

波による質量輸送に関する研究の動向

大阪府立工業高等専門学校 正員 平山秀夫

1. はしがき: 波による質量輸送は、波動中における水粒子の軌道が1周期後に同じ位置にいて、発生する1種の流れであって、その存在を初めて理論的に指摘したのは Stokes であることはあまりにも有名である。それ以来、この問題は、波動理論の展開そのものに対する興味や漂砂の動態及び海浜過程を究明し、ひいては海浜流系の機構を解明しようとして特に注目され、理論・実験・現地観測の全ゆる角度から精力的に研究が進められてきている。

本小文では、波による質量輸送に関する従来の研究を取りまとめ、併せて今後のこの方面の研究の動向を模索しようとするものである。

2. 質量輸送の定義: 質量輸送は、基本的には波動場での momentum flux に起因する流れである。Stokes (1847) は有限振幅波理論の高次解の展開において、それを初めて2次の時間平均残留速度 (Stokes drift) として理論的に定義した。その後、Longuet-Higgins (1953) によって理論体系が整理され、いわゆる波動中における水粒子の運動速度 (Lagrangian velocity) に基づく時間平均残留速度 (Lagrangian drift) として;

$$[Lagrangian\ drift] = [Eulerian\ drift] + [Stokes' drift],$$
 のように表わされることを示した。

3. 質量輸送に関する従来の研究の整理とその概観: (1) 非円転非粘性理論: Stokes (1847) はラプラス方程式と底面条件を満足するポテンシャルを決定する段階で、流速の定義 (実及び虚2定義) の必要性を指摘し、それぞれに基づき質量輸送速度を算出した。また、Ursell (1953) は、浅海波および孤立波において、質量輸送の存在を理論的に示し、続いて Le Méhauté (1968) は、Laitone のクワド波理論による質量輸送が流速の定義によって相違することを明らかにした。一方、Dalympole (1976) は、深海波の波及び流れの共存場での波動の大きい場合における Euler 的質量輸送 ($M = \frac{\rho}{2} \int_0^T \int_A u(x, y) dy dt$; u : 瞬間水平水粒子速度) の鉛直分布を明らかにし、また、平山 (1977) は波動場での単一粒子の沈降速度に起因する付加残留速度の出現を提示した。さらに、Tsuchiya ら (1980) は自ら提案した擬ストークス波及びクワド波理論によって定形進行波の質量輸送を算出している。いづれにせよ質量輸送が流速の定義に依存して相違することが明確になったが、いわゆる普通の水槽内での実験値との対応を考えると、流速の2定義に基づく結果がかなり実地的であると思われる。

(2) 粘性流体理論: a) 水平床上の規則波の場合: 境界層理論を用いて最初に層内の Eulerian Streaming (定常流成分) と理論的に論じられたのは Rayleigh (1883) である。次いで、Longuet-Higgins (1953) は、この Rayleigh の理論を1次元進行波に拡張し、曲線座標を用いて波動中の境界層内外の質量輸送速度の鉛直分布を理論的に示した。Hunt & Johns (1963) は平面波 (2次元波) の境界層内における定常流成分の式を誘導し、境界層外縁での Lagrangian drift を算出した。同様にして、Carter ら (1973) は、境界層内における Lagrangian drift を求めた。一方、野田 (1970) は、底面波動境界層内の質量輸送の従来の取り扱いを一般化し、進行波、部分重複波および完全重複波に対する質量輸送速度を層流及び乱流境界層理論に基づいて誘導した。また、Huang (1970) は Longuet-Higgins の理論結果が $kh \rightarrow \infty$ で発散するという矛盾を指摘し、新たな表面条件 (clear water surface, contaminated surface) の下での理論展開を行ない、 kh の全領域で矛盾のない結果を示した。続いて Ünlüata & Mei (1970) は Lagrangian 運動方程式を用いて規則波及び不規則の場合の理論を展開し、有限水深の場合の Longuet-Higgins

Hideo - Hirayama

の結果と全く一致することを確認した。一方, Sleath (1972, 73, 74) は, 厚流境界層の質量輸送速度と波形勾配の4次のオーダーまでの, そのときの外縁の速度に Stokes 波の2次近似解を適用した結果, 実験値の厚流解からのズレを説明できることを示した。また, 彼は, 波高が非常に小さい場合の解と, 水路方向の波の減衰と考慮することによって3つ得たが, いずれも実験値との適合は良くないことを示すとともに, さらに, 粗度によって質量輸送が増加することの裏付けを理論的に行っている。その他, Dore (1975) は, 進行波に依る移動座標を用いて, 3次元進行波の場合の理論を展開し, また, Isaacson (1976) は, 厚流境界層内の方程式を cnoidal waves に基づいて解いて厚流質量輸送の2次近似解まで求めた。さらに, Lamouré & Mei (1977) は, 微小円柱周りの質量輸送と3次元の理論解析, 底面付近では, 円柱の側面の両端に向って流れが集中することを示した。また, 極く最近, 柴山ら (1985) は, Darlymple & Liu (1978) にならって, 底面粘土層内の波動による質量輸送について理論的検討を加えている。

以上のよう, 水平床工の質量輸送の理論展開は多岐にわたっているが, 要は波動中における表面境界層の取り扱いかと厚流渦度の拡散及び厚流流速の正確な評価に議論は集中しており, 今後さらなる検討が必要であると思われる。

6) 傾斜面上の規則波の場合: まず Bijker (1974) は, 傾斜面上での進行波による質量輸送の理論を単に shoaling 効果と考慮した水平床工の境界層理論の拡張として展開し, 底勾配の影響を検討した。理論値と実験値との差異はかなり著しいことを明らかにした。一方, 手嶋 (1984) は, Bijker の理論を基にして傾斜面上での重力効果, 圧力勾配及び境界層厚の変化などを考慮した新たな理論を展開した。Bijker の理論に比べてより実際的にはなつたものの, 依然として実験値との対応はあまり良くないと思われる。今後は, 碎波帯を含めた傾斜面全域での水面波形に対応する境界層厚の実際のな変化や底流の影響と考慮に入れた理論を考案していく必要があるだろう。

7) 不規則波の質量輸送: 不規則波の質量輸送の解析方法は, 現在のところ, Bye (1967) のスペクトル解析法に基づいて各成分波の質量輸送と合成する方法, 及び Dyke (1981) の波別解析法に基づいて各成分波の卓越波に対応して質量輸送を合成する方法などがあるが, これらはいずれも Euler 座標, Lagrange 座標及び流速の定義によって結果が異なっている。一方, 土屋ら (1982) は, 分散性が卓越する深海域及び浅海域においては, 流速の定義との関係と明確に Stokes 流の展開で, 一方, 非線型が卓越する極浅海域においては, ソリトンスペクトル理論によって質量輸送の定式化を行い実験値と比較した。その結果不規則波動場でも波の質量輸送は, 波の進行方向と同一方向であり, 著者らの表示式とも良く対応することを明らかにした。いづれにしても, この方面の研究は, 端緒にすぎないであろうので, 今後の発展が期待される。

(3) 実験的研究: 従来の実験的研究と大まかに分類すれば, ①水平床工における質量輸送の鉛直分布と検討した研究 [B.E.B. (1941), Bagnold (1947), Russell & Osorio (1958), Longuet-Higgins (1960)], ②境界層の遷移と質量輸送速度の関連性を追究した研究 [Brenner & Collins (1961), Brenner (1966)], ③質量輸送の実験方法に関する研究 [土屋・安田・山下 (1978), 土屋ら (1980)], ④傾斜面上における流速の測定を試みた研究 [渡辺ら (1980), 泉・坂川 (1981), 澤田ら (1981)], 及び ⑤傾斜面上における質量輸送の分布特性と関係した研究 [Eagleson & Dean (1961), Law & Travis (1973), Wang (1982), 若垣・斐ら (1981), 磯部 (1982), 手嶋 (1981, 82, 83, 85)] のように分けられよう。

4. あとがき: 以上, 質量輸送に関する従来の研究結果を概括し, その動向を明らかにしようとしてきたが, 著者の能力と入手できる情報量の限界などから, 単に過去の研究成果の羅列に終始した点に遺憾を感じている。