

最新の数値風況シミュレーション技術リアムコンパクトが 実現するバーチャルwindファームー開発の歴史と将来展望一

九州大学応用力学研究所 風工学分野 内田 孝紀

1. リアムコンパクトの誕生

著者が、現在まで20年以上開発を続けているリアムコンパクト (RIAM-COMPACT, Research Institute for Appplied Mechanics, Kyushu University, COMputational Prediction of Airflow over Complex Terrain) と称する流体工学CFD (Computational Fluid Dynamics) モデルの誕生は、私が九大院の後期博士課程に進学した1996年頃に遡る。当時、私は修士課程で取り組んでいた安定成層時における山越え気流の2次元問題を3次元問題へ拡張するため、DNS (Direct Numerical Simulation) のFortranプログラムの改良を検討していた。私の恩師であり、指導教員の大屋裕二先生からの「風洞スケールの数メートルから、メソスケールの数十キロメートルの範囲のいわゆるマイクロスケールに的を絞り、かつ地形や建屋の影響を考慮可能なCFDプログラムが今後注目される。計算機性能が飛躍的に向上することは間違いない。計算負荷はまだ高いが非定常解析が可能なLES (Large-Eddy Simulation) によるアプローチを採用しよう」との開発方針を受け、私はLESのプログラム開発に着手した。当時は、図1に示すような単純な孤立地形を過ぎる強安定成層流を対象に、朝から深夜までプログラム開発に没頭した(今思うと非常に貴重な時間であった)。しかし、プログラムの修正・実行を何度繰り返しても計算は(見事に!)途中で発散し、寝ていても計算が発散する夢を見るほどであった。その後、計算初期に発生する強い速度シアが主な原因で計算が破綻していることが分かった。LESのSGSモデリングの定式化とプログラミングに多くの時間を費やしていたが、DNSとしての支配方程式群の離散化スキームの保存性等の見直しが必要となった。当時は毎年大みそかに徹夜してプログラム開発を行うことを私なりの決め事(楽しみ)としていたが、博士課程2年時の大みそかの夜は何か良い予感を感じていた。日付が変わる頃、恐る恐るプログラムをコンパイルして計算を実行すると、圧力のポアソン方程式の誤差の推移はそれまでとは全く異なっていた。必ず発散していた計算ステップ数を食い入るように眺めていたが、何事も無いように(いとも簡単に)計算は進んで行った。思わず大きな声を上げたのを覚えているが、まさにその瞬間がリアムコンパクト誕生の瞬間であった。その後、大屋先生にプログラムの完成報告をした際、「内田君、名前を

付けなさい。名前が独り歩きするから」とアドバイスをを受け、九大応力開発のCFD技術であることを表すための「リアム」を、また、先に述べたように計算対象エリアが「コンパクト」であることと、プログラム(ソフトウェア)として「コンパクト」に完成されていることの二つの意味を込めて、「リアムコンパクト」と名付けることとした。

余談ではあるが、現在、風力業界では大気安定度(浮力の効果)が一つの重要なキーワードとして認識されつつある。しかしながら、我々の研究室では、中立成層状態の流れ場に僅かに安定成層や不安定成層の効果が付加されると、流動現象にはdrasticな変化が生じることを、温度成層風洞や数値シミュレーションの結果を通じて、1990年代の後半には既に強く認識していた。

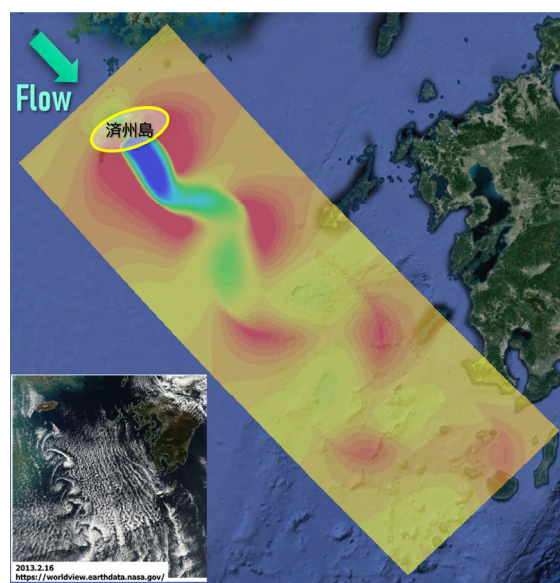


図1 済州島を過ぎる強安定成層流の計算例

2. リアムコンパクトによる研究開発と実用化

我々の研究室では、流体がいわゆるブラフボディを通過する際に発生する種々の「渦(乱流)」の非定常現象と、その可視化に注目しており、このことこそが当研究室の伝統として受け継がれている。私自身もリアムコンパクトを通じて上記の「渦(乱流)」の非定常現象とその可視化を常に心がけている。現在においても、リアムコンパクトのコア技術であるLESソルバーを中心に当研究室では最先端の研究開発が行われており、同時に様々な研究テーマに適用され、数多くの研究成果を挙げてい

る。まさに、リアムコンパクトは九大応力研、風工学分野で培われてきた純国産のCFD技術であると言える。一方、2003年11月からソフトウェアとしての普及が開始され、国立大学の法人化を受けて2006年10月には九大発ベンチャー企業の株式会社リアムコンパクトを設立した。現在では、株式会社リアムコンパクトを通じて、国内の風力業界の標準ソフトウェアの一つとして導入が進んでいる。ソフトウェアの導入に関して印象的なエピソードがあるので、ここで紹介したい。現在の株式会社ユーラスエナジーホールディングスを訪問した際のことである。当時の担当者(現在は株式会社Tsubasa Windfarm Design代表の李貫行氏、共同研究を継続中)から、複雑地形上のサイトで運転成績が最も良い風車と悪い風車を予測出来たらリアムコンパクトを導入したい、との申し出があった。それこそがリアムコンパクトが最も得意とすることであり、帰福後すぐに(自宅に戻らず)対象風向、地形標高データ、風車の位置情報などに基づいて計算を開始したことを覚えている。その一週間後、再び東京に行き、図2に示す結果を説明した。その結果、ユーラスエナジーホールディングスがリアムコンパクトソフトウェアを最初に導入した企業となった(現在では、後述するU-Kスケール1に基づいて、風車に対する良い風況/悪い風況の判定がさらに高精度で可能になった)。

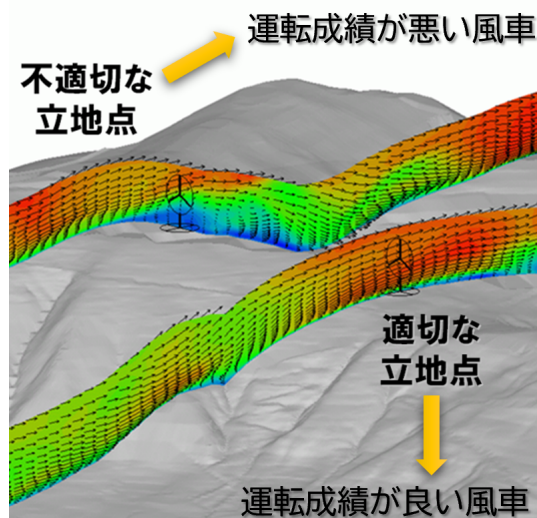


図2 数値風況診断例、現在U-Kスケール1で判定可能

私がリアムコンパクトの技術紹介をする際、20年以上使い続けているスライドを図3に示す。風力事業の成功は、陸上・洋上を問わず、限られたエリアに配置された風車群から風力エネルギーを最大限獲得し、同時に各風車を健全な状態で運転・保守管理し、各風車への風荷重リスクを最小化することである(個人的には、O&Mこそが最も重要であると考えている)。その意味で、図3で特に強調したいのは「風車の立地危険度調査」であり、

風車建設を避ける地点を正確に事前予測することの重要性(価値)を常に説明してきた。これに関して、古くからお付き合いがあり、当時は国内の某風車メーカーのエンジニアであった方から、「医療で言うと、リアムコンパクトは高度先進医療ですね」と表現して頂いたことがあるが、まさに私の想いを見事に表現したフレーズである。最近では、リアムコンパクトによる数値風況シミュレーションを積極的に「数値風況診断/数値乱流診断」と表現している。年間発電量(AEP)や設備利用率(CF)の評価に関しても、最近になって予測精度の著しい向上が確認されているが、それは別の機会に報告したい。



図3 我々が目指す「数値風況診断/数値乱流診断」

急峻な複雑地形を対象にした高度な「数値風況診断/数値乱流診断」の確立に向けた取り組みは、株式会社九電工、九州電力グループの西日本技術開発株式会社、株式会社日立製作所との共同研究を通じて大きな成果を得ることに成功した[1]。研究対象サイトは、2012年11月より運転を開始した図4に示す鹿児島県の串木野れいめい風力発電所である。ここには、日立製作所製の2MW風車(ハブ高60m、ブレード直径80m)が10基設置されている。本研究では東風が発生した際の10号機をターゲット風車にし、地形起因の大気乱流が風車ブレードに与える影響について詳細に調査・研究を行った。その結果の一例を図5に示す。現況の場合では、風車周辺に複雑な気流構造が出現している。

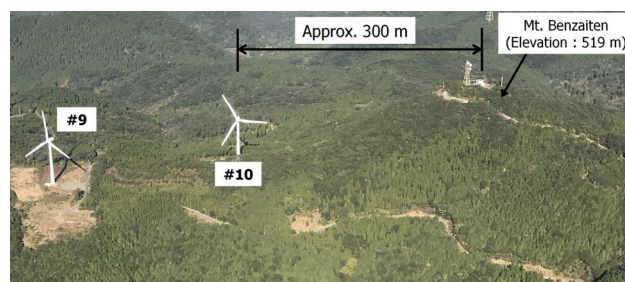


図4 弁財天山(標高519m)と10号機風車の位置関係

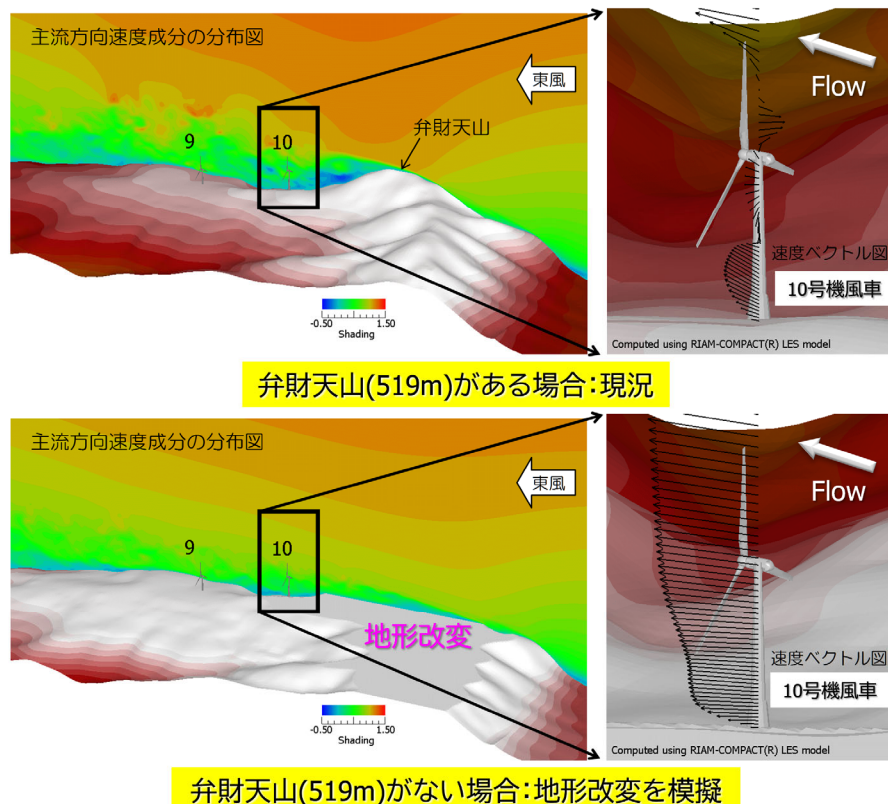


図5 リアムコンパクトにより再現された10号機風車周辺の極めて複雑な3次元気流構造

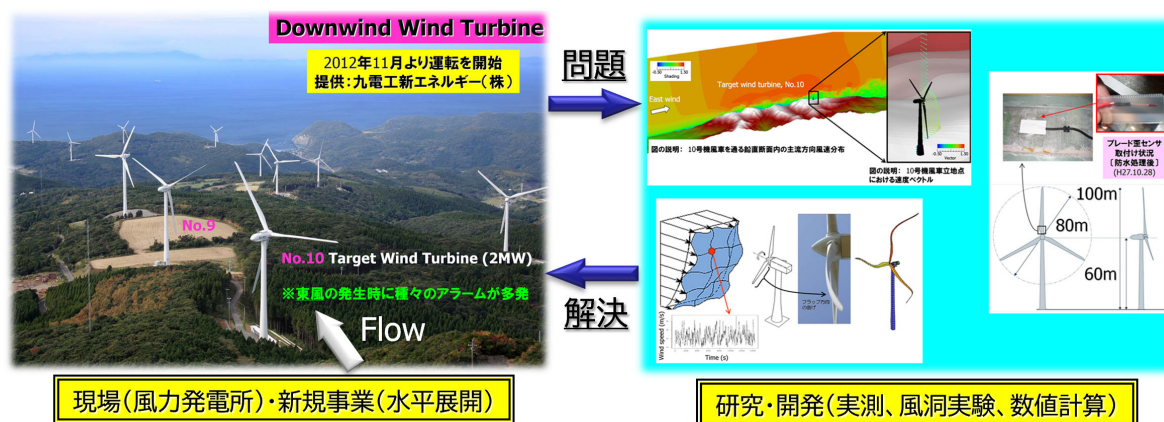


図6 産学連携による共同研究(実証研究)の重要性

本共同研究を通じて、西日本技術開発株式会社の川島泰史氏が当研究室に社会人博士課程として入学し、2018年9月に博士(工学)の学位を取得された。学位審査中、副査をお願いしていた麻生茂先生(現在、久留米工業大学)から頂いたコメントは、当時、すごく勇気づけられたのでここで紹介したい(図6を参照)。「現場から生じた問題点を研究テーマとして取り上げ、それを産学連携で技術協力して解決し、再び現場に返す。その結果、現場は以前より格段に状況が良くなる。この良い循環を繰り返すことが非常に重要であり、それこそが工学である」と。本共同研究の成果により、日本風力エネル

ギー学会から平成29年度論文賞を受賞した。さらに、地形性乱流が大型風車のブレードに与える2種類の新しい定量化指標を提案することにも成功した(特許申請済)。一つは、風況に関する定量化指標(乱流評価指標)で、Uchida-Kawashimaスケール1(U-Kスケール1)と定義した。もう一つは、荷重に関する定量化指標(疲労損傷評価指標)で、Uchida-Kawashimaスケール2(U-Kスケール2)と定義した。これらの「U-Kスケール」は、2019年7月にエネルギー国際誌「energies」に掲載され、学術用語となった[1]。U-Kスケール3の確立に向け、西日本技術開発株式会社とは共同研究を継続中である。

3. 洋上風力発電の実現に向けた現在の取り組み

菅義偉首相は2021年1月18日の施政方針演説において、「2050年の脱炭素社会の実現」を改めて掲げた。その切り札として期待されるのが、洋上風力発電である。洋上風力発電施設の導入拡大を促す「再エネ海域利用法」に基づいて複数の促進区域が指定され、事業化が検討されている。将来的には日本の主力電源になる可能性を秘めている。こうした社会的情勢を受けて、我々も洋上風力発電に関する研究開発を推進している。ここでは、我々の最新の研究開発状況を紹介する。

2013年3月12日、京都府太鼓山風力発電所で発生した風車のナセル落下事故を受けて、同年に響灘風力発電所を運営・管理する株式会社エヌエスウインドパワーひびき(松崎出 所長)からの依頼で響灘風力発電所を

対象とした数値風況診断を実施した。その結果を図7に示す。本シミュレーションを実行するに際し、建屋等の再現は株式会社環境GIS研究所(荒屋亮 社長)の協力を得た。風車SCADAデータ等の分析では、西日本技術開発株式会社の協力を得た。洋上風力発電導入の観点から図7に基づき強調したいことがある。それは、陸風に伴い建屋等から形成された複雑乱流場は海域にまで及んでいることである。沿岸域における事業計画では、陸風に起因して発生する乱流強度の正確な予測が困難であることから、風車の機種選定が進まない可能性がある。風車ウエイクに伴う乱流場が複合された場合は、さらに複雑な状況を呈する。図7から、リアムコンパクトによる陸風シミュレーションはこれらの問題を一挙に解決可能であることを示唆している。

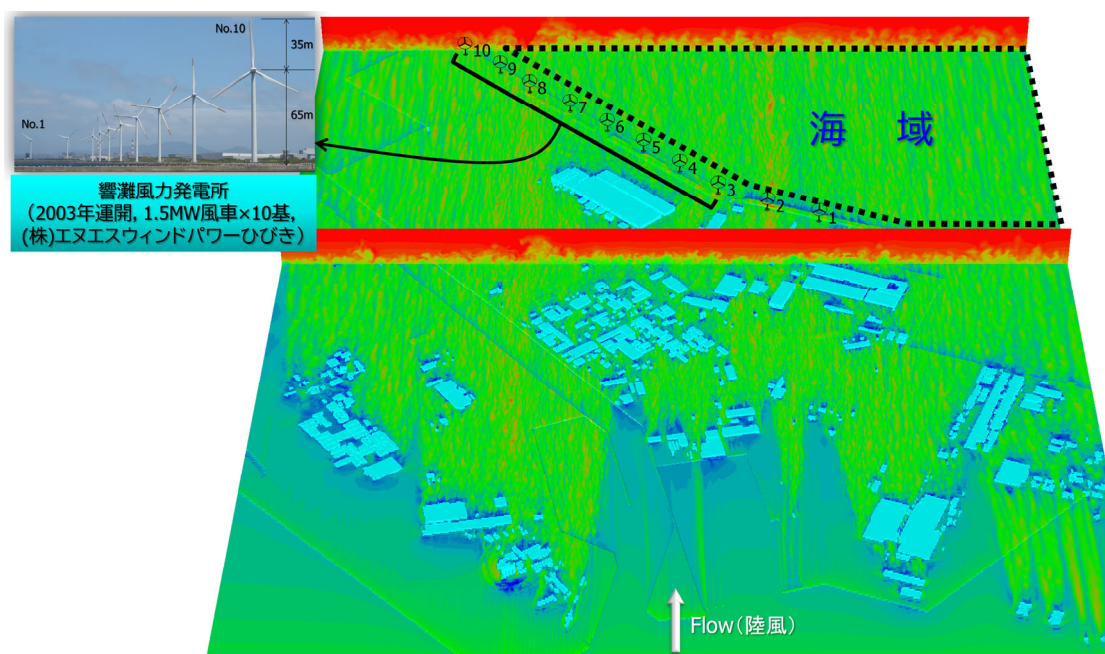


図7 リアムコンパクトにより再現された陸風の乱流場

現在、我々が最重要検討課題として位置付けているテーマが「風車ウエイク」に関連する諸問題である。図8に示すように、風車ブレードの回転に伴い、その下流では風速の欠損領域が形成される。その領域内では風速が時間的・空間的に著しく変動する。これらの流動現象が「風車ウエイク」と呼ばれる。特に、複数の風車群から構成される洋上の大規模ウィンドファームにおいては、上流側に位置する風車ウエイクに起因して、下流側に位置する風車の発電量低下や風車内外の故障などが生じる可能性がある。よって、実環境下において風車ウエイクの実態・挙動を深く知り、その影響範囲を定量化・明確化することが急務である。その結果、洋上風力の重要なキーワードである「低コスト化の実現」に直結する。

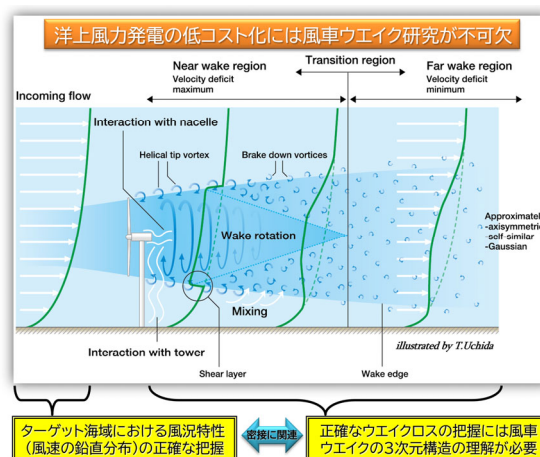


図8 風車ウエイク研究の重要性

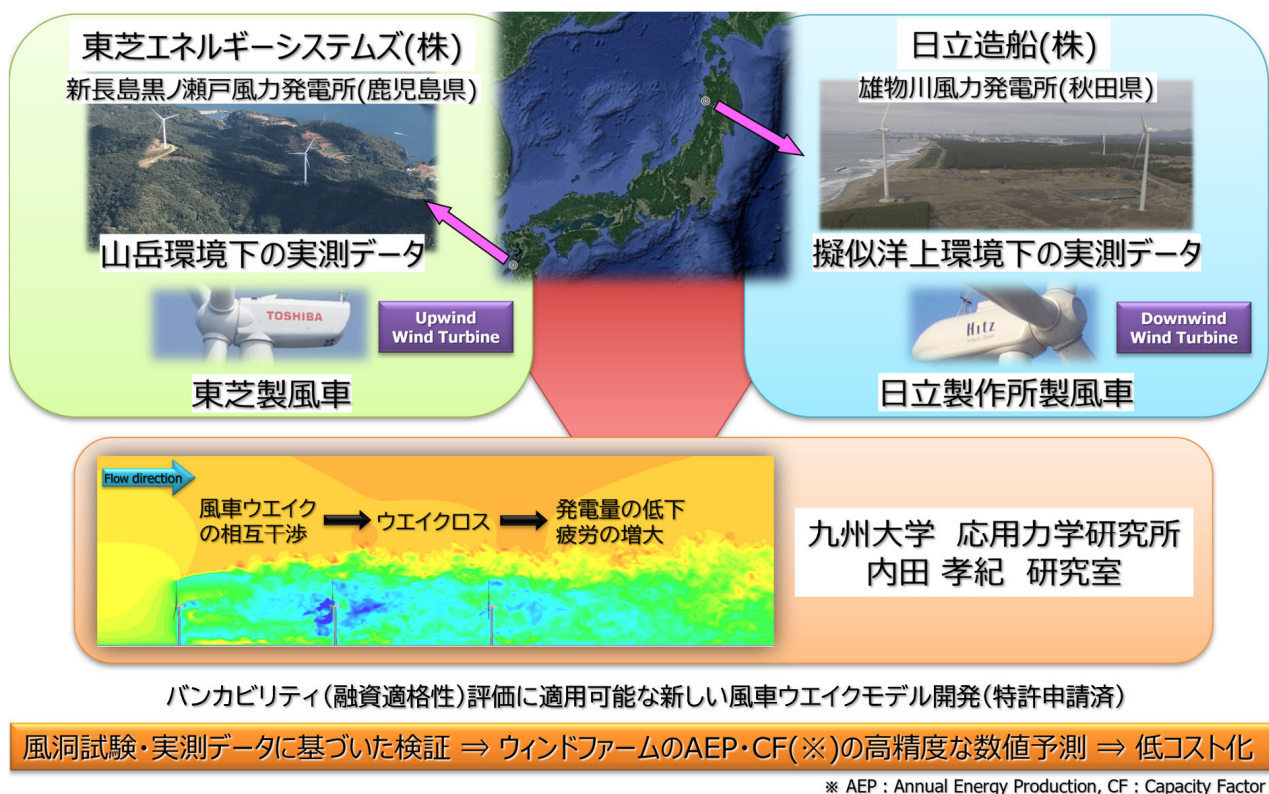


図9 東芝エネルギーシステムズ株式会社と日立造船株式会社で取り組んでいる共同研究(2018年4月～現在)

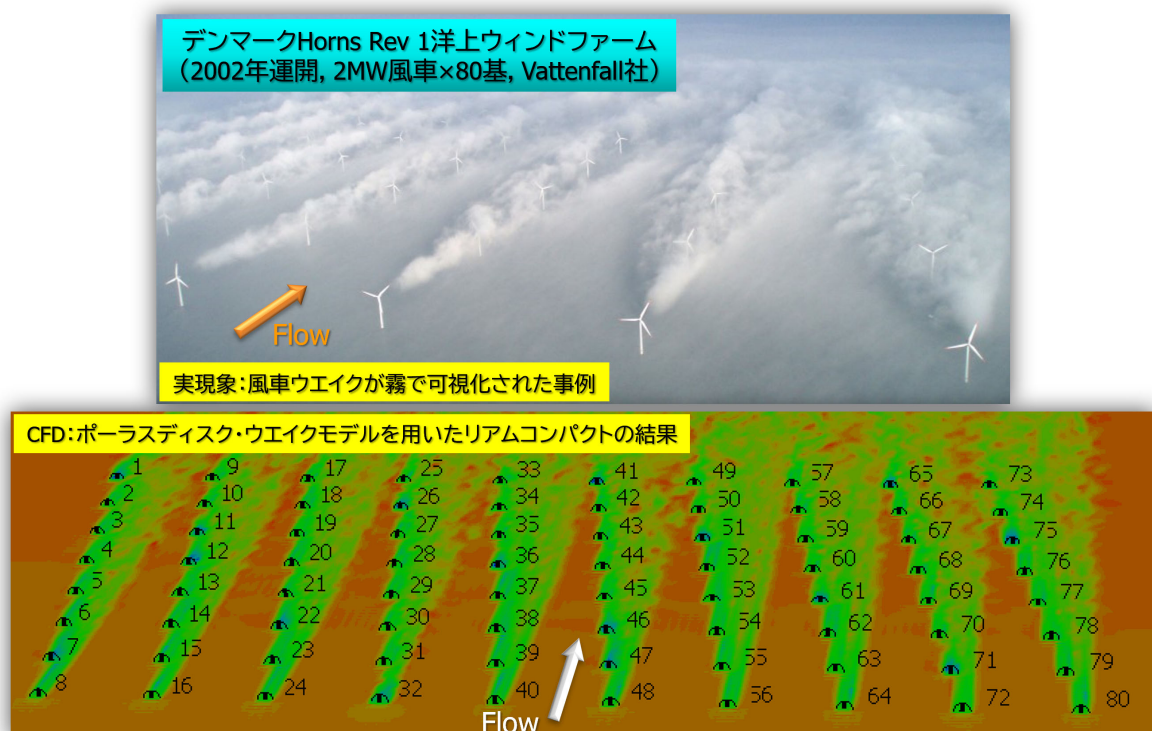


図10 ポーラスディスク・ウエイクモデルを実装したリアムコンパクトにより再現された風車ウエイクの非線形相互干渉

私は2018年4月から東芝エネルギーシステムズ株式会社と日立造船株式会社との共同研究に着手し、現在も継続中である(図9を参照)。2018年12月と2019年3月

には、お互いの発電所を視察して現場レベルの情報交換も実施した。本共同研究が正しく機能している要因は以下に示す通りである。一つは、研究開発のタスクが一

沿岸域におけるバーチャル洋上ウインドファーム(nearshore wind farms)

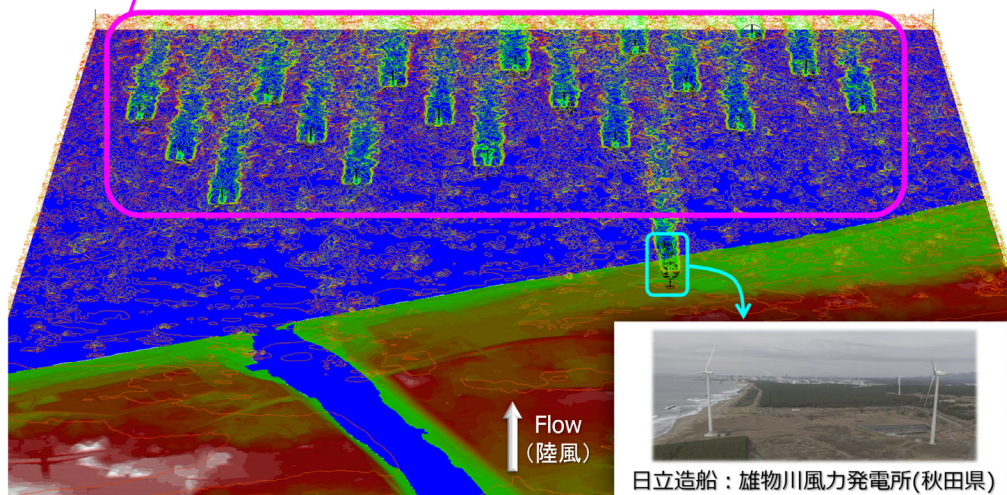


図11 ポーラスディスク・ウエイクモデルを実装したリアムコンパクトにより再現されたバーチャル洋上ウインドファーム

者に集中することなく、三者にバランスよく分散されていること。二つ目は、若手からベテランまで複数のエンジニアが本共同研究に参加していること。最後に、ほぼひと月おきに開催している打ち合わせの場で活発で自由な議論が行われていことである。本共同研究が実質的に機能していることは、毎年開催されている風力エネルギー利用シンポジウムでの多数の発表件数、また複数の特許申請件数からも見て取れる。これまで得られた研究成果の中でも最大の成果は、Jensen(Park)ウエイクモデルに代表されるエンジニアリング・ウエイクモデルと、翼素理論に基づいたアクチュエータラインモデルなどによるCFDウエイクモデルの中間的な手法として、ポーラスディスク・ウエイクモデルの開発に成功したことである[2]。紙面の都合上、ここでは省略するが、本提案手法の予測精度は、風車模型を用いた風洞実験、商用ソフトウェアによる風車ブレードの回転を忠実に再現した計算 (fully-resolved geometries combined with CFD simulations), ドップラーライダーによる実測データから総合的に比較・検証を実施している。図10には、デンマークの大規模洋上ウインドファームにポーラスディスク・ウエイクモデルを実装したリアムコンパクトを適用した結果を示す。80基の風車すべてからウエイクが形成されていることや、それらが相互干渉して複雑乱流場が出現している様子が観察される。

4. 洋上風力発電の実現に向けた将来展望

ポーラスディスク・ウエイクモデルを用いることで、各風車から形成される風車ウエイクの挙動とその相互干渉現象を数値予測し、各風車の耐久性やウインドファーム全体の経済性評価が可能になる。今後のリアムコンパクトは、(ウインドファームの建設前に)一連の検討をバー

チャルに、迅速に、かつ高精度に実行し、得られた結果はバンカビリティ(融資適格性)評価に資するものを目指す。同時に、新規の洋上ウインドファームが既設の陸上風車に与える影響、既設の陸上風車が洋上ウインドファームに与える影響なども評価可能である。今後、陸上版リアムコンパクトソフトウェアに複数のオプションを追加する形で洋上版リアムコンパクトソフトウェアをリリース予定である。スパコン富岳を用いたプロジェクトも推進中であり、その研究成果は改めて紹介する予定である。

5. おわりに

2020年の年末、ジャパン・リニューアブル・エナジー株式会社の協力の下、当研究室の院生数名と響灘地区の風車ウエイク計測に出かけた(現場との調整をお願いした高桑晋氏は当研究室の社会人博士課程に在籍中である)。当日は風速10m/sを超え、計測には最適であったが、吹き飛ばされそうな強風と寒さの中、ブレードが力強く淡々と回転している状況に改めて「迫力」を感じた。その時、大屋先生との最近の会話、「内田君、最近、風力発電はその場の風をちょっとお借りしているくらいの心境だよ」がふと頭をよぎった。同時に、「こんなに複雑な局所風況場を我々は数値予測できるのか?しかし、謙虚の気持ちを常に持ち、風の神様に守られ、純国産技術を駆使し、日本の環境に調和した洋上風力の実現に貢献したい」と改めて思った次第である。最後に、今回このような執筆の機会を与えて頂いた日本風力エネルギー学会(JWEA)に対して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Uchida, T. et al., energies, 12(13), 2624, 2019.
- [2] Uchida, T. et al., energies, 13(12), 3197, 2020.