2は音波伝搬時間を測定するために使った音波の信号処理結果の1例である。十分な信号対雑音比が得られていることが確認でき、ピーク値の横座標から音波伝搬時間が得られる。図のBは海底反射波であるからその横座標は送受波器と海底間約100 mの往復伝搬時間を示し、Sは海面反射波であるからその横座標は海面送受波器間約1000 mの往復伝搬時間を示している。SBは海面・海底反射波であるからその横座標は海面海底間の往復伝搬時間を示している。

係留観測は約20日間行った。Fig. 3 a), b)はアンデラ流速計で10分間隔で測定した流速と流向の時間変化を示したものである。海流に潮汐流が重畳されている様子がわか

Fig. 1 A mooring system and its model for calculation

Fig. 2 An example of acoustical signal processed to measure round trip time

る。このスペクトルはFig. 3 c)のようになっている。これから海流の他に、1日周期の潮汐流が主となり、それに半日周期の潮汐流が重畳されていることがわかる。

音波は20分に1回発射して海底、海面からの反射波を受信した。海底送受波器間の往復伝搬時間はFig. 4のようになる。底層の水温はアンデラ流速計で流速と同時に測定されており、その結果によると、ほぼ3.4°Cと一定である。それ故、底層での音速は1481.3 m/sでほぼ一定と考えることができるので、Fig. 4の音波の往復伝搬時間の1/2の変化分は、送受波器の流れによる鉛直方向への移動距離を表している。Fig. 3 c)のスペクトルからわかるように海中における流れの変化は、速くとも半日周期で海面の波浪変動と比較して非常に遅い。それ故、係留系は、流れによる抗力と浮力およびロープによる張力で傾いて平衡していると考えることができる。また、流れの時間変化に対しては、係留系は平衡状態を保ちながら流れに応じてゆっくり運動

Fig. 3 Time-series data of current velocities measured by AAnderra current meter moored on the bottom

Fig. 4 Time-series data of round trip times between transceiver and bottom

しているものと考えることができよう。実際、Fig. 4 の音波の海底往復伝搬時間の変化は Fig. 3 a) の流速の変化と良く対応した変動の様子を示しており、この考え方を支持している。

3. 係留系の運動解析

海底に設置した係留系は、Fig. 1 a) のように構成されている。これを Fig. 1 b) のように計測器等は 3 個の円筒に置き換え、それ等とガラス玉ブイおよびロープからなるものとモデル化する。このモデルにランブドマス法を使って係留系の運動解析を行うために 80 m のロープに 1 点を割当て、全体で Fig. 1 b) のように M1~6 の 6 点に質量を集中させる。このときの座標は Fig. 5 のようにとる。力学的パラメータは Fig. 1 の定数を使って算出する。力学的パラメータの運動への影響の見通しを得るために着目点の 1 点に全体の質量を集中させ、それに浮力 (B)、流れによる抗力 (F_D) およびロープによる張力 (T) がかかるとした集中定数の等価力学モデル（以下等価モデルと言う）を同時に考える。ここで、等価とは海流がステップ状に変化したときの係留系の着目点の応答がランブドマス法による計算結果または実測結果と一致するようにパラメータを決めることと定義する。ここでは着目点を Fig. 1 b) の M4 の音波の送受波器にとり、質量、浮力、抗力および張力を集中させる。円柱、ロープ、ガラス玉の半径方向の抗力係数はそれぞれ 0.82, 1.2, 0.5 とし、鎖で梯子状に連結した浮力用のガラス玉ブイの抗力係数は実験データから決定する。海底と送受波器間の音波の往復伝搬時間から求めた送受波器の鉛直方向の移動距離とアンデラ流速計から求めた海流流速の関係を示すと Fig. 6 の点のようになる。これに連結したガラス玉ブイの抗力係数と海流流速の鉛直分布の一意性を仮定してランブドマス法で計算した鉛直方向の移動距離と流速の関係は Fig. 6 の実線のようになり、このときのガラス玉ブイの抗力係数は 1.6 となる。以後この抗力係数を使って係留系の運動計算を行う。

3.1 1 次元流による運動

Fig. 5 A coordinate system for calculating mooring motions

Fig. 6 Vertical displacement of the transceiver vs. ocean current

係留線の長さ、浮力および 1 次元流によって係留系がどのような運動をするかを x - z 面内に運動を限定して調べる。これらの力学的パラメータがどのように運動に関係するかを調べるために等価モデルの運動方程式は力の平衡条件から次式のようになる。

$$F_{Dz} = F_D \sqrt{L^2 - r^2} = Br \quad (1)$$

ただし,

$$F_D = \sum \frac{1}{2} \rho C_D A V^2$$

ここで, ρ =海水の密度, C_D =係留要素の抗力係数, A =係留要素の代表面積, V =海流の速度, B =純浮力, L =係留線の長さ, r =送受波器の水平移動距離である。

海流速度が0で鉛直に立ち上がっていた平衡状態の係留系に対して $t=0$ から x 方向に一定速度 u の海流が流れたとすれば, y 方向の成分を0とすると十分時間が経過した後の送受波器の水平移動距離は(1)式から

$$x = \frac{KL u^2}{\sqrt{1+K^2} u^4} \quad (2)$$

ただし,

$$K = \frac{\sum \frac{1}{2} \rho C_D A}{B}$$

のように書くことができる。

Fig. 1 の係留系についてランプドマス法で海流の流速が0から0.5 m/sにステップ状に変わった時の音波の送受波器の応答を求めると Fig. 7 a) のようになる。同図 b) は係留線の運動の振る舞いである。先端から4番目の点 M4 が音波の送受波器である。H, D はそれぞれ送受波器の水平移動距離, 鉛直移動距離を示す。これから海流の速度が0.5 m/sの場合, 係留系が平衡に達するまでの時間は約18分かかることがわかる。このとき送受波器の水平移動距離と鉛直移動距離は, それぞれ47 mと12.3 mになる。等価モデルをこれに当てはめると(2)式からパラメータ K を求

めることができる。これから力学的パラメータ $K=2.13 \text{ s}^2/\text{m}^2$ が得られる。一方, Fig. 1 の係留系の諸元を使って K を求めると $K=1.87 \text{ s}^2/\text{m}^2$ となり前述の結果とはかなり異なる。これは係留線が(2)式では直線を仮定しており, ランプドマス法では質量分布を考慮しているため Fig. 7 b) のような曲線になることからの差の結果と考えられる。

ランプドマス法の計算では数値的に安定な解を得るために刻みを変えながら収束計算をしているので, 実際の24時間周期の潮汐流に対する運動計算を Sun SPARCstation 2 で計算すると計算時間が約1週間かかる。ここでは準定常状態の運動を検討しているので, 定常状態を保つ範囲の時間を考慮した海流に対する運動シミュレーションを行うことで係留系の実際の運動のシミュレーションとすることが可能であろう。Fig. 7 の海流流速に対するステップ応答は18分で定常状態になっている。従って, ここでは潮汐流の周期は2時間として運動シミュレーションを行う。それでも1回に約15時間の計算時間が必要である。

以上から, 潮汐流の振幅が0.5 m/s, 周期が2時間で正弦波状に変化したとして係留系の運動をランプドマス法で調べる。音波の送受波器の水平移動距離 x と係留線の長さ L の比 x/L は(2)式から

$$\frac{x}{L} = \frac{K u^2}{\sqrt{1+K^2} u^4}$$

であるから

$$(a) \quad L > x$$

$$(b) \quad L \approx x$$

に応じて送受波器の運動は, Fig. 8 a), b) のようになり, 大きく異なる。a) の場合は, 実験に使った係留系で係留線の長さ $L=100 \text{ m}$, 浮力 $B=92.4 \text{ kgw}$ のときの緊張係留の運動である。これは上式において左辺がかなり小さいから浮力 B を大にして K を小さくしたときの運動モードである。このとき送受波器の水平移動距離は短くなる。b) の場合は, やっと係留系が立ち上がっている状態の浮力となる $B=17.4 \text{ kgw}$ に小さくし, 流速の振幅を1 m/sと速くした場合の運動である。これは送受波器の水平移動距離 x が係留線の長さ L に近くなり, 浮力が弱く (K は大), 流速 u が速いとき現れる運動モードである。係留系の運動をできるだけ小さくするためには(a)の条件が満足されるように海流流速を考えて浮力を決定する必要がある。実際の係留系は(a)の条件が満足されるように係留されるのが普通であるので, 以後この条件の満足する係留系の運動について検討する。海流流速は0.5 m/s以下を仮定する。

(2)式において送受波器の運動を考えると流れに対する抵抗力は相対速度によって決まるから送受波器の運動速度は次式のようになる。

$$\frac{dx}{dt} = u - \sqrt{\frac{x}{KL}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{L}\right)^2}} \quad (3)$$

Fig. 7 Mooring system response to step ocean current

Fig. 8 Mooring system response to a tidal current

海流流速が 0.5 m/s のときランプドマス法で計算した送受波器の水平移動距離は Fig. 7 から 47 m であり、このとき係留線の長さ $L=100$ m であるから $\sqrt{1-(x/L)^2}=0.94$ となることを考えると、送受波器の運動速度を次式のように近似表現することもできる。

$$\frac{dx}{dt} = u - \sqrt{\frac{x}{KL}} \quad (4)$$

これを解くと送受波器の水平移動距離 x と相対速度 u_r は次式で与えられる。

$$x = KLu^2(1 - e^{-\frac{t}{2KL}u}e^{-\frac{1}{u}\sqrt{\frac{x}{KL}}})^2 \quad (5)$$

$$u_r = u(1 - e^{-\frac{t}{2KL}u}e^{-\frac{u_r}{u}})$$

係留系は十分時間が経過すると新しい平衡状態になり、平衡点までの送受波器の水平移動距離 x は次式のようになる。

$$x = KLu^2, \quad (t \rightarrow \infty) \quad (6)$$

(4) 式は非線形であるので線形の場合とは異なるが、(5) 式を考慮して次式

$$T = 2KL u \quad (7)$$

を係留系の運動の時定数と定義することができよう。これから係留線の長さが長いほど、また海流の速度が大きいくほど時定数が大になる。一方、浮力が大なるほど K は小さくなるから時定数は小さくなる。(6) 式をランプドマス法で計算した Fig. 7 の結果を当てはめると等価モデルのパラメータは $K=1.88 \text{ s}^2/\text{m}^2$ となり、この値は係留系の諸元を

使って求めた K の値に近い。このとき、時定数は $T=188$ s となる。以上から送受波器の運動は、(3) または (4) 式による等価モデル近似が可能と言えよう。ただし、(4) 式で近似する場合は、パラメータを当てはめた海流流速より小さい範囲に制限される。

3.3 2次元流による運動

Fig. 3 からわかるように海流には潮汐流が重畳されており、渦のような回転運動と並進運動が合成されている。送受波器の等価モデルの運動方程式の x, y 成分が水平移動距離 r の相対速度による x, y 成分になるから次式のように書くことができる。

$$x = r \frac{u_r}{\sqrt{u_r^2 + v_r^2}} \quad (8)$$

$$y = r \frac{v_r}{\sqrt{u_r^2 + v_r^2}}$$

ただし、

$$r = \frac{KL V_t^2}{\sqrt{1 + K^2 V_t^2}}, \quad V_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2}$$

ここで、相対速度の x, y 成分は

$$u_r = u - \frac{dx}{dt}, \quad v_r = v - \frac{dy}{dt}$$

であるから、次式

$$\frac{dx}{dt} = u - \frac{x}{\sqrt{KLr}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{L}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\frac{dy}{dt} = v - \frac{y}{\sqrt{KLr}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{L}\right)^2}}$$

が得られる。海流流速は 0.5 m/s 以下の場合を考えているので 1 次元流の場合と同様な近似をすると次式が得られる。

$$\frac{dx}{dt} = u - \frac{x}{\sqrt{KLr}} \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dt} = v - \frac{y}{\sqrt{KLr}}$$

潮汐流に対する送受波器の運動を見るために

$$u = V_0 \sin \omega t, \quad v = V_0 \cos \omega t$$

$$x = r \sin \theta, \quad y = r \cos \theta$$

といて (10) 式に代入すると次式を得ることができる。

$$V_0^2 - (\omega r)^2 = \frac{r}{KL} \quad (11)$$

潮汐周期は Fig. 3 から約半日と 1 日であるので $\omega=0.0002$ or 0.0001 rad/s 以下であり、 $(\omega r)^2 \sim 0$ とおける。(11) 式から次式

$$\frac{\omega r}{V_0} = \omega KL V_0 = \frac{1}{2} \omega T \quad (12)$$

$$= 0.004 \pi$$

が得られ、 $V_0=0.5 \text{ m/s}$ の場合、送受波器の移動速度は潮汐流の約 1/50 or 1/100 になる。

ランプドマス法で緊張係留をした係留系の 3 次元運動を計算すると音波の送受波器の運動は Fig. 9 のようになる。

Fig. 9 Mooring system responses to a rotating and an elliptically rotating currents

Fig. 10 Mooring system motions in tidal and oceanic currents

Fig. 9 から潮汐流と送受波器の速度は丁度 90° 位相がずれていることがわかる。また、送受波器の運動速度の振幅は潮汐流の速度の $1/10$ になっている。これは、潮汐流の周期を 2 時間としているので (9) 式からの結果と大体一致している。これは等価モデルでも実際の運動の近似表現として有効であることを示している。潮汐流の x, y 成分の振幅比を $1/1, 5/1$ に変えた場合についてランプドマス法で送受波

器の運動を計算するとそれぞれ Fig. 9 の a), b) のように変わり、これに対応して Fig. 10 の実線のように円形運動 (a) から 8 字形の運動 (b) に変わってくる。これは (8) 式から直接計算しても得られる。Fig. 10 c) は海流と潮汐流が重畳した場合の送受波器の運動である。水平移動距離の大、小によって非対称な動きになっている。

4. 流速による係留系の運動の推定

トモグラフィ観測では、3個のトランスポンダを係留系の周囲に展開して送受波器の運動を観測している。これは係留作業量を増やす結果になっている。トランスポンダを特に展開しなくとも送受波器の運動が計測できれば非常に便利である。海流流速データがあればランプドマス法を使った計算から必要な測器の運動を求めることができる。しかしながら、現在のところランプドマス法は1日の運動シミュレーションで約1週間の計算時間が必要となる。従って、送受波器の運動の推定方法としては、計算時間がかかり過ぎるので良い方法とは言えない。ここでは、送受波器の近くに流速計と一緒に係留して置き、この流速データから等価モデルを使って送受波器の運動を推定することについて検討する。式(8)において相対速度から得られる水平移動距離 $r = KL V_r^2 / \sqrt{1 + K^2 V_r^2}$ を代入すると送受波器の位置座標 x, y は

等価モデル A:

$$\begin{aligned} x &= \frac{KL V_r}{\sqrt{1 + K^2 V_r^2}} u_r \\ y &= \frac{KL V_r}{\sqrt{1 + K^2 V_r^2}} v_r, V_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2} \end{aligned} \quad (13)$$

のように書き表すことができる。これを等価モデル A とする。海流流速が 0.5 m/s 以下の場合、 $r = K' L V_r^2$ の近似式を使えば、送受波器の位置座標 x, y は

等価モデル B:

$$\begin{aligned} x &= KL V_r u_r \\ y &= KL V_r v_r, V_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2} \end{aligned} \quad (14)$$

のようになる。これを等価モデル B とする。等価モデル A, B の差は海流に対する送受波器のステップ応答に合わせる等価モデルとして採用する式の差による。これはパラメータ K の差になって現れてくる。既に求めたようにランプドマス法で計算した送受波器の海流に対するステップ応答に合わせると等価モデル A の場合は、 $K = 2.13 \text{ s}^2/\text{m}^2$ 、等価モデル B の場合は、 $K' = 1.88 \text{ s}^2/\text{m}^2$ になる。式(13), (14)を比較すると K, K' の関係は

$$K' = \frac{K}{\sqrt{1 + K^2 V_r^2}}, V_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2}$$

のように置くことができ、モデル B は K' を一定値で近似したことになる。係留系が運動する場合、係留した流速計のデータは係留系に対する海流の相対速度を計測していることになる。従って、式(13)または(14)からパラメータ K がわかっているならば送受波器の運動は流速計のデータから推定できる。 K は海流に対する送受波器のステップ応答から求めることが可能である。

Fig. 10 の○と点はランプドマス法で計算した送受波器の運動をそれぞれ等価モデル A, B によって推定した結果を示す。円形運動については両者は同様な傾向の推定結果

を示し、+0.8 m の誤差になっている (Fig. 10 a))。しかし、他の2例については、等価モデル A による推定結果はほとんど一致しているが、水平移動距離が増すと誤差が大きくなる。これに対して等価モデル B による推定の場合は誤差が大きい。等価モデル B による推定では、流速が小さい場合、最大 0.8 m の一誤差で推定されている (Fig. 10 b))。海流に潮流が重畳している場合は誤差がかなり大きくなり、最大 2 m になっている (同図 c))。等価モデル B の場合の適用限界は、当てはめる係留系のステップ応答を求めるときの海流流速に依存する。推定限界は、海流に応答する送受波器の水平移動距離 r が係留線の長さ L に比べて小である条件(a)から決まる。ここでは、Fig. 7 の結果から $r/L = 0.5$ とすると、(14)式から

$$V_r < 0.52 \text{ m/s}$$

が推定限界の目安となる。また、浮力と抗力に関する力学的パラメータを使って計算した結果 $1.87 \text{ s}^2/\text{m}^2$ と K' は良い一致を示すが、これが常に成立するか否かは更に検討することが必要となろう。

等価モデルによる送受波器の水平移動距離の推定誤差は、アンデラ流速計の精度は $\pm 1 \text{ cm/s}$ または実際の測定速度の $\pm 2\%$ ⁹⁾ であるので、次式

$$\text{等価モデル A: } \frac{\Delta r}{L} = \frac{2KV_r^2}{\sqrt{(1+K^2V_r^2)^3}} \frac{\Delta V_r}{V_r} \quad (15)$$

$$\text{等価モデル B: } \frac{\Delta r}{L} = 2KV_r^2 \frac{\Delta V_r}{V_r}$$

を使って評価できる。最大海流流速が 0.5 m/s とすると、等価モデル A で送受波器の運動を推定する場合、推定誤差は係留線の長さの $\pm 1.5\%$ 以下になる。等価モデル B で送受波器の運動を推定する場合の誤差は、係留線の長さの $\pm 1.9\%$ 以下になる。 $L = 100 \text{ m}$ のときの推定誤差は等価モデル A, B に応じてそれぞれ $\pm 1.5 \text{ m}$, $\pm 1.9 \text{ m}$ である。送受波器の運動を推定する場合、Fig. 10 から分かるように運動に応じた推定誤差が重なる。一方、ここでの係留系の場合、 $\pm 1 \text{ cm/s}$ の誤差は $\pm 0.02 \text{ m}$ の誤差となり、微小な運動の推定も可能である。トランスポンダを使う場合、LBL 方式で基線長、音速等を正しくキャリブレーションすれば、 $\pm 0.2\%$ の精度⁹⁾ で位置測定ができる。送受波器の運動を LBL 方式で測定するとすれば、基線長を 100 m に選ぶのが適当である。このときの誤差は $\pm 0.2 \text{ m}$ となる。従って、流速計を使う送受波器の運動の測定は、流速が小さい場合、高精度が期待できる。トランスポンダ方式の場合、キャリブレーションがないと 1~2% の誤差になる。しかし、海流流速から推定した結果は、送受波器の運動特有の誤差もあり、流速が速くなると誤差が大きくなる。トランスポンダ方式の場合は、一定誤差である。従って、流速計を利用した送受波器の運動の推定ではキャリブレーションをしない場合と同程度の精度が確実に期待でき、簡易であることから一つの実用的方法であると言える。

Fig. 11 Comparison between measurement and calculation results of a mooring system motion

Fig. 12 Estimation of a mooring system motion using two models of A and B

Fig. 11 はランプドマス法でアンデラ流速計データから送受波器の運動を計算した結果と音響で実測した結果を比較したものである。計算結果は、音響による実測値より低めの値になっている。しかしながら、音響による距離測定の場合、マルチパスがあることを考えると距離は長めにな

Fig. 13 Comparison between measurement and estimation results of vertical displacement of a mooring system

るので、大体合っていると見ることができよう。Fig. 12 の実線はランプドマス法を使ってアンデラ流速計のデータから送受波器の運動を計算した結果である。○は等価モデル A による送受波器の運動の推定結果である。水平運動の推定結果はほとんど一致しているが、鉛直移動距離の推定には、誤差が現れている。点は等価モデル B を使って送受波器の運動を推定した結果で、大体合っている。等価モデル B による推定より A による推定の方が推定誤差が小さくなっている。

Fig. 13 は、次式

$$Z_d = L \left(1 - \sqrt{1 - (1 + \varepsilon)^2 \left(\frac{r}{L} \right)^2} \right) \quad (16)$$

ここで、

$$\varepsilon = a + b \left(\frac{r}{L} \right)^2, \quad \frac{r}{L} = \frac{KV_r^2}{\sqrt{1 + K^2 V_r^2}} : \text{model A}$$

or

$$= KV_r^2 : \text{model B}$$

を使って音響による実測値と比較した結果である。 ε は係留線が懸垂線になることを考慮したときの補正を表すものである。 a 、 b は補正のパラメータで、ランプドマス法で計算した結果に合わせるように決めることができる。 $\varepsilon=0$ のときは係留線を直線と仮定した場合で、等価モデル A、B のそれぞれについて示してあるが、このときの推定値は r が大きくなるに従って誤差が大きくなり、最大 1.5 m になっている。これは水平運動の推定の場合と同程度の誤差である。等価モデル B の方が誤差が大きいの、係留線が懸垂線になることを考慮した等価モデル B の補正も示し、ここでは、 $a=0.2$ 、 $b=-0.7$ とした。Fig. 12 の推定結果を見ると、この補正は海流流速が速くない限り、必ずしも必要でないと考えられる。以上から、係留系の着目点の運動の簡易な実用的推定法として等価モデルが有効であると言える。

5. おわりに

係留系の海底設置後の潮流などによる運動について実測し、ランブドマス法を使って解析した。着目点への簡単な集中定数等価モデルのパラメータを海流に対する係留系のステップ応答から決めると、その点の運動はランブドマス法で計算した結果の良い近似を与えることが確かめられた。更に、この等価モデルを使うことにより、流速計のデータから係留系の着目点の運動がトランスポンダで直接観測するよりも簡易に推定できることが確認された。この方法は流速に対して十分な浮力を持たせた場合でないと使えないが、海中の位置決定や海洋音響トモグラフィ等の音響応用海洋計測の精度向上のために有効な手段となり得るものである。

謝 辞

海域実験は東京大学海洋研究所の白鳳丸 KH 92-2 次の研究航海で設置、同淡青丸 KT 92-8 次の航海で回収を行ったものである。平朝彦教授、徳山英一助手をはじめ関係各位のご協力に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) B. M. Howe, P. F. Worcester and R. Spindel: Ocean Acoustic Tomography: Mesoscale Velocity, J. Deophys. res., Vol. 92, No. C4 (1987), 3785-3805
- 2) 竹内俱佳, 久保晃, 永井豊, 平啓介, 北川庄司: 平均海流流量の音響応用測定法, 日本音響学会誌, Vol. 49, No. 8 (1993), 543-550
- 3) N. P. Fofonoff: Buoy-systems Motions, In: Handbook of Ocean and Underwater Engineering, J. J. Myers, editor, McGraw-Hill, New York (1969), 9-109-113
- 4) 田才, 光易, 竹松, 高橋, 本地, 高雄, 檜原, 川建, 水野, 大楠, 小寺山, 山形: 総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究, 九大応用力学研究所所報, NO. 52 (1980), 29-98
- 5) 小寺山亘, 水野信二郎, 光易恒: 海洋混合層水温計測用ブイシステムの設計, La Mer (日仏海洋学会) Vol. 24, No. 3 (1986), 139-149
- 6) W. Koterayama, S. Mizuno and M. Ishibashi: Dynamics of Deep Sea Surface Buoy system for Ocean Mixed Layer Experiment, La Mer (La Societe Franco-Japonaise d'oceanographie) Vol. 30, No. 3 (1992), 127-138
- 7) B. M. Howe and W. H. Munk: Deep-sea moorings in a tidal current, Deep-sea Res., Vol. 35, No. 1 (1988), 111-119
- 8) AANDERAA INSTRUMENTS: Operating manual (1993), 1-04
- 9) 海洋調査技術学会編: 海洋調査フロンティア, 海洋調査技術学会 (1993), pp. 10-15