

3D cine PC-MR 血流速度測定を用いた CFD血流解析の正確な流入境界条件 の決定法

東京工業大学 大西 有希, 青木 康平, 天谷 賢治,

(株)アールテック 清水 利恭,

名古屋大学 磯田 治夫,

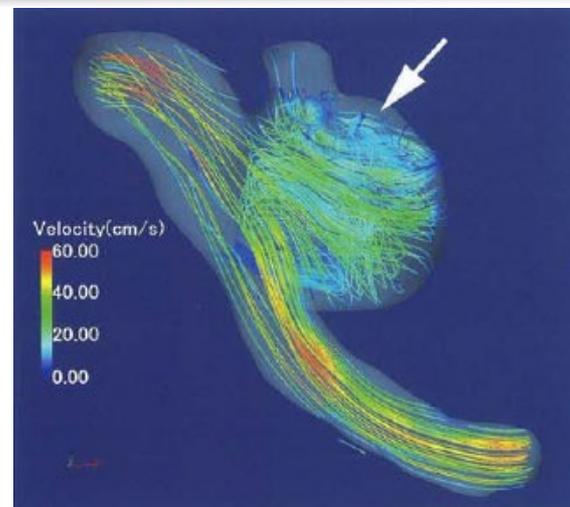
浜松医科大学 竹原 康雄,

(株)アールテック 小杉 隆司.



はじめに

脳動脈瘤の破裂危険性などを定量的に評価する診断手法として「患者固有CFD血流解析」の実現が期待されている。



★CFD血流解析の三大要件★

1. 血管形状の抽出
2. 血液粘性モデルの設定
3. 流入出境界条件の決定

いずれが不正確でも
CFD血流解析は
実用たり得ない

本発表は「**3. 流入出境界条件の決定**」
に焦点を合わせる。

(残る1. と2. については, 3つ後の講演にて発表)



研究背景と動機

【流入出境界条件決定法の現状】

- 標準的とされる流量を与える
- WSSが標準的な値となるような流量を与える
- 上記流量をWomersly流速プロファイルで与える

→ 物理的根拠に乏しい

- 2D cine PC-MRで測定した断面流速分布を与える

→ 測定誤差が大き過ぎる



流入出境界条件を正確に決定する方法は
未だ確立されていない



研究目的

【研究目的】

3D cine PC-MR (4D-Flow) を用いることにより、
CFD 血流解析の 正確な 流入境界条件 (BC)
の決定法を提案する。

【本発表の流れ】

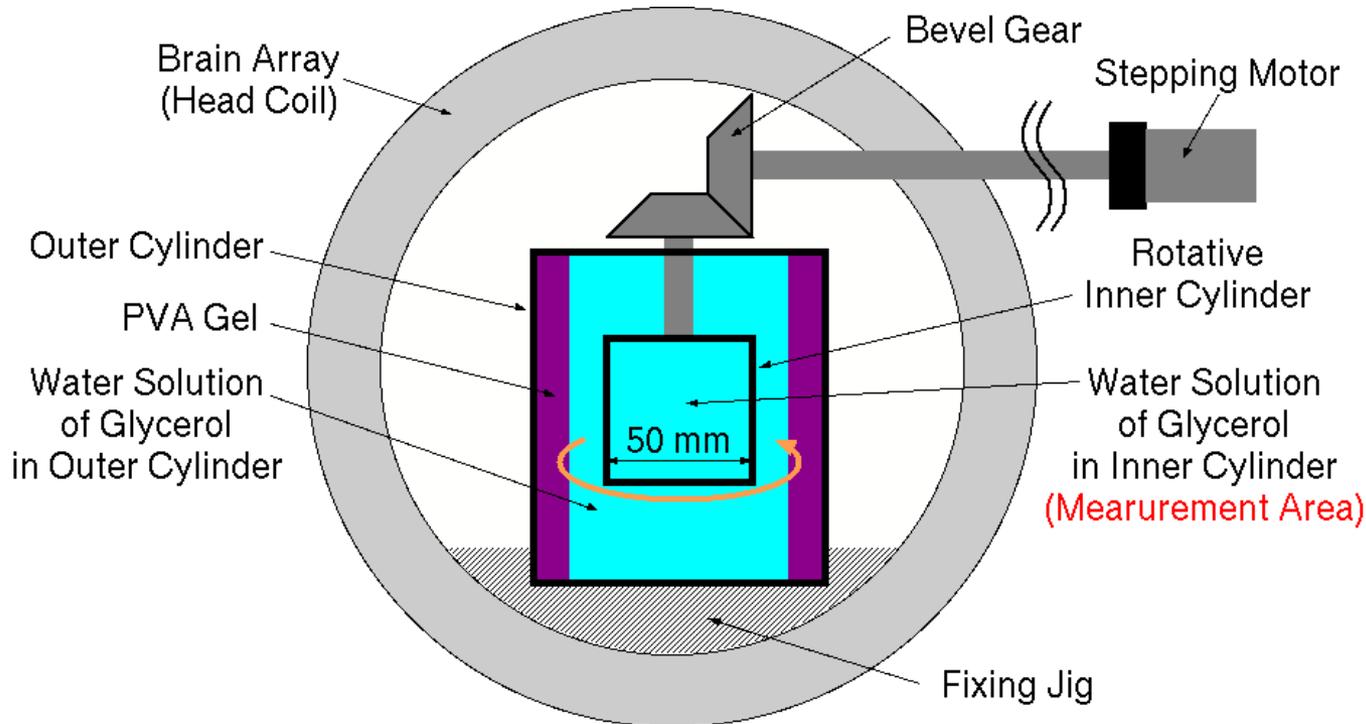
1. 4D-Flow 測定誤差評価実験
2. 提案する BC 決定法
3. 実験による検証
4. まとめ



4D-Flow測定誤差評価実験



4D-Flow測定誤差評価実験(装置)



■ 二重円筒から成る回転式ファントム

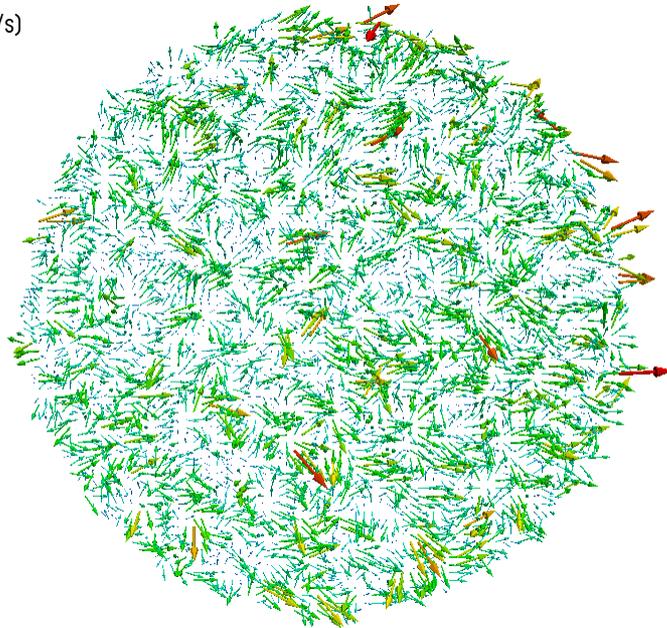
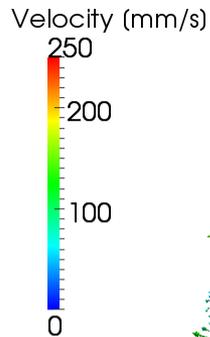
■ 40wt%グリセリン水溶液 (造影剤なし)

■ GEHC Signa HDxt 3.0T + 8ch Brain Array

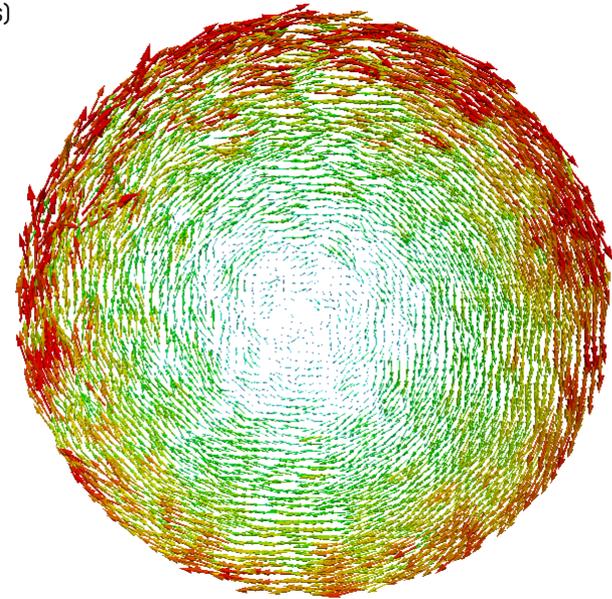
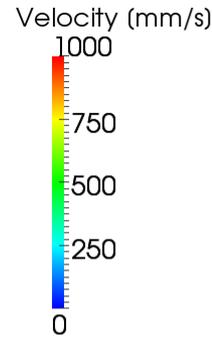
■ 内側円筒容器を剛体回転 ⇒ 流体も剛体回転

4D-Flow測定誤差評価実験(結果)

ある水平断面上の流速分布



回転速度が0 rpmの場合

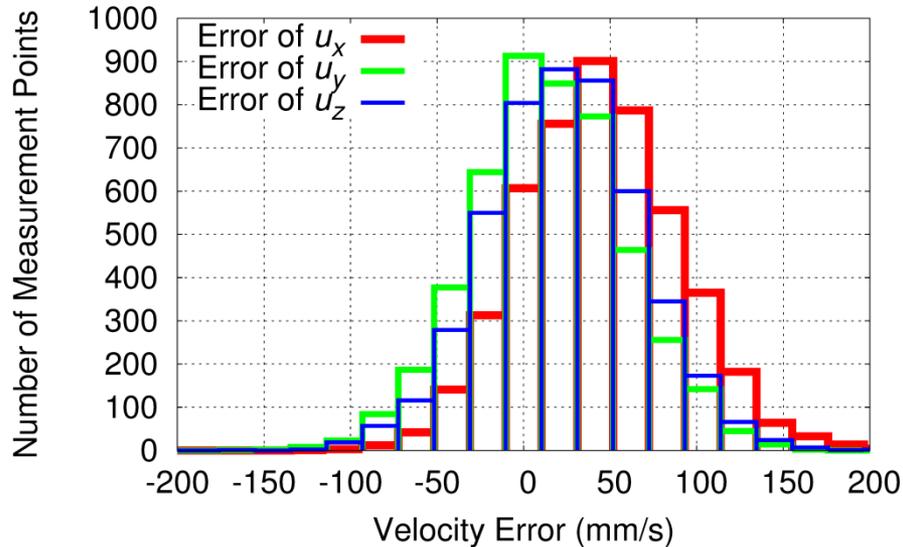


回転速度が360 rpmの場合

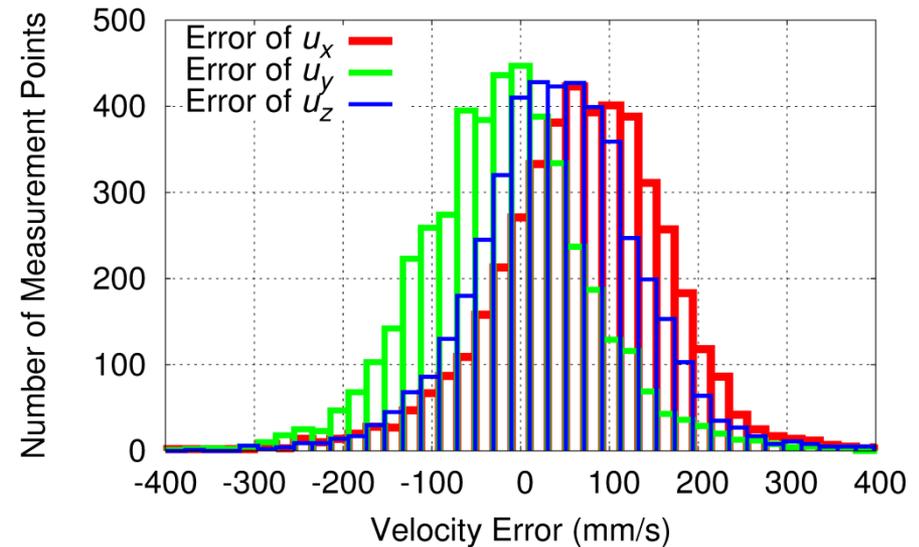
- 流れのおよその分布は測定出来ている
- 明らかに不正な流速点が多数存在する
- **ランダム誤差**が含まれているように見える

4D-Flow測定誤差評価実験(結果)

成分毎の測定誤差のヒストグラム



回転速度が0 rpmの場合



回転速度が360 rpmの場合

- $u_i^{\text{measured}} - u_i^{\text{exact}}$ ($i = x, y, z$) を計算
- 全成分で**平均値ほぼゼロの正規分布**をしている
- **分散は相当大きい**
(0 rpmで34.5 mm/s, 360 rpmで98.3 mm/s)

4D-Flow測定誤差評価実験(考察)

【実験から得られた知見】

1. 各ピクセルにおける4D-Flow測定流速の生データは大きな誤差を含んでおり, CFD血流解析の流入出境界条件として直接用いるには不適當である.
2. 大数の法則により, 多数の4D-Flow流速の生データを空間的に平均化したもの(例えば断面流量)は正確となることが期待できる.

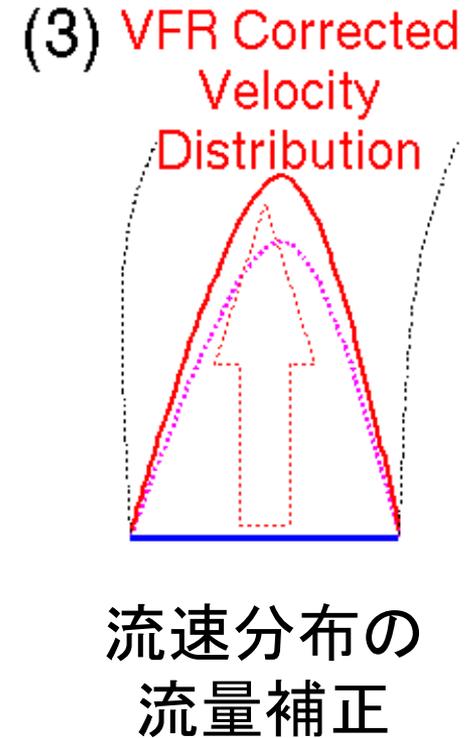
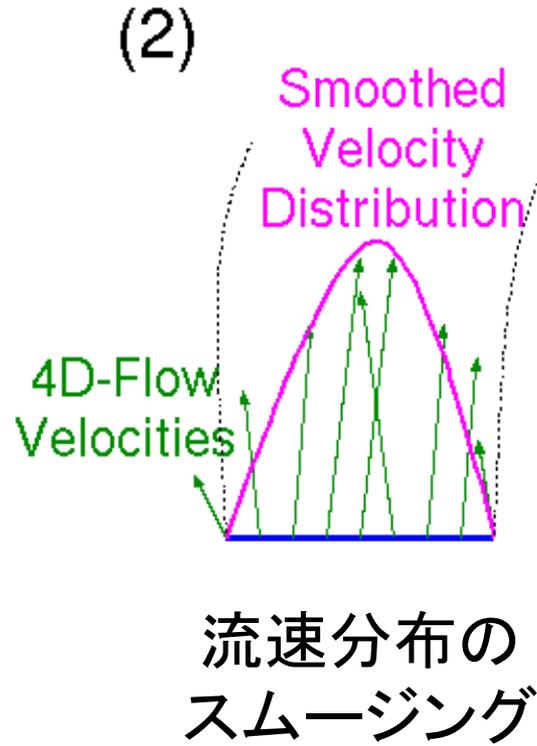
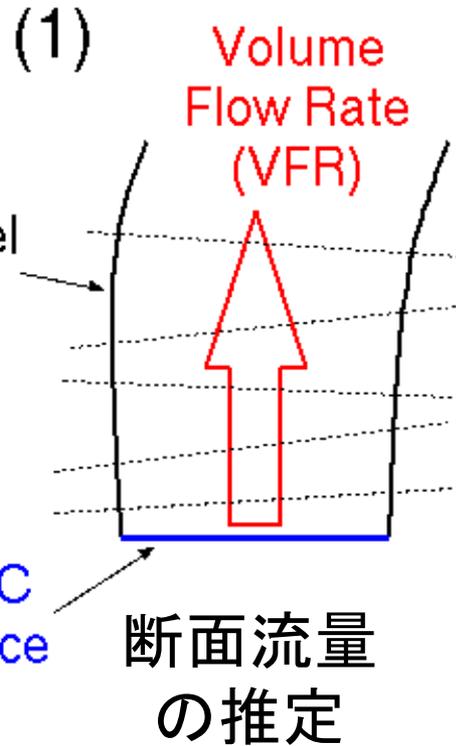


提案する流入出境界条件(BC)の決定法



提案するBC決定法

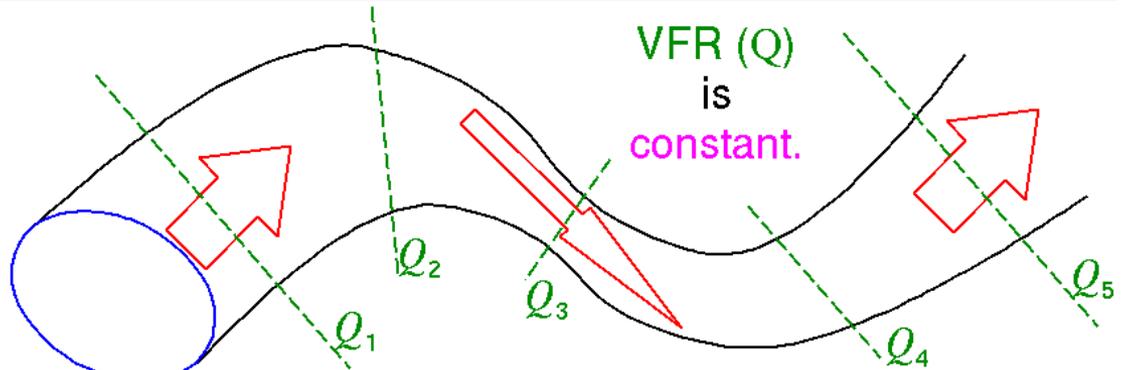
【決定手順】



決定手順(1) 断面流量の推定

【ポイント】

- 血液は非圧縮性流体とみなせる
 - 血流量に対して血管の膨張・収縮体積は充分小さい
- ⇒ 血管分岐が無い限り, 流量はあらゆる断面で等しい



【推定方法】

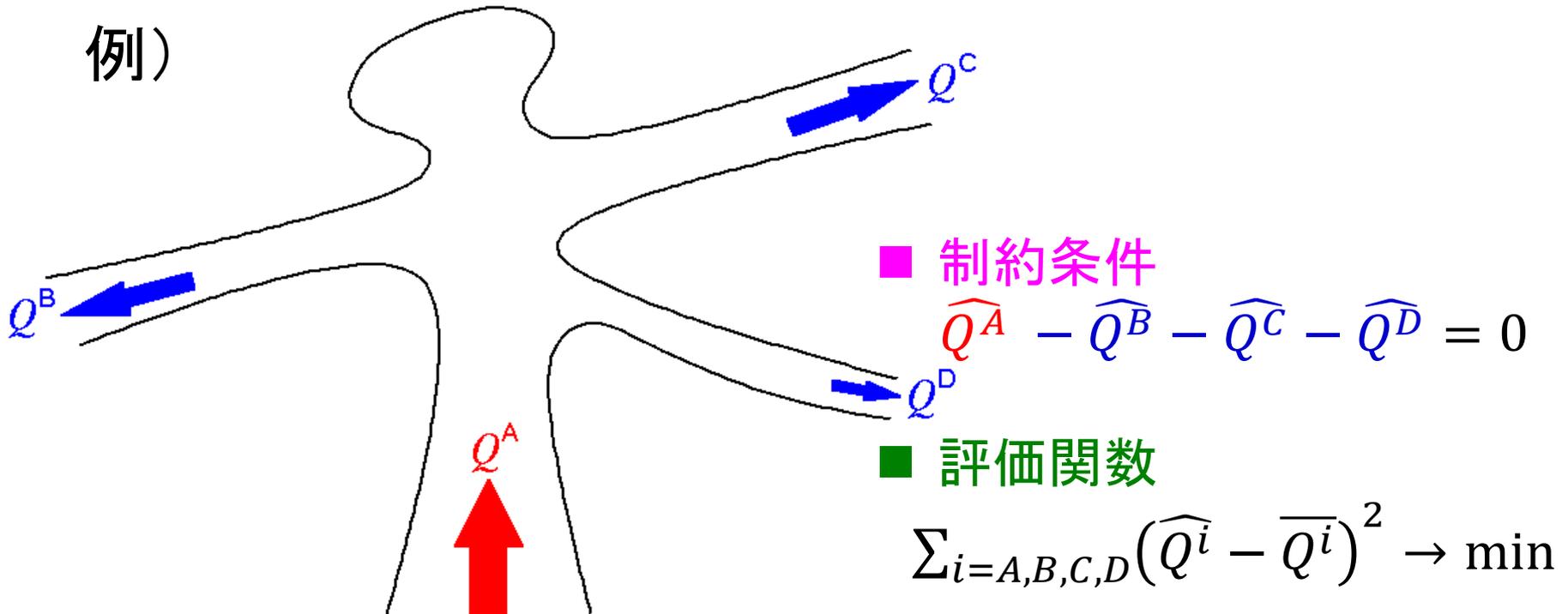
- BC面近傍に多数の**仮想断面**を作成
 - 各仮想断面の断面流量 Q_k ($k = 1 \sim N$) を計算
 - 全 Q_k の平均 \bar{Q} ($= \sum_{k=1}^N Q_k$) を計算する
- 大数の法則より, N を大きくすれば \bar{Q} は真値に収束

決定手順(1) 断面流量の推定

【推定方法の続き】

- 全流入出境界の流量の和がゼロとなるよう \bar{Q} に対して最小ノルム補正を行う。

例)



- 補正後の断面流量 \hat{Q} を推定値とする。

充分長く血管が撮影されている場合, \hat{Q} を流量BCで使用

決定手順(2) 流速分布のスムージング

【ポイント】

4D-Flow測定生データから得たBC面上の流速分布は
ギザギザ ⇒ ローパスフィルタでスムージング



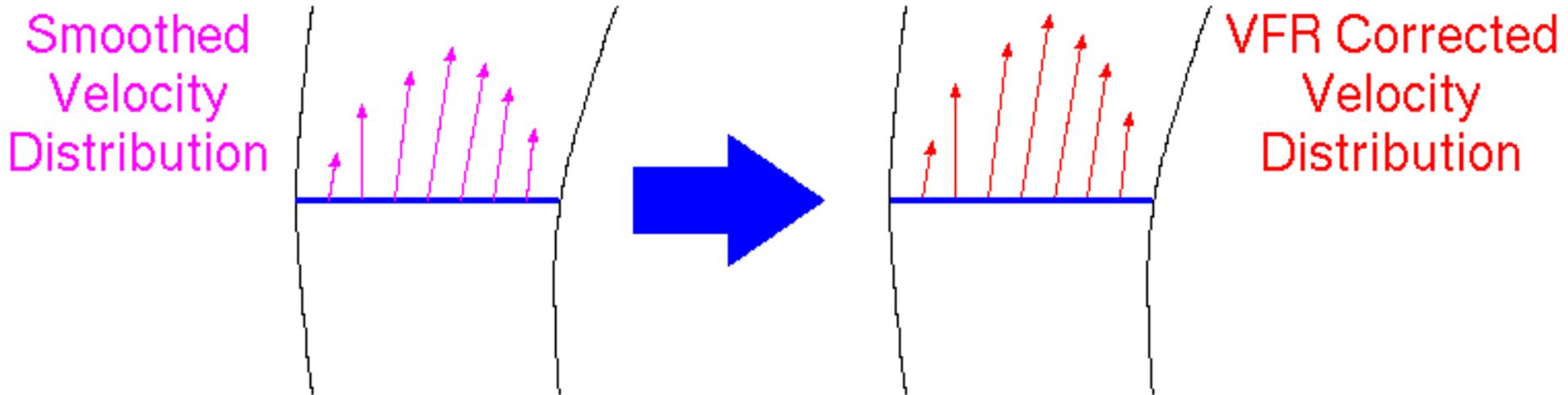
【スムージング手法】

- **移動最小二乗法 (MLS)** を使用
- BC面上のFVMコントロールポイントをMLS評価点

決定手順(3) 流速分布の流量補正

【ポイント】

- 手順(1)より, **正確な流量**が決定
 - 手順(2)より, およその**流速分布**が決定
- ⇒ 流速分布の流量を**正確な流量**に一致させる



【補正手法】

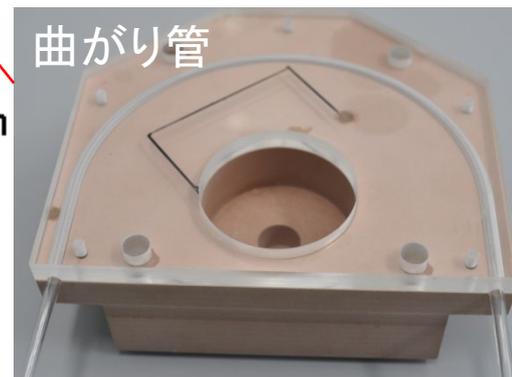
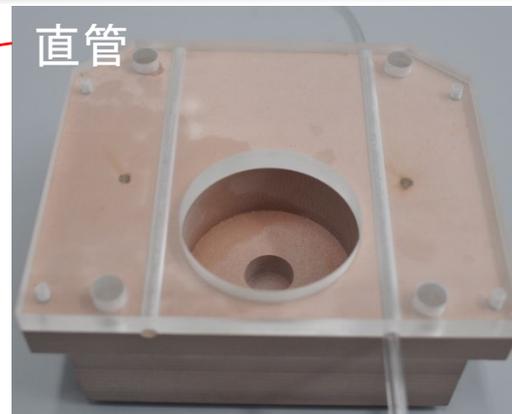
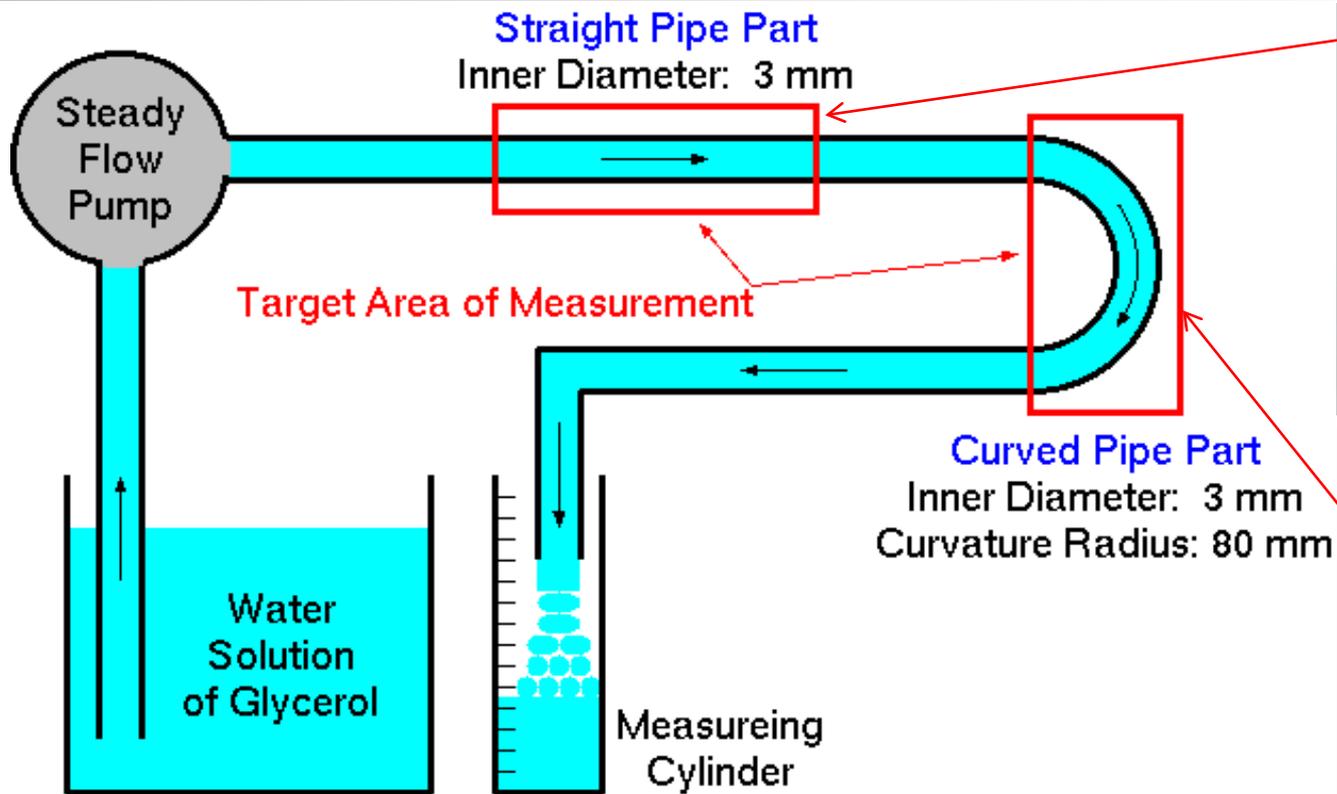
- 流速分布全体を定数倍するだけ

この流速分布を
流速BCとして
使用する

検証実験



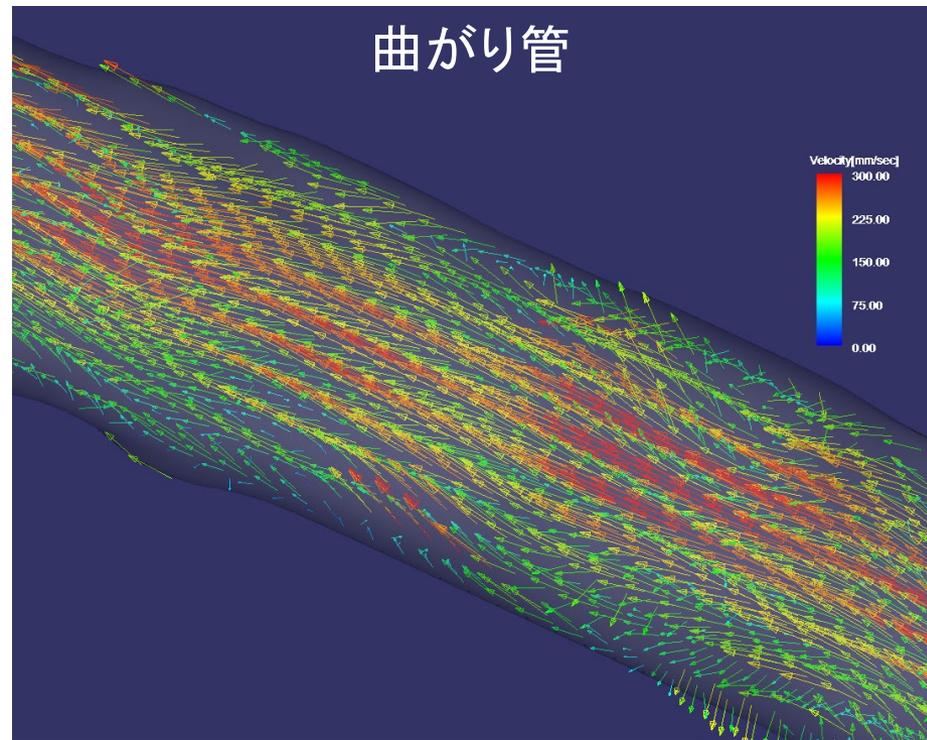
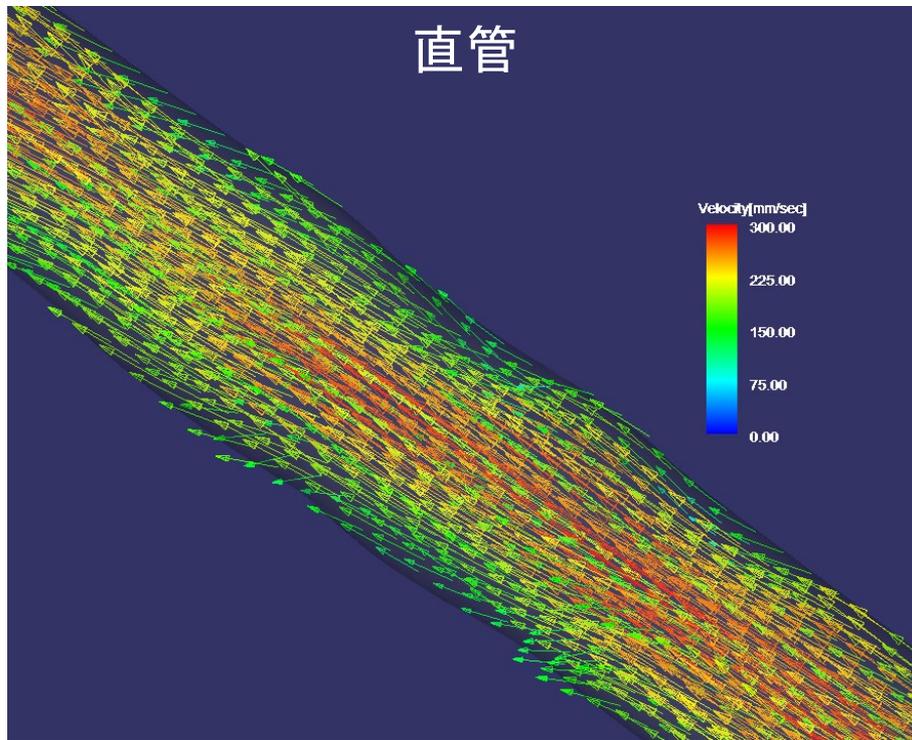
検証実験(装置)



- 内径3mmの直管と曲がり管を撮影
- 作動流体はグリセリン水溶液(造影剤なし)
- 定常流ポンプで定常層流を作成
- 流量をメスシリンダーで測定

検証実験(撮影結果)

4D-Flow流速ベクトル分布の生データ

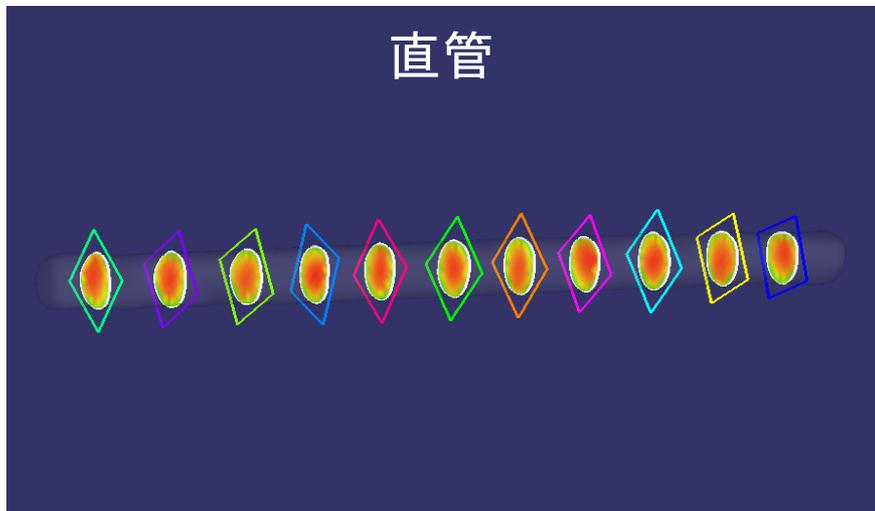


実際は層流であるが、まるで乱流に見える程
大きな測定誤差を含んでいる。

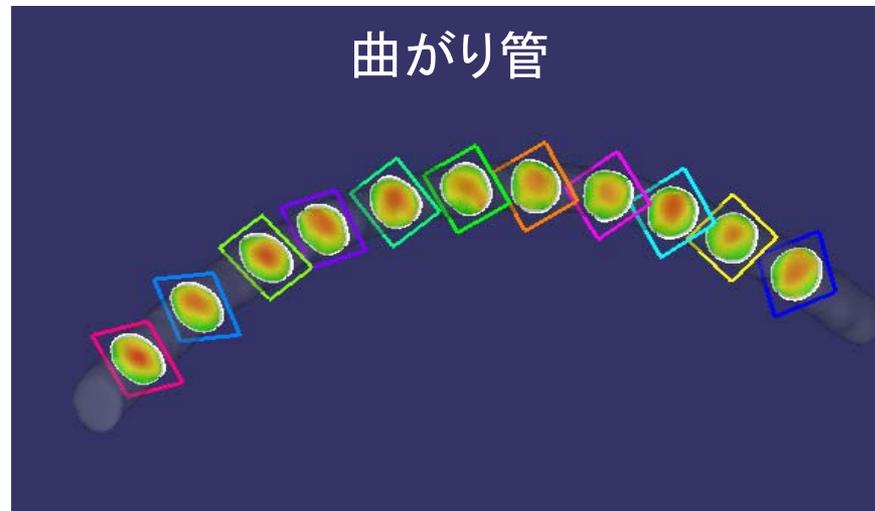
検証実験(流量の比較)

11個の仮想断面を用いて流量を推定

直管



曲がり管



正解流量 [mm³/s]

推定流量 [mm³/s]

誤差

直管

1150.1

1130.3

1.7%

曲がり管

1860.2

1882.9

1.2%

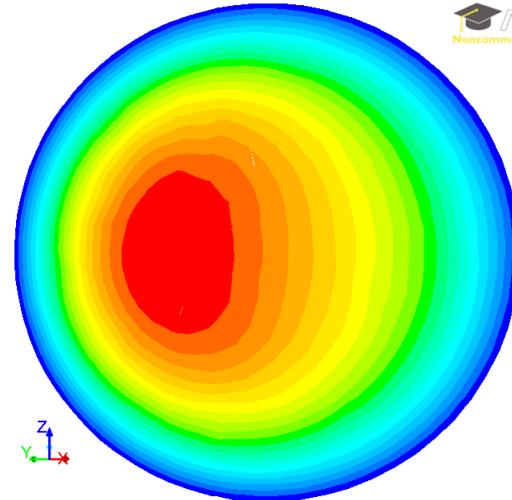
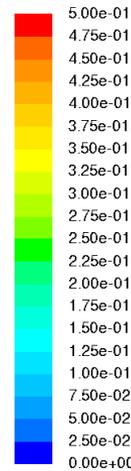
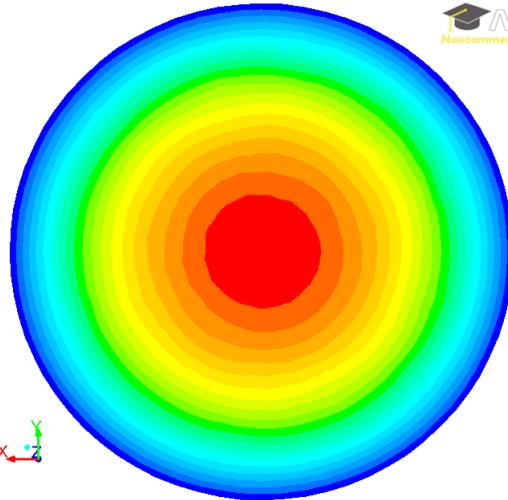
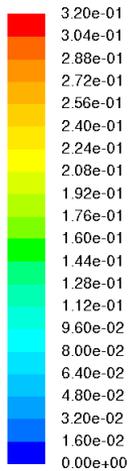
誤差 **2%**程度で**流量**が推定できた

検証実験(断面流速の比較)

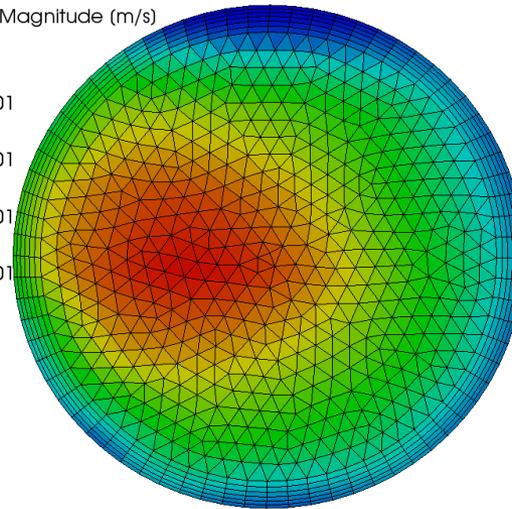
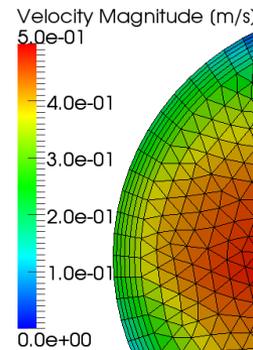
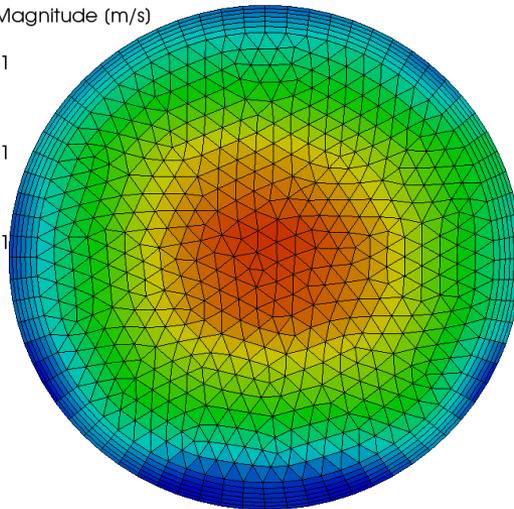
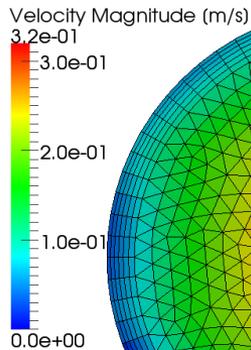
直管

曲がり管

正解



提案手法

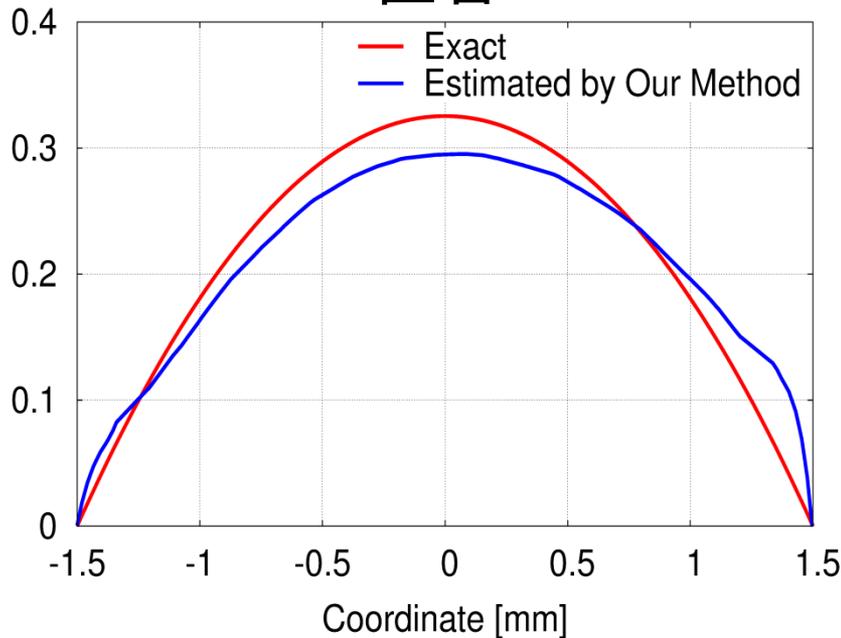


流速分布もそれなりに正解と合致している

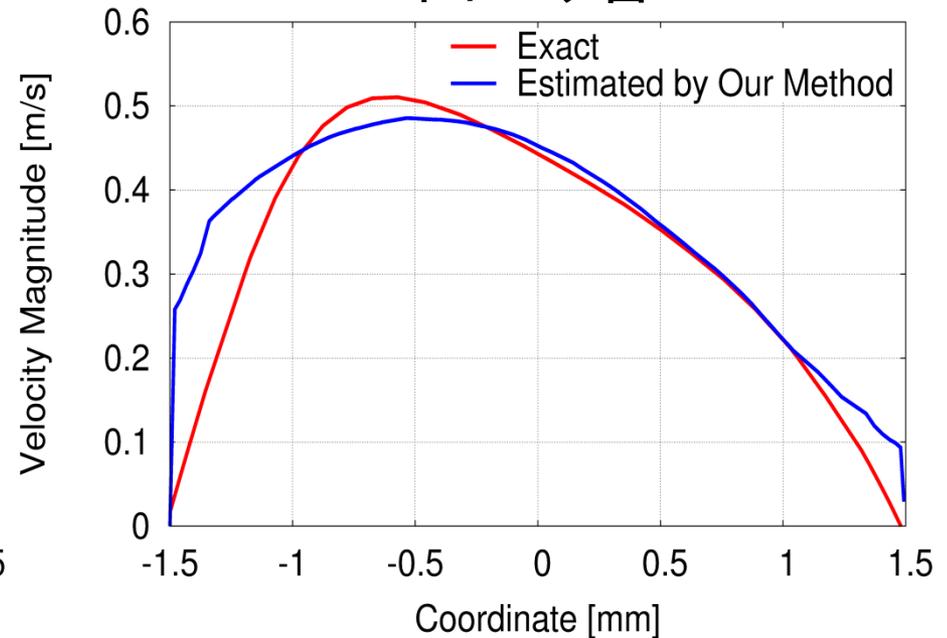


検証実験(断面流速の比較)

直管



曲がり管



流量は充分正確 + **流速分布**もそれなりに合致

短い助走距離で正確な流れと一致する

実用的に十分な精度で境界条件を決定出来ている

まとめ

まとめ

- 3D cine PC-MR (4D-Flow) を利用したCFD血流解析における正確な流入境界条件の決定法を提案した。
- 直管および曲がり管を用いて提案手法の精度検証実験を行い、**実用的に十分な精度を持つこと**を確認した。
- 本成果により、**CFD血流解析の三大要件の1つ**を満足させることが出来る。

残る2つの要件(形状抽出, 血液粘性)については
3つ後の講演で発表します。



付録



11断面流量の内訳の一例

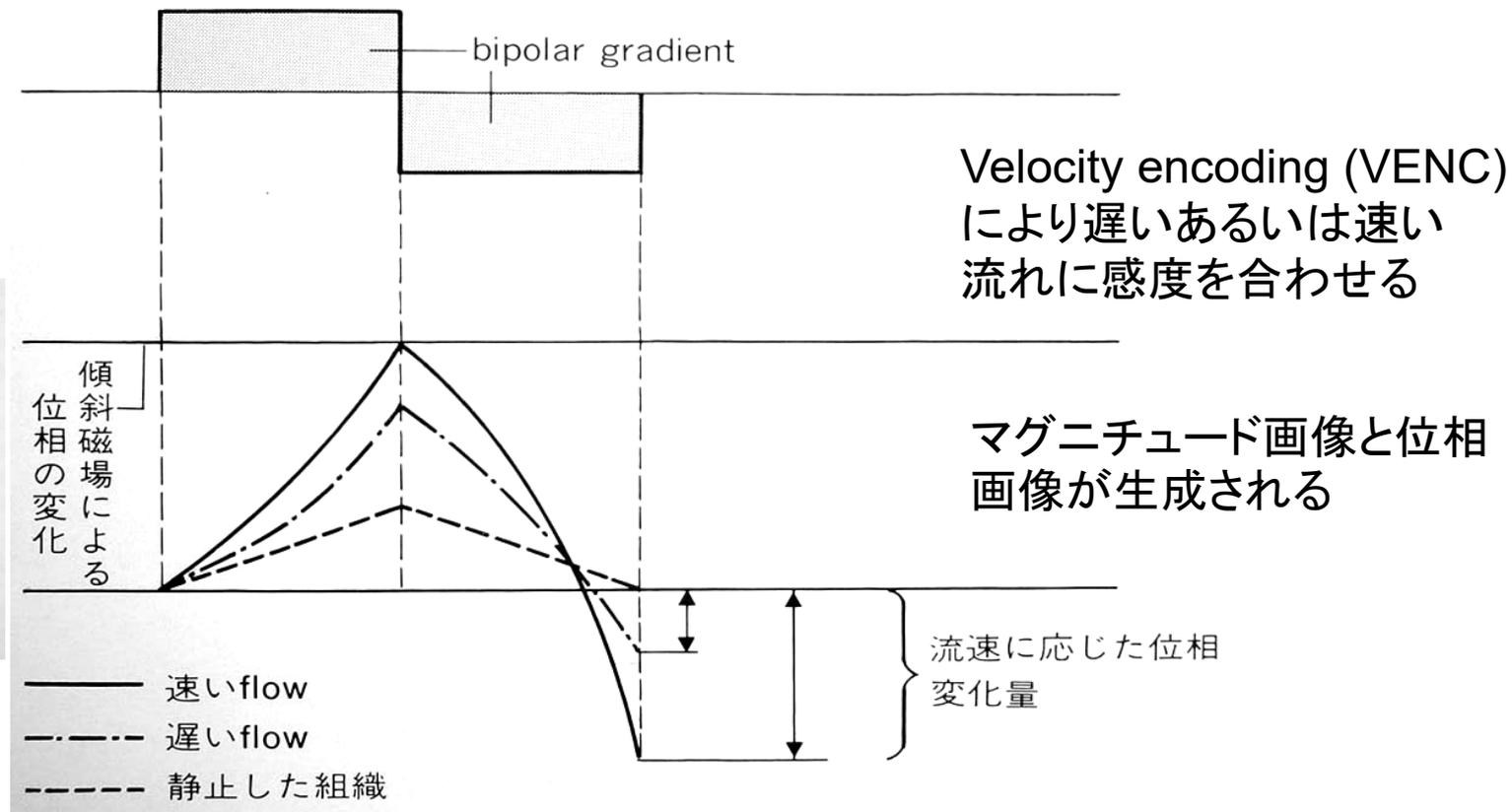
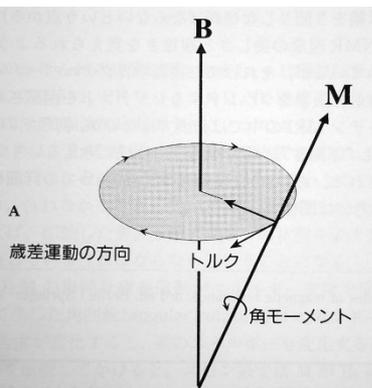
断面番号	断面流量 [mm ³ /s]
断面1	1090
断面2	1141
断面3	1155
断面4	1107
断面5	1117
断面6	1163
断面7	1226
断面8	1150
断面9	1221
断面10	1310
断面11	1324

平均値 : 1182.2 mm³/s, 標準偏差 : 75.1 mm³/s
正解値 : 1150.3 mm³/s, 推定誤差 : 2.8 %



Phase Contrast (PC) cine MRの原理

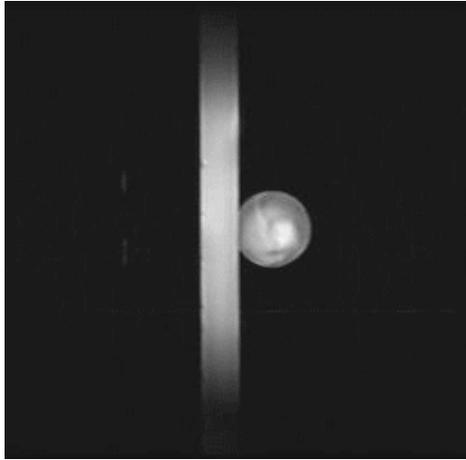
Phase Contrast法



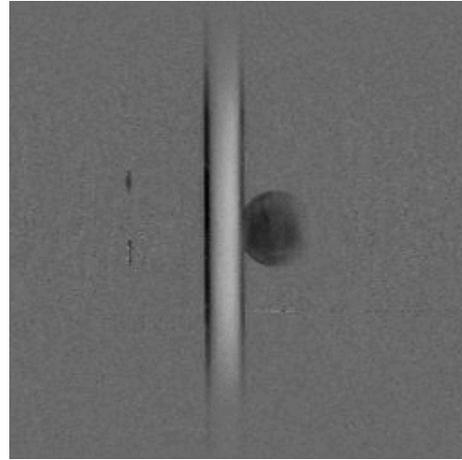
cine MR法

心電図同期により心周期の様々な時間に複数の画像を収集し、心周期の各ポイントの画像を得る手法

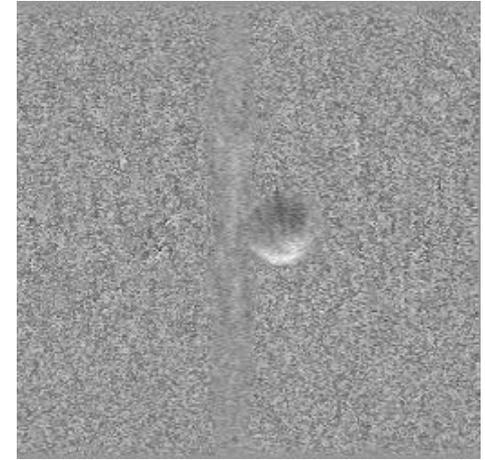
2次元シネ位相コントラスト磁気共鳴法 (2D cine PC MR)



マグニチュード画像

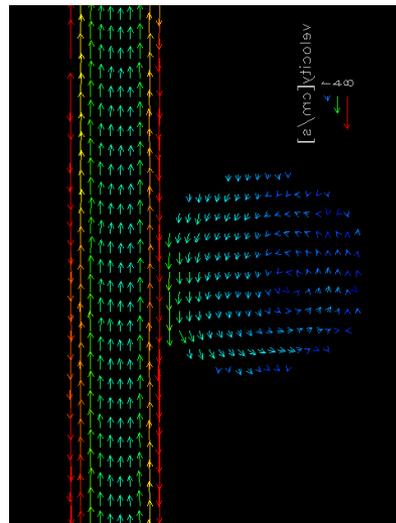


X方向にエンコード
した位相画像



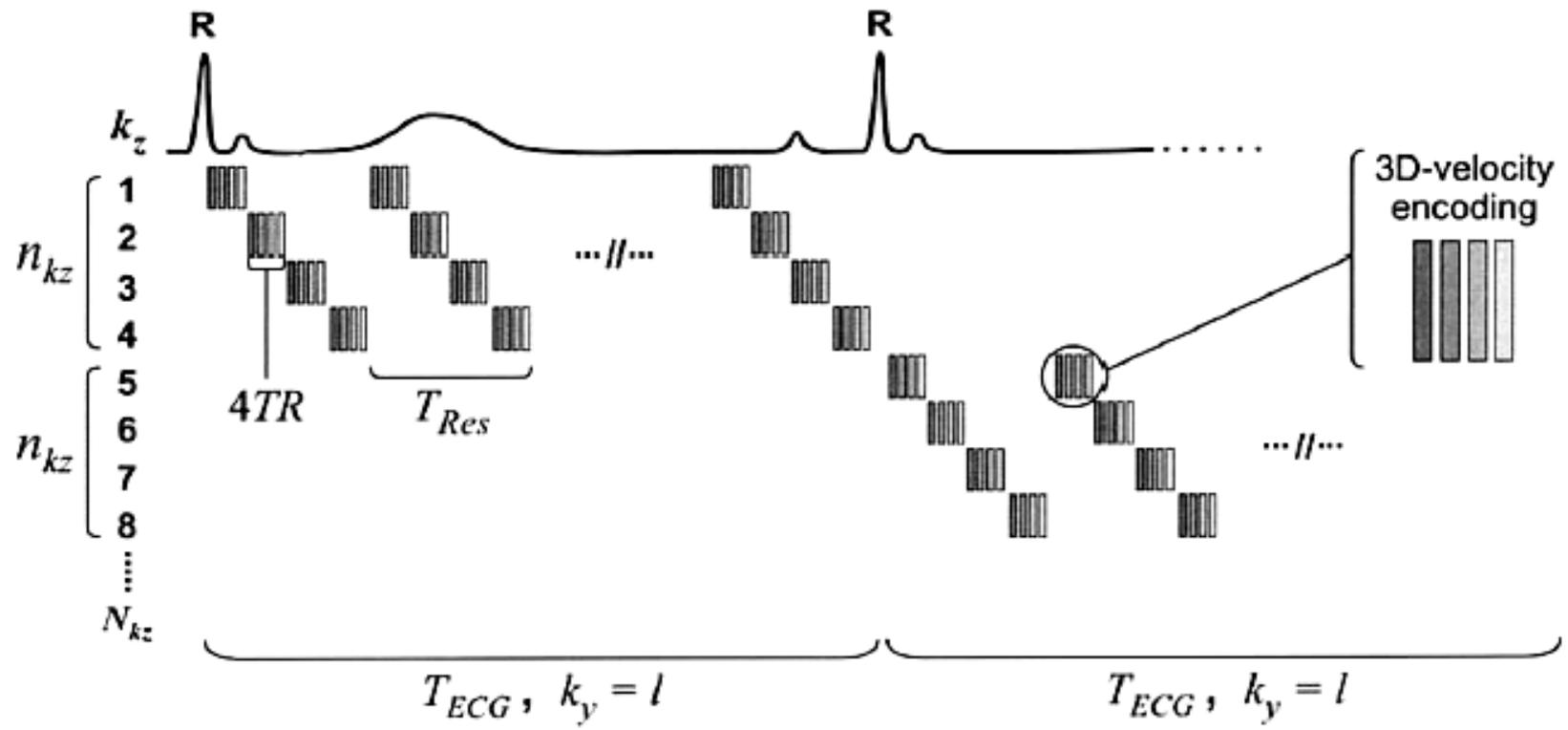
Y方向にエンコード
した位相画像

流速ベクトル画像



位相情報を合成

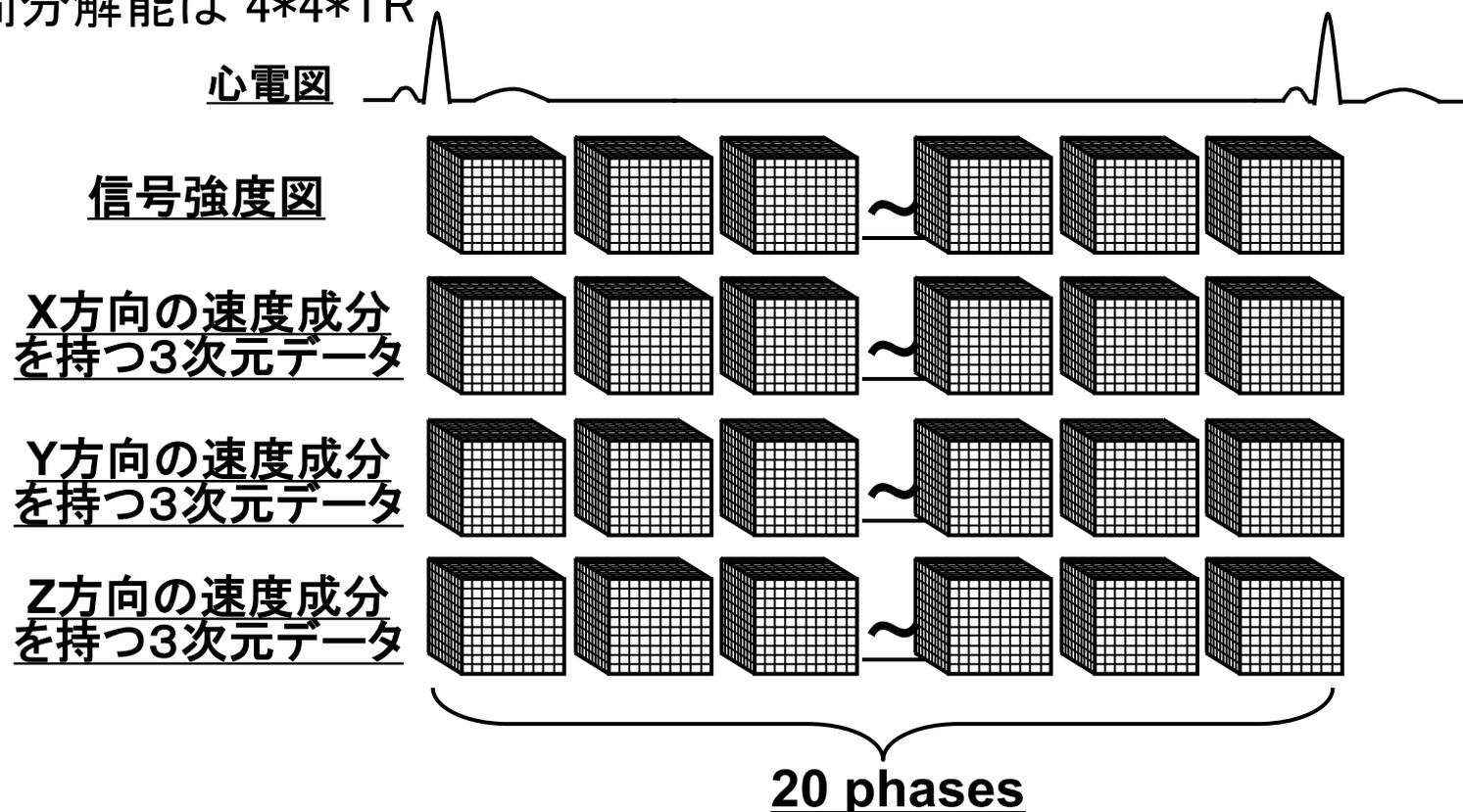
3次元シネ位相コントラスト磁気共鳴法 (3D cine PC MR = 4D Flow)



M. Markl et al. JMRI, (2003)

4D-Flowの原理

- 撮像シーケンスはradiofrequency-spoiled gradient-echoが基本
- 3軸全てに速度エンコード(時間軸と合わせて4次元データ)
- Segmented k-spaceでデータ収集
- 心電図に同期させてデータ収集
- 時間分解能は $4 \times 4 \times TR$



4D-Flowの長所

【2D cine PC-MRに対する長所】

- 1回の撮影で血管形状と流速分布が同時に測定できる ⇒ 患者負担と費用を抑えられる

