



Title	Data-driven closure modeling of turbulence
Author(s)	松元, 智嗣
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105526
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (松 元 智 嗣)	
論文題名	Data-driven closure modeling of turbulence (データ駆動型手法を用いた乱流のクロージャモデリング)
乱流中の輸送現象は大スケールの流れによって支配されるため、その運動を記述するモデルの構築は重要である。近年では、データ駆動型手法に基づく乱流モデルが提案されており、従来のモデルを上回る性能を示すことが報告されている。しかし、その多くはバックスキッタの抑制などの安定化手法を必要とし、その結果、モデルの精度が低下することがある。また、学習データに含まれる条件下では高い性能を発揮する一方で、流れの条件が変化した場合にはモデルの性能が大きく低下することがある。本学位論文では、これらの課題を克服することを目的として、(1) データ駆動型乱流モデルの数値安定性を決める条件の解明、(2) 大スケールの流れを安定に再現するモデルの構築、(3) 外力の変化に対する汎化性能の実現に取り組んだ。 まず、(1) に向けて、乱流のシェルモデルを対象に、再帰型ニューラルネットワーク (RNN) を用いてグリッドスケール変数からサブグリッドスケール変数を推定するモデルを構築し、その安定性と精度を評価するパラメータサーベイを実施した。切断波数が$0.2\eta^{-1}$ (ηはKolmogorov長) よりも小さい場合には、モデルは数値的に不安定になる。この波数は乱流の小スケールの大スケールへの従属性を特徴付ける波数であり、数値安定性が乱流の物理的性質によって決まることを示した。 次に、(2) の実現に向けて、周期箱内の乱流を対象に、渦度Fourier係数の低波数成分の時間発展を自己回帰的に予測するモデルをRNNを用いて構築した。学習データを時間的に粗視化することで、モデルは安定に大スケール渦のダイナミクスを再現する。さらに、最適なカットオフ周波数f_c^*が自己回帰予測の時間幅Δt_pと最大渦の旋回時間T_Lを用いて、$f_c^* \propto \Delta t_p^{-1} T_L^{-2}$に従うことを示した。 さらに、(2) で構築したモデルに制御パラメータを導入することで、(3) を試みた。その結果、モデルが学習データに含まれない外力条件下の乱流の渦構造および統計性質を再現することを示した。本学位論文で得られたこれらの結果は、データ駆動型乱流クロージャモデリングの基盤を与えるものであり、従来のラージエディシミュレーションに代わる新たな手法となり得る。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (松 元 智 嗣)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	後藤 晋
	副 査	教 授	河原 源太
	副 査	教 授	杉山 和靖
	副 査	教 授	服部 裕司 (東北大学 流体科学研究所)
論文審査の結果の要旨 乱流現象の予測は種々の系において重要な課題である。一般に乱流は大小さまざまな渦からなるが、多くの場合、最大渦の予測が鍵を握る。これは乱流の高い輸送能力の大部分が大きな渦によるためである。このため、乱流の最大渦を精度よく予測するモデルの構築が望まれてきた。そのような乱流モデルを、機械学習を援用して構築することが本論文の目的であり、次に挙げる三つの成果が報告された。(一) まず、乱流中のある切断スケールよりも大きなスケールの流れの情報から、より小さなスケールとの相互作用を予測することで、切断スケールよりも大きなスケールの流れのみで閉じたモデルを構築したところ、切断スケールの大きさには限界があることが示された。具体的には、疎結合シェルモデルとよばれる乱流のトイモデルに対して再帰型ニューラルネットワーク (RNN) を用いたモデルを構築し、切断スケールがコルモゴロフ長 (最小渦の大きさ) よりも短くないと、モデルが不安定になることが示された。また、この限界スケールの物理的な意味を乱流の性質から明らかにするとともに、モデルの不安定化を回避する方法も提案された。(二) 次に、周期境界条件下の乱流に対して、最大スケールの渦のみで閉じたモデルをRNNにより構築した結果が報告された。具体的には、乱流の直接数値シミュレーションで得られた教師データをネットワークに学習させ、自己回帰予測を用いることでモデルが構築された。このとき、適切に選択された低波数域のフーリエ係数のみを用いるが、ネットワークに学習させるデータには予測時間間隔に応じた適切な時間粗視化が必要なことが示された。(三) さらに、機械学習で最重要問題のひとつである汎化性能に関する新たな知見が示された。具体的には、周期境界条件下の乱流を二種類の力の線形和で駆動し、その重みを系統的に変えた場合を考えた。教師データとしてはどちらか一方の外力のみが印加されているものを用意してRNNを学習させたにもかかわらず、教師データがない場合に対しても十分に良い精度のモデルが構築可能であることが示された。一連の研究は、機械学習を援用した乱流モデルの可能性、安定性、汎化性能に関わる根本的で重要なものである。したがって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分な価値があるものと認める。			