

No.8801 流下液膜蒸発法に関する研究

外山茂樹(名古屋大学工学部)

1. 緒言 流下液膜型蒸発装置の伝熱促進上、基本的な円柱間と球体間に懸垂する液膜や液滴の平衡形状とその安定性を有限要素法により数値解析を行った。また、その応用として山型多重効用型や太陽電池との複合型海水淡水化装置の開発や検討を行った。

2. 円柱間に形成されるメニスカスの形状

2本の平行な円柱間に付着するメニスカスの平衡形状は、液膜の持つ表面張力と重力による全ポテンシャルエネルギーが、液膜面積の拘束条件の基で極値を持つ必要条件から決定できる。ここで、円柱表面での3相接触角がゼロとなる境界条件から接触線を決定した。上面と下面におけるメニスカス形状をその位置や円弧近似との相違を表している。

3. 球体間に形成されるメニスカス形状と安定性

2つの球体間に形成される液滴の平衡形状とその安定性は、一定体積の拘束条件の基で、液滴の持つ全ポテンシャルエネルギーが最小となる時の形状であり、最小固有値の符号によって安定性を判別し、その安定の限界を示した。

4. 多重効用型太陽熱利用の蒸発装置の開発

4-1 実験室規模の山型多重効用型太陽熱蒸発装置の試作

腐食性の少ないプラスチックフィルムを仕切り板に用い、その裏面に接着したウイックにメニスカスによって海水を供給する山型の多重効用型海水淡水化装置を試作し、実験室規模における性能評価を行った。

4-2 太陽電池とのハイブリッド型蒸発装置のシミュレーション

太陽電池は、日射強度に比例して短絡電流は増加するが、パネル温度が増加し開放電圧が下がるために効率低下となる特性がある。そのためにパネル温度を冷却すると同時に海水を淡水化できるハイブリッド型蒸発装置のシミュレーションを行い、その有効性を検討した。

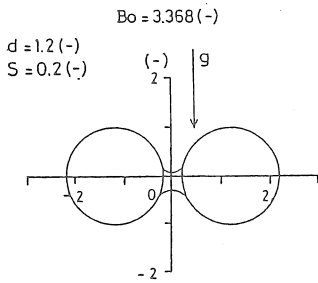


Fig. 2-1 円柱間のメニスカス形状

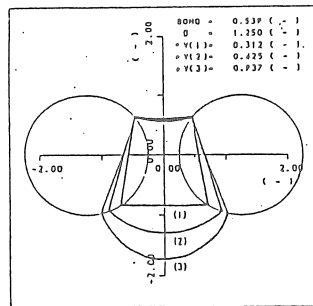


Fig. 3-1 球体間のメニスカス形状

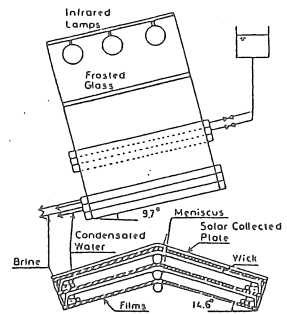


Fig. 4-1 山型海水淡水化実験装置

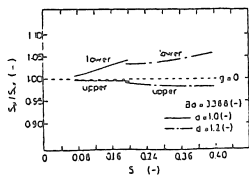
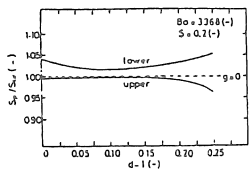


Fig. 2-2 円弧近似による相違

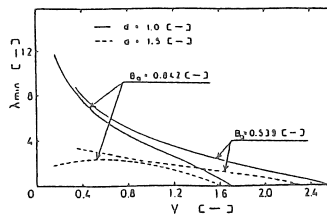


Fig. 3-2 最小固有値

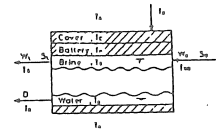


Fig. 4-2 Simultaneous Model

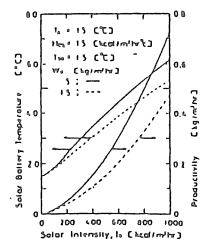


Fig. 4-2 太陽電池パネル温度分布

No.8801 流下液膜蒸発法に関する研究

外山茂樹(名古屋大学工学部)

1. 緒言

流下液膜型の蒸発装置において、各種形状の伝熱表面における液膜や液滴形状とその安定性を予測することは、伝熱促進や性能向上を計る上で必要である。ここでは、物体間に懸かる液滴とし基本的な円柱間と球状固体間の液滴形状と安定性について研究した。さらに、その応用として太陽熱利用蒸発装置についても研究した。

2. 円柱間に形成されるメニスカスの形状

2・1 基礎方程式

2本の平行な円柱間に付着する液膜のメニスカス形状を決定するために、Fig.2-1のようなデカルト座標系を採用した。メニスカス形状を $f(x)$ とすると、液膜の持つ表面張力と重力による全ポテンシャルエネルギー(E)は次式となる。

$$E = \sigma \int_0^x \sqrt{1 + f_x^2} dx \pm \frac{1}{2} \int_0^x \Delta \rho g f^2 dx \quad (2-1)$$

ここで、 σ は表面張力、 $\Delta \rho$ は液体と空気の密度差、 g は重力加速度、 $f_x = df/dx$ であり、第2項の複合は+が上部のメニスカス形状を、-が下部のメニスカス形状を表す。

液膜の面積は次式で表される。

$$S = \pm \int_0^x f dx - A, \quad A = \frac{r^2}{4} (2\Phi + \sin 2\Phi) \quad (2-2)$$

(2-2)式で表される一定面積の拘束条件の基で、液膜の持つ全ポテンシャルエネルギーを極小にする条件から、液膜の平衡状態におけるメニスカス形状を決定できる。従って、次式の関数(F)の第1変分(δF)がゼロとなる条件を満足しなければならない。

$$F = E + \lambda \left\{ S - \left(\pm \int_0^x f dx - A \right) \right\} \quad (2-3)$$

ここで、 λ はラグランジェ定数である。計算における境界条件は、積分範囲を上部のメニスカス (f_2) に関しては $[0, x_2]$ 、下部 (f_1) は $[0, x_1]$ とすると(2-4)式となる。

$$\begin{aligned} \left. \frac{df_1}{dx} \right|_{x=0} &= 0 \\ \left. \frac{df_2}{dx} \right|_{x=0} &= 0 \\ \left. \frac{df_1}{dx} \right|_{x=x_1} &= \cot \phi_1 \\ \left. \frac{df_2}{dx} \right|_{x=x_2} &= \cot \phi_2 \end{aligned} \quad (2-4)$$

$x=0$ においては液面の対称条件を表し、 $x=x_1, x_2$ の気液固三相接触線における条件は液体の接触角がゼロとしたときの境界条件を表している。

2・2 計算方法

(2-3)式の関数 (F) の第1変分 (δF) がゼロとなる条件式に、有限要素法を用いて数値解析を行った。下部および上部の積分領域 $[0, x_1]$ 、 $[0, x_2]$ を1要素当りに3節点を有する線要素に分割し、メニスカス形状 f_1 、 f_2 を双2次のアイソパラメトリックな形状関数を用いて離散化を行った。そのメニスカスに関する離散式を $\delta F = 0$ の式に代入すると、節点値における未知のメニスカス形状に関する連立方程式を得る。全節点値数 n に対してラグランジェ定数も未知数であるので全未知数の数は $n + 1$ 個となる。故に、 $\delta F = 0$ の方程式に面積を表す(2-2)式を併せて $n + 1$ 個の連立方程式とし、非線形な代数方程式となるために、Newton-Raphson法を用いて数値解を求めた。

2・3 メニスカス形状の計算結果

数値計算結果の一例を図に示す。ここでは、 B_0 は円柱半径 r を代表長さとしたボンド数を表し、 $\Delta \rho g r^2 / \sigma$ で定義される無次元数である。Fig.2-2、2-3は、重力によってメニスカス形状や付着位置の違いを示した図形出力である。円柱間距離が小さく、液膜の供給量少ない場合においても、重力によって上部のメニスカスが下方に下がって付着している様子がわかる。

そこで、供給液膜量 S 、円柱間距離 d 、および円柱半径と液体の表面張力によるボンド数がメニスカス形状に及ぼす影響を、Fig.2-4-a,bではその液膜面積比 S_p/S に関して、Fig.2-5-a,bでは気液固三相接触線の位置 ϕ に関して、重力の影響がない場合と併せてそれぞれ図示した。ボンド数が小さい時の液膜面積比 S_p/S は、重力の影響が小さく上部と下部との相違は小さいが、ボンド数が大きくなるほどその相違は著しくなり、特に円柱間距離の影響が強いことがわかる。つまり、ボンド数が大きいほど付着液膜の重力に対する液体の表面張力が小さいために液膜を十分に支えきれないためである。それ故に、ボンド数が大きいほど気液固三相接触線の位置 ϕ は、重力を考慮しないつまり上下対称の液膜形状の位置より下方に位置している。また、表面張力によって支えなければならない液膜量が小さいとき、つまりボンド数が小さいときには一般にメ

ニスカス形状は円弧で近似できるが、円柱間距離や供給液膜量が大きくなると円弧で近似できなくなるために、Fig.2-6では円弧近似に対する液膜面積比を表している。図から上部に関してはほぼ円弧で近似できるが、下部に関してはその相違が著しくなることがわかった。この章の一部は、第22回化学工学秋季大会(東京、1989年10月)において発表する。

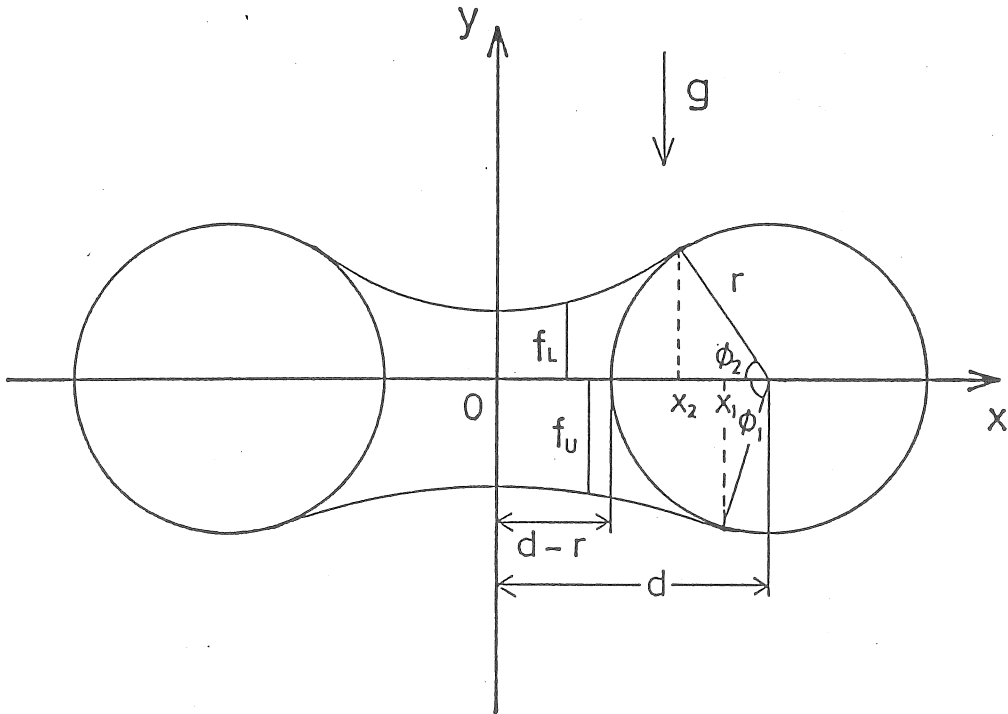


Fig.2-1 Cartesian coordinate

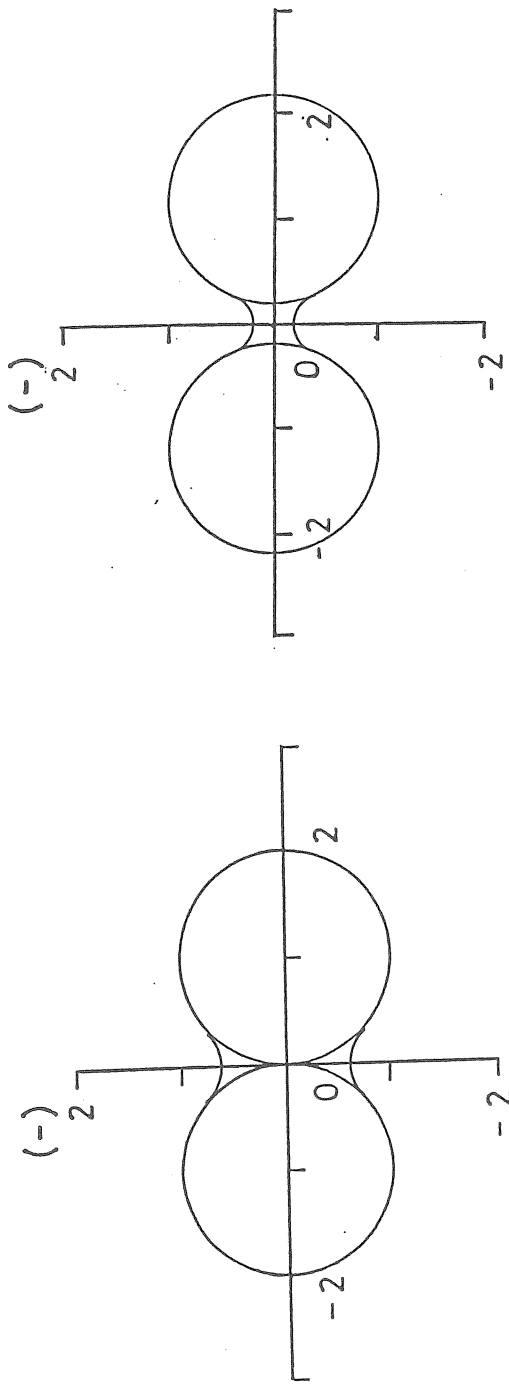


Fig.2-2 Meniscus shape with no gap

$Bo = 3.368 (-)$

$d = 1.2 (-)$

$S = 0.2 (-)$

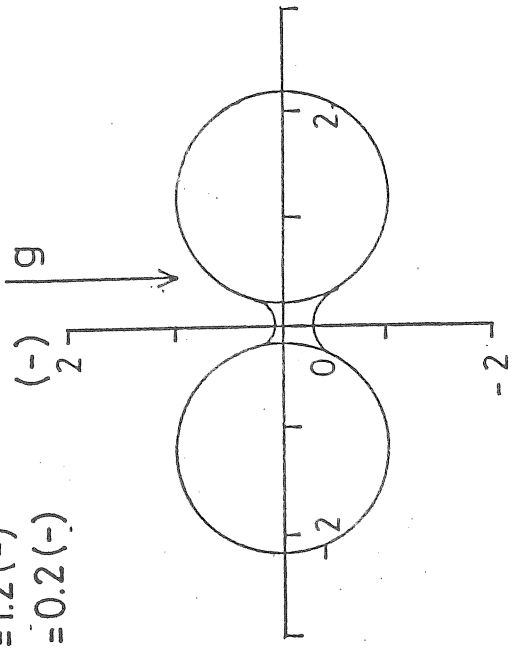


Fig.2-3 Meniscus shape with a gap

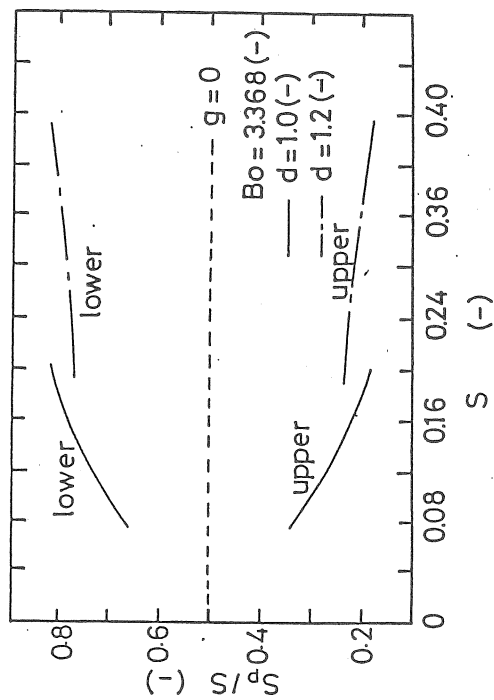
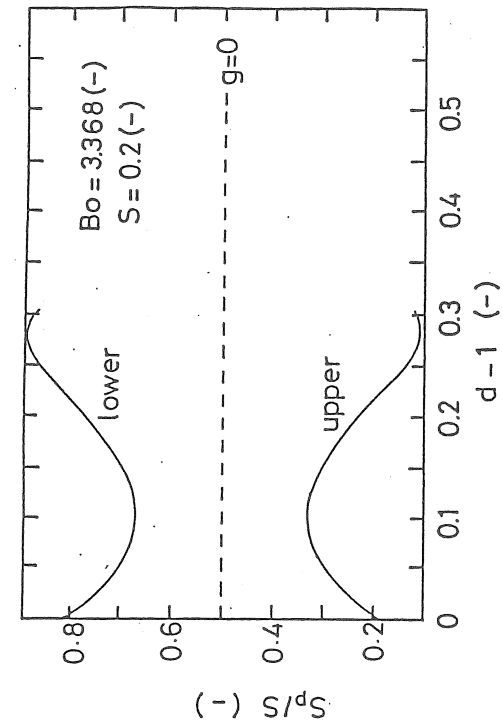


Fig.2-4-b Ratio of area vs. a gap and a area at Bond number=3.368

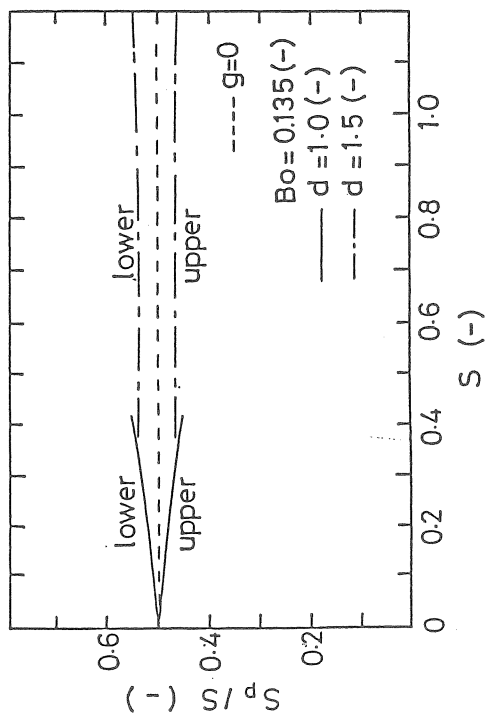
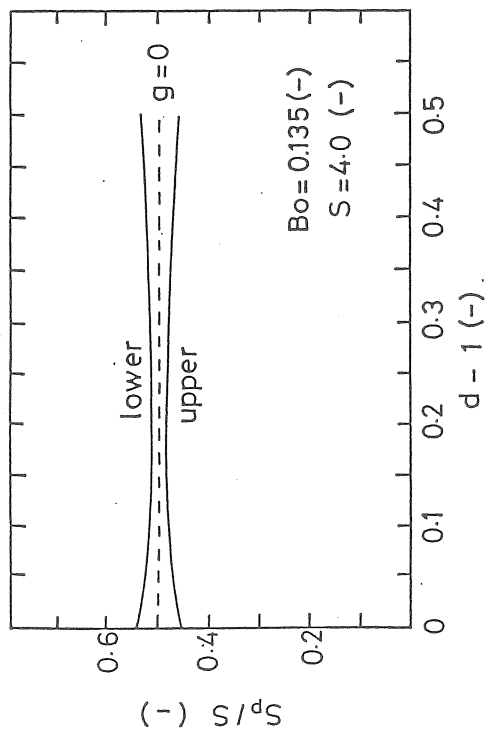


Fig.2-4-a Ratio of area vs. a gap and a area at Bond number=0.135

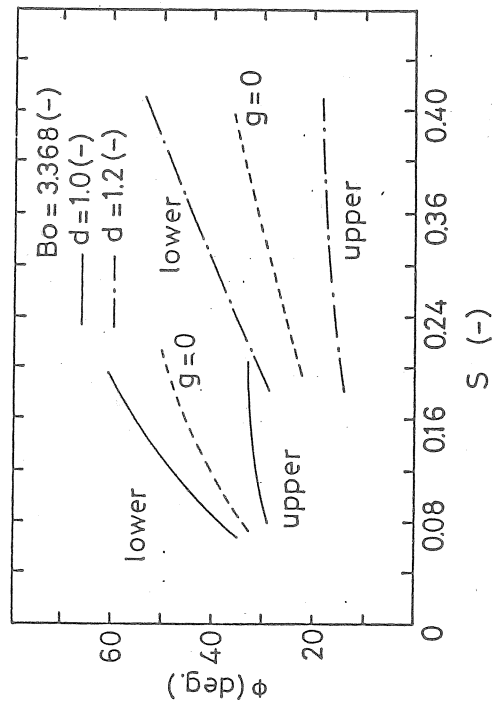
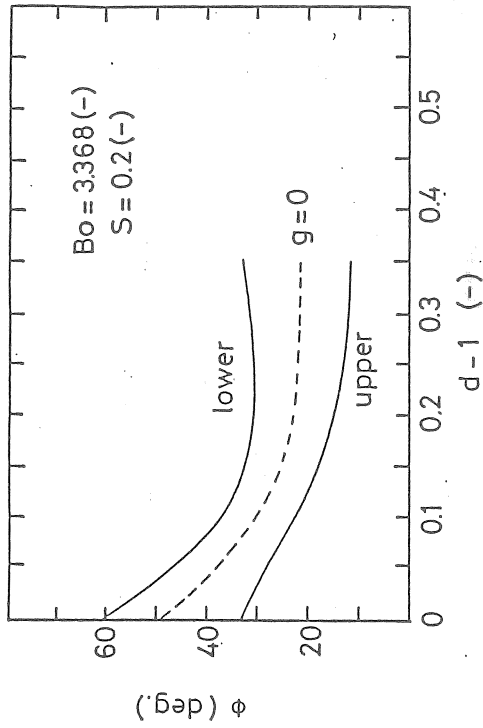


Fig.2-5-b Contact point vs. a gap and a area at Bond number=3.368

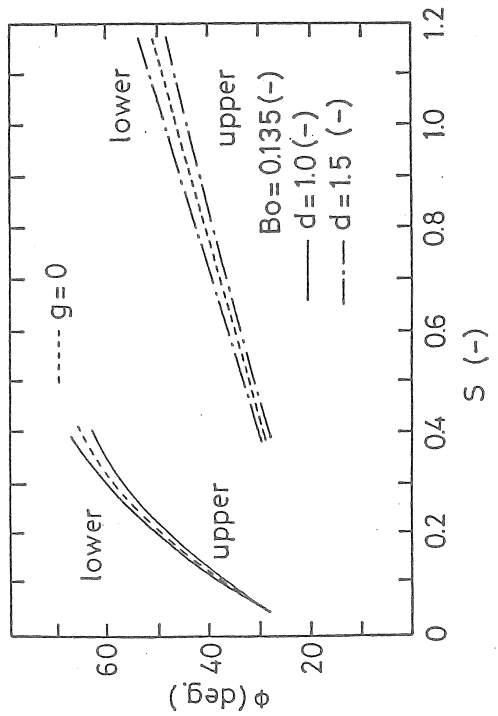
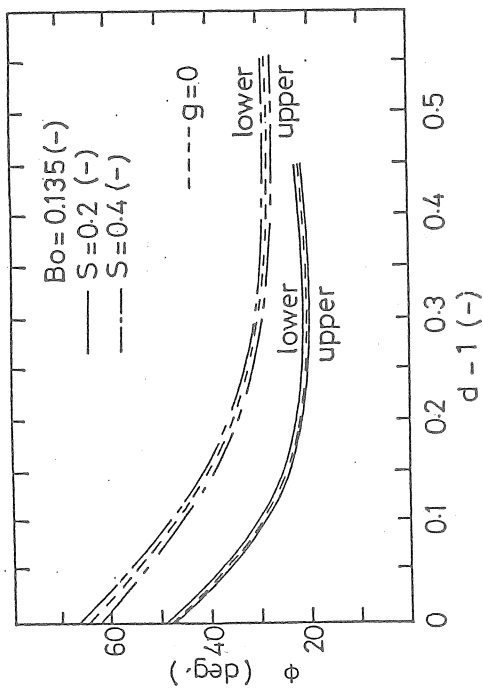


Fig.2-5-a Contact point vs. a gap and a area at Bond number=0.135

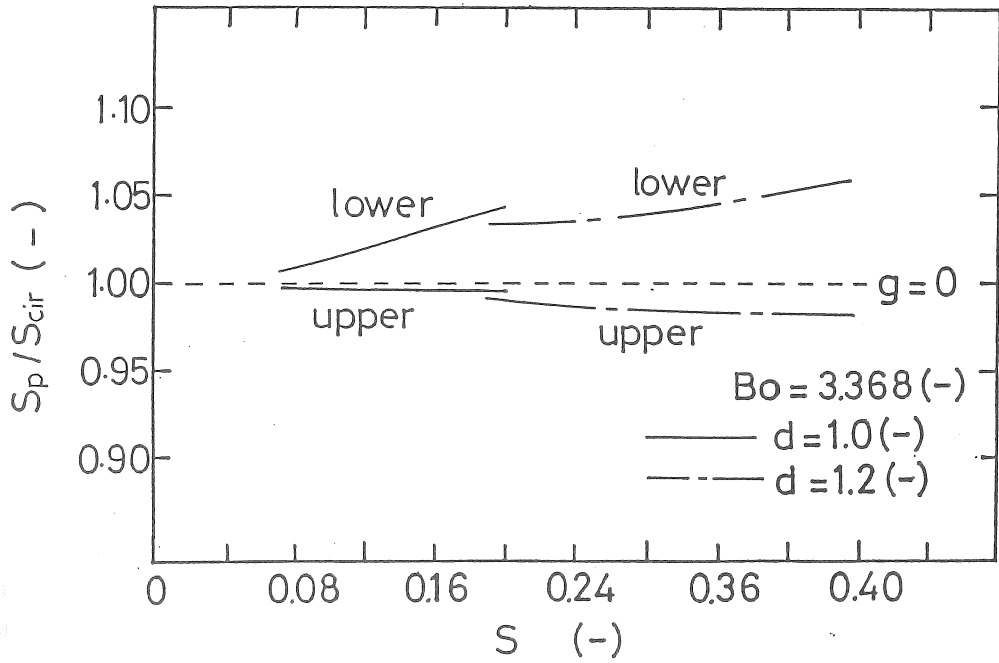
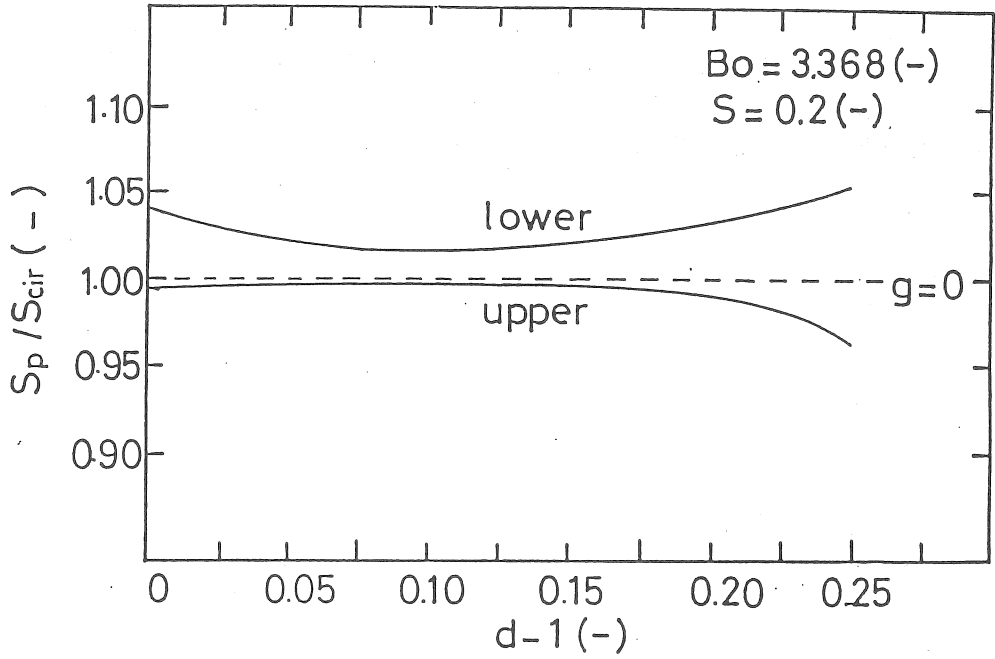


Fig.2-6 Ration of area to area with circular meniscus

3. 球体間に形成されるメニスカス形状と安定性

3・1 基礎方程式

2つの球体間に形成される液滴の形状を表す円筒座標系をFig.3-1の様に設定すると、液滴表面 $f(x, \theta)$ は液の表面張力と重力とが釣り合っており、液滴の持つ表面張力と重力との全ポテンシャルエネルギーは(3-1)式となる。

$$E = \sigma \int_D \sqrt{(f^2 + f_x^2 + f_\theta^2)} dD + \frac{1}{3} \int_D \Delta \rho g f^3 \sin \theta dD \quad (3-1)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_D f^2 dD \quad (3-2)$$

ここで、 σ は表面張力、 $\Delta \rho$ は水と空気の密度差、 g は重力加速度を表し、 $f_x = df/dx$ 、 $f_\theta = df/d\theta$ である。(3-2)式の体積拘束条件の基で、液滴の持つ全ポテンシャルエネルギーを最小にする条件から、平衡状態における液滴を決定することができる。そのために次式の関数 F を定義する。

$$F = E + \lambda \left\{ V - \left(\frac{1}{2} \int_D f^2 dx \right) \right\} \quad (3-3)$$

ここで、 λ はラグランジュ定数である。積分領域 D の範囲 $[x, \theta]$ は、 $0 \leq x \leq x_c(\theta)$ 、 $0 \leq \theta \leq \pm \pi/2$ であり、 $x=0$ 、 $\theta = \pm \pi/2$ における境界条件は対称条件を、気液固3相接触線における境界条件は固定接触線の条件であり、次式となる。

$$\begin{aligned} \partial f / \partial x_{x=0} &= 0 & \partial f / \partial \theta_{\theta = \pm \pi/2} &= 0 \\ f(x = x_c) &= \text{const.} \end{aligned} \quad (3-4)$$

平衡状態におけるメニスカス形状は関数 F が極小を取る場合であり、そのためには関数 F の第1変分がゼロとなることが必要条件である。さらに、その平衡形状が実際に安定に存在するかどうかを判別するためには、平衡形状の安定解析つまり平衡形状が関数 F を最小にすることが十分であり、関数 F の第2変分の符号が正となっていることを確かめればよい。この判定は次式で表される最小値問題に変換できる。

$$\lambda_i = \min_{\eta(x, \theta)} \frac{\delta^2 F}{\langle \eta_i, \eta_j \rangle} \quad (3-5)$$

$$\langle \eta_i, f \rangle = 0, \quad \langle \eta_i, \eta_j \rangle = 0 \quad (3-6)$$

ここで、

$$\langle p, q \rangle = \int_D p(x, \theta) q(x, \theta) dD$$

η は平衡形状からの変動量である。(3-6)式における前式は一定の供給体積における安定解析を行うために、供給体積の変動量はゼロであることを意味している。そのために、拘束条件付きの最小問題となっている。また、後式は変動量の直交性を表している。(3-6)式における λ が正であることは右辺の関数 F の第2変分が正であることに等しく、この時に平衡形状は安定性を示す。

3・2 計算方法

関数 F の第1変分がゼロである平衡形状およびその第2変分に関する安定計算に関して有限要素法を適用して数値計算を行った。積分領域 D の範囲 $[x, \theta]$ を4辺形要素に分割し、1要素当たり9節点を持つ双2次多項式の形状関数を用いて液滴形状の離散化を行った。その液滴形状に関する離散式を第1変分がゼロである $\delta F = 0$ の式に代入すると、節点値における未知の液滴形状に関する連立方程式を得る。全節点値数 n に対してラグランジェ定数も未知数であるので全未知数の数は $n + 1$ 個となる。故に、 $\delta F = 0$ の方程式に体積を表す(3-2)式を併せて $n + 1$ 個の連立方程式とし、非線形な代数方程式となるために、Newton-Raphson法を用いて平衡形状を求めた。

安定解析に関しても同様に、平衡形状からの変動量である η を離散化して拘束条件付きの最小値問題(3-5)式に代入すると、最終的には次式の固有値問題に帰着される。

$$J x_i = \lambda_i M x_i, \quad c x_i = 0 \quad (3-7)$$

3・3 境界条件としての3相接触線

気液固3相接触線における境界条件に関しては、固体表面が乾燥している部分と濡れている部分とが存在するので、まず剛球を用いた簡単な実験結果より接触線をほぼ円形と近似できると判断し、実験によって3相接触線の最高点と最低点のデータを用いて円形で表した。そのために3相接触線における接触角は分布を生じる。固体表面が完全に濡れている状態であれば3相接触線における接触角は一定となるはずである。

3・4 メニスカス形状と安定性に関する計算結果

計算によって得られた液滴形状の1例をFig.3-2に示す。右の図は $x = 0$ の左右対称面における液滴の断面形状を表しており、供給液滴量の増加にともなって下方に垂下して付着し、液滴の断面形状が円形から下方に膨らんだ楕円体に変形して行く様子がわかる。さらにFig.3-3においては、ボンド数が液滴形状に及ぼす影響を表している。ボンド数が大きい場合、液滴の重力に対して支える表面張力が小さくなるので、供給液滴量の増加にともなって上部のメニスカスが下方に下がった状態で平衡状態となっている。

Fig.3-4は、3相接触線を円形で近似した計算データと実験データとの誤差について、左右対称面における上部と下部の液面高さに関して比較した図である。下部の液面高さに関しては計算結果の方が小さいがよく傾向を捕らえている。

Fig.3-5は、3相接触線における接触角分布を表している。ボンド数が低いときは、球体の中心を通る平面より上部においてはほとんど変化はなく、供給液滴体積と共に下方に行くほど増加して行く。一方、ボンド数が大きいときは表面張力よりも重力が大きく作用するため、上部の液面までも下方に下がることから接触角が小さくゼロに近くなっている。

拘束条件付きの固有値問題における最小固有値の変化をFig.3-6に示す。これより、安定した液滴が形成される液滴体積の範囲を知ることができる。この章の一部は、第40回日本海水学会年会(岡山、1989年6月)において発表の予定。

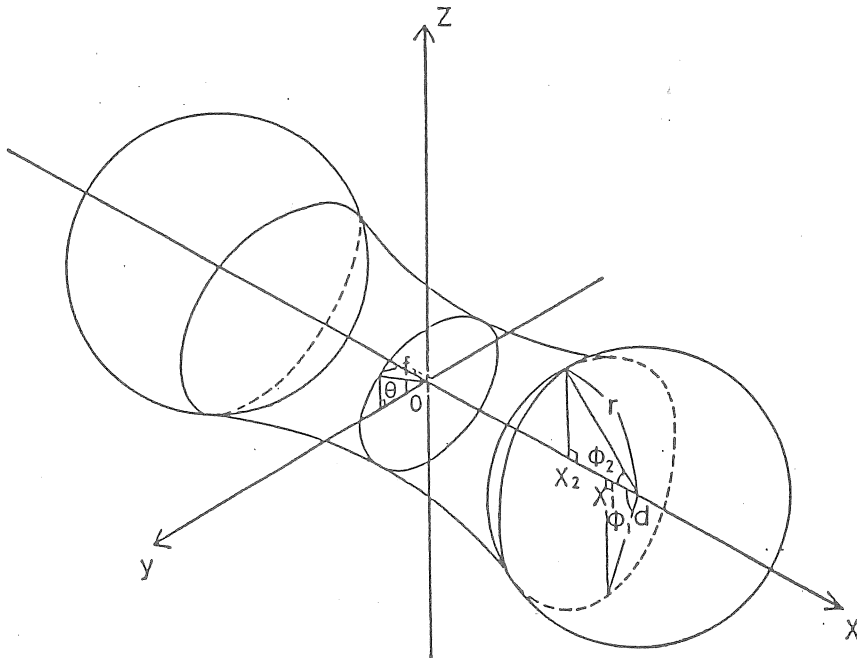


Fig.3-1 Cylindrical coordinate

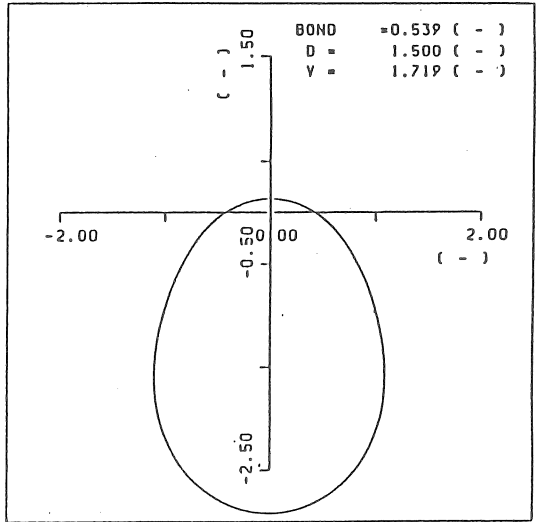
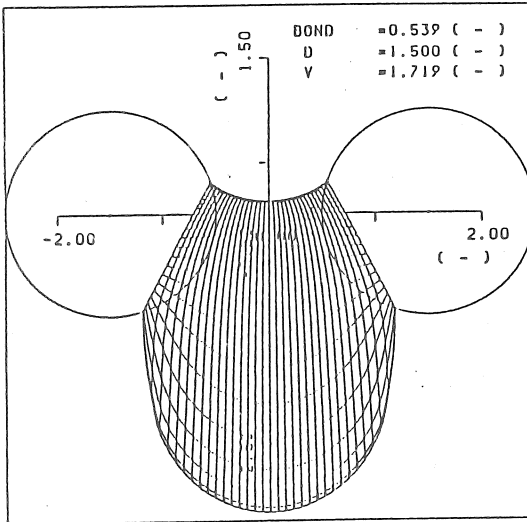
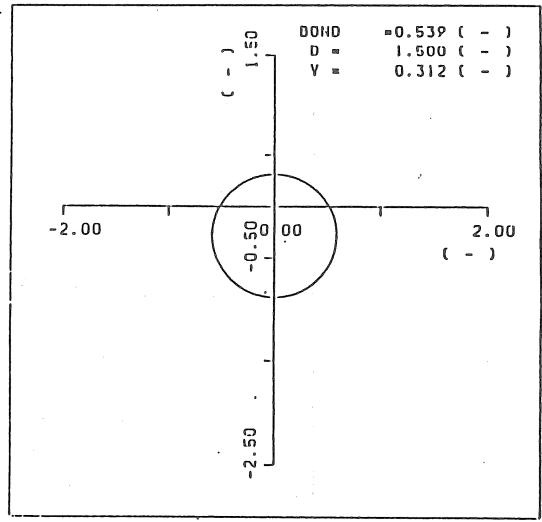
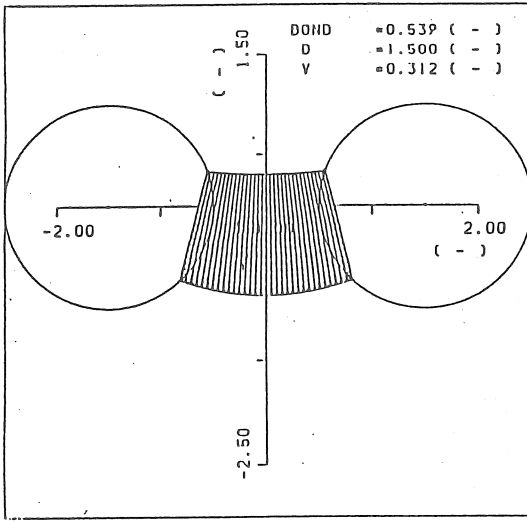


Fig.3-2 Cross section at symmetrical line

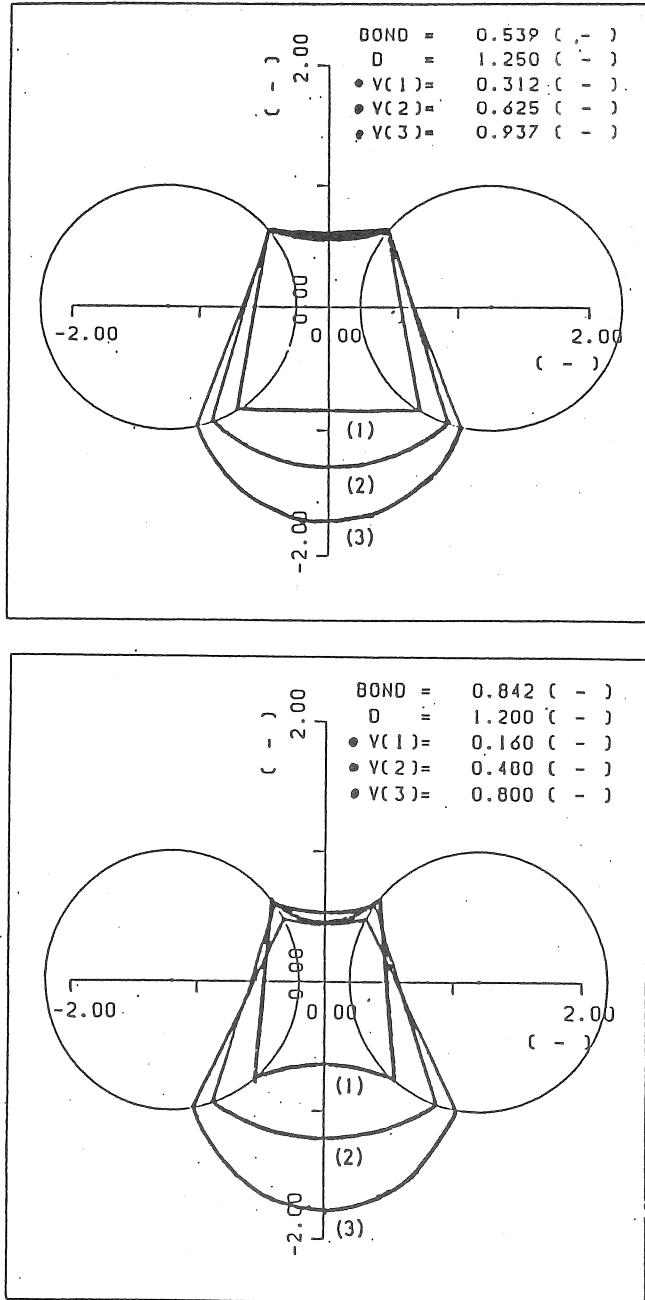


Fig.3-3 Meniscus shape as drop volume

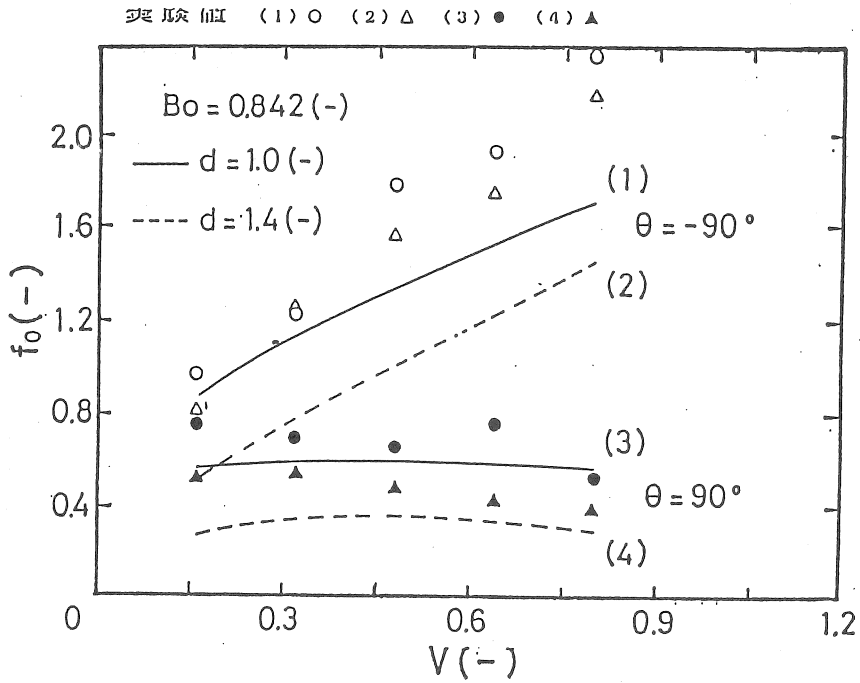
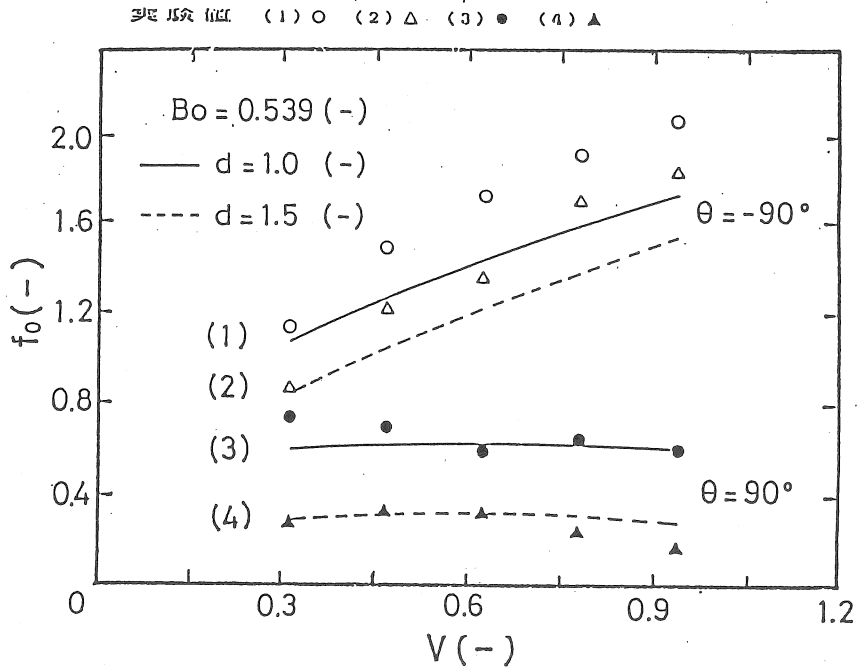


Fig.3-4 Comparison of a experimental data with the calculation data

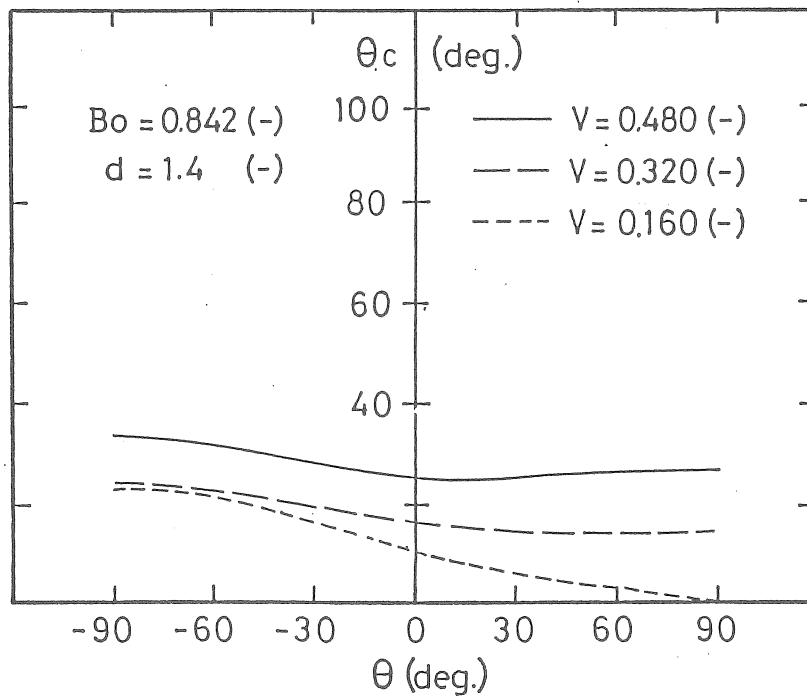
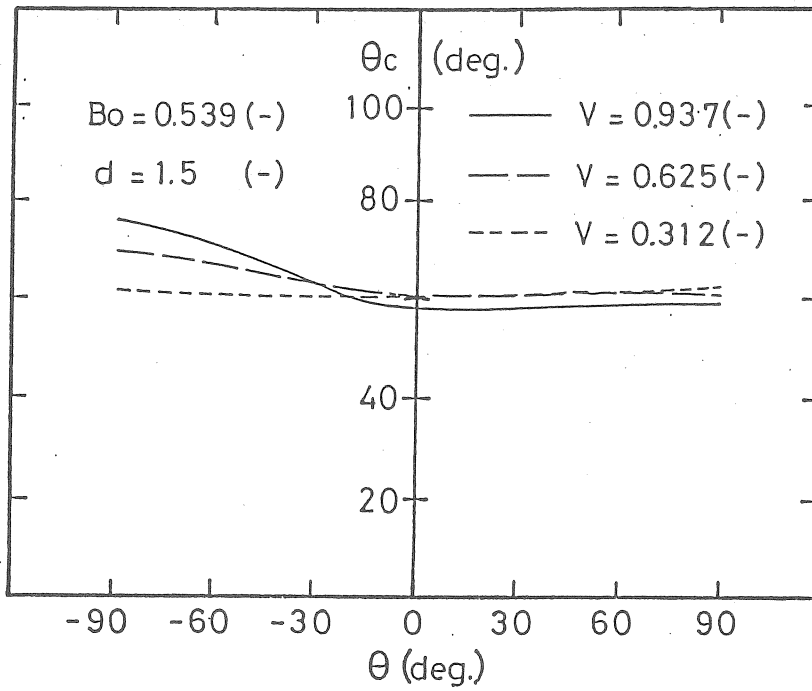


Fig.3-5 Contact angle at the contact line

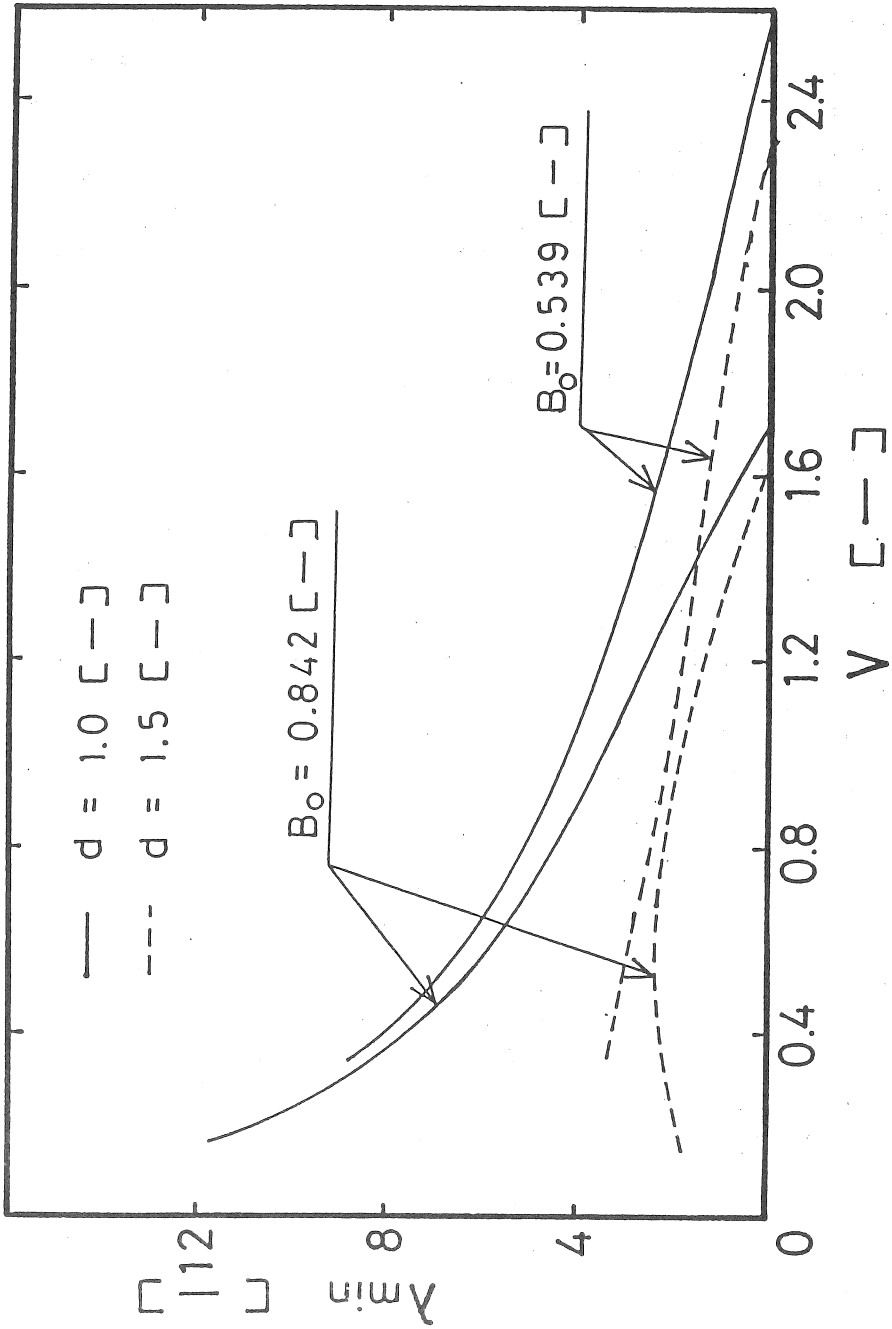


Fig.3-6 Minimum eigen value as stabel analysis

4. 多重効用型太陽熱利用の蒸発装置の開発

序論 クリーンで無尽蔵な太陽エネルギーを用いた蒸発装置の開発において、装置単位面積当りの造水効率を増加させるために多段式多重効用型を開発を行ってきた。平板の裏面に多孔質性の布のウィックを張り付けた仕切り板を多層にした蒸発装置の性能を評価してきたが、日射量の増加にともなうウィックの乾燥を防ぐために、その平板をパイプを用いて中心で折り曲げた山形多重効用型蒸発装置を試作し、実験室においてその性能試験を行った。また、太陽電池のパネル温度の冷却効果を促進する複合型多重効用型蒸発装置を検討するために蒸発装置としての計算機シミュレーションを行った。

4・1 実験室規模の山形多重効用型太陽熱蒸発装置の試作

実験装置および方法

Fig.4-1は、実験装置の概略図である。ここでは、平板の腐食性を避けるためにプラスチックフィルムを仕切り板に用い、両側にある角型のパイプを引っ張って、蒸発面と凝縮面との間隔を維持している。装置片面の伝熱面積の大きさが縦500mm、横250mmの2段の蒸発装置である。塩水(濃度は0.1wt%)は、円管の外壁とウィックとの間にメニスカスを形成してウィックに供給され、濃縮された塩水は角型パイプ内を、生成された水はフィルム上面で凝縮して角型パイプ外を流下し回収される。実験は室内赤外線ランプを用いて210,390,560(kcal/m hr)の3種類に付いて行われた。

実験結果及び考察

集熱板、蒸発面、凝縮面における傾斜方向の温度分布をFig.4-2に示す。装置の傾斜方向には温度分布がほとんどなく一様であり、出口付近でのウィックが乾燥することによる温度上昇もないと考えられる。また赤外線ランプの照射強度が造水量に及ぼす影響をFig.4-3に示す。特に照射強度の高い場合についても期待される造水量をあげている。実際における海水の塩濃度は3.5wt%であるが、この実験における生成水の塩濃度が1ppm以下であることが確認されたので、実際に海水においても飲料水の許容を満たすことができる。

4・2 太陽電池とのハイブリッド型蒸発装置のシミュレーション

計算機シミュレーションモデル

太陽電池の特性は、照射強度の増加に比例して短絡電流は増加するものの開放電圧には影響がなく、逆に太陽電池の温度が上昇することによって電圧低下による出力低下を引き起こす。照射強度が強い時では太陽電池のパネル温度が60度以上にも上昇することがある。そのためにただパネル温度を冷却するだけでなく、その温度以上であれば十分に太陽熱蒸発装置を運転することができ

るために、太陽電池の裏面に多重効用型蒸発装置を組み込んだ複合型蒸発の内の有効性について、計算機シミュレーションによる検討を行った。

複合型蒸発装置の物質と熱の流れをFig.4-4に示す。蒸発装置は1段としてガラスカバー、太陽電池のプレート、蒸発面、凝縮面に関して熱収支と取ると以下のようなになる。ただし、流れ方向の温度分布はないものとし、また蒸気は蒸発面から凝縮面へと一方拡散にて移動すると仮定する。

Glass cover;

$$\rho_C L_C C_C \frac{d T_C}{d t} = \alpha_C I_0 + U_{PC} (T_P - T_C) - H_{CA} (T_C - T_A) - \sigma \epsilon_{CS} F_{CS} (T_C^4 - T_{SKY}^4) \quad (4-1)$$

Battery plate;

$$\rho_P L_P C_P \frac{d T_P}{d t} = \alpha_P \tau_c I_0 - U_{PC} (T_P - T_C) - U_S (T_P - T_S) \quad (4-2)$$

Brine;

$$\rho_S L_S C_S \frac{d T_S}{d t} = H_{SO} W_0 + U_{PS} (T_P - T_S) - H_S W_L - H_D D - R_{SD} - \frac{k}{z} (T_S - B - T_D) - \sigma \epsilon_{SD} F_{SD} (T_S^4 - T_D^4) \quad (4-3)$$

Distillated water;

$$\rho_D L_D C_D \frac{d T_D}{d t} = R_D D + \frac{k}{z} (T_S - B - T_D) + \sigma \epsilon_{SD} F_{SD} (T_S^4 - T_A^4) - U_{DA} (T_D - T_A) \quad (4-4)$$

$$D = \frac{\phi}{z A} \frac{(P_S - P_D)}{P_{BM}}$$

Fig.4-5は、日射量による太陽電池パネルの温度変化と造水量変化を表している。この結果から十分な冷却効果と造水量を挙げることが可能であることを示唆している。この章の一部は、第4回海水淡水化世界会議(クエート、1989年11月)において発表する。

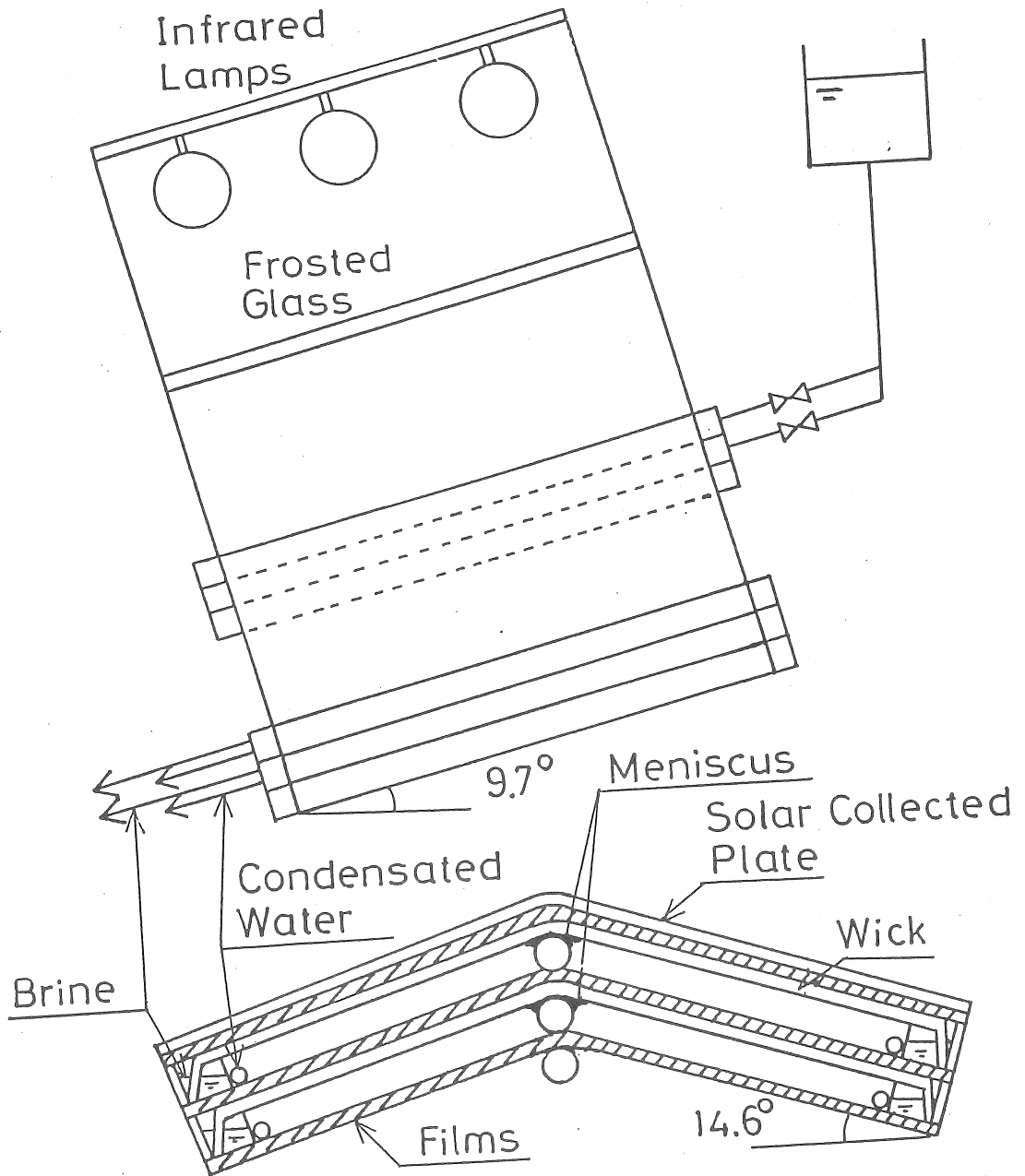


Fig.4-1 Experimental Appartus

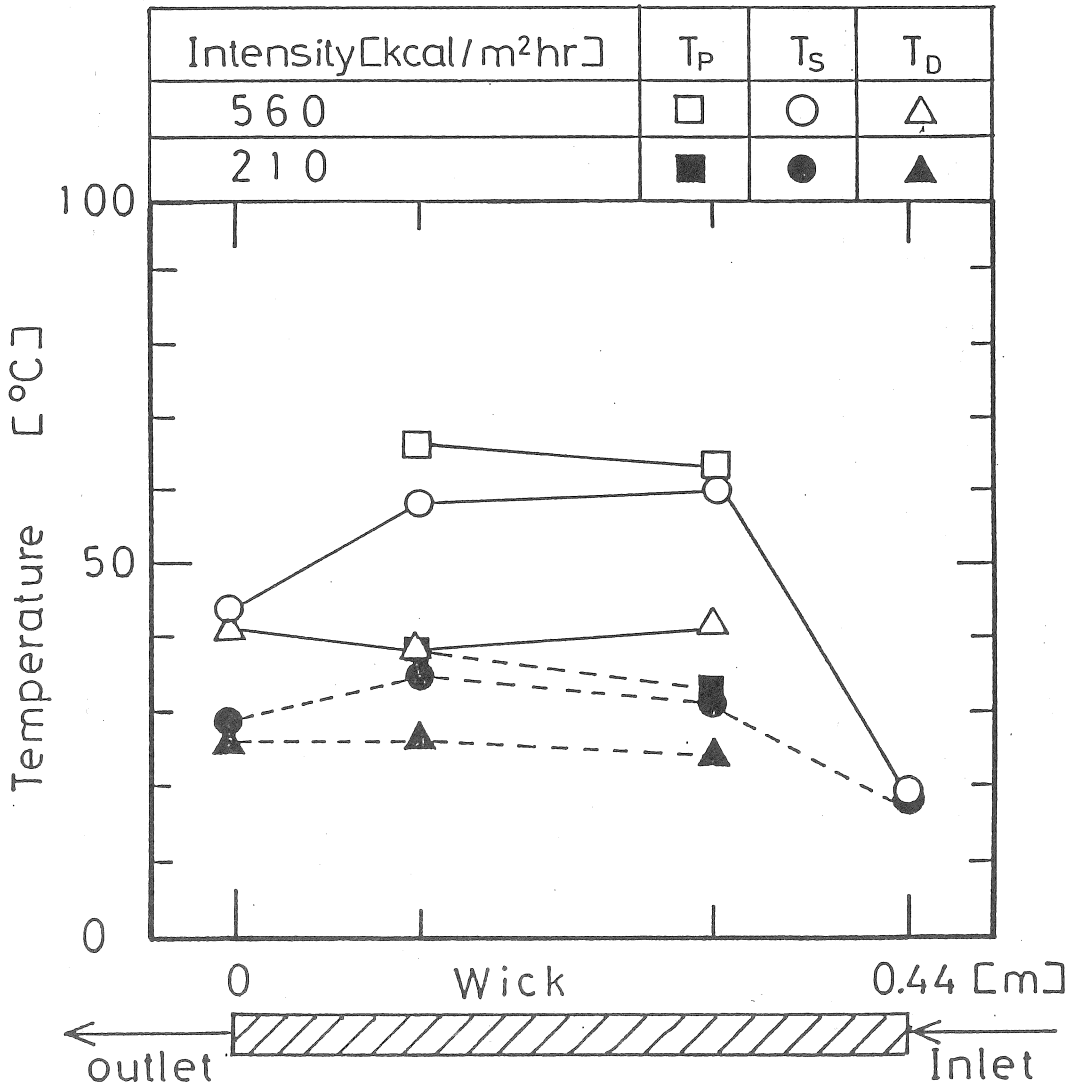


Fig.4-2 Temperature Distribution

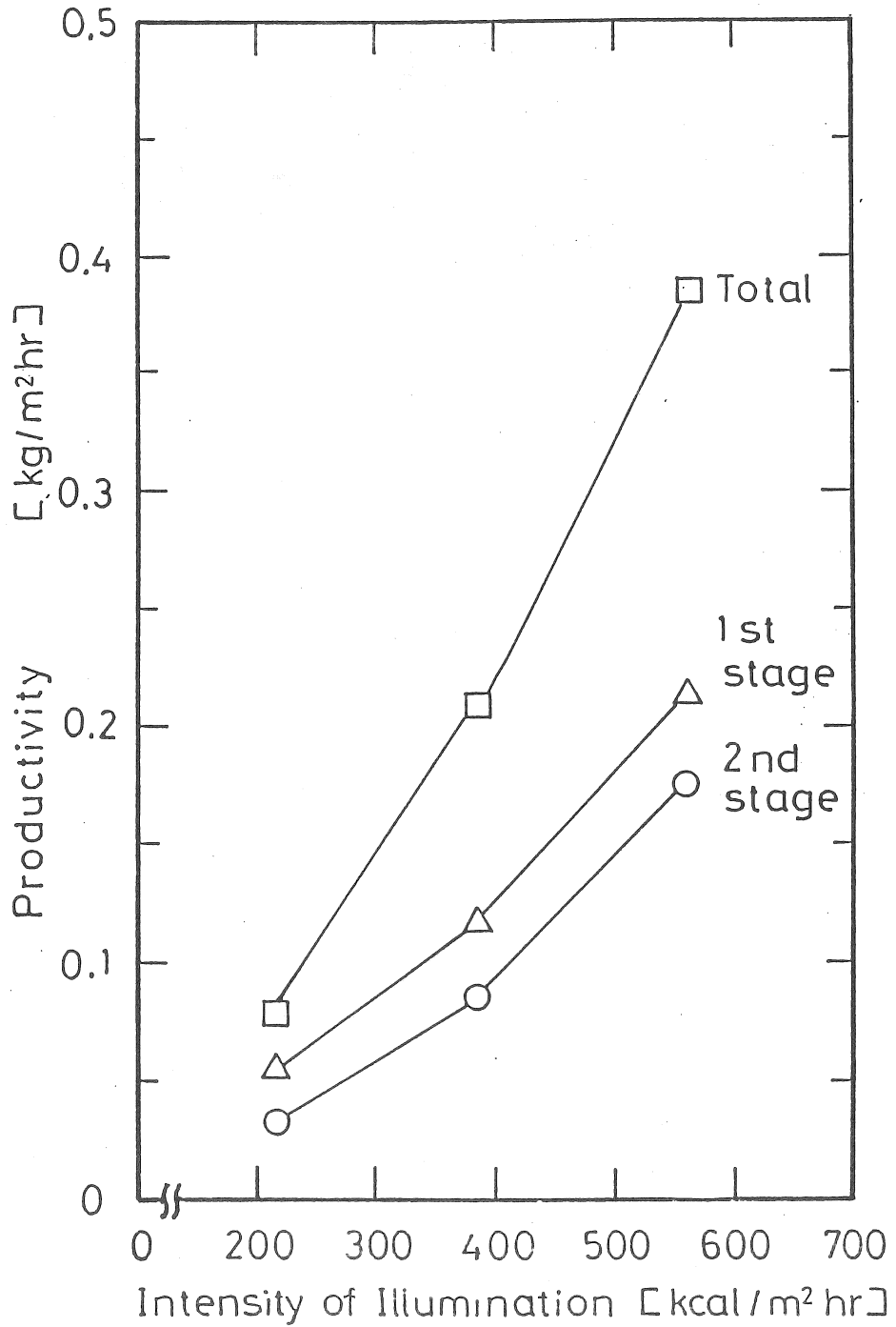


Fig.4-3 Productivity vs. I_0

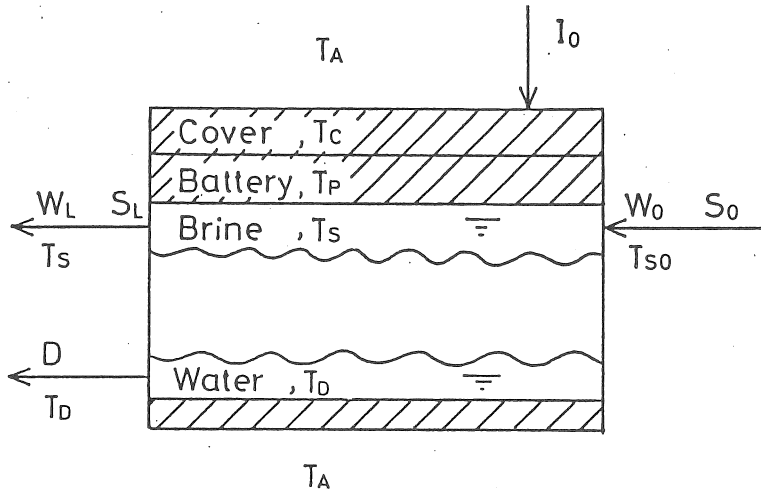


Fig.4-4 Simulation Model

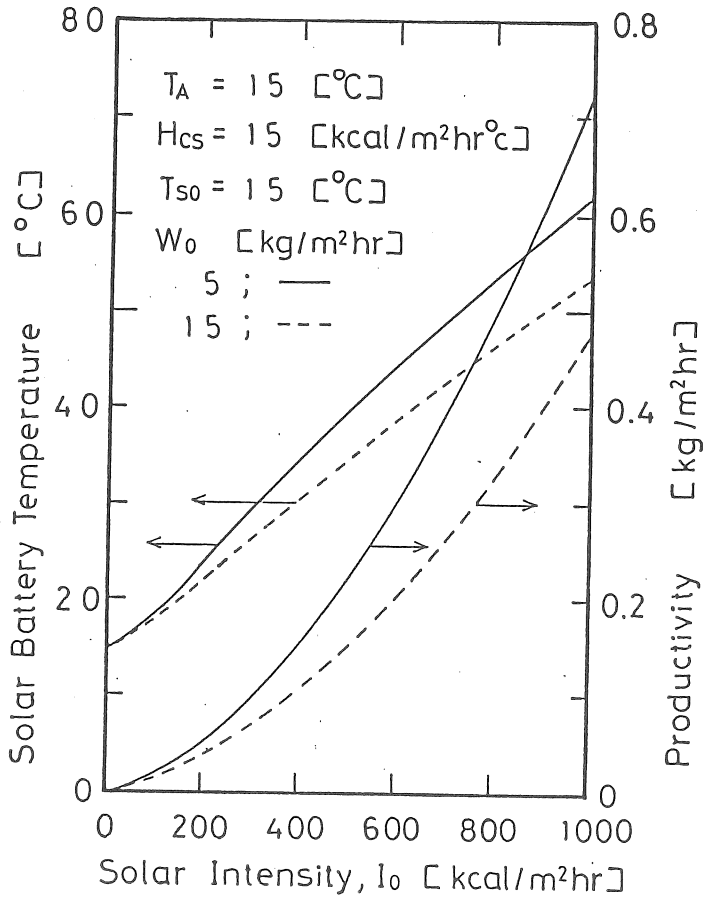


Fig.4-5 Battery Temperature and Productivity vs. I_0