

2次元傾斜海浜における波による質量輸送速度の 断面分布特性について

平 山 秀 夫*

1. 緒 論

漂砂がある方向に輸送されるためには、底質の移動限界以上の外力の作用と同時に、その移動方向を支配する要因が存在していなければならない。これまで、漂砂の移動方向を支配する要因として、砂蓮上に発生する渦や水面波形の非対称性、あるいは波自身による質量輸送などが指摘されているが¹⁾、著者は、これらが総合的に関わり合って新たに net としての質量輸送速度に変化が生じ、これが結局は漂砂の移動方向を支配するものとする。

本研究では、傾斜海浜地形の変形予測の基礎研究として、このような質量輸送と底質の移動との相互関係を究明するため、前報²⁾に引き続いて、傾斜面全域での質量輸送に関する種々の特性を主として実験的に明確にしようとするものである。ここでは特に、1) これまであまり詳しく論じられていない傾斜面全域（砕波帯内外）における水平および鉛直質量輸送速度の断面分布特性を、傾斜面勾配や砕波型式別に調べ、これらの相違による分布特性の差異を明確にすること、2) 質量輸送速度の鉛直分布から、質量輸送速度の方向が底面付近で岸向き、中間層で沖向きである領域の各高さや、各岸・沖方向別の断面平均質量輸送速度および質量輸送量 (Mass flux) を求め、水平床上的の理論値との適合性を含めて、これらの一般的な特性の把握を行うこと、3) 実験で得られた質量輸送速度の変向点の高さ、断面平均質量輸送速度および Mass flux を surf similarity parameter³⁾で整理するとともに、これらの諸量の底勾配や砕波型式の違いによる差異も明確にすること、4) さらに、断面平均水平質量輸送速度と波形の非対称性（波形の前かがみや上下非対称性の程度）との関連性を明らかにすること、などに主眼を置いて種々の検討を行ったものである。

2. 実験装置、実験方法および解析方法

実験装置および実験の方法は、前報²⁾と全く同様である。すなわち、実験は、水槽の端部に勾配 $i=1/20$ あるいは $1/10$ の斜面を設置した $21\text{m} \times 0.7\text{m} \times 1.0\text{m}$ の片面ガラス張り水槽を用いて、造波開始後 15 波と 100 波目

の波動中における質量輸送速度を測定するため、スチロール樹脂球（粒径 1.91mm 、比重 1.04 、沈降速度 $w_f=2.56\text{cm/s}$ ）の単一粒子を水表面から所定の位置に投入し、その 1 周期ごとの位置を特殊にセットされたモータードライブ付きカメラで連続撮影を行った。単一粒子の投入位置は、 h/h_b (h : 測定点水深、 h_b : 砕波水深) ≈ 0.5 , 1.0 , 2.0 , 3.0 になるように選び、また水平床上でも 1 地点を選んだ。

表—1 実験条件

勾配 i	水深 h_0 (cm)	周期 T (sec)	沖波波高 H_0 (cm)	砕波水深 h_b (cm)	測定点水深 h (cm)	沖波波 形勾配 H_0/L_0	砕波形式
1/10	45	1.0	7.3	8.1	5.8~45.0	0.047	Plunging
			11.1	14.4	10.1~45.0	0.071	Spilling
		1.5	6.8	9.2	6.7~45.0	0.019	Plunging
			2.0	3.7	6.7~45.0	0.006	Surging
1/20	45	1.0	7.3	9.6	4.8~45.0	0.047	Spilling
			10.6	18.1	13.7~45.0	0.068	Spilling
		1.5	7.2	12.3	6.6~45.0	0.020	Plunging
			2.0	2.2	4.7~45.0	0.003	Surging

実験条件は、表—1に示すとおり、沖側水深 $h_0=45.0\text{cm}$ と常に一定とし、波の周期 $T=1.0, 1.5, 2.0\text{sec}$ の各場合について、砕波型式が spilling, plunging, surging 型になるように、沖波波高 $H_0=2.2\sim 11.1\text{cm}$ の間で適当に選んだ。また、底面にはアクリル板を張ってすべて滑面とした。

実験結果の解析法は、得られたネガフィルムからモーションアナライザーを用いて、単一粒子の 1 周期ごとの位置の座標を順次求め、それから水平および鉛直質量輸送速度 U, W を求めた。また、本実験結果を整理するにあたって、断面平均水平質量輸送速度 ($\bar{U}$) などの諸量（すべて無次元量で表示）を求めたが、それらの各諸量の定義を図—1に示す。すなわち、質量輸送速度の方向向が底付近の岸向きおよび中間層の沖向き領域の無次元高さをそれぞれ h_1, h_2 、また、その各高さにおける断面平均水平質量輸送速度をそれぞれ $\bar{U}_1, \bar{U}_2$ 、さらに各岸・沖向き方向の無次元 Mass flux をそれぞれ M_1, M_2 と

* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校助教

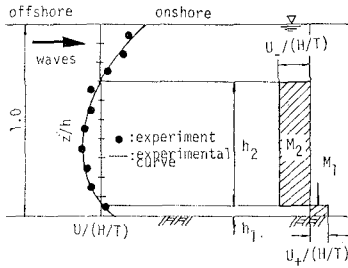
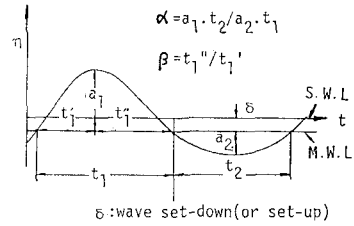


図-1 質量輸送の各諸元の定義

図-2 水面波形の非対称性 (α, β) の定義

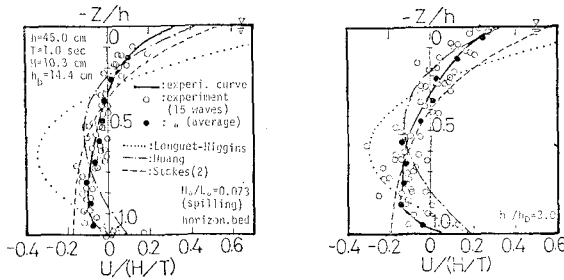
すれば、 $M_1 = (\bar{U}/H/T) \cdot h_1$ 、 $M_2 = (\bar{U}/H/T) \cdot h_2$ で与えられる (H : 測定点波高)。一方、水面波形の非対称性の程度を表わすパラメーター α および β の定義を図-2 に示す。ここで、 α は水面波形の上下非対称性の程度を、 β は波形の前傾度を表わす一つの指標となる。

3. 実験結果および考察

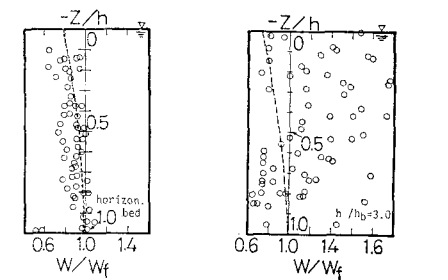
(1) 水平および鉛直質量輸送速度の断面分布特性

図-3 (1)~(5) は、水平質量輸送速度の実験値の鉛直分布を水平方向の各位置に分けて示した一例であって、

それぞれ (1) は水平床、(2) は $h/h_b \approx 3.0$ 、(3) は $h/h_b \approx 2.0$ 、(4) は $h/h_b \approx 1.0$ 、(5) は $h/h_b \approx 0.5$ の場合における結果である (図中、○印: 実験値、●印: その平均値、太い実線: 実験曲線)。なお、図中には参考のために、従来の水平床上での各種の理論曲線⁴⁾ (点線: Longuet-Higgins の conduction solution の結果、一点鎖線: Huang による水表面が clear water の場合の結果、破線: 波速の第2定義に基づく Stokes 波の第2次近似解を用いた場合の結果) も示した。これらの図からも明らかなように、一般に、水平質量輸送速度は砕波型式や



(1) 水平床の場合

(2) $h/h_b \approx 3.0$ の場合

(1) 水平床の場合

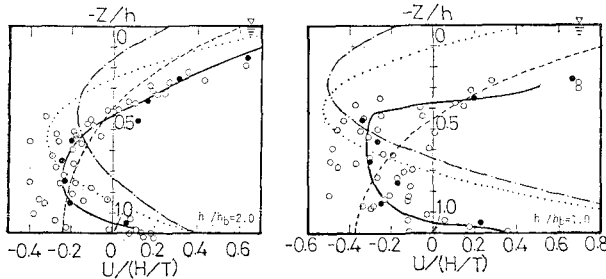
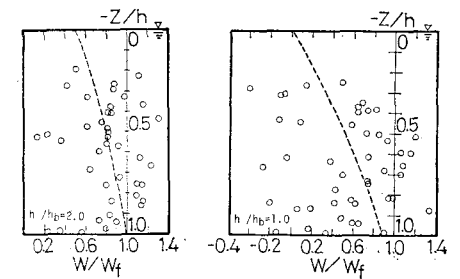
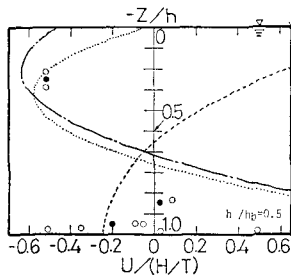
(2) $h/h_b \approx 3.0$ の場合(3) $h/h_b \approx 2.0$ の場合(4) $h/h_b \approx 1.0$ の場合(3) $h/h_b \approx 2.0$ の場合(4) $h/h_b \approx 1.0$ の場合(5) $h/h_b \approx 0.5$ の場合

図-3 水平質量輸送速度の水平分布

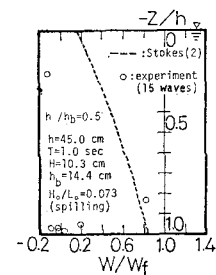
(5) $h/h_b \approx 0.5$ の場合

図-4 鉛直質量輸送速度の水平分布

水底勾配にかかわらず、沖から岸側に向って、その岸・沖両方向の絶対値がともに徐々に大きくなる傾向があり、特に砕波点付近では、Wang⁵⁾ ちも指摘したように、どちらかと言えば、実験値はほぼ鉛直方向に一様分布を示す傾向にあるようである。また、理論値との適合性は、本実験条件の範囲内では沖浜の水平床上においてすらあまり良くなく、特に冲向き最大値の発生位置は明らかに両者には差異があるように思われる。一方、図-4 (1)~(5) は、図-3 と同一条件下における鉛直質量輸送速度(沈降速度を含む)の場所的变化特性を示した一例であって、これらの図からも明らかなように、一般的に砕波点付近($h/h_b=0.5\sim1.0$)に底面から一様に上昇流が、 $h/h_b=2.0\sim3.0$ 付近に下降流が発生しており、渡辺⁶⁾ が指摘しているように、いわゆる循環流セルの存在が認められる。また、水平床上での鉛直質量輸送速度の鉛直分布は、著者が示した沈降速度を考慮した理論結果⁴⁾ と全般的によく合致する傾向にあることが明らかである。

(2) 断面平均水平質量輸送速度の変化特性

図-5 は、 $i=1/10$ の場合における断面平均水平質量輸送速度の水平方向の位置による変化特性の一例を示し

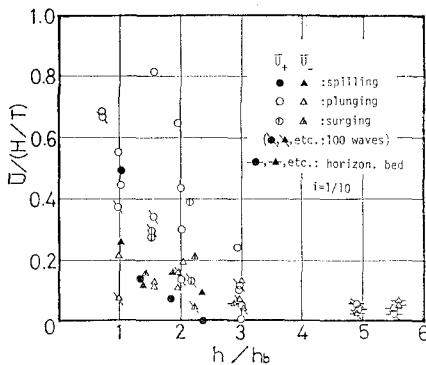


図-5 断面平均水平質量輸送速度の場所的分布 ($i=1/10$)

たもので、図中には、岸・冲向き方向別の値 ($\bar{U}_+$, $\bar{U}_-$) が、ともにそれらの絶対値で示されている。この図から明らかなように、一般的に砕波型式による分布特性の差異はあまり見られないが、どちらかと言えば、全般的に $\bar{U}_+$ が $\bar{U}_-$ よりも若干大きく、特に両者の差異は勾配がきつくなつ砕波点に近づくほど顕著のようである。図-6 (1), (2) は、断面平均水平質量輸送速度を、surf similarity parameter ($i/\sqrt{H_0/L_0}$) を用いて整理したもので、それぞれ (1) は $h/h_b \leq 1$ (砕波帯内), (2) は $h/h_b > 1$ (砕波帯外) の場合の結果である。これらの図から明らかなように、砕波帯内の $\bar{U}_-$ の結果を除いて、 $\bar{U}_+$ および $\bar{U}_-$ ともほぼ $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の増大とともに増加し、しかも前報²⁾ で示した底面質量輸送速度の場合の結果と同様に、砕波型式をこのパラメーターで整理できるように思われる。

(3) 水平質量輸送速度の変向点高さの変化特性

図-7 は、 $i=1/10$ の場合における h_1 および h_1/h_2 の値の場所的分布特性を、各水平方向の位置での水平質量輸送速度の鉛直分布の砕波型式による比較とともに示した結果である。なお、特に h_1 の結果を示した図中には、参考のために、Longuet-Higgins⁷⁾ の理論からのそれらの推定値も破線で示してある。この図から明らかなように、 $i=1/10$ の場合には、砕波型式による分布特性

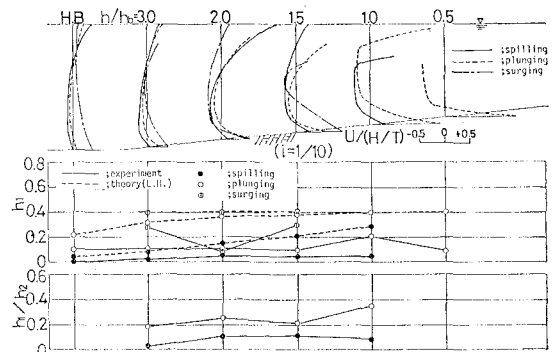


図-7 水平質量輸送速度の変向点高さの場所的分布

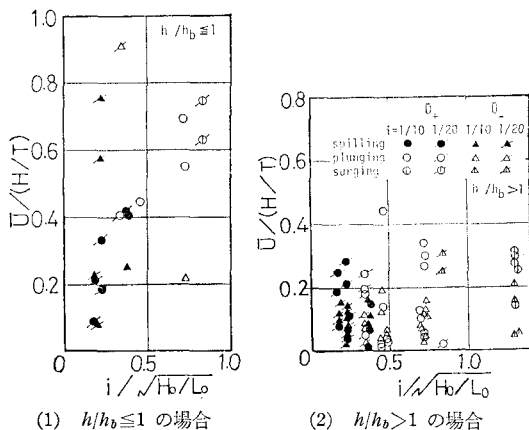


図-6 断面平均水平質量輸送速度と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係

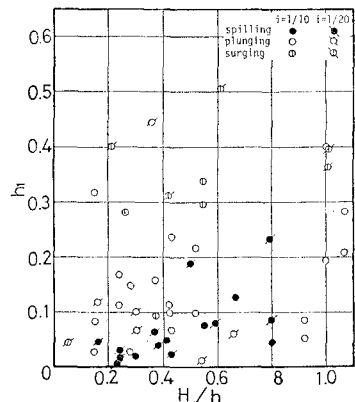
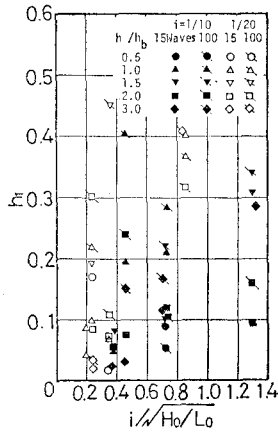


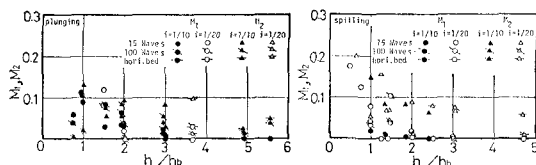
図-8 h_1 と H/h との関係

図-9 h_1 と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係

の若干の相違が見られ、 h_1 および h_1/h_2 の値とも、どちらかと言えば、spilling, plunging, surging 型の順に全体的に大きくなり、しかも両者とも沖から岸に向かって徐々に増大して、特に砕波点付近で最大値を示す傾向にあるようである。しかし、ここでは示していないが、 $i=1/20$ の場合には、このような砕波型式および水平方向の位置による明確な差異はほとんど見られないようである。一方、図-8 は h_1 と測定点における波高水深比 (H/h) との関係を示したものである。この図から明らかに、 h_1 は斜面勾配にかかわらず、 H/h の増大とともに増加する傾向にあるが、その増大率は、どちらかと言えば、砕波型式によって若干異なり、spilling, plunging, surging 型の順に大きくなる傾向にある。また、図-9 は h_1 を surf similarity parameter で整理したもので、この図から明らかに、 h_1 は $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の増大とともに増加し、しかも同じ $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の値に対しては緩勾配の場合が h_1 の値は大きくなる傾向にあるようである。

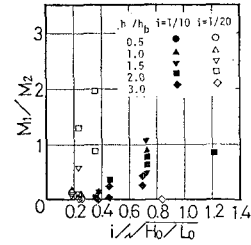
(4) 質量輸送量 (Mass flux) の変化特性

図-10 (1), (2) は各岸・沖向き質量輸送量 (M_1, M_2) の水平方向の場所的变化特性を、砕波型式別に示したもので、(1) は plunging 型、(2) は spilling 型の場合の結果である。これらの図から明らかに、砕波型式にかかわらず、全般的に M_2 (沖向き) が M_1 (岸向き) より大きく、特にその傾向は spilling 型の場合に顕著のようである。また、 M_1 および M_2 とも、前述の $\bar{U}$ お



(1) plunging 型の場合 (2) spilling 型の場合

図-10 Mass flux の場所的分布

図-11 M_1/M_2 と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係

および $\bar{U}$ と同様に、沖から岸に向かって徐々に増大して、しかも砕波点付近で最大値を示すことが明らかである。また図-11 は M_1/M_2 の値と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の関係を示したもので、この図から明らかに、 M_1/M_2 は $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の増大とともに増加し、しかも同じ $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の値では、前述の h_1 と同様に、緩勾配ほど M_1/M_2 の値は大きいようである。

(5) 断面平均水平質量輸送速度と水面波形の非対称性との関係

ここでは、図-2 に示した波形の非対称性を表わすパラメーター α, β と断面平均水平質量輸送速度との関係を調べる。図-12 (1), (2) は、それぞれ α と $\bar{U}$ および β

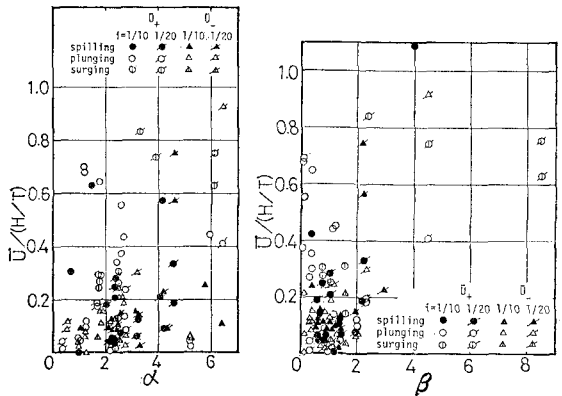
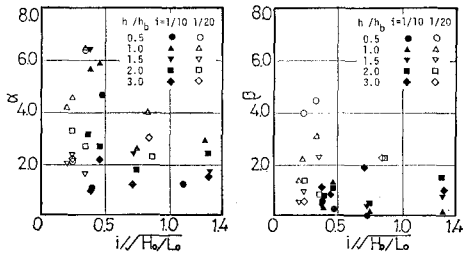
(1) $\bar{U}$ と α との関係(2) $\bar{U}$ と β との関係

図-12 断面平均水平質量輸送速度と水面波形の非対称性との関係

と $\bar{U}$ との関係を示したもので、これらの図から明らかに、全般的に砕波型式にかかわらず、 $\bar{U}$ および $\bar{U}$ とも、 α および β の増大とともに増加する傾向にあるが、その増大率に及ぼす影響度は α と β とでは若干異なるように思われる。一方、図-13 (1), (2) は、それぞれ α と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ および β と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係を示したもので、これらの図から、 α および β も $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の増大とともに逆に減少し、両者の関係はほぼ類似した傾向にあることが明らかであろう。また、ここでは示していないが、 α と β とは大きいに相関があることも見い出された。



(1) α と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係
(2) β と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係

図-13 水面波形の非対称性と $i/\sqrt{H_0/L_0}$ との関係

4. 結 論

以上の結果を要約すれば、次のとおりである。

(1) 2次元傾斜海浜上での鉛直質量輸送速度の場所的分布特性から、一般に、砕波点付近 ($h/h_0 \approx 0.5 \sim 1.0$) で上昇流が、 $h/h_0 \approx 2.0 \sim 3.0$ 付近で下降流が発生する、いわゆる循環流セルの存在が明らかに認められる。

(2) 本実験条件の範囲内では、水平床上的での鉛直質量輸送速度の実験値は、単一粒子の沈降速度を考慮して波速の第2定義に基づく Stokes 波理論を適用した著者の理論結果と非常に良く合致する傾向にある。

(3) 各岸・沖向き断面平均水平質量輸送速度は、ともに沖から岸に向かって徐々に増大し、砕波点付近で最大値を示すようである。また、砕波型式や底勾配によらず、全般的に岸向き断面平均質量輸送速度が沖向きのそれに比べて大きく、特にその傾向は砕波点付近で顕著のようである。

(4) 水平質量輸送速度の変向点高さ (h_1) は、沖から岸側に向かって徐々に大きくなり、砕波点付近で最大値を示すようである。また、全般的に、 h_1 は spilling, plunging, surging 型の順に大きくなっているが、斜面勾配による分布特性の明確な差異は見い出せないようである。

(5) 質量輸送量 (Mass flux) は、全般的に、沖向き

質量輸送量 (M_2) が底面付近の岸向き質量輸送量 (M_1) よりも大きく、特に M_1 は沖から岸側に向かって徐々に増大する傾向にある。

(6) 水平断面平均質量輸送速度は、波形の非対称性 (波形の前かがみや上下非対称性) の程度と密接な関係があり、非対称性の程度が増大するにつれて、質量輸送速度の大きさも増大する傾向にある。

(7) 波形の前かがみの程度と上下非対称性の程度とは非常に相関が強く、両者とも surf similarity parameter ($i/\sqrt{H_0/L_0}$) の増加とともに逆に減少する傾向にある。一方、底面の岸向き質量輸送速度の領域の高さ (h_1) および岸沖向き質量輸送速度の領域の高さの比の値 (h_1/h_2)、あるいは岸沖向き質量輸送量の比の値 (M_1/M_2) は、 $i/\sqrt{H_0/L_0}$ の増大とともに増加する傾向にある。

最後に、温かいご指導を賜った京都大学工学部岩垣雄一教授、ご助言を賜った酒井哲郎助教授および実験や解析に協力を惜しまなかった岡崎昭夫・手塚久一 (元大阪府立高専学生) の両君に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 平山秀夫: 傾斜底面上における波による質量輸送速度に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 29~33, 1981.
- 2) 平山秀夫: 二次元傾斜海浜における質量輸送速度の特性について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 264~268, 1982.
- 3) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. of 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 466~480, 1974.
- 4) 平山秀夫: 波浪水槽中における進行波による単一粒子の残留速度に関する研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 23~27, 1978.
- 5) Wang, H., T. Sunamura and P. A. Hwang: Drift velocity at the wave breaking point, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 121~150, 1982.
- 6) 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢幸・堀川清司: 斜面上で砕波する波の底面流速に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 40~44, 1980.
- 7) Longuet-Higgins, M. S.: Mass transport in water waves, Phil. Trans. Royal Soc., London, Series A, No. 903, Vol. 245, pp. 535~581, 1953.