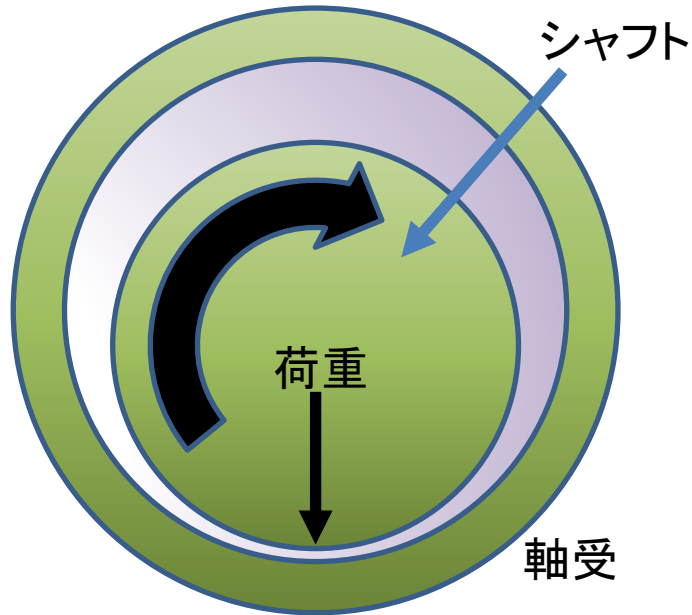


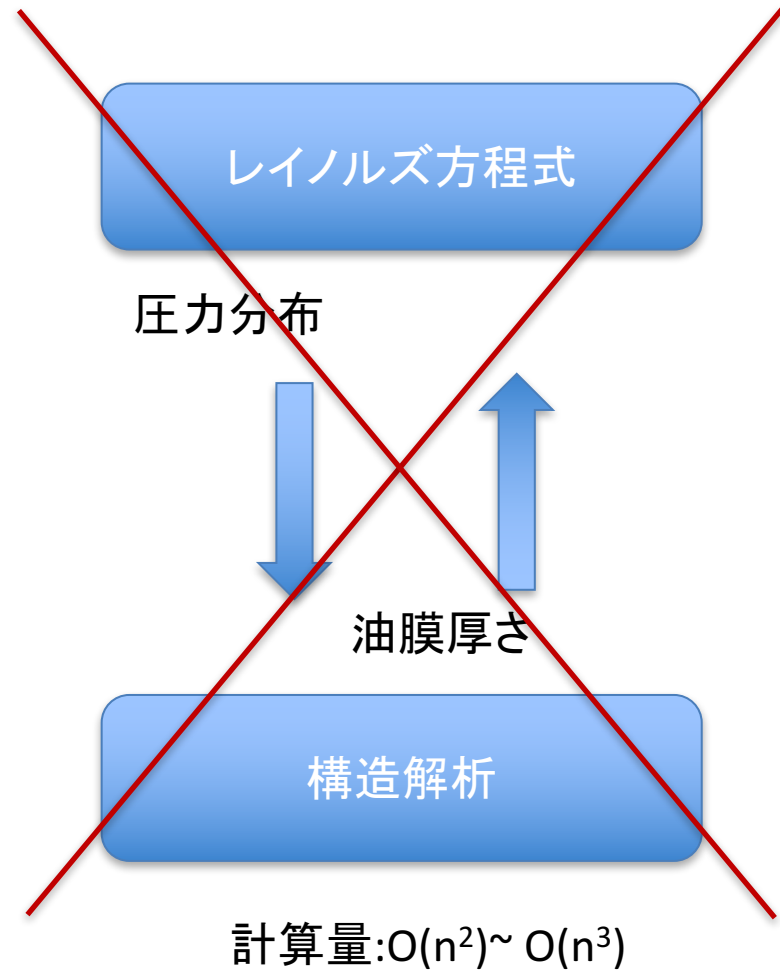
千億自由度の自動車のエンジンの軸受モデル の流体構造連成動解析

2018/5/11
九州大学大学院工学研究院
機械工学部門
深川宏樹

弾性流体潤滑解析(既存手法の問題点)



潤滑油のくさび効果により、シャフトは軸受から浮く。

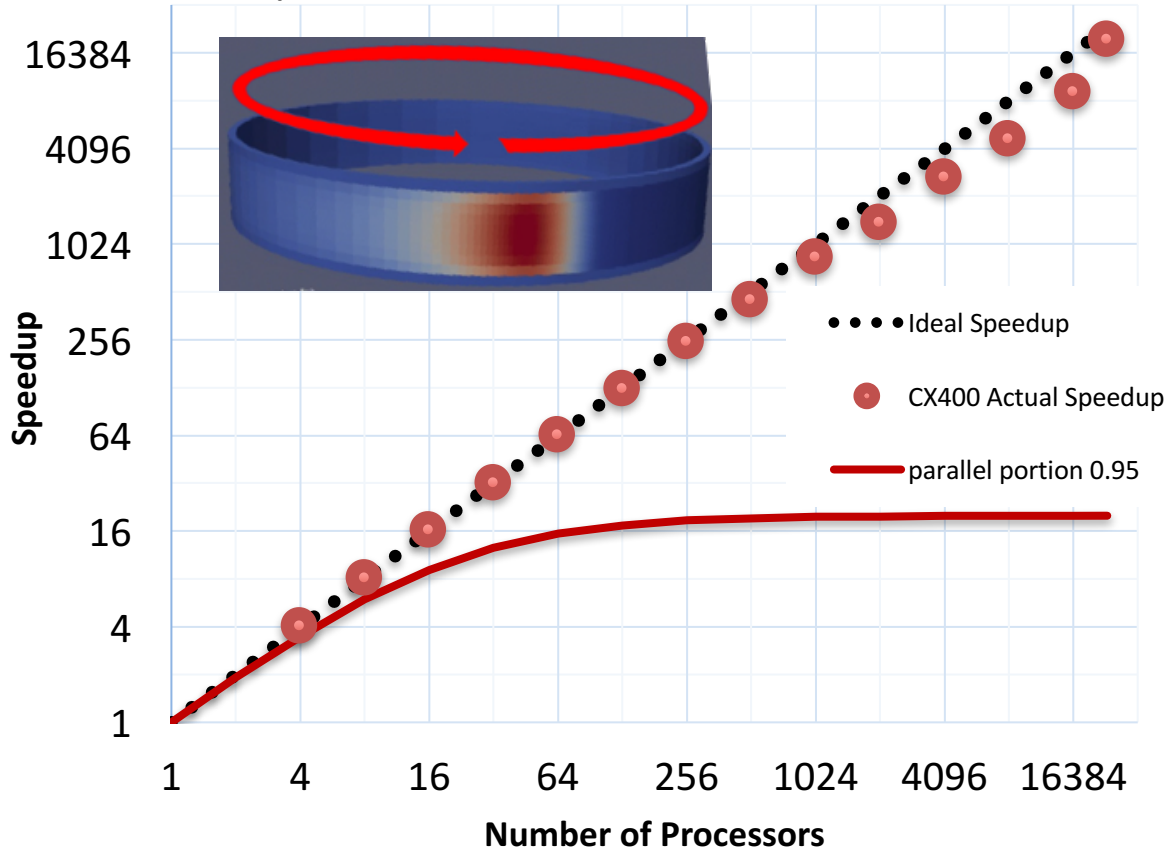


計算量が膨大、並列計算に向かない。

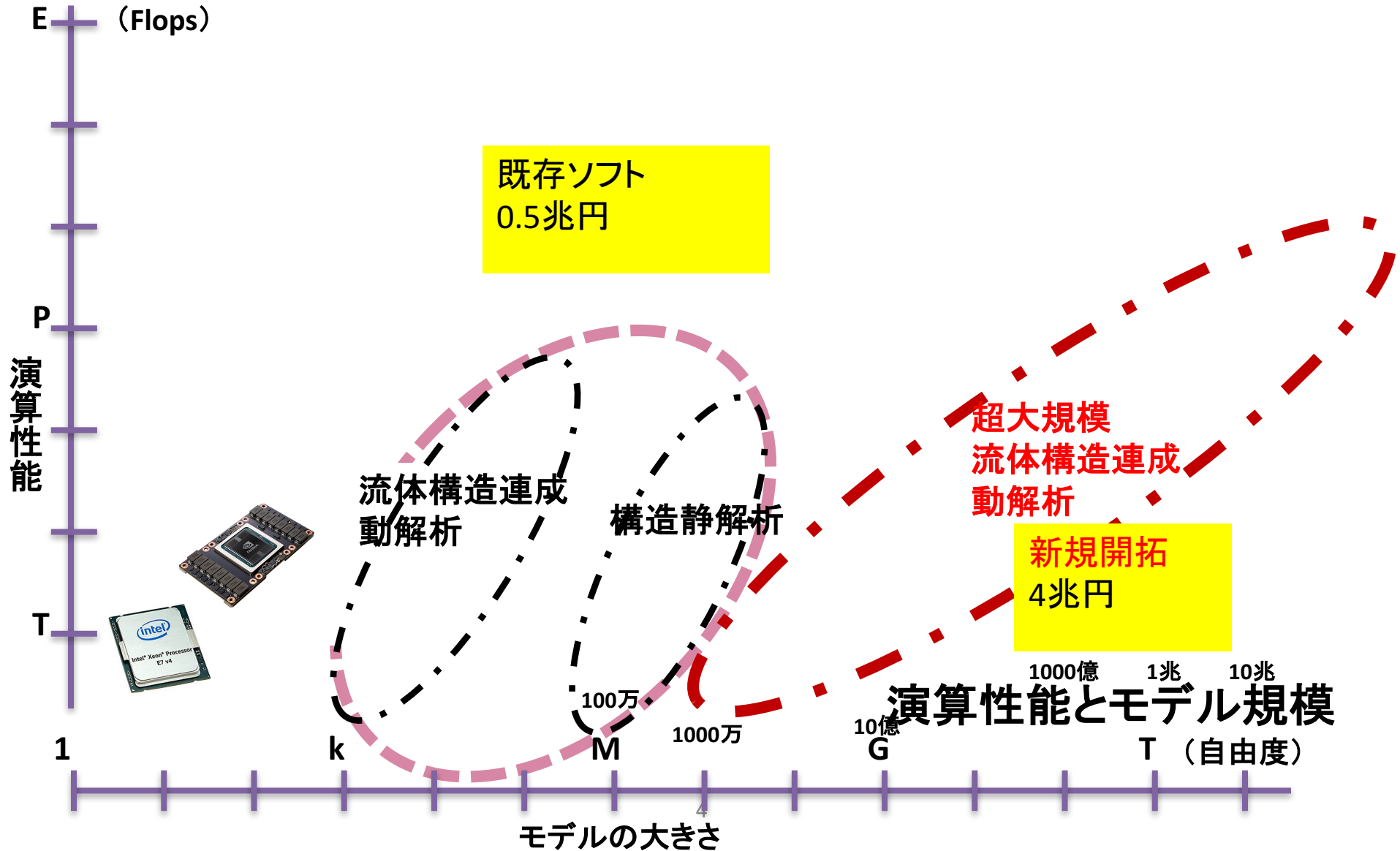
本研究の成果

世界初 **完全陽解法**と**Position Based Dynamics**による
1600億自由度のstiffな流体構造連成動解析を実現
従来ソルバ(AVL EXCITE 数千自由度)の一億倍の自由度
最薄油膜厚さ 0.1 μm 、数nmでの厚さ変化 0.1 μs での動解析

1. 高い並列性能 並列度100%
2. 計算量の抑制 $O(n) \ll O(n^3)$



従来技法との解析規模の比較

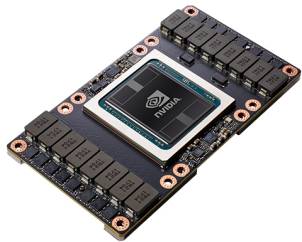


本技術の優位性と独自性

従来の有限要素法ではスパコンに対応できない。

理由

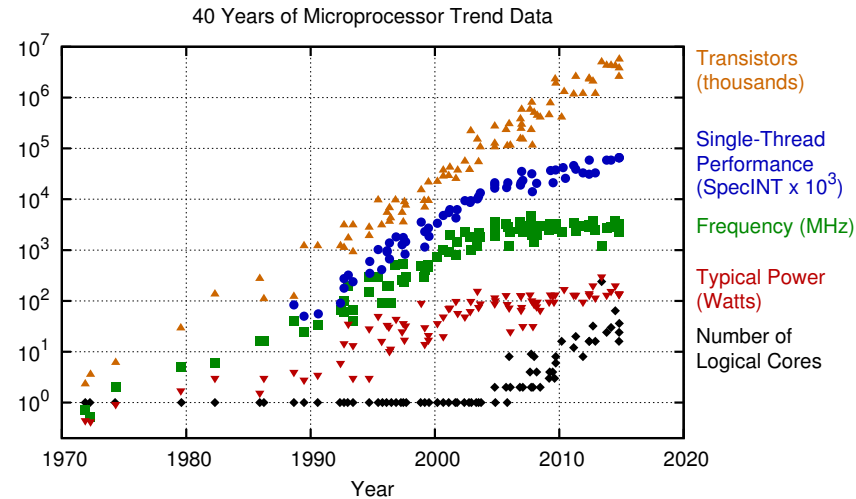
1. ハードウェアのトレンドの変化
高並列化、B/F値の低下
2. スパコンに向かないアルゴリズム
LU分解、SpMv



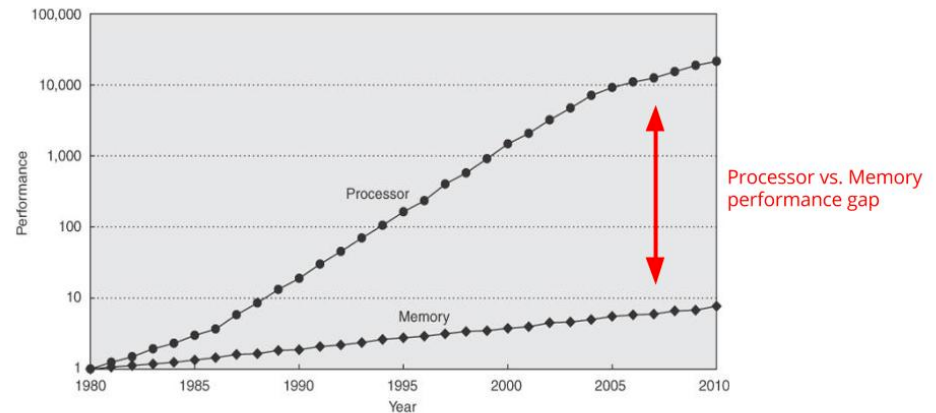
V100 5120コア
7.5 TeraFLOPS



E7-8890v4 24コア
0.84 TeraFLOPS



Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2015 by K. Rupp



© 2007 Elsevier, Inc. All rights reserved.

Memory speed lags behind CPU speed

完全陽解法

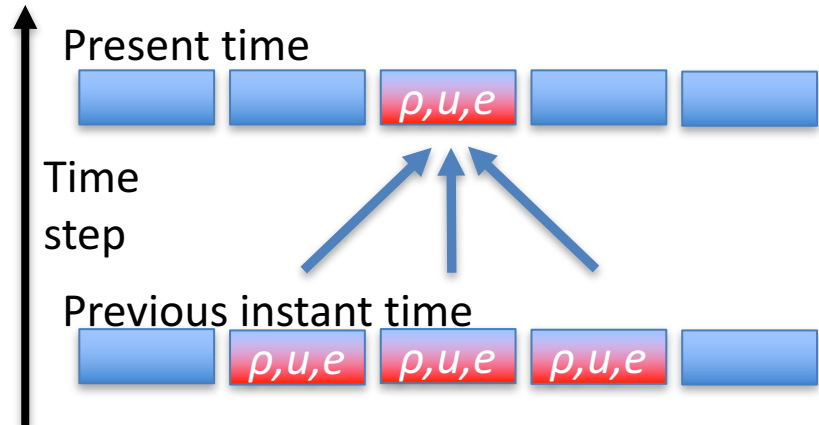
[長所]

高い並列性 → 大規模問題にも対応可能

アルゴリズムがシンプル

非線形問題もシンプルに扱える。

計算速度が速い。



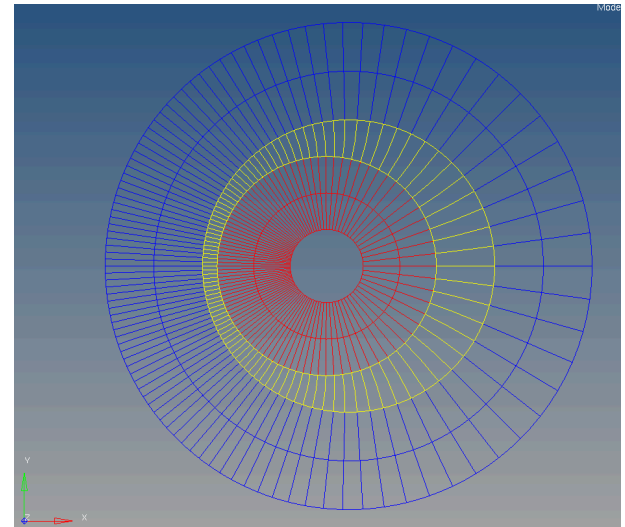
[短所]

不揃いなメッシュサイズでは安定しない

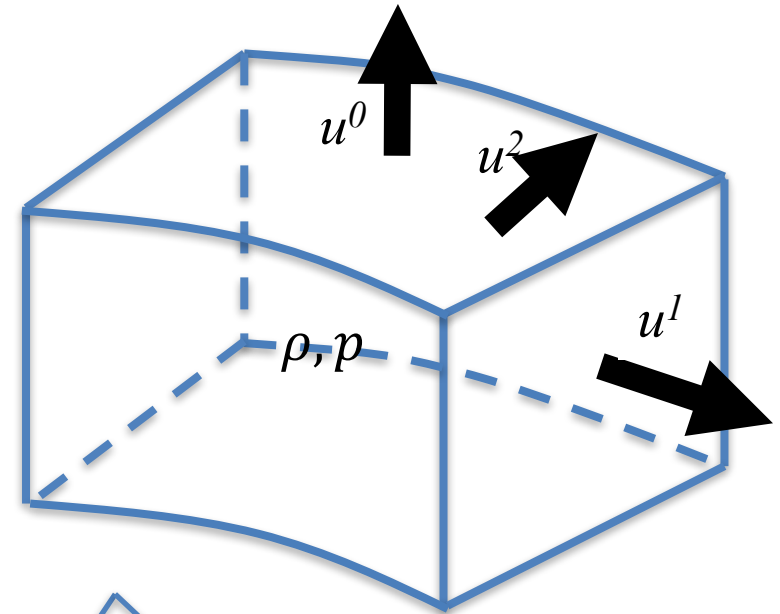
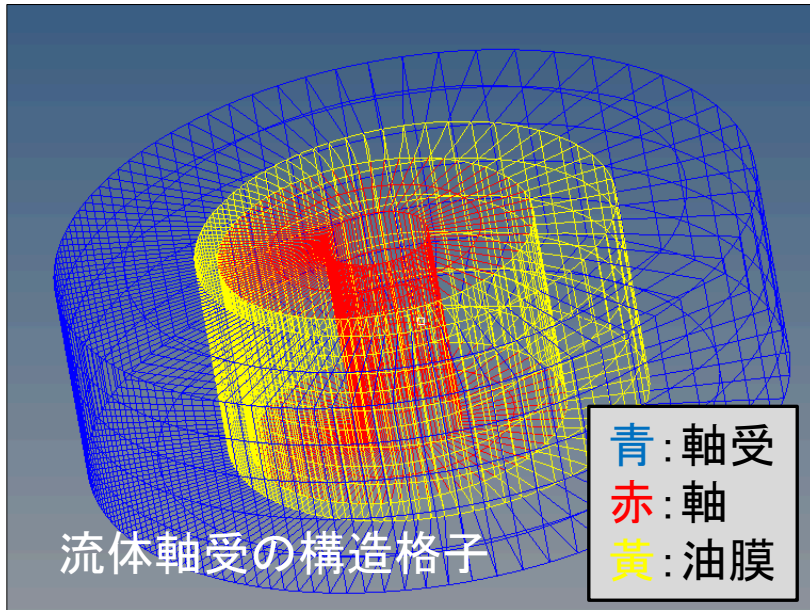
→ 解が発散

短い時間刻み $\sim(\text{サイズ})^2$

→ 莫大な計算時間



流体の運動方程式

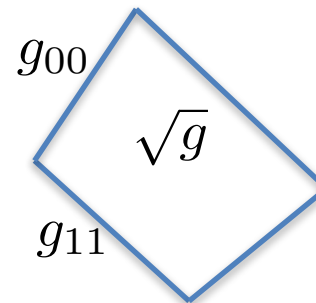


質量保存速

$$\partial_t(\sqrt{g}\rho) + \nabla_j(\sqrt{g}\rho u^j) = 0$$

Navier-Stokes 方程式

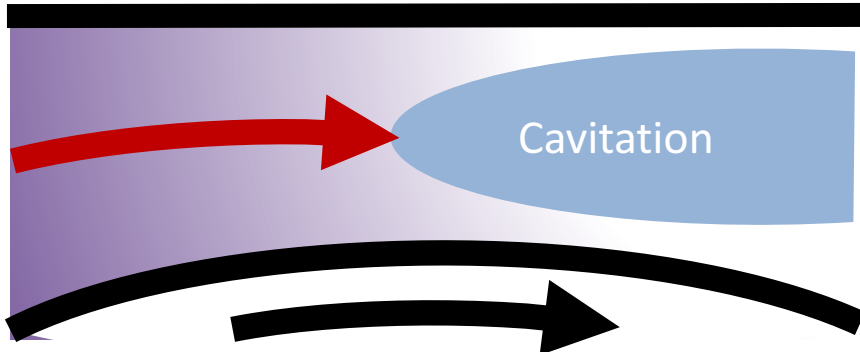
$$\partial_t(\sqrt{g}\rho u_i) + \nabla_j(\sqrt{g}\rho u_i u^j) + \sqrt{g}\rho \partial_j p - \nabla_j(\sqrt{g}\sigma_i^j) = 0$$



$$\sqrt{g} \equiv \sqrt{\det g_{ij}}$$

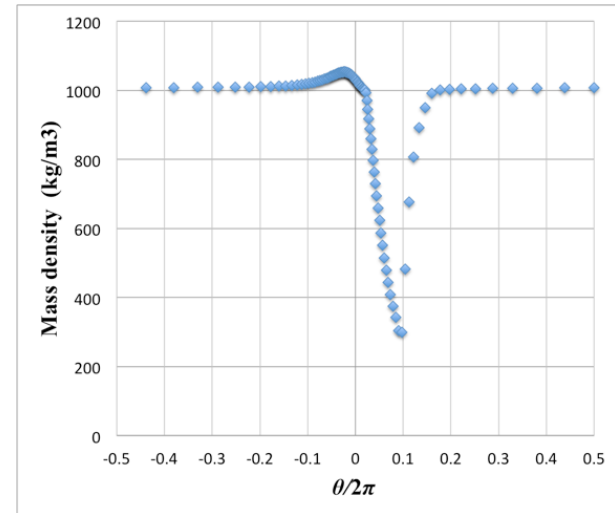
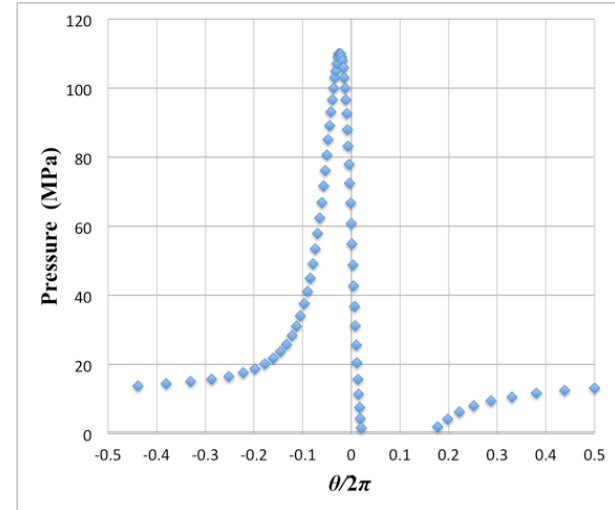
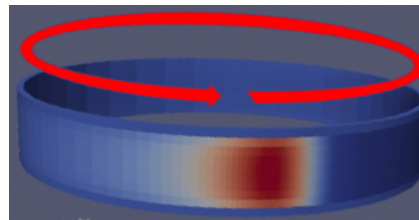
$$u_i \equiv g_{hi} u^h$$

圧力と密度の式



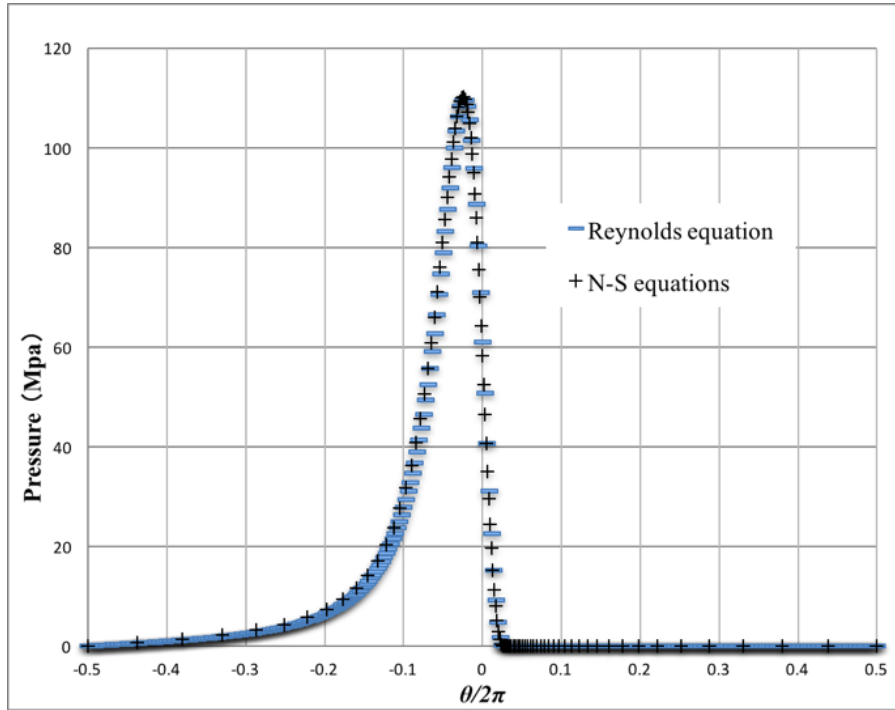
$$P = \begin{cases} \frac{5.9 \times 10^8 \times (\rho - \rho_0)}{1.34 \times \rho_0 - \rho} & (\rho - \rho_0 \geq 0) \\ 0 & (\rho - \rho_0 < 0) \end{cases}$$

- シャフトの直径 : 30 mm
- ベアリングの長さ : 20 mm
- 半径隙間 : 30 μm
- 最小油膜厚さ : 1.5 μm
- 偏心率 : 0.95
- 粘性 : 10 mPa \cdot s
- オイルの密度 : 1000 kg/m 3
- 回転速度 : 1000 rpm
- 時間刻み : 0.1 μs



7.5ms 後の圧力分布と密度分布

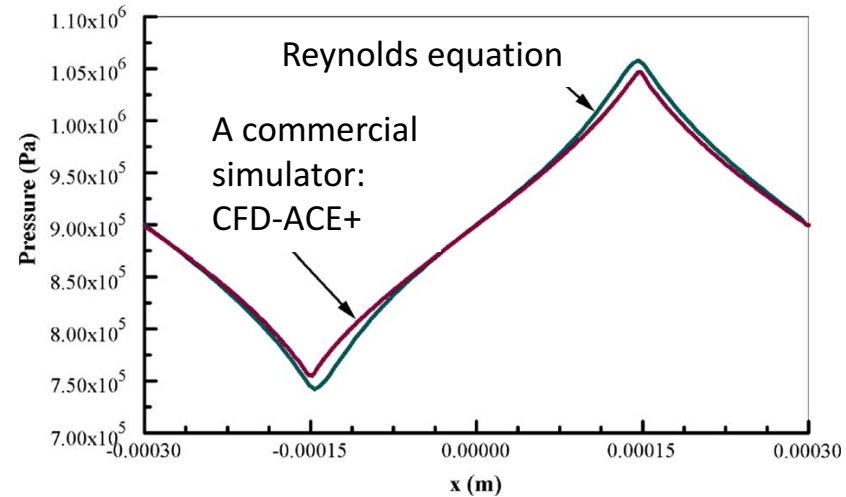
計算精度の検証



Reynolds 方程式とNavier-Stokes方程式との比較 (計算結果の一致)

Reynolds 方程式

$$\left[\sum_{i=1,2} \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \right] - u_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial \theta} = 0.$$



Pressure distributions from two simulations result
cf. Y. Qiu and M. M. Khonsar, 2009

弾性変形の支配方程式

運動量保存則

$$\partial_t(\sqrt{g}\rho u_i) + \sqrt{g}[\nabla_j(\rho u_i u^j) - \partial_j \kappa_i^j] = 0$$

歪の式

$$(\partial_t + \mathcal{L}_u)e_{ij} = \frac{1}{2}\left(g_{ik}\frac{\partial u^k}{\partial x^j} + g_{kj}\frac{\partial u^k}{\partial x^i}\right) + \frac{1}{2}\partial_t g_{ij}$$

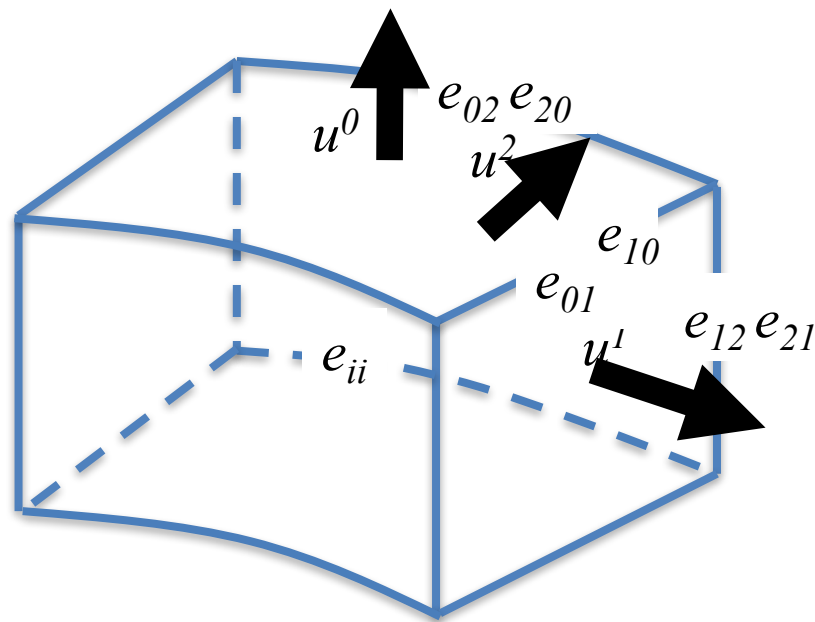
フックの法則

$$\kappa_j^i = \frac{E}{(1+\nu)}\left(e_j^i + \frac{\nu}{(1-2\nu)}\right)e_k^k\delta_j^i$$

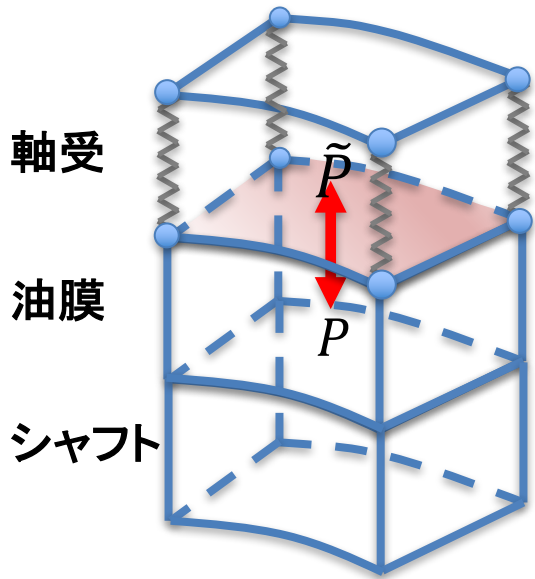
where

$$e_i^j \equiv e_{ik}g^{kj}$$

- Young率 E : 211.4 GPa.
- Poisson比 ν : 0.293
- 鉄の密度 $\tilde{\rho}_0$: 7800kg/m³

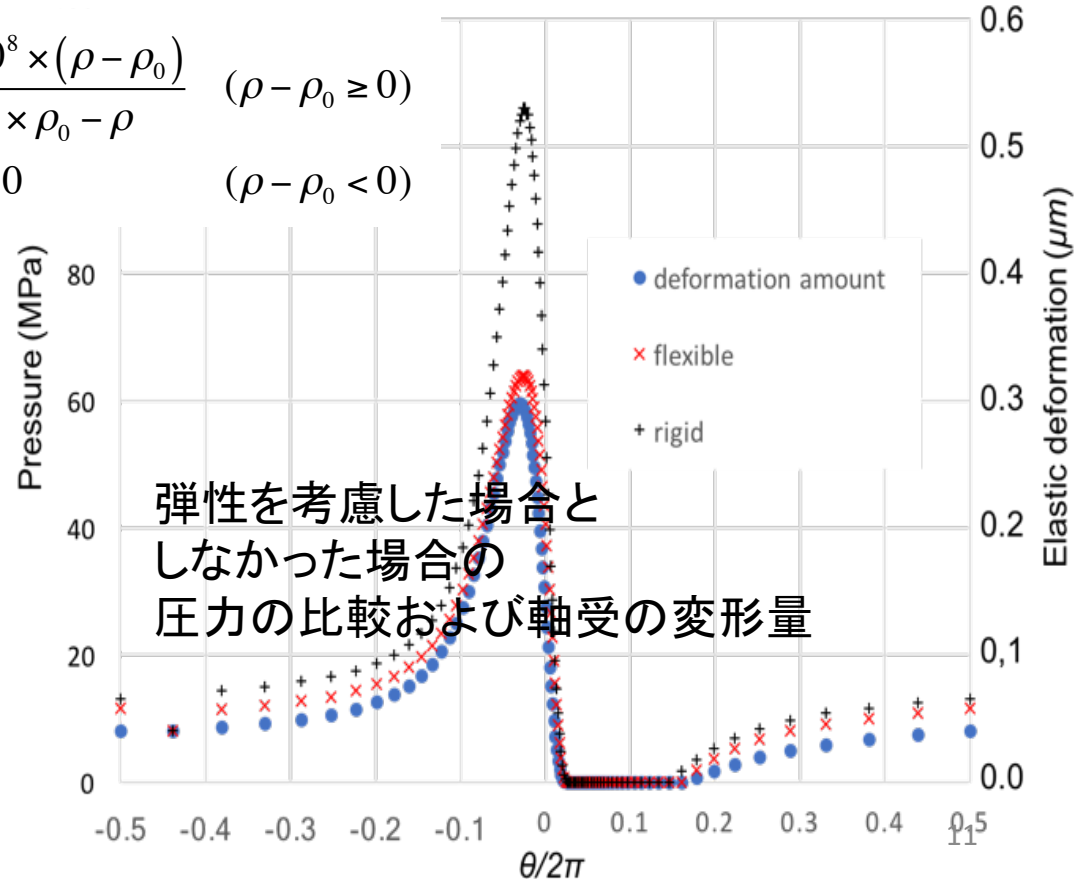


弾性変形(Position Based Dynamics)



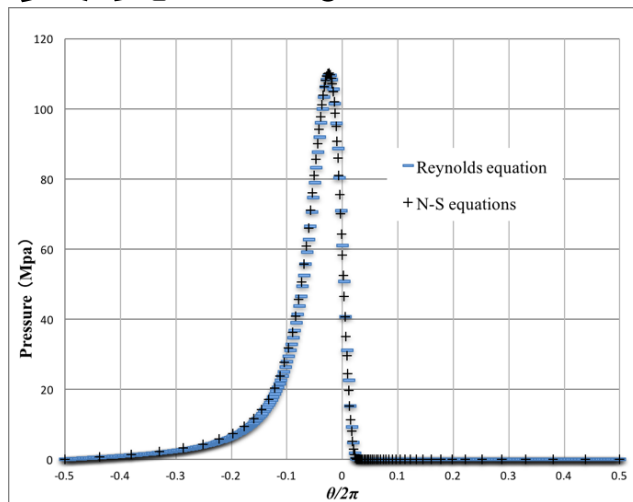
$$\tilde{P} = \kappa_0^0 = \frac{E}{(1 + \nu)} \left[e_0^0 + \frac{\nu}{(1 - 2\nu)} (e_0^0 + e_1^1 + e_2^2) \right]$$

$$P = \begin{cases} \frac{5.9 \times 10^8 \times (\rho - \rho_0)}{1.34 \times \rho_0 - \rho} & (\rho - \rho_0 \geq 0) \\ 0 & (\rho - \rho_0 < 0) \end{cases}$$

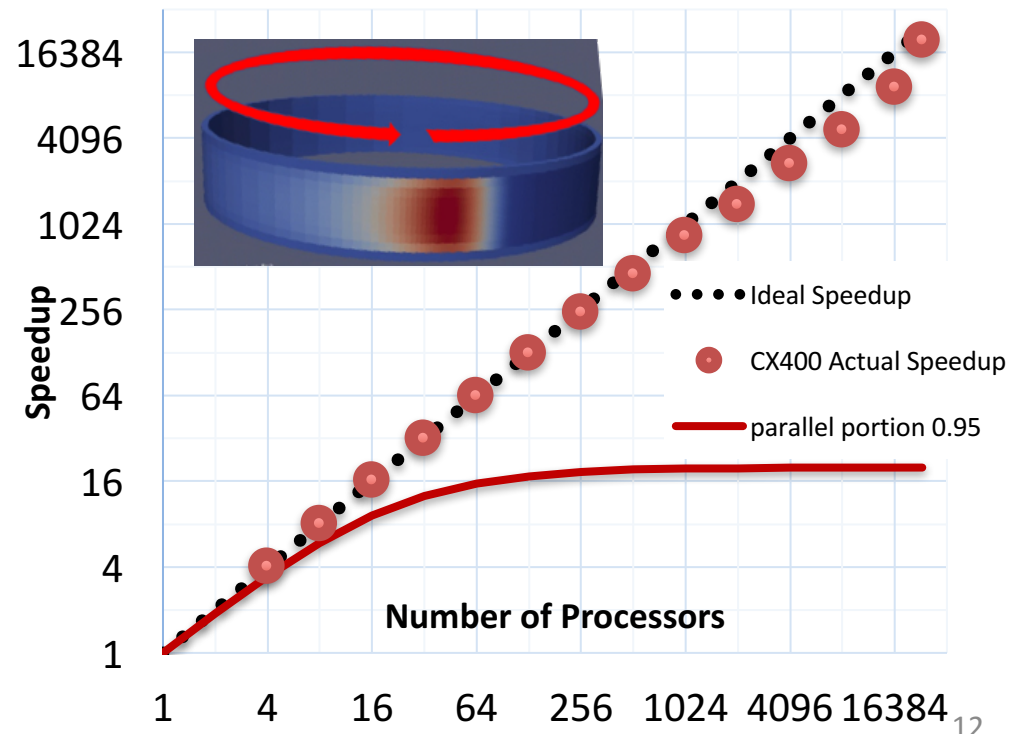


まとめ

- 完全陽解法とPosition Based Dynamicsを組み合わせることで、計算量の抑制と100%の並列化率を実現した。
- 高い計算精度を実現した。



Reynolds 方程式とNavier-Stokes方程式との比較 (計算結果の一致)



謝辞

- 総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「革新的燃焼技術」の支援を受けた。
- スパコンCX400の使用にあたっては、九州大学情報基盤研究開発センターの先端的計算科学研究プロジェクトの支援を受けた。
- 九州大学情報基盤開発センターの南里豪志准教授には、スパコンCX400を動かす際にアドバイスを頂いた。
- プログラムの作成には、九州大学理学部の福谷貴一氏、九州大学工学部の寺内優人氏、平健太郎氏、新垣翔太氏、フィックスターズの丸石崇史氏の協力を得た。
- 小田啓太氏には、研究の初期段階でアドバイスを頂いた。
- この研究成果は、九州大学大学院工学研究院の八木和行准教授との共同研究による。