

# 太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究

(第5報：他の集光方式の検討)

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 (5th Report : On the other solar collecting system)

By

Kinji HAMAJIMA and Kenji WATANABE

### Abstract

The project is for hydrogen production with solar energy on a huge raft floating on the South Pacific Ocean and for transport of liquified hydrogen. In previous papers, linear parabolic mirror accompanying sun following rotation of the raft was investigated as a solar energy collecting system. The recent report proposes and studies two alternative collector systems; one is of many rotating narrow mirrors and a linear receiver, another is solar cells array. It is not necessary to have regard to the raft rotation for narrow mirrors system. Solar cells system does not necessitate sun following.

Results are following; liquified hydrogen income by narrow mirrors system is a little smaller than that by the previous system, and 18-19% efficiency of solar cell is necessary to gain 5000ton hydrogen income per year of the previous system.

### 1. はじめに

この第5報に先立つ第1報<sup>1)</sup>から第4報<sup>4)</sup>までにおいては、南太平洋上に巨大な筏を浮かべ、放物柱面鏡を用いて太陽熱を集め、作動流体を加熱してタービンを動かし、発電して海水を電気分解し、得られた水素を液化して消費地に運ぶ、という計画に多面的な検討を加え、それが技術的に可能であるとの結論<sup>4)</sup>を得た。

この検討にあたって、他の太陽熱集光方式と異なる特徴を持つ方式が提案<sup>1)</sup>された。すなわち、放物柱面を頂線で切った片側を鏡面として、これを筏上に水平にのせ、太陽光線が放物柱面の軸面に平行に入射するように、筏自体が太陽を追尾回転するというものである。

このとき、反射光線はかならずこの放物柱面の焦線上に達するから、焦線上に集熱部を設けて太陽熱を集めることができる。当然、追尾回転にさいし、外乱の

多い洋上で筏がどの程度に精密な運動をおこない得るかが問題となったが、くわしい検討を加えた結果、許容誤差の範囲内で追尾可能であると結論<sup>2),3)</sup>された。

しかしながら、検討された集光から液化水素輸送までのシステムには、他の方式によって代替できる部分があると考えられ、その場合よりすぐれたものとなるかどうかの検討が計画の段階から必要となる。そこで、本報では、集光方式の代案について考えてみることにする。

提案されたような巨大な筏(1km×1km)の回転運動は角速度が小とはいへ未経験の分野に属し、また、この計画が実用化されるときには多数の筏が設置されるので、さらに筏群の運動という問題が加わる。筏を静止させたまま、鏡だけが太陽追尾運動をおこなうという代案の検討にも意味があろう。

放物柱面鏡はそのままでは幅100mという大きさなので追尾運動は困難で、これを多数の小さい平面鏡におきかえる方法をとる。この方法で多く用いられるのは、中央に集光塔を置いて一点集光する central receiver

\*共通工学部

原稿受付：昭和59年4月16日

方式であるが、筏の有効面積が小となる<sup>2)</sup> 不利があり、また、放物柱面鏡を用いる前の方式と対比できる方がよいから、集熱部が線形で水平に置かれ、これに平行な細長い平面鏡群の反射光を集める方式を検討する。

また、前方式はもちろん、この細長い平面鏡群の場合でも、筏の位置や追尾方向の誤差、あるいは傾きによって、鏡への入射角が変って集熱部から外れるための集光ロスが大きいのではないかという不安がある。

検討の結果、前方式では、構造が充分な剛性を持たず、集光ロスは無視できることがわかり<sup>2),3)</sup> 本報告でも細長平面鏡方式について同様に検討をおこなうが、第3の方式として、筏上に太陽電池を敷きつめるという方法をとれば、太陽追尾にまつわる配慮は一切必要なくなるというメリットが出てくる。

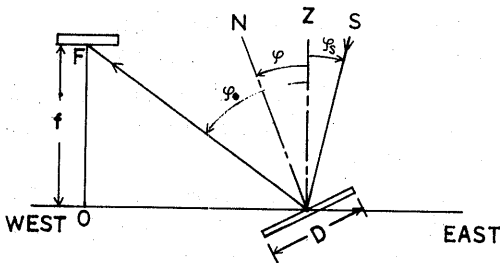
以下、このふたつの集光方式代案に対して検討をおこなうが、細長平面鏡方式については、その構成の概要、受熱量、入射角ずれにともなう集光ロス、このずれを生ずる追尾誤差のみつもり、鏡回転にともなう諸問題についてしらべる。また、太陽電池方式については、海塩粒子による汚染にともなう効率低下を新しい課題として検討する。

最後に、これら3方式のエネルギーの流れ、液化水素収量などを比較し、細長平面鏡方式がはたして前方式とくらべてすぐれているか、太陽電池方式では、同程度の液化水素収量を実現するには、電池効率が何パーセントでなければならないか、などの問題に解答をあたえる。

## 2. 細長平面鏡方式

### 2.1 概 要

この方式は、各辺が東西および南北方向に平行になるよう方向および位置を固定した正方形の筏上に、南北軸のまわりに回転できる幅Dの細長い平面鏡を、東西方向に多数ならべ、反射した太陽光を、やはり南北に長い集熱部に集めるものである。集光の原理を図一

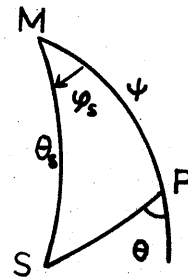


図一 細長平面鏡による集光系

1に示す。Zを鉛直方向(すなわち天頂方向)、Sを太陽入射光の方向の紙面への投影、Nを鏡の垂線方向とし、Fを集熱部の中央とする。ZとFのなす角 $\phi_0$ は、ひとつの鏡の位置をあらわすパラメータと考えられ、入射方向をあらわす角 $\phi_s$ (すべての鏡に共通)の変化にともなう鏡の回転角 $\phi$ は

$$\phi = \frac{1}{2}(\phi_0 + \phi_s) \dots\dots\dots (5.1)$$

とあらわされる。鏡の回転軸方向(水平方向)をMとし、入射光線と方向Mのなす角を $\theta_s$ とすると、図二



図二 平面鏡回転軸方向Mと極P、太陽Sのなす球面三角形

の球面三角形より

$$\begin{cases} \cos\theta_s = \sin\delta_0 \cos\psi - \cos\delta_0 \sin\psi \cos\theta \dots\dots (5.2) \\ \sin\phi_s = \cos\delta_0 \sin\theta / \sin\theta_s \dots\dots\dots (5.3) \end{cases}$$

となる。ただし、 $\psi$ は緯度、 $\delta_0$ は太陽赤緯、 $\theta$ は太陽時角である。鏡の回転角速度は

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d\phi_s}{dt} \dots\dots\dots (5.4)$$

であり、どの鏡も同一角速度で回転させればよいことになる。この方式で、前報と同様に135°W8°Sの海域で集光するものとし、太陽赤緯 $\delta_0$ のいろいろな値に対して $\phi_s$ 、 $\theta_s$ の時刻変化を求めれば図三、図四のようになり $\phi_s$ は1日のあいだではほぼ一樣に変化し、 $\theta_s$ の1日のあいだの変化は小さいことがわかる。さらに、球面三角の式を微分し、 $\phi_s$ の微分を求めれば、鏡の回転角速度 $d\phi/dt$ が得られ、図五のようになる。回転角速度がいちじるしく小であるだけでなく、1日のあいだの変化は大きくとも10%程度でしかない。これは、どの鏡も同一角速度で回転させればよいことと相まって、回転の機構の簡単さや制御の容易さをもたらすも

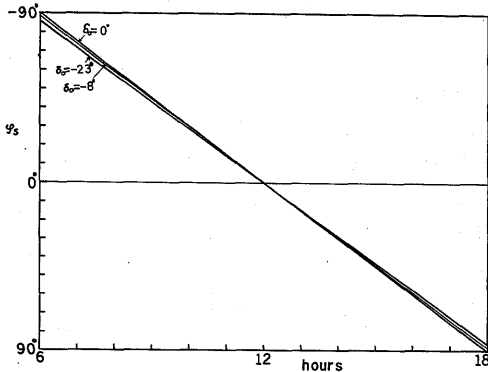


図-3 太陽赤緯 $\delta_s$ をパラメータとする $\varphi_s$ の時刻変化

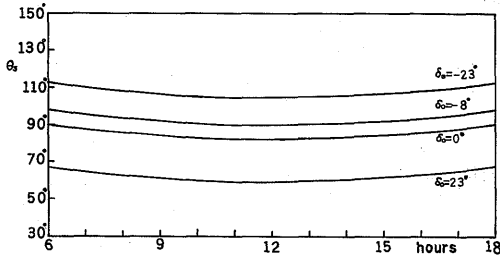


図-4 太陽赤緯 $\delta_s$ をパラメータとする $\theta_s$ の時刻変化

のと思われる。

つぎに、この光学系に具体的な寸法をあたえてみる。

前報の放物柱面鏡方式と対比しやすくするため、同じ大きさの1km四方の筏表面を東西方向に100m、長さ1000mの10ブロックに分け、それぞれのブロックの中心線上高さ50mのところに集熱部を割り当てる。細長平面鏡の幅Dは1m(100倍集光)とし、ブロックの端にある鏡もふくめてすべての鏡で反射された光が、全部集熱部に集まるようにすれば、集熱部の幅は $\sqrt{2}$ mとなる。これまた、放物柱面鏡方式において検討したもの<sup>2)</sup>と、たまたま一致することになった。

これら鏡と集熱部および発電・水素製造用プラントをのせる筏の概要を考えると、まず総重量については上部構造の主要部分を占める鏡と集熱部のスケールが放物柱面鏡と同じであり、発電・水素製造用プラントは全く同一のものとしてよいので、近似的に前報で提案された筏と同じとしてよからう。円柱浮体の数も同じ121本とすれば、浮体形状寸法については筏にはたら

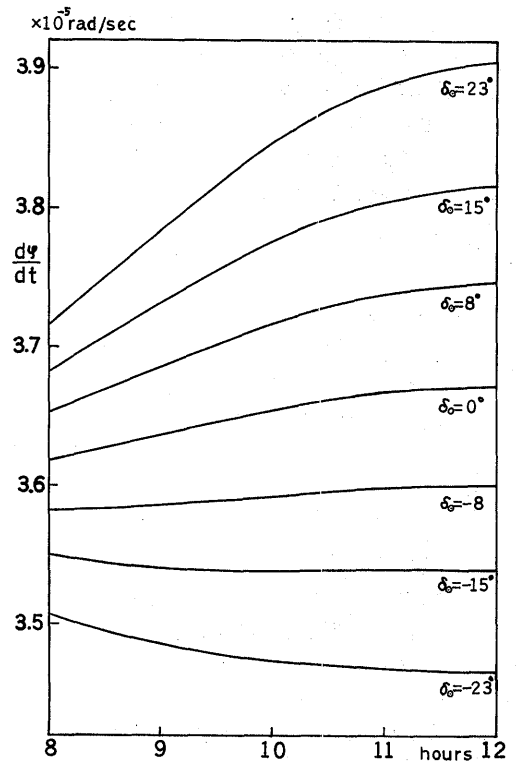


図-5 太陽赤緯 $\delta_s$ をパラメータとする鏡回転角速度の時刻変化

く波浪外力・海流力・波漂流力<sup>3)</sup>も同じことになる。これらの力がシステムの効率に影響する割合は小さいので、このようなおおよその見積りでよい。

### 2.2 集熱量とそのロス

この方式で、どの程度の集熱量がみこまれるか、また太陽追尾の誤差にともなってどの程度の損失があるかを検討する。西から鏡に番号をつけ、第n番目の鏡への入射角余弦は

$$\sin \theta_s \cos \frac{1}{2}(\varphi_{on} - \varphi_s) \dots\dots\dots (5.5)$$

となる。これに鏡の面積と太陽入射強度を乗ずれば鏡1枚あたりの集熱量が得られるはずであるが、これを減少させるつぎの2要因を考慮する必要がある。

ひとつは入射光に南北方向成分があつて、反射光が集熱部から外れることである。この結果、第n番目の鏡の有効長さは

$$1 - f|\cot \theta_s|/l \cos \varphi_{on} \dots\dots\dots (5.6)$$

の割で減少する。ここで、集熱部高さ  $f = 50$ m, 集熱

部長さ  $l = 1000\text{m}$  である。

さらに、となり合う鏡のあいだで、入射光と反射光のしゃへいがおこる場合を考えなければならない。n 番目の鏡の反射光が、西または東どりの鏡によってしゃへいされるのは、 $\varphi_{n-1}, \varphi_n > 0$  (西どりにより) と  $\varphi_n, \varphi_{n+1} < 0$  (東どりにより) の場合に限る。

しゃへいがおきる条件は、それぞれ

$$\cos(\varphi_{n-1} - \varphi_{0n}) + \cos(\varphi_n - \varphi_{0n}) > 2 \cos \varphi_{0n} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

$$\cos(\varphi_n - \varphi_{0n}) + \cos(\varphi_{n+1} - \varphi_{0n}) > 2 \cos \varphi_{0n} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

で、鏡の有効幅は、それぞれ

$$\frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2 \cos \varphi_{0n} - \cos(\varphi_{n-1} - \varphi_{0n})}{\cos(\varphi_n - \varphi_{0n})} \right\} (m) \dots (5.9)$$

$$\frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{2 \cos \varphi_{0n} - \cos(\varphi_{n+1} - \varphi_{0n})}{\cos(\varphi_n - \varphi_{0n})} \right\} (m) \dots (5.10)$$

となる。入射光のしゃへいも同じ場合におこり、その条件と有効幅は上の式で  $\varphi_{0n}$  を  $\varphi_s$  におきかえたものになる。この条件を機械的に適用すると、ひとつの鏡について、入射光のしゃへいと反射光のしゃへいが、みかけ上同時におきている場合が出てくるが、それはかならず一方の有効幅の部分が他方を被覆する状態であるので、有効幅の小の方をとればよい。

こうして、それぞれの鏡の有効面積がきまり、これに入射角余弦と入射強度を乗じて、すべての鏡にわたって加え合わせると、各時刻における集熱量が定まる。

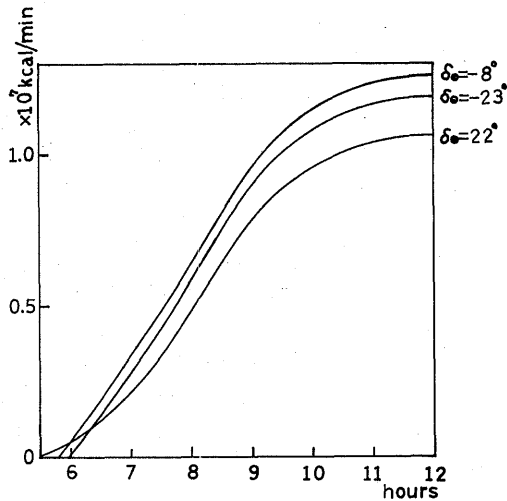


図-6 太陽赤緯  $\delta_0$  をパラメータとする集熱量時刻変化

図-6 は、太陽赤緯の色々な値に対しての集熱量の時間変化を示す。これを放物柱面鏡を用いたときと比べると、以前に報告<sup>5)</sup>しているように図-7のようになる。縦軸は、筏全面に垂直入射するとしたときの全エネルギーに対する集熱量の比であって、いわば集光効率をあらわす。10時から14時のあいだでは、放物柱面鏡の方が効率よいが、それ以外では逆転する。しかし、大きい差はなく、年間にわたって積分した結果もほとんど差はない。

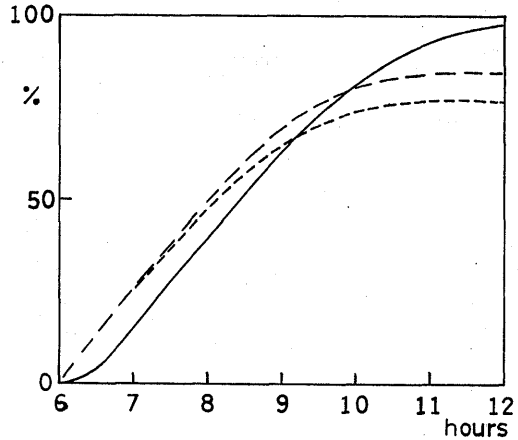


図-7 放物柱面鏡——と細長平面鏡---の集光量比較 (3月28日, なお-----はcentral receiver方式)

放物柱面鏡方式においておこなったと同様に、この光学系への入射誤差によって生ずる集熱ロスを考察しよう。それには、ある鏡回転角に対応する太陽入射方向から実際の入射方向が  $\Delta\varphi_s, \Delta\theta_s$  ずれているとして、それぞれに対する集熱量の変化を計算する。反射方向も同じだけずれるので、集熱部との幾何学的関係から、集熱部から外れる反射光量を計算する。さらに、しゃへい関係も変わるわけであるが、その効果は、となり合う鏡のあいだの距離を  $d$  とするとき有効幅の変化が、 $d\Delta\varphi_s$  のオーダーと見積られる程度である。これは、集熱部の位置における反射光のずれが、少なくとも  $50 \Delta\varphi_s (m)$  のオーダーであるのに対して無視できるので ( $d < 1m$ ), 計算にいれないことにした。 $\Delta\varphi_s$  に対する相対集熱量計算結果の1例を図-8に示す。正午においては  $\Delta\varphi_s$  の正負につき対称であるが、他の時刻ではいちじるしく非対称である。午前と午後では  $\Delta\varphi_s$  の正負に関する対称性が逆転する。また他の太陽赤緯の場合の計算でも、ほとんど同じ相対集熱量の曲線が得られている。なお、相対集熱量がほんのわずか1.0より

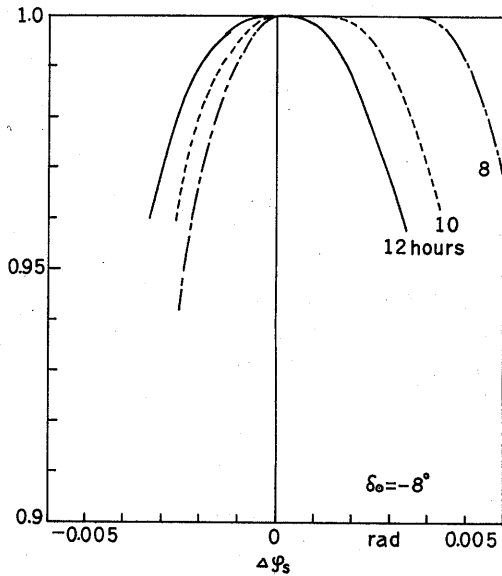


図-8 時刻をパラメータとする誤差 $\Delta\phi_s$ に対する相対集熱量

大となる場合がみられたが、これは入射角余弦を増加させる方向に入射角がずれた影響と思われる。

このように、時刻によって異なる集熱ロスのためやすを作るため、各 $\Delta\phi_s$ に対する集熱量の時間平均を作り、平均相対集熱量として表わしたのが、図-9である。  
 $|\Delta\phi_s|=0.002$  radianのとき約99%、 $0.003$  radianになると95%であり、それ以上になると急速に減少する。

$\Delta\theta_s$ に対する相対集熱量を求め、変化のもっとも大きかった、大陽赤緯 $23^\circ$ で正午のときの例を、図-10に示す。  
 $|\Delta\theta_s|=0.015$  radianで約1%の変動で、 $\Delta\phi_s$ にくらべて集熱量変化ははるかに小である。また、 $\Delta\theta_s$ の符号によって相対集熱量が、1.0より大となったり小となったりする。これは $\Delta\theta_s$ が入射光の南北方向へのずれなので、入射光方向余弦の増加と集熱部から外れる光の減少をもたらす場合があるためである。 $\Delta\theta_s$ が正または負になる確率はほとんど同じであるから、平均して $\Delta\theta_s$ に起因する集熱量変化はないとする。

したがって、 $\phi_s$ のずれに対するものだけを考慮すればよい。 $\Delta\phi_s$ は放物柱面鏡方式における偏差角 $\omega^2$ に相当し、 $\omega$ の許容幅 $0.005$  radian<sup>2)</sup>に対し、許容幅を99%集熱に対応させれば $0.002$  radianとなって小さい。放物柱面鏡の場合の取扱い<sup>2)</sup>と同じく太陽像の拡がり(視半径 $0.005$  radian)まで考慮すればこの許容幅は大

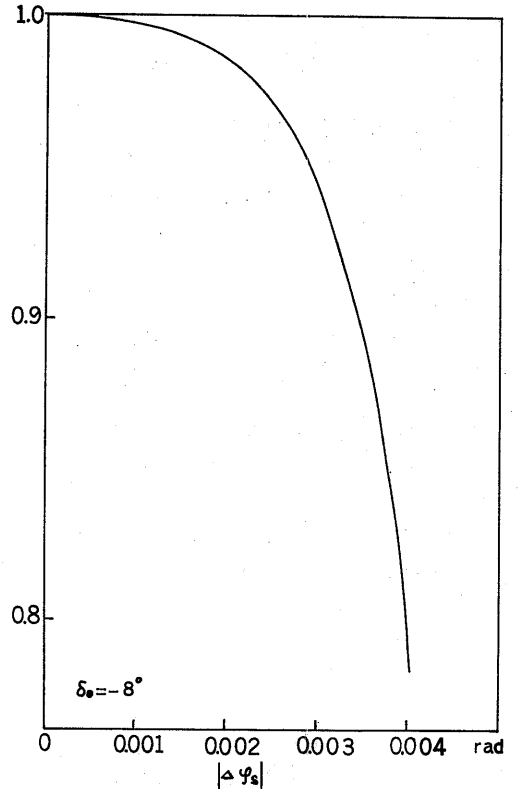


図-9 全時刻にわたって平均した $\Delta\phi_s$ に対する相対集熱量

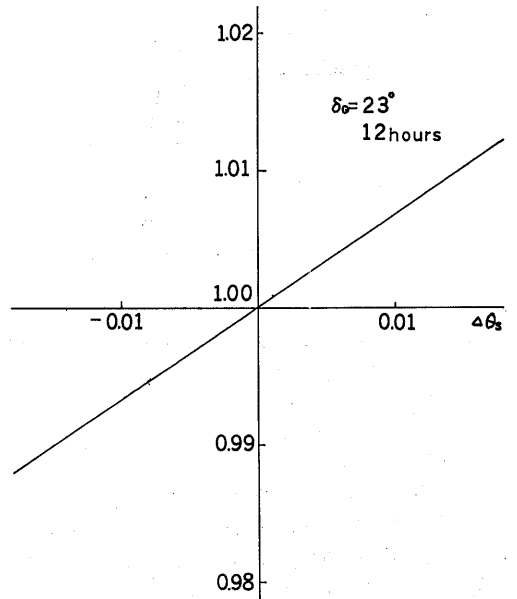


図-10 誤差 $\Delta\theta_s$ に対する相対集熱量

きくなるが、小さい許容幅を用いるのはより安全側に立って検討することになるから  $|\Delta\varphi_s| = 0.002$  radian を以後めやすとして採用する。

2.3 追尾誤差とその見積り

細長平面鏡方式での追尾誤差は、鏡の回転におけるものと、鏡をのせた筏が正しい状態にないためのものに分けることができる。前者は単に角  $\varphi_s$  における誤差に還元される。ところで、図-5にみるように、鏡の回転角速度は  $10^{-5}$  radian/sec のオーダーであり、1日間の変動は10%以下である。たとえ回転角速度に100%の誤差(すなわち回転ストップ)があったとしても、1%集熱ロスに対応する  $|\Delta\varphi_s| = 0.002$  radian になるまでには約1分かかる。10%の誤差であれば約10分かかる。誤差をチェックし、正常の状態にもどすことは容易と思われる。

筏の状態としては、想定海域からの位置ずれ、筏が正しい方向をむいていないとき、および筏が水平でなく傾いているとき、の3通りがある。

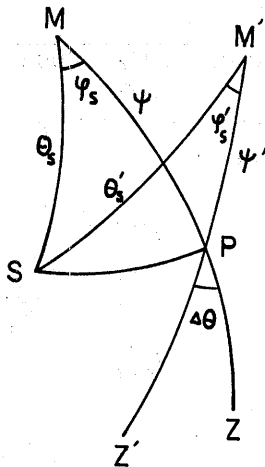


図-11 筏の位置ずれ(天頂Z→Z'への移動)の球面三角形

(1) 位置ずれによる誤差

図-11のように、想定地点の天頂をZとして、位置ずれの結果、筏の存在する位置の天頂がZ'になったとする。球面三角形の公式を用い微分して一次の微量のみ残し、東西方向へのずれを  $\Delta x$ 、南北方向へのずれを  $\Delta y$  とすると、

$$\Delta\theta_s = \frac{1}{R_0} \left( \Delta y \frac{\sin\delta_0 \sin\psi + \cos\delta_0 \cos\psi \cos\theta}{\sin\theta_s} + \Delta x \sin\varphi_s \tan\psi \right) \dots\dots\dots (5.11)$$

$$\Delta\varphi_s = -\frac{\tan\varphi_s}{\tan\theta_s} \Delta\theta_s - \frac{\Delta x \cos\delta_0 \cos\theta}{R_0 \cos\psi \cos\varphi_s \sin\theta_s} \dots\dots\dots (5.12)$$

となる。ただし、 $R_0$ は地球半径である。 $\Delta\varphi_s$ の計算結果を図-12、図-13に示す。 $|\Delta\varphi_s| < 0.002$  radianは、すくなくとも  $|\Delta x| < 12\text{km}$   $|\Delta y| < 60\text{km}$ の範囲に相当する。誤差の問題がなくとも、海流と風に抗して常に位置保持をおこなう必要があり、そのための推進力を装備することになるので、特別の対策はいらないし、この程度の位置ずれ以内におさえるのは容易である。

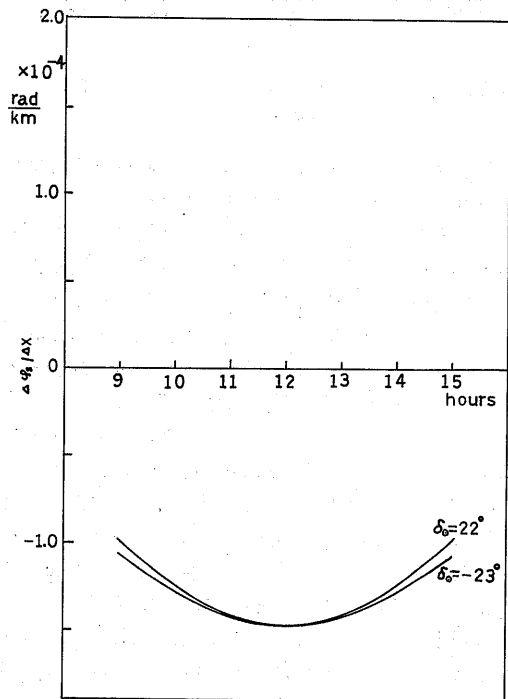


図-12 東西方向位置ずれによる  $\varphi_s$  の変化

積で $100 \times 1000 \text{ m}^2$ ,  $\rho$ は空気密度,  $U$ は風速である。モーメント係数は

$$C_M \approx -0.4 \sin 2\theta \dots\dots\dots (5.16)$$

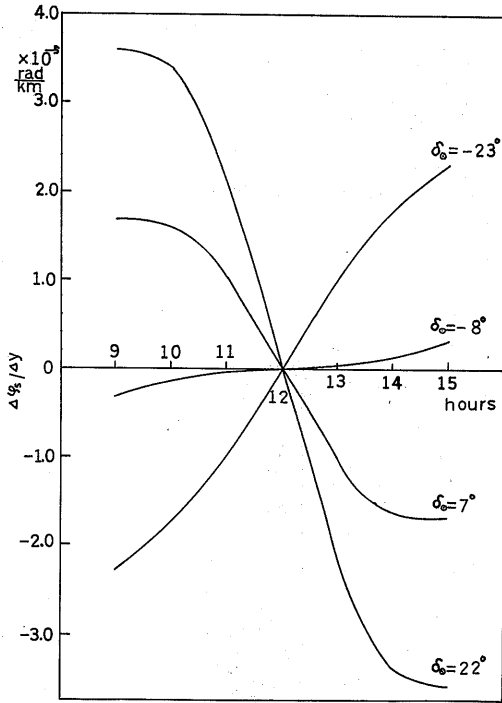


図-13 南北方向位置ずれによる $\varphi_s$ の変化

(2) 筏の方向による誤差

筏は上部の細長平面鏡が正しく南北をむかうように浮んでいるが、その方向が $\Delta A$ だけ回転してずれたときの誤差は、図-14から

$$\Delta \theta_s = \Delta A \sin \varphi_s \dots\dots\dots (5.13)$$

$$\Delta \varphi_s = \Delta A \cos \varphi_s \cot \theta_s \dots\dots\dots (5.14)$$

となる。計算結果を図-15に示す。もっとも大きい場合で $|\Delta \varphi_s| = \frac{1}{2} |\Delta A|$ ぐらいであり、常に $|\Delta A| < 0.004$  radianであればよい。この範囲におさまられるかどうかは、波・海流・風の影響を考察しなければ保証できない。前報<sup>3)</sup>では、これらは空間的に一様とみなしたので、ここでも同様とすれば、波と海流は、円柱浮体相互間に干渉はないとする第1報<sup>1)</sup>の結果からみて、筏に回転モーメントを生じさせない。残るは風だけであって、第1報<sup>1)</sup>の放物柱面鏡筏での結果では

$$M = C_M \cdot \frac{L}{2} \cdot S \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 \dots\dots\dots (5.15)$$

と表わされ、 $L$ は筏の辺長で1000m,  $S$ は筏の正面面

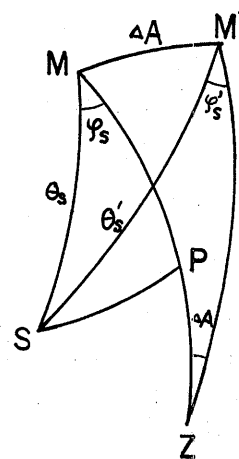


図-14 筏の方位変動の球面三角形

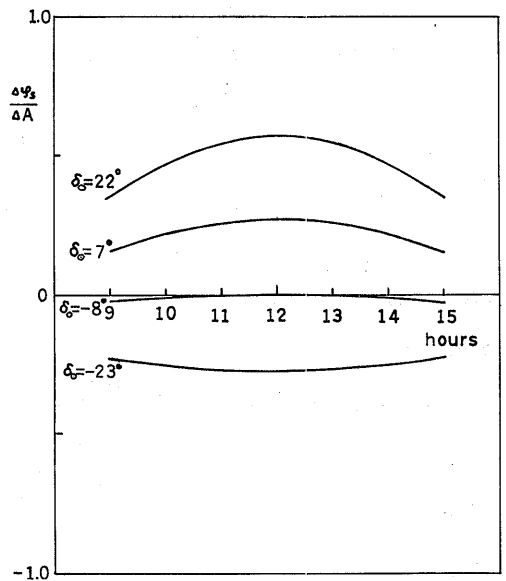


図-15 筏方位変動による $\varphi_s$ の変化

と近似され、 $\theta$ は筏の風に対する迎い角である。

しかし、この回転モーメントは、大きな放物柱面鏡の存在に起因するところ大とみられ、細長平面鏡方式では回転モーメントが生ずるとしても小さいと考えられる。ただ、データがないので、より安全側の検討をするために上記の数値を採用する。そして、次の理由によって、迎い角 $90^\circ$ の状態から風向変化によって生ずる筏方位変化のみを検討する。

(イ) 想定海域<sup>1)</sup>では東風が卓越している。

(ロ) 定常風によるモーメントに対しては、推進機を備えているので、突然の風向変化のみを考慮すればよい。 $\theta=90^\circ$ では、風向変化に対するモーメント変化がもっとも大きい。

筏方位変化の方程式を

$$I\ddot{A} + K|\dot{A}|\dot{A} = M \dots \dots \dots (5.17)$$

とおく。 $I$ は筏の垂直軸のまわりの慣性モーメント、 $K$ は筏が回転するとき円柱浮体が海水によってうける抵抗の係数で、放物柱面鏡方式<sup>2)</sup>の場合と同じとする。第1報<sup>1)</sup>の想定海域の気象調査から、風速 $U=5.0m/sec$  風向変動幅 $\Delta\theta_0 \approx 0.1 \text{ radian}$ 、変動周期 $T \approx 300sec$ と推定されているから、風速 $U$ の定常風があるとき、突然  $\Delta\theta_0 \sin \frac{2\pi}{T}t$ なる風向変動が生じたとして、方程式を解くと図-16のような結果が得られる。 $\Delta A$ は $0.004 \text{ radian}$ の範囲におさまり、そこに到着するまで30分ぐらいかかる。 $|\Delta\phi_s| \leq \frac{1}{2} |\Delta A|$ で図-9より

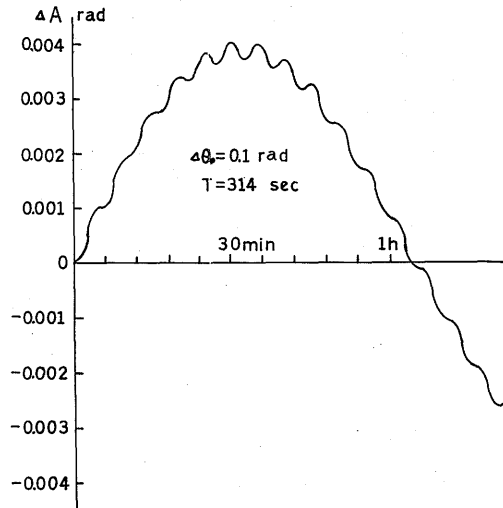


図-16 風向変動で生ずる筏方位変動

(152)

$|\Delta\phi_s| = 0.002 \text{ radian}$ に対し平均集熱ロスはほぼ1%である。かなり安全側からみた検討をおこなってもこのぐらいであり、位置保持のための推進機をそなえていて、必要とあれば筏の方向制御をおこなわせることができるから、集熱ロスはこの場合も1%以下となる。

(3) 筏の傾きによるもの

筏の中心を通り、南北方向とAなる角度をなす水平軸のまわりに、筏が角 $\Delta B$ だけ傾いたものとする。図-17より

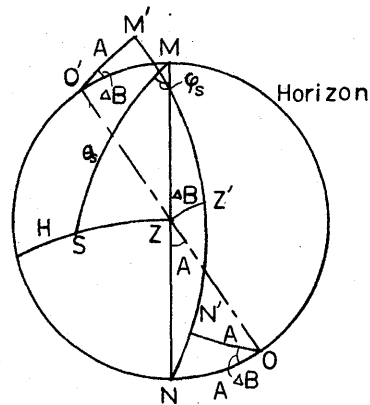


図-17 筏の傾きにもなう諸関係

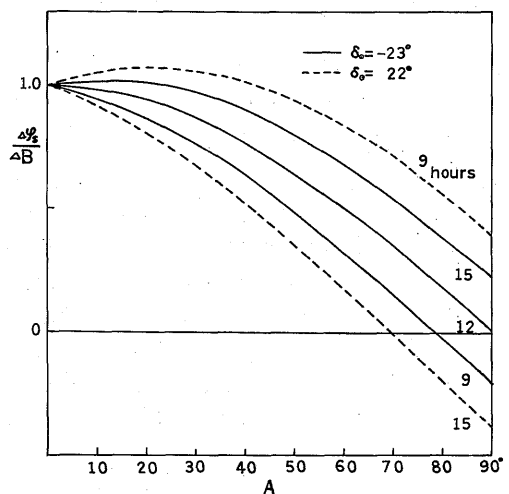


図-18 筏の傾きによるφₛの変化



$$\Delta\varphi_s = \Delta B \left( \cos A - \frac{\tan\varphi_s}{\tan\theta_s} \frac{\sin H \sin A}{\sin\theta_s} \right) \dots (5.18)$$

が得られ、計算結果は図-18のようになる。ただし、 $H$ は太陽高度である。もっとも大きいときでも $\Delta\varphi_s \approx \Delta B$ であり、第3報<sup>3)</sup>によれば、極端な仮定をおこなっても $\Delta B \approx 0.0025$  radian程度であり、集熱ロス1%程度の保証が得られる。

以上のことから太陽追尾にはほとんど問題なく、集熱ロスは小と結論できる。

### 3. 太陽電池方式

#### 3.1 概 要

この方式も同じように1km×1kmの筏を使用し、その上に太陽電池を敷きつめて太陽光を受光する。この場合、筏の方向や予想される程度の傾きは、受光量に全く影響しない。筏は各部分の極端な変形がおきないよう強度だけを考慮して設計すればよい。筏は漂流しないように位置保持をする（これも、もし繫留ができれば必要ない）。放物柱面鏡と同じように筏面を50mの高さにすると、鏡および集熱部がないので、風力は放物柱面鏡方式にくらべて約半分になると考えられる。海流力や波漂流力は円柱浮体の寸法形状に、円柱浮体の寸法形状は筏全体の重量に関係する。したがって、筏全体の重量をみつめることによって、位置保持に必要なエネルギーが得られる。

筏の上部構造の主部は、太陽電池およびその架台である。市販の太陽電池パネルを敷きつめると、1㎡あたり12kgぐらいになる。一方、文献<sup>6)</sup>によれば、太陽電池パネル重量を8.25kg/㎡、架台をふくめると64.25kg/㎡みつめられている。このみつもりは、現在のものであって、将来においてはさらに小さくできる見通しがなされているが、安全側のみてこの数値を採用する。

ところで、第1報<sup>1)</sup>の筏設計値でみると、反射鏡支持材をのぞき、鏡面アルミ板のみで8.1kg/㎡、反射鏡重量76kg/㎡となっており、上記の太陽電池および架台の重量に近い値である。さらに、筏全体の重量は $3.7 \times 10^5$  tonで、うち反射鏡重量が $0.76 \times 10^5$  tonとなっているから、集光方式の変更が全体重量の変化に及ぼす効果はすくない。また、もっとも大きい海流力は円柱浮体の投影面積に比例、ひいては重量のほぼ2/3乗に比例するから、海流力の変化に及ぼす効果はさらに小となる。本報告では、エネルギー収支を主として検討するので、筏全体重量また円柱浮体形状寸法は、前報<sup>1)</sup>のものと同じとする。

この太陽電池を直列また並列に組合せ、昇圧や交流

への変換などをおこなって、海水の電気分解・水素液化・位置保持動力などに用いる。

#### 3.2 海塩粒子による汚染

太陽電池方式におけるエネルギー収支を論ずるに際し、反射鏡方式の場合に調べたと同じように、パネル面の汚染による効率低下を検討する必要がある。洋上で使用するのであるから、主として海水に起源する海塩粒子の付着によるものとみられ、鏡面に対しては想定海域の気象条件のもとで、大きいときは20%、年平均して2~3%の効率低下が推定<sup>7)</sup>された。

太陽電池に対してはどうか、以下のように実験をおこなった。使用した太陽電池はシリコン製の市販品で円形素子5個を直列につないだもので、以下の特性を持つ。25℃、入力100mW/cm<sup>2</sup>のとき

開放電圧	短絡電流	最大出力	効 率
2.8V	1.1A	2V×1A=2W	10%

光源は太陽光そのものを使用し、図-19の測定回路で、太陽電池パネル面が清浄な場合と食塩水をスプレーした後乾燥させた場合と、それぞれ電圧・電流指示値を読みとった。また、パネル面を回転させて入射角依存性をみた。

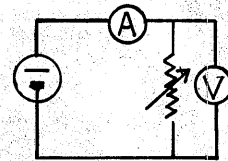


図-19 太陽電池テスト回路

太陽電池出力の入射角依存性の1例を図-20に示す。横軸はパネル面が鉛直方向となす角度で、約25°のとき最大すなわち太陽光がパネル面に垂直入射する場合となる。この角度は太陽高度にひとしい。直達光のみを考えれば、出力は入射角の余弦に比例し、図からみると大ざっぱにそうなっている。しかし、太陽電池は拡散入射光によっても動作するので、図は厳密に余弦曲線とはなっていない。

拡散光は大気状態とともに変動するので、測定時刻の異なるデータの直接の比較はむずかしい。そこで、測定のさい、別に、水平に置いた太陽電池の出力を対照にもちいた。

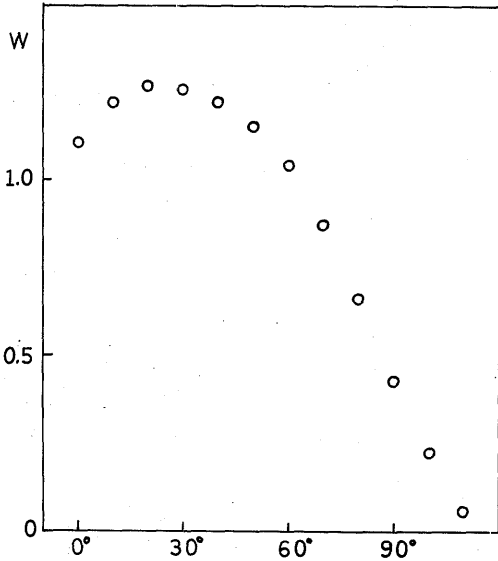


図-20 太陽電池出力の受光面傾斜依存性

パネル面に付着させた食塩粒子を顕微鏡写真撮影し、それから粒径分布と被覆率を求めた。付着状況を写真-1に、粒径分布の1例を図-21に示す。

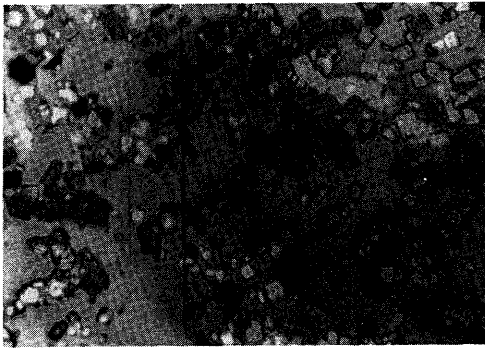


写真-1 太陽電池の汚染受光面顕微鏡写真

対照太陽電池出力を横軸に、測定太陽電池出力を縦軸にとった図で、汚染による効率低下を検討する。図-22は、測定太陽電池パネル面が水平のときで、○は汚染されていない場合、×は汚染された場合で数字はパーセントで表わした被覆率である。原点からひかれた上方の直線上に、汚染されない場合がほぼのっており、汚染された場合はその直線の下側にあり出力低下の傾向を示している。下方の直線は、約17%出力低下の状態を表わしている。この図から、測定誤差がふくまれるにしても、測定太陽電池を水平におき入射角が約65°

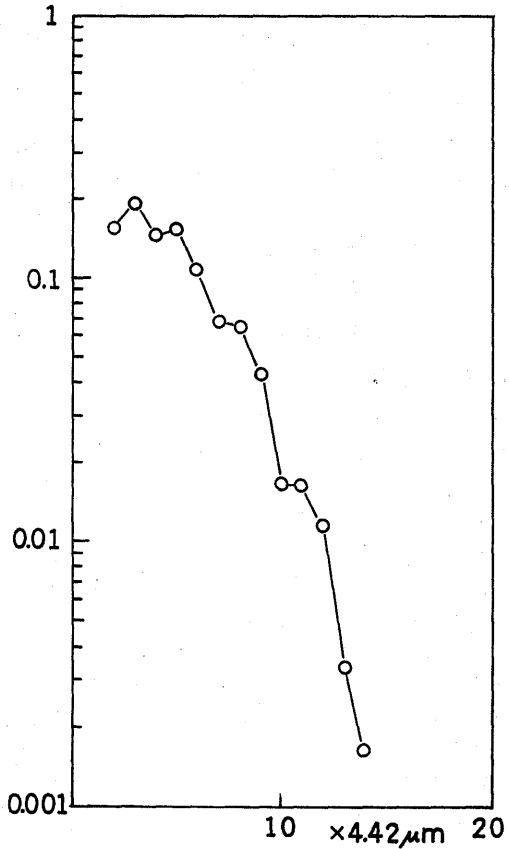


図-21 太陽電池パネル汚染粒子の粒径分布  
：被覆率 0.2965

ぐらいのとき、出力低下は被覆率と同程度かそれ以下になることがわかる。図-23は縦軸にパネル面垂直入射で出力最大となる場合をとったものであるが、汚染の影響があるかどうかははっきりしない。強い出力低下があるものと考え、被覆率43%ぐらいに大であれば測定誤差の効果は小さいと仮定して、そこでみつもっても被覆率の数%にすぎない。なお、この図のプロットは右へゆくほど(日照が強いほど)傾斜がなだらかになってゆくが、これは太陽電池の温度上昇で出力が低下する傾向および、負荷が大きいことによる。しかし、汚染による効率低下を検討するという目的には障害とならない。

太陽電池は拡散入射光、すなわち大気中微粒子によって散乱されてから入射する光によっても動作する。したがって、付着粒子によって散乱された光もふたたびパネル面に到達すれば有効となる。太陽電池外へ散乱されることと、吸収ないし反射されることが効率低

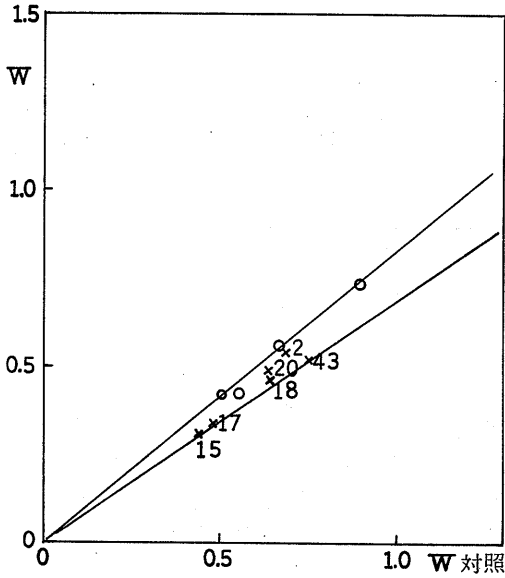


図-22 対照太陽電池出力と受光面水平時出力との関係：○ 汚染前，× 汚染後(数字は被覆率%)

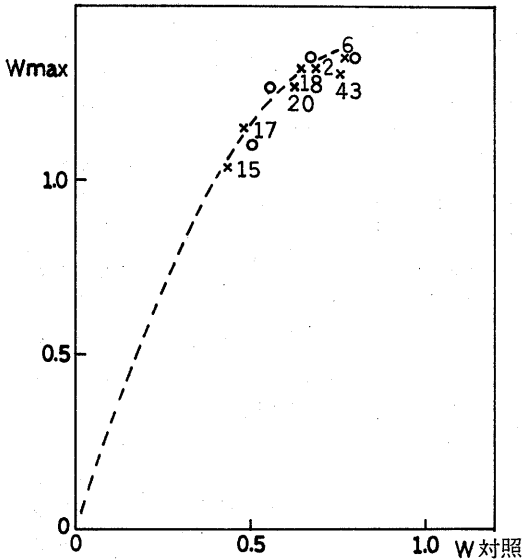


図-23 対照太陽電池出力と垂直入射時出力の関係：○ 汚染前，× 汚染後(数字は被覆率%)

下の原因となる。食塩は1cmの厚さでも太陽光波長領域でほとんど100%近い透過率<sup>7)</sup>を持っている。したがって、垂直入射ではほとんど効率低下はみられないであろう。水平に置いた太陽電池では、入射角が大きく反射および外部へ散乱される光が多くなることで、

出力低下の傾向があらわになったと考えられる。

鏡による反射集光の場合は、汚染粒子によってすべての方向に散乱され、たまたま集熱部の方向に散乱する光を除いて大部分が無駄になる。これが太陽電池の場合と異なるところで、第4報<sup>8)</sup>によれば、被覆率の1~2倍の反射率低下がみられた。それでも、想定海域においたとき、降雨による洗浄を考慮すれば年間平均2~3%程度の効率低下しかないことが推定<sup>9)</sup>された。太陽電池の場合、さらに効率低下は小さいので、それほど問題にしなくてよいと思われる。

#### 4. 各方式の比較と液体水素収量

本報告は、前4報において詳論した放物柱面鏡による集光に代るものとして、細長平面鏡による方式および太陽電池による方式を検討し、それぞれを比較することを目的とする。前報と同じく、経済性についての考察はせず技術的可能性に限り、同じ大きさの筏で年間どの位の液化水素量<sup>10)</sup>がみこめるかを第一の比較基準とした。

##### 4.1 細長平面鏡方式

放物柱面鏡方式でのエネルギーの流れは、図-24<sup>11)</sup>のように表わされ、これは細長平面鏡方式でもほとんど変わらない。あきらかに異なるのは、太陽追尾のため筏を回転させるのに必要なエネルギー<sup>12)</sup>のかわりに、鏡を回転させるエネルギーが必要なこと<sup>13)</sup>で、このエネルギーの見積りをおこなってみる。

単位鏡は幅1m長さ5mとし、これを東西に1000枚南北に200枚ならべる。第1報の放物柱面鏡の設計にない、板厚3ミリのアルミ板を鏡面とし、6×200×50のアンクルを組んだ枠の上に張る。これら主要部材の重量は約89kgとなるが、補助材等を入れて単位鏡の重量を100kgとみつめる。この単位鏡を回転軸両端で支持すると自重によってひずむが、鏡面は最大傾斜部で水平と0.0018radianの角をなす。この鏡面の傾きによる集光誤差は、筏の傾きによるものと等価とみられ、許容範囲となる。

鏡の回転トルクは、回転軸と重心の位置関係から最大1000kg・cmとみつめられる。しかし、回転角速度は最大 $4 \times 10^{-5}$  radian/secと小さいので、直接に回転に要するパワーはごく小であり、むしろ変速機や単位鏡面連結機構での消費パワーが主<sup>14)</sup>となる。そこで実際に太陽光を集める目的で造られた例を参考としてみる。この例は90cm×100cmで重さ24kgの単位鏡を17枚1列にして14列、計238枚用い同じ角速度で俯仰させ太陽を追尾したものである。鏡の大きさ・重量からみて、

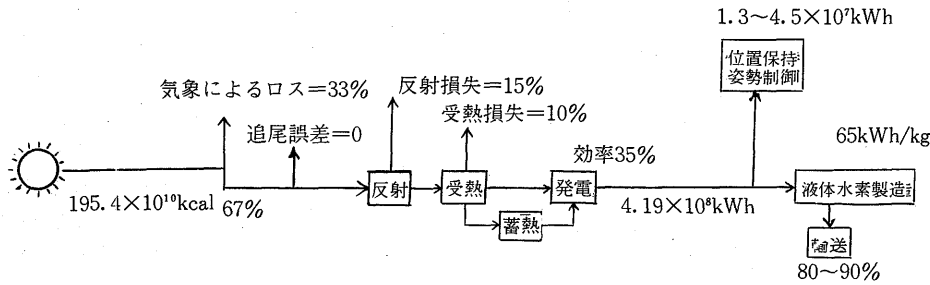


図-24 システムにおけるエネルギーの流れ(年間)

そのまま応用できる例とみられる。機構上の工夫の結果、負荷のある状態で110 W程度の消費電力におさえることができている。これは本方式の単位鏡40枚分にあたるので、全体で550 kwの電力を必要とすることになり、1日12時間運転すれば年間 $2.4 \times 10^6 \text{ KWH}$ のエネルギーが必要となる。

放物柱面鏡方式で検討した結果<sup>9)</sup>では、位置保持に必要なエネルギーが圧倒的に大きく、追尾回転に必要なエネルギーはその1/10以下である。上記の鏡回転に必要なエネルギーは、図-24にある位置保持・姿勢制御エネルギーの10%程度になっている。両方式とも筏および浮体の形状寸法が同じであるから、位置保持に必要なエネルギーも同じである。結局、この部分については、両方式ともほとんど変りない。

しかし、細長平面鏡方式にとって不利な次の2点がある。まず、となりあう単位鏡同士を密着させることができないので、その分面積効率が落ちる。上に示した単位鏡では厚さ20cmということになるから、回転にさいして接触しないためには、約7%の面積効率低下が生じるくらい離さなければならない。しかし、枠構造を工夫して単位鏡の端の厚さを小にすれば、それほど離す必要はない。つぎに、集熱部およびその支持構造物によって入射光がしゃへいされ、面積効率が落ちる。これは、ほとんどの反射鏡集光方式でおこる現象であるが、前報<sup>7)</sup>で提案された放物柱面鏡方式では解決されている。この細長平面鏡方式では、細部構造を検討しなければわからないが、集熱部によるしゃへいだけでも、3%程度の面積効率低下をひきおこすと考えられる。

以上から、本方式は液体水素収量の点からみると、放物柱面鏡方式の筏1基あたり年間5000トンにくらべて、やや小になる。

#### 4.2 太陽電池方式

この場合も図-24にしたがってエネルギーの流れを検討してゆく。直達入射年間 $195.4 \times 10^{10} \text{ Kcal}$ は、反射鏡の場合太陽高度 $10^\circ$ 以上が有効としたが、ここではすべて有効なものとし $206.3 \times 10^{10} \text{ Kcal}$ となる。雲の存在その他気象条件によるロスも直達入射に関してのみ考え、上記の33%とする。拡散入射は直達入射の25%とみつめる。太陽電池パネルの汚染は、前節の結果からみて影響なしとし、追尾誤差は考える必要ない。集光から発電までをまとめて効率 $\eta$ であらわすが、ここでも面積効率が問題であってこれをふくめてあらわしておく。現在市販のものは多く円形素子であるので、これを用いると面積効率が低い。太陽電池の製造工程の改良研究がすすんでいるので、角形素子を使用できれば面積効率100%近くに上げ得る。素子そのものの効率を上げ同時に低価格を実現するのと同じように、到達目標であるので、まとめて効率 $\eta$ であらわした。

これら各素子を組合せ、水の電気分解・液化水素製造・筏の位置保持にもちいられるよう整合をとる。太陽電池は入射光量の変化にともない電圧電流特性が変り、最大出力に対応する電圧電流値が変化する。この変化は水の電気分解の特性と似ており、これを利用して太陽電池と電解装置を直結する試み<sup>9)</sup>もあり、90%の効率を実現している。もっとも、通常のようにインバーターをもちいても同じぐらいの効率である。水素液化や位置保持動力のためには、商用電源なみに変換するとして、効率80%ぐらいにみつめる。電解に必要な電力は前報<sup>9)</sup>と同じく $45 \text{ KWH/kgH}_2$ 、水素液化および補機その他に必要な電力をふくめて $20 \text{ KWH/kgH}_2$ とする。位置保持に必要なエネルギーは、回転をおこなう必要がないから約10%減とし、風力が半分になるため、さらに10%減とする。したがって $1.0 \times 3.6 \times 10^7 \text{ KWH/year}$ である。

以上をまとめると年間液化水素収量は $\eta$ をパラメータ

として

$$\{29.4\eta - (0.17 \sim 0.60)\} \times 10^3 \text{ ton/year} \dots (5.19)$$

という式であらわせる。ただし、式中の(0.17~0.60)の数値は位置保持エネルギーで、この幅以内にみつめられたものである。効率 $\eta$ を横軸に、年間液化水素収量を縦軸に示したのが図-25である。

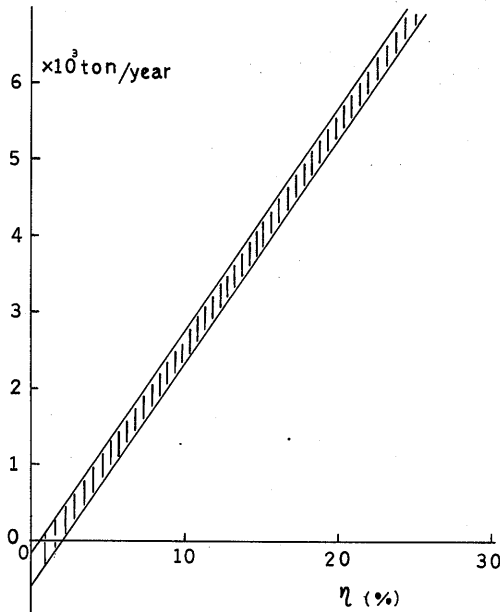


図-25 太陽電池効率と年間液化水素収量：  
斜線部分は位置保持エネルギーに対  
応する液化水素量の変動範囲

年間5000トンの液化水素収量を得るためには、18~19%の効率を必要とする。これは各種計画の目標値<sup>10)</sup>にほぼひとしい。現在ではまだ効率が低く、この一連の報告で検討した限りにおいては、放物柱面鏡方式に比べればはるかに液化水素量が小さいといえる。

## 5. む す び

南太平洋上に巨大な筏を浮かべ太陽エネルギーを集めて水素を製造する計画において、すでに検討した放物柱面鏡による集光方式にかわるものとして、細長平面鏡方式・太陽電池方式のふたつをえらんで考察をおこない、3方式を比較した。その結果、細長平面鏡方式では放物柱面鏡方式よりも、やや液化水素収量が落ちること、太陽電池方式では同程度の液化水素収量を得るためには、18~19%の太陽電池効率を実現しなければならず、現状ではまだ到達できないことが結論さ

れた。

したがって、現状では放物柱面鏡による集光方式がすぐれていることになったが、他の方式に利点がないわけでない。細長平面鏡方式では、すべての鏡が同じ速度で、しかも1日のあいだの変化が小さく角速度自体も $3.5 \times 10^{-5}$  radian/secと小さいので、太陽追尾が容易である。放物柱面鏡方式では、正午近くで、ふたけた大きい加速が必要<sup>2)</sup>である。また、太陽電池の汚染による効率低下は、反射鏡におけるもの<sup>4)</sup>より、はるかにすくない。ただ、生産量そのものは経済性などの議論に直結し、計画の目的であるので、液化水素収量を第一の比較基準とした。

つぎに、これら3方式を他の点で2,3比較を試みる。

(1) 細長平面方式は筏の回転をおこなう必要がないが、50mの高さへ集熱部を保持し、鏡との幾何学的関係を維持できるかどうか不安が残る。放物柱面鏡方式は、かなり、ましであろう。太陽電池方式では剛性の考慮は2次的なものとなる。

(2) 多数の筏を並べるとき、放物柱面鏡方式では回転をおこなうため、筏1基あたりすくなくとも $\sqrt{3}$  km<sup>2</sup>の面積を必要とするが、他方式では1 km<sup>2</sup>でよい。また、筏1基の大きさも、放物柱面鏡方式の場合は回転に対する抗力<sup>3)</sup>の増大のため1 km<sup>2</sup>が限度と考えられるが、他方式では環境への影響を無視すれば、製造可能な範囲でいくら大きくともさしつかえない。

(3) 太陽電池方式は、素子および架台の軽量化の可能性があり、さらに筏各部の変形等にきびしい条件を課する必要がないため、筏全体の材料の軽量化ないし節減が可能となろう。それにより、筏単位面積あたりの価格を下げ得れば、効率が劣っていても経済性において他方式に匹敵できるかもしれない。

さて、本報においては、全体のシステムのうち太陽光集光方式の代案にしぼり、他の部分についてはその波及効果にのみ触れた。このほかに、集熱部から発電プラントの部分での変更、あるいは最終生産物を液化水素でなく水素化物とするなど、各種の代案の可能性も検討する必要がある。第4報において指摘した問題点である巨大化にともなう環境への影響、想定海域での気象海象データの細部、経済性の検討なども残されたままである。これらの点をふくめて、輸送から利用までを考慮した全システムの検討をおこない、その中での製造サブシステムの部分で考察する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 遠藤ほか：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, vol 19, No. 4, 昭和57年7月
- 2) 浜島ほか: 同上 (第2報: 太陽追尾と光学系), 同上
- 3) 山川ほか: 同上 (第3報: 筏の位置と方向の保持), 同上, vol 20, No. 2, 昭和58年3月
- 4) 渡辺ほか: 同上 (第4報: 技術的可能性), 同上
- 5) 岩柳ほか: 同上, 船舶技術研究所研究発表会, 第37回, 昭和56年5月
- 6) 資源調査会: エネルギー収支からみた自然エネルギー利用技術の評価手法に関する調査報告——自然エネルギー利用発電技術について——, 科学技術庁資源調査会報告 No. 88, 昭和57年11月
- 7) 東京天文台編: 理科年表
- 8) 桜井ほか: 大型太陽炉の試作, 東北大学科学計測研究所報告, vol 16, No. 1, 昭和42年
- 9) Carpet et al: Electrolytic Hydrogen by mean of Photovoltaic Energy Conversion, Hydrogen Energy Progress IV
- 10) 浜川圭弘: 太陽光発電入門, オーム社