

- 2.2. Vertical circulations due to the oscillatory bottom boundary layer
 - 2.2.1. Model sea and governing equations
 - 2.2.2. Solutions
 - 2.2.3. Hydraulic experiment
 - 2.2.4. Generation mechanism of the tide-induced vertical circulation
 - 2.2.5. Vertical structure of the residual current
 - 2.2.6. Higher-order currents
 - 2.2.7. Some remarks
3. Tide-induced residual currents in the sea with a sloping floor in three dimensions
 - 3.1. Horizontal circulations due to the oscillatory bottom boundary layer in a bay with a sloping floor
 - 3.1.1. Model basin and governing equations
 - 3.1.2. Solutions
 - 3.1.3. Solution curves
 - 3.1.4. A hydraulic experiment using a model bay with a sloping bed
 - 3.1.5. A hydraulic experiment using a scale model of the Seto Inland Sea
 - 3.1.6. Some remarks
 - 3.2. Tide-induced residual currents over an undulating sea floor with the Coriolis effect
 - 3.2.1. Model sea and equations governing the residual current system
 - 3.2.2. Solutions of the basic oscillatory currents
 - 3.2.3. Solutions of the second-order residual currents
 - 3.2.4. Solution curves
 - 3.2.5. The tide-induced residual current over a nonrotating sea floor
 - 3.2.6. Generation mechanism and some remarks
4. Longitudinal dispersion of matter due to the shear of currents
 - 4.1. Longitudinal dispersion of matter due to the oscillatory boundary layer
 - 4.1.1. Model of matter dispersion and analysis of the advective-diffusion equation in a two-dimensional plane
 - 4.1.2. Solutions of equations governing the various moments
 - 4.1.3. Solution curves and discussion
 - 4.1.4. Some remarks
 - 4.2. Longitudinal dispersion due to the shear effect of steady and oscillatory currents and its time-dependence
 - 4.2.1. Longitudinal dispersion model with two dimensions and analyses of the advective-diffusion equations

4.2.2. Vertically averaged solutions of the equations governing the longitudinal dispersion due to the shear effect

4.2.3. Solution curves of the vertically averaged dispersion

4.2.4. Vertical structure of the shear diffusion

4.2.5. On the negative dispersion coefficient in the oscillatory current and some remarks

5. Conclusions

Acknowledgements

References

Figures

Appendix

論文内容要旨

潮流のような振動流は固体境界との間に Stokes 層と呼ばれる境界層を形成することが知られているが、この層は一般に薄く、従来の内湾や内海の流動や物質輸送の研究においてはあまり考慮されることなく、潮流の卓越する海域における拡散の数値モデル等においても無視されがちであった。しかし、この層は流れの強いシアーにより、流れに非線形効果や物質分散効果を生じさせ、それらの効果は渦動粘性や渦動拡散によって境界層外へも伝達され、湾内全域の物質輸送にも無視できない影響を与える。本研究は物質輸送に及ぼす境界層の重要性に着目し、境界層による潮汐残差流、および境界層のシアー効果による物質分散について理論的な解明を試みたものである。なお、境界層に注目した場合には、そこにおける乱流の発生など極めて重要な問題があるが、ここではその詳細を省き、渦動粘性係数や渦動拡散係数は一定として解析した。

第2章と第3章では振動流が形成する境界層 (Stokes 層) に起因する潮汐残差流を解析した。

閉鎖的な沿岸海域でも潮汐周期よりも長い変動周期を持つ流れがしばしば観測され、それが海中の物質分布に強い影響を与えていることが知られている。この流れは海面を吹く風や海水の密度変動によることもあるが、潮汐振動流の非線形効果によっても生成される。この非線形効果によって生じる定常的な流れは潮汐残差流と呼ばれ、原理的には Rayleigh (1884), Schlichting (1932) らによって Streaming として説明されたものに相当する。この流れは一般的には振動流に比べるとはるかに弱い、その恒常性のために物質輸送に強い影響を与えるものとして、近年は海洋の研究者に注目され、半島などのような水平地形の出入りに伴う潮流の剥離によるもの、および海底地形と地球自転の相互作用によるものが、水理実験、数値計算、理論解析等によって研究されている。

潮汐残差流は、当初、杉本 (1972) らに潮汐水理模型の中で取り上げられ、水理実験や数値実験によって研究されてきた。しかし模型と現地のデータを比較すると、模型内では剥離による潮汐残差流が卓越しやすいが、現地では剥離は抑制され、非線形領域としては陸岸からの境界層が卓越しやすいことがわかった。本論文における境界層による潮汐残差流の研究はこのことから出発した。

境界層については陸岸性のものの他に底層性のものが存在する。第2章では単純化した矩形の湾内の陸岸境界層による水平循環流と底層境界層による鉛直循環流とを理論的に解析した。なお、潮汐残差流は、潮流の非線形効果によって倍振動周期の流れとともに生じるものであるが、それを厳密に解くことは現段階では困難である。本研究では、第3章も含めて非線形効果は十分に小さいという仮定のもとで2次の残差流を注目して解析した。

第2章では、潮汐残差流の基本的な生成メカニズムを明らかにするため、海底が平坦な海域で2次元的な解析を行った。

2.1節では水平渦動粘性係数による Stokes 層を陸岸境界層として、流速の1次に比例する底面摩擦も考慮して、鉛直平均的な水平面内における潮汐残差流を解析した。その結果、残差流

の強さは潮汐振動流の振幅の2乗に比例し、さらに摩擦が小さい場合には潮汐残差流は3層構造（陸岸沿いに湾奥から湾口へ、そのすぐ外側を逆に湾奥向きに、さらにその外側、つまり湾の中央部周辺では湾口向きに流れる）になり、底面摩擦の増加と共に、境界層とそのすぐ外側のみで顕著に現れることがわかった。陸岸境界層による潮汐残差流において、振動成分から定常成分への橋渡しは $u_T \omega_T$ (u_T は潮汐振動流の陸岸（縦）方向成分、 ω_T はその渦度）によるが、その1潮汐周期間の挙動を考察することによって、陸岸近くで湾口向きに（潮汐振動流の振幅の小さい方から大きい方へ）流れる潮汐残差流の生成メカニズムを説明することができた。

2.2節では鉛直渦動粘性係数によって海底上の Stokes 層に引き起こされる、鉛直的な潮汐残差流について解析した。このような鉛直的な残差流の存在は、すでに Ianniello (1977) によって示されたが、本研究においては、前節の水平的な潮汐残差流との違いを、生成機構を踏まえて明らかにし、その生成に関する水理実験も行った。さらに、水理実験と理論解析の結果の違いから、高次の非線形効果についても解析し、その役割を明らかにした。

底層境界層による潮汐残差流も、前節同様潮汐振動流の振幅の2乗に比例するが、前節の水平的なものよりも強い鉛直的な循環流を形成する。そのことは、前節では運動方程式の中に流速に比例する摩擦項が存在したためでもあるが、さらに、残差流の生成項として新たに $w_T \xi_T$ (w_T は潮汐振動流の境界層を横切る方向（ここでは鉛直方向）の成分、 ξ_T は底層境界層のシアを代表する渦度で陸岸境界層の場合 ω_T に相当）が存在することによる。つまり水平的な残差流の場合には、振動成分から残差成分への変換は $u_T \omega_T$ のみで行われたが、鉛直的なものについては $u_T \xi_T$ と $w_T \xi_T$ の2つで行われている。なお、この $w_T \xi_T$ をメカニズムの点から水平的なものにあてはめると $v_T \omega_T$ に相当する。水平的なモデルにおいては湾幅が固定しているために有意な v_T は存在しないが、鉛直的なモデルでは、潮汐に伴う海面昇降によって w_T が生じ第2の項が現れている。 $w_T \xi_T$ の存在は境界層外でより強い残差循環流を生成する。

この鉛直循環流を検証するための水理実験は、流れの測定精度の点で、理論の前提である非常に小さい非線形効果のもとでは行っていないが、境界層外における鉛直循環流は明瞭に得られ定性的には理論の結果と一致した。しかし実験結果は理論結果の数倍の値を示し、振動流も境界層外の上層とで顕著な位相のずれを示した。本研究では潮汐残差流は基本振動流の2次の流れとしているが、3次と4次の流れを解析することによって、実験結果の違いは比較的強い非線形効果によるものであることがわかった。

第3章では海底の傾斜によって3次元的な挙動を示す潮汐残差流を解析した。2.1節では水平渦動粘性係数によって水平的な潮汐残差流が生成されることを示したが、海底が傾斜している場合には、流れの体積輸送保存則に従って、水平渦動粘性がなくても、鉛直渦動粘性のみによって水平的な潮汐残差流が発生する。本章では鉛直渦動粘性係数のみを取り入れて、海底が傾斜する海域における潮汐残差流を3次元的に解析し、水平循環モードが生成されていることを明示した。

3.1節では、海底が潮流の主軸の横方向に傾斜する場合に底層境界層（Stokes層）が水平

循環流のモードを生み出すことを3次元解析から導き、基礎水槽実験でもそれを検証した。実際の海域では海底は岸から沖合に向かって傾斜し、沖合では平坦になっていることが多いが、その場合には岸沿いの傾斜した領域で優勢な潮汐残差流が生成されることもわかった。現地では確認されていないが、水平縮尺2000分の1の瀬戸内海潮汐水理模型では、播磨灘東部の淡路島岸沿いにこの節のタイプの潮汐残差流と思われる顕著な流れが見られる。

以上の解析においては地球自転によるコリオリ効果は無視していた。3.2節では以上の解析で無視していたコリオリ力が潮汐残差流に及ぼす効果を調べるために、潮汐残差流が発生しうる最も簡単な地形として、海底が起伏して水平方向に無限に広がる海域での解析を行った。この種のモデルについてはこれまで鉛直構造を無視して水平2次元で取り扱われたことがあるが、水深が変化する海域での運動方程式の2次元化には問題があることも指摘されている。本研究では水深はX方向のみに変化するとしてY方向に一樣に伸びる海嶺を考え、コリオリパラメータ f や海嶺に対する潮汐振動流の主軸の方向が変化する場合の、3次元な潮汐残差流の構造を解析した。

残差流のX方向成分（海嶺を横切る方向）の鉛直分布は f の大きさによってかなり異なるが、Y方向成分については、 f が潮流の振動数にくらべて非常に小さい時を除いて、全水深で海嶺の上を時計廻りに循環するように流れることが示された。また f が小さい時には当3次元解析のY方向流は従来の2次元解析とは逆に流れるように得られたが、この違いは生成機構を考察することによって説明することができた。 f の効果によって海嶺のまわりを卓越する残差流についても、海面昇降量を求めることによってその生成維持機構を明らかにすることができた。

第3章までに取扱ったように、潮流のシアは潮汐残差流として海水の定常的な流動を引き起こすが、さらに海水中の物質の混合輸送をも引き起こす。陸岸から投入された拡散物質は一般に半円状には広がらずに岸に沿うように混合拡散される。本章では、これは潮流の陸岸境界層のシア効果による物質分散の初期段階の特徴であるとして、従来あまり取り扱われなかった初期段階から定常段階に至る物質分散過程を、境界層を持つ振動流やその他の流れにおいて理論的に解明しようとした。

第1節ではStokes層を形成する振動中における瞬間線源からの物質分散を、横方向（流れに垂直な方向）の構造もわかるように2次元的に解析した。解析はAris(1956)のモーメント法に従い、2次のモーメントまで求め、各レベル毎の分散係数の時間変化等を明らかにした。シア効果による分散は、初期には境界層内で強く引き起こされ、それが次第に境界層外へも伝播されてゆく過程が明らかとなった。それによると、初期段階の境界層における分散係数は、定常段階におけるものよりも1桁程度大きくなる。また潮流は横方向の位相の変動を伴うことが多いが、そのような位相変動も新たな分散効果を生み出すこと、さらに境界層を持つ振動流は、従来適用されてきた線形流速分布の振動流にくらべて数倍の分散効果を持ちうることもわかった。ここで新しく導入した各レベル毎の統計的分散値からは、拡散物質の2次元的な濃度分布も解析的に知ることができる。

4.2節では、以上の解析手法を用いて横方向（または鉛直方向）に平均した分散係数の初期

段階から定常段階に至る過程を、定常流と振動流との比較も念頭において、典型的な流速分布のもとで解析した。1次元化するための平均操作は、従来の横方向平均濃度に基いたので、拡散物が流れのシアーによって単に引き伸ばされる効果までも分散係数の中に入っていたが、本研究では実際に混合した効果のみが係数の中に現れるように、横方向に分布する統計的分散値に基いて横方向平均値を求めた。それによると、従来から問題にされていた振動流中の負の分散係数はまったく見られない。また分散係数は拡散代表時間(=[横方向の代表寸法]²/横方向拡散係数)の0.6倍で横方向にほぼ均一となり定常値に達することが示された。ただし振動流における分散係数については、1周期平均値は定常値に達するものの周期内変動は倍振動周期でいつまでも残る。

シアー効果による物質分散の概念は従来、横方向(または鉛直方向)に平均して、時間が十分に経過した場合の定常値が注目されていたが、特に振動流においては初期段階のシアー領域での分散効果が著しく卓越して現れた。沿岸から物質が投入された時の拡散の数値シミュレーションモデルでもこのことは考慮すべき重要な要素である。

潮流の水理実験においては、流れの剥離が顕著に現われ、それに起因する潮汐残差流や物質分散が従来研究されてきたが、現地資料の解析が進むにつれ、乱流が卓越する現地では剥離はそれほど顕著ではないことがわかってきた。また、潮流の卓越する湾等においては、従来は、境界層外の流れの主流域での観測や解析がほとんどで、数値シミュレーションにおいても境界層領域の再現性の確認などは無視されてきた。本研究は、物質輸送に大きく係わるシアー領域として境界層(Stokes層)に注目して、境界層に起因する潮汐残差流および物質分散について解析し、その重要性など新しい知見を得た。しかし実際の海域では、境界層は乱流の発生領域でもあり、地形の出入りのために流れも複雑で、さらに未知の現象もあるのではないかと思われる。沿岸海洋過程の理解をより高度に確立するためには、境界層領域の研究をさらに深める必要がある。

論文審査の結果の要旨

潮流の卓越する内湾や内海では、陸岸や海底に沿ってストークス層とよばれる境界層が形成される。本研究は、物質輸送に及ぼすストークス層の重要性に着目し、それに起因する潮汐残差流およびそのシア効果である縦方向物質分散について、その生成機構や物理過程を理論的に解析研究したものである。

まず第2章で、陸岸境界層による鉛直平均の水平的残差流、および、底層境界層による鉛直的残差流を、長方形の湾のモデルで2次的に解析し、その特徴を明らかにした。内湾等の鉛直循環流については、従来は、風による吹送流や海水の密度分布による重力循環流が取上げられていたが、本研究の内容は、新しいタイプの鉛直循環流として注目される。

第3章では、海底が傾斜した海域での3次的な潮汐残差流を解析している。まず、海底傾斜の効果によって、潮汐残差流が水平循環モードを持つことを示しているが、この結果は、風や密度分布による鉛直循環流も海底の傾斜によって容易に水平循環流を生み出すことを示唆しており、水平循環流の大きい物質輸送効果からみても、この解析のもつ意味は大きい。次に潮汐残差流に及ぼすコリオリ力の効果を扱い、種々新知見を得ている。特にその鉛直構造に関して、近年注目されている海底近傍の推積物輸送にも大きくかかわるものと思われる。

第4章では、縦方向物質分散にかかわる諸量の解析解を得ている。ここではストークス層領域のシアによる分散を扱っているが、従来無視されていた流れの横方向の構造、さらに分散初期からの時間変動も解析解によって明らかにし、ストークス層による分散が従来の簡略化された取扱いの結果にくらべて効果的であることを示している。また、従来の分散の概念があいまいで、負の分散係数の議論があるなど、解釈の混乱もあったが、本論文では、分散係数について新しい物理的に合理的な定義を提案し、問題点の整理に貢献している。

本研究は、密度が一樣、渦粘性・拡散係数も一定という、簡略化されたモデルでの解析ではあるが、従来看過されていたストークス層に注目することによって、様々な新知見を見だし、沿岸海域の予測モデルの高度化に大きく貢献した。

このように、本論文は申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識とを有することを示している。

よって安田秀一提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。