

学位論文題名

砕波ジェットの局所水面遷移とその予測

学位論文内容の要旨

砕波のジェットが着水すると同時に様々なサイズの飛沫が大量に空気中に放出される。飛沫中の海塩は陸域へと飛散して沿岸構造物の腐食や、沿岸環境の悪化等の塩害の発生原因となる。また、飛沫の大気への放出に伴う、海洋性エアロゾルの生成は沿岸域の熱・湿度環境に影響を与え、局所気象を変化させる。

ジェットから飛沫への遷移に関して、複数の異なる物理機構が存在する。ジェットの水面への接触後の極短時間では、マイクロメートルオーダーの微細飛沫が高速度で噴出し、また、せん断流中のジェットはその伸張過程において、エッジがフィンガー状に変形、発達し、表面張力不安定を經由した分裂と放出が継続的に繰り返される。この飛沫のサイズや発生量は、生成源であるフィンガージェットのサイズや長さ依存して決定される。一方沿岸砕波の場合、複雑な水面形の下、非常に強い乱れが存在する複雑な問題となる為、飛沫への遷移を含む自由水面の局所変形機構は殆ど明らかにされておらず、飛沫飛散量を予測する為に必要な飛沫発生量やサイズ分布を与えることはできない。

本研究は砕波ジェットの着水に伴うフィンガージェットの生成機構とそのスケールを決定するパラメータを明らかにすると共に、ジェットのフィンガーへの分裂確率モデルを構築するものである。これは以下に示す手順により、可視化実験結果と、新たに提案する三次元水面流れの計算手法を用いた数値計算結果とを総合的に評価する事により行われる。

- (1) ジェット着水により跳ね上がるフィンガー状の二次ジェット及び飛沫の可視化実験
 - (2) 水面-渦相互作用を評価可能な数値計算法の開発
 - (3) ジェット着水流れの三次元数値解析による、ジェットの分裂機構と渦、フィンガー、飛沫サイズを決定するパラメータの解明
 - (4) ジェットの分裂確率を予測する為の分裂分散モデルの構築
 - (5) 砕波帯におけるフィンガー及び飛沫分布の予測
- (1) フィンガージェットと飛沫の可視化実験

砕波ジェットモデルとして導入した平面ジェットを着水させたときに跳ね上がる二次ジェットの可視化実験により、ジェットの着水に伴う飛沫は次の異なる生成機構に支配される事を発見した。(A) ジェットが着水する瞬間、ジェット-静水面間のコンタクトラインから微細な飛沫群が高速で噴出する。(B) 微細飛沫群に続き発生する(A)よりも大規模な平面二次ジェットの先端がフィンガー状に分裂し、長く伸張したフィンガーの先端が表面張力不安定を經由して分断される事により、軸方向に並んだフィンガーと同スケールの飛沫が放出される。本実験によりフィンガー及び飛沫の代表長さを決定する固有の確率密度分布を発見した。

- (2) 水面-渦相互作用を評価可能な数値計算法の開発

フィンガーの様な著しい局所水面変形は水面下の渦との相互作用により支配されるが、これを数値的に評価できるモデルは存在しない。本研究ではこの水面-渦相互作用を適切に評価する為の三次元自由水面流れ数値計算法を新たに開発した。この計算法は湾曲水面に発生する渦度の解析解を高精度で満足させると共に、液滴着水後の水面変形と三次元的な渦の発達に関する実験結果との比較により、新たに提案した計算法の妥当性を証明した。

(3) ジェット分裂機構と渦、フィンガー、飛沫サイズの決定パラメータ

(2) で開発した数値計算法を乱流モデルに導入し、モデルジェットの着水に伴う二次ジェットの挙動とフィンガー及び飛沫の生成を再現した。モデルジェットと静水面との間に生じる強いせん断力場の中で三次元交互交代縦渦列が発生し、二次ジェットの内部から背後にかけてスパン方向に規則的に配列する。この交互交代渦列が直上の水面を変形させ、ジェットを渦の軸に沿った方向に分断する事によりフィンガーが形成される物理機構を発見した。三次元渦列の配列間隔はジェット-静水面間のせん断力により決定される為、モデルジェットの水平着水速度により定義された水平 Froude 数 (Fr_h) により特徴化できることを明らかにした。即ち、渦列との相互作用を経て形成されるフィンガーのサイズもまた Fr_h に依存し、更に、流体の表面張力と共に局所水面遷移過程を支配する事が明らかとなった。

(4) ジェットの分裂確率を予測する為の分裂分散モデルの構築

先端に行く程高速となるジェット内の流速勾配により、進行方向に伸張されフィンガー状に分裂する平面ジェット内で、流体が存在する確率の空間分布を表すモデルを導出した。確率密度分布を決定する係数は、(3) のフィンガージェットの流体存在確率分布に対しモデル方程式をフィッティングさせた結果を元に、 Fr_h と Weber 数 (We) をパラメータとしてモデル化した。これにより任意の Fr_h , We をもつジェットがフィンガーへと分裂する範囲と分裂速度を予測し、検証した。

(5) 砕波帯におけるフィンガー及び飛沫分布の予測

巻き波砕波ジェットの着水に伴う急速な三次元渦度場の発達とフィンガージェットと飛沫の形成を (2) の数値計算法を用いて再現した。造波境界で初期擾乱を与えることにより試行数値実験を行い、フィンガーと飛沫のサイズ分布の遷移やジェット流体の存在確率分布等について統計的に評価した。砕波におけるフィンガージェットと飛沫のサイズ分布遷移を明らかにすると共に、分裂過程における流体存在確率分布を (4) で構築したモデルをベースに開発し、その適用性を明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 准教授 渡 部 靖 憲
副 査 教 授 泉 典 洋
副 査 教 授 清 水 康 行
副 査 教 授 山 下 俊 彦

学 位 論 文 題 名

砕波ジェットの局所水面遷移とその予測

沿岸域の波浪の砕波に伴い流体内に複雑な乱流場が形成されると共に空気中には大量の飛沫が放出される。飛沫の陸域への飛散は構造物の劣化、臨海施設の利用阻害や交通障害、更に物理的、人的被害の原因となる。また砕波に伴う大量の微細飛沫はエアロゾルとして沿岸域の局所的熱・湿度環境に影響を与える為、気象・気候予測の観点からも重要な因子であると考えられている。

ジェット着水に起因する飛沫の生成には複数の物理機構が存在する事が明らかにされている。ジェットの水面への接触後の極短時間では、 μm オーダーの微細飛沫が高速で噴出し、また、せん断流中のジェットはその伸張過程において、エッジがフィンガー状に変形、発達し、表面張力不安定を経由した飛沫の生成が継続的に繰り返される。この飛沫のサイズや発生量は、生成源であるフィンガーのサイズや長さに依存して決定される。一方、沿岸砕波の場合、波浪スケールの大規模渦から小スケールの乱れに至る広域レンジの流れが波面に作用し、 $\mu\text{m}\sim\text{cm}$ スケールの多量の飛沫を生成する極めて複雑な現象であり、その生成、発達機構は未解明であり、飛沫飛散量を予測する方法は存在しない。

本研究は砕波ジェットの着水に伴うフィンガーの生成機構と、そのスケールを決定するパラメータを明らかにすると共に、飛沫の生成基本物理量を与える為に必要なジェットからフィンガーへの分裂統計モデルを構築するものである。これは以下の可視化実験的研究と、新たに提案する三次元水面流れ計算法を用いた計算的研究とを総合的に評価する事により行われた。

- (1) ジェット着水により跳ね上がるフィンガージェット及び飛沫の可視化実験
- (2) 水面-渦相互作用を再現可能な三次元数値計算法の開発
- (3) ジェットの分裂機構と渦、フィンガー、飛沫サイズを決定するパラメータの解明
- (4) ジェットの分裂分散を予測する統計モデルの構築
- (5) 砕波帯におけるフィンガー及び飛沫分布の予測

モデルジェットの着水により跳ね上がる二次ジェットの可視化実験から、ジェット着水に伴う飛沫が二つの異なる生成機構に支配される事が発見された。即ち、ジェットが着水する瞬間、ジェット-静水面間を高速で移動するコンタクトラインから微細飛沫群が噴出する初期生成機構と、その後発生する大規模なフィンガージェットの先端から、表面張力不安定を経由してフィンガーと同スケールの飛沫が生成される機構である。これらの物理機構を経由して、フィンガー、飛沫のサイズ分布を

決定する固有の確率密度分布が存在する事が明らかにされた。

ジェット着水過程を支配する水面-渦相互作用を適切に評価する為の三次元自由水面流れ数値計算手法を新たに開発した。この計算法は湾曲水面に発生する渦度の解析解を高精度で満足させると共に、液滴着水後の局所水面変形と三次元的な渦の発達に関する実験結果を適切に再現する、信頼性の高いスキームである。この新たに開発した数値計算法により、モデルジェット着水に伴うフィンガーの発達と飛沫の生成を再現した。モデルジェットと静水面との間に生じる強いせん断力場の中で交互交代縦渦列が発生し、二次ジェットの内部から背後にかけて主流方向に直交して規則的に配列する。ジェット内の交互交代縦渦が水面を流体中に巻き込み、ジェットを渦の軸に沿って分断するフィンガーの形成機構が発見された。縦渦の配列間隔はジェット-静水面間の水平せん断力により決定され、モデルジェットの水平着水速度により定義された水平 Froude 数に従う。即ち、縦渦との相互作用を経て形成されるフィンガーのサイズもまた水平 Froude 数に支配される事が明らかにされた。

フィンガージェット内の流体存在確率を表す統計モデルを導出した。この確率密度分布は、水平 Froude 数と Weber 数をパラメータとして決定できる。本モデルにより、水理、数値実験における任意の速度と表面張力をもつジェットからフィンガーへの分裂分散過程を予測可能である事を検証し、その妥当性が明らかにされた。

巻き波砕波のジェット着水に伴う急速な交互交代縦渦度場の発達とフィンガージェットと飛沫の形成を数値的に再現した。造波境界で擾乱を与える事により試行数値実験を行い、フィンガーと飛沫のサイズ分布遷移やジェット流体の体積率分布等について統計的に評価した。砕波におけるフィンガーと飛沫のサイズ分布遷移を明らかにすると共に、提案する分裂分散統計モデルが砕波ジェットの分裂過程における流体体積率分布を適切に予測可能である事が明らかにされた。

これを要するに、著者は沿岸砕波に伴う組織渦と自由水面の相互作用を経由した砕波ジェットのフィンガー化とそれに続く飛沫への遷移に至る局所水面変形を決定する物理機構を解明すると共に、飛沫とその発生源となるフィンガーのサイズ分布、飛沫生成量を決定するフィンガージェット流体体積率分布に対する統計モデルを新たに開発したものであり、流体力学、海岸工学、港湾工学に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。