

(論文内容の要旨)

本論文は、複断面開水路流れの低水路・高水敷境界付近や主流・死水域境界付近傍などで生じる、非定常大規模渦を伴う乱流場を再現可能な非定常 RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes)モデルに関して、まず二、三の基本的流れ場の乱流特性量や大規模渦の再現性を検討することでモデルの基本特性を明らかにするとともに、土木工学分野で対象としている実際的な流れ場に対してモデルの適用を行い、モデルの有効性を検証したものであり、8章からなっている。

第1章は序論であり、研究の動機と目的を記述している。

第2章では、本研究で基本モデルとして用いる非線形渦粘性乱流モデルの基礎方程式系を記述するとともに、乱れ強さの非負条件など実現条件の基本的な検証を行っている。

第3章では、基本モデルを旋回流を伴う軸対称噴流に適用した。流速と乱流特性量の分布形の相似性を仮定し、旋回流を考慮した流れ場のモデルを基礎式系に代入することで、平均流速場と乱流特性量の分布形に関する解析解を導いた。従来の実験結果と比較することで基本モデル中の定数の同定を行なうとともに、導かれた理論式を用いて無次元旋回パラメータが乱流特性量の分布形や噴流の拡がり及び影響などについて考察した。

第4章では、コヒーレントな大規模渦を伴う基本的な流れ場としてスクエア渦列を取り上げ、基本モデルの基礎式系を用いて渦列内の乱流特性量の空間分布に関する解析解を導いた。平均流速場には渦心点と鞍形点の二つの特異点が存在するので、乱流特性量の特異点周辺の空間構造について、導かれた解析解を用いて理論的に考察した。その結果、渦心点周辺については、乱れ強さの空間構造がモデル定数の値によって渦心点型から鞍形点型に、せん断応力は鞍形点型から渦心点型に定性的に変化することが分かった。大規模渦中の渦中心近傍における乱れ強さの空間構造は渦心点型と考えられることから、渦心点型の空間構造を再現するモデル定数の組み合わせを使用することが、大規模渦を再現するために用いられる非定常 RANS モデルの必要条件の一つであることを指摘した。

第5章では、基本モデルを複断面開水路流れに適用し、低水路・高水敷境界付近において非定常大規模渦が発生している状況での流れの特性を検討した。まず、従来の水理実験の条件下で数値計算を行い、低水路・高水敷境界付近での大規模水平渦と乱流構造の非等方性に起因する第二種二次流の再現性、及び両者の相互作用について確認した。また、水平渦と第二種二次流の両方を発生させた計算結果、標準型モデルを用いることで第二種二次流を発生させず水平渦のみを発生させた結果、及び両者ともに発生させない結果を用いて流れの抵抗則を比較したところ、水平渦と二次流をともに発生させない結果と比較して、水平渦は抵抗係数を20%程度増加させ、二次流はさらに抵抗係数を5%程度増加させる効果があることを示した。さらに、本計算結果を用いて、スクエア渦列内の乱流特性量の空間構造との関連を考察し、用いるモデル定数により、大規模渦中心の乱れ強さの空間分布が渦心点型から鞍形点型に変化することも検証した。

第6章では、大規模渦を伴う基本的な流れとして、軸方向流れが存在する場合と存在しない場合のランキン渦について第5章と同様の考察を行なった。与えた初期流速場からの乱流特性量の時間発展について、上述の非定常 RANS モデル、従来の DNS データ、本研究で行なった LES による数値計算結果と比較することにより本モデルの適用性を検討した。その結果、ランキン渦の時間発展の終期段階では乱流特性量の時間変化に関して適合性が悪い場合もあるが、本モデルを用いることにより、ランキン渦型流れ場と乱流特性量の空間構造、及び時間変化過程を概ね良好に再現可能であることを示した。

第7章では、開水路流れの側岸に死水域が存在する場合の非定常流と取り上げ、同様の検討を行った。開水路主流と死水域の境界面近傍で生じる、せん断不安定に起因する非定常大規模渦の再現性について、基本モデルによる数値解析結果と従来の実験結果を比較することで検証した。境界面上流端からせん断不安定渦が発生し、流下とともに増幅する様子が RANS モデルでも再現可能であることを確認している。また定量的にも、境界面近傍の流速変動の振幅や死水域内の静振による水面振動などの計算結果が実験結果と概ね適合することを示し、モデルの有効性を検証している。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、複断面開水路流れの低水路・高水敷境界付近や主流・死水域境界面近傍などで生じる非定常大規模渦を伴う乱流場を再現可能な非定常RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) モデルに関して、まず二、三の基本的流れ場の乱流特性量や大規模渦の再現性を検討することでモデルの基本特性を明らかにした。さらに、水工学分野で対象としている実際的な流れ場に対してモデルの適用を行い、モデルの有効性を検証したものである。得られた成果を要約すると以下ようになる。

1. 乱流モデルとして、乱れ強さの非負条件など実現条件を考慮した非線形RANSモデルを基本モデルとして考え、まず旋回流を伴う軸対称噴流に適用した。流れと乱流特性量の分布形の相似性を仮定し、旋回流を考慮した流れ場のモデルを基礎式系に代入することで、平均流速場と乱流特性量の分布形に関する解析解を導いた。従来の実験結果と比較することでモデル定数の同定を行なうとともに、導かれた理論式を用いて無次元旋回パラメータが乱流特性量の分布形に及ぼす影響などについて考察した。

2. 次に、コヒーレントな大規模渦を伴う基本的な流れ場としてスチュアート渦列を考え、非線形渦粘性モデルの基礎式系を用いて渦列内の乱流特性量の解析解を導いた。平均流速場には渦心点と鞍形点の二つの特異点が存在するので、乱流特性量の特異点周辺の空間構造について理論的に考察し、渦心点周辺については乱れ強さの空間構造がモデル定数の値によって渦心点型から鞍形点型に定性的に変化することを示した。大規模渦中の渦中心近傍における乱れ強さの空間構造は渦心点型と考えられることから、渦心点型の空間構造を再現するモデル定数を使用することが、大規模渦を再現するために用いられる非定常RANSモデルの必要条件の一つであることを指摘した。

3. 基本モデルを複断面開水路流れに適用し、非定常大規模渦発生下での流れの特性を検討した。まず、従来の水理実験の条件下で数値計算を行い、低水路・高水敷境界付近での大規模水平渦と乱流構造の非等方性に起因する第二種二次流の再現性、及び両者の相互作用について確認した。また、水平渦と第二種二次流の両方を発生させた計算結果、標準型モデルを用いることで第二種二次流を発生させず水平渦のみを発生させた結果、及び両者ともに発生させない結果を用いて流れの抵抗則を比較したところ、水平渦と二次流ともに発生させない結果と比較して、水平渦は抵抗係数を20%程度増加させ、二次流はさらに抵抗係数を5%程度増加させる効果があることを示した。さらに、本計算結果を用いて、スチュアート渦列内の乱流特性量の空間構造との関連を考察し、用いるモデル定数により大規模渦中心の乱れ強さの空間分布が渦心点型から鞍形点型に変化することも検証した。

4. 続いて、大規模渦を伴う基本的な流れとして、軸方向流れが存在する場合と存在しない場合のランキン渦について同様の考察を行なった。与えた初期流速場からの乱流特性量の時間発展について、上述の非定常RANSモデル、従来のDNSデータ、本研究で行なったLESによる数値計算結果と比較することにより本モデルの適用性を検討した。その結果、ランキン渦の時間発展の終期段階では適合性が悪い場合もあるが、本モデルを用いることにより、ランキン渦型流れ場と乱流特性量の空間分布、及び時間変化過程を概ね再現可能であることを示した。

要するに本論文は、非定常大規模渦を伴う乱流場を再現可能な非定常 RANS モデルの基本特性を明らかにするとともに、水工学分野で対象とする流れ場に対するモデルの有効性を検証したもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。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る。また、平成20年7月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。