



東北大学

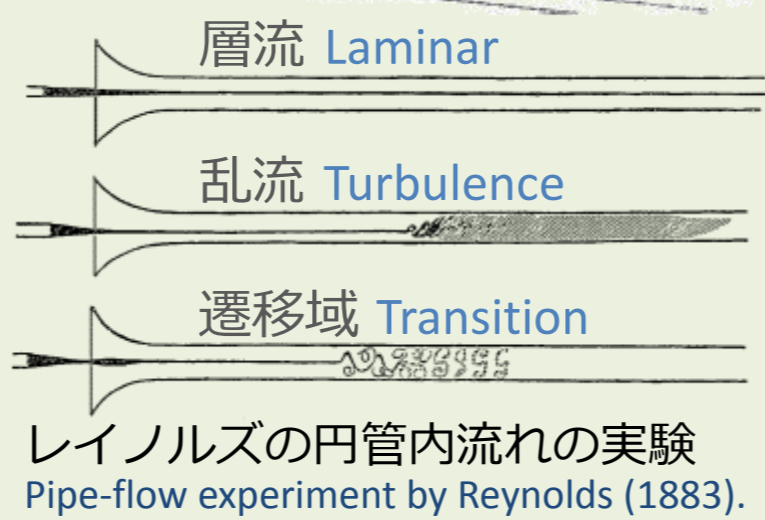
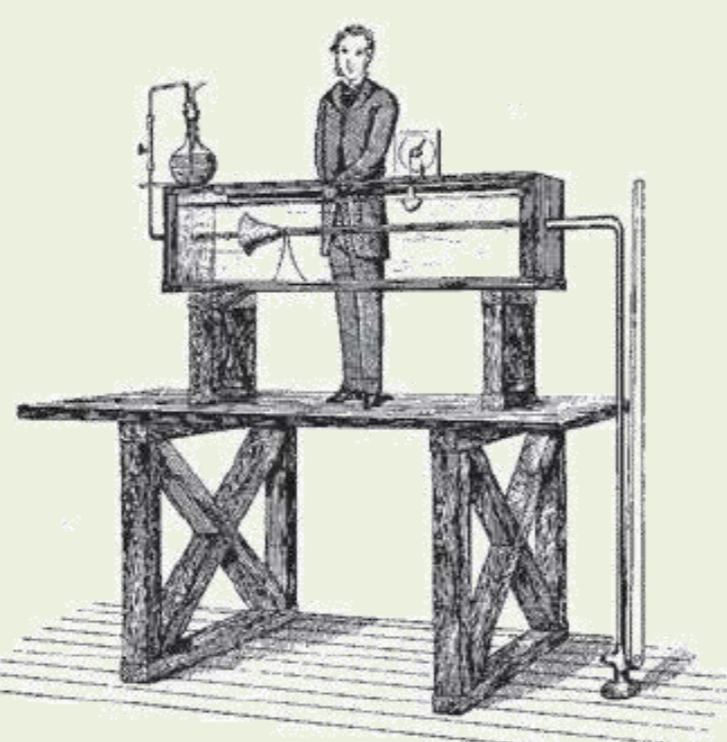
サイバーサイエンスセンター
ユーザの研究紹介

遷移域“乱流”の直接数値シミュレーション

東京理科大学 工学部 塚原 隆裕

研究背景 | “乱流”起源の探求

水や空気などの流体（液体・気体を問わず）の流れは大別して、「層流」と「乱流」がある。私達の身の回りや産業分野に見られる多くの流れは乱流である。その発生条件として、流れの指標であるレイノルズ数（慣性力/粘性力）が大きいときに乱流となることが一世紀以上前の実験（右図）から知られている。



Liquid/gas fluid flows (such as water/gas) can be categorized roughly into “laminar” and “turbulence”. We often encounter various turbulent flows in nature and industry. The onset of turbulence is well known to be predicted by an index, so-called “Reynolds number” Re (= inertial force / viscous force), since the pioneering work by Osborne Reynolds (1883).

層流と乱流では流動特性・伝熱特性が顕著に異なるため、製品設計等では遷移（層流⇔乱流）の予測が重要である。

Between laminar and turbulence, there exists big differences in flow property and also heat-transfer property. Hence, the prediction of transition to/from turbulence is of practical and scientific importance.



遷移域は乱れが間欠的となり、層流と乱流が時空間的に混在した流れになる。その特徴（流動構造や統計的普遍性）に加えて、遷移域の臨界レイノルズ数（乱流を維持できる下限値）は不明である。この問題について、大型計算機を用いた大規模な直接数値シミュレーション（DNS）により乱流を忠実再現すれば、遷移現象の全体の様相や、長年の問題である乱流起源の解明に繋がる。

Flow in the (subcritical) transition regime exhibits localized turbulence intermittently with laminar co-existing. Its features (structure/pattern and statistics) and critical Reynolds number (below which any turbulence cannot sustain) are still open questions. To address this issue, large-scale Direct Numerical Simulation (DNS) using supercomputers would be helpful, and may allow to find an origin of turbulence.

乱流現象を忠実に再現するには、スパコンの活用が不可欠であり、特にSX-ACE（東北大学保有）のようなベクトル計算機は流体計算において強力なツールとなる。通常のPC等のスカラ計算機に比べて、効率的にベクトル計算が行える。本研究では、約10億点の格子点（CPUメモリー 200GB以上）を扱う上でもスパコンは必須となる。

In order to simulate turbulent flows rigorously, we should leverage supercomputers. In particular, vector computer such as SX-ACE (Tohoku Univ. owns) is a powerful tool for DNS, since flow simulations with structured grids is accompanied by massive vector calculations. In this study, we deal with approximately 10 billion grid points, which demands CPU memory of > 200 GB, and supercomputer is required for it.

研究方法 | 直接数値解析 (DNS)

下記の支配方程式を直接（乱流モデルを用いず）に、各格子点で計算（数値積分）して、時々刻々の速度変化を数値的に求めていく。

The following two governing equation are integrated numerically without any turbulence model, to obtain temporal variations of the velocity at each grid point.

● 連続の式（質量保存則）： $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

Equation of continuity

\mathbf{u} : 速度ベクトル p : 圧力
velocity vector pressure
 Re : レイノルズ数 t : 時間
Reynolds number time

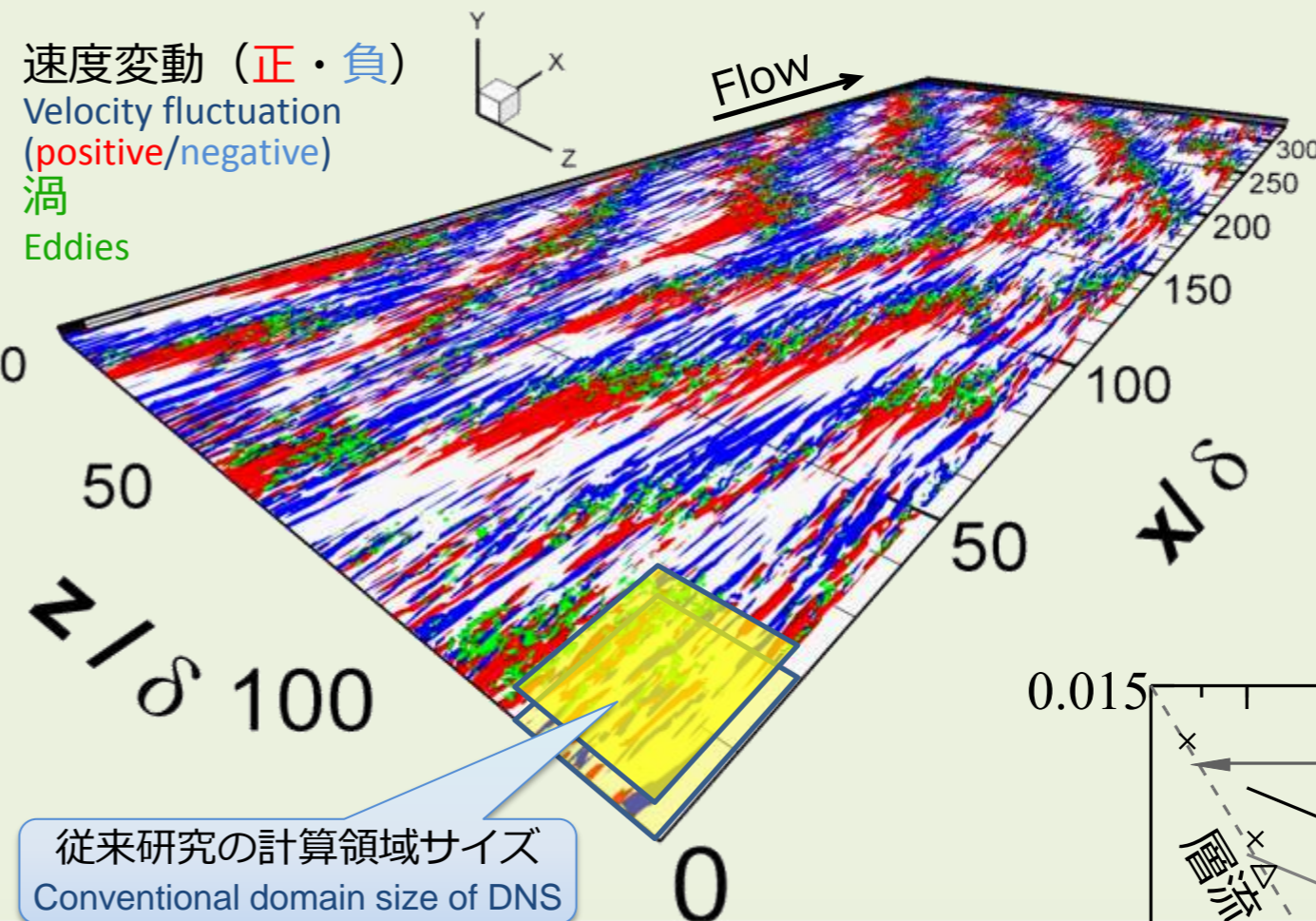
● ナビエ・ストークス方程式（運動量保存則）： $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u}$

Navier-Stokes equation

DNSでは、渦などの乱流構造を解像する十分に細かい格子間隔と、構造全体を捉える十分に大きな計算領域が必要 ⇒ 計算負荷が膨大！

DNS (direct numerical simulation) requires sufficiently small grid spacing and large computational domain to capture fine-scale eddies and large-scale turbulent structures. → It demands computational power!

研究結果 | 乱流縞と臨界レイノルズ数

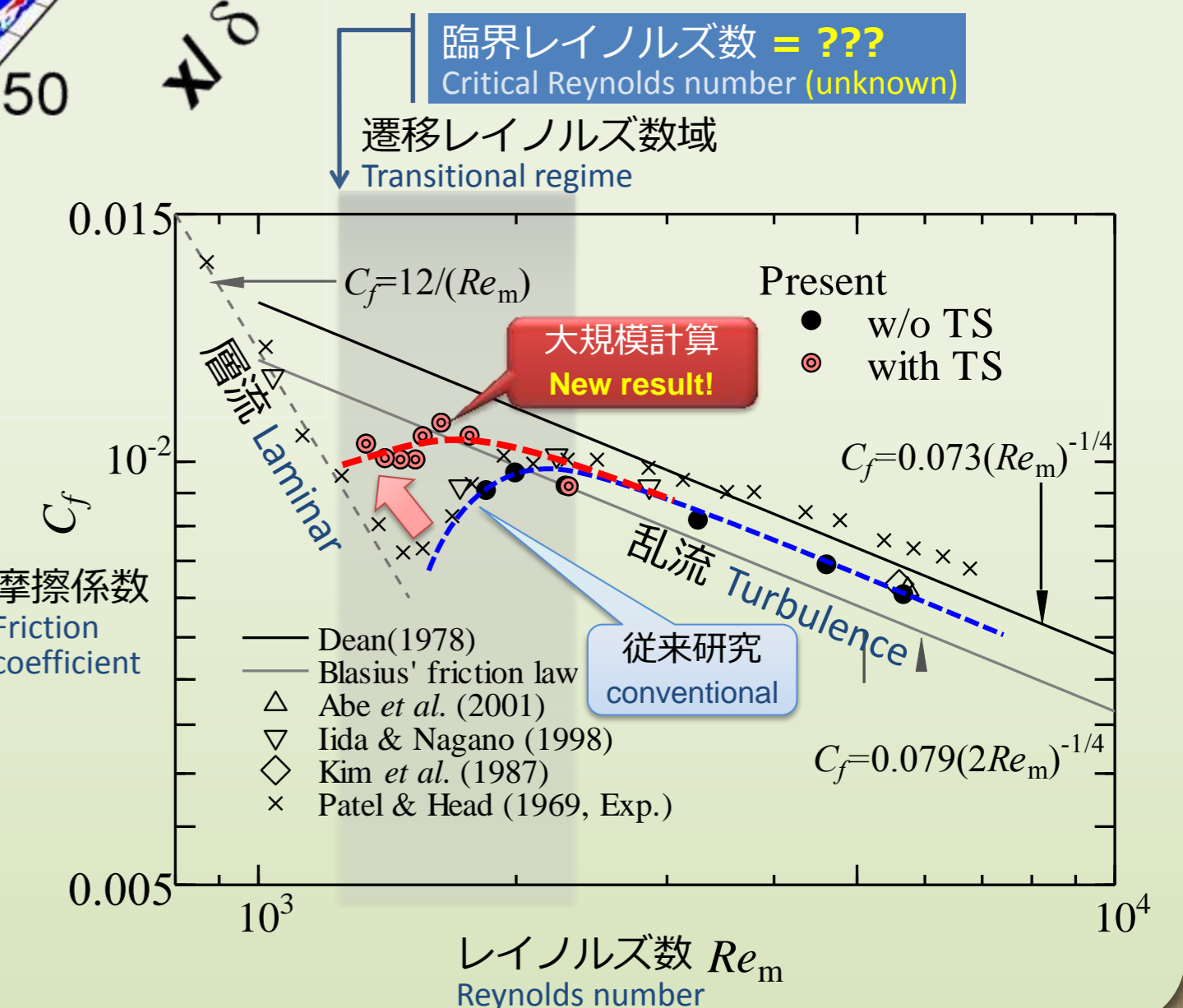


局在乱流が縞状パターンを形成し、非常に低い Re で乱流領域を維持させる。

Localized turbulence exhibits stripe pattern, sustaining turbulent regions at very low Re .

壁面摩擦係数 C_f の変化
遷移域は乱流と層流の中間的な値になる。大規模計算で乱流縞を捉えると C_f 増加と臨界 Re 低下を発見。

In transitional regime, C_f becomes a value intermediate between laminar and full-turbulent values. With turbulent stripe, higher C_f and lower critical Re are found.



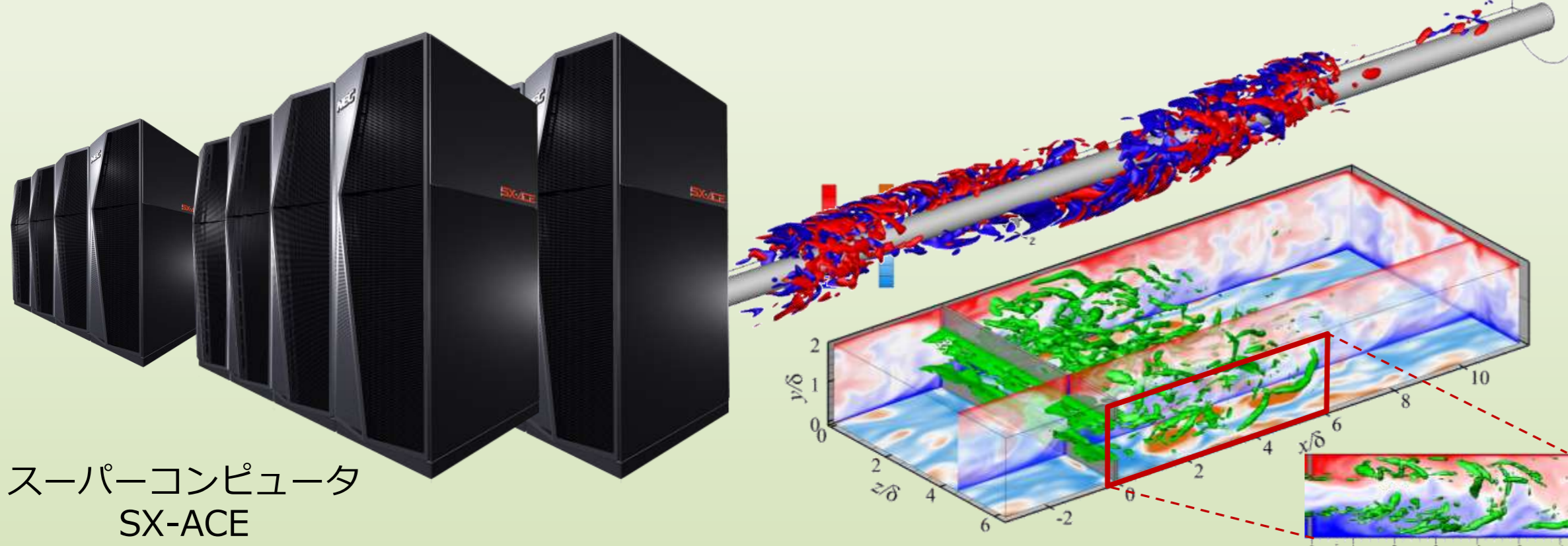
将来展望 | 将来目標・期待される成果・応用分野

乱流の発生&維持のメカニズム解明は、より複雑な流路における乱流現象の理解・予測・制御に繋がる。例えば、マイクロ熱交換器の伝熱促進や、航空機・車両等の抵抗低減による省エネ化に資する。

Understanding the onset and sustenance mechanism of turbulence would lead a great progress in better prediction and control of complex and practical flows. For instance, our findings will contribute the heat-transfer enhancement in micro heat exchanger and the drag-reduction of aircraft, boat, and vehicle.

臨界付近の乱流縞パターン形成を捉えるには、現状の1万倍以上の（時空間的）計算量が要され、計算機の高性能化も必須である。

Further developments in supercomputing performance/technique are necessary to realize 10,000-times larger DNS for fully-capturing turbulent-stripe pattern in the vicinity of the critical Reynolds number.



スーパーコンピュータ SX-ACE

発電炉の安全設計 Safety design of power plant

マイクロ熱交換器や（CPU等の）除熱フィンの伝熱促進 Heat-transfer enhancement of micro heat exchanger and heatsink fin of CPU

翼面上の乱流遷移を制御 Turbulence-transition control on airfoil

次世代技術開発におけるCFD*性能の高度化 Highly-developed CFD* tool for next-generation product

*CFD: 数値流体力学
*CFD: Computational Fluid Dynamics

Shah & Sekulić, (2003) Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons, Inc.

Yeh & Taira (2016) 69th Ann. Meeting APS-DFD Gallery of Fluid Motion, P0019

©ESI Group

©NASA