

# 学位論文の要旨

|   |           |            |   |
|---|-----------|------------|---|
| 専攻名   | システム工学 専攻 | ふりがな<br>氏名 | なかやま かつゆき<br>中山 雄行 <span style="float: right;">㊟</span> |
| 学位論文題目  |           |            |   |
| <p>水平軸風車のスパイラル渦における複数平行平面の 2 次元速度データによる 3 次元渦構造の同定に関する解析技術の研究<br/>         (英訳又は和訳 Study of numerical analysis for identification of three-dimensional vortical structure of a spiral vortex in horizontal axis wind turbines with two-dimensional velocity fields in plural parallel planes)</p>   |           |            |   |
| <p>本研究は、風力発電における水平軸風車が発生するスパイラル渦について、複数の 2 次元の速度場のデータより本スパイラル渦の位置を同定し、その 3 次元の渦の速度構造とそのトポロジーに関わる渦の物理特性を解析する技術の構築に関するものである。渦が描くスパイラル軌道上の複数の位置（アジマス角）において 2 次元速度場を実験にて測定し、各測定面間に関する速度勾配テンソルの線型変換の関係をを用いて 3 次元の速度勾配テンソル場を求め、ガリレイ不変の渦位置を同定し、渦の 3 次元構造を特定する。</p> <p>この渦構造では、渦の旋回強さ、旋回平面、渦軸の旋回平面に対する角度、半径方向速度（吸込み／湧出し流れ、またはその混在した流れ）等のトポロジカル（幾何的）な特性を特定する。また、渦度ベクトルにおいて、旋回に垂直な成分は旋回強さ並びに渦の伸長による渦の強化に関わるが、旋回平面に平行な成分は渦軸を傾ける作用を与える。本解析では、旋回平面を同定することにより、これらの成分の分類も行う。また、渦の物理特性では、旋回する渦流れのトポロジーから得られる自己安定性に関するものとして、圧力極小並びに渦の伸長が挙げられる。本解析では、これらの物理特性も併せて評価できるものとした。</p> <p>本解析技術では、測定する各位置・アジマス角において、スパイラル渦は同じ速度構造を有している、という仮定のみを用いて解析法の定式化を行った。一方、この解析の固有の性質として、基準平面の法線方向の空間微分に関する速度勾配テンソル成分の微係数が一定である、という条件が付帯されることを示した。実在渦のモデルとして挙げられる Vatisas, Batchelor, Burgers の渦は、この条件を満たしている。しかし、対象とする渦が複雑な渦構造である場合も考慮し、速度勾配テンソル成分の本法線方向の微係数が変化する場合であっても渦構造の評価を可能とする定式化を併せて行った。ここでは本方向の空間微分を離散化して定式化を行ったが、この手法を用いると、任意の次数で定式化が可能である。</p> <p>3 次元の速度勾配テンソル、また渦構造を評価するとき、用いる 2 次元速度場の測定データはアンサンブル平均を施すが、各瞬間の速度場では渦位置や渦の状態も変わる。ここでは、2 次元の渦解析を行い、ガリレイ不変の渦位置と渦の状態を評価した上で渦位置を揃えてアンサンブル平均を算出することにより、より明確な渦の特性を解析できる統計処理を検討した。</p> <p>本研究における実験のスパイラル渦の解析では、渦流れの対称性の高い明確な圧力極小を有する渦であることが解った。一方で、半径方向速度は小さく、渦流れの高対称性や圧力極小を有していても渦の伸長による渦の強化は期待できないことが示された。後流に移動するにつれて、スパイラ</p> |           |            |   |

|            |                      |
|------------|----------------------|
| ふりがな<br>氏名 | なかやま かつゆき<br>中山 雄行 ㊟ |
|------------|----------------------|

ル渦は同じ速度構造を保ちつつも渦が弱くなり、渦や渦度が拡散している様相が確認されたが、これはこの渦の速度構造が有する性質によるものである。また、Vatistasの渦の一つのモデルとは異なる渦構造であることが併せて示された。

渦や乱流に関わる実工学や実設計では、渦・乱流の非線形性により、根本的な現象の解明や対策が難しく、理論的厳密さを幾分犠牲にした帰納的な手法で適用可能な設計条件を定める技術的手法には限界がある。それに加え、実験と数値解析は各々長所短所があり、いずれか一つの方法で現象を解析するのは困難である。実験と数値解析を融合する技術により実在の渦の構造を捉えることができると、スパイラル渦の安定性等に関する物理数学的なアプローチにつながり、健全な風車の流動技術や評価技術の確立に貢献できる。更に、本解析は、様々な条件により3次元の速度場の測定が困難であっても、2次元かつ平行な平面上の測定により3次元構造の解明が可能である。

実フィールドの風車では、立地条件や気温の変化等で流況が変化する。また、高出力のための風車の大型化や稼働時の高レイノルズ数化による流況の変化、更に翼端渦・スパイラル渦の抑制のための翼の改良等、今後の風車の開発においても渦構造の特性は変わり、詳細な渦構造・特性の解析が設計検証のために要求される。一方、ウインドファームにおける風車間の設置間隔は、発電の効率において重要な設計要素である。渦の速度構造が本解析技術により明確になると、より現実に近いスパイラル渦の安定性解析が可能となり、渦の安定性だけでなく、スパイラル軌道自身の安定性や特性の解明にもつながり、風車の設置基準に貢献できる。更に、後流移動における渦構造と特性の遷移が明確になると、渦の減衰の時間・空間スケールを検討することができる。渦の減衰モデルを構築できれば、設置基準における設計条件のための有効なデータを提供することができる。本解析技術は、様々な設置条件や開発において、渦の構造と特性を詳細に評価することができる。これにより、風力発電の健全性、信頼性を高めるための流動技術に資するものと考えられる。

本論文の構成について、第1章では、渦の定義とトポロジーに関するこれまでの研究、また翼端渦から構成されるスパイラル渦の構造解明の必要性について記述した。本研究では、3次元の速度勾配テンソルを基にして渦の構造を解析する。渦の定義は現在も未確立であるが、速度勾配テンソルが示す局所流れの幾何・トポロジーがガリレイ不変の流れの様相を示し、圧力極小の特性にも関わっている。一方、最近はこれまでの分類には不明瞭な点があることが示され、詳細なトポロジーを特定する物理量が提示され、また旋回平面上の圧力極小を評価する渦定義も提案されている。これらを本解析に取り入れる。また、これらを用いて詳細な渦のトポロジーの特性が明確になると、スパイラル渦の安定性解析に関わる流体物理・数学分野に実在渦の速度構造を提供でき、より厳密なスパイラル渦の減衰特性の評価が可能になる。即ち、渦構造における安定性の評価だけでなく、スパイラル軌道に関する渦の安定性の評価にも繋げることができ、厳密な渦の特性の評価が可能になる。

第2章では、渦の定義とトポロジー不変量について、第1章で記述した物理量等を説明する。詳細な渦流れのトポロジーを定める不変量・物理量、渦のトポロジーに関する $\Delta$ -定義と圧力極小に着

|            |         |
|------------|---------|
| ふりがな<br>氏名 | 中山 雄行 ㊟ |
|------------|---------|

目した  $Q$ -、 $\lambda_2$ -定義、そしてこれらを統合した旋回平面の旋回による圧力極小を定めた定義について説明する。また、本解析に用いる旋回強さや半径方向速度の同一方向性と強さを定める物理量 *swirlity*, *sourcity* について示す。

第3章では、スパイラル渦のトポロジーと渦特性の解析内容について記述する。第2章で説明したトポロジー不変量と渦定義を用いてスパイラル渦の同定に用いる渦定義、並びにトポロジーの解析にて評価する物理量を定める。また、圧力極小の他渦の伸長(*vortex stretching*)による旋回の強化等の渦特有の性質は、渦流れのトポロジーに関わる。これらの評価式も併せて定める。

第4章は、本研究のコアの理論・技術である2次元速度勾配テンソルから3次元の同テンソルを同定する解析理論である。複数のアジマス角で速度場を計測するスパイラル渦は同じ速度構造を有している、という条件のみから2次元の速度場測定より3次元の速度勾配テンソルの導出につなげ、3次元のスパイラル渦の速度構造を同定する解析理論について記述し、線型変換、また数値計算の手法を用いて任意の次数で解析する理論をまとめる。

第5章では、本研究にて実施した実験における複数の平行平面の速度場の測定について記述する。本実験は、測定の信頼性が高い2次元の PIV (*Particle Image Velocimetry* : 粒子画像流速計測法) を用いて速度場を測定する。測定する面は水平面とし、アジマス面 (アジマス角に平行な面) が水平面となるアジマス角 (翼・ブレードの周方向角度) を  $0^\circ$  とし、幾つかのアジマス角の水平面にて測定を行うものとし、その要領について記述した。

第6章では、測定した2次元瞬間速度場のデータのアンサンブル平均に関する統計処理について記述する。実験では、渦の確認を行いながら測定を行うが、速度ベクトル場や流線により渦流れを確認できたとしても、一様な流れや後流があると、渦は異なる位置に存在する様に見えるか、或いは渦が存在する様には見えない。このため、2次元の速度場のデータを用いて2次元の渦解析を行い、この面における渦の有無やその強さを示す物理量(*swirlity*)を数値計算で求め、渦位置を調整した上でアンサンブル平均を求める。

第7章では、スパイラル渦の渦構造を解析するための手順とアルゴリズムについて記述する。第3、6章で示した渦解析と統計処理を含め、3次元の渦解析を含めた全体の解析の手順を示す。

第8章は解析結果である。各測定面における瞬間速度場の特徴等について分析し、各測定面のアンサンブル平均に基づいた3次元の渦構造について示す。渦構造では、トポロジー不変量と渦特性、即ち圧力極小と渦の伸長について、渦領域におけるこれらの等値面図を示す。3次元の渦構造では *swirlity* の極大領域が明確に示される。一方、半径方向流れの強さに関する不変量の等値面図では、半径方向の歪み (引張り、圧縮) が小さく、半径方向の速度は旋回流れ・周方向速度に比べて小さい。また、渦流れの対称性は渦中心において高い。また、明確な圧力極小の特性を示す一方で、渦の伸長は半径方向速度の特徴からとても小さく、渦の強化は期待できない。これらの渦特性を後流の幾つかの領域で評価し、確認した。

第9章は、詳細なスパイラル渦のトポジカルな特性について分析する。まず、本解析結果から

|            |         |
|------------|---------|
| ふりがな<br>氏名 | 中山 雄行 ㊞ |
|------------|---------|

得られた渦構造について、考えられる渦モデルとその速度分布について考察し、swirlity の極大特性、また渦流れの高対称性から、周方向速度の特徴を示す関数系について示した。即ち、スパイラル渦は Rankine 渦の様な渦中心における剛体回転的な速度構造は有さず、Burgers, Batchelor, Vatistas 渦の様な周方向速度の半径方向の変化が渦中心で極大となる渦構造を有していることが示された。また、半径方向速度の特性からは Vatistas 渦の一つのモデルの関数系とは異なる性質があることを示した。旋回平面の角度の特性から渦軸方向に関する速度構造について上記渦 (モデル) との相違を考察し、渦モデルの適合性の判断において注意すべき点についてまとめた。また、今後の本解析技術の展開について、渦が構成されるメカニズムの解析等を含めて記述した。

第 10 章は結言をまとめた。