

# 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)

浜島金司\*・渡辺健次\*

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

(2nd Report: Sun Following and Optical System)

By

Kinji HAMAJIMA and Kenji WATANABE

### Abstract

In this paper, optical problems of sun following on the sea is discussed. Main difficulty is that angular velocity of the raft is very large when the sun passes near the zenith. This difficulty is released by mean of adequate rotation of raft that reduces the angular velocity and minimizes the loss of incident solar energy resulting from sun following error.

Furthermore, some formulae for sun following that is necessary to use in the third and the fourth reports are showed, for example, raft angular velocity, acceleration, moment, power, and energy for raft rotation etc.

### 記号表

$H$  ; 太陽高度  
 $\delta_{\odot}$  ; 太陽赤緯  
 $\phi$  ; 緯度  
 $\theta$  ; 時角  
 $A$  ; 太陽方位角  
 $\Delta A$  ; 太陽方位角誤差  
 $\zeta$  ; 天頂角  
 $a$  ; 近似角速度  
 $C$  ;  $\pi/12$  hour  
 $\alpha, \alpha'$  ; 受熱板をみこむ角  
 $\beta$  ; 受熱板の傾き  
 $D$  ; 鏡の幅  
 $f$  ; 焦点距離  
 $n$  ; 倍率  
 $d$  ; 太陽視半径  
 $P_{\alpha}$  ; 太陽定数

$L$  ; 筏の辺長 (1000m)  
 $\rho_l$  ; 海水密度  
 $S_l$  ; 円柱浮体没水部の投影断面積  
 $C_{Dt}$  ; 抗力係数  
 $M$  ; 筏の回転モーメント  
 $V_F$  ; 海流流速  
 $l_{ij}$  ; 筏中心から円柱浮体までの距離  
 $A_{\theta ij}$  ; 筏中心から円柱浮体までの方向  
 $B$  ; 筏の水平面からの傾き角  
 $i$  ; 同上傾き回転軸と太陽方向のなす角

### 1. はじめに

本報告の「第1報 筏の構造と流力特性」で述べたごとく、太陽エネルギーを主要なエネルギーとして利用できるようになるためには、基礎的な多面にわたる研究の積み重ねが必要である。実際に、たとえば太陽の日周運動を追尾して太陽熱をなるべく高い密度で集める、という単純な目的に対してさえ、実に数多くの着想が発表<sup>1), 2), 3)</sup>されている。ところで、第1報で提案された集光筏には、集光にさいして従来陸上では考

\* 共通工学部

原稿受付: 昭和57年4月28日

えられなかった問題点が生じる。それは、上述の各種研究においては取り扱われていないものなので、これを解明するには新しい基礎研究が要求される。

新しい問題点のひとつは、反射鏡をのせた筏全体が太陽を追尾しながら海上で回転するという方式をとっ

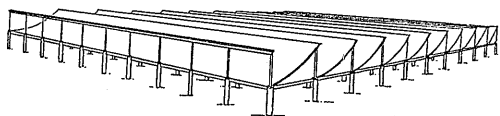


図-1 船研式集光筏 (121 本脚) の概念図

たことから生ずる。この方式に対して、筏を固定し反射鏡ないし受熱部が太陽の日周運動に応じて回転する、という考え方もあろう。これは、提案された集光筏<sup>4),5)</sup>が、鏡と受熱部の支持を共通していることを利点としていることと、まったく逆行しているから問題にならないことがあきらかである。さらに、このような巨大な鏡や受熱部が、強度と精度を維持しながら、筏面に対して相対的に動くということは、技術的に困難と思われる。それでは、筏全体が回転する場合はどうかという、やはり、回転運動に対する空気と水の抵抗があって、これを見積る必要があり、それが過大ならば計画全体は実現困難となる。

この方式では、筏は水平に置かれ、太陽の日周運動によって太陽光線は、時間とともに角度を変えながら斜めに入射してくる。よく知られているように放物柱面鏡<sup>6)</sup>の場合、頂線と焦線からなる平面に平行に入射する光線は、反射後かならず焦線とまじわり、焦線上におかれた受熱部に集まる。従って、つねに鏡の長手方向(頂線ないし焦線方向)が太陽方位と一致するように筏が回転すれば、正確に太陽を追尾でき、受熱量は太陽高度を  $H$  とすると  $\sin H$  に比例する。しかし、正確な追尾は、各種の外乱のためにならずしも可能でなく、その結果生ずる集光ロスが過大であれば、本方式の実現は不可能である。

もうひとつは、筏の想定海域から出てくる問題である。海域は南緯  $8^\circ$  にあり、一方太陽の赤緯は、ほぼ  $-23^\circ \sim 23^\circ$  の間を年間に変動しているから、太陽が天頂近くを通る日がかならずできる。そのとき太陽方位角は、 $-90^\circ$  近くから  $+90^\circ$  近くに短時間で変り、これを追尾するためには、筏の回転角速度が無限大に近づく必要がある。このことは、ごく限られた時間内の問題であるが、それにしてもなんらかの回避方法をとらざるを得ない。

以上列挙した問題点を、この「第2報 太陽追尾と光学系」において検討する。光学系は、第1報において示された寸法のものをもととして考え、必要に応じて一般の光学系について論ずる。

まず、太陽追尾の基礎として、太陽の方位角、角速度、角加速度、高度、日没方位角と時刻等の計算式と計算結果を示す。

太陽が天頂近くを通る場合、計算誤差が小となるように改良された式も示す。これらから筏一基あたりの集光量とその時刻変化を計算する。

追尾誤差に対応した集光ロスを計算するために、反射鏡へ入射した光が受熱部へ到達する過程を解析し、受熱部における放射強度を積分計算しなければならない。ここでは、文献<sup>9)</sup>における方法と仮定から出発して、入射光の光軸からのずれ  $\omega$  (偏差角となづける) を導入し、それと太陽高度  $H$  に対する放射強度を計算する。

放射強度分布の積分から偏差角  $\omega$  に対する集光ロスの関係が得られる。そこで、いろいろな形での誤差が、偏差角  $\omega$  とどのような関係にあるかくわしく検討しておく。

追尾回転にともなう抵抗、必要なパワー、エネルギーについては第1報の結果をもちい、海流と風の中での回転であるので、それらとの合成を考えて式をたてる。

最後に、太陽が天頂近くを通る場合(特異日となづける)の回避方法を論ずる。これは回転角速度を極端に大きくしなければならないことが問題となっているのであるから、追尾の正確さを少々犠牲にして角速度を小さいままにしておき、その結果の集光ロスが無視できるか、あるいは、角速度を小にすることによる運動エネルギーの節約以下にできればよい。

このようにして、前にあげた問題点のすべてが解決されることがわかったので、以下にくわしく述べる。

## 2. 太陽の運行と入射光

### 2.1 太陽追尾の基礎式

放物柱面鏡を筏に水平にのせ、筏の回転によって太陽を追尾する際、常に太陽光線を光軸に平行に入射させることは出来ない。しかし、入射光線が放物柱面鏡の頂線と焦線からなる平面に平行であるならば、反射光線は必ず焦線を通る。従って、鏡の長手方向が常に太陽の方を向くように追尾することが必要である。このため、太陽高度・方位角・角速度・角加速度などの

諸元を求める式を導き、筏の想定海域ではどうなるか計算しておく必要がある。

よく知られているように地球上のある点における太陽高度と太陽方位角は、天球座標と球面三角形の公式

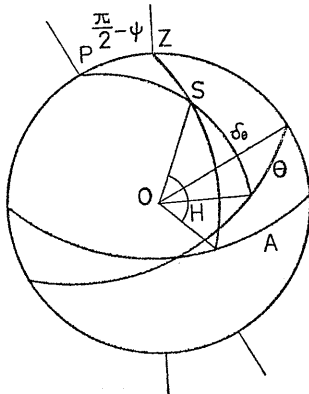


図-2 天球座標

を用いて以下の式から求められる。

$$\sin H = \cos \delta_0 \cos \theta \cos \phi + \sin \delta_0 \sin \phi \quad (2.1)$$

$$\sin A = \cos \delta_0 \sin \theta / \cos H \quad (2.2)$$

$$\cos A = \frac{\sin \phi \sin H - \sin \delta_0}{\cos \phi \cos H} \quad (2.2)'$$

ここで、 $H$ ；太陽高度、 $A$ ；太陽方位角、 $\phi$ ；緯度、 $\delta_0$ ；太陽赤緯、 $\theta$ ；時角 {地方時  $t_h$  としたとき  $\theta = \frac{\pi}{12} \times (t_h - 12)$ } であり、図-2 に示されている。

筏の想定海域 ( $\phi = -8^\circ$ ) の場合、太陽方位角が第2、第3象限にくることがあるので、判定のため(2.2)'の式が必要となるので示しておく。次に、筏が太陽を追尾して回転する角速度・角加速度は、(2.2)'を時刻の関数として微分してえられる。

$$\frac{dA}{dt} = C \cdot (\sin \phi - \sin \delta_0 \sin H) / \cos^2 H \quad (2.3)$$

$$\frac{d^2A}{dt^2} = C^2 \cdot \frac{\cos \delta_0 \cos \phi \sin \theta}{\cos^4 H} \{ \sin \delta_0 (1 + \sin^2 H) - 2 \sin \phi \sin H \} \quad (2.4)$$

$(C = \pi/12h)$

ここで、赤緯は時刻に依存するが1日としてほとんど変化しないので定数として考える。

以上、筏が太陽を追尾するための基礎式である。

日没時刻とそのときの太陽方位角は(2.1)、(2.2)式で  $H=0^\circ$  とすればえられ、 $\theta_0$  を日没時の時角、 $A_0$  をそのときの太陽方位角とすれば以下の式になる。

$$\theta_0 = \pm \cos^{-1}(-\tan \delta_0 \tan \phi) \quad (2.5)$$

$$A_0 = \pm \sin^{-1}(\cos \delta_0 \sin \theta) \quad (2.6)$$

### 2.2 計算例

筏を浮べる想定海域は、西径  $138^\circ$ 、南緯  $8^\circ$  であるので、その地点における太陽高度・方位角・角速度・角加速度について、半年間にわたって計算してみた。計算に使用した太陽赤緯の値は1977年及び1978年の理科年表<sup>7)</sup>に掲載されている値を使用した。その値は毎日0時における値であるが、太陽赤緯の日変化の最大が  $34'$  と小さいことから、0時における値と翌日0時における値の算術平均を実際の計算には使用した。計算例のいくつかを図-3~7に示しておく。

さて、太陽を追尾するための角速度は毎日正午において最大となるが、緯度と太陽赤緯がほぼ等しくなる

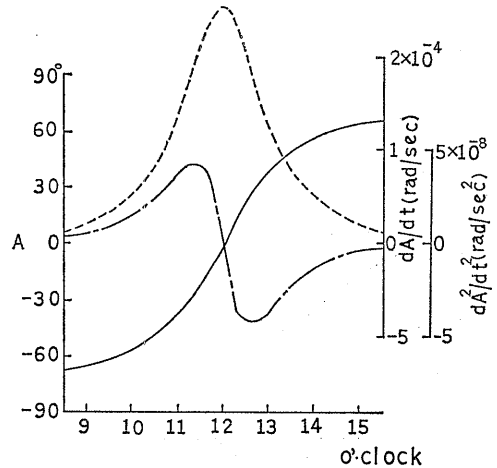


図-3 方位角・角速度・角加速度 (12月20日)

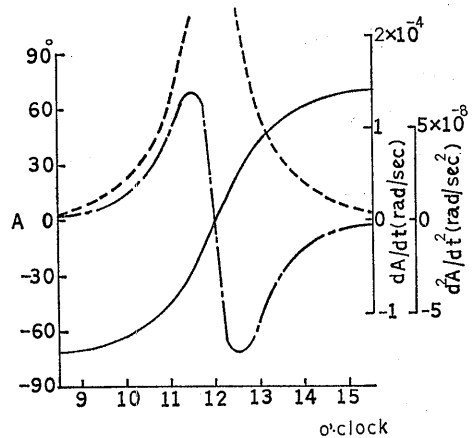


図-4 方位角・角速度・角加速度 (1月20日)

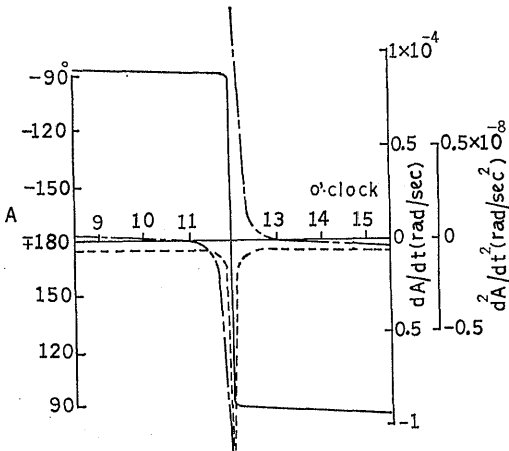


図-5 方位角・角速度・角加速度 (2月28日)

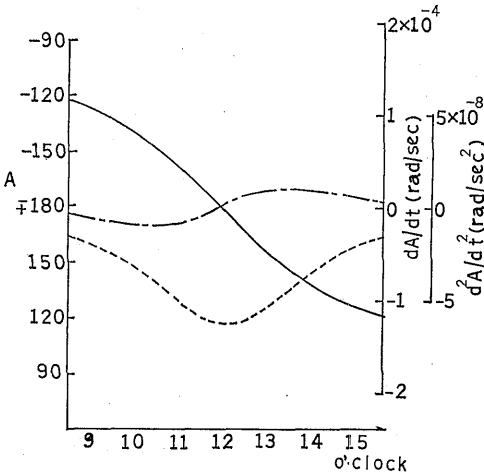


図-6 方位角・角速度・角加速度 (6月20日)

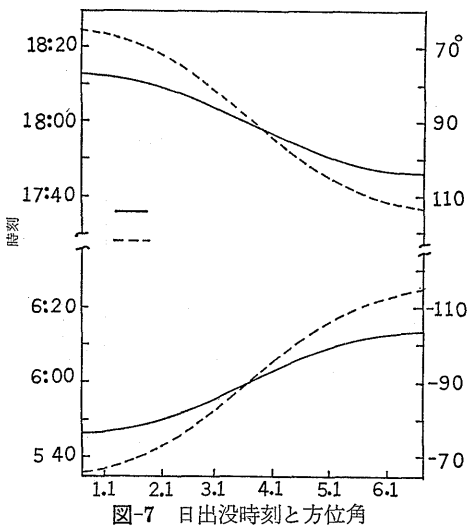


図-7 日没時刻と方位角

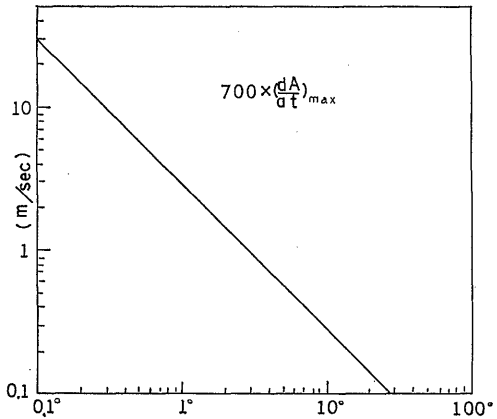


図-8 緯度・太陽赤緯差と筏最外端最高速度との関係

とき、それは図-5 (2月28日) のように非常に大きくなる。そこで筏の端の最大速度を緯度太陽赤緯差に対して計算すると図-8 のようになる。筏の回転によって完全に太陽を追尾していくことは、筏に装備された回転動力に限りがあるので不可能であり、装備された動力をこえるおそれの出るこうした日の特異日となづけ後で検討する。

### 2.3 計算式の改良

緯度と太陽赤緯がほぼ等しくなる場合は、(2.1)~(2.4) 式では  $\cos H$  が分母に存在し、正午付近でゼロに近くなるため計算精度が悪くなる。そこで、 $H=90^\circ - \zeta$  ( $\zeta$ : 天頂角) とおくことにより、各式を書きなおすと、

$$\sin \frac{\zeta}{2} = \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\delta_0 - \phi}{2} \right) + \cos \delta_0 \cos \phi \sin^2 \frac{\theta}{2}} \quad (2.7)$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta_0 \sin \theta}{2 \sin \frac{\zeta}{2} \sqrt{1 - \sin^2 \frac{\zeta}{2}}} \quad (2.8)$$

$$\frac{dA}{dt} = C \frac{\sin \phi - \sin \delta_0 + 2 \sin^2 \frac{\zeta}{2} \sin \delta_0}{4 \sin^2 \frac{\zeta}{2} \left( 1 - \sin^2 \frac{\zeta}{2} \right)} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} d^2A = C^2 \cdot & \frac{\cos \delta_0 \cos \phi \sin \theta}{16 \sin^4 \frac{\zeta}{2} \left( 1 - \sin^2 \frac{\zeta}{2} \right)^2} \\ & \times \left\{ 2(\sin \delta_0 - \sin \phi) \left( 1 - 2 \sin^2 \frac{\zeta}{2} \right) \right. \\ & \left. + 4 \sin \delta_0 \sin^4 \frac{\zeta}{2} \right\} \quad (2.10) \end{aligned}$$

となり、実際に計算してみると、特に太陽高度の計算

表-1 近似式  $A=\tan^{-1}(at)$  の真の値との比較

時刻	$\delta_0 = -9^\circ$		$\delta_0 = -10^\circ$		$\delta_0 = -15^\circ$		$\delta_0 = -20^\circ$	
	A	A'	A	A'	A	A'	A	A'
12:10	67.8	67.9	50.8	50.9	19.1	19.1	11.1	11.1
12:20	78.2	78.5	67.6	67.9	34.5	34.7	21.5	21.5
12:30	81.8	82.3	74.3	74.9	45.7	46.0	30.4	30.6
12:40	83.5	84.2	77.8	78.5	53.5	54.1	37.9	38.3
12:50	84.5	85.4	79.9	80.8	59.1	60.0	44.0	44.6
13:00	85.1	86.1	81.2	82.2	63.2	64.3	48.9	49.8
14:00	85.9	88.1	83.8	86.1	73.9	76.4	64.4	67.1
15:00	85.3	88.7	83.9	87.4	76.7	80.9	69.7	74.2

精度が改善されるので  $\cos H$  が分母にある他の式の精度もよくなる。

実際の計算にはその目的によっては近似式の方が便利なので以下のような式を使用した。

太陽赤緯は年によっても異なるが約  $\pm 23^\circ$  の間を一年で変化している。従って、地球の公転軌道を円と仮定すれば、次の近似式となる。

$$\delta_0 = 23^\circ \times \sin\left(\frac{2\pi}{365} \times D_0\right) \quad (2.11)$$

$D_0$ ; 春分を0とし1年を365日としたときの春分からの日数

また、式(2.1)、(2.3)で  $\theta=0$  とおくと、正午における角速度は、

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_{\max} = C \cdot \frac{\cos \delta_0}{\sin(\phi - \delta_0)}$$

となる。図-8をみれば  $(dA/dt)_{\max}$  が  $\phi - \delta_0$  にほぼ逆比例することがわかり、

$$\left(\frac{dA}{dt}\right)_{\max} \approx \frac{0.004126}{\phi - \delta_0} \quad (1/\text{sec}) \quad (2.12)$$

としてよい。これを  $a$  とすれば、正午付近の方位角は

$$A' \approx \tan^{-1}(at) \quad (2.13)$$

と表わしてよい。この近似式を用いたときの値と真の値との比較を表-1に示す。

#### 2.4 太陽高度と受光量

筏単位面積あたりの入射量は、 $\sin H$  に比例する。これが鏡で反射されて受熱部に入るとき、太陽高度によってロスが生ずる。それは、受熱部の位置が高さ45m(設計値)のところであり、斜め入射のとき、反射

光が受熱部長手方向に一部外れるためである。受熱部の長さは1000mであるため、垂直入射のときに比べて受光量は、

$$\sin H - 0.045 \cos H \quad (2.14)$$

になる。図-9, 10は、それぞれ太陽高度と受光量の時間変化を示す。午前と午後ではまったく対称であるので片方のみを示した。

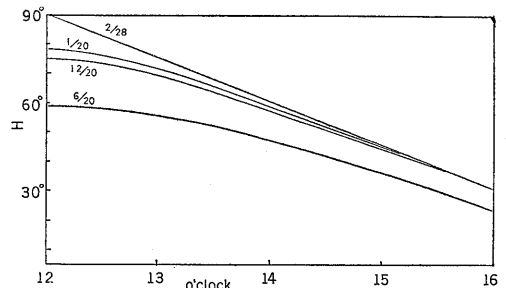


図-9 太陽高度の日変化

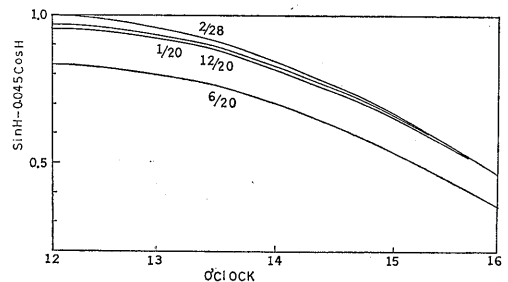


図-10 集光量の日変化

### 3. 集光量と追尾誤差

さて、前章で計算されたとおりに、筏が回転して太陽を正確に追尾できればよいのであるが、実際には種々の原因で誤差が発生するし、回転動力にも限界があって追尾しきれない。こういった誤差によってどの程度集光ロスが生じるかを調べる必要がある。

はじめに、見通しをよくするために、入射光線が放物柱面の長手方向に垂直な平面、すなわち、焦線ないし頂線に垂直な平面内において同じ平面内に反射される場合について、簡略された方法で計算をおこない、次に、一般の場合で三次元的な考察によってより正確な式を導びく。

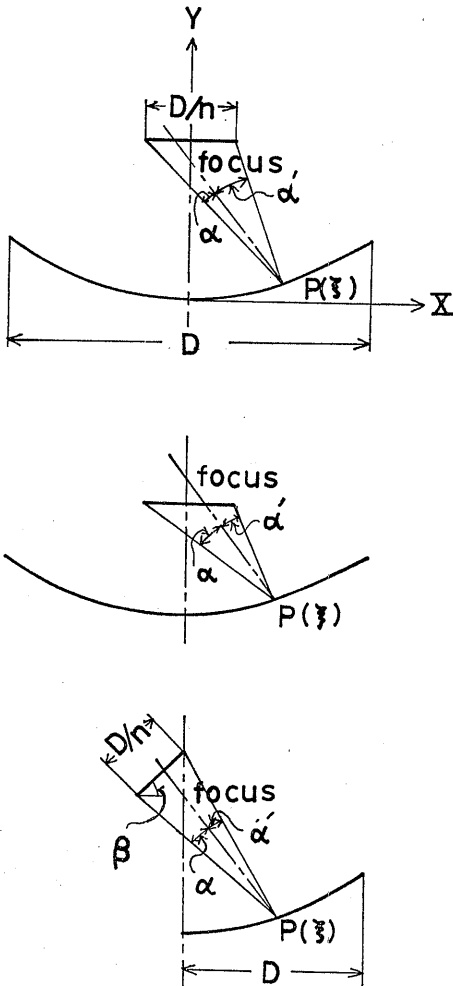


図-11 放物柱面鏡と受熱部の位置関係

#### 3.1 二次元的取り扱い

図-11 のように放物柱面鏡の頂点を原点に焦線方向を Y 軸、口径方向を X 軸にとれば、焦点距離  $f$  の放物柱面をあらわす式は  $Y=1/4f \cdot X^2$  となる。放物柱面鏡の幅  $D$ 、集光倍率  $n$  として、

$$\text{口径比} \quad F \equiv D/f$$

$$\text{放物柱面鏡上の } P \text{ 点の } X \text{ 座標} \quad \xi \equiv X/D$$

と無次元化しておく。また、受熱部の幅は  $D/n$  となる。

一般に、受熱部の形状は平板・円筒など種々考えられるが、ここでは平板とし、また、受熱部をおく位置も色々考えられ図-11 に示すように ① 焦線と頂線のなす平面に垂直で焦線の後に置いた場合、同様に、② 焦線の前に置いた場合、そして、③ 放物柱面鏡の片側のみを用い受熱部を焦線の後に置きその平面に対し傾けて置いた場合について検討してみた。

まず、放物柱面鏡上の  $P$  点から、焦線と受熱部の両端をみこむ角を  $\alpha, \alpha'$  として、 $\xi$  と  $\alpha, \alpha'$  の関係を求めてみると、

① 焦線の後に置いた場合

$$\left. \begin{aligned} \alpha \\ \alpha' \end{aligned} \right\} = \tan^{-1} \left\{ \left[ \pm \left( \xi \pm \frac{1}{2n} \right) (4 - F^2 \xi^2) \mp 4F\xi \left( \frac{1}{F} - \frac{F\xi^2}{4} - \frac{F\xi^3}{4} + \frac{16 - F^2}{16nF} \right) \right] / \left[ \left( \frac{1}{F} - \frac{F\xi^2}{4} + \frac{16 - F^2}{16nF} \right) (4 - F^2 \xi^2) + \left( \xi \pm \frac{1}{2n} \right) 4F\xi \right] \right\} \quad (3.1)$$

② 焦線の前に置いた場合

$$\left. \begin{aligned} \alpha \\ \alpha' \end{aligned} \right\} = \tan^{-1} \left\{ \left[ \pm \left( \xi \pm \frac{1}{2n} \right) (4 - F^2 \xi^2) \mp 4F\xi \left( \frac{1}{F} - \frac{F\xi^2}{4} - \frac{16 - F^2}{16nF} \right) \right] / \left[ \left( \frac{1}{F} - \frac{F\xi^2}{4} + \frac{16 - F^2}{16nF} \right) (4 - F^2 \xi^2) - \left( \xi \pm \frac{1}{2n} \right) 4F\xi \right] \right\} \quad (3.2)$$

となる。(①, ② いずれも複号同順)

③ 焦線の後で傾いている場合 (傾き角  $\beta$ )

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \left\{ \left[ \left( 4F\xi + \frac{4F}{n} \cos \beta \right) (4 - F^2 \xi^2) - 4F\xi (4F^2 \xi^2) \right] / \left[ (4 - F^2 \xi^2) + \frac{4F}{n} \sin \beta (4 - F^2 \xi^2) + 16F\xi^2 \right] \right\} \\ \alpha' &= \tan^{-1} \left\{ \left[ \frac{16F^2 \xi}{n} \sin \beta \right] / \left[ (4 - F^2 \xi^2) + \frac{4F}{n} \sin \beta (4 - F^2 \xi^2) + 16F^2 \xi^2 \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

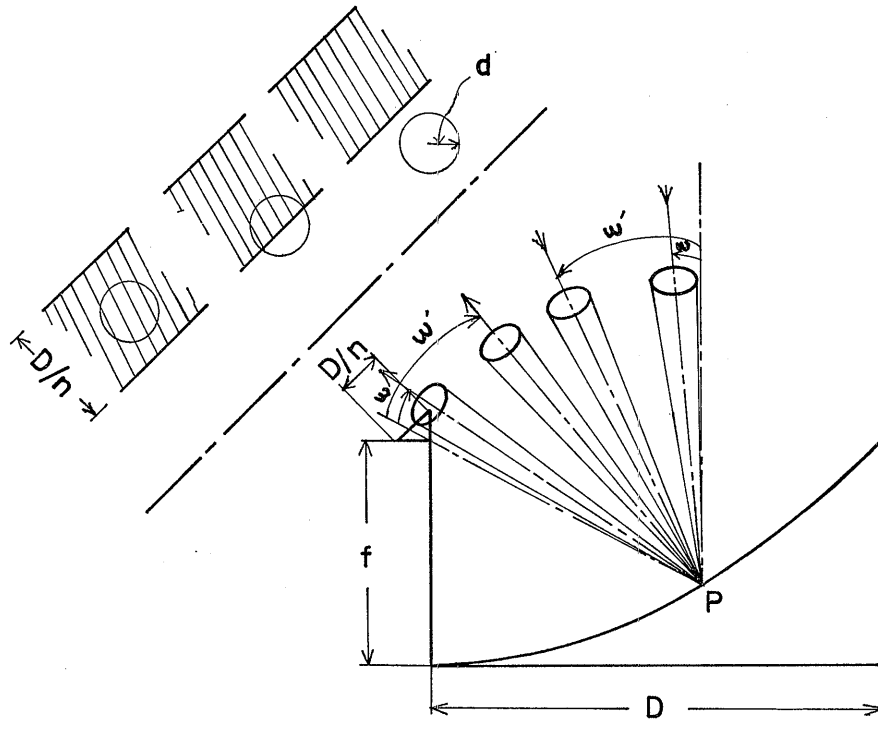


図-12 偏差角による光円錐のずれ

となる。

次に、 $X-Y$  平面内で太陽光線の入射と反射を考えてみる。図-12 のように  $P$  点に入射した光は反射して受熱部に達する。ここで、入射光線が  $Y$  軸に平行であれば焦線を通るが、平行光線でない場合焦線からはずれる。平行でない場合偏差角  $\omega$  を次のように定義する。「焦線と頂点をふくむ平面に対し、入射光線方向と頂線からなる平面とがなす角」。

次に、太陽の視半径（約  $16'$ ）を考慮すると  $P$  点に  $16'$  の半頂角で入射した太陽光線は、同じく  $16'$  の半頂角で反射し、円錐状に拡がり受熱部に達する。ここで、偏差角  $\omega$  と放物柱面鏡上の  $P$  点の位置により反射した太陽光の円錐状の拡がりの中で、受熱部において外れる部分が生じる。したがって、ある偏差角  $\omega$  のときの全集光量  $G(\omega)$  とすれば、それは受熱部にはいる部分を全域について積分したものであり、

$$G(\omega) = \int g_{\xi}(\omega, d, F, n, \xi) d\xi \quad (3.4)$$

とあらわされる。ここで、 $d$  は太陽視半径（約  $16'$ ）である。

$P$  点で反射され円錐状に拡った光が受熱部上で円形

となり、その中で強度一様と仮定すれば、先程検討した  $P$  点から受熱部の両端をみこむ角  $\alpha, \alpha'$  と太陽の視半径  $d$ 、偏差角  $\omega$  の相互関係によって、被積分関数  $g_{\xi}$  の形はきまる。それらの相互関係と  $g_{\xi}$  の関係をまとめたのが表-2 である。

今までえられた関係で放物柱面鏡から受熱部に入る全集光量が計算できるのであるが、ある偏差角  $\omega$  のとき、入射光線が受熱部の両端部もしくは上端部によってさえぎられるため、積分範囲を考慮する必要がある。

次に、計算例を示すが、ここで相対集光ロスを次のように、

$$1 - \frac{G(\omega)}{G(\omega=0)} \quad (3.5)$$

と定義し、受熱板が焦線の後にある場合で、偏差角と相対集光ロスを種々の倍率について示したのが図-13 である。ここで、偏差角  $\omega$  を反時計方向に  $+$ 、時計方向を  $-$  とした。倍率大のほど急速にロスが大となることがわかる。また、受熱板が傾いている場合 ( $\beta = 45^\circ$ ) で、焦線の前および後のときについて図-14, 15 に示す。この場合にいちじるしい非対称性がある。

表-2 太陽の視半径, 偏差角,  $\alpha \cdot \alpha'$  と  $g_\xi(\omega)$  の関係

$\alpha, \alpha'$ と $\omega, d$ の関係	$g_\xi(\omega)$
$\pm\omega + d < \alpha'$ $d \mp \omega < \alpha$	1
$\pm\omega + d > \alpha'$ $d \mp \omega < \alpha$	$1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\alpha' \mp \omega}{d} \right) - \frac{\alpha' \mp \omega}{d^2} \sqrt{d^2 - (\alpha' \mp \omega)^2} \right\}$
$\omega - d < \alpha'$ $d - \omega < \alpha$	$\frac{1}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\omega - \alpha'}{d} \right) - \frac{\omega - \alpha'}{d^2} \sqrt{d^2 - (\omega - \alpha')^2} \right\}$
$d - \omega < \alpha'$ $\omega - d < \alpha$	$\frac{1}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\omega - d}{d} \right) - \frac{\omega - \alpha}{d^2} \sqrt{d^2 - (\omega - \alpha)^2} \right\}$
$d + \omega > \alpha'$ $d - \omega > \alpha$	$1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\alpha' \mp \omega}{d} \right) - \frac{\alpha' \mp \omega}{d^2} \sqrt{d^2 - (\alpha' \mp \omega)^2} \right\}$ $+ \cos^{-1} \left( \frac{\alpha \pm \omega}{d} \right) - \frac{\alpha \pm \omega}{d} \sqrt{d^2 - (\alpha \pm \omega)^2}$
$d + \omega < \alpha'$ $d - \omega > \alpha$	$1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\omega \pm d}{d} \right) - \frac{\omega \pm \alpha}{d} \sqrt{d^2 - (\alpha \pm \omega)^2} \right\}$
$\left\{ \begin{array}{l} \omega - d > \alpha' \\ \text{全ての } \alpha \end{array} \right.$ または $\left\{ \begin{array}{l} \text{全ての } \alpha' \\ \omega - d > \alpha \end{array} \right.$	0

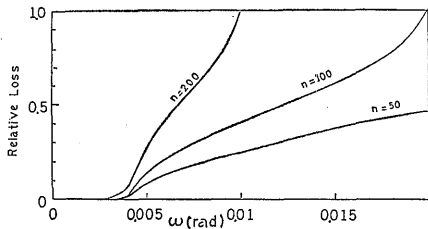


図-13 偏差角と相対集光ロスの関係 (焦線後の受熱面)

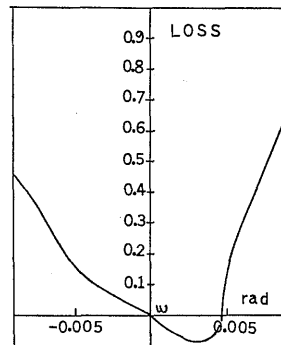


図-15 焦線の後に受熱面があるときの偏差角と集光ロスの関係 (n=100)

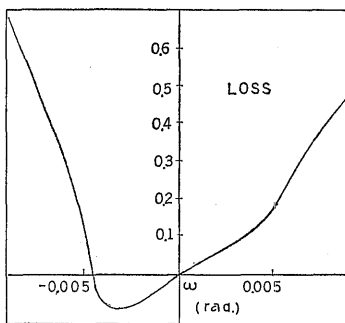


図-14 焦線の前に受熱面があるときの偏差角と集光ロスの関係 (n=100)

全体として,  $\omega \approx 0.005$  rad ぐらいならばロスは小さいと考えられる。

### 3.2 三次元的考察 (一般の場合)

前項では鏡の長手方向に垂直な平面に入射光と反射光がある場合を検討した。実際には入射光は、鏡の長手方向に垂直な平面内にはないから、太陽高度  $H$  と偏差角  $\omega$  の関数としてロスを求める必要がある。

このような場合の計算方法については、文献<sup>6)</sup>を参



考にしたが、そこでは受熱部が水平な平板か円筒の場合についてのみ取り扱われているので、ここではより一般的に受熱板の傾きや偏差角の存在を考慮に入れて議論することにする。

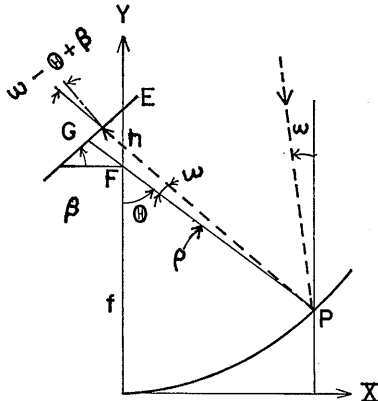


図-16 鏡長手方向に垂直な断面への投影

座標は図-16 のようにとり、Z 軸は鏡の長手方向にとる。今、反射面上の入射点 P を含む XY 面内で考えれば、

$$PF = \rho = 2f / (1 + \cos \theta) \quad (3.6)$$

であり、反射点での微小面積  $\Delta S$  を考えると、

$$\Delta S \cos \frac{\theta}{2} = \rho d \theta dZ$$

とあらわせるから、 $\Delta S$  に入射する放射強度は、

$$P_a \Delta S \cos \left( \frac{\theta}{2} - \omega \right) \cos \delta = P_a \rho \cos \delta \left( \cos \omega + \sin \omega \tan \frac{\theta}{2} \right) d \theta dZ \quad (3.7)$$

となる。ここで、 $P_a$  は太陽定数で  $\delta$  は入射光と XY 面のなす角である。

次に、反射点から受熱点までの距離（光路長） $l'$  は図-16 より、

$$l' = \frac{1}{\cos \delta} \cdot \frac{\cos(\beta - \theta)}{\cos(\omega - \theta + \beta)} \left\{ \rho + \frac{h \cos \beta}{\cos(\beta - \theta)} \right\} \quad (3.8)$$

となる。反射光線が受熱面上で法線となす角を  $\gamma$  とすると、

$$\cos \gamma = \cos(\omega - \theta + \beta) \cos \delta$$

とあらわされるから、受熱面上での太陽像を長径  $l'd / \cos \gamma$ 、短径  $l'd$  の楕円でかつ放射強度一様と仮定すれば（Appendix 参照）、その中の放射強度  $\Delta I$  は、

$$\Delta I = \frac{P_a \rho \cos^2 \delta \left( \cos \omega + \sin \omega \tan \frac{\theta}{2} \right) \cos(\omega - \theta + \beta)}{\pi l'^2 d^2} \times d \theta d x \quad (3.10)$$

となる。

さらに、受熱面上に E を原点とし、Z 軸に平行に x 軸、XY 面内に y 軸をとり、直線  $y = y_1$  とこの太陽像の楕円との交点を  $x_1, x_2$  とすると  $y_1$  における放射強度は、放射強度分布が x 方向に一様であるから、

$$I(y_1) = \frac{P_a}{\pi d^2} \int_{-\theta_m}^{\theta_m} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\rho}{l'^2} \cos^2 \delta \left( \cos \omega + \sin \omega \tan \frac{\theta}{2} \right) \cos(\omega - \theta + \beta) d \theta d x \quad (3.11)$$

となる。ここで、 $\theta_m$  は放物柱面鏡の端に対応し、 $y_1$  のとりうる範囲は受熱板の範囲である。

そこで、x についての積分を実行すれば、

$$I(y_1) = \frac{2 P_a \cos \delta}{\pi d^2} \int_{-\theta_m}^{\theta_m} \frac{\rho}{l'} \left( \cos \omega + \sin \omega \tan \frac{\theta}{2} \right) \times \cos(\omega + \beta - \theta) \left[ 1 - \frac{(y_1 - y_0)^2}{l'^2 d^2} \right]^{1/2} d \theta \quad (3.12)$$

となる。ただし、 $1 - \frac{(y_1 - y_0)^2}{l'^2 d^2} \cos^2(\omega + \beta - \theta) \geq 0$  である。

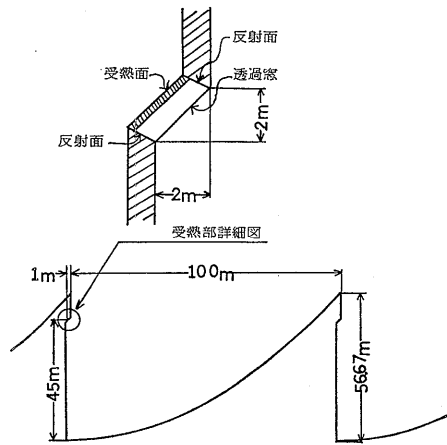


図-17 提案筏の集光部概念図

第1報で提案された筏の放物柱面鏡は図-17のような形をしている。透過窓に到達した光はすべて吸収されるから、透過窓が受熱板とみなしてよい。この場合 ( $\beta = 45^\circ$ ) の放射強度は、被積分項を  $F(y_1, \theta, \omega, \delta)$  とおけば、

$$I(y_1) = \frac{P_a \cos^2 \delta}{\pi d} \int_{\theta_1}^{\theta_m} F(y_1, \theta, \omega, \delta) d \theta \quad (3.13)$$

ただし、

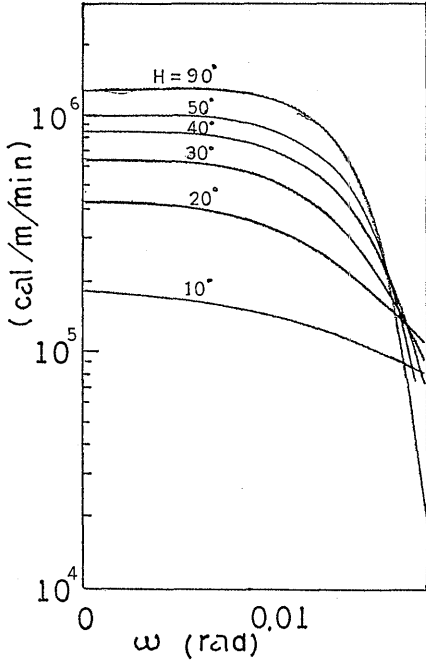


図-18 偏差角と集光量の関係

$$F(y_1, \theta, \omega, \delta) = \frac{\left(\cos \omega + \sin \omega \tan \frac{\theta}{2}\right) (\cos^2(\omega + 45^\circ - \theta))}{\cos(45^\circ - \theta)} \times \left[4 - \left(\frac{y_1 - y_0}{fd}\right)^2\right]^{1/2} \times \frac{\cos^4(\omega + 45^\circ - \theta) \cos^2 \delta (1 + \cos \theta)^2}{\cos^2(45^\circ - \theta)}$$

積分範囲の  $\theta_m$  は鏡の端に対応し、図-17 からわかるように入射光は隣接する鏡の端によってさえぎられることを考慮し、(3.13) の積分を遂行し、さらに  $I(y_1)$  は受熱面上の一点の放射強度であるから、受熱板の幅方向に積分すると単位長さあたりの集光量がえられる。太陽高度  $H$  との関係は  $\sin H = \cos \omega \cos \delta$  であるが、 $\omega$  が小のとき  $H = 90^\circ - \delta$  となる。この関係をもちいて  $H = 10^\circ \sim 90^\circ$  のときの偏差角  $\omega$  と集光量の関係を 図-18 に示す。また、前項と同様に相対ロスを 図-19 に示す。

3.3 各種誤差と偏差角の関係

以上の結果から偏差角  $\omega = 0.005$  rad まではほとんど集光ロスがなく、0.01 rad をこえると急速に集光ロスが増大することがわかった。この偏差角が生ずるもとにいろいろの誤差があり、それらの誤差は種々の原因から起る。しかし、ここでは、誤差の原因の議論は、

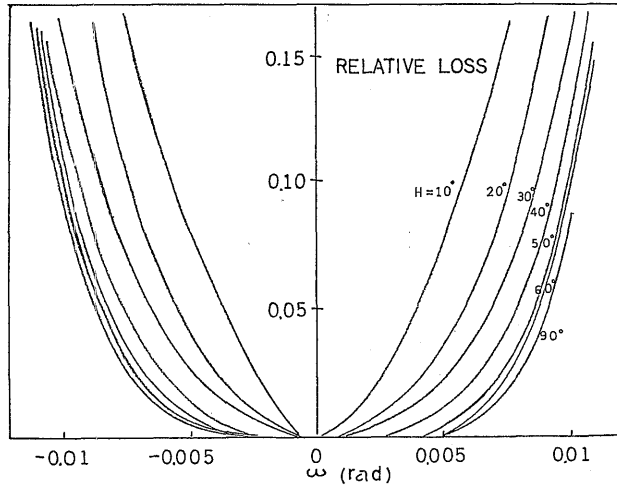


図-19 偏差角と相対ロスの関係

太陽の運行に関するもの以外は他の部分にゆずり、その結果から生ずる偏差角について論ずるのみとする。

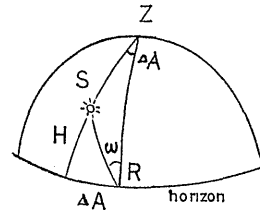


図-20 方位角誤差と偏差角

まず、なんらかの原因で 図-20 のように  $\Delta A$  だけ放物柱面鏡の長手方向  $R$  が太陽  $S$  の方向からずれたとする。天頂を  $Z$  とすると、球面三角形の公式より、

$$\tan \omega = \sin \Delta A / \tan H \tag{3.14}$$

となる。 $\omega, \Delta A$  が小のとき、

$$\omega \approx \Delta A / \tan H \tag{3.15}$$

と近似できる。

つぎに、筈がなんらかの原因で、想定地点から動いたとする。もし、ここで追尾プログラムを変更しなければ、図-21 のように想定地点の天頂  $Z$  を、ずれた

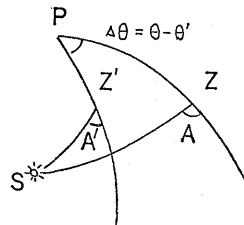


図-21 位置誤差と偏差角

位置での天頂を  $Z'$  とすれば、時角・方位角ともに誤差が生ずる。そこで、

$$\begin{aligned} \tan \omega &= \sin(A - A') / \tan H' \\ &= (\sin A \cos A' - \sin A' \cos A) / \tan H' \quad (3.16) \end{aligned}$$

となり、 $\sin A, \cos A$  の表式を代入し、

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta - \Delta\theta \\ \phi' &= \phi + \Delta\phi \\ H' &= H + \Delta H \end{aligned}$$

において、二次以上の微量を無視すると、

$$\tan \omega = \Delta\phi \sin A + \Delta\theta (\sin \phi - \sin \delta_0 \sin H) / \sin H \cos H \quad (3.17)$$

となる。地球半径を  $R_0$  (平均 6378 km)、南北方向への位置のずれを  $\Delta y$ 、東西方向のそれを  $\Delta x$  とすると、

$$\Delta\phi = \Delta y / R_0, \quad \Delta\theta = \Delta x / R_0 \cos \phi \quad (3.18)$$

である。図-22, 23-1, 2 は、それぞれ北および西へ 2 km ずれたときの偏差角を、太陽赤緯  $\delta_0$  をパラメータとして示したものである。

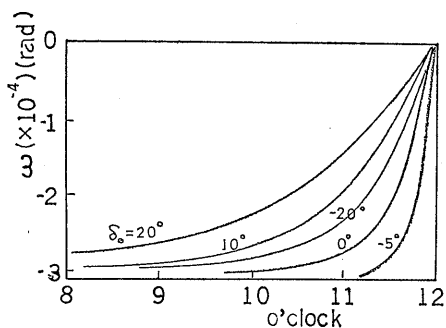


図-22 北へ 2 km ずれたときの偏差角

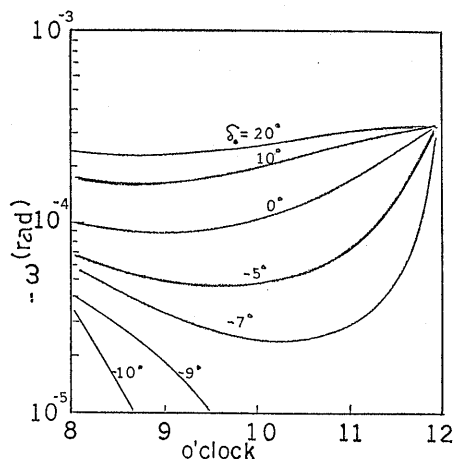


図-23-1 西へ 2 km ずれたときの偏差角

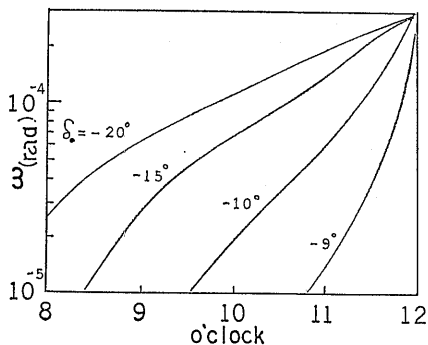


図-23-2 西へ 2 km ずれたときの偏差角

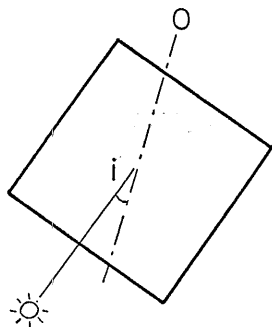


図-24 筏の傾きによる偏差角 (平面図)

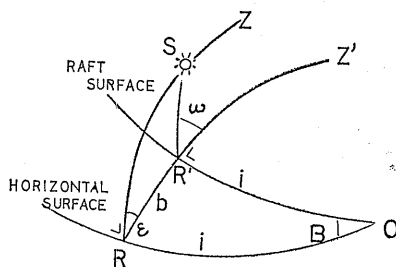


図-25 筏の傾きによる偏差角 (球面座標)

つぎに、筏が水平面から傾いたときを考えよう。図-24 のように、筏が太陽の方向と角  $i$  をなすような水平軸  $O$  のまわりに角度  $B$  傾いたとする。そのとき図-25 のように、鏡の長手方向  $R$  と筏の垂線方向  $Z$  は、それぞれ  $R', Z'$  にうつる。図の補助角  $\epsilon, b$  を導入すると、

$$\begin{aligned} \Delta ORR' \text{ で} \\ \cos b &= \cos^2 i + \sin^2 i \cos B \quad (3.19) \end{aligned}$$

$$\cos B = -\sin^2 \epsilon + \cos^2 \epsilon \cos b \quad (3.20)$$

ASRR' で

$$\tan(\omega - b) = \frac{\sin H \sin \epsilon / (\sin H \cos \epsilon \cos b - \cos H \sin b)}{\quad} \quad (3.21)$$

となり、この三式から  $i, B$  に対する  $\omega$  が計算できる。図-26 は、 $B$  をパラメータとして、 $i$  と  $\omega$  の関係を示す。

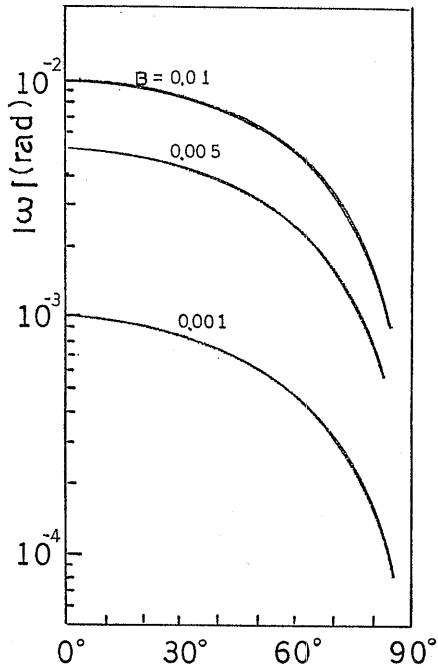


図-26 筏の傾きによる偏差角 ( $H=10^\circ$ )

以上は筏自体の運動や姿勢ともなう偏差角を議論したのであるが、太陽の位置そのものがふつう平均的にあたえられているものからずれていることがある。ひとつは太陽赤緯の変動であって、1日の間でも最大  $5 \times 10^{-6}$  rad/分ぐらいになる。 $\theta$  を一定として、2次以上の微量を無視すると、

$$\Delta A / \Delta \delta_0 = \sin \theta \cos \phi / \cos^2 H \quad (3.22)$$

となつて、方位角誤差と偏差角の関係式を

$$\Delta A \approx \omega \tan H \quad (3.23)$$

と近似すると、

$$\omega = \frac{\sin \theta \cos \phi}{\sin H \cos H} \quad (3.24)$$

となる。図-27 は、太陽赤緯の時間変動に対する偏差角の増大割合をしめる。

もうひとつは、時差すなわち平均太陽時と真太陽時の差であつて、時角  $\theta$  における誤差としてあらわれ、

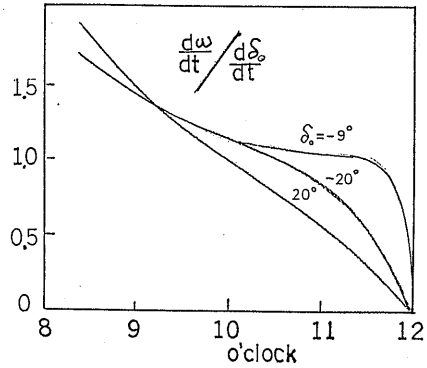


図-27 太陽赤緯変動と偏差角変動の関係

最大  $1.4 \times 10^{-6}$ /分である。偏差角  $\omega$  との関係は、

$$\omega = \frac{\sin \phi - \sin \delta_0 \sin H}{\sin H \cos H} \Delta \theta \quad (3.25)$$

と近似される。図-28 は、 $\theta$  の変動に対する偏差角の増大割合をしめる。太陽運行にともなう、これらの誤差ないし、その時間変動はちいさいので、結果として生ずる偏差角は無視できるか、または、簡単に修正できる。

この他、地心視差 ( $4 \times 10^{-8} \cos H$ )、日周光行差 (1.5

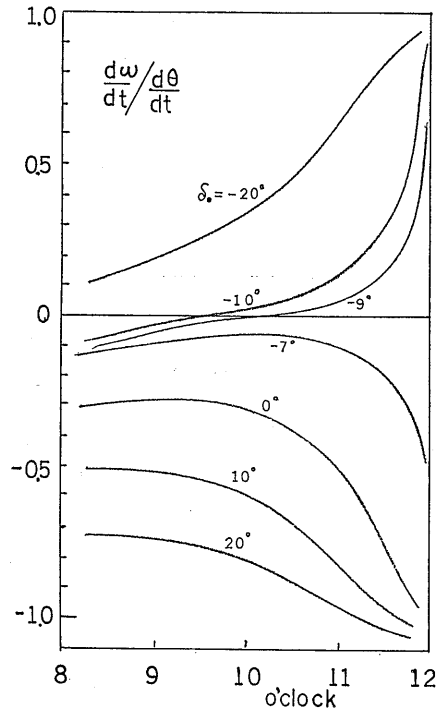


図-28 時差と偏差角の関係

$\times 10^{-6} \cos \phi$ ), 歳差 ( $2.4 \times 10^{-4}$ /年) などがあるが, まったく無視できるので説明を省略する。

#### 4. 追尾回転にともなう力

第1報で提案された構造の太陽熱集光筏は, 洋上で太陽を追尾して回転を行う。筏は位置保持しつつ回転を行うので, 回転にともなう抗力, 海流に対する抗力, また, 風による回転モーメントなどがおよぼされる。第2章で示したように筏を想定海域に浮べるとすると, 太陽を追尾するための追尾角速度は毎日12時において最大となり, しかも緯度と太陽赤緯が近似した日(特異日)においては無限大に近くなる。筏の回転パワーには限界があり, その最大値を適当に設定するためにまず, 筏が位置保持しつつ回転するパワーを見積る必要がある。

なお, 筏の回転にともなう流力特性, 風の影響については, 第1報で調べたデータと研究成果を参考にし検討をすすめた。

##### 4.1 海流と回転の合成

第1報で報告されている筏想定海域付近の海象データによれば, 流速・方向ともあまり変動しないので, 一様な海流中での回転として考えてよい。また, 第1報での筏没水部の流力特性の検討によれば, 円柱浮体間の干渉は無視してよいため, 複数本の浮体のうち1本の浮体について抗力を計算し全浮体にわたって重ね合わせる。

座標系を図-29のように筏の回転中心を原点に東西方向に  $x$  軸, 南北方向に  $y$  軸をとる。ある時刻にお

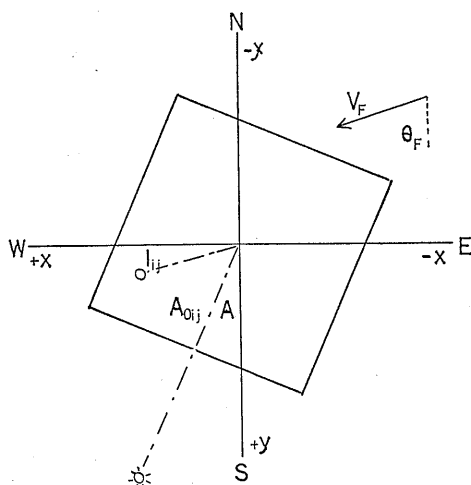


図-29 一様海流中での筏の回転

ける円柱  $P_{ij}$  の座標を  $(x_{ij}, y_{ij})$  とすれば,  $OP_{ij}$  の  $y$  軸となす角  $A_{ij}$  は,

$$A_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{x_{ij}}{y_{ij}} \right)$$

となり, 太陽追尾方位角  $A$  との関係は,

$$A_{ij} = A_{0ij} + A \quad (4.1)$$

となる。ここで,  $A_{0ij}$  は太陽が真南にあるとき筏がとる姿勢において  $OP_{ij}$  が  $y$  軸となす角のことである。

つぎに, 回転中心から円柱までの距離  $l_{ij}$  をとすれば, 円柱の回転速度  $V_{ij}$  は,

$$V_{ij} = l_{ij} \frac{dA}{dt} \quad (4.2)$$

であらわされる。ここで,  $dA/dt$  は太陽追尾角速度である。

そこで, 海流の速度を  $V_F$ ,  $y$  軸となす角を  $\theta_F$  として, 円柱の回転速度と海流速度の合成流による円柱浮体に働く力  $F_{ij}$  は, 次の式で与えられる。

$$F_{ij} = \frac{1}{2} \rho_i S_i C_{Di} \left\{ l_{ij}^2 \left( \frac{dA}{dt} \right)^2 + V_F^2 + 2l_{ij} V_F \frac{dA}{dt} \sin(A_{ij} - \theta_F) \right\} \quad (4.3)$$

ここで,  $\rho_i$ ; 海水密度,  $S_i$ ; 円柱浮体没水部投影断面面積,  $C_{Di}$ ; 抗力係数である。

また, 回転中心  $O$  のまわりの抗力モーメントは,

$$M_{ij} = F_{ij} \sin(\alpha_{ij} - A_{ij}) l_{ij} = \frac{1}{2} \rho_i S_i C_{Di} l_{ij} \left\{ l_{ij}^2 \left( \frac{dA}{dt} \right)^2 + V_F^2 + 2l_{ij} \frac{dA}{dt} V_F \sin(A_{ij} - \theta_F) \right\} \sin(\alpha_{ij} - A_{ij}) \quad (4.4)$$

となる。ここで,  $\alpha_{ij}$  は合成流の  $y$  軸となす角である。

第1報の海象データによれば, 安定な南赤道海流が東ないし北東から  $0.4 \sim 1.3$  kt で流れているから, 海流は東から流れていると仮定する。つまり,  $\theta_F = \pi/2$  とする。さらに, 円柱浮体の本数は121本であるから, モーメントを  $M$  と書きあらためると次のとおりとなる。

$$M = \frac{1}{2} \rho_i S_i C_{Di} \sum_{ij} l_{ij} \left\{ V_F \cos A_{ij} - l_{ij} \frac{dA}{dt} \right\} \times \sqrt{V_F^2 + l_{ij}^2 \left( \frac{dA}{dt} \right)^2 - 2l_{ij} V_F \frac{dA}{dt} \cos A_{ij}} \quad (4.5)$$

そこで, 回転速度と海流速の比  $L \frac{dA}{dt} / V_F$  を横軸

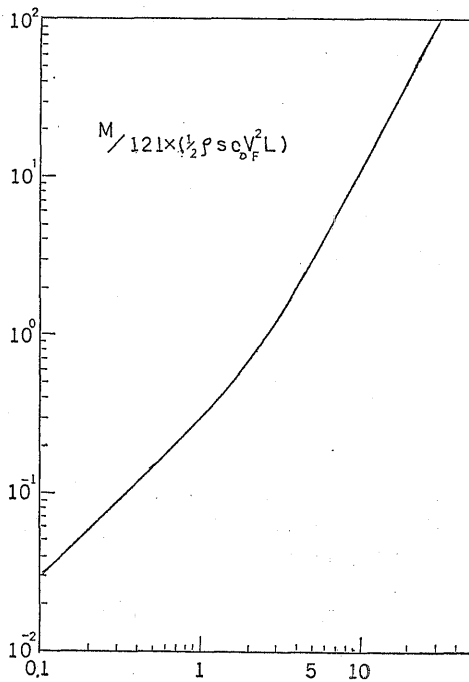


図-30 回転速度・海流速比と抗力モーメントの関係

にとり、 $M/121 \times \frac{1}{2} \rho_i S_i C_{Di} V_w^2 L$  の変化を図-30に示す。 $L$  は筏の辺の長さ 1000m である。計算に使用した数値は浮体の投影面積  $S_i = 8 \times 11.7 + 22 \times 16.58 = 458.36 \text{ m}^2$ 、 $C_{Di} = 0.8$  である。

実際には、式からあきらかなように、角  $A_{ij}$  ひいては、方位角  $A$  によっても  $M$  はことなる。しかし、この変動は図-30に示した主要部分とくらべて  $10^{-3}$  程度のオーダーであるので無視できる。また、計算結果によれば、回転流速にくらべて大きいとき、モーメント  $M$  は回転速度の 2 乗に比例し、逆のときは回転速度と海流速の積に比例する。すなわち、回転速度が大のとき、抗力によるモーメントは静水中におけるものと同じと考えてよいが、回転速度と海流速が同じ程度になると様相が変ることを示す。これは上記のような取扱いで合成してみた結果生じたのであり、実際の場合にもおこりうる現象であるかどうか検討課題として残る。

#### 4.2 回転のパワーとエネルギー

筏の回転に要するパワーやエネルギーを厳密に見積るには、立ち上りに要するパワー、追尾回転停止してから翌日の追尾回転開始方位角までどのような回転を

行うかなど、詳細な検討が必要であろう。しかし、これらの問題は、位置保持と姿勢制御の問題として第 3 報に検討が行なわれるので、ここではパワーとエネルギーの概算だけを目的とし日中は追尾回転を行い、夜間は停止し、立ち上りなどは無視する。

回転に要するパワーとしては、前節の海流と回転の合成抗力に対するもの他に、風によるモーメントに対するものおよび、加速度回転にもなうものが主として考えられる。風によるモーメントは第 1 報において調べられており、筏の姿勢によって向きが逆となりパワーを節約する効果を持っている。風の場合にも、回転との合成が考えられるが、風速にくらべて回転速度が小なので、第 1 報でえられた主要な筏の姿勢にもなうモーメントとくらべて小さく無視できる。加速度にもなうものは、筏の質量以外に円柱浮体の没水部分の運動による付加質量を加えなければならない。第 1 報の結果によれば、この筏の場合、円柱浮体間に干渉はなく、ひとつの円柱浮体の付加質量を 121 昇すればよいことがわかる。結局、回転に要するパワーは、

$$P_r = M \left( \frac{dA}{dt} \right) + (I_0 + I') \frac{d^2 A}{dt^2} \cdot \frac{dA}{dt} + M_w \left( \frac{dA}{dt} \right) \quad (4.6)$$

となる。ここで、

$$M_w = \frac{1}{2} \rho_w S_w L C_m V_m^2$$

$\rho_w$ ; 空気密度,  $S_w$ ; 筏上部構造前面投影面積,  $C_m$ ; モーメント係数,  $V_m$ ; 風速

また、 $I_0, I'$  は筏および付加質量の慣性モーメントである。そして、エネルギーの計算式は減速にたいしてもエネルギーが必要なことを考えにいて、

$$E = \int |P_r| dt \quad (4.7)$$

となる。

そこで、太陽高度  $H = 10^\circ$  となるときを回転開始と回転停止時刻として、回転に要するパワーとモーメントの日変化を求めたのが図-31, 32 である。また、回転に要するエネルギー日変化を半年間にわたって計算したのが図-33 である。この図よりわかるように、特異日 (この例では 2 月 28 日) 付近ではエネルギーが多く要ることがわかる。そこで、緯度と太陽赤緯の差に対するモーメントとパワーの最大値との関係を調べたのが図-34 である。これによれば、緯度と赤緯差が  $10^\circ$  近くまでは、かなり大きい。このことは、パワー

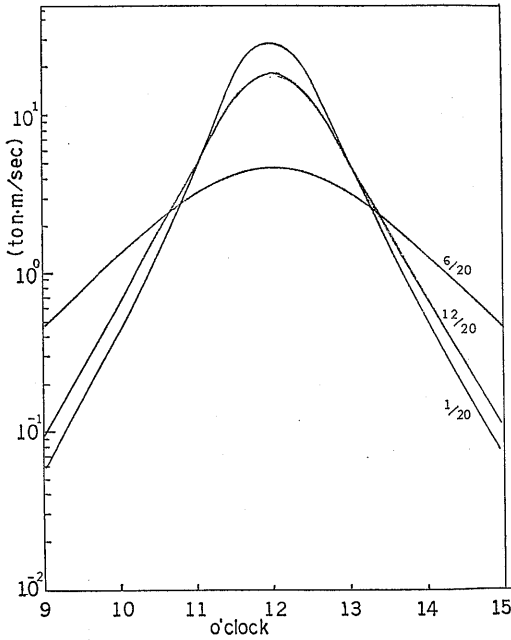


図-31 回転に要するパワーの日変化

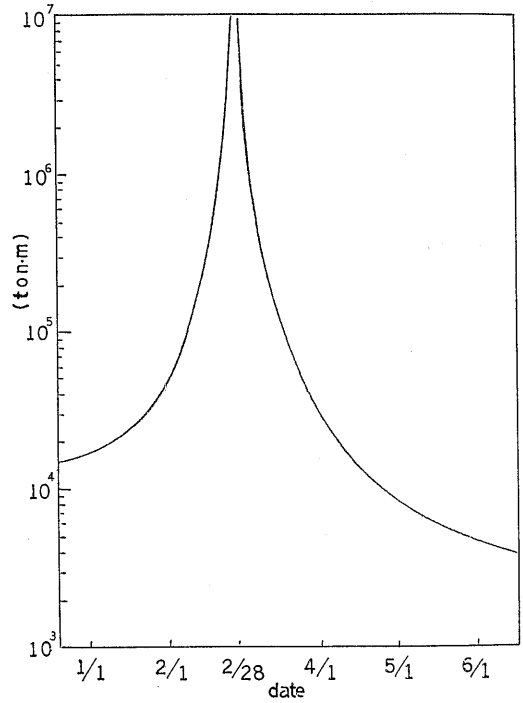


図-33 1日に回転に要するエネルギーの年変化

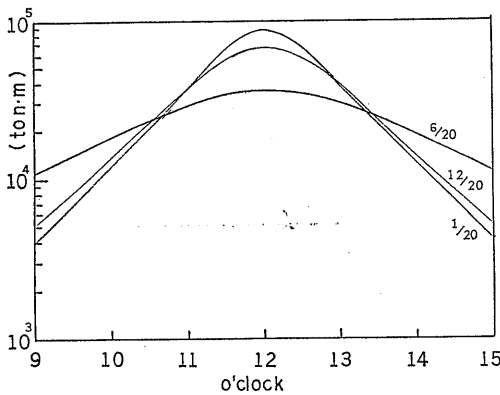


図-32 回転時のモーメントの日変化

の最大限の問題がかならずしも、特異日だけの短期間でなく、広い範囲で検討する必要があることを示す。なお、計算に用いた各数値は、海流速  $V_F=0.4$  m/sec, 風速  $V_w=5$  m/sec,  $S_w=10^3$  m<sup>2</sup>,  $I'=I_0=\frac{1000^3}{3}W$  で  $W$  は筏の全重量である。

### 5. 特異日付近の追尾

前章で、太陽を忠実に追尾したとき、特異日だけでなく、特異日付近では、多くのパワー、エネルギーを要することがわかった。また、第3章では、種々の要

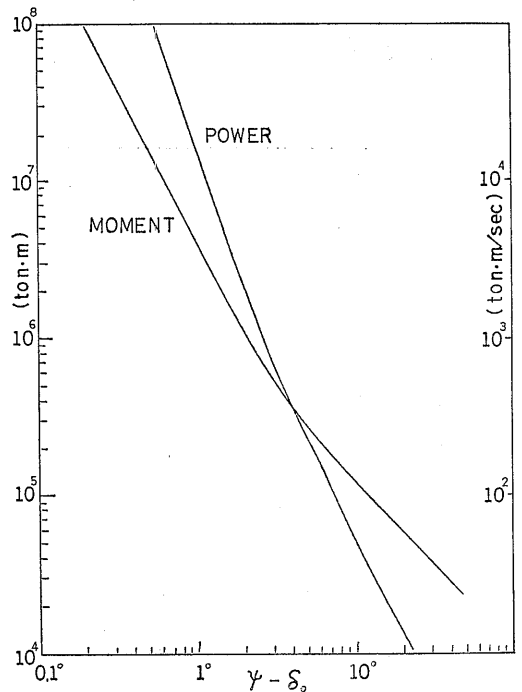


図-34 緯度・太陽赤緯差とモーメント及びパワー最大値の関係

因による追尾誤差から生ずる集光ロスを求めた。そこで、集光ロスがあってもそれ以上に回転パワー・エネルギーを少なくすればよいという考えの下で、最適な追尾方法はどのようなものか論じる。

まず、第3章でえた偏差角と相対ロスの関係から、ロスに対応した偏差角を求め、対応する方位角誤差の範囲を求める。第3章で示したように、偏差角と方位角誤差の関係は以下の式である。

$$\sin \Delta A = \tan \omega \cdot \tan H \quad (5.1)$$

この関係によって求めた一定集光ロスに対応する方位角誤差の範囲を図-35に示す。

これらの図からわかることは、緯度・太陽赤緯差が小さいほど、一定集光ロスに対応する方位角誤差の許容範囲が大きくなることと、正午に近いほど同じく許容範囲が大きくなることである。これは集光ロスを許しても、それ以上にパワーやエネルギーを小さくする

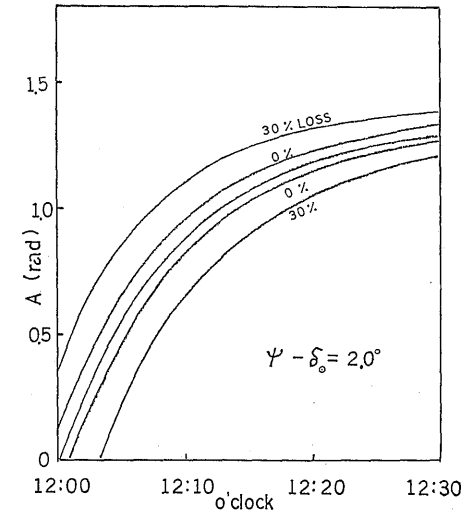
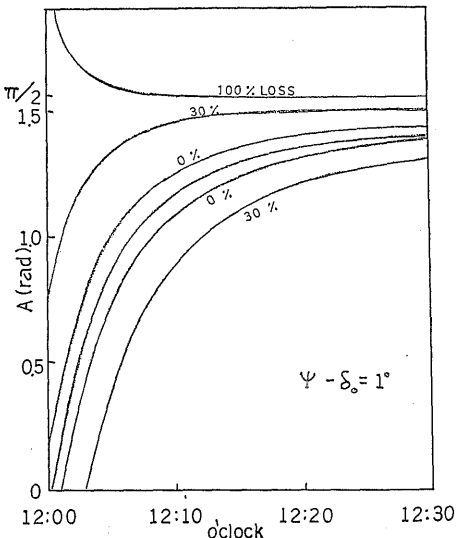
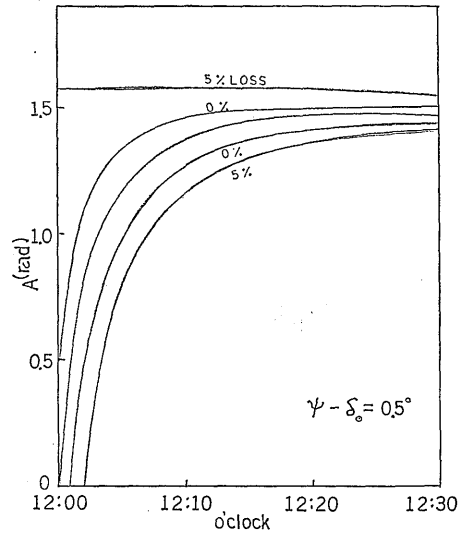
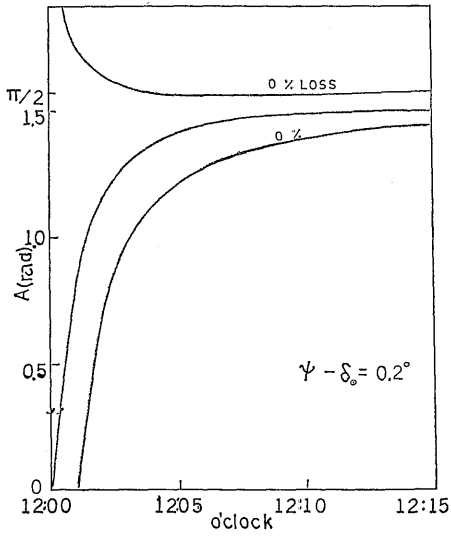


図-35 正午付近の方位角とある相対ロスに対する許容範囲



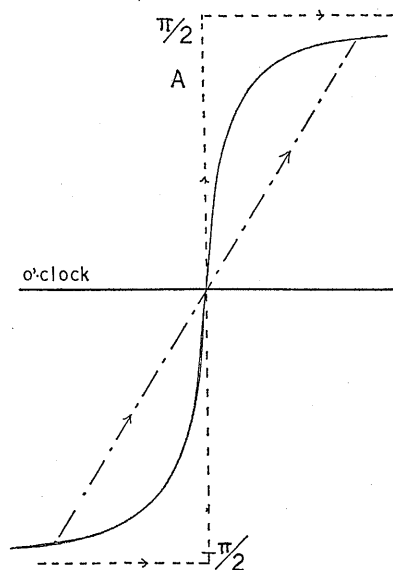


図-36 太陽追尾の固定モードと等速モード

という考え方にとって始都合である。また、大きな角速度の必要な時間帯は、正午をはさむわずかなあいだであることから、集光ロス、たとえば1年を通じてみれば、全集光量のわずかな比率を占めるにすぎないこともわかる。

そこで、ある程度の集光ロスを許しながら追尾する方法として、図-36 に示す様に等速モード（図の鎖線）、固定モード（図の点線）のふたつを考えた。等速モードとは、ある時刻からある時刻まで太陽の運行にはしたがわず、等速回転を行う。固定モードとは、特異日においては、太陽が真東から出、真西に没するため、鏡は回転させず鏡の長手方向を東西に固定する。

以上のモードに対して、集光ロス（実線）と回転エネルギー節約（破線；集光段階換算）の関係を 図-37 に示す。等速モードはふたとおりの適当にえらんだ角速度の場合を示す。集光ロスが、エネルギー節約より小さいような緯度・太陽赤緯差の場合は、上記の追尾モードをとればよい。しかし、逆の場合は、むしろ正確に追尾した方がよい。（たとえば、0.0004 rad/sec の等速モード）

ところで、緯度・赤緯差がほぼ 1° 以内のときは、固定モードがよいことがわかるが、1°~4° のあいだでは、0.0008 rad/sec の等速モードでは集光ロスの方が大きい。したがって、もうすこし大きい角速度の等速モードを採用しなければならない。そこで、こんどは

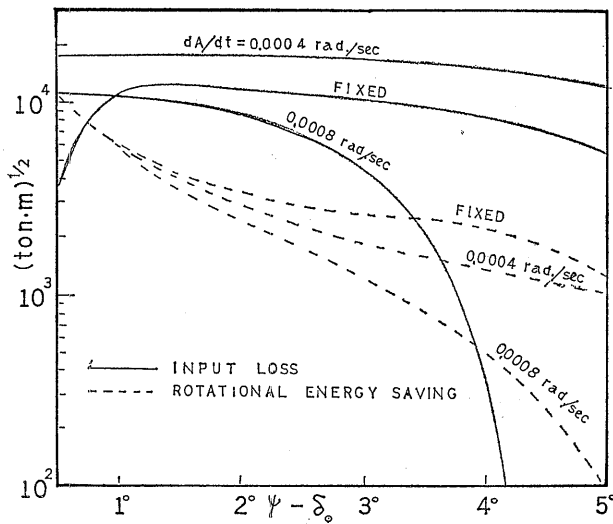


図-37 等速モードおよび固定モードに対する全集光ロスと回転エネルギー節約（集光段階換算）

緯度赤緯差をパラメータとして、等速モードの角速度に対する集光ロス・回転エネルギー節約の関係を 図-38 に示す。おのおのの  $\psi - \delta_0$  において、実線と破線の

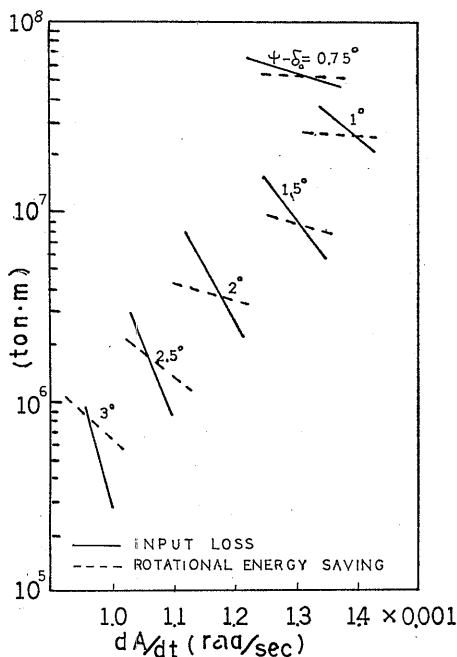


図-38 等速モードに対する全集光ロスと回転エネルギー節約の関係

交点に対応する角速度の等速モードが、最適の追尾方法となる。これをみると、筏は、0.0014 rad/sec の角速度（筏最外端速度 1 m/sec）の回転を可能とするパワーをそなえておればよいことになる。もちろん、集光ロスが回転エネルギー節約を上まわっても、それがわずかな時間帯に限られ、全体の集光量に対して無視できる程度ならば許されるとするならば、上記パワーはもっと小であってもよいと考えられる。

6. むすび

放物柱面鏡をのせた筏が太陽を追尾回転する方式について、光学的諸問題と追尾方法を第1報で提案された太陽熱集光筏を主な対象に検討した。

この報告の主な目的はふたつあり、ひとつはこの方式の太陽追尾にともなう諸基礎式の導出と、計算結果の表示で、第3報、第4報での利用の便をはかったものであった。もうひとつは、想定海域が赤道付近であることから生ずる新しい問題、すなわち、追尾角速度が無限に大きくなる特異日の前後で、どのような追尾方法をとればよいかを示すことであった。えられた結果を以下にまとめる。

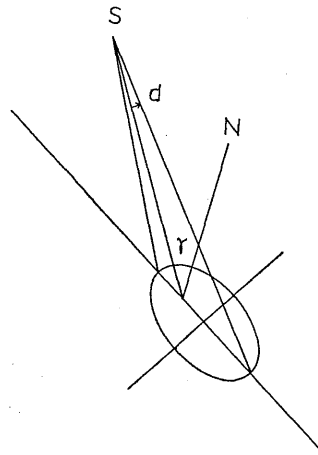
- (1) 太陽方位角・角速度・角加速度などの想定海域における変動および計算式の改良と近似式がえられた。
- (2) 太陽光入射角にかたよがりがあるとき、偏差角と集光ロスの関係をえた。太陽高度  $H$  と偏差角  $\omega$  によってことなるが、 $\omega=0.005$  rad 程度までだと、ほとんど集光ロスがない。
- (3) 太陽追尾誤差による方位角のずれ、位置誤差や筏の傾き、平均太陽運行からのずれ等から生ずる偏差角  $\omega$  をあたえる式の導出と計算。

- (4) 海流や風の中で筏が回転するのに必要なパワーやエネルギーの式と計算結果がえられた。
- (5) 追尾角速度が非常に大となる難点の回避は、追尾方法として角速度 0.0014 rad/sec 以下の等速モードまたは固定モードをとることによっておこなえる。それは、集光ロス以上に回転に要するエネルギーを節約できるからである。

以上によって目的はほぼ達成されたわけであり、今後に残された問題点としても開発段階にまで進めばともかく、調査段階において重要なものはないと思われる。

Appendix

太陽光円錐が平面に斜め入射したとき、太陽像が長径  $l'/\cos \gamma$ 、短径  $l'd$  の楕円で、その中の強度が一樣という仮定について考慮する。実際には、付図のよ



付図 太陽光円錐が平面に斜め入射するとき

付表 太陽輝度分布<sup>2)</sup>

見かけの太陽円板上で中心から  $\rho$  なる距離（半径を単位とする）にある点の輝度との比を種々の波長について示す。 $\rho=0$  は太陽円板の中心、 $\rho=1$  は縁 (Abbot: Smithsonian Ann 4, 1932)

$\rho = \sin \theta$	0.00	0.20	0.40	0.55	0.65	0.75	0.825	0.875	0.92	0.95
$\cos \theta$	1.000	0.980	0.916	0.836	0.760	0.661	0.565	0.484	0.392	0.312
$\lambda$ 3737 A	1.000	.984	.934	.871	.811	.730	.652	.580	.499	.432
4265	1.000	.985	.937	.872	.812	.734	.655	.587	.511	.445
5062	1.000	.989	.951	.900	.852	.787	.720	.660	.591	.529
5955	1.000	.990	.959	.916	.876	.821	.764	.713	.651	.595
6702	1.000	.993	.967	.929	.893	.844	.794	.748	.692	.640
8580	1.000	.993	.972	.944	.916	.877	.836	.799	.753	.710
10080	1.000	.994	.975	.949	.923	.888	.851	.816	.773	.733

うに光円錐中心軸は楕円の中心を通らない。

正確には、

$$\begin{cases} \text{長径} = \frac{l' \tan d}{\cos \gamma (1 - \tan^2 d \tan^2 \gamma)} \\ \text{短径} = \frac{l' \tan d}{\sqrt{1 - \tan^2 d \tan^2 \gamma}} \end{cases}$$

となる。 $\tan d \approx d$  としてよいから、近似が成立するためには、

$$1 \gg d^2 \tan^2 \gamma$$

の必要がある。しかしながら、 $\gamma < 80^\circ$  であれば、 $d^2 \tan^2 \gamma < 6.51 \times 10^{-4}$  となるから、かなり広い範囲にわたって近似が成立する。

太陽表面の輝度は付表のように中心が大きく周辺部で小であるから、太陽像の放射強度分布も実際には一様ではない。この条件をいれて計算した例<sup>9)</sup>では、一様とした場合にくらべて、焦点付近で 10% ぐらい強度が増加する。すなわち放射強度分布がことなってくる。しかし、現在のところでは、受光量すなわち積分したものを求めることが目的なので輝度一様の仮定でよいと思われる。

## 参考文献

- 1) SCHUSTER et al.; Fixed Mirror Solar Concentration For Power Generation; International Symposium on Solar-Thermal Power Stations; 1978
- 2) GHARMALKAR et al.; Optical Design and Performance of an Inverted, Segmented Mirror Solar Concentration; ASME Publication 78-HT-32
- 3) BURKHARD et al.; Solar Concentrating Properties of Truncated Hexagonal, Pyramidal and Circular Cone; Applied Optics, Vol. 17, No. 15, 1978
- 4) 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, 昭和 56 年 5 月
- 5) 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 筏の構造と流力特性, 船舶技術研究所報告, 未発表
- 6) 柴田行男・桜井武磨; Parabolic Cylinder による斜入射太陽放射の集中比および到達温度, 東北大学科学計測研究所報告, 第 27 巻, 第 1 号 1-2, 13-28 (1978)
- 7) 理科年表 1977・1978 年版
- 8) 荒木俊馬; 現代天文学事典, 恒星社, 昭和 46 年, pp. 796