

# 太陽光利用洋上水素製造輸送計画の調査研究

(第4報:技術的可能性)

渡辺 健次\* ・ 森下 輝夫\*\*

内藤 正一\*\*\* ・ 菅 進\*\*

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

(4th Report : Technical Feasibility)

By

Kenji WATANABE, Teruo MORISHITA, Shoichi NAITO and Susumu KAN

### Abstract

This 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, authors proposed a new raft system and showed that the system is efficient for collecting solar energy and able to follow solar motion in the range of allowable error. In this paper, the feasibility on the total plan is studied from technical view point and other problems are investigated; the pollution and efficiency reduction of reflecting mirrors by sea-salt particles, transport of liquified hydrogen by tankers and meteorological and ecological influence by the existence of huge raft floating on ocean are discussed.

Energy conversion ratio is about 20 per cent and total liquified hydrogen income of the system is about 5,000 ton per year. Consequently the project is feasible from technical view point.

### 目次

- |                 |  |
|-----------------|--|
| 1. はじめに         | 3.3 位置保持と追尾の全エネルギー                       |
| 2. 海塩粒子による鏡面汚染  | 4. 液化水素タンカーによる輸送                         |
| 2.1 室内予備実験      | 4.1 水素の気・液・固相輸送の比較                       |
| 2.2 実船および実地試験   | 4.2 液化水素タンカーの船型の特徴                       |
| 2.3 反射率低下の簡易予測式 | 4.3 タンクの防熱と水素の蒸発量                        |
| 2.4 降雨による洗浄     | 4.3.1 タンク防熱層厚さを現用 LNG タンク<br>と等しくする場合    |
| 2.5 洗浄効果の予測式    | 4.3.2 タンク容積効率                            |
| 2.6 鏡面汚染の推定     | 4.3.3 船殻温度を現用 LNG タンカーに等し<br>くする防熱層厚さの場合 |
| 3. 各段階での効率      | 4.3.4 蒸発量を主機関燃料必要量に等しくす<br>る防熱層厚さの場合     |
| 3.1 集光段階        | 4.4 主機関に関する検討                            |
| 3.2 発電から水素液化まで  | 4.4.1 主機関燃料必要量                           |

\* 共通工学部 \*\* 機関開発部 \*\*\* 艤装部  
原稿受付: 昭和58年1月11日

- 4.4.2 燃料供給のための水素ガスの圧縮仕事
- 4.4.3 蒸発ガスの冷熱利用
- 4.4.4 水素燃料利用と各種熱機関の性能
- 4.5 水素の実輸送量とLH<sub>2</sub>タンカーの実現性
- 5. システム稼動シミュレーション
  - 5.1 エネルギーの流れ
  - 5.2 シミュレーションの手法
  - 5.3 エネルギー変換率と液体水素収量
- 6. 環境への影響
  - 6.1 局地気候への影響
  - 6.2 生態系への影響
- 7. むすび

## 1. はじめに

この調査研究の目的は、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の可能性をさぐることであった。そのために、新しい集光構造を持った筏を提案して「第1報、筏の構造と流力特性」「第2報、太陽追尾と光学系」「第3報、筏の位置と方向の保持」において諸課題を研究し、報告した。この第4報では、それぞれにおいて得られた諸成果をもとに、計画の技術的可能性を論ずることとする。

技術的可能性の検討にあたって考えるべきことに、次のようなものがある。

- (1) 構造物としての実現性。
- (2) エネルギー変換率と収量。
- (3) 周辺諸問題。

(1)は第1報において充分検討されているから、ここでは(2)と(3)を主として考える。ただし、結論にいたる条件を明確にするために、もっと具体的な目標を定めておく。まず、(2)では経済的な諸問題にふれない。そして出力されたエネルギーや生産物の量と、投入されたエネルギーとの比較を主眼にする。ここで筏やプラントの建設に必要とされるエネルギーやその償還を考慮に入れる行き方があるが、それはとらず、入力太陽エネルギーから各種のエネルギー損失や稼動に必要なエネルギーをさしひいた残りが充分な量であればよいとした。建設に投下されるエネルギーおよびその償還の考慮は、むしろ経済性をふくんだ考え方をもちこむことになると思うからである。(3)については、計画の実現に付随して必要となるものの他に、いわゆる環境

問題などをふくめて広い意味を持たせて考察することにした。もちろん、すべての周辺諸問題を検討できるわけではなく、重要と思われるものいくつかに限った。なかでも直接プラントに関係するものは、汚染や腐食による効率低下の問題であろう。生産物の荷役や輸送も必要欠くべからざるものである。「公害」としては海洋生態系や局地気候への影響があるが、それがふたたび逆にプラントに影響をおよぼすこともあり得る。海洋資源の分配や公海上へのプラント設置をめぐる国際政治上の問題もふくまれてくるであろう。

そこで、本報告ではまず、洋上大気中にふくまれる海塩粒子の付着による鏡面の汚染と、そのための効率低下について、実験とそれをもとにしたシミュレーションによる評価をおこなう。つぎに、第1報から第3報までの成果をもとにして、各段階での必要エネルギーやエネルギーロスの評価をおこない、また、各種資料を参考にして各段階での効率をみつめる。さらに、生産された水素を輸送するひとつの方法として液体水素タンカーを考え、その実現可能性を論じる。その上で、全体のシステム稼動をシミュレートして、得られる最終エネルギーと液体水素収量をもとめる。環境問題としては、生態系や局地気候におよぼす影響をプラント規模との関連で検討する。また、公海上へのプラント設置にともなう法的問題にもふれる。

以上のようにして、予想できない困難の発生の可能性ある周辺諸問題は別として、この提案筏が海洋構造物として可能であり、充分なエネルギーおよび液体水素収量が得られること、すなわち技術的に可能であることがわかった。以下にくわしく述べる。

また、前報の内容を概観するために、第1報および第2報の目次を付録に再録する。

## 2. 海塩粒子による鏡面汚染

大気中の塵埃や各種物質による汚染や腐食はすべての構造物ないしプラントなどに共通し、対応をせまられる問題点である。それは、すべての構成部分に発生するが、太陽熱を大量に集める必要のある本計画のような場合、鏡面部分の汚染や腐食はその面積が大きく保守管理がむずかしいことから、特に考察する必要がある。腐食は長期にわたって徐々に進行する現象であり、償却や保守など、どちらかといえば経済的考慮の中の要因とみなされる。これに対し、汚染は気象条件によっては短時間で進行し、プラントの稼動にただちに影響するので、エネルギー収支の検討を主眼とする

本報告では汚染現象のみをとりあつかうことにした。

汚染物質は空気中の塵埃をはじめとして種々あるが、洋上ではむしろ大気中に浮遊する海水起源の海塩粒子による汚染が大と考えられるので、袋の大部分の面積を占め効率に大きく影響する鏡面部分の海塩粒子による汚染の評価を目標として検討をおこなった。

海塩粒子の分布などについては、鳥羽<sup>1)</sup>をはじめとする多くの研究があるので、それらを参考とした。

## 2.1 室内予備実験

鏡面汚染の評価の資料を得るために、他の研究を参考にするだけでなく、すくなくとも簡単な実験をおこなってみる必要があると考え、ガラス製の試験鏡片を製作した。大きさは70×100×5、アルミを蒸着しシリコンでコーティングした表面鏡タイプのものである。これを洋上でテストする前に、室内実験として、食塩水をスプレーして反射率低下をしらべてみた。まず、汚染前後において鏡面に入射角45度の光束をあて、反射光の強度を光度計で測定し、汚染前後における強度比を反射率低下の尺度とした。一方、汚染された鏡面の付着粒子の占める面積を、顕微鏡写真を撮影し画面解析することによって測定し、その面積の総和と鏡面面積の比をとって鏡面被覆率とした。この2通りの計測結果を比較してみると、図2.1.1、図2.1.2のようになる。図2.1.1はスプレー直後の細かい水滴状態のときで、図2.1.2は充分乾燥させ食塩が結晶状態になっているときである。あきらかに45°反射率低下の方が被覆率よりも大きい傾向をしめし、とくに乾燥状態の

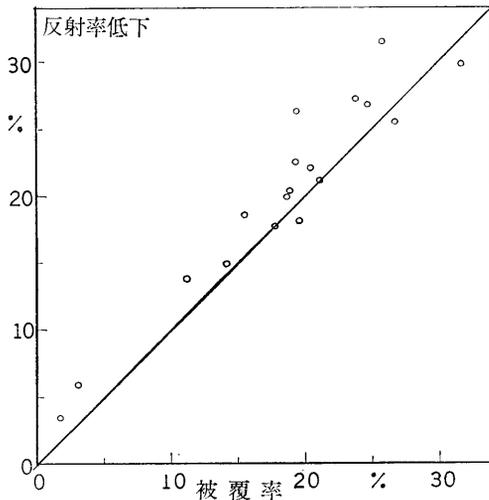


図-2.1.1 被覆率と反射率低下の関係（室内、水滴状態）

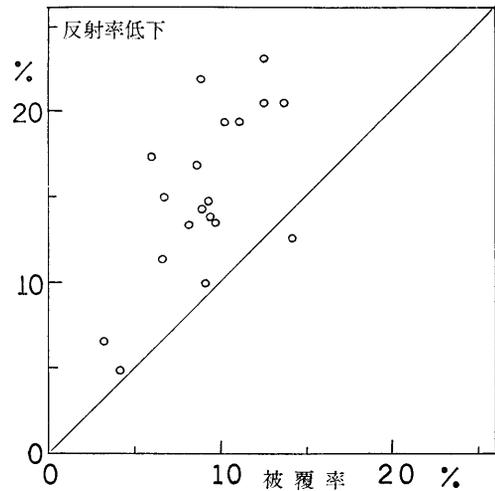


図-2.1.2 被覆率と反射率低下の関係（室内、乾燥状態）

方でいちじるしい。しかも、これらの間にはっきりした関数関係がみられない。

現象の性質上、この程度のばらつきはやむをえないとする考え方もあるが、2計測結果の不一致とばらつきの原因として、次のようなものが考えられる。

- (1) 測光上の誤差。
- (2) 顕微鏡でとらえられない微小粒子の存在。
- (3) 45°入射であるから、付着粒子の厚みも考慮する必要がある。

(1)はばらつきの原因であるにしても、不一致の傾向の説明とはなりにくい。(2)は一部分役割をになっていると考えられるが、すべてを説明するには、被覆率の2倍ぐらいの反射率低下もあり、不充分である。(3)は図2.1.3のように、粒子に厚みがあるため「影」がで

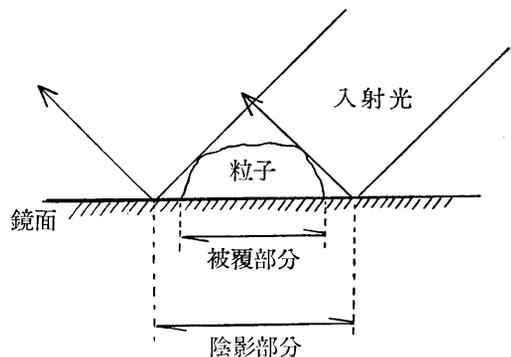


図-2.1.3 反射率低下の入射角依存

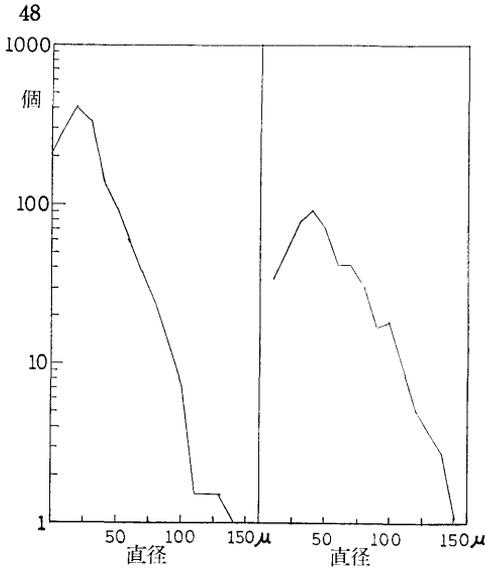


図-2.1.4 鏡面投影粒径の分布例（室内実験）

きて、粒子の被覆面積が実効的に大きくなるという説明である。顕微鏡写真でとらえられる粒子の大きさは、光の波長にくらべて充分大きいので、この「影」は存在し得る。そして、とらえられない粒子の存在とあいまって、上記不一致の傾向の説明となり得る。この説明を補強するために、粒子分布の効果をとりいれてみよう。図 2.1.4 は、顕微鏡写真からよみとった粒径（鏡面投影粒径というべきか）分布の二例である。微小粒径の粒子は、よみとれないために相対的に少なくなっている。一方、大きい粒径の粒子を考えると、これが鏡面に付着するとき、付着力ないし表面張力の関係で、大きいほどつぶれたような形になり、相対的に厚みが少なくなる。したがって、相対的に影の部分が小となり反射率低下と被覆率の差は、大きい粒子が多いほど相対的に小となる。図 2.1.4 の分布を

$$N_0 e^{-2r}$$

と仮定して、各測定結果から  $\lambda$  の値を求め、 $45^\circ$  反射率と被覆率の比とくらべたものが図 2.1.5 である。 $\lambda$  が小、すなわち大きい粒子が多いほど、この比は小となり 1 に近づく。これは、上記(2)による原因の説明にもなり得る。すなわち、 $\lambda$  が大ということのを微小粒子が多いということに言いかえ得るならば、反射率低下と被覆率の差が大きくなることの説明になる。

もし、上記(3)だけで説明できるならば、入射角が大であるほど反射率低下は大となるわけであるが、定量的な結論を出すほどデータがないので今後の課題とし

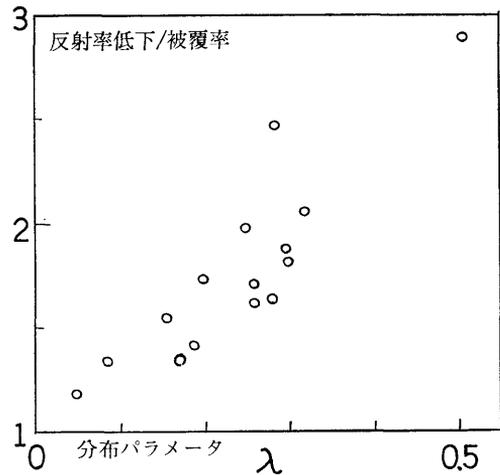


図-2.1.5 分布の型による反射率低下の差異

て残す。本調査研究の目的をはたすには、実地試験結果にもとづく評価の方が、より実態に即していると考えられるからである。

## 2.2 実船および実地試験

次に、試験片を船上あるいは海岸に設置して、反射率低下および被覆率の測定を同様におこなった。実施地点の気象データを可能な限り入手した。場所および日付は以下のとおりである。

- (1) 啓風丸による関東南岸沖 54年 11/21~11/30
- (2) 八丈島西岸 55年 1/29~2/1
- (3) 伊豆半島石廊崎 55年 7/28~8/2
- (4) 北斗丸による太平洋 56年 1/23~2/28

それぞれについて、反射率低下および気象データを図 2.2.1~2.2.3 に示す。(4) の場合は長時間露出であり、鏡面蒸着アルミニウムの腐食がみられたので、汚染試験としては有効でなかったということにとどめる。しかし、他の試験と同様の傾向がみられた。すなわち、高気圧の到来で湿度が低下し風速が大となると汚染が進行し、逆の場合は汚染はすすまず、降雨によって洗浄され反射率が回復することがわかる。降雨による洗浄作用は予想以上に大きい。

関東南岸沖では全試験片を最初に露出し、1日1枚ずつ回収するという方法をとった。したがって反射率低下の図は、1枚の鏡の反射率の経時変化をあらわすものとみてよく、上記傾向の典型的な例である。しかし、船上試験では、船自身の走行が風や波をおこしてかなり環境を変えること、鏡設置場所が海面上8mと低いので、評価にあたっての資料価値は小さい。

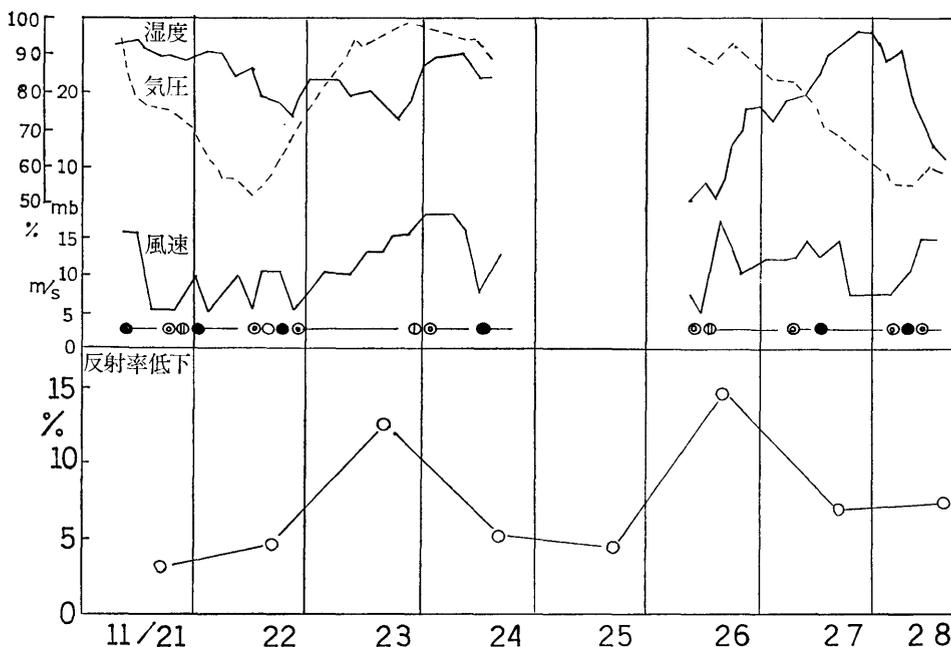


図-2.2.1 関東南岸沖実船試験

八丈島西岸(図2.2.2)の結果は、強風時の汚染状況をj知るのに適したデータをあたえる。しかし、設置場所が海面上7.5m でやはり低い。

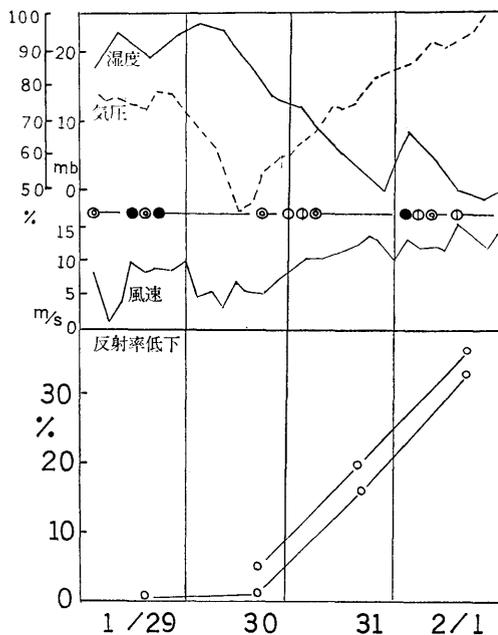


図-2.2.2 八丈島西岸実地試験

石廊崎(図2.2.3)は海面上50mと15mに設置したので、試設計袋の高さとほぼひとしい高さでのデータが得られた。

これらについて、鏡面投影粒径分布をとると図2.2.4のようになりほとんど同じような分布である。強いてA・Bの2タイプに分けると、反射率低下と被覆率の比が、この2タイプのあいだで前節と同様の差異、すなわち大きい粒子の多い方が反射率低下と被覆率の差がすくないことだけを指摘しておく。この比は、室内

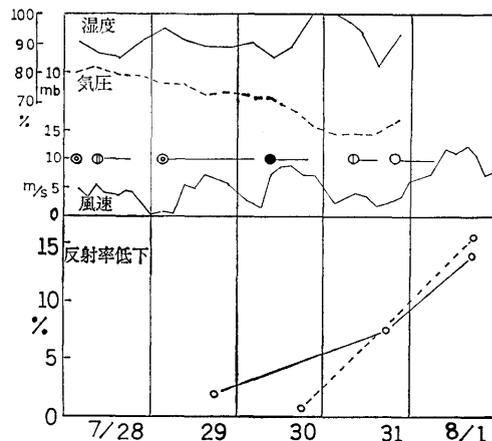


図-2.2.3 石廊崎実地試験

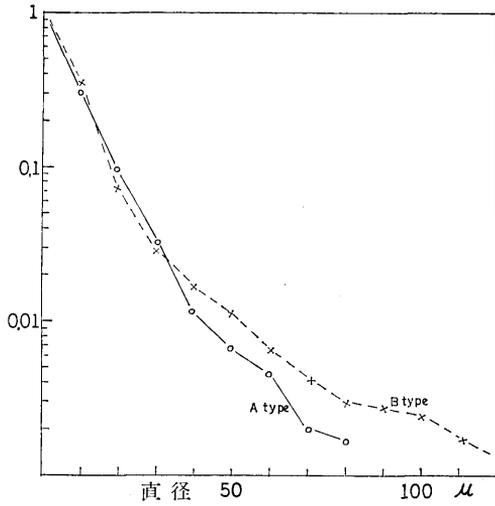


図-2.2.4 実地および実船試験での鏡面汚染粒子投影直径の分布

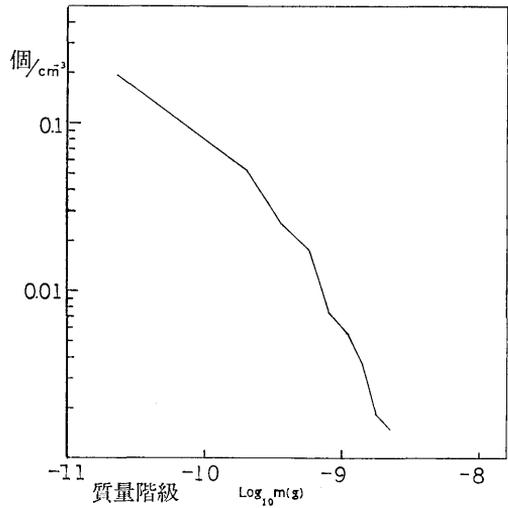


図-2.2.6 石廊崎における海塩粒子の質量階級密度分布

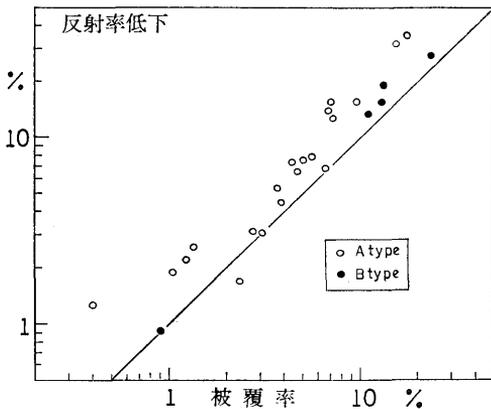


図-2.2.5 被覆率と反射率低下の関係（実地および実船試験）

実験の場合と同様にほぼ1と2のあいだにある。(図2.2.5)

この粒径分布は鏡面に付着したときの鏡面への投影であり、実際に大気中に浮遊している海塩粒子の粒径とは異なるので、鏡面露出と並行して大気中の海塩粒子をしらべた。これは従来<sup>1)</sup>おこなわれてきたように、空気を吸引して捕集フィルムに吹きつけ、フィルムに付着した海塩粒子が化学変化によってフィルム上につくるハローの大きさと数を顕微鏡によってしらべる方法である。それによれば、ハロー面積と粒子質量がほぼ比例すると報告<sup>1)</sup>されている。(3)の石廊崎における採取粒子の質量階級分布は図2.2.6のようにな

り、他の測定結果の報告<sup>1)</sup>とほぼ似ている。

さて、ここで、汚染された鏡面上の投影粒径分布と採取空気中の海塩粒子分布とがどう対応するか問題となる。鏡面上の付着粒子の厚さに関する知識が、大きい粒子ほど相対的に厚さが小であろうという以外、ほとんどないからである。

大気中の海塩粒子の形はほぼ球に近いと考えるのが自然であろう。すくなくとも、たがいに直角な三方向について、サイズは同じ程度であろう。これが鏡面に付着する形に、極端な場合として2通りが考えられる。

ひとつは、その形のまま(ほぼ球形のまま)付着する場合であり、他は形がつぶれて、どれも同じ程度の厚さになる場合である。前者は海塩粒子の粒径分布がそのまま付着粒子の鏡面投影粒径分布に対応する。後者は海塩汚染の粒径の3/2乗分布が付着粒子の投影粒径分布に対応する。後者の場合、捕集フィルム上のハローの径分布が、付着粒子の投影粒径分布に対応するといつてよい。

これら分布の間の変換を式で示すと、たとえば分布  $f(r)dr$  があるとき  $r^2=S$  の分布は

$$f(\sqrt{S})dS/2\sqrt{S}$$

$r^{3/2}=v$  の分布は

$$2f(v^{2/3})dv/3v^{1/3}$$

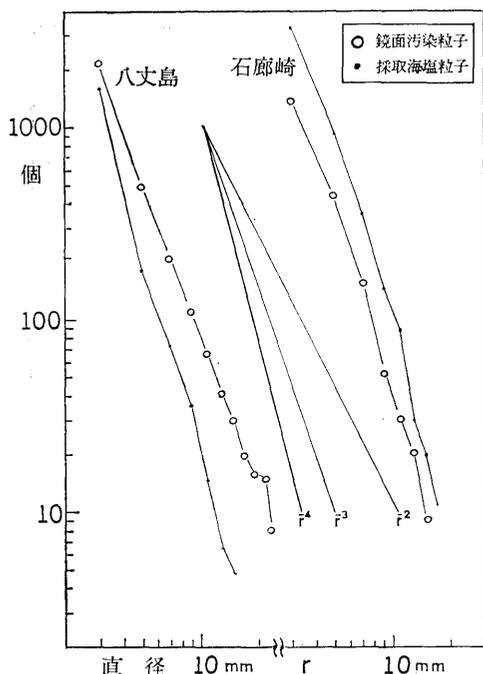


図-2.2.7 鏡面汚染粒子投影直径と海塩粒子ハロー直径の分布比較

となる。これらを使えば、各種分布の対応関係が明らかになるはずで、もし鏡面投影粒径分布が

$$r^n dr$$

捕集フィルム上ハロー径分布が

$$r^m dr$$

の形をしているとすれば、海塩粒子がそのままの形で付着するという仮定の場合、 $m=n-1$ 、一様な厚さで付着するという仮定の場合、 $m=n$ である。図2.2.7は、上記の2種の分布を  $r^2$ 、 $r^3$ 、 $r^4$  と比較して示

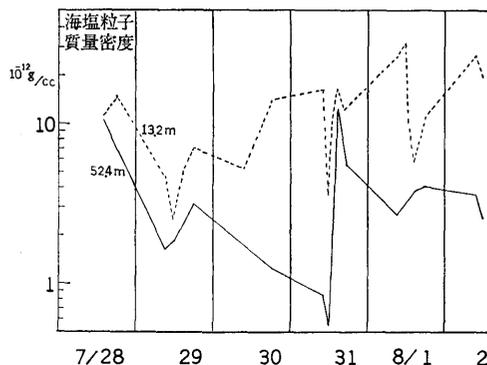


図-2.2.8 石廊崎における海塩粒子の空気中全質量密度

したものであるが、どちらの仮定が成立つか、いずれとも決定しがたいような分布である。

しかしながら、鏡面に吹きつけられた海塩粒子のすべてが付着するわけではない。どちらの仮定をとっても、ある程度実用的な評価ができればよいと、今のところは考える。そこで、石廊崎における海塩粒子の捕集データを用いて、これら2通りの仮定を適用した場合に、どれだけの違いがあるかを比較することにする。まず、各時刻におこなった空気採取結果から、単位体積中にふくまれる海塩粒子の全質量の和を図2.2.8にしめす。もうひとつ、単位体積にふくまれる各粒子が形を変えずに鏡面に付着したときの全被覆面積の和で、1ccあたりで、 $\mu^2$ を単位とする面積で表現したものが、図2.2.9である。すなわち、図2.2.8は、変形して厚さ一様で付着の仮定でもちいられ、図2.2.9は変形せず付着の仮定でもちいられる。これらの値と風速の積を鏡の露出している時間で積分すると、それぞれの仮定のもとで吹きつけられた粒子が全部付着したときの被覆面積を相対的に表現する量が得られる。

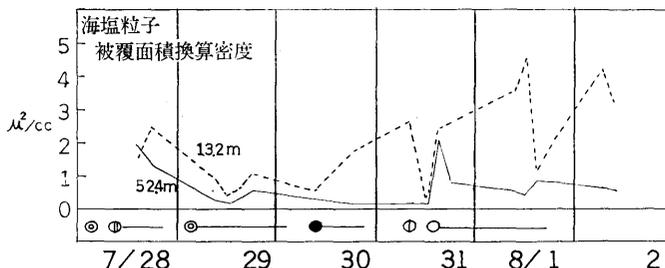


図-2.2.9 形を変えず付着したとすときの被覆面積換算海塩粒子密度

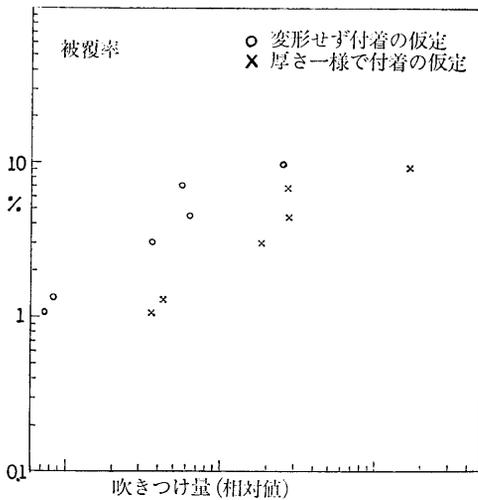


図-2.2.10 海塩粒子吹きつけ量と被覆率の関係

これを吹きつけ量とよんでおこう。この値と鏡面の被覆率の関係を示したものが図2.2.10である。どちらの仮定でも、ほぼ同じ傾向になる。ただし、降雨による洗浄をうけている鏡はのぞいた。

どちらの仮定でも、ほぼ同じ傾向を示すということは、一定の結論を得るほどのデータがないからであり今後の課題とする方がよいと思われる。

2.3 反射率低下の簡易予測式

ここで、想定海域における海塩粒子による汚染と反射率低下を予測することを考える。前節では、海塩粒子の密度と風速をもちいて、吹きつけ量を計算し、それと鏡面被覆率の関係をもとめるという方法をとった。

しかし、想定海域での大気中海塩粒子の測定データがないという問題があるし、もっと簡便な方法のほうがのぞましいということもある。文献<sup>1)</sup>によれば、風が強ければ風波が発達し海面が荒れて海塩粒子生成率が大きくなり、図2.3.1のように風速と海塩粒子の関係が得られている。この生成率Fが大気中海塩粒子濃度に比例するものとする。なぜならば、平衡状態では、海塩粒子の濃度  $\rho$ 、落下速度  $w$ 、とすれば

$$\rho w = F$$

の関係がほぼ成立し、 $w$  は定数と考えてよいからである。図-2.3.1 より

$$u < 9\text{m/sec} \quad F = \exp\{-5.38/u\}$$

$$u > 9\text{m/sec} \quad F = 0.205\exp\{0.110u\}$$

(100)

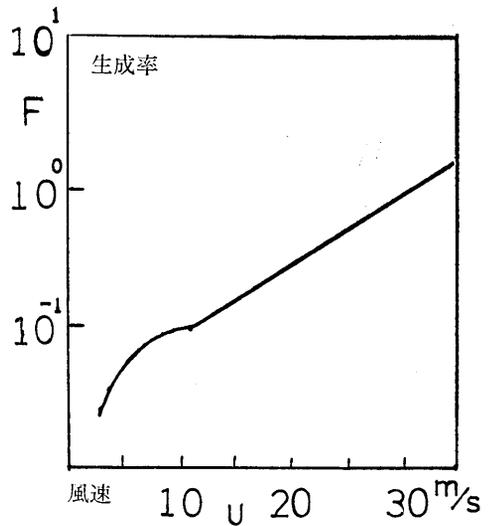


図-2.3.1<sup>1)</sup> 海塩粒子生成率と風速の関係

とおく。こうして、風速のみもちいて吹きつけ量を求めることができるようになる。すなわち、 $u$  と  $F$  の積を露出時間で積分する。これと鏡面被覆率の関係を現地試験の結果にもとずいて、図2.3.2に示す。

そして粗い近似であるが、吹きつけ量に被覆率が比例するとして予測式をつくる。実際には吹きつけ量が大きくなる割に付着量は大きにならない。しかし、図2.3.2からはそれ以上の結論は出せない。反射率低下と被覆率の比は1と2の間にあるが、それも図のプロットのばらつきの中に埋まってしまう。そこで

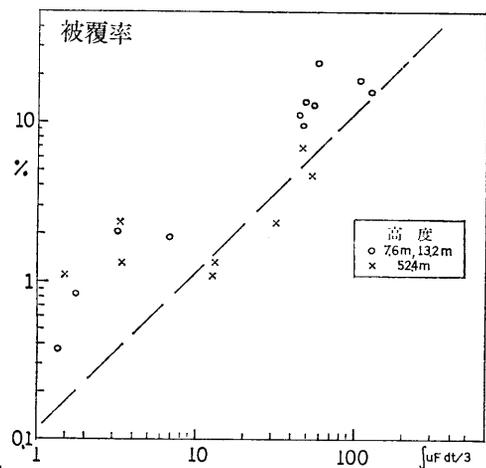


図-2.3.2 海塩粒子生成率と風速の積の時間積分と被覆率の関係

$$1-R=0.0004\int uFdt \quad R; \text{反射率}$$

を高さ50mでの反射率低下の予測式として採用する。

風速  $u$  は m/sec, 時間  $t$  は hour, の単位をもちいる。

#### 2.4 降雨による洗浄

実地試験によって、降雨による洗浄効果が予想以上に大きいことがわかったということは前に述べた。試験鏡片を常に  $45^\circ$  にかたむけて設置していたので、洗い流しの作用もはたらいたものと思われる。この洗浄効果を、実地試験から持ち帰った鏡片をつかって追試してみた。雨量換算で 1.5mm の水を10秒間にわたって散布すると、70~80%の反射率のものが97%以上へ回復するという結果が得られた。人工海水を使って同様のことをおこなうと、やや効力は落ちるが、ほとんど淡水の場合と変わらない。

また、これらの鏡片を降雨中に露出し、雨量計測と並行して洗浄効果をしらべた。降雨前と降雨後の反射率を比較したものが図2.4.1である。鏡片を  $45^\circ$  に傾けた場合よりも、水平の場合の方が洗浄効果が弱い。

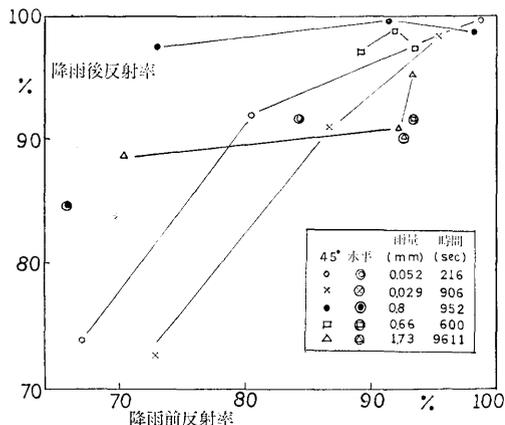


図-2.4.1 降雨による洗浄試験結果

雨量や露出時間を図に書きいれてあるが、霧雨程度のものをはじめとし、いずれも雨量小であり強度もそれほどでない。したがって、ある程度以上の雨が降れば鏡面上の水溶性の海塩による汚染は、ほとんど洗浄されると考えてよい。

#### 2.5 洗浄効果の予測式

想定海域は熱帯性気候に属し、降雨はスコールとよばれるようにしゅう雨性の強い雨になると考えられる。前節の洗浄実験をみても、ある程度の降雨があれば

ほとんど元の反射率に回復するから、降雨がすくないときどうなるかを示すような式を作ればよい。そして想定海域では強い雨の降る確率が大きく式を使う必要がすくなるから、平均的な洗浄効果の評価のためには、その式の精度はそれほどよい必要はない。

まず、洗浄度合をあらわすパラメータとして

$$\varepsilon = \frac{R-R_0}{1-R_0} \quad \begin{array}{l} R_0 \sim \text{降雨前反射率} \\ R \sim \text{降雨後反射率} \end{array}$$

をえらび、図-2.4.1 からひとつの降雨露出実験ごとに推定する。降雨のもつ洗浄能力をあらわすパラメータとしては、雨量はもちろんであるが、雨の強さをあらわす降水強度  $i$  (mm/sec) の影響もふくむものとするのがのぞましい。そこで時間積分

$$K = \int i^2 dt$$

を洗浄能力のパラメータに採用する。ここで

$$\int idt$$

は総雨量であることに注意する。また、水の密度を  $\sigma$  とすると  $\sigma i^2$  は運動量フラックスの次元をもつ。こういったことから、洗浄能力のパラメータとして、上記の  $K$  を用いることはもっともらしい。

$\varepsilon$  と  $K$  の関係は、図2.5.1 のようになり

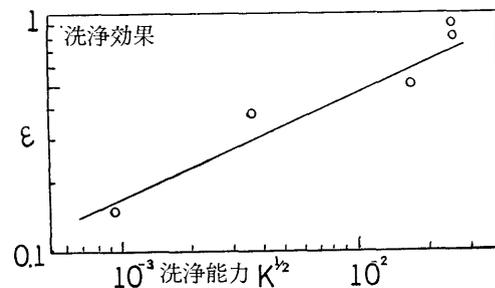


図-2.5.1 降雨洗浄能力パラメータと洗浄効果パラメータの関係

$$\varepsilon = 5.62K^{1/4}$$

とおくことができる。ただし、 $\varepsilon > 1$  となるときは  $\varepsilon - 1$  とする。

#### 2.6 鏡面汚染の推定

この章では、提案された集光鏡に対してその技術的可能性をさぐるため、各段階での効率をもとめる一環として、海塩粒子によって放物柱面鏡がどの程度汚染

され、その結果どのくらい効率が落ちるかを検討しているわけである。したがって、全体として、また一年を通じてこれがどうなるか評価できればよい。海塩粒子濃度や風速を支配する気象状況は時々刻々と変動し、確率的に記述されているから、汚染状況も同様に

確率的統計的に記述するほかない。このような場合、シミュレーションを多数回おこなうことによって、平均的な状況とそこからの偏よりの程度を評価する行き方がある。

そこで、次のような手順でシミュレーションを実施

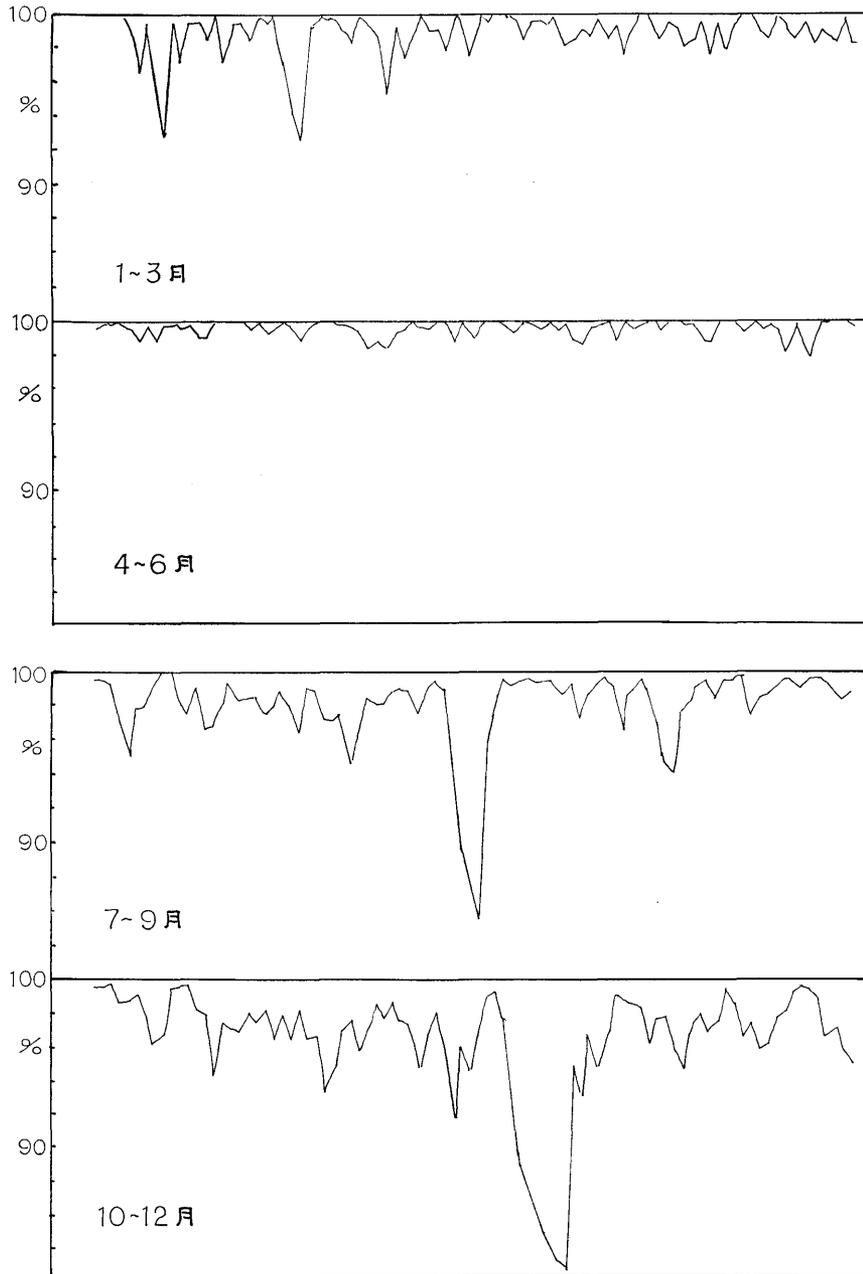


図-2.6.1 シミュレーション結果；反射率変動の一例

してみた。まず、想定海域における気象要素の月平均値は、文献<sup>9)</sup>によれば表2.6.1のとおりである。この月平均値からのずれがどのように分布しているかの資料が得られなかったので、以下のように推定した。

表-2.6.1 想定海域における気象要素

	1月	4月	7月	10月	単位
風速	5	4	5	5	m/sec
降水確率	5	8	7	5	%
降水強度	1.64	2.05	0.685	0.685	mm/hour

風速大のとき汚染が大となるので、そのようなときの分布をよく表現するような分布式をえらぶ。文献<sup>9)</sup>によれば、月平均風速から日平均風速の分布をもとめるのに  $P(<u) = \exp\{-(u/\bar{u})^2\}$  の式を用いる。 $\bar{u}$  は月平均風速、 $u$  は日平均風速で  $P(<u)$  は、 $u$  より大きな風速である確率となる。降雨の分布としては、夕方から夜にかけてしゅう性の雨が降るものと仮定して降雨の可能性のある時間を1日12時間としておく。いま降水確率を  $p$  としたとき1日  $n$  時間降雨のある確率は二項分布が適当と考えられ、

$$W(n) = {}_{12}C_n p^n (1-p)^{12-n}$$

とおくことができる。

表2.6.1には、12ヶ月の中4ヶ月の平均値しか出ていないが、それぞれ、他の2ヶ月の平均値をも表わしていると考え。シミュレーションは、乱数を発生させ、各分布式と比較することによってその日の気象要素を定め、2.3節の反射率低下の簡易予測式、2.5節の洗浄効果の予測式を用いて1時間きざみで計算を進めてゆき、1年経過したところで停止させる。1日平均の反射率の年間変動の一例を図2.6.1に示す。シミュレーションは9回おこなったが、それぞれの年平均反射率を表2.6.2に示す。ほとんど同一の値をしめし偏りはない。また、反射率低下の日平均の分布を図2.6.2に示す。

表-2.6.2 各シミュレーションの年平均反射率

No.	1	2	3	4	5
年平均反射率	98.6	98.8	98.3	98.3	98.5
No.	6	7	8	9	
年平均反射率	98.6	98.4	98.2	98.6	

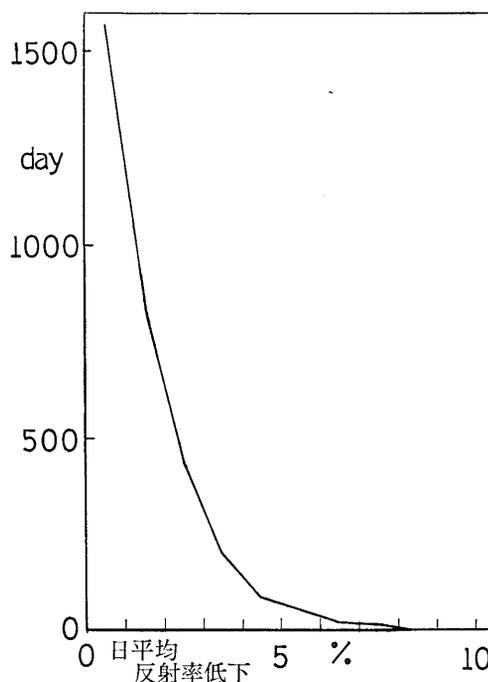


図-2.6.2 シミュレーション結果；反射率低下分布

以上、各種仮定の吟味の余地はあるにしても、年平均で、海塩粒子による汚染の結果の反射率低下は2%程度とみられる。

### 3. 各段階での効率

本計画の技術的可能性をさぐるためには、全体の効率を、太陽エネルギーが変換されてゆく各段階での効率を総合することによってもとめ、筏一基によって得られる最終エネルギー収量ないし最終目標である液体水素収量を計算することが特に重要である。それには、まず第一段階として太陽光を集め適当な媒体に熱として吸収させ、それを輸送するという集光段階、つぎに熱エネルギーを電力に変換して電気分解により水素を発生させ、かつそれを液化して貯蔵する段階がある。さらに、筏の位置保持や追尾に必要なエネルギーも効率を考える上では無視できない。本章では、これら各段階でのエネルギー変換効率について論ずる。

#### 3.1 集光段階

太陽から地球に入射するエネルギー束は太陽常数として知られ、ほぼ

$$2.0 \text{ cal/cm}^2/\text{分}$$

である。大気圏を通過するうちに、これは吸収・散乱

されて、地表での直達日射束は

$$1.3 \text{ cal/cm}^2/\text{分}$$

となる。さらに、雲によるしゃへいなどを考慮し、1年を通じて積分すれば想定海域では、約2/3に減少する。これは、太陽高度をHとしたとき、上記直達日射束に $\sin H$ を乗じて時間積分したものの67%が想定海域単位面積あたりに期待できるという意味である。

次に鏡面での反射率をみつめる。アルミニウムを用いた場合、表面に酸化被膜を作って保護した状態で、入射角全体に平均して90%の反射率に到達させることができる。また、銀をプラスチックフィルムに蒸着した薄膜では98%の反射率に到達できる。しかし、実用化の段階での安全率をみこみ、前節でしらべた海塩による鏡面の汚染などを考慮にいれ、おおよそのところで反射段階での効率を85%とみつめる。

放物柱面鏡で反射した太陽光は、放物柱面の焦点に位置する受熱部へ集まるが、太陽追尾に誤差があると受熱部からはずれて、集光効率が低下することになる。

追尾誤差による集光損失としては、本計画の集光鏡の追尾方式に固有な次の3種がある。第一に、鏡の回転動力には上限があって、 $H=90^\circ$ 付近での高速回転が不可能なための追尾誤差である。これは第2報においてくわしく論じ、最高角速度 $1.4 \times 10^{-3} \text{ rad/sec}$ におさえたとき、そのために生ずる集光損失よりも回転エネルギー節約分の方が上まわること、この集光損失は1年のうちの数日のあいだ、しかも20分間程度生ずるので、1年を通じてみれば無視できること、がわかった。第二に、正確な追尾が可能か、第三に、風や波・海流などの外力およびその変動によって生ずる誤差はどうか、の問題があるが、これらは第3報においてくわしく検討し、集光損失をほとんど生じない許容誤差の範囲内で追尾し得ることがわかった。結局、追尾誤差はまったく考える必要がない。

次に焦点上にある受熱部に集まる太陽光のどれだけ吸収され輸送されるかの問題である。受熱部は焦点

に沿って長く伸び、その中を媒体が流れて熱を発電プラントへ輸送する構造になる。十分な断熱構造にすると、集まった太陽エネルギーがうしなわれるのは受熱面からが主で、とりわけ放射損失が大きいと考えられる。太陽光の波長範囲は、ほぼ $0.3 \sim 4 \mu\text{m}$ で、これに対し、放射損失は放射面温度にもよるが、 $3 \mu\text{m}$ 以上の波長範囲を持っている。太陽光の波長範囲の光をよく吸収し、逆に赤外放射をおさえるような、いわゆる選択吸収面の研究がすすんでいる<sup>32)</sup>。たとえば $PbS$ 蒸着膜では吸収率 $\alpha=0.98$ 、放射率 $\epsilon=0.30$ である。これには温度依存性があるので、到達目標温度をどのぐらいにするか、どのような比熱をもつ熱媒体をもちいどのように設計するか、などによってこの段階の効率がきまるわけであるが、いまのところはごく簡単なモデルによって効率をみつめることにする。

媒体は水をもちい、それは受熱部のパイプ中を流れながら太陽熱を吸収して気液2相となり、つづいて全部水蒸気になってから発電にもちいられる。約1,000mのパイプ中は、この液相・気液2相・気相の三つの部分に分けられるが、それぞれの部分において各種係数の温度依存性などを無視し、圧力は一定として流路長 $dx$ の部分における定常状態で熱バランスを記述する方程式を立てる。液相においては

$$C_p G \frac{d}{dx} T = \alpha Q - w_{\epsilon} \kappa T^4$$

となり、右辺は流入太陽熱と放射損失、左辺は媒体が部分 $dx$ を流れるときにうけとる熱量をあらわす。気液二相流になると媒体がうける熱は気化熱としてもちいられるとして

$$-L \rho_l S \frac{d(ru)}{dx} = \alpha Q - w_{\epsilon} \kappa T_s^4$$

となる。また、連続方程式として

$$\rho_l r u + \rho_g (1-r) u = \text{const.}$$

がみちびかれる。気相においては、圧力一定で理想気体と仮定すれば体積と温度が比例するので、液相と同

表-3.1 受熱部における損失

H	Q (cal/m/sec)	G (kg/sec)	液相 (m)	2相 (m)	気相 (m)	損失 (%)
90°	21,667	28.85	84	619	297	4.8
67°	20,000	26.50	84	618	298	5.2
35°	12,500	16.01	82	609	309	8.4
20°	7,500	8.94	79	586	335	18.4
10°	4,000	2.90	51	385	564	48.3

様に

$$C_{pg}G \frac{d}{dx} T = \alpha Q - w \varepsilon \kappa T^4$$

が成立つ。ただし、 $T$ : 温度、 $T_s$ : 沸点、 $C_{pt}$ 、 $C_{pg}$ : 比熱、 $G$ : 流量、 $S$ : 流路断面積、 $w$ : 受熱面幅、 $u$ : 流速、 $Q$ : 単位時間単位長さあたり入射エネルギー、 $L$ : 気化熱、 $r$ : ボイド比、 $\kappa$ : ステファン・ボルツマン定数、 $\alpha$ : 吸収率、 $\varepsilon$ : 放射率、である。20気圧、入口温度 150°C、出口温度 500°C、 $\alpha=1$ 、 $\varepsilon=0.3$ とした計算結果を表 3.1 にしめす。太陽高度が減ずると入射エネルギー $Q$ も減少するが、出口温度500°Cを得るために、流量を減少させてバランスをとらなければならない。

これを勘案し、熱輸送の損失もふくめて平均10%の損失があるとし、この段階の効率を90%とする。

### 3.2 発電から水素液化まで

受熱部で得られた太陽熱は蓄熱発電装置に移送され電力に変換される。筏の位置保持と姿勢制御に必要な動力、補機類駆動用電力や生活用電力を差引いた電力を用い、海水から電気分解により水素を発生させ、これを液化して貯蔵する。

太陽熱を電力に変換するには、蒸気を作動流体とするランキンサイクルを用いた蒸気タービンプラントを使用するのが最も現実的である。作動流体は日中は受熱部で蒸発・過熱され、一部は蒸気タービンを駆動、一部は蓄熱器に導びかれ蓄熱体を加熱する。夜間は蓄熱器で加熱された作動流体が蒸気タービンを駆動する。

蒸気タービンプラントの熱効率は使用される蒸気の最高温度と圧力、復水器圧力、再熱の有無、給水加熱の回数および構成機器の効率によって決る。本装置に使用される蒸気タービンプラントの出力は、後述のように船用主機とほぼ同程度であり、サイクルの構成や主として出力規模で決る構成機器の効率は船用主機プラントと同様と考えることができる。従ってプラント全体の効率は船用主機プラントの実績に蒸気温度および冷却水温度の考察を加えて推定する。

現在、船用主機蒸気タービンプラントでは、復水器圧力 0.05 kg/cm<sup>2</sup> (冷却水温度 20°C 以下)、蒸気温度 520~540°C、再熱を行った場合、熱効率40~42%が達成されている。再熱を行わない場合でも蒸気温度 510°C で熱効率38%は可能である<sup>9)</sup>。

太陽熱発電の場合の主蒸気温度は、集熱器設計の最

も重要なパラメータである。海上の浮体上で線形放物面鏡を用いて集光する本計画では、集光倍率を考慮して日中で500°C、蓄熱器で蒸気発生を行う夜間は450°C程度を上限と考えるのが適当であろう。

発電機を含めたプラント全体の熱効率と熱力学的に得られる最高の効率であるカルノー効率との比を船用プラントの実績をもとに次のように仮定する。

	蒸気温度500°C	450°C
再熱サイクル	63%	60%
非再熱サイクル	60%	58%

復水器圧力を 0.05 kg/cm<sup>2</sup> (復水器温度 32°C) とすると、カルノー効率は蒸気温度500°C、450°Cに対してそれぞれ60.5%、57.8%となり、1日の間の発電量の比を1:1とするなら、再熱サイクルでは平均熱効率36.4%、非再熱サイクルでは34.9%となる。保守の容易さから非再熱サイクルを選ぶならば、太陽熱の電力への変換効率は35%となる。

冷却水温度は復水器圧力を選定するうえで重要な要素である。筏の設置を想定している南太平洋では海水表面温度は28°C程度であり、これを冷却水として使用する場合、復水器温度は38°C以上(復水器圧力は0.065 kg/cm<sup>2</sup>以上)をとる必要が生じ、熱効率は約1%低下する。しかし海水温度は深度200mで20°C、400mで10°C、800mで5°C程度に下るので<sup>9)</sup>、深度200m以下から冷却水を吸み上げることにより、復水器圧力は0.05 kg/cm<sup>2</sup>をとることができる。

蓄熱体としては融解熱を利用する塩類や顕熱を利用する水、油、碎石などを温度範囲を分けて組合せて使用する。蓄熱体重量当りの利用可能な蓄熱量は使用する蓄熱体の種類や温度範囲範囲で異なるが、おおよそ70 kcal/kg程度を期待することができる。

水を電気分解して水素を発生させるために必要な電力は、現在商用として稼働している装置では48~60 kWh/kgH<sub>2</sub>であるが、高温高圧電解槽法、固体高分子電解質電解法などの開発によって45kWh/kgH<sub>2</sub>以下を将来は期待できる<sup>9)</sup>。

電気分解で得られた水素は液体窒素や液体ヘリウム、膨張タービンなどを用いて液化する。水素分子は原子のスピンの方向の組合せ方でオルソとパラの2種類があるが、オルソはパラにくらべ蒸発熱が小さく蒸発しやすいため、常温では3/4を占めるオルソを液化温度では5%以下にパラに変換しておく必要がある。95%パラ水素の液化動力は10~12kWh/khLH<sub>2</sub>程度が必要である<sup>7)</sup>。

以上から、水を電気分解し液化するには現状では約60kwh/kgLH<sub>2</sub>の電力が必要となる。さらに、各種補機、生活用電力として約10%余分の電力を見積ることになると、液体水素1kgを製造し貯蔵するために必要な電力は65kwhと考えることができる。

### 3.3 位置保持と追尾の全エネルギー

本計画の想定海域は近くに陸地がなく、水深4,000mであって係留することも困難であるので、太陽追尾にくわえて、どう位置を保持するかもひとつの重要な問題であった。この位置保持の精度は、たとえば海流に1日間流されたとしても許容誤差範囲にあるという程度のものであるが、いつまでも同じ海域にとどまっているという保証はない。太陽追尾回転をおこなうためには推進機が当然必要であるので、ついでに位置保持をおこなわせるという考え方ができる。それも、断続的に元の位置にもどるやり方でなく、常にほぼ一定位置を保持するのが、所要エネルギーおよびパワーの点からみて得策である。

この位置保持と追尾のエネルギーとパワーは、集められた太陽光から得られるエネルギーないしパワーからさしひかれる。この段階では効率として何パーセントかを乗ずればよいというのとはことなり、減算によってゼロまたはマイナスとなり得る。たとえプラスであっても相当部分を動力についやすならば、計画自体無意味なものになる。

まず、パワーについて考察する。位置保持動力に向をもちいるか色々の方法があるが、ここでは発電段階からの電力をもちいるものとし、推進機効率を50%とする。入射・集熱・発電の結果得られる太陽熱パワーは、反射効率85%、受熱効率90%、発電効率35%、雲によるしゃへいを考慮して直達日射の65%を用い得るとすれば、1年にわたって平均して

$$4.78 \times 10^4 \text{ kW}$$

の実効パワーが得られる。これは、船用主機とほぼ同程度の出力である。

筏が必要とする最大パワーは、海流速・風速・波・回転角速度のそれぞれ最大値からみつもられるが、想定海域の気象海象<sup>9)</sup>から、海流速0.6m/sec、風速7.2m/sec、波には平均的な値をえらんでおく。最大角速度は正午にあらわれるが、これは $1.4 \times 10^{-3} \text{ rad/sec}$ におさえることができる<sup>9)</sup>。一方、風力によるモーメントと筏の回転角速度は正午においてゼロで、最大値は別の時刻にあらわれるが、角速度によるモーメントよ

り一桁小さいから、回転に要する最大パワーは正午において

$$1.85 \times 10^4 \text{ kW}$$

である。一方、位置保持のためのパワーは、海流力が回転角速度に依存して正午において最大となること、また、風力も同じく正午においてほぼ最大値に近いことから、

$$2.44 \times 10^4 \text{ kW}$$

で、合計、 $4.29 \times 10^4 \text{ kW}$ の最大パワーが、推進機効率を考慮した上で要求される。これは、かなり極端な場合であるが、それでもプラントの実効パワー内におさまっている。

平均的にはどうかといえば、海流速0.4m/sec、風速5.0m/sec、波は平均値、角速度は太陽日周運動の $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$ 、をもちいると、回転に必要なパワーは182kW、位置保持に必要なパワーは

$$5.94 \times 10^3 \text{ kW}$$

であって、太陽熱パワーの約1/10となる。このことを確かめるために、これらのパワーを年間にわたって積分し、追尾と位置保持に要するエネルギーを求めてみる。もし、海流速0.4m/sec、風速5.0m/secとすると

$$5.13 \times 10^7 \text{ kWh/年}$$

となる。年間 $4.19 \times 10^8 \text{ kWh}$ の太陽熱から得られる電力量の約1/10となっている。

## 4. 液化水素タンカーによる輸送

陸地からはるかに離れた太平洋上に設けられた水素製造基地からの水素輸送は船舶によるほかはない。この場合、水素を金属と化合させた金属水素化物として輸送する方式と、液化水素として輸送する方式とが考えられるが、4.1節に述べるように、いまのところ液化水素で輸送する方式のほうが実用化されやすいといえる。

本章では、水素を大気圧下で極低温(-253°C)の液化水素にして運ぶ、いわゆる液化水素タンカー(以後LH<sub>2</sub>タンカーとも書く)について熱工学的な検討を行い、その見地からのLH<sub>2</sub>タンカーの特徴を示すとともに、水素製造基地から日本内地への水素の輸送量を示すことにする。

液化水素タンカーについての検討は現用の球型タンク型液化天然ガスタンカー(以後LNGタンカーとも

書く)をもとに行うことにする。

液化水素と液化メタンの主な性質を表4.1に示す。

表-4.1 液化水素および液化メタンの物性値

	水 素	メ タ ン
分子式	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
分子量	2.02	16.04
沸点 °C (1atm)	-253	-162
液体密度 kg/m <sup>3</sup>	71	425
ガス比重(空気に対する)	0.0695	0.554
蒸発熱 Kcal/kg	107	122
低(真)発熱量 Kcal/kg	28570	11950
液体比熱 Kcal/kg°C		0.83(-162°C)
ガス比熱比	1.41	1.31
ガス定数 KJ/kg K	4.124	0.519

#### 4.1 水素の気液固相輸送の比較<sup>10)~13)</sup>

輸送される水素の形態には、耐圧容器に入れられた高圧の気体、極低温で液化されたほぼ大気圧の液体および常温で大気圧あるいは数気圧の比較的低下下の金属水素化物としての固体とがある。表4.1.1にこのような水素の形態および相における水素の物性値を示した。

船舶の水素輸送における水素の形態の適否を我々が現在持ち合わせている技術情報をもとに大雑把に比較すると以下に示すようにいまのところ液化水素がもっとも実現性が高いといえよう。

高圧気体で大量輸送する場合には、溶接技術の制約からタンクに使用できる鋼材の厚さは最大40mm程度となり、数万 m<sup>3</sup> 程度の大型タンクに入れられる水素の圧力は約20 kg/cm<sup>2</sup>が限度となる。表4.1.1から、液化水素を運ぶ場合と等しい容積をもつタンクで輸送するとなれば、液化水素の1/42の重量の水素しか運べ

ず、船の主機関の燃料消費量にも足りないので、気相による水素輸送の実現の可能性はない。

金属水素化物として輸送する場合には二つの方式が考えられる。一つは、適当な大きさの容器に水素化物をつめたものを運ぶ、いわゆるコンテナ輸送方式である。他の一つは、船上に据えたタンク内に適当な金属を充填し、水素製造基地では水素ガスをこれに導入して水素化物を作り、荷上げ地ではこれを分解して水素ガスを取り出すという方式である。

金属が水素を吸蔵して水素化物となったり、水素化物が水素を放出して金属となる反応は、ほぼ可逆的な平衡反応であって、反応が成立する温度と圧力の関係は図4.1.1に示すように金属によって異なる。

船に水素化物タンクを据え付けて運ぶ方式では、たかだか室温よりやや高い程度の温度と数気圧程度の解離圧をもつ金属水素化物を使用する必要がある。図4.1.1より、水素化鉄チタン (FeTiH<sub>2</sub>) および水素化ランタンニッケル (LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>) などがこの条件を満た

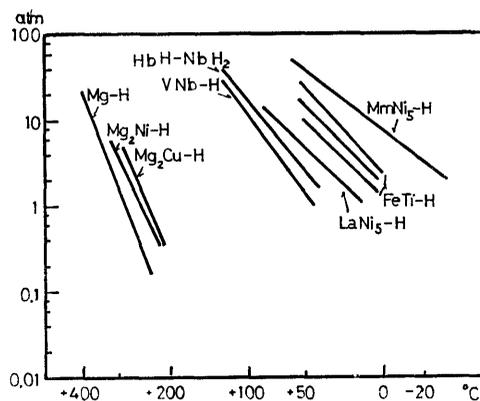


図-4.1.1 金属水素化物の平衡解離曲線

表-4.1.1 水素の形態および相別の性質

水素の形態および相	水素含量 (重量%)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含有水素単位重量あたりの重量 (kg/kg)	含有水素単位重量あたりの容積 m <sup>3</sup> /kg	同一水素重量あたりの容積比 (対液体水素比)	圧縮, 液化, 分解に必要な熱量 Kcal/kgH <sub>2</sub>
水素 気体 常圧 (1 <sup>a</sup> *20°C) 高圧(20 <sup>a</sup> *20°C)	100	0.084	1	11.9	846	—
		1.68	1	0.596	42	1380
		71	1	0.0141	1	2838
		81	1	0.0123	0.87	
水素化物 LaNi <sub>5</sub> H <sub>6~7</sub>	1.6	7950	62.5	0.00786	0.56	7640
FeTiH <sub>1.6</sub>	1.5	2430	66.7	0.027	1.91	4028
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>2</sub>						
MgH <sub>2</sub>	7.3	907	14.2	0.015	1.06	9250

している。いっぽう表 4.1.1 によれば、これらの水素化物の重量は液化水素と同一重量の水素を運ぶとき液化水素の60倍以上になる。因みに、125,000m<sup>3</sup>液化水素タンカーを想定した場合、LH<sub>2</sub>タンカーでは積荷の重量は僅か9×10<sup>9</sup>TONにすぎないが、水素化ランタンニッケル Hydride Carrierでは5.57×10<sup>9</sup>TONとなる。現用の125,000m<sup>3</sup>型液化天然ガスタンカーの排水容積は約95,000m<sup>3</sup>であるから水素化物の重量を支えるためには排水容積をLNGタンカの6倍にもしなければならぬ。

コンテナ輸送方式では大気圧以上の解離圧をえるのに必要な温度がかなり高い水素化物を使用できる可能性がある。図4.1.1より、例えば水素化マンガン(MgH<sub>2</sub>)などがそれである。表4.1.1によれば、液化水素と同一重量を輸送するのに必要な水素化マンガンの容積は液化水素のそれにほぼ等しい。したがって重量・容積的にはこの方式は可能性がある。

金属水素化物から水素を放出させるには表4.1.1に示すようかなり多量の熱を必要とする。例えば水素化マンガンは、放出した水素を燃焼してえられる熱量(発熱量)の32%もの解離熱が必要である。この熱は輸送してきた水素からえなければならぬ。いっぽう液化水素では、消費地の周囲温度(大気温度あるいは海水温度)と水素との温度差を利用する、いわゆる冷熱利用によって水素製造基地で液化のために使われたエネルギーの一部が回復利用できる。したがってエネルギーの輸送の見地からは、いまのところ船舶による水素輸送の形態は、大気圧下の液化水素がもっとも実現性が高いと考えられる。

#### 4.2 液化水素タンカの船型の特徴<sup>(13)~(19)</sup>

液化水素の密度は液化メタンのその1/6であるため、船型が同じ場合液化水素タンカの吃水は液化メタンタンカに比べて極めて少くなる。従ってこのような船型の開発は大きな問題であるが、本論の趣旨から基本計画の考え方とは別に、液化水素タンカの特徴を推定する。LNG船と相似の船型において、同一タンク容積をもつLNGタンカとLH<sub>2</sub>タンカの吃水差 $\Delta d$ を次式で近似する。

$$\begin{aligned} \Delta d \rho_0 A_w L_H &= (\rho_{LNG} - \rho_{LH}) V_T \\ \therefore \Delta d &= \frac{(\rho_{LNG} - \rho_{LH}) V_T}{\rho_0 (C_w L B)_{LH}} \\ &= \frac{(\rho_{LNG} - \rho_{LH}) V_T}{\rho_0 (C_w L B)_{LNG} \cdot \frac{C_w L H}{C_w L N G}} \end{aligned}$$

(108)

$$\begin{aligned} & \frac{(L B D)_{LH}}{(L B D)_{LNG}} \cdot \frac{D_{LNG}}{D_{LH}} \\ &= \frac{(\rho_{LNG} - \rho_{LH}) V_T}{\rho_0 (C_w L B)_{LNG} \cdot \frac{C_w L H}{C_w L N G}} \cdot \frac{\eta_{TLNG}}{\eta_{TLH}} \cdot \frac{D_{LNG}}{D_{LH}} \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

ここで、 $\rho_0, \rho_{LNG}, \rho_{LH}$ : 海水, LNG, LH<sub>2</sub>の密度(kg/cm<sup>3</sup>),  $V_T$ : タンク容積(m<sup>3</sup>),  $L, B, D$ : 船体の垂線間長, 型幅, 深さ(m),  $A_w$ : 水線面積(m<sup>2</sup>),  $C_w = A_w / L B$ : 水線面積係数,  $\eta_T = V_T / L B D$ : タンク容積効率。添字のLNGおよびLHはそれぞれ液化メタンおよび液化水素を示す。

後節の検討などから次式が仮定できる。

$$\begin{aligned} \frac{C_w L H}{C_w L N G} &\leq \sim 1, \quad \frac{\eta_{TLNG}}{\eta_{TLH}} \geq \sim 1, \\ \frac{D_{LNG}}{D_{LH}} &= \left( \frac{\eta_{TLH}}{\eta_{TLNG}} \right)^{\frac{1}{3}} \doteq 1 \end{aligned}$$

したがって、式(4.2.1)は次式で近似できる。

$$\Delta d \doteq \frac{(\rho_{LNG} - \rho_{LH}) V_T}{\rho_0 (C_w L B)_{LNG}} \quad (4.2.2)$$

現用のLNGタンカの $C_w$ の平均値および $\rho_{LNG}, \rho_{LH}$ の値を式(4.2.2)に代入すると次式がえられる。

$$\Delta d \doteq 0.41 \frac{V_T}{(L B)_{LNG}} \quad (\text{m}) \quad (4.2.3)$$

したがってLH<sub>2</sub>タンカの吃水 $d_{LH}$ とLNGタンカのそれ $d_{LNG}$ の間には次式が成立つ。

$$\begin{aligned} d_{LH} &= d_{LNG} - \Delta d = d_{LNG} \left( 1 - \frac{\Delta d}{d_{LNG}} \right) \\ &= d_{LNG} \left[ 1 - 0.41 \frac{V_T}{(L B D)_{LNG} \left( \frac{d}{D} \right)_{LNG}} \right] \\ &= d_{LNG} \left[ 1 - 0.41 \frac{\eta_{TLNG}}{\left( \frac{d}{D} \right)_{LNG}} \right] \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

図4.2.1aに現用のLNGタンカの吃水深さ比 $d/D$ と式(4.2.4)を用いて推定した同一船型のLH<sub>2</sub>タンカの $d/D$ を示す。LH<sub>2</sub>タンカの $d/D$ はLNGタンカのそれよりかなり小さくなるが、タンク容積 $V_T$ が10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>程度の船の場合には現用の自動車輸送専用船(PCCと略記)の $d/D$ より著しく小さくなることはない。

図4.2.1bにLH<sub>2</sub>タンカの吃水・長さ比 $d/L$ を示すが、自動車輸送専用船の $d/D$ よりかなり小さくなる。また最近開発されている浅吃水船(SDV, USDV)

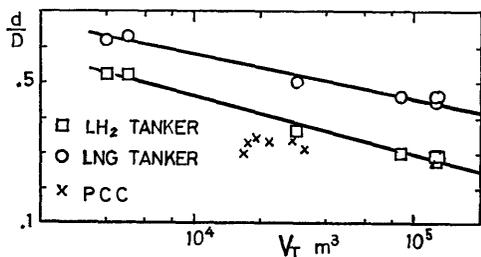


図-4.2.1a LH<sub>2</sub> タンカの吃水・深さ比

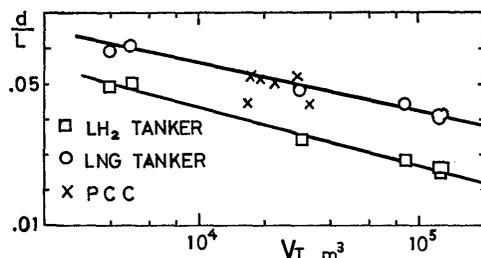


図-4.2.1b LH<sub>2</sub> タンカの吃水・長さ比

と比べても、例えば1軸SDVの $d/D=0.05$ 、2軸USDVの $d/L=0.043$ に対してLH<sub>2</sub>タンカーの $d/L$ は0.025~0.04と著しく小さい。

$d/D$ 、 $d/L$ が小さいことは風の影響を受けやすかったり針路安定性に不安を生じる可能性が極めて大きい。

本章では、はじめに述べたようにLH<sub>2</sub>タンカーの特徴を主として熱工学的見地にたって検討することにして、船体の安定性に関する具体的検討は省略する。

吃水が極めて小さいことはプロペラの没水に問題が生じる。プロペラ直径と吃水の比 $D_p/d$ の実積値は通常0.7~0.85にとられているがLH<sub>2</sub>タンカーの場合がどうかを検討する。

プロペラ直径の決定を第一近似として行うために、プロペラ単独の推進効率を最高にする、いわゆる最適プロペラ直径の考え方をを用いることにする。最適プロペラ直径 $D_p$ （以下簡単のためプロペラ直径と呼ぶ）は門井ら<sup>8)</sup>により次式で表わされる。

$$D_p = k \frac{P^{\frac{\alpha}{4}}}{N^{1-\frac{\alpha}{2}} [(1-w)v]^{\frac{5}{4}\alpha-1}} \quad (4.2.5)$$

ここで、 $P$ : 伝達馬力(PS)、 $N$ : プロペラ回転数(rpm)、 $v$ : 船速(kt)、 $k$ 、 $\alpha$ 、 $w$ : 実験で決まる定数。

簡単のため門井らが提案している実験値の平均をとって $k=14.3$ 、 $\alpha=0.863$ とし、 $w=0.25$ と仮定して式(4.2.5)に代入すると次式がえられる。

$$D_p = 13.9 \frac{P^{0.22}}{N^{0.57} v^{0.08}} \quad (4.2.6)$$

伝達馬力 $P$ は次式で定義されるアドミラルティ係数（通常は次式の逆数をアドミラルティ係数と定義するが、後の計算の便利のためにこのように定義する） $C_A$ を用いると、式(4.2.8)で与えられる。

$$C_A = \frac{P}{(LBD)^{\frac{2}{3}} v^3} \quad (4.2.7)$$

$$\begin{aligned} P &= C_A (LBD)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{2}{3}} v^3 \\ &= C_A \left(\frac{V_T}{\eta_T}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{2}{3}} v^3 \end{aligned} \quad (4.2.8)$$

式中の記号の意味は式(4.2.1)における同じである。式(4.2.8)により式(4.2.6)は次式で表わされる。

$$D_p = \text{Const.} \left(\frac{V_T}{\eta_T}\right)^{0.147} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.147} v^{0.58} N^{-0.57} \quad (4.2.9)$$

LH<sub>2</sub>タンカーとLNGタンカーのプロペラ直径吃水比 $D_p/d$ の関係は、タンク容積 $V_T$ および船速が等しい場合式(4.2.4)および式(4.2.9)を用いて次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_p}{d}\right)_{LH} &= \left(\frac{\eta_{TLNG}}{\eta_{TLH}}\right)^{0.147} \left[\left(\frac{d}{D}\right)_{LH}\right]^{0.147} \\ \left(\frac{D_p}{d}\right)_{LNG} &= \left(\frac{N_{LNG}}{N_{LH}}\right)^{0.57} \left[1 - 0.41 \left(\frac{\eta_T}{d}\right)_{LNG}\right]^{-1} \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

後節での検討から次の関係がえられる。

$$\left(\frac{\eta_{TLNG}}{\eta_{TLH}}\right)^{0.147} \left[\left(\frac{d}{D}\right)_{LH}\right]^{0.147} \div \left[\left(\frac{d}{D}\right)_{LNG}\right] \div 1.1$$

$$\left[\left(\frac{\eta_T}{d}\right)_{LNG}\right] \div 1 (V_T=10^4) \sim 2 (V_T=10^5)$$

したがってLH<sub>2</sub>タンカーのプロペラ直径吃水比 $D_p/d$ をLNGタンカーのそれに等しくするためにはプロペラ回転数は次式を満たすようにしなければならぬ。