

オープンCAEシンポジウム2014

(2014. 11. 14)

矩形筐体内に設置した 円柱障害物周りの 脈動流のOpenFOAMによる分析

* 福江 高志 谷津 なつき 小幡 一真 廣瀬 宏一

岩手大学工学部

白川 英観

富山高等専門学校

研究背景：熱機器の流体輸送

熱交換器

電子機器の冷却
(ファンによる強制空冷)

熱機器内部での
流体駆動



ファン・ポンプなど
流体機械によるエネルギー付与



流体機械の高速化（回転数増加）



(流量の増加による)
熱機器の性能の向上

Trade-off

消費電力の増加
騒音の増加



→ 熱機器の高効率化を企図した流体機械の制御

熱交換性能の向上

消費電力の削減
騒音の低減

の両立



研究背景：脈動流の適用？



脈動流の例^[1]:



生体内の血液 etc...

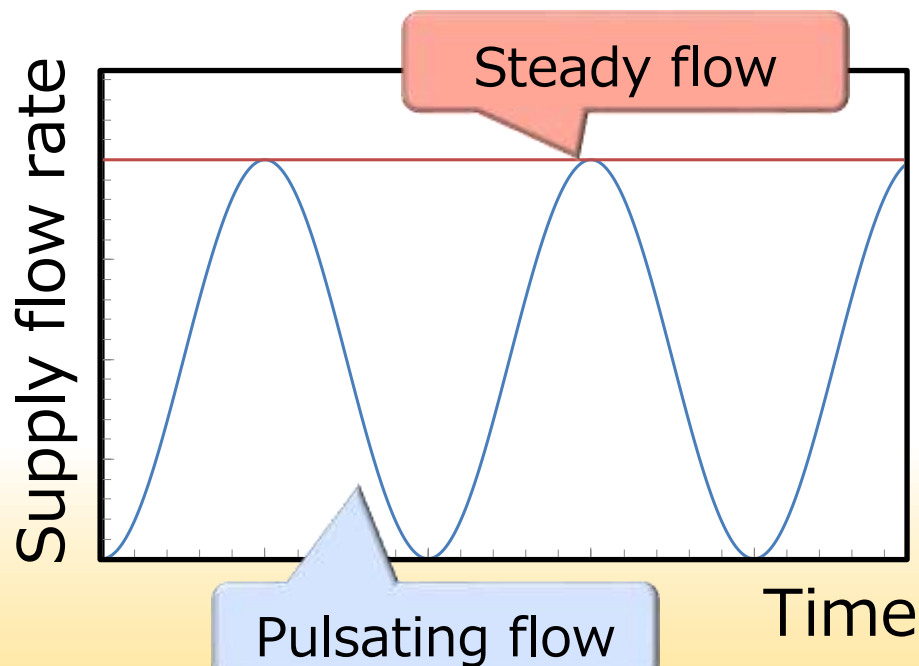
脈動流 流量を周期的に変化

- 往復流による肺のガス交換^[2]
- 矩形流路内の伝熱促進^[3]
- 脈動乱流による抵抗低減^[4]

**正味流量の低減
(ファン消費電力低減)**

冷却性能の維持

両立？



- [1] Sato, K. et al., Proc. ISTP-25 (2013).
- [2] 望月ら, 機論B, 68-667 (2002), 831-838.
- [3] Saitoh, H. et al., Proc. ISTP-21 (2010).
- [4] 岩本, JSME2011年度年次大会講論 (2011).

研究背景：脈動流の適用可能性



Ex: 電子機器 × 脈動流

ファンの回転数を適宜制御することで簡易に生成可能？



既存の流体を取り扱う熱機器にも簡易に導入できる可能性

しかしながら、熱機器には

- 数多くの部品
(フィン, 電子部品, ...)
- 実装密度, レイアウト, 部品形状は多種多様



脈動流による、部品まわりの伝熱への影響を分析し
応用の可能性を検証する必要

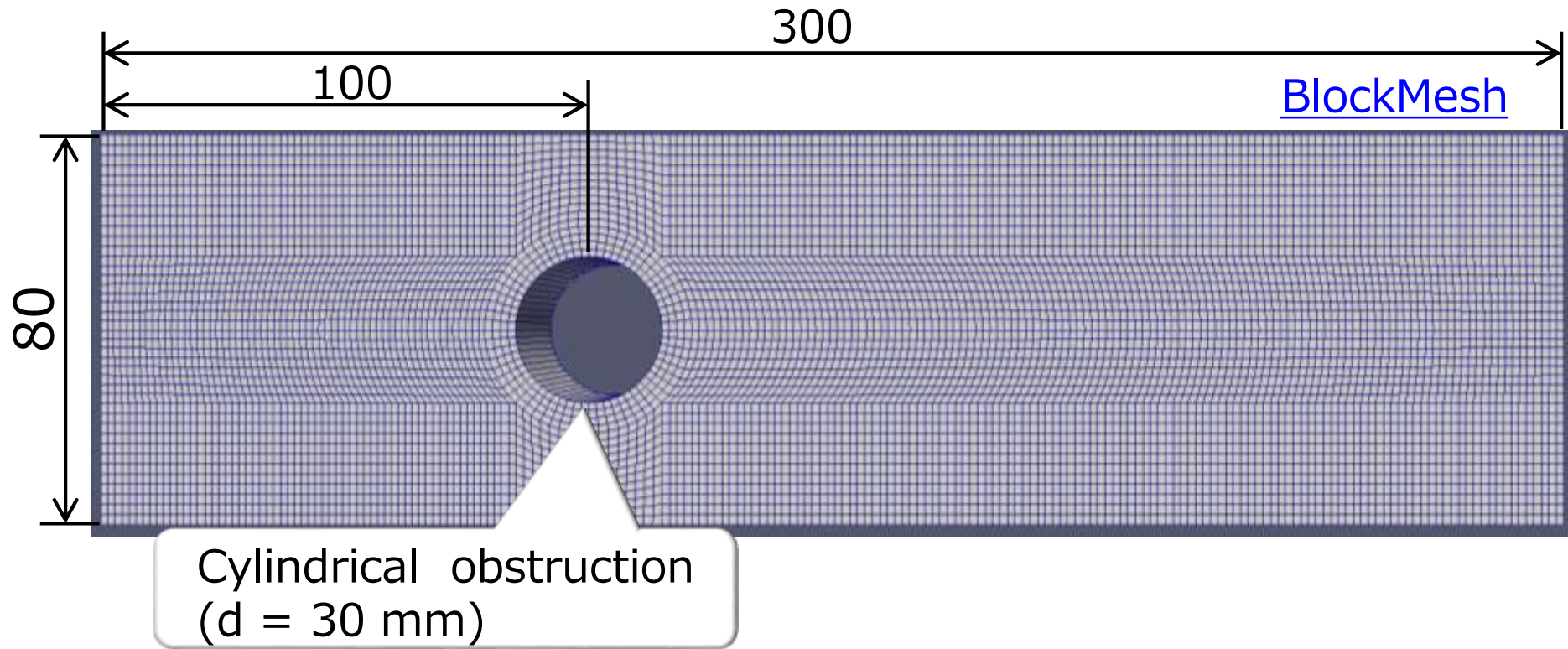
研究目的：

流れの脈動による熱機器における省電力化への可能性の検証

➤ 実験的検証
(伝熱実験・流れの可視化)

➤ 解析的検証
(OpenFOAMの活用)

OpenFOAM計算モデル：



CFD Code

OpenFOAM Ver. 2.3.0

Computer

Ubuntu 13.10 or 14.04 LTS

Intel Core i7 4770K (3.5GHz x 4 Core)

16GB or 32GB Memory

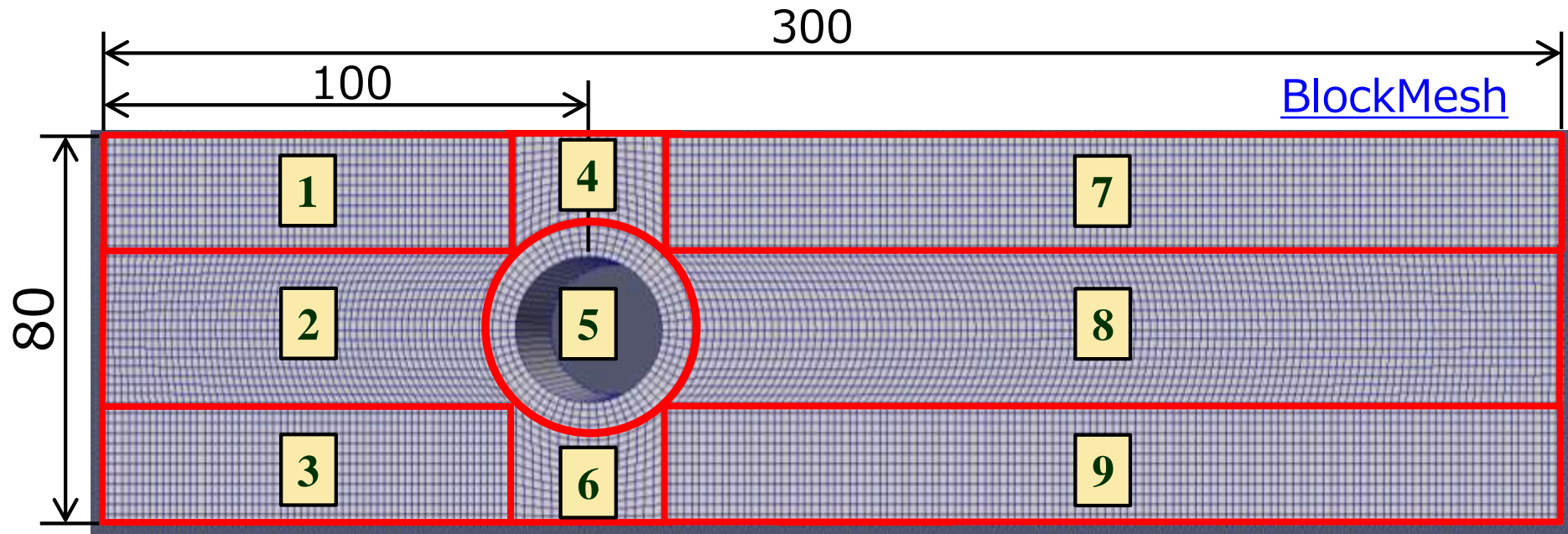
Mesh generator

BlockMesh

Mesh number

7840 meshes

OpenFOAM計算モデル：



- 円柱まわりの境界層メッシュ生成 → 9領域に分けて生成.

ソルバ

- 流れ + 温度場解析

- 層流・非定常解析
- 解析時間：流れ開始から60秒
- 初期条件：全領域で $\vec{u} = 0$

arranged icoFoam ※

(icoFoamにEnergy方程式を組み込んだ改造ソルバ)

※OpenCAE勉強会@富山 第19回講義内容 (2014.3.23)

OpenFOAM計算モデル：

境界条件 (流れ場)

<Wall> $\vec{u} = 0$.

<Wall> $\vec{u} = 0$.

<Wall> $\vec{u} = 0$.

<Inlet>

Uniform flow (fixedValue)
Pulsation (Velocity is changed)

<Outlet>

Velocity: Free (ZeroGradient)
Pressure: $P = 0$

- 入口：
 - 一様流の場合 : 一様流速 (流れ方向流速を規定)
 - 脈動流の場合 : 流速を時間毎に変化 (テキストベース入力)
- 出口 : 自由流出
- 壁面 : 滑りなし摩擦境界
- 筐体厚み方向 (画面手前&奥) : Empty (2次元仮定)

OpenFOAM計算モデル：

境界条件（脈動テキストベース入力）

```
*U x
/*-----* C++ -*-----*/
=====
Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  Version: 1.7.1
And        Web: www.OpenFOAM.com
Manipulation
**-----**
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        volVectorField;
  object       U;
}
// *****

dimensions    [0 1 -1 0 0 0];

internalField uniform (0 0 0);

boundaryField
{
  inlet
  {
    type            uniformFixedValue;
    uniformValue    tableFile;
    tableFileCoeffs
    {
      fileName      "$FOAM_CASE/U";
      outOfBounds    clamp;
    }
  }

  outlet
  {
    type            zeroGradient;
    //value          uniform (0.04 0 0);
  }

  nonslipWall
  {
    type            fixedValue;
    value           uniform (0 0 0);
  }

  cylinderWall
  {

```

```
*U x
(
  ( 0 ( 0.00000 0.000 0.000 ) )
  ( 0.01 ( 0.00015 0.000 0.000 ) )
  ( 0.02 ( 0.00060 0.000 0.000 ) )
  ( 0.03 ( 0.00136 0.000 0.000 ) )
  ( 0.04 ( 0.00240 0.000 0.000 ) )
  ( 0.05 ( 0.00374 0.000 0.000 ) )
  ( 0.06 ( 0.00537 0.000 0.000 ) )
  ( 0.07 ( 0.00728 0.000 0.000 ) )
  ( 0.08 ( 0.00946 0.000 0.000 ) )
  ( 0.09 ( 0.01191 0.000 0.000 ) )
  ( 0.1 ( 0.01461 0.000 0.000 ) )
  ( 0.11 ( 0.01756 0.000 0.000 ) )
  ( 0.12 ( 0.02073 0.000 0.000 ) )
  ( 0.13 ( 0.02413 0.000 0.000 ) )
  ( 0.14 ( 0.02774 0.000 0.000 ) )
  ( 0.15 ( 0.03153 0.000 0.000 ) )
  ( 0.16 ( 0.03551 0.000 0.000 ) )
  ( 0.17 ( 0.03965 0.000 0.000 ) )
  ( 0.18 ( 0.04393 0.000 0.000 ) )
  ( 0.19 ( 0.04834 0.000 0.000 ) )
  ( 0.2 ( 0.05286 0.000 0.000 ) )
  ( 0.21 ( 0.05748 0.000 0.000 ) )
  ( 0.22 ( 0.06217 0.000 0.000 ) )
  ( 0.23 ( 0.06691 0.000 0.000 ) )
  ( 0.24 ( 0.07170 0.000 0.000 ) )
  ( 0.25 ( 0.07650 0.000 0.000 ) )
  ( 0.26 ( 0.08130 0.000 0.000 ) )
  ( 0.27 ( 0.08609 0.000 0.000 ) )
  ( 0.28 ( 0.09083 0.000 0.000 ) )
  ( 0.29 ( 0.09552 0.000 0.000 ) )
  ( 0.3 ( 0.10014 0.000 0.000 ) )
  ( 0.31 ( 0.10466 0.000 0.000 ) )
  ( 0.32 ( 0.10907 0.000 0.000 ) )
  ( 0.33 ( 0.11335 0.000 0.000 ) )
  ( 0.34 ( 0.11749 0.000 0.000 ) )
  ( 0.35 ( 0.12147 0.000 0.000 ) )
  ( 0.36 ( 0.12526 0.000 0.000 ) )
  ( 0.37 ( 0.12887 0.000 0.000 ) )
  ( 0.38 ( 0.13227 0.000 0.000 ) )
  ( 0.39 ( 0.13544 0.000 0.000 ) )
  ( 0.4 ( 0.13839 0.000 0.000 ) )
  ( 0.41 ( 0.14109 0.000 0.000 ) )
  ( 0.42 ( 0.14354 0.000 0.000 ) )
  ( 0.43 ( 0.14572 0.000 0.000 ) )
  ( 0.44 ( 0.14763 0.000 0.000 ) )

```

時間・流速成分 (x,y,z) の順

OpenFOAM計算モデル：

境界条件 (温度場)

<Wall> zerogradient

<Wall> T = 318 K

<Wall> zerogradient

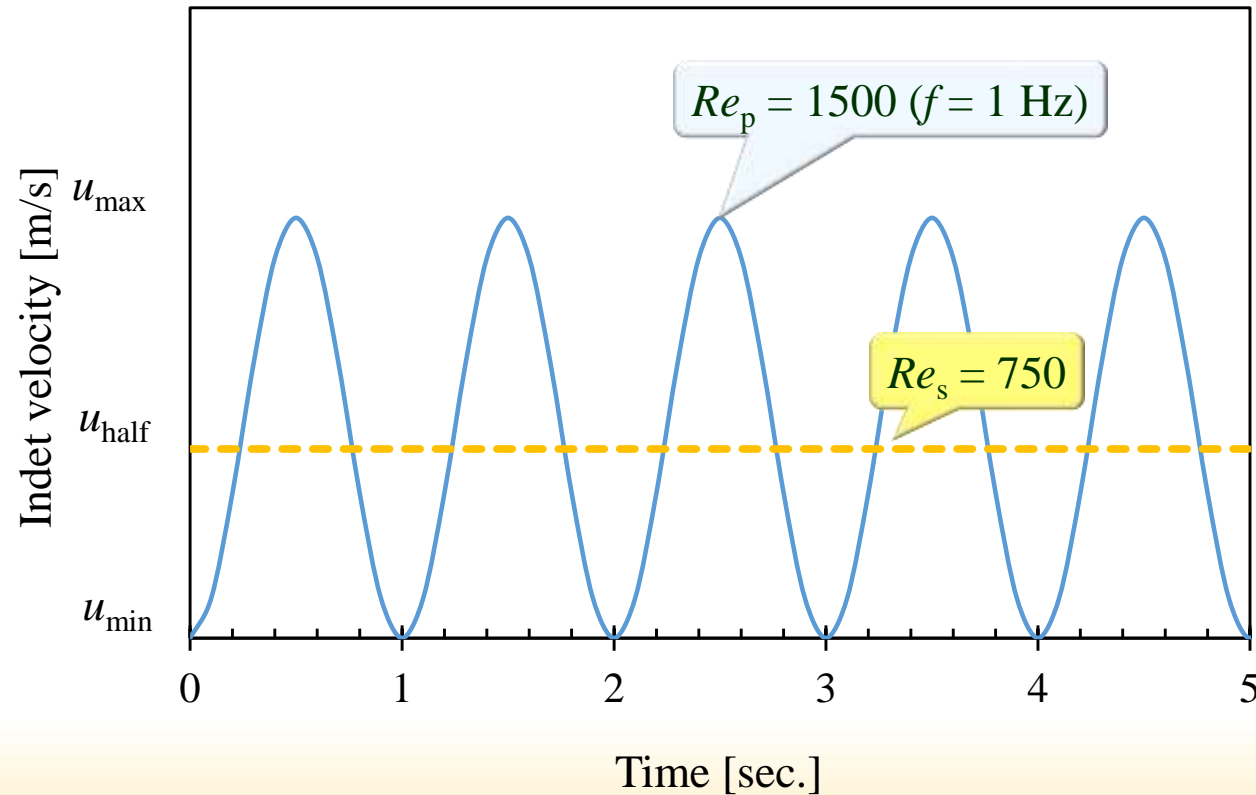
<Inlet>
T = 298 K

<Outlet>
ZeroGradient (自由流出)

- 入口 : T = 298 K
- 出口 : 自由流出
- ロッド側面 : T = 318 K
- 壁面 : 断熱
- 筐体厚み方向 (画面手前&奥) : Empty (2次元仮定)

脈動波形，解析条件：

脈動波形



入口脈動波形の式

$$u_p(t) = 0.5 \sin(2\pi ft - 0.5\pi) + 0.5u_{\max}$$

解析条件

CFD code	OpenFOAM Ver. 2.3.0
Re_p / f	1500 / 1 Hz
Re_s	750
Mesh number	7839
Calculating time	60 sec.

f [-] : 脈動周期
 t [-] : 計算時間
 u_p [-] : 脈動流速
 u_{\max} [-] : 最大脈動流
 u_s [-] : 定常流速

評価方法：

Nusselt数

$$Nu_{\theta} = \frac{\Delta T^{+}}{n^{+}}$$

$$T^{+} = \frac{T - T_{in}}{T_{rod} - T_{in}}$$

$$Nu_m = \frac{1}{A} \int_A Nu_{\theta} dA = \frac{1}{64} \sum_{\theta=1}^{64} Nu_{\theta}$$

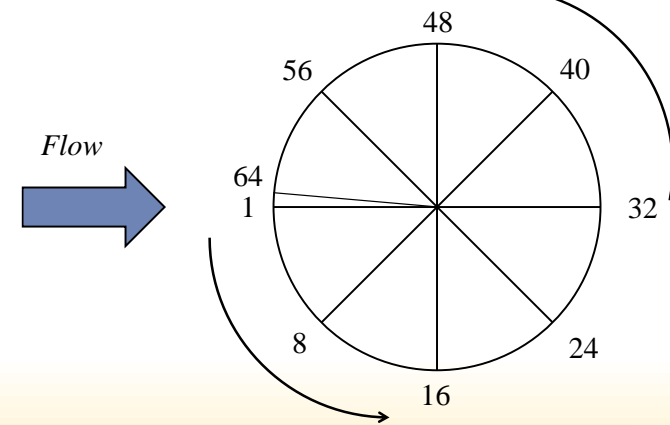
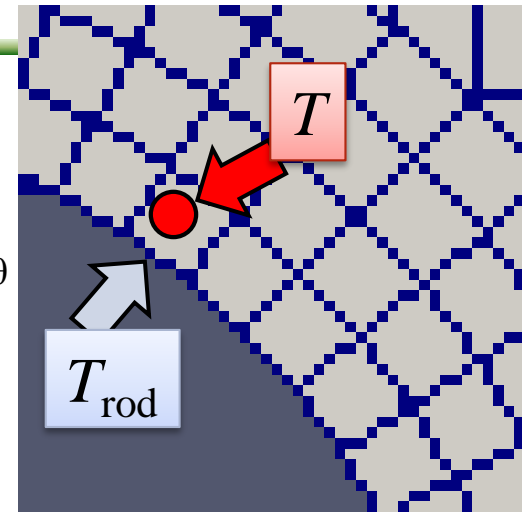
$$\Delta T^{+} = 1 - T^{+}$$

$$n^{+} = \frac{n}{2d}$$

Reynolds数

$$Re_p = \frac{u_{max} d_d}{\nu}$$

$$Re_s = \frac{u_s d_d}{\nu}$$



T [K]: 円柱障害物周りの局所温度

T_{in} [K]: 流入空気温度

T_{rod} [K]: 円柱障害物温度

n [m]: 障害物周りの単位セル長さ

d_d [m]: 水力等価直径

d [m]: 円柱直径

Re_p [-]: 脈動流におけるReynolds数

Re_s [-]: 定常流におけるReynolds数

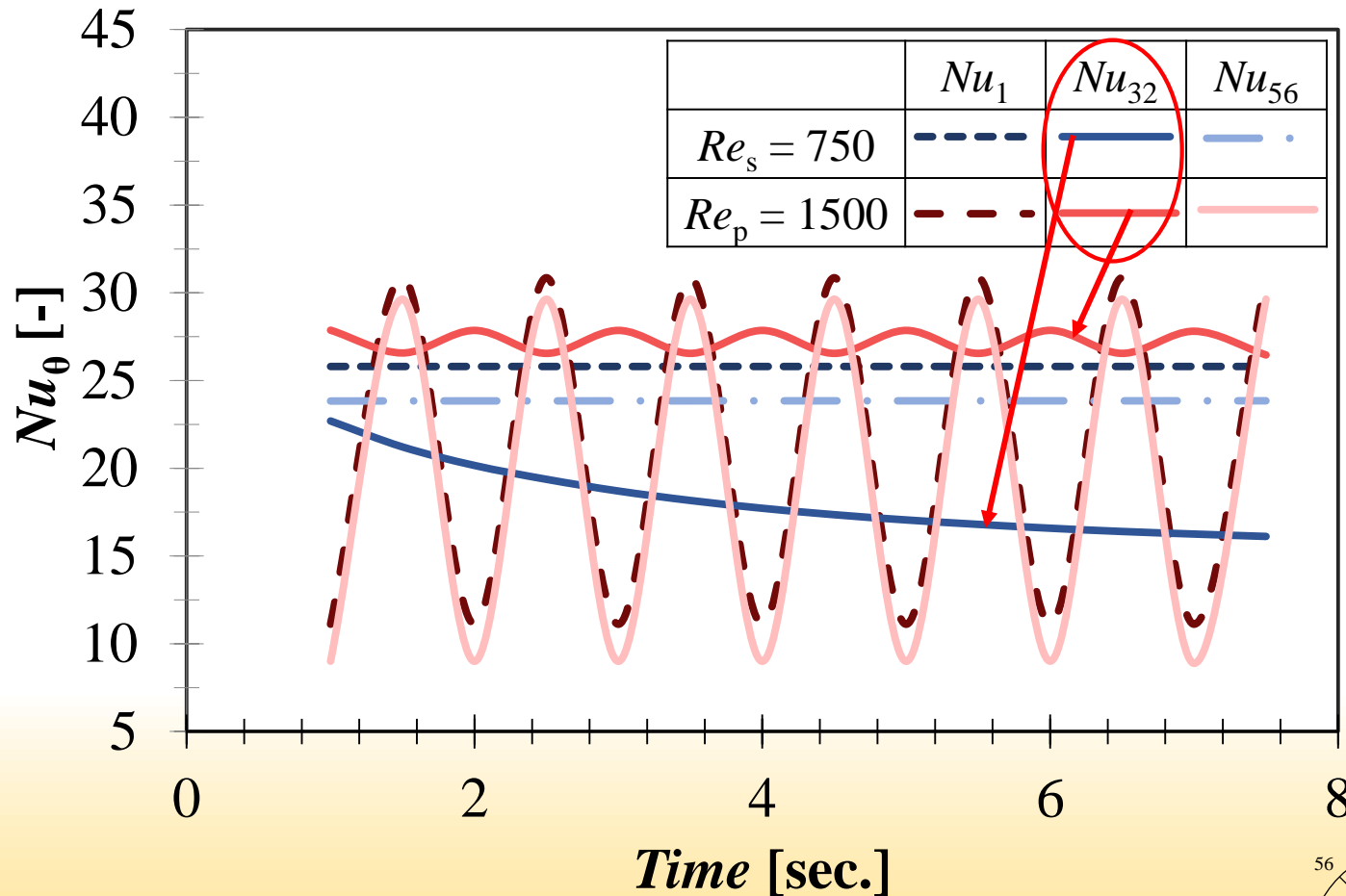
u_{max} [m/s]: 脈動流における最大流速

u_s [m/s]: 定常流の流速

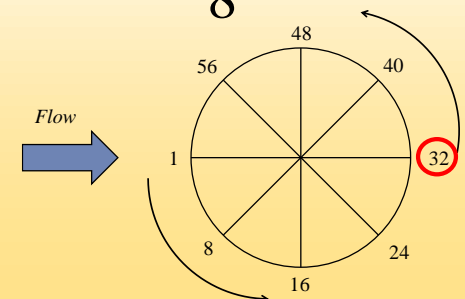
ν [m²/s]: 空気の動粘度

流れ場解析結果：(定常流との比較)

解析開始直後の発達期間 ($t = 1.0 \sim 7.5$ s) における局所Nusselt数

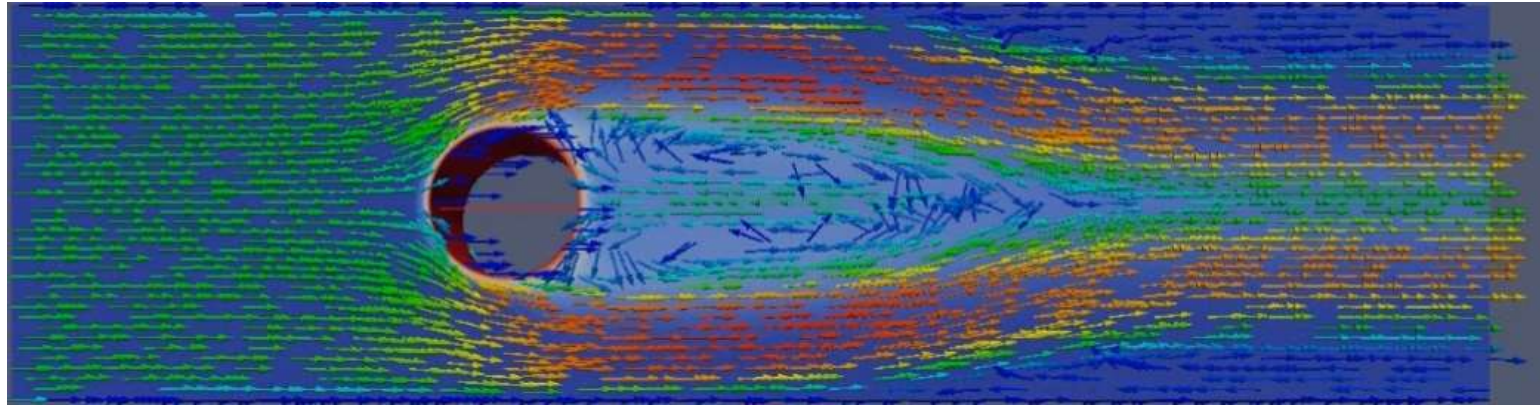


解析開始直後の発達期間において、円柱背面の局所Nusselt数は脈動流を付与した方が高い

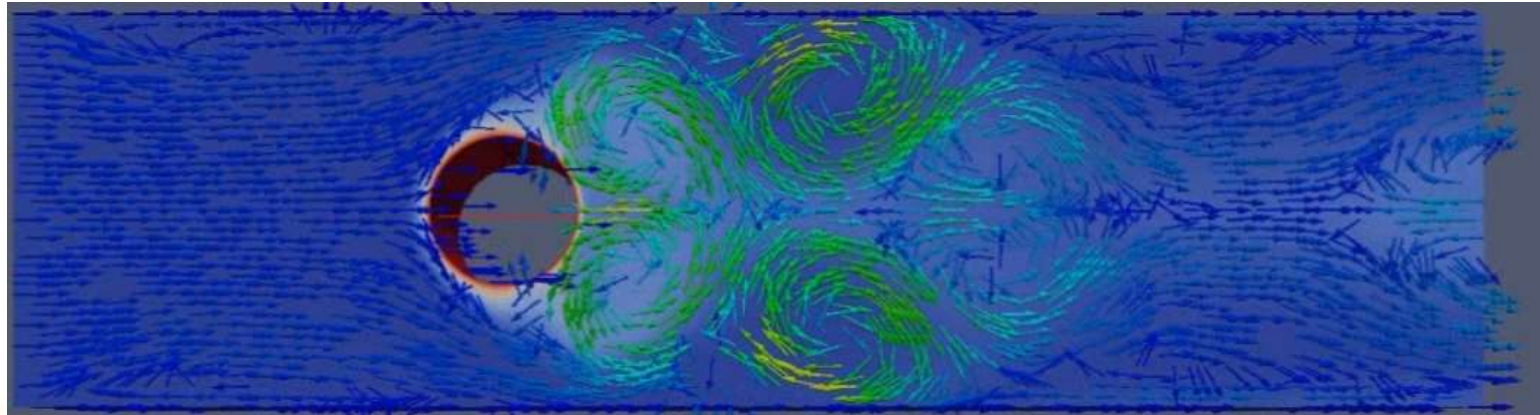


流れ場解析結果：(定常流との比較)

Steady
flow:



Pulsating
flow:

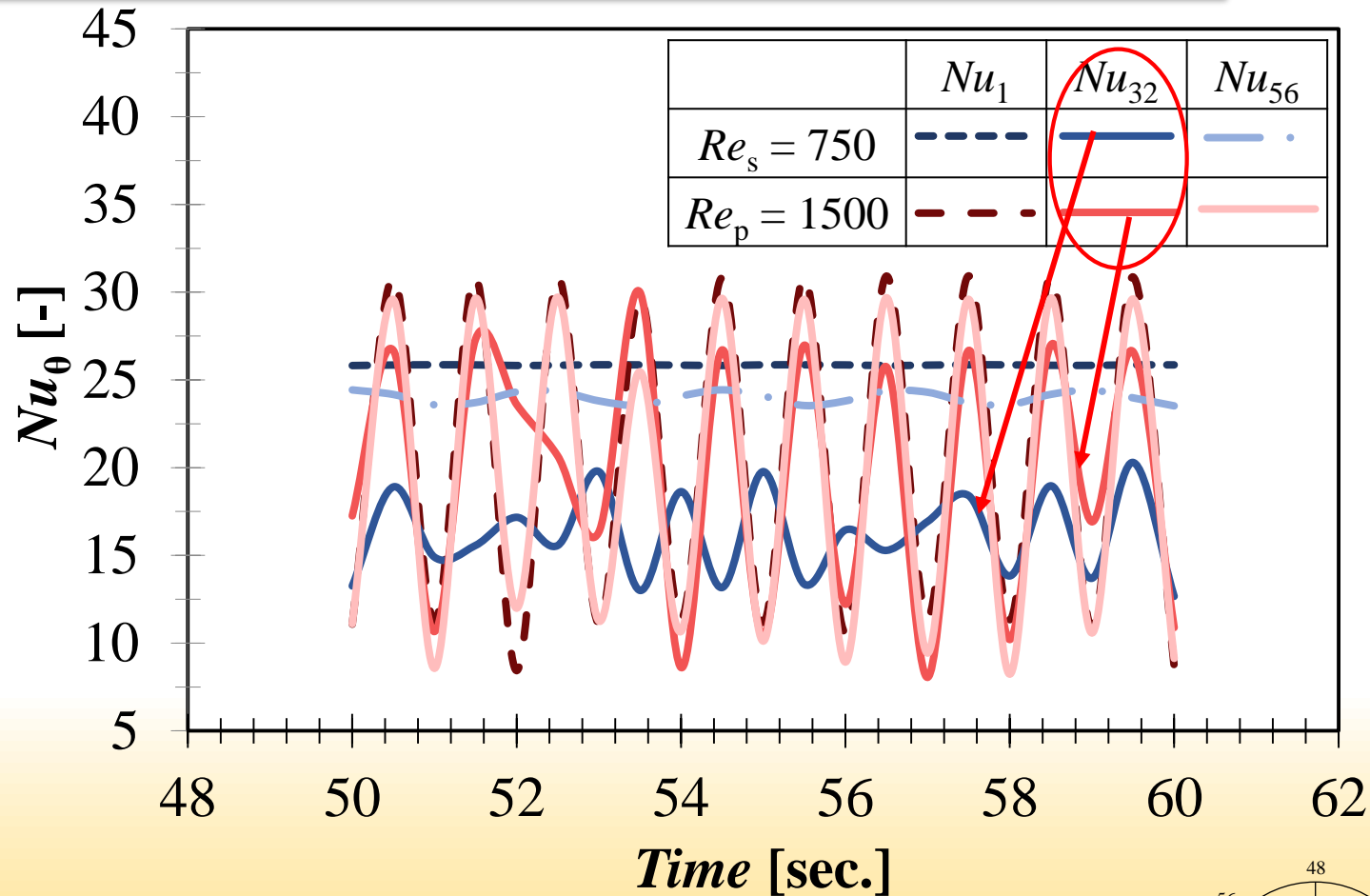


解析開始直後の発達期間 ($t = 1.0 \sim 7.5$ s)

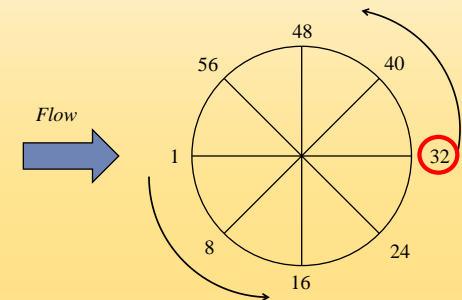
- ▶ 脈動流の場合：減速周期において主流からの逆流がロッド背後の剥離域に流れ込み、ロッド背面に衝突。衝突した高温の空気は主流に掃き出される
- ▶ 定常流の場合：円柱背後に剥離域が発生し、流れが停滞する

流れ場解析結果：(定常流との比較)

流れが発達した状態 ($t = 50.0 \sim 60.0$ s) における局所Nusselt数

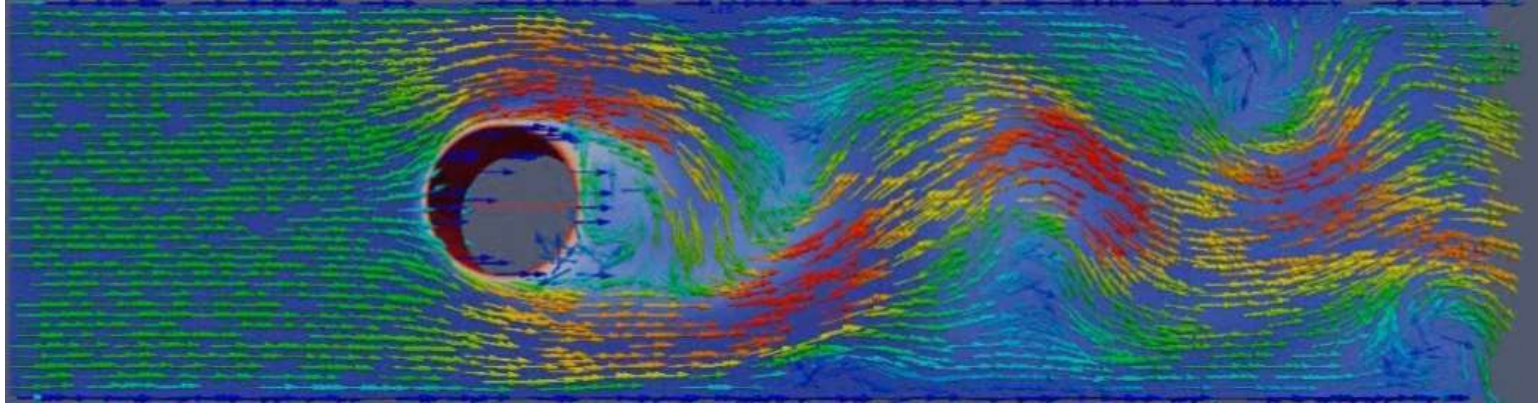


流れが発達した状態になると、
円柱背面の時間平均局所Nusselt数は
脈動流と定常流で大差がなくなる

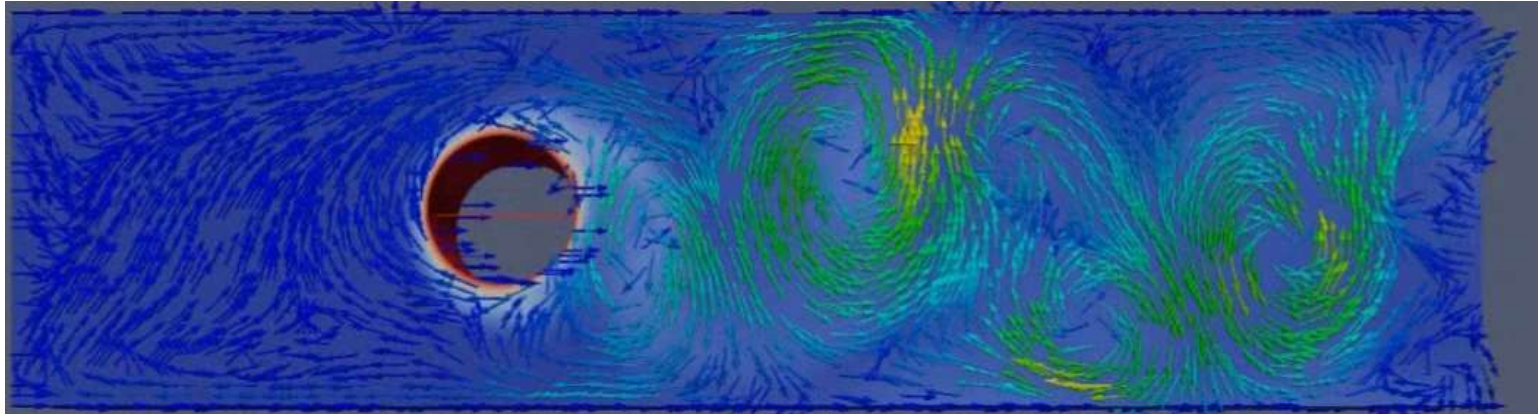


流れ場解析結果：(定常流との比較)

Steady
flow:



Pulsating
flow:

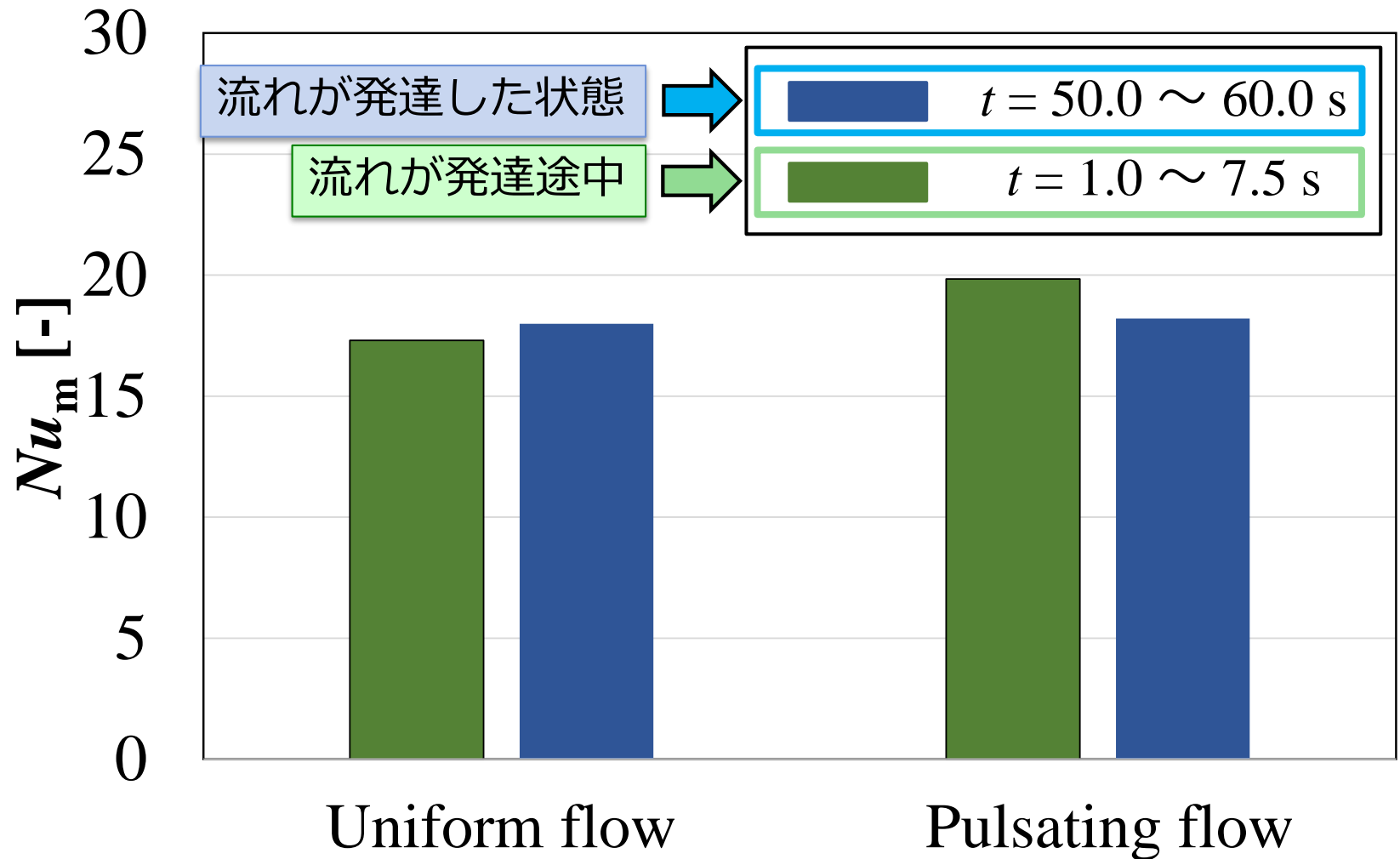


流れが発達した状態 ($t = 50.0 \sim 60.0$ s)

- 定常流の場合：円柱背面にKarman渦が発生することで、円柱背面の剥離域に流体が流れ込む
→熱伝達率が $t = 1.0 \sim 7.5$ sの時に比べ改善される
- 脈動流の場合：Karman渦が発生することで、脈動流による影響が小さくなる
→熱伝達率が $t = 1.0 \sim 7.5$ sの時に比べ低下する

流れ場解析結果：(定常流との比較)

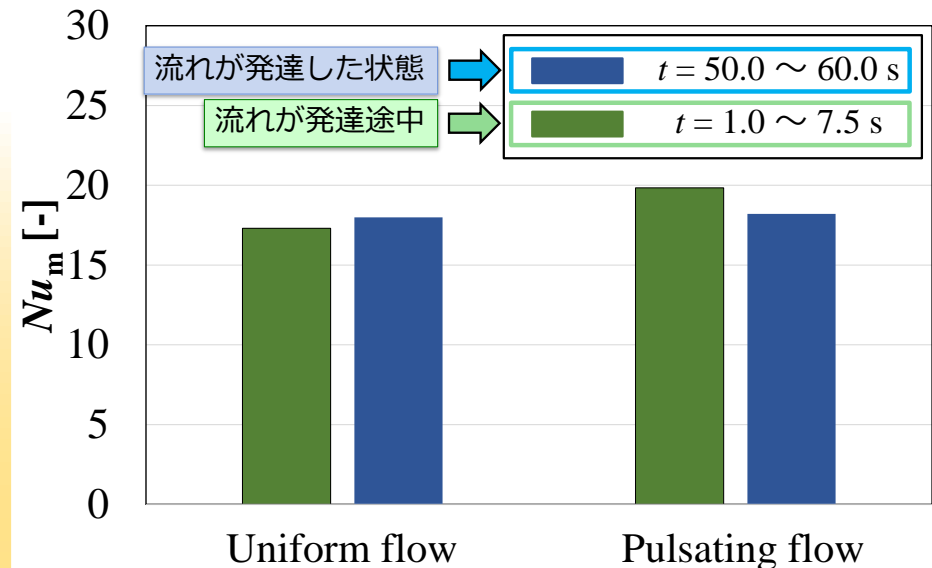
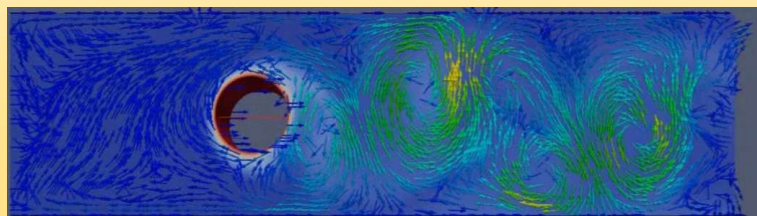
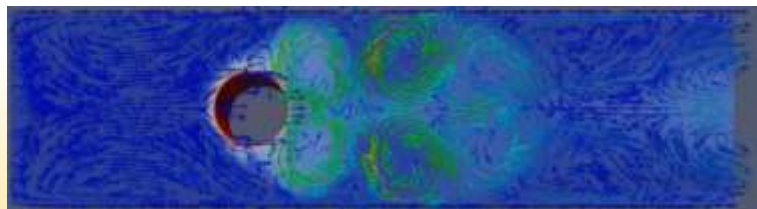
定常流と脈動流の平均Nusselt数の時間平均



流れ場解析結果：(定常流との比較)

定常流と脈動流の平均Nusselt数の時間平均

- 流れが発達中で、双子渦がロッド後方に形成される場合平均Nusselt数を比較すると脈動流を付与した場合の方が伝熱性能が15%も改善.
- Karman渦が生成されるような発達した流れの場合は、脈動流と定常流で伝熱性能に大きな差がなくなる.



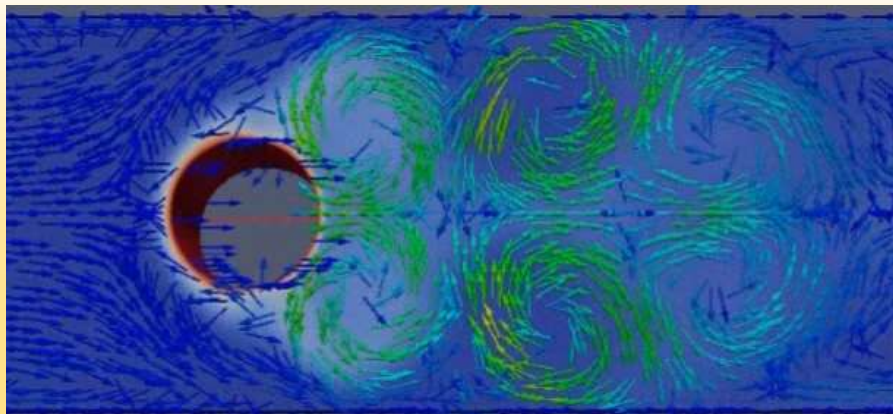
まとめ：

- 円柱周りに誘起した脈動流の伝熱特性について、OpenFOAMによる解析を行い評価。
- 伝熱促進に効果的な脈動流の制御指針について議論。



- 流れの発達段階において、脈動流を付与した場合、時間平均流量が同じ定常流に比べ伝熱性能が高い。
- 流れが発達してKarman渦が生成されると脈動流と定常流の伝熱性能に大差が無くなる。

発達段階



Karman渦形成後

