

管中心部のボイド率信号による気・液二相流の 流動判別について

清水 英 男*

Flow regime by the signal of void fraction on the tube center in Air・Water
Two-Phase Flow.

Hideo Shimizu

Abstract

In this study, to be based on the informations obtained from the signals of void fraction on the tube center, the flow regime and the minimum film thickness on a tube surface are discussed. The principal results are summarized as follows

- 1) The boundary between bubble and slug flow obtained by the flow regime is similar to the boundary obtained by the visual observation.
- 2) The time of existing gas and the minimum film thickness strongly correlate and are inverses to each other.

From this point of view mentioned above, the flow conditions could be classified from the signals of void fraction on the tube center. The results are applicable to the experimental prediction of two-phase flow regimes in systems in which the visual study of inside flow condition are impossible.

1. 結 言

気液二相流における流動様式、流動形態^{1) 2)}の分類は多方面で議論されてきた。これらは二相流を研究する上で欠くことのできない問題である。

気液二相流は気体と液体が混在して流れるため、気液界面が幾何学的に複雑な形状を呈する。通常、流れを分類する上でよく用いられる方法として、写真などによる視察結果から気液界面の形状に着目し、それぞれ特徴をもった様式に分類するいわゆる流動様式の判別方法がある。この方式は主に気相あるいは液相の形状に対して分類しているため、具体的に流れをは握するには便利な分類法といえる。しかし視覚によるため主観が入り易く流動様式線図を作成する場合など個人的な差異が生じることが多い。

実験者による差異が入りにくい分類法として、定量的

に分類する方法がある。定量的に分類した流れを流動形態と称している。気液界面の形状が変化すれば流動機構も変化すると考えられる。流動機構の変化に基づいて定量的に流れを分類するには、流動機構の変化を知るべき指標となるものを抽出する必要がある。ボイド率や静圧変動などがその指標として選ばれる場合が多い。ボイド率と静圧変動の場合は測定する場所、方法を明確にしておく必要がある。

外部から二相流の流動視察ができないような場合など、上記のボイド率のような情報を得ることにより、流動形態の判別ができれば、内部の流動状態を知る上で有力な方法と考えられる。本研究の目的の一つはここにある。

本研究は管中心部に点電極プローブをそう入固定し、前述の流動機構の変化を知るべき指標として管中心部のボイド率変動を測定した。そのプローブの電気信号から流動形態を分類し、同時に視察結果から得られた流動様式と対比した。又気体存在時間 τ_g を定義し、 τ_g と管壁面上

*宇部工業高等専門学校 機械工学科

に形成される最小水膜厚さとの関係について調査した。管内に障害物をそう入した場合の障害物上流側における薄膜化機構などに関して、存在時間 τ_g の影響は大きいと考えられる。詳細については今後の研究成果にまつところが大きい。

実験範囲はみかけの水流速 $j_l = 0.1 \sim 1 \text{ m/s}$ 、みかけの空気流速 $j_g = 0.01 \sim 5 \text{ m/s}$ 、供試管圧力は $1.1 \sim 1.4 \text{ ata}$ 、水温は $28 \sim 33^\circ\text{C}$ である。

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置の概略図である。装置は循環ポンプを含む水のループと、コンプレッサから供試管を経て気水分離器に至る空気のラインとから成っている。供試管は内径 19.2 mm 、全長 10 m のなめらかな内壁面をもつステンレス管を使用した。この装置は 200 気圧 の高圧下でも実験できるように製作されている。水と空気の流量計測はオリフィスを使用し、オリフィス前後の圧力差は差圧変換器で測定した。

流量計で調節された水は供試管の最下部より流入する。供試管の最下部から 0.5 m に気水混合部を設けた。気水混合部は供試管の軸方向へ 20 mm 間隔で4列に穴があげられている。上流側の2列は直径 3 mm の穴が円周方向に8等分の間隔で、他の2列は直径 5 mm の穴が円周方向に5等分の間隔で互に千鳥配列にあげられている。この多数の穴から流量調節された空気が吹き込まれて水と混合する。混合した水と空気は二相流となり上方（下流側）へ流れる。気水混合部から 5.8 m 下流側に測定部が設けられ、測定部に管中心のボイド率を測定できるようにI型プローブを取り付けた。得られたボイド率信号は増巾器を介してデータレコーダに記録した。測定部近傍の流動状態を観察するために、測定部の直前に観測窓を設けている。観測窓は管の半径方向へ 20 mm 、管軸方向へ 400 mm の範囲が観察できる。供試管からでた二相流は気水分離器で気、水に分離されて空気は大気へ放出され、水はポンプにより再循環される。循環水の温度が一定になるように加熱、冷却する装置を設備した。

図2は本実験で使用したI型プローブの概略図である。プローブ用線材として 0.2 mm の白金線を使用した。針の最先端部が約 0.01 mm になるよう円錐形に研削されている。針の最先端部以外はすべて電氣的に絶縁して支持棒に固定している。

最近点電極プローブは線材の研削技術が進歩したこと

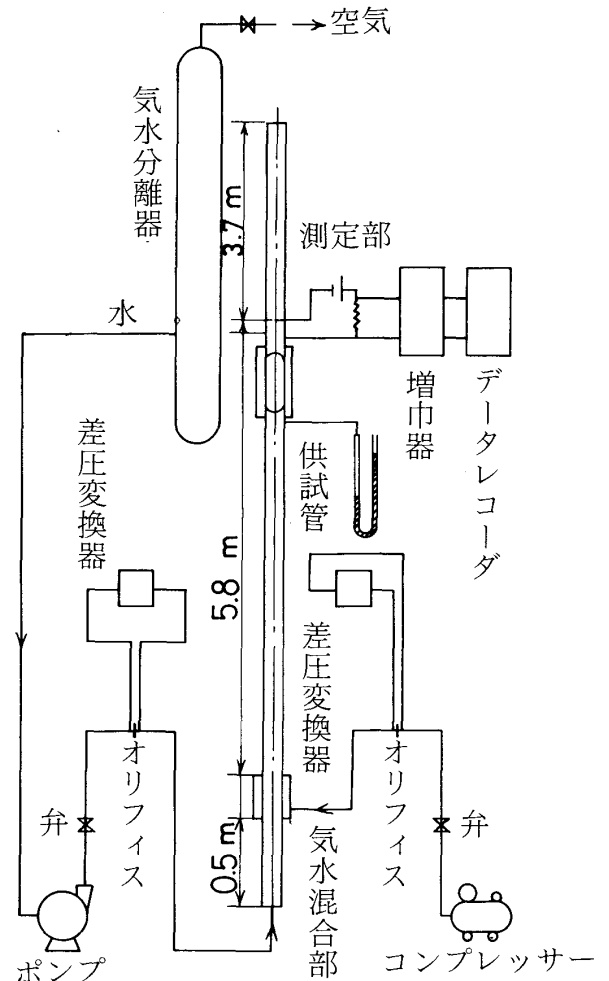


図1 実験装置概略図

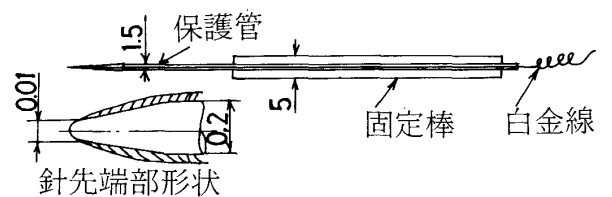


図2 プローブ概略図

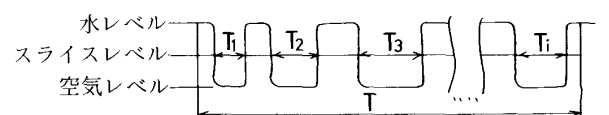


図3 ボイド率信号の例

により、数 μ の気ほうをも感知するプローブを製作できるようになった。今後増々点電極プローブの利用が増加すると考えられる。

プローブの先端が気泡を突切っている場合と水中にある場合とでは電気抵抗に大きな差が生じる。気体と液体がプローブを通過する時の電気抵抗差を電圧信号に変えて測定する。この電圧信号をボイド率信号として解析した。

図3にボイド率信号の例を示す。水レベル、空気レベルはそれぞれプローブが水中にあるとき、および気ほう中にあるときの電圧差に相当する。図中の $T_1, T_2, T_3, \dots, T_i$ は気ほうがプローブを通過した時間に相当し、この時間を気体存在時間(または単に存在時間)と称する。測定時間 T 内に図3で示すようなそれぞれ $T_1, T_2, T_3, \dots, T_i$ の時間巾をもつ気ほうが通過したとする。 i 個の気ほうのうちで、比較時間 τ_c 以上のもののみの存在時間の総和 T_s を求めることができる。比較時間 τ_c におけるボイド率 α_c は次のようにして求める。

$$T_s = \sum_{n=1}^m T_n \quad (1), \quad \alpha_c = T_s / T \quad (2)$$

T_n は $T_1, T_2, T_3 \dots T_i$ のうちで比較時間 τ_c より大きい要素である。

本実験はスライスカウンターを用いて比較時間 τ_c を段階的に変え、時間総和 T_s および個数 n_c を求めた。比較時間 τ_c は連続可変であることが望ましいが、本研究ではスライスカウンターの機能上限定された。

3. 実験結果および考察

3.1 流動様式および流動形態

図4は実験範囲と視察による流動様式、および管中心のボイド率信号から定量判別した流動形態を示している。図中の○印は実験点を示し、実線は流動様式の境界線である。また点線は流動形態(後述する)による区分線を示している。記号BとSは気ほう流とスラグ流、Fはフロース流を示す。

図5, 6は比較時間 τ_c に対する時間平均ボイド率(以後単にボイド率とする)の変化を示している。図5はみかけの水流速 $j_l = 1 \text{ m/s}$ 、図6は $j_l = 0.1 \text{ m/s}$ の場合である。図5に示すみかけの空気流速 j_g が 0.26 m/s の場合、 τ_c が $0.1 \sim 20 \text{ ms}$ の範囲では α_c の値はほぼ一定値を示し、 α_c は τ_c にほとんど影響を受けないことがわかる。 τ_c が 20 ms より大きくなると α_c は急激に減少しはじめる。これは j_l 、

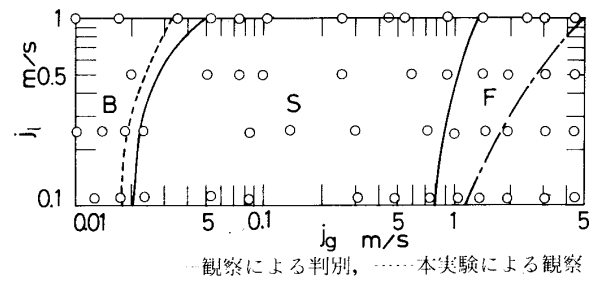


図4 実験範囲および流動観察結果

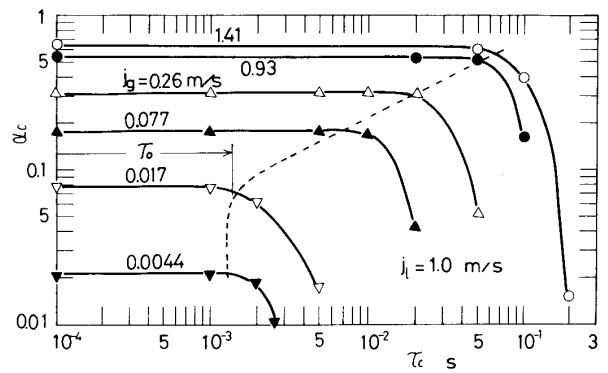


図5 τ_c に対する α_c の変化 ($j_l = 1.0 \text{ m/s}$)

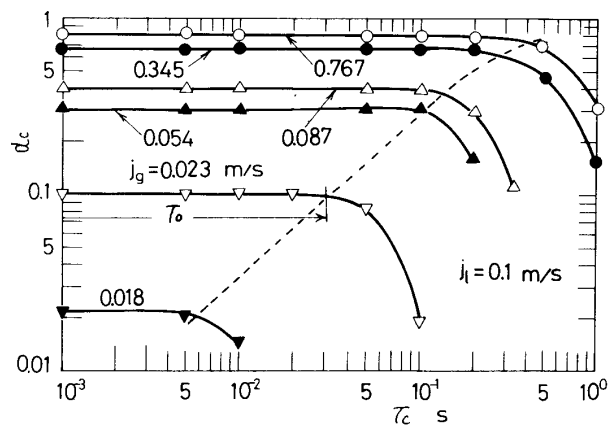


図6 τ_c に対する α_c の変化 ($j_l = 0.1 \text{ m/s}$)

j_g にかかわらず同じ傾向を示している。 α_c が急激に減少しはじめる比較時間 τ_0 を求め、このようにして求められた τ_0 を点線で結んで図5と6に示した。

図7はみかけの水流速 $j_l = 1 \text{ m/s}$ の場合において、比較時間 τ_c 以上の存在時間を有する気ほうの単位時間あたりの通過個数 n_c を示している。例えば流動様式が気ほう流 $j_l = 1 \text{ m/s}$ 、 $j_g = 0.0044 \text{ m/s}$ (同図中▲印)に着目すれば、 n_c の値は τ_c が $0.1 \sim 1 \text{ ms}$ の範囲でほぼ一定の値となっている。これは 1 ms 以下の存在時間を有する気ほうがほとんど存在しないことを意味する。 τ_c が 1 ms から 3 ms の

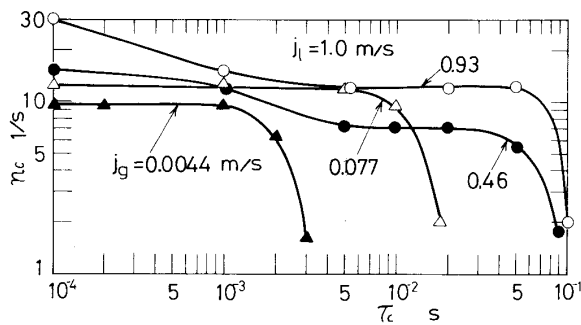


図7 n_c におよぼす j_g の影響

間で n_c が急激に変化していることから、 τ_c が 1~3 ms に相当する大きさの気泡が存在していることがわかる。気泡の上昇速度 U_B を気相と液相の合体速度と、気泡の浮力による上昇速度との和と仮定して、気泡の大きさ D_B を次式で求める。

$$D_B = T_c \cdot U_B \quad (3)$$

τ_c が 1~3 ms に対する気泡の大きさは約 1.3~4 mm に相当する。

次にスラグ流 $j_g = 0.46$ m/s (同図中●印) に着目する。図7に示すように $\tau_c \leq 5$ ms の範囲で n_c の値が変化し、この範囲に相当する大きさの気泡が存在することを示している。式(3)から気泡の大きさを概算すると約 8.7 mm 以下となる。さらに τ_c が 5~30 ms の領域では n_c の値はほぼ一定値を示し、この大きさの気泡はほとんど存在しない。 τ_c の値がさらに 30~100 ms の間で n_c の値は急激に減少し、この範囲に相当する大きさの気泡が存在する。式(3)から気泡の大きさを概算すると約 50~160 mm の大きい気泡であり、気体スラグの長さに相当していると考えられる。

このようにスラグ流領域の気泡分布は、小さい気泡を集団とする部分と大きい気泡を集団とする2つのピークをもつ分布となる。フロス流も同じ傾向を示す。この両者は気泡流に示す小さい気泡のみを集団とする分布形と相違したものになる。

上記のように気泡流とスラグ流では気泡の分布形が異なっている。ボイド率 α_c が急激に減少し始める比較時間 τ_0 を求めて、この τ_0 を基に気泡径 D_B を算出した。 D_B を流動形態の判別基準として、 D_B の値が管径の $\frac{1}{2}$ より小さくなる領域を気泡流と定め、図4に点線で境界を示した。この境界線は流動様式によるそれと大体一致している。流動様式と流動形態のそれぞれの判別基準がいずれも気泡の大きさに基づいている結果と考えられる。しかしながら本研究ではスラグ流とフロス流に対する流

動形態の判別基準となるものを見出すことはできなかった。

3. 2 気体存在時間が最小液膜に与える影響

前章でも述べたように比較時間 τ_0 におけるボイド率 α_c はある比較時間 τ_0 から急激に減少する。流れがスラグ流あるいはフロス流の場合には、 τ_0 は気体スラグの最少存在時間を示していると考えられる。存在時間が τ_0 以上の気体スラグに着目し、気体スラグ1個あたりの平均気体存在時間 τ_g を求めた。

図8はこのようにして求めた τ_g の値に対するみかけの空気流速 j_l の影響を示したものである。パラメータはみかけの水流速 j_l である。 $j_l = 0.1$ m/s の場合、 j_g の増加と共に τ_g も増加している。 j_g が約 1.3 m/s で τ_g は極大値となり j_g の増加と共に減少している。この傾向は j_l が小さくなるほど顕著に現れる。 $j_l = 0.1$ m/s の場合、 j_g の増加と共に気体スラグの長さも長くなる。 $j_g = 1$ m/s 近傍になると長さが 1 m 以上にもなる気体スラグが観察される。さらに気体スラグの長さが長くなると、液体スラグが小さくなったと思われる液体塊が多く現れはじめ、通過ひん度も多くなる。 τ_g が j_g と共に減少するのはこの液体塊の通過ひん度が多くなることに起因すると考えられる。

$j_l = 1$ m/s の場合では、 j_g の増加と共に気体スラグも長くなるが、比較的小さいみかけの空気流速で連続上昇液膜流となる。 j_l が 0.1 m/s にみられた小液体塊はみられない。 j_g と共に気体スラグの長さも単調に長くなっていると考えられる。同じフロス流の範ちゅうに入る流動様式であっても、みかけの水流速が異なると流動機構も相違したものになっていると考えられる。 τ_g の値が極大値となる点を図4に1点破線で示した。流動様式ではフロ

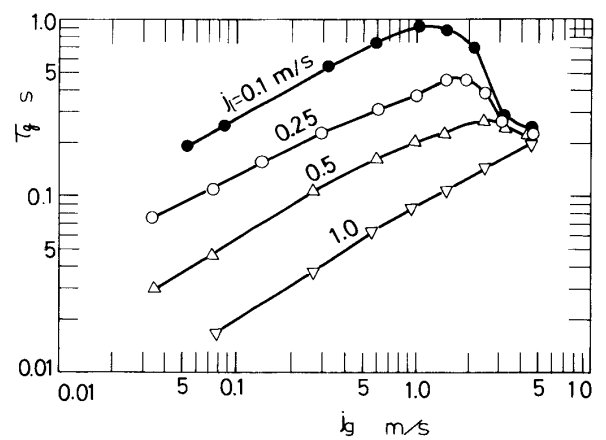


図8 τ_g におよぼす j_l の影響

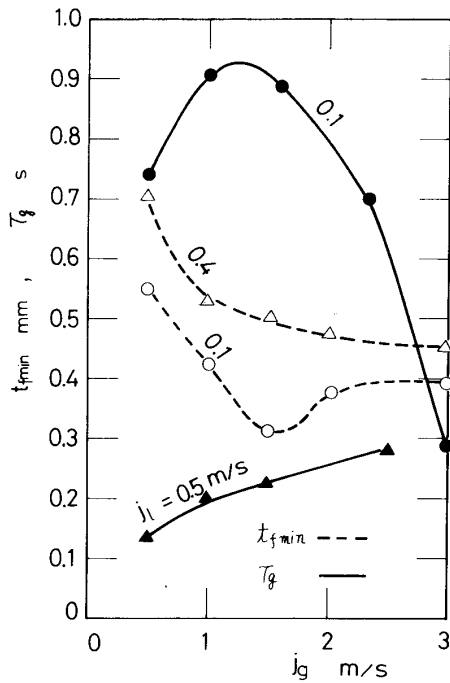


図9 t_{min} と τ_g の関係

ス流の領域に入るが、流動機構を考慮した1つの区分線になるものと考えられる。

スラグ流周囲の液膜厚さに関する報告と関連して考察する。気体スラグ周囲の流下液膜に対する気流のせん断力が無視できる領域では、 τ_g が最小水膜厚さに与える影響は大きいと考えられる。すなわち、壁面上を気体スラグが通過する場合、通過時間が長いほど壁面上の最小水膜が小さくなると考えられる。

図9は管径が26mmの上昇流に対する最小水膜厚さ t_{min} と τ_g との関係を示している。この図から τ_g と t_{min} は先に述べたような逆比例の関係にあることを示している。しかも $j_l=0.1\text{ m/s}$ の場合に着目すれば、 τ_g と t_{min} の極値が $j_g=1.5\text{ m/s}$ で一致していることも興味深い。以上のことから τ_g と t_{min} の間には強い相関があることがわかった。また $j_g=5\text{ m/s}$ で τ_g が j_l にかかわらず同じ値を示していることも注目すべきことである。流路に流動障害物をそう入した場合、障害物上流側に起こる薄膜化現象との関連性も十分考えられる。これらとの対応を考えることは今後の検討に値するものと思われる。

3.3 ボイド率 α_c におよぼす β の影響

管中心部のプローブによる信号からボイド率 α_c を式(2)で定義した。 α_c は局所的なボイド率であり気体スラグの管断面平均のボイド率 $\hat{\alpha}_g$ とは異なる。 $\beta=j_g/(j_l+j_g)$ とし

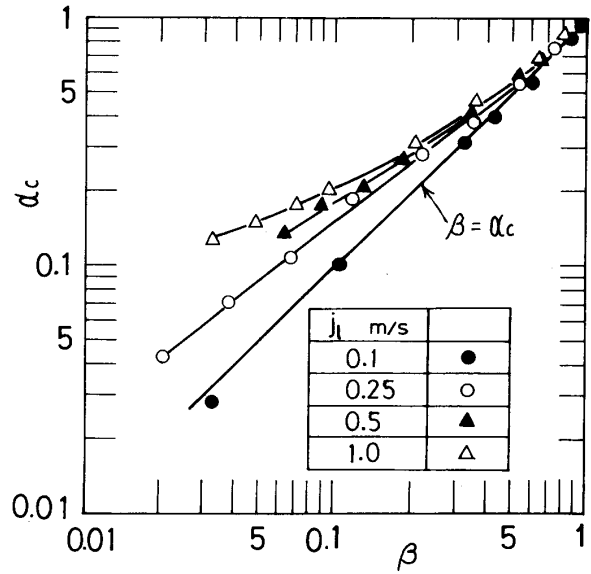


図10 α_c におよぼす j_l の影響

て、気体スラグと液体スラグのスリップを無視すると次式が成り立つ。

$$\beta = \hat{\alpha}_g \cdot \alpha_c \quad (4)$$

水流量が小さい場合には、スラグ周囲の液膜も小さくなり $\hat{\alpha}_g$ が1に近い値になることが予想される。図10の $j_l=0.1\text{ m/s}$ の場合 $\hat{\alpha}_g=1$ となることを示している。又みかけの水流速 j_l が大きくなると気体スラグ周囲の液膜も厚くなり $\hat{\alpha}_g$ も小さくなる。図10中の $j_l=1\text{ m/s}$ (Δ 印)から $\hat{\alpha}_g$ は1よりも小さくなっていることを示すが、 $\hat{\alpha}_g$ の絶対的な評価はできない。気体スラグの上昇速度や液体スラグのボイド率などを考慮する必要がある。

4. 結 言

管中心部におけるボイド率信号を用いて、流動形態の定量判別を可能にする因子を求めるため、ボイド率 α_c が急激に減少しはじめる比較時間 τ_0 を求めた。 τ_0 から気ほうの大きさ D_B を求め、 D_B を気ほう流とスラグ流を判別するパラメータとして選定した。

管壁面上の1点を通過する気体スラグの通過時間は、管壁面上に形成される液膜厚さに影響をおよぼすと考えられる。気体スラグの通過時間に相当する気体存在時間 τ_g を求め、最小液膜厚さにおよぼす影響について検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

- 1) D_B が管の半径に等しい場合を気ほう流とスラグ流の境界とした。その境界は流動様式による区分線と大体一致し、気ほう流とスラグ流を十分判別できる。

2) 気体存在時間 τ_g と最小水膜厚さ t_{fmin} の間には強い相関がある。 τ_g と t_{fmin} の間には逆比例の関係がある。

3) 管中心の時間平均ボイド率 α_c は、みかけの水流速が 0.1 m/s より小さい場合、 $\alpha_c = j_g / (j_g + j_l)$ として求められる。

以上のことから、管中心部に固定したプローブの信号解析による流動状態の判別はかなり可能であることが認められた。

最後に、本研究に多大のご援助をいただいた中里見正夫教授に心から感謝いたします。また実験に協力された卒業研究の学生諸君に対して感謝する。

文 献

- 1) 世古口, 伝熱工学の進展, (昭48), 養賢堂
- 2) Gouse, S.W.Jr., MIT, Rep.No.9, MIT press, (1966)
- 3) 深野, 九州大学学位論文, (昭46-10)
- 4) 世古口・ほか3名, 機論, 43-373 (昭52-9), 3417
(昭和57年9月16日受理)