

報告番号 ※ 甲 第 2204号

主論文の要旨

題名 閉鎖性海域における潮流場
の特性に関する基礎的研究

氏名 和田 清

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	和田 清
<p>閉鎖性海域を代表する内湾域では、閉鎖的であるが故に複雑な流動場と水質環境が形成され、水質汚濁の著しい停滞性水域が多く存在している。今日ではこれら停滞性水域に多くみられる貧酸素化、富栄養化水域を改善し、海域全体の海水交換を促進して、その流動環境を物理的に制御する技術の確立が望まれている。そのためには、まず海域内に存在する水塊分布と流れの構造を捉えて、それに係わる物理的要因を評価するとともに、長期的な物質輸送機構に大きな役割を果たす恒流の成因、特に潮汐残差流の生成・維持機構を明らかにしなければならない。この潮汐残差流は、流体運動の非線形性のために、潮汐振動流と地形条件の関連で生じる二次的な流れであり、その生成には、流れのシア（流速の不均一性）が強く関与している。すなわち、流動場のシア構造は、潮汐残差流の成因であると同時に、また物質分散（シア拡散）過程にも重要な役割を果たしているのである。</p> <p>本論文は、閉鎖性海域における物質分散過程を支配する基本的な流動要素として、潮流系、すなわち潮汐振動流と、その振動流のシア構造が生み出す潮汐残差流とに着目し、海域を取り巻く境界条件、特に地形条件に強く支配される流動場のシア構造と潮汐残差流の生成・維持機構の関係を明らかにするとともに、海域における海水交換性に関して基礎的な研究を行ったものである。</p> <p>第1章では、閉鎖性海域での物質輸送における潮汐残差流の役割を明らかにし、流動場のシア構造と残差流の生成・維持機構、物質分散機構との関係を明確にし、本研究の目的と立場、さらにその水理学的意義を述べている。</p> <p>第2章では、閉鎖性海域における水塊分布の物理的性格を大局的に明らかにするために、豊水期と渇水期の対照的な時期に分け、水塊分布とその形成過程の実態について考察した。その結果、豊水期と渇水期では、河川水の流出パタ</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	和田 清
<p>ーンが大きく異なり、また水温・塩分の季節的変動からは、豊水期では湾内部全体に水塊の3次元的な構造、渇水期には水平1次元的水塊分布の存在が確認された。このような水塊の分布状態の差異は、季節的な外力要因とともに、内湾の地形形状によって潜在的に決定されている潮流の強さに起因しており、この流動場のシア構造によって各水域の物理構造が特徴づけられることを明らかにした。</p> <p>ついで、水理模型実験から水塊分布の形成に影響を及ぼす流動場の構造と、地形条件などの境界条件および密度成層状態相互の関係を考察した。まず、潮汐残差流の生成機構には、上げ潮と下げ潮最盛時の流況が大きく関与していることを明らかにし、それらの時点における湾内の水平渦度分布を検討した。潮流自身の非線形性が強くなると、両方の潮時で渦度が同符号となり、常に湾内に正の渦度を蓄積することを示し、この事実が残差環流を生成し発達させるマクロ的な生成・維持機構であることを示した。さらに、以上の考察に基づき、新たに導入した仮想平均渦度が潮汐残差流の大きさを決定する最も重要な要素であることを指摘した。加えて、潮汐振動流にシアや位相の空間分布があればドリフトが生じて、水粒子は1周期後には元の位置に戻らず、Lagrange的な残差流を生成する。この効果は海峡部のように潮流の流速が大きいところで顕著に現れ、海水交換を促進することを理論的に説明した。</p> <p>流動場の水平・鉛直シアの構造を詳細に検討するためには、流速の振幅と位相が絶えず時間的に変化している流れ場の内部流速の測定が必要不可欠である。第3章では、特に水理実験水槽内で卓越する緩流速域での流動場を計測する目的で、安定性の高い流速計として差温式微流速計を開発した。差温式微流速計の作動原理を理論的に検討した結果、本流速計は原理的に流速が小さくな</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	和田 清
<p>るほど、流速に対する温度差の変化率が大きく、流速が小さいほど流速計としての感度が高くなることなどを示した。また、この流速計は速度変化に対して敏感に応答し、ほとんど時間遅れなしでその変動と流速の絶対値を測定しうることを示し、長周期波動場の内部構造の把握と解析に十分適用できることを検証した。</p> <p>第4章では、流れの鉛直シアー勾配の大きな底面境界層に起因する潮汐残差流に着目し、その基本的性格を明らかにした。潮流のような長周期波動場では、境界層厚が水面近くにまで達する場合が多い。その流動場をも理解するために、自由表面における流速の境界条件を満足する理論解（厳密解）を新たに誘導した。この厳密解と従来の近似解の比較から、流速と底面摩擦応力の基本振動成分および定常成分は、水深と境界層厚に比例するパラメターの比（相対水深比）h^* が大きい領域ではほとんど一致するが、従来の近似解の適用限界とされている $h^* = 5$ では、10 % 程度の差異を生じること、また、その適用限界を境にして h^* に対するそれらの変化率が異なり、$h^* < 5$ の範囲で最大値をとることなどが新たに明らかにされた。さらに、潮汐残差流の鉛直分布は相対水深比 h^* によって大きく変化し、h^* が小さい場合には2層構造、h^* が大きい場合には3層構造の鉛直分布となり、底面付近の残差流の向きは、h^* に関係なく常に湾口向きであり、底面摩擦応力の定常成分は常に湾奥向きに作用することが指摘された。</p> <p>ついで、水理実験により、Shear Meter による底面摩擦応力の直接測定、第3章で述べた差温式微流速計などによる内部流速の計測を合わせて行い、理論解析で指摘された流動場の支配パラメターの一つである相対水深比 h^* を基礎にしながら、底面摩擦応力の特性を流況特性と関連づけて検討を加えた。これ</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	和田 清
<p>らの結果より、水位と境界層外縁近傍の流速の位相差は $\pi/2$ 程度で、完全重複波の様子を示しているが、境界層外縁近傍の流速と底面摩擦応力の位相差は理論値 ($5\pi/4$) よりも小さくなることを指摘した。また、水平 Reynolds 数が $10^4 \sim 10^5$ の範囲では、相対水深比 h^* の減少につれて、底面近傍流速および底面摩擦応力の実験値は理論値 (近似解) よりも上回る傾向となるが、これは自由表面付近とその下部領域の流速の位相差に起因することが示された。さらに、実験によって得られた底面摩擦応力と底面近傍の流速値から、底面摩擦係数を Reynolds 数の関数として求めた結果、その値 (両者の定常成分を含めた場合) は理論値 (近似解) よりも大きくなることが明らかにされた。加えて、定常成分を含めた Reynolds 数および底面摩擦応力は、h^* の関数で表現可能となるため、底面摩擦係数についても h^* の関数として定式化がされ得ることを示した。以上のことから、相対水深比 h^* はシアアが卓越する領域を表現する指標であり、流速および底面摩擦応力を大きく支配し、残差流を考える上で重要なパラメータとなることが明らかにされた。</p> <p>第5章では、第4章で述べた一様水深の鉛直2次元の流動場を基礎に、底面が傾斜した3次元的な流動場を想定することにより、水平・鉛直シアアの分布と潮汐残差流の生成・維持機構の関係を基本的に明らかにした。まず、海底傾斜の効果が基本的にどのような循環流を生成するかを把握する目的で、潮汐波の進行と垂直な方向に海底が一様に傾斜した海域を取り上げ、水面勾配を2次元の、潮汐振動流の流動場を3次元的に解析した結果、海底傾斜と底面境界層による相互作用が、水平循環流のみならず鉛直循環流の生成要因となることを理論的に指摘した。</p> <p>次に、底面勾配を変化させた水理実験により、湾口部における流れの水平シ</p>				

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	和田 清
<p>アー構造と、湾内部に形成される水平残差環流(循環流)の形態(環流の個数とそのスケール)が密接に関与していることを指摘し、上げ潮および下げ潮時の流況の水平渦度分布の対称性から、マクロ的な水平残差環流の生成機構とその循環特性が明らかにされた。また、湾口部における流れの水平シアー分布に依存する水平残差環流と潮汐振動流の関係を基本的に明らかにするために、湾口部に形成される残差環流(第1環流)を Kirchhoff の2次元楕円渦と仮定し、両者の運動エネルギーの比と、残差環流の個数との関係から、水平残差環流の個数およびそれが安定化する程度を表す指標、循環流安定数を新たに提案した。加えて、実験で得られた残差環流形態に類似した現地観測例を挙げた。</p> <p>さらに、実験結果から得られた潮汐振動流および水平残差環流を単純にモデル化し、Lagrange 的手法に基づく数値シミュレーションによって、潮汐振動流と残差環流が、湾内部領域の物質輸送機構や湾口境界での外海水との海水交換にどのように関わっているかを考察した。その結果、湾口部に形成される残差環流(第1環流)の強さとスケールが湾口部での海水交換機構を大きく支配するが、湾奥部の残差環流(第2,3環流)は、湾内部の物質輸送機構を支配し、その領域の水塊の固有特性を強めるので、停滞性水域全体の水塊形成にとって重要な核となっている。</p> <p>以上のように、本論文は閉鎖的な内湾域を対象にして、流動場のシアー構造と密接に関与する潮汐残差流の生成機構を明らかにした基礎的な研究であり、今後現地海域での諸問題を考える上で、流動場の基本的な理解に基礎的な指針を与えるものである。</p>				

A FUNDAMENTAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF TIDAL CURRENT
FIELDS IN SEMI-ENCLOSED INLAND SEA

by
Kiyoshi WADA

ABSTRACT

Understanding the characteristics of tidal current fields in a semi-enclosed inland sea is fundamental to the study of physical oceanography and oceanographical engineering. The shear of the tidal oscillatory current causes residual currents. They are originated from interaction between the oscillating tidal stream and topographical conditions because of its strong effect on mass transport and longitudinal dispersion process. The purpose of this thesis is to investigate theoretically and experimentally the relation between the current shear and the generation mechanism of the tide-induced residual current in order to establish control techniques of the current field, taking notice of bottom and shore boundary conditions.

First of all, the behaviors of water mass as a tracer of the current field in the actual sea are investigated from macroscopic viewpoint. The distributions of temperature, salinity and turbidity in sea area have their seasonal fluctuations and the formation of water mass is closely correlated with topographical conditions.

Hydraulic model experiments are carried out for various boundary conditions in order to examine basically the effect of topographical conditions to the current field observed in the actual sea. The generation mechanism of the residual current is explained, based on an asymmetrical vorticity distribution in the stages of flood and ebb tides. By introducing the virtual mean vorticity taking account of the current shear, it is shown that the magnitude of the residual current velocity is controlled by the proposed vorticity. This suggests that the curvature of stream line is very important in inducing the residual current.

Next, a temperature gradient-type micro-flowmeter is newly devised so as to measure the very low velocity less than 1 cm/s which usually appears in the tidal current field in laboratory experiments. The fundamental characteristics (sensitivity, response, etc.) of the flowmeter are discussed theoretically and experimentally for the various flow conditions. In spite of the limited range of application, the flowmeter is able to measure accurately the low velocity when thermal diffusivity is ineffective. The flowmeter is demonstrated to be an useful tool to discuss details of the fundamental structure of the current field caused by bottom boundary condition, which is mentioned later.

The discussions are high-lighted on the bottom boundary layer that produces the nonlinear properties in currents through the strong current shear. A new theory is developed to explain the relation between the velocity and the bottom shear stress in the tidal current due to the bottom boundary layer in a rectangular basin with constant water depth. Employing the perturbation method, the residual components of the current field are theoretically analyzed in two-dimensional frame. The derived

solution is completely satisfied with the boundary condition of velocity at the water surface, and this solution can be widely applied for the case that the bottom boundary layer thickness is up to the water depth. The theory shows the followings ; (i) usual approximate solutions underestimate the oscillatory and residual components of the velocity and the shear stress, (ii) the vertical profiles of the residual current velocity have a two-layer distribution when the water depth is shallow, and have a three-layer one when the water depth is deep, and (iii) the current in the lower layer flows always toward the bay mouth, and then the residual bottom stress acts toward the bay head.

A shear meter is newly devised to measure directly the current-generated bottom stress in a laboratory basin. The temperature gradient-type micro-flowmeter is simultaneously used to measure the velocity distribution. The experimental values of the bottom stresses are compared with the theoretical values. The comparison shows that the experimental values of the basic-mode oscillating and residual components of the bottom stresses become predominant over the theoretical ones with increasing of the bottom boundary layer thickness up to the free surface.

Lastly, the relation between the tidal current shear and residual circulations in three dimensional flow conditions are studied in the basin with a sloping bottom topography.

The structure of the vertical circulations caused by the combined effect of the bottom oscillatory boundary layer and bottom inclination of on-offshore direction is analyzed theoretically. In the first-order theory, the maximum amplitude of a water surface appears at the shallowest water depth on the reflection boundary in the coastal region, and the major axes of the tidal current ellipses deflect toward shallower water region. The generation mechanism of the residual current in tidal currents with different vertical profiles of velocity is discussed. It is pointed out that the second-order vertical circulation produces a two-layer distribution, that is, the residual current flows toward the onshore in the lower layer and toward the offshore in the upper layer.

It is demonstrated that the horizontal current shear at the bay mouth gives rise to the horizontal residual circulation in hydraulic experiments. The number of the circulation is clearly determined by the circulation stability parameter defined by the ratio of the kinetic energy of the oscillatory current to that of the residual circulation. The relation between the horizontal current shear and the number of circulations is confirmed to correspond well to that in the actual site.

Furthermore, based on the numerical simulation, the water exchange is shown to be in close relation to the strength and scale of the circulation in the neighborhood of bay mouth, which indicates the important role of water mass on the transport process.