

博士論文審査報告書

論文題目

離散渦法による沿岸域流れの解析に関する研究

A Study on Application of Discrete Vortex Method to
Coastal Circulation

申請者

氏名

古川 恵太

Keita Furukawa

専攻・研究指導
(課程内のみ)

2004年 4月

わが国における内湾域の環境問題に対する取り組みは、公害対策・環境復元（創造）・生態系との共存といったキーワードを軸に進められてきた。こうした中で、現在では、広域的・長期的な視野に立った環境評価ならびにその対策と、生物・生態系に配慮した局所的・短期的な（非定常的な）諸現象の把握および評価が求められてきている。本研究では、後者を対象とした検討を行うための解析ツールを開発し、環境シミュレーションの手法を確立することを目的としている。ここでは、数値解析手法として「離散渦法」を取り上げる。「離散渦法」は、これまで一様な流れ場に置かれた孤立渦の挙動や二つの異なる流速を持つ流体の界面における混合現象等に適用されてきたが、そこに含まれるモデルパラメータを定めるには個々に観測値や実験値を必要とし、試行錯誤的にこれを決めるほかなかった。本研究では、実験水路や現地において見られる小規模な流れおよび実際の沿岸域流れについて、それぞれパラメータの値を定めるための関係式を提示し、離散渦法によりそれらの流れを予測できるようにしている。その際、まず小規模な流れに対する手法の確立を図り、次に実際の沿岸域流れにこれを適用するための手法の拡張を行うという手順をとっている。さらに、実験室のみならず実際の沿岸域においても観測機器を駆使した計測を行い、その結果と解析結果を比較することで、ここで提示した解析手法が工学的に有用なものであることを実証している。

本論文は6章から構成されており、以下に各章の要点をまとめて示す。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および本論文の概要ならびに構成について述べ、本研究の位置付けを明らかにしている。

第2章では、離散渦法がナビエ・ストークス方程式(NS方程式)の直接解法として発展してきた経緯や、この解析方法の理論的根拠や定式化の仕方などについて詳細に説明している。ここでは、特に、離散渦法の特徴と基本的な考え方を解説し、流速場や圧力場の求め方について整理している。すなわち、水中の微小な水塊(コントロール・ボリューム)内に存在する水についての運動量の保存則としてNS方程式が導かれているが、ここではこれを変形することにより導かれた「渦度の移流・拡散方程式」を基礎式とし、ビオ・サバールの式による流速場の評価と非定常のベルヌーイの式を用いた圧力場の計算とを可能にする手法について論じている。

第3章においては、「実験水路における流れ」あるいは「現地において見られる小規模な流れ」を検討の対象とし、離散渦法によってこのような流れ場を良好に再現するための検討を行っている。本章における重要な成果は、離散渦法を上記のような流れ場に適用する際に必要となる「モデルパラメータ」の決定方法を、具体的に定式化し提示している点にある。また、対象となる流れが、単一閉境界、単一開境界あるいは複数閉境界をもった流れに分類できるとして、その各々に対する境界条件の与え方についても明らかにしている。

具体的には、単一閉境界流れとして、平板背後の渦列の解析を取り上げ、簡

易な境界設定法（強制的渦剥離モデル）を用いて再現することを試み，モデルパラメータの決定方法を検討した．単一開境界流れとしては，棧粗度のような単一または複数の凸部周辺の流れを対象として，壁面境界を一系列の境界渦で再現することを試み，再付着位置と凸部のピッチ（縦断方向間隔）との関係について考察した．さらに，複数閉境界流れとしては，ヨシ原やマングローブ林などを通り抜ける流れを取り上げた．複数の根や茎といった複数閉境界から剥離する渦の相互干渉を計算し，接近流れの減衰過程を再現することや，根や茎に働く抗力を算定することでヨシ原やマングローブ林全体としての抵抗係数の変化が定量的に評価できることを示した．このように，本章では，離散渦法を実際の「沿岸域流れ」に適用する上で必要な基礎固めがなされ，次章以降にこれが活用されている．

第4章では，本研究の主たる目的である実際の「沿岸域の流れ」にこの離散渦法を適用することを目指した研究の成果について説明しており，前章で検討した計算手法の拡張を図っている．本章では，沿岸域の流れを離散渦法により計算する際の基本的な考え方や解析手法を提示し，これについて論じている．沿岸域における流れを工学的に評価する場合には，乱流研究において注目される渦よりも遙かにスケールの大きな渦運動が再現される必要があり，同時に計算領域も実験室スケールのものと比べて格段に大きくなる．このことは，実際の沿岸域の流れを前章と同様の解像度を維持しつつ再現しようとするとき，計算技術的には可能であっても工学的には現実的とは言えないほどの計算時間を要することを意味する．そこで，対象とする流れ場の規模に応じて注目する渦のスケール，言い換えれば拡散係数を評価し，第3章で提示された小規模な流れに対するパラメータの算定式を修正することで，実際の沿岸域流れの解析に用いるパラメータの算定式を新たに提示している．

この算定式を用いた離散渦法による沿岸域流れの具体的な解析例としては，次のものを取り扱っている．まず，最初に，強い潮流の中に孤立する島（Rattary島）周辺の流れの解析について説明している．この中で，実際の沿岸域流れの場合には，局所的な水深の違いに伴う底面摩擦の影響が無視できなくなることを示し，この効果を解析モデルに反映する方法を提示している．また，ヘッドランド周辺の流れ場を対象とした観測を行い，ヘッドランドから放出される離散渦が相互に干渉することで，ヘッドランド周辺ではパッチ状の水塊構造が維持されることを説明した．さらに，このような海岸線を含む線境界周辺での渦構造が，本手法によって再現ならびに予測可能であることも示している．なお，著者は，自ら積極的に現地観測を実施し，データの収集に関与することで，数値計算手法の開発における観測結果の重要性を示すとともに，数値計算と現地観測を組み合わせることで，沿岸域における現象の一層の解明が期待できることを実証している．

第5章では，たとえば東京湾口周辺における流れのようなさらに規模の大きな流れに，この離散渦法を適用していくことを目指し，そのために必要となる

検討を行っている。すなわち、ここでは内部流れへの離散渦法の適用について検討し、流れの三次元性の影響とこれに関わる適用限界について論じている。

具体的には、「グチ式造流堤」による造流効果について、様々なスケールの実験を行い、その結果との比較を通じて本計算法を含む種々の計算法による再現計算の精度検証を行っている。これは、グチ式造流堤の場合には、その開口率が小さくなると、開口部付近での流速が大きくなり三次元性が強まるため、ここでの検討に最適な解析例であることを考慮してのことである。結果として、従来の厳密な三次元計算手法や擬似三次元計算法と比べて、離散渦法はきわめて簡便でありながら、その解析精度は上記二つの手法の中間に位置することが確認され、同時にその適用限界も示された。また、メソスケールの渦流動への適用性を検討する事例として、数百m規模の島(ここでは Palm 諸島)の間にある海峡部の流れや、数km規模の東京湾湾口部における流れが示された。ここでも、現地スケールでの渦を捉えるために、種々の手法を利用した現地観測を行うなど、現象の把握・解明を進めるとともに、この流れに離散渦法を適用する試みが示されている。結果として、観測によって確認された空間的な渦構造が数値計算によっても再現されることが示された。また、有限要素法などの空間的に高い分解能をもつとされる計算手法と比べて、離散渦法は、比較的計算負荷をかけずに、海峡部周辺の噴流構造の時間的変化や、滞留域の空間規模などを良好に再現可能であることが示された。以上のように、本研究で検討してきた解析手法を用いることで、沿岸域における流れのパターンや水塊構造の形成過程、海水交換機構などが簡便かつ比較的精度よく予測されることが確認された。

最後に第6章では、本研究において得られた成果や知見を総括し、結論を述べている。

以上のように、本研究では、「離散渦法」に含まれるモデルパラメータの設定方法を提示し、この方法を用いることで、新たな観測値や実験値によってパラメータの調整をすることなく「実際の沿岸域流れ」の解析が可能となることを示している。このように、離散渦法を工学的に有用な手法として発展させている点は本研究において最も評価されるべきところであり、本論文は今後の水工水理学の発展に寄与するところ大である。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認められる。

2004年4月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	関根 正人
	副査	早稲田大学教授	工学博士(東京大学)	鮎川 登
		早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	太田 有