

太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究

(第3報：筏の位置と方向の保持)

山川 賢次*・浜島 金司**
渡辺 健次**・菅 信***

Feasibility Study on a Project for Hydrogen Production by Solar Energy at Sea and Its Transport

(3rd Report : Positioning and Direction Control of the Raft)

By

Kenji YAMAKAWA, kinji HAMAJIMA
Kenji WATANABE, Makoto KAN

Abstract

The feasibility studies of hydrogen production with solar energy on a huge raft floating on the sea and transport of liquefied hydrogen have been carried out. In the first report, a new raft system was proposed, and it was concluded that the raft system was possible. In the second report, optical problems of sun following on the sea was discussed.

In this paper, kinematical possibility of positioning and sun following of the new raft are described. Since positioning and control of such a huge raft have not been experienced, firstly, the equations of motion and mooring systems of the raft were considered in detail and power and energy for steady state were calculated. Secondly, the response and control of the raft in the external forces of current and wind were investigated. Furthermore, the numerical simulations of the sun following of the raft for still water and fluctuating wind conditions were carried out.

目 次

- | | |
|---------------|-------------------|
| 1. はじめに | 2.3 係留方式の検討 |
| 2. 筏の位置保持の検討 | 3. 筏におよぼす変動外力の影響 |
| 2.1 筏の運動方程式 | 3.1 並進運動への影響 |
| 2.1.1 並進運動 | 3.2 回転運動への影響 |
| 2.1.2 回転運動 | 3.3 定常流によって生じる偏移 |
| 2.2 パワーとエネルギー | 4. 太陽追尾シミュレーション |
| | 4.1 静水中における太陽追尾 |
| | 4.2 変動外力を考慮した太陽追尾 |
| | 5. むすび |

* 海洋開発工学部

** 共通工学部

*** 運動性能部

原稿受付：昭和58年1月11日

主な記号表

A	: 筏の方位角
A_{\odot}	: 太陽の方位角
ΔA	: 太陽と筏の方位角の差
C_M	: 風力のモーメント係数
C_W	: 脚の抗力係数
D	: 海水の抗力
F	: 海流力
g	: 重力の加速度
I	: 付加質量分を含むZ軸周りの筏の慣性モーメント
K	: 回転運動における海水の抗力係数
L	: 筏の辺長 (=1000m)
M	: 回転運動の推進カトルク
M_W	: 風力によるトルク
m	: 付加質量を含む筏の質量
O	: 波漂流力
\ddot{i}	: 筏の加速度
T	: 推進力
U	: 風速
V_F	: 海流の速度
W	: 風力
W	: 筏の重量
x, y	: 東西および南北方向の座標
ρ_w, ρ_a	: 海水および空気密度
τ	: 推進力の時定数
ω	: 偏差角

1. はじめに

太陽エネルギー利用計画の1つである、洋上の太陽熱プラントによる水素製造・輸送計画の可能性について検討した。この計画は、日射量が多く、晴天率の高い南緯8°西経138°付近の洋上に1km四方の筏を浮かべ、太陽を追尾回転しながら集熱し、この熱で蒸気タービン発電して海水を電気分解し、水素を採り出し、液化して消費地に輸送するというものである。

第1報では、筏および集光構造の一案を提示し、それに働く諸外力を考慮して試設計した結果、海洋構造物として実現可能であるという結論を出した。この案では、太陽光を集める鏡は筏に固定され、筏自体が回転して太陽を追尾するところに特徴がある。第2報では、この追尾上の問題点を考察し、ある程度の誤差を許容すると共にエネルギー収支バランスを維持するという条件を満足する追尾方法を見いだすことができ

た。このような巨大な海洋構造物の運動はこれまで経験されていない。したがって、第3報では筏が太陽を追尾回転することが運動力学的に可能であるかどうかを詳細に検討した。また、海流や風に抗して推進器で筏の位置を保持するに必要なエネルギーおよび係留方式による位置保持について検討した。第4報では、海塩による反射鏡面の汚染とそれともなう効率低下、筏の存在が海洋環境にあたる影響、さらに生産された液体水素をタンカーによって輸送することの可能性などの検討に加えて、第1報から第3報までの結果をふまえた、計画の技術的可能性を考察する。

本報は第2報の結果とのかかわりが大きいので、その概要をやや詳しく述べる。まず、太陽熱集光鏡として放物柱面鏡を用いたが、光学的解析の結果、放物柱面の光軸に対して入射光線が0.005 radian以上傾かなければ、ほとんど集光ロスが生じないという結果が得られた。さらに加えて、この値を許容誤差の目安として筏の定位置からのずれ、水平面からの傾き、太陽方位からのずれ等に対しても許容誤差が得られた。次に、太陽赤緯が筏の緯度とほぼ等しくなる日の正午において、過大な回転角速度が筏に要求されることになるという問題があった。これには、正確な追尾をするための必要エネルギーよりも、追尾精度を犠牲にしてそのために生じる集光ロスの方が小さければよいという考えのもとに、筏は最大0.0014 rad/secの回転能力を持つことで十分であるという結論が得られた。さらに、海流中における筏の回転に対して生じる合成抗力を考察した。

以上の結果をうけて、本報では第2章において運動方程式の検討、運動の定常状態において必要なパワーとエネルギーの計算および係留方式の検討を行った。第3章においては、変動外力に対して筏がどのように応答し、大きく乱されることのないように回転運動を制御できるかどうかについて、また定常流によって生じる筏の偏移について検討した。第4章においては、静水中および変動外力を考慮した場合の太陽追尾シミュレーションを行い、十分な精度で太陽を追尾できるかを検討した。

以上の考察から、ほぼ満足すべき結果が得られた。

2. 筏の位置保持の検討

2.1 筏の運動方程式

集光筏は波、風、海流による諸外力の影響をうけつつ位置保持し、かつ、太陽を追尾する回転運動をし

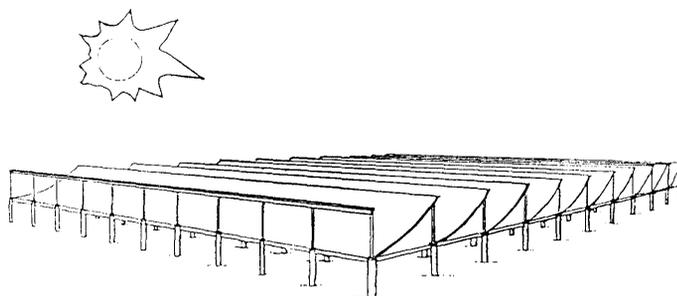


図-1 船研式集光筏（121本脚）の概念図

表-1 筏の主要目

長さ×幅	$L \times B = 1000 \times 1000 \text{m}$
水面上の高さ	$H = 106 \text{m}$
排水重量	$W = 6.99 \times 10^8 \text{ ton}$
慣性モーメント(Z軸)	$I = 1.24 \times 10^{11} \text{ ton} \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2$
付加質量係数は1.0とする。	

なければならない。こういった目的にかなう運動が可能であるかどうかがこの報告の主題であり、そのためにもまず運動方程式を導くことが必要である。以下、簡単のため波、風、海流とそれらの変動は、筏が存在する空間にわたって一様なものとする。図-1に筏の外観を、表-1に筏の主要目を示す。

一般に筏の運動は、三つの座標軸方向の並進運動と各軸周りの回転運動で表わされるが、次の考察から解析の対象とする運動の自由度を限定することができる。まず、筏の中心を通り一辺に平行な水平軸周りの回転運動は、第1報にあるように筏が大きいメタセンタ高さ \overline{GM} を持っており復原力が大きいので除外してよい。例えば角度 θ radian だけ傾いたとき、復原力のモーメントは、

$$M_R \doteq W \cdot \overline{GM} \cdot \theta = 3 \times 10^8 \theta \quad (\text{ton} \cdot \text{m}) \quad \dots(1)$$

になる。これに対し、最も影響の大きいと思われる風力によるモーメントを考え

$$M_W = C'_M \cdot \frac{L}{2} \cdot S' \cdot \Delta h \quad \dots(2)$$

とあらわす。ここで、 $L=1000\text{m}$ 、 $\Delta h = \frac{1}{2} \rho_a U^2$ 、 S' は代表面積、 C'_M は水平軸周りの風力のモーメント係数である。第1報で報告した風の影響の風洞実験で

は、水平軸周りのモーメントは計測しなかったが、 $C'_M=1.0$ 、 $S'=L^2$ 、 $U=10\text{m/sec}$ という極端な値をとって、(1)、(2)式を等値すると $\theta=0.0025$ radian となる。この値は、第2報で求めた集光ロスがほとんどゼロの偏差角 $\omega=0.005$ radian 以下となる。筏がこのような傾きを生じるような外力は他に考えられない（例えば、波長2km、波高5mの波、10/secにおよぶ海流変動や渦）。次に、全体としての上下揺れも太陽光の入射角をほとんど変えないから集光効率に影響しない。したがって、筏は水平面内で運動するものとして、運動方程式が記述できる。

さらに、筏の形状が点対称に近く、外力は空間的に一様と考えているから、筏の回転中心はつねに重心と一致してするものとして、運動方程式をx軸、y軸方向の並進運動とz軸周りの回転運動に分けることができる。

2.1.1 並進運動

筏の並進運動にかかわる力としては、外部からは風力 \mathbf{W} 、海流力 \mathbf{F} 、波漂流力 \mathbf{O} があり、それに筏に備えている推進力 \mathbf{T} と筏の運動にともなう慣性力および海水の抗力 \mathbf{D} とがある。したがって、並進運動の方程式はベクトルで表わせば(3)式ようになる。

$$m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{T} + \mathbf{F} + \mathbf{W} + \mathbf{D} + \mathbf{O} \quad \dots(3)$$

m は付加質量を含む筏の質量、 $\ddot{\mathbf{r}}$ は筏の加速度である。

風・海流・波は想定海域では一方向に卓越し、かなり安定しているので、大きさと方向が一定な定常分と変動分に分ける。そこで、これらの外力に対して位置保持の推力も、あらかじめ設定しておく一定分と外力の変動分に対応する制御分に分けることにする。

ところで外力の変動分は、風や海流の大きさ・方向

の変化に対応するものだけでなく、風力については第1報で示したように風速が一定でも筏の向きによって抗力係数が変わり、風向に直交な横力が生じてくる。同様のことは海流の場合にも筏の回転運動との合成の結果生じる。第2報の方法で海流と回転運動を合成すると、海流の方向およびそれと直角方向について、

$$F_x = -\frac{1}{2} \rho_w S C_w \sum_{ij} \left(V_F - l_{ij} \cos A_{ij} \frac{dA}{dt} \right) \cdot \sqrt{V_F^2 + l_{ij}^2 \left(\frac{dA}{dt} \right)^2} - 2 V_F l_{ij} \cos A_{ij} \frac{dA}{dt} \quad \dots(4)$$

$$F_y = -\frac{1}{2} \rho_w S C_w \sum_{ij} l_{ij} \sin A_{ij} \frac{dA}{dt} \cdot \sqrt{V_F^2 + l_{ij}^2 \left(\frac{dA}{dt} \right)^2} - 2 V_F l_{ij} \cos A_{ij} \frac{dA}{dt} \quad \dots(5)$$

なる合成力が得られる。ここに、 ρ_w は海水の密度、 S は脚の没水部の投影面積、 C_w は抗力係数、 V_F は海流の速度、 l_{ij} は原点（筏の中心）から脚 ij までの距離、 A_{ij} は原点から測った脚 ij の方位角、 dA/dt は筏の角速度である。このような合成が意味をもつのは、海流の速度と筏の回転運動が同じ程度になるときである。図-2 に合成力の東西方向成分を $|F_x|/121 \cdot \frac{1}{2} \rho_w S C_w V_F^2$ を縦軸に、 $L \left| \frac{dA}{dt} \right| / V_F$ を横軸にとり示す。これには、方位角 A の変化にともなう変動分が重なるが、 10^{-3} のオーダーであるから無視できる。

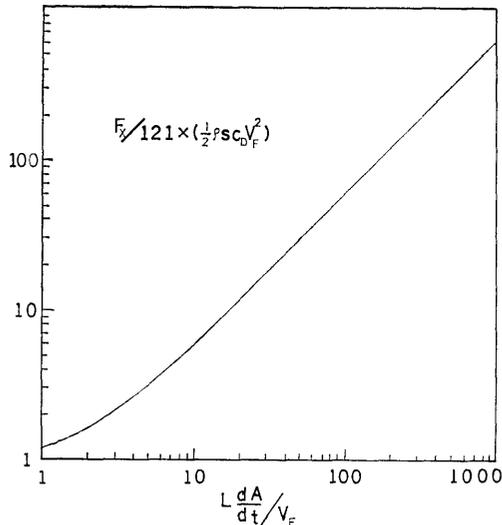


図-2 回転速度・海流速比と抗力の関係 (L = 1000m)

図-2から回転速度が大きいとき、海水の抗力は dA/dt に比例することがわかる。図-3と図-4に横力の絶対値 $|F_y|$ とその方位角依存性を示す。海流方向の抗力 F_x に比べて横力 F_y は 10^{-2} 以下と小さい。定常流と回転運動との合成は風力についても考えられるが、風速が回転速度に比べて大きいので合成効果は無視できる。また、筏の方位角によって海流力が異なることも考えられるが、第1報で121本の円柱浮体の彫りの干渉効果は無視できるとされているから、この変動はないものとする。

次に、波漂流力について考察する。当該海域の波の推定値として平均波高 $H_V = 1.7m$ 、平均波周期 $T_V = 6.0 \text{ sec}$ が与えられている。目視観測データであるの

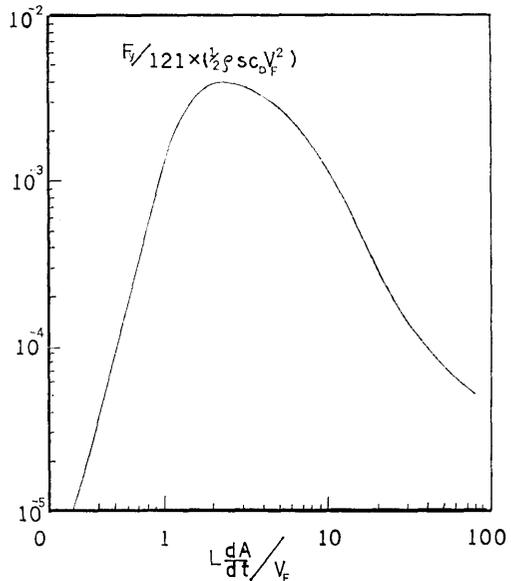


図-3 回転速度・海流速比と横力の関係 (L = 1000m)

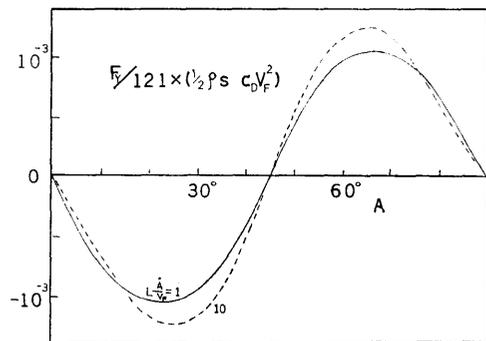


図-4 方位角と横力の関係

で、この H_V は有義波高 $H_{1/3}$ に等しいと仮定し、また T_V はスペクトルの 0 次と 1 次のモーメントからの求まる平均周期 T_{01} に等しいと仮定する。

$H_{1/3}$ と T_{01} が与えられたときの modified Pierson-Moskowitz 型のスペクトルは、周波数 f (Hz) として

$$\left. \begin{aligned} S(f) &= A f^{-5} \exp[-B f^{-4}] && (\text{m}^2 \cdot \text{sec}) \\ A &= 0.11 H_{1/3}^2 T_{01}^{-4} && (\text{m}^2 / \text{sec}^4) \\ B &= 0.44 T_{01}^{-4} && (1 / \text{sec}^4) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

が ITTC(1978) で勧告されている。

一方、鉛直円柱の漂流力は Havelock による無限吃水の値を用い

$$R = \frac{2}{3} \rho g \zeta^2 a C_R \quad \dots(7)$$

とする。 ζ は波高、 a は円柱の半径、 C_R は漂流力係数で a と波長入の関数である。

不規則波中の漂流力の平均値は

$$\bar{R} = 2 \int_0^{\infty} \frac{R}{\zeta^2} \cdot S(f) df = \frac{3}{4} \rho g a \int_0^{\infty} C_R S(f) df \quad \dots(8)$$

$a=9.55\text{m}$ として数値積分をおこなうと $\bar{R} \approx 1.8\text{ton}$ (1 本あたり) になる。これは定常分と考えられ、さらに変動分が重なるものとしなければならないが、波漂流力の場合それがどのようなものか推定することは、さらに困難となる。

ところで変動外力には、その効果が時間と共に逆にはたらいで打ち消し合い、一定時間後には筏の位置が変わらないようになるものと、そうでないものがある。前者の場合、筏の位置偏移が最大のときでも集光に影響がないならば、制御推進力を働かせる必要はなく、元の位置にもどるのを待つだけでよい。どのような場合、制御推進力をはたらかす必要があるかは第 3 章で検討するが、上記波漂流力の変動については、特に制御をかける必要のないものと考えられる。また、つねに一方にはたらき、その効果が残る変動外力に対しても、もしその大きさの予想がつくものであるなら、設定推進力にくりいれてもよいと思われる。そのようなものとして、上記の海流と回転運動の合成による抗力変動や、風の抗力の筏の方向にともなう変動がある。

想定海域では、風・海流・波ともに東から西へ向うものが卓越しているため、東を x 軸の正の方向とし、

定常および設定分と変動および制御分に分けて並進運動の方程式を表わす。

定常および設定分としては(3)式から

$$\left. \begin{aligned} T_{x0} + F_x + W_x + O_x &= 0 \\ T_{y0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots(9)$$

とする。 $W_x = -\frac{1}{2} C_D S \rho_a U^2$ である。平均して筏は静止しているため、運動にともなう慣性力と海水の抗力の項は消える。横方向の外力はすべて変動分にくりいれる。

変動分の x 方向成分は、一次の微量のみを考えると、

$$m \ddot{x} = \Delta T_x + \frac{\partial F_x}{\partial V_F} (\Delta V_F + \dot{x}) + \frac{\partial W_x}{\partial U} (\Delta U + \dot{x}) \quad \dots(10)$$

とする。 ΔV_F 、 ΔU は海流速と風速の変動であり、方向変動によるものは 2 次の微量となるので無視する。筏の x 方向への運動は流速変動と等価なので右辺の形で、運動にともなう抗力がくりいられる。波漂流力の変動は前述のように推定が困難なので除いておく。 y 方向成分は同様に

$$m \ddot{y} = \Delta T_y + F_y + W_y + \frac{\partial W_y}{\partial U} \Delta U + D_y \quad \dots(11)$$

とする。2 次の微量と思われる項も残しておいた。 D_y は y 方向への運動に対する抗力で、海水の抗力のみを考えると

$$D_y = -121 \times \frac{1}{2} \rho_{ws} C_w \dot{y} |\dot{y}| \quad \dots(12)$$

とおくことができる。

筏の位置偏移はかなりの大きさ (30km ぐらい) まで許容されるから、並進運動については、かなり粗い近似をおこなえる。

2.1.2 回転運動

筏の回転運動は太陽を追尾するためのものであるから、並進運動にくらべ相当注意深くとりあつかう必要がある。回転運動の方程式を

$$I \frac{d^2 A}{dt^2} = M_T + M_{FD} + M_W \quad \dots(13)$$

とする。 I は付加慣性モーメントを含む筏の慣性モーメント、 M_T は筏の回転に必要なトルクである。 M_{FD} は海流と回転運動を合成した抗力モーメントで、 M_W は風力のモーメントである。波は一様としたので、回転運動に影響をおよぼさないものとする。

定常ないし設定分として

$$I \left(\frac{d^2 A}{dt^2} \right)_0 = M_{T0} + M_{FD0} + M_{W0} \quad \dots(14)$$

とする。 $\left(\frac{d^2 A}{dt^2} \right)_0$ は太陽運行の方位角加速度で、 M_{FD0} と M_{W0} は一樣かつ定常な海流および風の中で正確に太陽を追尾するときのモーメントで

$$M_{FD0} = \frac{1}{2} \rho_w s C_w \sum_{ij} l_{ij} \left(V_F \cos A_{ij} - l_{ij} \frac{dA}{dt} \right) \cdot \sqrt{V_F^2 + l_{ij}^2 \left(\frac{dA}{dt} \right)^2 - 2 l_{ij} V_F \cos A_{ij} \frac{dA}{dt}} \quad \dots(15)$$

$$M_{W0} = C_M \frac{L}{2} S \cdot \frac{1}{2} \rho_a U^2$$

である。並進運動の場合と同じように、海流による円柱浮体間の干渉の結果生じるモーメントの方向性、風力と回転の合成効果は無視する。

M_{T0} はこれら外力のモーメントを考慮して正確に太陽を追尾させるために必要な、筏の持つべきトルクである。

変動ないし制御分は

$$I \Delta \left(\frac{d^2 A}{dt^2} \right) = \Delta M_T + \Delta M_{FD} + \Delta M_W \quad \dots(16)$$

とする。風力モーメントの変動 ΔM_W には風速変動と風向変動に対応するもの以外に、方位角変動に対応するものが考えられるがこれは風向変動と逆の効果をもたらす。したがって

$$\Delta M_W = \frac{\partial M_W}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial M_W}{\partial A} \Delta A + \frac{\partial M_W}{\partial \varepsilon} \varepsilon \quad \dots(17)$$

となる。 ε は風向変動で方位角と逆向きにはかる。風力のモーメント係数は $C_M \doteq -0.4 \sin 2A$ で方位角 A の関数となるので

$$\Delta M_W = \frac{\rho_a L S}{4} \left[2 C_M U \Delta U + U^2 (\Delta A + \varepsilon) \frac{d C_M}{d A} \right] \quad \dots(18)$$

となる。 ΔM_{FD} について、さらに角速度変動に対応するものも考え

$$\Delta M_{FD} = \frac{\partial M_{FD}}{\partial V_F} \Delta V_F + \frac{\partial M_{FD}}{\partial \varepsilon} \varepsilon + \frac{\partial M_{FD}}{\partial (dA/dt)} \Delta \left(\frac{dA}{dt} \right) + \frac{\partial M_{FD}}{\partial A} \Delta A \quad \dots(19)$$

とする。

(78)

$$\Delta M_{FD} \doteq C_V \frac{\Delta V_F}{V_F} + C_\varepsilon \varepsilon + C_w \frac{L}{V_F} \Delta \left(\frac{dA}{dt} \right) + C_A \Delta A \quad \dots(20)$$

とおき、 $C_V / 121 \cdot \frac{1}{2} \rho_w s C_w V_F^2 L$ 等を図-5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 に示す。 C_V , C_w は図-5, 8 に $L \frac{dA}{dt} / V_F$ を横軸にとってあらわされ、方位角依存性は無視できる。 C_ε は $C_{\varepsilon m} \sin 4A$ と近似でき、図-6 は $C_{\varepsilon m}$ の $L \frac{dA}{dt} / V_F$ に対する関係、図-7 は C_ε の方位角依存性を示す。 C_V , C_w , C_ε は dA/dt の正負によって符号が変わる。図-8, 9, 10 は C_A の値を示すが、 $C_A = C_{Am} f(A)$ の形となり、 $L \frac{dA}{dt} / V_F$ が小のとき $C_A = C_{Am} \sin 4A$ (ただし、 $C_{Am} < 0$) 大のとき同じく $C_A = C_{Am} \sin 4A$ (ただし、 $C_{Am} > 0$) で

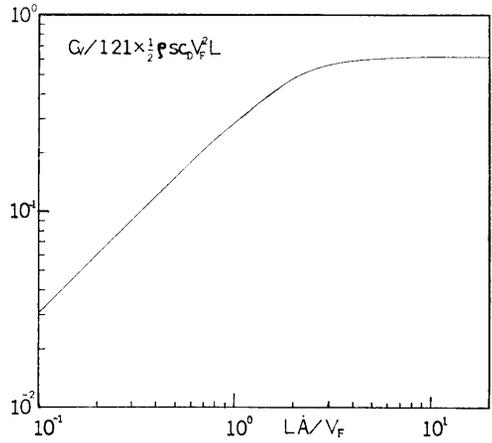


図-5 $L \dot{A} / V_F$ と $V_F \frac{\partial M_{FD}}{\partial V_F}$ の関係

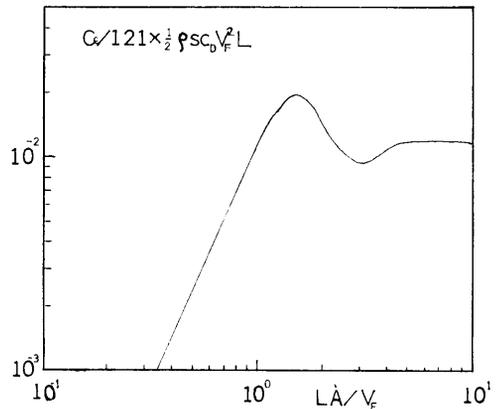


図-6 $L \dot{A} / V_F$ と $\frac{\partial M_{FD}}{\partial \varepsilon}$ の関係

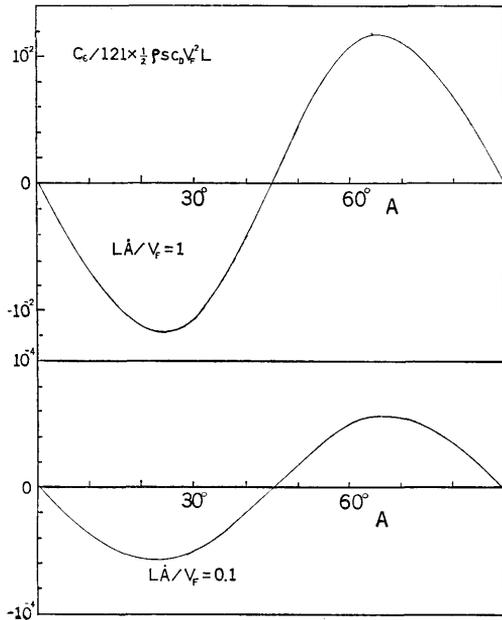


図-7 $\frac{\partial M_{FD}}{\partial \varepsilon}$ の方位角依存性

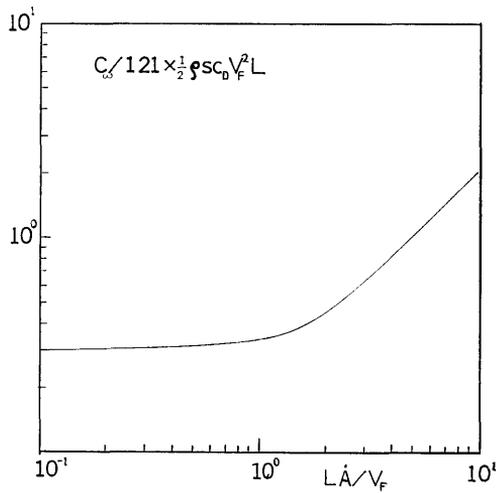


図-8 LA/V_F と $\frac{V_F}{L} \cdot \frac{\partial M_{FD}}{\partial A}$ の関係

あって、中間に方位角依存性に高調波があらわれるところがある。

2.2 パワーとエネルギー

つぎに、筏の位置保持と太陽追尾に必要なパワーとエネルギーを考察する。2.1では、運動方程式を定常分ないし設定分と変動分ないし制御分に分けた。実

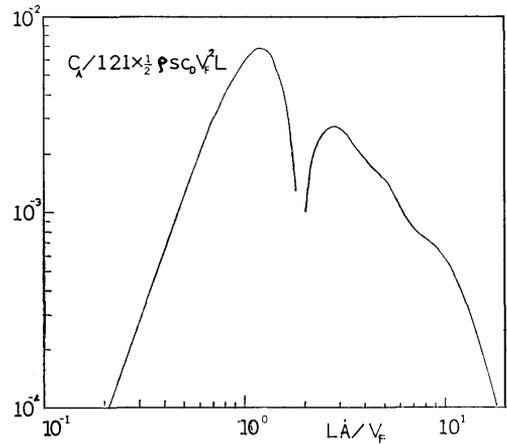


図-9 LA/V_F と $\frac{\partial M_{FD}}{\partial A}$ の関係

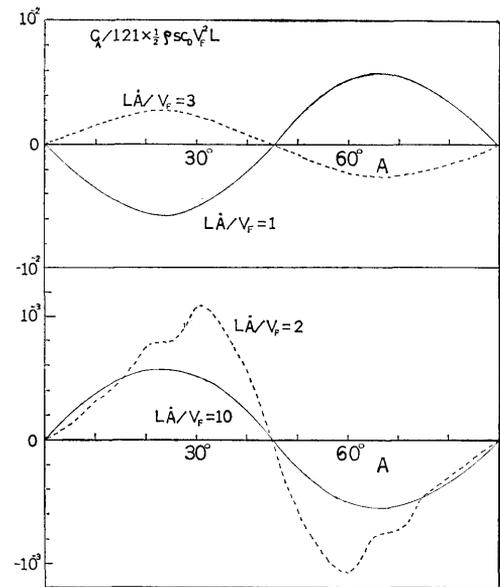


図-10 $\frac{\partial M_{FD}}{\partial A}$ の方位角依存性(I)

際の場合、このように機械的に分けられるものでなく、常に位置ないし方向を検出して変更を重ねてゆくやり方となるであろう。しかし、エネルギー収支がどうかを見積るためには、定常ないし設定分を用いる方が適当であるし、太陽追尾の運動が可能であるかどうかは、変動分を主に考察する方がよい。この分け方はかなり便宜的なものである。

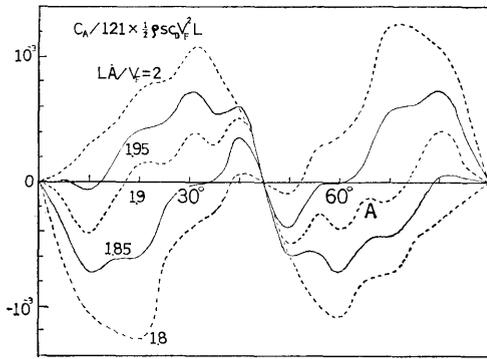


図-11 $\frac{\partial M_{FD}}{\partial A}$ の方位角依存性(II)

変動ないし制御分に対応する必要なパワー・エネルギーが無視できるかどうかは、第3章の解析結果をまつことにして、設定分から計算する。

並進運動に対応して、位置保持のためのパワーは

$$T_{x0} V_F = (-F_x - W_x - O_x) V_F \quad \dots(21)$$

とする。回転運動に対応して、追尾に必要なパワーは

$$M_{T0} \frac{dA}{dt} = I \frac{d^2A}{dt^2} \frac{dA}{dt} - (M_{FD0} + M_{m0}) \frac{dA}{dt} \quad \dots(22)$$

とする。エネルギーは

$$E = \int (T_{x0} V_F + M_{T0} \frac{dA}{dt}) dt \quad \dots(23)$$

となる。夜間は回転せず、太陽高度が10°以上のときのみ追尾回転するものとして、1日当り必要なエネルギーを海流・風・回転に対応するものに分け、さらに日最高パワーとあわせて示したのが図-12である。第2報において、太陽赤緯と筏の緯度がほぼひとしくなるときは、鏡を東西に向けて固定するかある角速度以下で回転すればよいという結果が得られているので、ここでは筏の角速度が $700 \times (dA/dt) > 2.0 \text{ m/sec}$ のときの回転エネルギーは計算に入れていない。この日数は年間で9日間である。図-13に太陽の赤緯と日数の関係を示す。海流速、風速をそれぞれ 0.6 m/sec, 7.2 m/sec および 0.4 m/sec, 5.0 m/sec について計算結果を実線と破線で示した。海流速・風速が大きくなると共に、パワーおよびエネルギーは増大する。また、海流力に対する位置保持エネルギーが最も大きい。海流速が過大であれば集めた太陽エネルギーをす

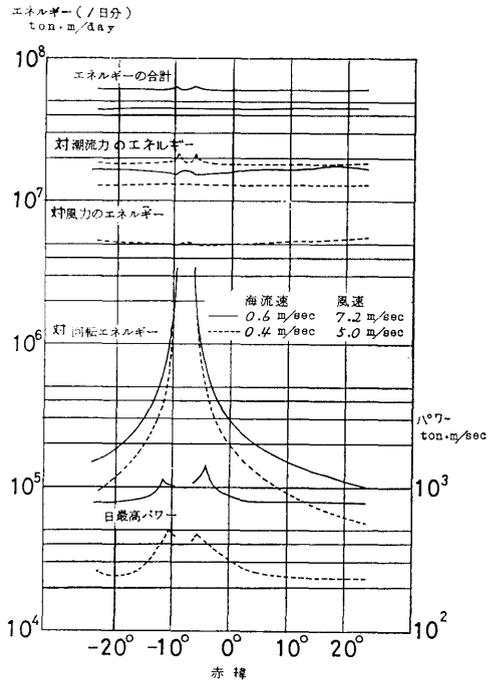


図-12 パワーとエネルギー

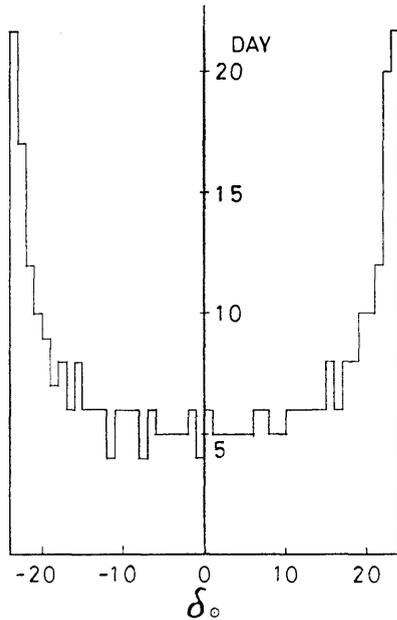


図-13 太陽赤緯の年間日数

べて位置保持のために費やしてしまうこともあり得る。

2.3 係留方式

一般的には、浮遊式海洋構造物の位置保持は、係留方式が最も信頼性が高いとされている。しかし、係留による位置保持の実績は、石油掘削リグに最も多いものの、排水重量で2万トン、水深で1,000m程度で、本報で取り扱うような排水重量で約70万トン、水深4,200mの係留実績はない。係留システムは、主として係留ラインとアンカーから構成され、弛緩係留の係留特性は次のようにまとめることができる。

- 1) 係留力に相当する係留ラインの水平張力は水深の増加とともに減少し、係留ラインの傾きはその水中重量に比例する。
- 2) 最大張力発生時に海底に這った係留ラインの持ち上る長さおよび水平距離と水深の比は、水深が大きくなるとともに減少する。
- 3) 係留ラインの張力の鉛直成分は、水深の増加とともに増大する。
- 4) 係留限界水深を増加するには、係留ラインの破断強度を大きくし、水中重量を小さくすればよい。
- 5) 係留力を増加させるには、係留ラインの破断強度を大きくすればよい。

したがって、当該海域（水深4,200m）において巨大な構造物を係留方式で位置保持するには、水中重量が小さく、破断強度の大きな係留ラインが必要となる。海洋温度差発電（OTEC）プラントの大水深係留システムの設計例では、係留ラインの水中重量を小さくするため、浮力をもたせた中空円筒リンクが考案されている。しかし、OTECプラントも石油掘削リグと同程度の海洋構造物であり、また中空円筒リンクそのもの実績もない。

筏に働く水平力は、海流速1m/sec、風速10m/secとして約4,000トンと概算される。筏の規模からみて多条係留の方が実際的にはあるが、ここでは簡単のため一点係留した場合の係留ラインの長さおよび張力の関係を略算した。その結果を図-14に示す。係留ラインは比重の小さい合成繊維ロープで十分強度をもつものと仮定した。係留ラインの形状はカテーナリー曲線を描くものとして計算した。係留ラインの張力 T_M の水平成分 T_H で筏の位置が保持されることになるので、アンカー付近で接線を描くように係留ラインの長さ S を選ぶのが有利であろう。 $T_H \doteq T_M$ にしようすると $S=25\text{km}$ もの係留ラインが必要となる。また、係留ラインの単位長さ当りの水中重量 w と張力

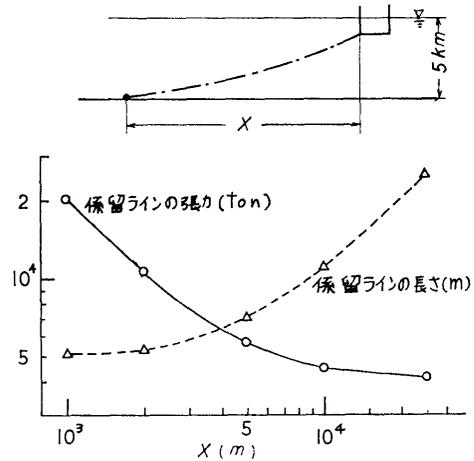


図-14 係留ラインの長さおよび張力の関係

T_M は $T_M = T_H \cosh(wx/T_H)$ の関係になる。したがって、係留ラインの自重による係留力のロスを小さくするため、水中重量を小さくすることは必須の条件である。

以上に係留方式による位置保持を検討したが、筏が巨大であること、大水深であること、また太陽追尾運動にさいし、係留ラインを付けたまま回転しなければならず、筏と索のリンク構造の問題、また制御上の問題も関連するので、既存の係留技術の規模の拡大だけでは実現困難であろう。

3. 筏におよぼす変動外力の影響

3.1 並進運動への影響

筏の位置保持は、定常な風・海流・波による外力に対しては、推力を働かせることによって行うこととし、それに必要なパワーとエネルギーを2.2で計算した。後は、外力の変動に対してどのようにするか、それが無視できるか否かの問題である。

まず x 成分、すなわち東西方向について考える。

2.1.1では、海流と風の変動による位置偏移の方程式を立てた。いまそれぞれの寄与を評価すると

$$\text{海流変動} \quad \left| \frac{\partial F_x}{\partial V_F} \Delta V_F \right| < 7.5 \text{ ton}$$

$$\text{風速変動} \quad 16 < \left| \frac{\partial W_x}{\partial U} \Delta U \right| < 50 \text{ ton}$$

となる。ただし、 $V_F=0.4\text{m/sec}$ 、 $U=5\text{m/sec}$ で変動は短周期変動 $\Delta V_F/V_F \doteq 0.01$ 、 $\Delta U/U \doteq 0.1$ をと

った。オーダーは同じであるが、風速変動の寄与の方が大きいのでこれについて検討する。

変動外力の形としては、時刻 t_0 にステップ入力 ΔU がある場合をとり、方程式は(10)式から(24)式を得る。

$$m\ddot{x} - \frac{\partial W_x}{\partial U} \dot{x} = \frac{\partial W_x}{\partial U} \Delta U \quad \dots(24)$$

ここに、 $W_x = -\frac{1}{2} \rho_a S C_D U^2$ で $C_D = 1 + \frac{1}{2} \cos 2A$, $A = \tan^{-1} \alpha t$ と近似し、 $\rho_a S U / 2m \equiv \beta$ とおくと、初期条件を $t = t_0$ で $x = 0$, $\dot{x} = 0$ としたときの解は

$$x = -\Delta U(t - t_0) + \Delta U \int_{t_0}^t \exp\{-\beta(t - t_0)\} dt - \frac{2\beta}{\alpha} (\tan^{-1} \alpha t - \tan^{-1} \alpha t_0) \quad \dots(25)$$

となる。第二項の積分式を I_I とおき $t \rightarrow \infty$ では(26)式のようになる。

$$x = -\Delta U(t - t_0) + I_I, \quad 0 < I_I < \frac{\Delta U}{\beta} \quad \dots(26)$$

第2項は有限で第1項を打消す効果を持っているから、風力の変動に対する東西方向の偏移は $-\Delta U(t - t_0)$ 以下と見積ることができる。風の場合、 $\Delta u = 1 \text{ m/sec}$ としても、1時間当り3.6kmの偏移をひきおこす程度であり、実際には ΔU の方向が変化してこの偏移を打ち消すから、1日以内での風向変動は無視しても集光効率にまったく影響しないと結論できる。海流変動は風速変動より小さいから当然無視できる。したがって、(10)式で $\Delta T_x = 0$ としてよい。

次に y 成分、すなわち南北方向の変動外力による偏移について考察する。海流による横力は小さいので、小さい海流変動の効果はさらに小さく無視できる。さて、変動分の方程式(11)式には、風による横力 W_y と風の変動による横力 $\frac{\partial W_y}{\partial U} \Delta U$ が並列に入っている。いま、 x 成分の場合と同様に ΔU も $t = t_0$ におけるステップ入力と考えれば、この二項の形は同じになり

$$\frac{\partial W_y}{\partial U} \Delta U / W_y = 2\Delta U / U < 1$$

であり、風による横力そのものの効果の検討結果がそのまま使える。もし、 W_y のひきおこす偏移が無視できるなら、当然 $\frac{\partial W_y}{\partial U} \Delta U$ による変動も無視できるので、3.3の定常流によって生じる偏移の解析結果をまつことにする。

3.2 回転運動への影響

太陽を追尾する筏の回転運動のプログラムは、まず

(82)

太陽の運行・風や海流の定常分による回転モーメント、回転運動にともなう抗力・慣性力などをすべて考慮して、回転動力とその時間変動を設定しておく。そして、ランダムに生じる変動外力による筏の方位の乱れに対しては、制御動力を働かせて修正するという形になる。こうした取扱いをするために、運動方程式を定常ないし設定式(14)と変動ないし制御分(16)に分けたのである。そして、さらに変動は小とみなしたから回転運動の方程式(16)は線形となり、取扱い易くなった。回転運動の変動分の方程式は、(16)式に(17), (20)式を代入して、(27)式のようになる。

$$I \frac{d^2}{dt^2} (\Delta A) - C_\omega \frac{L}{V_F} \cdot \frac{d}{dt} (\Delta A) - (C_A + D_A) \Delta A = \Delta M_T + C_V \frac{\Delta V_F}{V_F} + C_\varepsilon \varepsilon_F + D_V \frac{\Delta U}{U} + D_\varepsilon \varepsilon_w \quad \dots(27)$$

ここに、 C_A , C_V , C_ε , D_A , D_V , D_ε は、それぞれ方位角変動、流速変動、流向変動に対応して、海流と風がおよぼす変動の係数、 C_ω は角速度の変動に対応する抗力変動の係数で、第2章で説明した。

ΔM_T は制御トルクである。(27)式は方位角変動に対する二階線形微分方程式になっているが、変動外力の影響を簡単に調べるために、以下のような仮定を設けた。

- (1) 変動は海流速・風速・風向の三つを選び、それぞれの変動を別個に、また合成してステップ関数の形で入力する。
- (2) 制御トルクは、入力後一定時間が経ってからステップ関数の形で働かせる。
- (3) 変動外力が制御トルクによって打ち消されるまで、すなわち、方位角変動が逆転するまで追跡する。
- (4) 以上の間、諸係数は一定のままとする。

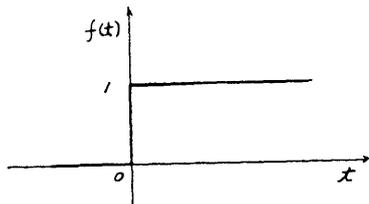
この仮定によって(27)式は

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + cy = E(t) \quad \dots(28)$$

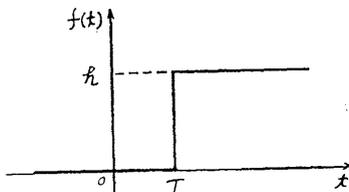
の形となり、解析的に解くことができる。 $E(t)$ は Heaviside の単位関数で図-12(a)の形である。図-12(b)の任意のステップ関数に対する応答も

$$A(t) = \begin{cases} 0 & t \leq T \\ = h \cdot y(t - T) & t > T \end{cases} \quad \dots(29)$$

となることが証明されるので、それぞれの変動外力および、制御トルクに対する解を重ね合わせることで



(a) Heavisideの単位関数 $E(t)$



(b) 任意のステップ関数 $f(t)$

図-15 ステップ関数

きる。ただし、制御トルクは一定で、ほぼ筏の持ち得る最大トルクとする。変動外力の生じた時刻を横軸に、最大方位角変動を縦軸にとり、制御トルクを働かせるまでの時間を変えて図-16に示す。与えた数値は、想定海域の気象・海象条件を考慮して次のようにした。

風速 $U = 7.82 \text{ m/sec}$,

風速変動 $\Delta U = 0.63 \text{ m/sec}$

風向変動 0.08 rad

海流速 $V_F = 0.6 \text{ m/sec}$,

海流速変動 0.01 m/sec

許容方位角誤差は、第2報にあるように日時によって異なるが、図-17のように年間を通じて変化する太陽の赤緯をパラメータとして時刻を横軸にとって表わすことができる。図-16、図-17の比較から、許容方位角誤差以内で制御し得ることがわかる。また、風速変動が最も大きい方位角変動を生ずることがわかる。

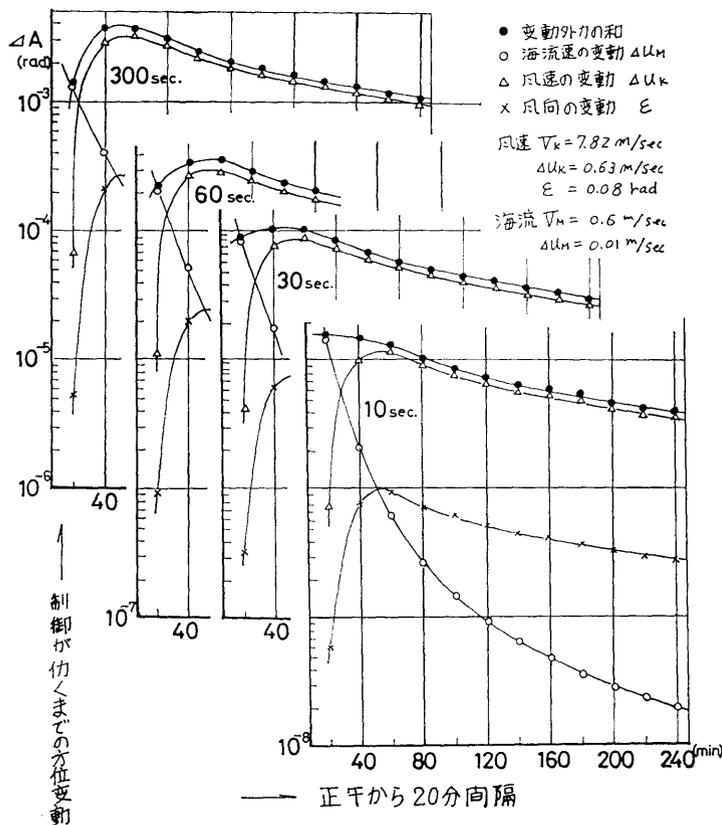


図-16 変動外力による方位角変動の修正

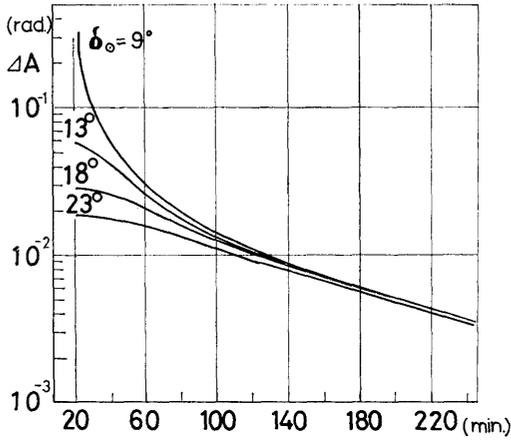


図-17 方位角変動の許容誤差

3.3 定常流によって生ずる偏移

2.1.1で変動外力の中でその効果がある時間後に打ち消されるようなものに対しては、制御する必要がないことを述べたが、打ち消されるまでの間に到達する最大変動がどの程度かを見積っておく必要がある。その一つとして、定常流中で筏が回転するために生じる変動外力について検討する。海流および風方向、すなわち、ここではx軸方向の成分については、全て位置保持動力を働かせることによって解消し、必要なパワーおよびエネルギーの中に繰り入れてしまうので問題とせず、海流および風方向に直角な成分についてのみ考える。

風による変動外力と海流による変動外力とを比べると、その最大値は、 $W_y \doteq 200\text{ton}$, $F_y \doteq \text{数 ton}$ である。また、風速変動にともなう横力は、平均風速によって生ずる横力より小さいので、ここでは定常風の中で筏が回転していることによって生じる横力による偏移のみを見積ることとする。運動方程式は(30)式のようになる。

$$m\ddot{y} + C_{DM}y = W_y \quad \dots(30)$$

右辺は、第1報における実験結果から $W_y \doteq w \sin 2A$ (A : 筏の方位角)の形であり、抵抗係数 C_{DM} は海水に対してのみ考慮するものとする。風速 5m/sec とし、8時から16時まで回転するものとしたときの計算結果を図-18に示す。太陽の赤緯が小さいとき横偏移も小さく、 $\delta_0 = -23^\circ$ では約4.7km南に偏移する。第2報によれば、南北に Δy だけ偏移したとき、太陽入射光の放物柱面鏡光軸からのずれ、すなわち偏差角

(84)

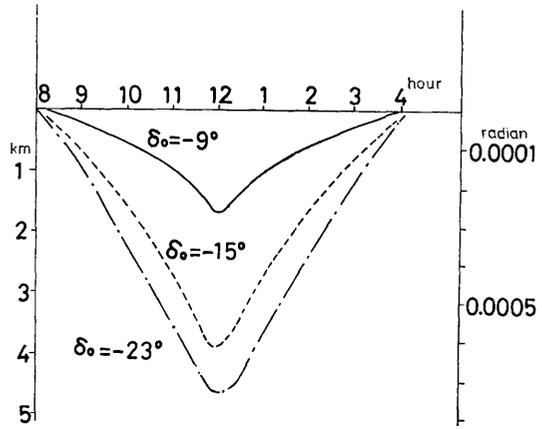


図-18 風力による横偏移

ω は(31)式で与えられる。

$$\tan \omega = -\frac{\Delta y}{R_0} \sin A \quad (R_0: \text{地球の半径}) \quad \dots(31)$$

図-15の右側縦軸の目盛は、 $\Delta y/R_0$ の値であり偏差角 ω はもちろんこれより小であるから、風による横方向偏移に対して放置しておいても、許容誤差以内の追尾が可能である。ただし、完全に元へ戻らず、いくらかのドリフトがあり、各種漂流力も働くから適宜修正する必要がある。

4. 太陽追尾シミュレーション

第3章で行った太陽追尾回転運動の検討は、変動外力に対する筏の応答についてであり、その影響をカバーできるという結論に達しただけであった。ここでは、集光時間帯を通じて許容許差以内で太陽追尾ができるかどうかの問題をシミュレーションを行って検討する。追尾運動のプログラムとしては、予知可能な分に対応して回転動力の設定を行っておき、ランダムに生じる変動外力に対してはその都度修正することになるが、実際には予知可能といっても細部にわたる完全な設定ができた上で、その通り正確に変動ができるわけではない。したがって、適当な時間間隔であるいは連続的に太陽の方位と筏の方位を検知しながら修正する形をとることになるであろう。

太陽追尾シミュレーションを行う運動方程式の基本形は(32)式となる。

$$I\ddot{A} + K\dot{A} + \dot{A} = M \quad \dots(32)$$

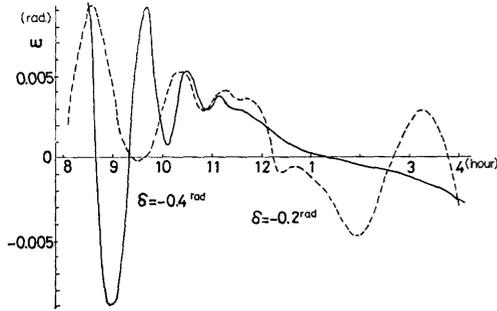


図-21 シミュレーション(I)

=0.005radian) におさまっているが、他の検討結果に比べると全体に偏差角が大きく出ている。

シミュレーション (II)

太陽追尾の制御トルクの決め方にはいくつかの方法が考えられるが、シミュレーション (I) の方法ではやや誤差が大きく不安である。したがって、現時刻 T_i における筏の角速度とトルク M_i を検出し、時間 ΔT 後に筏の方位を修正できるようにトルク M を決めるという方法でシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、時刻 T_i から $T_{i+1} = T_i + \Delta T$ までに筏の方位が A_i から $A_{\odot(i+1)}$ に向う“軌道”は図-22(a)~(b)のような4通りが考えられる。32式は右辺のトルク M を一定とする解析的に解けるので、その結果を用いて方位修正に必要なトルク M_{i+1} を決める。 M_{i+1} を決める式は図-23のように筏の条件によ

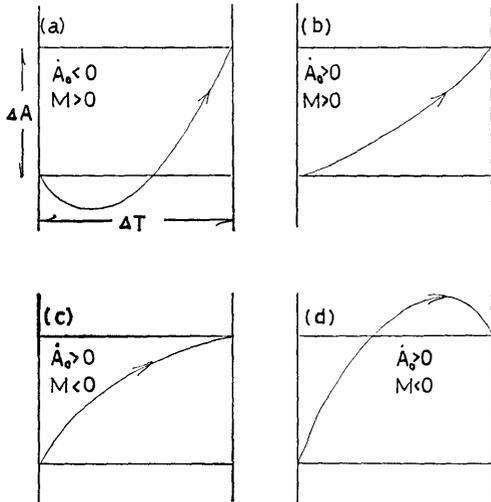


図-22 筏の方位修正の軌道

って選択する。

まず、 $\dot{A}_0 < 0$ ならば、図-22(a)のように正方向のトルクによって角速度はゼロになり、次いで $\dot{A} > 0$ に転じて目標方位角に達する。このとき、39式を解いてトルク M_{i+1} が得られる。

$$\sqrt{1 + \dot{A}_0^2 \frac{K}{M}} \exp\left(\frac{K}{I} \Delta A\right) = \cosh\left\{\frac{K}{I} \sqrt{\frac{M}{K}} \Delta T + \tan^{-1}\left(\dot{A}_0 \sqrt{\frac{K}{M}}\right)\right\} \dots (35)$$

$\dot{A}_0 > 0$ で小のときは図-22(b)のように、正方向トルクによって到達する。トルク M_{i+1} は36式を解いて得られる。

$$\exp\left(\frac{K}{I} \Delta A\right) = \cosh\left(\frac{K}{I} \sqrt{\frac{M}{K}} \Delta T\right) + \dot{A}_0 \sqrt{\frac{K}{M}} \sinh\left(\frac{K}{I} \sqrt{\frac{M}{K}} \Delta T\right) \dots (36)$$

$\dot{A}_0 > \frac{I}{K \Delta T} \left\{ \exp\left(\frac{K}{I} \Delta A\right) - 1 \right\}$ になると図-22(c)のようにトルクは負方向に付ける必要があり、トルク M_{i+1} は37式を解いて得られる。

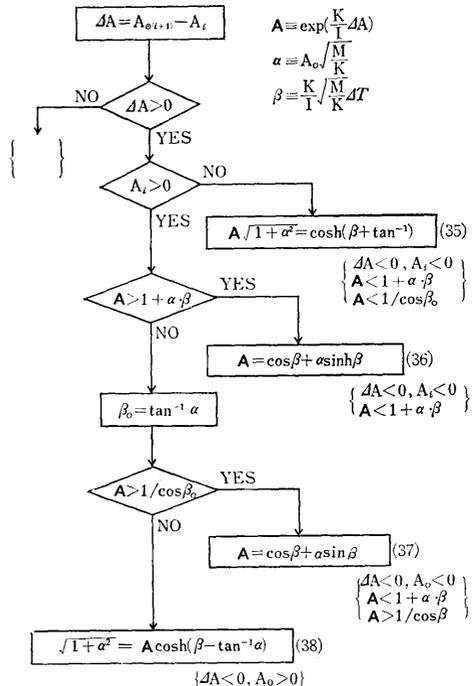


図-23 追尾トルク計算式を選択

$$\exp\left(\frac{K}{I}\Delta A\right) = \cos\left(\frac{K}{I}\sqrt{\frac{M}{K}}\Delta T\right) + \dot{A}_0\sqrt{\frac{K}{M}}\sin\left(\frac{K}{I}\sqrt{\frac{M}{K}}\Delta T\right) \quad \dots(37)$$

さらに \dot{A}_0 が大きくなり、 $\frac{K}{I}\dot{A}_0\Delta T = d \tan a$ の根を α_0 としたとき $\exp\left(\frac{K}{I}\Delta A\right) > \cos \alpha_0$ ならば、図-22(b)のように負方向トルクによって角速度はゼロとなり、逆転して目標に到達する。このとき、トルク M_{i+1} は38式を解いて得られる。

$$\sqrt{1 + \dot{A}_0^2 \frac{K}{M}} = \cosh\left\{\frac{K}{I}\sqrt{\frac{M}{K}}\Delta T - \tan^{-1}\left(\dot{A}_0\sqrt{\frac{K}{M}}\right)\right\} \cdot \exp\left(\frac{K}{I}\Delta A\right) \quad \dots(38)$$

ここで、 $\dot{A}_0 \equiv \dot{A}_i$ 、 $\Delta A \equiv A_{i+1} - A_i$ 、 $M \equiv M_{i+1}$ である。 ΔA が負の場合も同様に取扱うことができる。このようにして決めたトルク M_{i+1} を34式の形で32式に入れて解くことになる。35~38式はマラー法で、32式はハミング法で数値計算した。

日出から日没までの時間、追尾計算をした結果を表-2に示す。太陽赤緯 δ_0 、追尾開始時の筏の方位角 A_0 および方位検定間隔 ΔT を変えて、偏差角 ω が許容値 0.005radian より小さくなり始める時刻を示してある。この時刻以後の偏差角は、ほとんど 10^{-4}radian 以下となり、許容誤差内での追尾をしていることになる。トルクの決め方から予想されるように、シミュレーション (I) と比べると偏差角は非常に小

表-2 許容誤差以内で追尾し始める時刻(静水中) 検出間隔 5分

$A_0 \backslash \delta_0$	-20°	-10°	10°	20°
-75°	6 : 50	—	—	—
-80°	7 : 00	—	—	—
-90°	—	6 : 35	6 : 35	7 : 00

検出間隔10分

$A_0 \backslash \delta_0$	-20°	-10°	10°	20°
-80°	10 : 50	11 : 30	—	—
-85°	—	11 : 30	—	—
-90°	10 : 50	—	7 : 15	7 : 20

さくなっている。しかし、検出間隔は10分の場合に定常状態に達するのに時間がかかる場合があるので、5分間隔とする方がよいことがわかる。

4.2 変動外力を考慮した太陽追尾

次に、変動外力を考慮した太陽追尾シミュレーションを行う。変動外力の見積りは第3章で行っており、想定海域での気象・海象条件では、風力によるものが最も大きいことが得られたので、ここでは風速変動のみをとり入れることにした。運動方程式は、32式の右辺に風力モーメント M_w の項を加えて39式の形となる。

$$IA + K\dot{A}|\dot{A}| = M + M_w \quad \dots(39)$$

第1報の結果により、風力モーメント M_w は40式のように表わされる。

$$M_w = \frac{\rho_a L S}{4} C_M U^2 \quad \dots(40)$$

モーメント係数は $C_M \equiv -0.4 \sin 2A$ と近似され、方向によって異なるが、検出時間間隔 ΔT 内では一定とすると、風力モーメントは41式となる。

$$M_w = \gamma U^2 \equiv \gamma (U_0 + \Delta U)^2, \quad \gamma \equiv \frac{\rho_a L S C_M}{4} \quad \dots(41)$$

ここに、 U_0 は平均風速、 ΔU はランダムな変動風速である。

シミュレーションの方法は、(41)式から風力モーメントの定常分 $M_{w0} \equiv \gamma U_0^2$ のみを39式の右辺に加えて

$$I\dot{A} + K\dot{A}|\dot{A}| = M + \gamma U_0^2 \quad \dots(42)$$

の解から4.1のシミュレーション (II) の方法で制御トルク M_{i+1} を決めた。変動風力モーメントは太陽追尾のモーメントの中に

$$M(t) = M_i + (M_{i+1} - M_i) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + M_w(t) \quad \dots(43)$$

として、計算のくり返し毎に加えるようにした。

変動風は、Davenport のスペクトルによって $U_0 = 5.0 \text{m/sec}$ として作成した。図-24、25に使用したスペクトラムと変動風の例を示す。

追尾は日出から16時までとし、追尾開始時の筏の方位角 A_0 は、ほぼ日出の方位とした。また、方位検出間隔 ΔT は5分とした。

図-26~30に太陽赤緯 δ_0 を変えたシミュレーショ

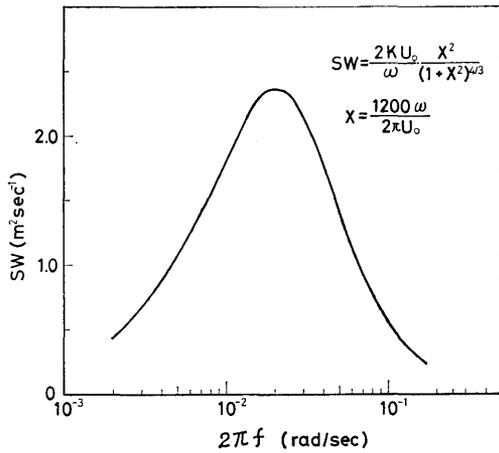


図-24 変動風ウスペクトラム

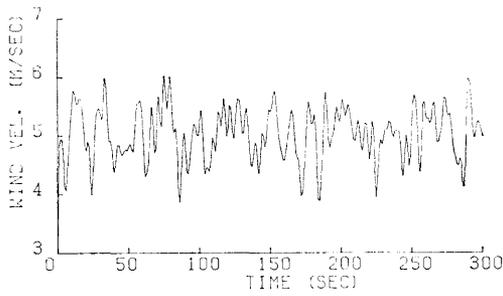


図-25 変動風の例

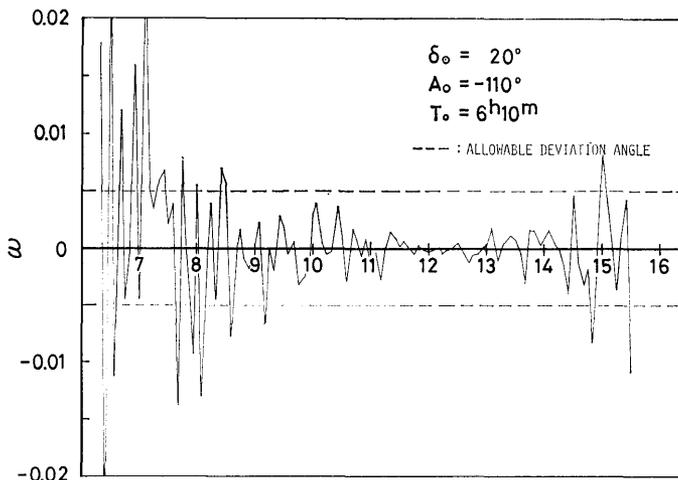


図-26 変動風中の太陽追尾 ($\delta_0=20^\circ$)

ン結果を示す。静水中のシミュレーション(Ⅱ)が、表-2に示した時間以後は偏差角がほとんど 10^{-4} radian以下になったのに対して、偏差角が大きくなっている。これは、風力モーメントの変動分については補正していないので、方位角誤差が大きくなるためである。太陽赤緯の変化について結果が違っているのは、筏の方位によって決まる風力モーメント係数 C_M が、太陽の運行に依存するためである。

図-28, 29の正午に偏差角が急激に大きくなっているのは、筏の緯度と太陽赤緯の差が接近(2度)しているため、太陽方位が5分間で約32度も変化し、追尾できないために生じる誤差である。しかし、極く短時間の現象であるから、正午以降の追尾に影響しなければ問題にならない。また、第2報の結論から、太陽赤緯と緯度の差が小さいときは、正午近くで方向固定ないし等速回転でよいので、この現象は生じないと予想される。強いて精度を上げようとするならば、検出間隔を小さくすることでよいと思われる。

変動風の影響で偏差角は大きくなっているが、検出間隔5分間で追尾補正することで、集光時間帯を通じては、ほぼ許容誤差 $\omega=0.005$ radianの範囲で追尾している。

また、第2報で、太陽赤緯と緯度の差が小さいときは、正午近くで方向固定ないし、等速回転でよいと結論されているのでこの現象は生じないと予想される。強いて精度を上げようとするならば、検出間隔を小さくすることでよいと思われる。

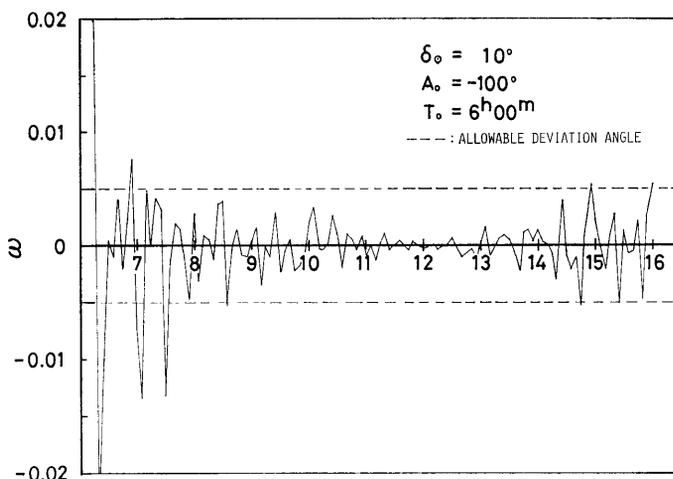


図-27 変動風中の太陽追尾 ($\delta_0 = 10^\circ$)

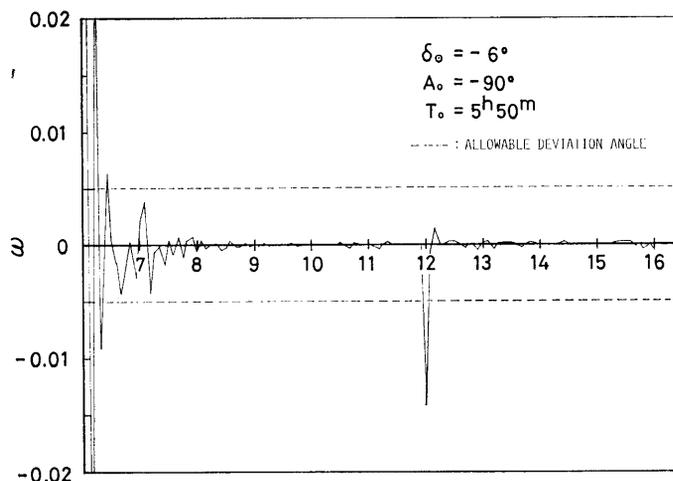


図-28 変動風中の太陽追尾 ($\delta_0 = -6^\circ$)

5. む す び

本計画で提案された太陽熱集光筏の位置保持と太陽追尾の運動を検討し、次の結果を得た。

- (1) 係留方式による位置保持は、4,000mの水深をもつ想定海域ではかなり困難であることがわかる。
- (2) 風および海流に抗して推進器方式で位置保持と太陽追尾運動するためのパワーとエネルギーを計算した。これが計画を不可能にするほど過大であるかどうかは、第4報で検討する。

- (3) あらかじめ、太陽の運行・外力の定常分などを考慮して設定した筏の運動が、外力変動によって大きく乱されるかどうかを検討した。風および海流方向の並進運動への影響は、設定分にくり入れる形で補正できる。横方向への影響は、放置しておいても太陽追尾にほとんど誤差を生じない。回転運動への影響は、5分以内に検出して制御することによって補正できる。

- (4) 静水中および風速変動を考慮した場合の2通りの太陽追尾シミュレーションを行い、許容誤差の範囲

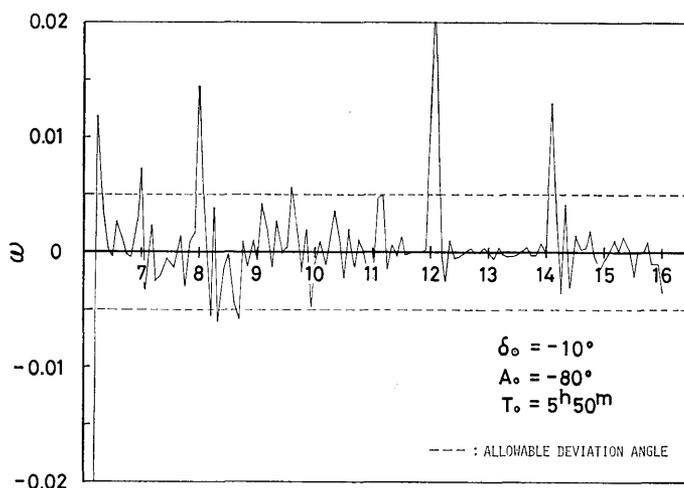


図-29 変動風中の太陽追尾 ($\delta_0 = -10^\circ$)

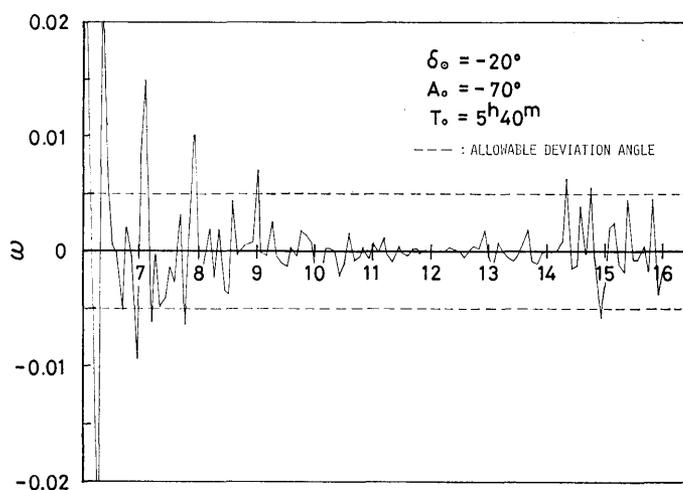


図-30 変動風中の太陽追尾 ($\delta_0 = -20^\circ$)

で太陽追尾が可能かどうかを検討した。静水中では5分間隔の検出で十分な追尾を行える方法が見い出された。最も大きい影響をもたらす変動風の中でも許容誤差の範囲で太陽を追尾することができた。

以上のように、提案された筏は、位置保持に要するパワートエネルギーが過大であるかどうかの結論を保留しても、十分な精度で太陽追尾の回転運動をすることができる。これは、筏の回転速度・加速度が最も大きくなる正午付近において、太陽高度 H が大であるため、 $\tan \omega = \sin \Delta A / \tan H$ の関係によって、許容方

位角誤差（偏差角） ω が大きくなるということにもよる。

本報のような主題に対しては、もっと一般的・解析的な研究方法をとるべきであったかも知れない。しかし、計画の可能性検討の一環としては、提案された筏の具体的な運動の様子を知ることが必要であり、一般論は別の機会にゆずって、てっとりばやい数値計算に力を注いだ。

参 考 文 献

- 1) 岩柳順二ほか；太陽光利用洋上水素製造輸送計画の調査研究，第37回船舶技術研究所，研究発表会講演集，（1981）pp. 81～120.
- 2) 遠藤久芳ほか；太陽光利用洋上水素製造輸送計画の調査研究，第1報 筏の構造と流体力特性，船舶技術研究所報告，第19巻，第4号，（1982）pp. 13～39.
- 3) 浜島金司・渡辺健次；太陽光利用洋上水素製造輸送計画の調査研究，第2報 太陽追尾と光学系，船舶技術研究所報告，第19巻，第4号，（1982）pp. 41～59.
- 4) 日根野元裕・山内保文；海洋波スペクトル，日本造船学会誌 第609号「海洋工学」特集—海洋構造物と海象—（1980）
- 5) 第187研究部会；海洋構造物の深海係留に関する研究報告書，日本造船研究協会研究資料No.352，（1982）
- 6) 海洋工学委員会性能分科会海洋エネルギーパネル；「海洋エネルギー利用」特集，日本造船学会誌 第637号 別冊，（1982）
- 7) 高橋 雄・佐尾邦久；海洋構造物の設計と海象，日本造船学会誌 第609号「海洋工学」特集—海洋構造物と海象—（1980）