JAEA-Research
2009-017

高速炉冷却系配管における流れの剥離現象に関する基礎研究

ー高レイノルズ数領域におけるマルチエルボ内複雑流動構造の解明ー
（先行基礎工学研究に関する平成 19 年度共同研究報告書）

Basic Study on Flow Separation Phenomenon in Cooling System Piping in Fast Reactors
-Clarification of Complex Flow Structure in a Multi-Elbow in a High Reynolds Number Regime-
(Joint Research Report in FY2007)

結城 和久　橋爪 秀利　中西 繁之　相澤 康介　山野 秀将

Kazuhisa YUKI, Hidetoshi HASHIZUME, Shigeyuki NAKANISHI
Kosuke AIZAWA and Hidemasa YAMANO

次世代原子力システム研究開発部門
設計統括ユニット

FBR Cycle System Design Synthesis Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

August 2009

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387，Fax 029-282-5920，E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

高速炉冷却系配管における流れの剥離現象に関する基礎研究
－高レイノルズ数領域におけるマルチエルボ内複雑流動構造の解明－
（先行基礎工学研究に関する平成 19 年度共同研究報告書）

日本原子力研究開発機構
次世代原子力システム研究開発部門　設計統括ユニット
結城 和久*[1]、橋爪 秀利*[2]、中西 繁之*[3]、相澤 康介、山野 秀将

（2009 年 5 月 26 日受理）

東北大学では、コールドレグ配管で発生する非定常流動メカニズムを明らかにし、更にスケール効果を調べるため、実機の 1/15 縮尺試験と 1/7 縮尺試験が実施される。1/15 縮尺試験については、平成 19 年度は 2 段エルボ体系で試験を行った。その装置における配管内径は 56mm、エルボの曲率半径比は 1.0 である。屈折率対策のため、作動流体を NaI 水溶液とする屈折率調合 PIV 計測が実施された。Re 数は 43000 であり、エルボへの流入条件は完全発達乱流である。まず、全体的な流動構造として、第 1 エルボの内側で剥離が発生し、第 2 エルボでは 1 つの旋回流が形成されることが確認された。また、第 1 エルボ剥離域の終端部近傍で発生した非定常な流動が成長しながら下流方向に輸送され、第 2 エルボの管中央部に流入していることを指摘した。一方、1/7 試験装置は作動流体が水であり、平成 19 年度は大流量条件を達成するための試験装置の設計と各コンポーネントの製作を実施した。

原子力機構では、実機設計の成立性評価に向けて解析評価手法の開発を進めている。平成 19 年度は商用熱流動解析コード FLUENT を用いて 1/15 縮尺流動試験解析を実施し、可視化試験結果と流速分布の傾向は概ね一致していることが示された。

本研究は日本原子力研究開発機構と東北大学との共同研究に基づいて実施したものである。
大洗研究開発センター（駐在）〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002
*1 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻（現在、山口東京理科大学）
*2 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻
*3 日本原子力発電（株）

Basic Study on Flow Separation Phenomenon in Cooling System Piping in Fast Reactors

- Clarification of Complex Flow Structure in a Multi-Elbow in a High Reynolds Number Regime - (Joint Research Report in FY2007)

Kazuhisa YUKI*[1], Hidetoshi HASHIZUME*[2],
Shigeyuki NAKANISHI*[3], Kosuke AIZAWA and Hidemasa YAMANO

FBR Cycle System Design Synthesis Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 26, 2009)

At Tohoku University, 1/15 scale and 1/7 scale flow tests are being performed in order to clarify an unsteady flow structure in the cold leg piping and to investigate the scale effect. In FY2007, the 1/15 scale test was carried out using a double elbow geometry. In the test apparatus, the inner diameter is 56mm and the curvature radius ratio is 1.0. For visualization without any image distortion, matched refractive-index PIV measurement was carried out using NaI solution as the working fluid. The Reynolds number was 43,000, and the inlet flow condition to the test section was a fully developed turbulent flow. It was confirmed that there existed a separation along the inner wall of the 1st elbow and a large swirling flow in the 2nd elbow. Furthermore, the unsteady flow formed in and/or behind the separation region was transported downstream and flows into the center area of the 2nd elbow. On the other hand, the working fluid of the 1/7 scale experimental apparatus is water. In this fiscal year, the apparatus for achieving high Reynolds number conditions was designed and each component was manufactured.

At JAEA, a numerical analytical evaluation method is being developed to evaluate the feasibility of the reactor design. In FY2007, numerical analyses for the 1/15 scale test were performed using the commercial thermal-hydraulics code FLUENT. The analyses showed that the trend of calculated velocity distributions was in good agreement with the visualization test results.

Keywords: Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR), Elbow, Unsteady Flow

---

This work has been performed in JAEA as a joint research with Tohoku University.

*1 Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University. (Presently, Tokyo University of Science, Yamaguchi)

*2 Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

*3 Japan Atomic Power Company.

目次

1　序論……1
2　コールドレグ 1/15 縮尺流動試験……2
2.1　試験装置および条件……2
2.2　PIV による可視化結果（流れ場の概要）……3
2.3　まとめ……5
3　コールドレグ 1/7 縮尺流動試験装置の設計・製作……6
3.1　ループの設計・製作・設置の概要……6
3.2　1/7 縮尺試験装置の主要構成要素……6
3.2.1　大流量循環ポンプ……6
3.2.2　混合タンク……7
3.2.3　整流タンク……7
3.3　まとめ……7
4　コールドレグ 1/15 縮尺流動試験の数値解析……8
4.1　解析体系および条件……8
4.2　解析結果……8
4.2.1　シングルエルボ体系解析……8
4.2.2　ダブルエルボ体系解析……9
4.2.3　複数エルボ効果の検討……9
4.3　まとめ……11
5　結論……12
謝辞……13
参考文献……14

Contents

1 Introduction …….. 1

2 1/15 scale flow experiments for cold-leg piping …….. 2

2.1 Experimental apparatus and conditions ……. 2

2.2 Visualization results by PIV measurement (schematic flow field) ……. 3

2.3 Summary ……. 5

3 Design and fabrication of 1/7 scale flow experiments for cold-leg piping …….. 6

3.1 Design, fabrication and installation of experimental loop ……. 6

3.2 Main component of 1/7 scale flow experiments ……. 6

3.2.1 Circulating pump ……. 6

3.2.2 Mixing tank ……. 7

3.2.3 Rectifier tank ……. 7

3.3 Summary ……. 7

4 Numerical analyses of 1/15 scale flow experiments for cold-leg piping …….. 8

4.1 Analysis models and conditions ……. 8

4.2 Analysis results ……. 8

4.2.1 Analysis using a single elbow geometry ……. 8

4.2.2 Analysis using a double elbow geometry ……. 9

4.2.3 Consideration of multi-elbow effect …..……. 9

4.3 Summary ……. 11

5 Conclusions …… 12

Acknowledgements …… 13

References …… 14

図表一覧

図 1： 2 ループ型ナトリウム冷却大型高速炉の 1 次主冷却系配管 ……16
図 2： コールドレグ 1/15 縮尺流動試験装置図 ……17
図 3： 2 段エルボ試験部 ……17
図 4： エルボ入口の流れ方向流速分布(Re~42000, U_{in}=0.62m/s） ……18
図 5： 屈折率調合 PIV 計測によるトレーサ粒子像と時間平均流速ベクトル……18
図 6： 第 1 エルボにおける流動状態（(a)瞬時流動場，(b)平均流速場，(c)等速度線図 ，(d)面内速度変動の RMS 値） ……19
図 7： 剥離領域に着目した瞬時流動場 ……20
図 8： 第 1 エルボ下流 0.2D における 2 次流れ（左図：時間平均流動場、右図：瞬時流動場） 20
図 9： 第 2 エルボにおける瞬時流動場及び時間平均流動場 ……21
図 10：第 2 エルボ下流 0.2D における 2 次流れ（左図：時間平均流動場、右図：瞬時流動場） 21
図 11： コールドレグ 1/7 縮尺流動試験装置（上図：上面図、下図：側面図） ……22
図 12： 循環ポンプ設計図……23
図 13： 振動吸収ゴム設計図……23
図 14： コールドレグ 1/15 縮尺流動試験の解析モデル……24
図 15： シングルエルボ体系の解析モデル ……25
図 16： 解析モデル入口の流速分布 ……25
図 17： シングルエルボ体系解析における流速コンター……26
図 18： シングルエルボ体系解析における流速ベクトル……27
図 19： シングルエルボ体系解析における流速コンター（エルボ部拡大） ……28
図 20： シングルエルボ体系解析における流速ベクトル（エルボ部拡大） ……29
図 21： シングルエルボ体系解析における流速ベクトル（エルボ後流での剥離部拡大） ……30
図 22： シングルエルボ体系解析におけるエルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速コンター31
図 23： シングルエルボ体系解析におけるエルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速ベクトル32
図 24： シングルエルボ体系解析における出口境界での軸方向流速コンター……33
図 25： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部全体の流速コンター……34
図 26： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部全体の流速ベクトル……35
図 27： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部の流速コンター（エルボ部拡大） ……36
図 28： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部の流速ベクトル（エルボ部拡大） ……37
図 29： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部の流速ベクトル（エルボ後流での剥離部拡大） ……38
図 30: ダブルエルボ体系解析における第１エルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速コンター ……39
図 31: ダブルエルボ体系解析における第１エルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速ベクトル ……40
図 32： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ部全体の流速コンター……41
図 33： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ部の流速コンター（エルボ部拡大） ……42
図 34： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ部の流速ベクトル（エルボ部拡大） ……43

図 35: ダブルエルボ体系解析における第２エルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速コンター……44
図 36: ダブルエルボ体系解析における第２エルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速ベクトル……45
図 37： ダブルエルボ体系解析における出口境界での流速コンター……46
図 38： エルボ出口から下流位置における配管中心の時間平均流速分布……47
図 39： ダブルエルボ体系における配管中心の圧力分布……48
図 40： ダブルエルボ体系における第 1 エルボ後流での断面圧力分布……49
図 41： ダブルエルボ体系における第 2 エルボ後流での断面圧力分布……50
図 42： シングルエルボ体系におけるエルボ後流の各位置での壁面圧力変動……51
図 43： ダブルエルボ体系における第 1 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動……52
図 44： ダブルエルボ体系における第 2 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動……52
図 45： シングルエルボ体系におけるエルボ後流の各位置での壁面圧力変動のパワースペクトル密度……53
図 46： ダブルエルボ体系における第 1 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動のパワースペクトル密度……54
図 47： ダブルエルボ体系における第 2 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動のパワースペクトル密度……55

1　序論

FBR サイクルの実用化研究開発（FaCT）では、将来の基幹電源としての経済性を確保できるよう、建設コストの低減を実現できる 2 ループ型ナトリウム冷却大型炉（電気出力 150 万 kWe）の研究開発を進めている [1)2)]。この設計概念は、従来設計に比べ薄肉構造の 1 次系配管が大口径化し、かつ管内平均流速も 9m/s 台に増大する。このような冷却系を設計する上で、エルボ周辺での流体の乱れに起因する流力振動に対する配管の健全性について確認することとし、大口径配管内流動特性の把握および配管の流力振動に関する評価手法の開発のための研究を実施している [3)]。

図 1 に示すように、1 次主冷却系は 1 ループにつき L 字型エルボを 1 つ有するホットレグ配管（直径 1.27m）1 本と、エルボを３つ有するコールドレグ配管（直径 0.86m）2 本で構成される。これらのエルボはショートエルボであるにもかかわらず、レイノルズ数は、ホットレグ配管では 4.2×10^7、コールドレグ配管では 2.5×10^7 に達する [4)]。これまで、レイノルズ数の大きなホットレグ配管について、配管の流力振動評価上もっとも重要と考えられるエルボ部における剥離の影響に着目して、1/3 縮尺水試験装置を用いて入口整流条件下での流動試験を実施した [5)6)]。また、配管流力振動評価手法の検証のための試験データを拡充した [7)]。1/3 縮尺水流動試験では、実機ホットレグ配管のレイノルズ数の 1/5（$Re=8\times10^6$）までしか達していない。これまでの試験で水温を変えることにより粘性の影響を調べており、その影響は小さいことが分かった [8)]。配管にかかる流体力は動圧支配であり、実機とほぼ同等の流体力条件とするため、1/3 縮尺水試験では実機条件での流速でも試験を行った [9)]。配管スケール効果については、1/3 縮尺水試験より大きな試験を行うことは困難であるため、スケール依存性を明らかにすべく 1/10 縮尺水試験を開始した [10)]。

実機評価のため、商用解析コードである STAR-CD を用いて定常解析を実施した [11)]。しかしながら、非定常現象の流れによる流力振動を評価するには不十分であることが明らかになった。そのため、非定常解析を行って、流動メカニズムの把握および実機条件への外挿を行うこととし、STAR-CD[12)]および高度な乱流モデルを有する解析コード SMART-fem[13)]を用いて試験解析を実施し、実機適用性の検討を開始した。

コールドレグ配管については、エルボが複数連結され上流側エルボで形成される渦が下流側エルボへ流れ込むため、流動構造は複雑となり、複数エルボの影響を調べることが重要である。3 段エルボ体系で実機条件に近い 1/4 縮尺水試験を行う計画としているが、複数エルボの影響を個々に分離するなど詳細に調べることは困難である。そこで、1/7 縮尺水試験装置（内径 126.6mm）を製作し、1 段、2 段、3 段エルボ体系と拡張していき、複数エルボの影響を調べることとした。また、既存の 1/15 縮尺水試験装置（内径 56.0mm）を使用して、1 段、2 段エルボ体系で試験を行い、1/7 縮尺水試験と比較することで、スケール効果も調べることとした。さらに、高レイノルズ数条件下におけるエルボ部での複雑流動現象の把握、並びに流動励起振動に影響する主要因子の抽出を目的として、試験では、流動場計測に優れている PIV 計測技術を使用する。これらの試験で得たデータは解析コード検証にも資する。

本報告書では、研究初年度に実施した研究成果について述べる。第 2 章では、既存の 1/15 縮尺試験装置で得られた流動試験結果（低 Re 数域）を記述する。第 3 章では、実機設計の約 1/7 縮尺流動試験装置の設計・製作について報告する。第 4 章では、1/15 縮尺水流動試験の解析結果について記述する。最後に、第 5 章で本研究をまとめるとともに今後の研究計画について述べる。

2　コールドレグ 1/15 縮尺流動試験

2.1　試験装置および条件

図 2 にコールドレグ 1/15 縮尺流動試験の系統図を示す。装置は循環ポンプ、整流部、助走部、試験部、トレーサ除去部、混合タンクから構成されている。主として配管は内径 D=56mm の硬質塩化ビニル管（JIS-K-6741）を用い、試験部および混合タンクのみアクリルにより製作されている。循環ポンプはマグネット式（流量範囲：10～200L/min）であり、流量はポンプ後に設置される主配管バルブとポンプからタンクに戻るバイパスラインのバルブの開閉度によって調整される。流量は後述の助走部にて超音波流量計を用いて計測され、すなわち内部流れに影響を与えないように管外部から超音波を入射し、その反射波を検出して流量値を得ている。整流タンクは、上流部からデフューザ、多孔板、ハニカム、レデューサで構成されている。デフューザ部分の多孔板は、流路の急拡大による乱れや剥離の発生を抑え、更にポンプ後のエルボ部で発生する偏流を平坦化する効果を有する。ハニカムは旋回流の除去に対して効果的に作用し、更にレデューサにより流れが整流される。助走部は、試験部に流入する流れが十分に発達した乱流状態になるよう、整流タンクの出口後に管直径の 44 倍の直管部を有する。混合タンクでは、その上部から作動流体である NaI 水溶液とトレーサ粒子を投入するとともに、ループ内を脱気する。また、作動流体の温度を一定に保つため、螺旋管状熱交換器も混合タンク内に設置されている。トレーサ除去部では作動流体の回収前に全てのトレーサが回収される。使用するフィルターは、円筒型のポリプロピレン製カートリッジフィルター（最小回収粒子サイズ 5μm）であり、容器内に入った流体は円筒フィルターを外側から中心方向に向かって通過し、その際に分離される。試験部はコールドレグにおける立体接続 2 段エルボを模擬するものであり、可視化のためにアクリルブロックを 3 次元 NC により切削加工し高精度で製作されている。配管形状をコールドレグの実機設計に一致させるため、長さ 0.57D の直円管流路を介して 2 つのエルボが立体的に接続される。曲率半径比は 1.0（=R/D：R は曲率半径）である。

一方、PIV 計測系はシートレーザ発信器、タイミングコントローラ、CCD カメラ、解析用 PC で構成されている。レーザは Diode レーザであり、出力 10mJ、波長 808nm の赤外線である。また、タイミングコントローラによりパルス間隔を最短で 1μsec まで調整可能である。CCD カメラの解像度はレーザの発信周期に依存し、2kHz までの撮影であれば解像度 1024×1024 ピクセル、5kHz であれば 512×512 ピクセルとなる。CCD カメラには画像データストレージ用のメモリが内蔵されており、一度の撮影で最大 2048 枚の粒子画像を得ることができる。なお、得られる粒子像をデータ処理する解析システムは Oxford 社製の Vid-PIV システムであり、結果として 1 回の撮影で 1024 枚の速度ベクトル情報を取得可能である。本報告で使用したデータの PIV 計測条件は、サンプリング周期 30Hz（ダブルパルス）、サンプリング時間約 34 秒、サンプリング数 1024 枚の流速ベクトルデータ、である。

先述のように本試験で使用する試験部はアクリル製であるため、作動流体として水を使用した場合、配管材料と作動流体の屈折率の違いから粒子画像が歪み、正しい計測データの取得が困難となる。アクリルの屈折率は 1.49 であるため、可視化試験では同じ屈折率を有するヨウ化ナトリウム水溶液（以降、NaI 水溶液）を作動流体として使用する。NaI 水溶液の屈折率は、温度変化よりも濃度変化に強く依存するため、過去に著者らが実施した屈折率調合実験 [14] と同様の方法で

NaI 水溶液の濃度を決定した。

このように平成 19 年度前半では、NaI 水溶液を作動流体とする屈折率調合試験を実施し、次いで既存のロングエルボ（曲率半径比 1.5）を対象とする流れ場の可視化を予備的に実施した。具体的には、図 3 の様な平面接続構造を有する二段エルボ内（エルボ間距離 0.0D）の流れを可視化し、特に第一エルボから第二エルボの内側へ流れ込む高速流れ、の可視化に成功した。しかしながら、配管断面に形成される二次流れの可視化から、その流動構造が非対称であることを確認した。この原因として、試験部入口部における流入条件が若干偏流している可能性があるため、試験部への助走距離を従来の 35D から 44D に改良し、更に、助走部の上流側に整流促進のためのハニカム整流器とレデューサを設置した（図 2 参照）。これにより、エルボへの流入条件として図 4 のような完全発達した乱流速度分布の取得に成功した（Re~42,000）。

2.2　PIV による可視化結果（流れ場の概要）

以上の予備実験を踏まえ、本研究で対象とする立体接続 2 段ショートエルボ（曲率半径比 1.0）に関する屈折率調合 PIV 計測を平成 19 年度後半に実施した [15)]。コールドレグのマルチエルボ体系（3 段 3 次元曲がり）では、第 1 エルボ内側にて流動剥離が発生した後、第 2 エルボでは、第 1 エルボの影響が強く残り旋回流が形成されると予想される。また第 3 エルボの曲がり面が第 2 エルボの曲がり面と平行であるため、第 2 エルボで形成された旋回流はそのまま第 3 エルボでも維持されると考えられるが、第 2 エルボと第 3 エルボの空間距離が比較的長いため（6.14D）、第 3 エルボでは単一エルボの特性が強くなり、再び流動剥離が発生することも懸念される。この様に、エルボ間の相関が非常に強いコールドレグ体系での大まかな流動構造を評価するため、先ず低 Re 数条件下（Re=43,000）において、第 1 エルボと第 2 エルボ内の流動構造を可視化した。

図 5 は屈折率調合 PIV 実験により得られたトレーサ粒子像とその時の流速ベクトル図である。管路であるアクリルと同じ屈折率を有する NaI 水溶液を用いることによって、複雑幾何形状を有する曲がり管内の流動場を屈折率の影響を除外して取得できることを示している。なお、以降で示す可視化結果は PIV 計測 1 ショット（サンプリング周期：30Hz（ダブルパルス）、サンプリング時間：約 34 秒、サンプリング数：流速ベクトルデータ 1024 枚）のデータであるため、平均化および統計データを取得するためのサンプル数が十分でないこと、更にエルボの入口・出口部では O リングの存在により測定精度が劣化していること、曲がり管壁に関する境界設定の後処理が十分でないことを申し添える。

先ず、第 1 エルボにおける流動状態に注目する。図 6(a), (b), (c), (d)はそれぞれ同エルボ内の曲がり面における瞬時流動場、平均流速場、等速度線図、面内速度変動の RMS 値を表している。流れ場は非定常に揺動しており、曲がり管固有の低周波の揺動が形成されていると考えられる。また入口内壁近傍には流れ方向の順圧勾配による高速域が形成されており、その最大速度（1.09m/s）は入口平均流速の 1.76 倍に達する。更に剥離領域の一部と考えられる低速域が曲がり 40°付近から発達しており（平均流速ベクトル図参照）、瞬時場の図からは剥離渦の一部と考えられる逆流構造を確認することができる。剥離域はエルボ下流方向に発達しており、これに伴い出口領域で再び高速域が形成されていることも確認できる。なお、剥離点が先行研究よりも上流側に遷移しているのは、エルボへの流入条件の違いであり、境界層が十分に発達した乱流速度分布がエルボへ流入するためと考えられる。速度変動の RMS 値に注目すると、この曲がり面内では

剥離領域と主流の境界近傍に強い速度変動が存在することがわかる。剥離渦の構造をより詳細に評価するため、剥離領域をクローズアップした瞬時流動場を図 7 に示す。これより、曲がりの中心縦断面におけるエルボ内側とその下流側直管部では複雑な流動構造が存在し、特に下流側に大きく広がる低速域の上流側（剥離域に対応）で比較的小さな複数の横渦構造、下流側に大きなスケールの流動構造を確認することができる。時間変化の様子から、特に下流側の流動構造は特に激しく変化しており、先行研究で指摘されている剥離渦の放出挙動の動特性の一端を反映していると考えられる。今後、より高時間解像度による可視化によりその動特性の解明が必要である。また、剥離領域と渦の放出領域の大きさを考慮すると、特に剥離渦の放出領域下流部は第 2 エルボ形状の影響を強く受けると考えられ、先述の動特性に大きく影響すると考えられる。剥離渦の 3 次元構造を明らかにするため、第 1 エルボ下流側 0.2D の位置における二次流れを計測した（図 8 参照）。これより、曲がり管中央部に形成される高速領域とエルボ内壁の間に低速スポットが存在し、特徴的な 2 対の双子渦が存在していることが確認できる。大きな双子渦が遠心力駆動によって生成されたものであるのに対し、エルボ内側近傍の小さな双子渦は、図 7 との比較により、剥離領域の横断面流動構造を表している。すなわち、この計測位置での平均的な剥離渦構造が周方向へ広がった 2 つの渦構造として存在していることが明らかである。更に入口平均流速の 80%を越える高速流れが管外壁近傍に存在しており、時間変化の様子から、その流れが間欠的に剥離領域へ流れ込んでいることを確認した。この影響により、剥離領域であるエルボ内壁近くの流動は非定常性が非常に強くなり、すなわち管外壁側からの 2 つの高速流れの衝突効果により流動が不安定となっている。この高速流れが主流上流側で形成されたものか、或いは剥離渦の放出に伴う流体欠損を補うために形成されているかは今後検討する必要があるが、これが剥離域の流動構造と渦放出に関する動特性に多大に影響することは間違いない。

続いて、第 2 エルボ内部の流動状態について議論する。図 9(a), (b)は、それぞれ第 2 エルボ内における瞬時流動場と時間平均場を表している。第 1 エルボはベクトル図の紙面左奥側に存在している。先ず、エルボ内の速度分布が第 1 エルボのものと全く異なることが確認できる。第 2 エルボでは剥離領域は形成されておらず、内壁側と外壁側に高速域が存在している。特にエルボ内壁側では､第 1 エルボの高速流れよりも速い流れが形成されている｡また瞬時流動場の様子から、第 2 エルボの中心部で流れ場の揺動に関する空間スケールが第 1 エルボよりも増大している。すなわち、第 1 エルボで放出された非定常渦がカルマン渦のように空間的に発達しながら第 2 エルボの中心部に流入していると考えられる。第 2 エルボ内での 3 次元流動構造について明らかにするため、図 10 に第 2 エルボ直後 0.2D 下流での二次流れの流動形態（a：時間平均場、b：瞬時流動場）を示す。剥離領域を表す流動構造は存在せず、偏った 1 つの旋回構造を確認することができる。平均速度の最大値は 0.43m/s であり、主流平均速度の約 60%に達しており非常に強い旋回流が第 2 エルボで形成されていることが明らかである。図左上からは第 1 エルボで形成された高速流れ、図左下からは剥離流れ（低速流れ）が流入するため、第 2 エルボで形成される旋回流構造は第 1 エルボで発生する偏流状態によって決定される。一方、過去の研究において、剥離を伴わない高曲率半径（曲率半径 1.5）を有する 3 次元曲がり 2 段エルボでは、この位置で既に管全体に一様な旋回流が確認されていることから、剥離を伴うエルボが上流に存在する場合、偏流が非常に強いことが伺える。また、時間変化の様子から、旋回中心の位置が時間的に変化しており、剥離が発生しない場合と同じ知見が得られている。上記の流れはエルボ間の直管長さに対して非常に敏感であると考えられ、特に剥離渦発達に伴う加速域での流れが第 2 エルボに流入するか、もしくは剥離渦が消滅する減速域の流れが流入するかで、第 2 エルボでの旋回流構造が劇的に変

化する可能性は高い。

2.3　まとめ

以上、1/15 縮尺流動試験装置を用いて 3 次元曲がり 2 段エルボ内における流動構造の PIV 可視化試験を実施した。第 1 エルボ内では低速域（剥離領域と渦放出領域）が形成されるのに対し、第 2 エルボでは剥離領域が形成されず旋回流が存在していることを確認した。さらに、第 1 エルボで放出された剥離渦が成長しながら第 2 エルボ中心部に輸送されている可能性を指摘した。今後、より高 Re 数域においてより定量的な評価（速度変動特性、全圧力損失係数、壁面圧力）を実施する。

3　コールドレグ 1/7 縮尺流動試験装置の設計・製作

コールドレグの大流量条件を模擬する流動ループを製作する場合、限られた空間内での装置要素の配置と整流、振動・キャビテーションの抑制、など多くの課題を解決する必要がある。平成 19 年度では、主としてコールドレグ 1/7 縮尺流動装置の設計と各コンポーネントの製作まで実施した。以下にその概要について纏める。

3.1　ループの設計・製作・設置の概要

装置は主として大流量循環ポンプ、混合タンク、整流タンク、助走部、試験部、冷却部により構成される。主配管は実機の 1/7 縮尺であり、内径が 126.6mm である。作動流体は水である。次節以降で詳説するが、混合タンクはトレーサ粒子の投入・脱気・キャビテーション防止のための加圧・および自由液面による振動吸収の役割を担い、整流タンクは偏流と旋回流を整流するものである。また、信頼性の高いデータの取得と 1/15 縮尺試験装置との比較によるスケール効果を議論するためには、助走部を設置し完全に発達した乱流速度分布を達成する必要がある。本試験で想定される最大 Re 数は約 1.0~2.0×10^6 であるため、乱流助走距離に関する H. Latzko の相関式による評価と実験室面積の制限から 27D の距離を確保する。試験部として、平成 19 年度ではシングルエルボを装着するための設計としている。配管系および圧力計測試験における試験部は主として SUS304 により製作されるが、混合タンクおよび整流タンクについてはポリ塩化ビニルにより製作されている。PIV による可視化の際、助走部の一部と試験部はアクリル製の配管に交換される。可視化試験部は 1/15 縮尺試験装置のものとは異なり、作動流体が水であるためウォータージャケット付きの試験体を予定している。

循環ポンプや配管等の設置・固定に関しては、特に本研究で対象となる低周波の固有周波数を抑制する必要があるため、以下の点に注意して設置する。

(1) 循環ポンプによる機械的振動の伝播を抑制するため、ポンプ直下に防振マットを設置すると同時に、ポンプ吐出・吸込み側に樹脂製のパイプと防振継ぎ手を設置して振動を吸収する。また、混合タンクに自由液面を設けることで積極的に振動を吸収させる。
(2) 配管固定用のアングルを低くすることで全体の重心を下げ、不安定な低周波振動を抑制する。
(3) 振動を更に防止するため、実験室床面へアンカーボルトによりアングルを固定する。
(4) 鉛ブロックをアングルへ固定し、装置の固有振動数を高周波側へシフトさせる。

以上を踏まえ、装置の概要を図 11 に示し、以下で詳説する。

3.2　1/7 縮尺試験装置の主要構成要素

3.2.1　大流量循環ポンプ

本研究では、シングルエルボにおける超臨界領域の高レイノルズ数流れを再現するため、大流量かつ脈動が発生しないマグネットポンプを選定した（図 12 参照）。ポンプの最大流量は 4000L/min、最高揚程は 26m、吐出圧力は 0.25MPa である。最大流量 4000L/min 時における流速

は 5.3m/s であり、作動流体温度が 40 度の場合に Re 数が 10^6 オーダとなる。なお、流量はインバータにより制御されるが、最大 60Hz まで可変であるため 5000L/min に近い流量も可能である。またポンプによる機械的振動を吸収するため、ポンプの下に図 13 のような振動吸収ゴムを設置している。

3.2.2　混合タンク

混合タンクは内径 600mm、高さ 2000mm の円筒容器であり、先述の自由液面による振動吸収の他に、ループ内に残存する気泡を除去し、トレーサ粒子を投入する。設置面積の制限により、流量条件に見合ったタンク容積の確保が難しいため、タンク内上部に長さ 400mm のハニカム（内径 14mm の塩ビ円管の束）を設置して自由液面部の波立ちとガス巻き込みを防止する。また、加圧により高速流れに伴うキャビテーションの発生を防止することができる。

3.2.3　整流タンク

整流タンクでは、流入する偏流と旋回流を除去し、助走部における理想的な乱流境界層発達のための流入条件を達成することが重要である。タンクの内径は混合タンクと同様、600mm である。タンク内は旋回流と偏流を除去するためのハニカムと高気孔率の多孔質メッシュが設置できる構造となっており、助走部における速度分布調整の際に最適化される。整流タンクのエンドには整流のためのレデューサが設置され助走部と接続される。本来であればベルマウスのような曲率を持った縮小管が理想であるが、600mm 規格に近いベルマウスが存在しないため、レデューサを 2 段設置して代用している。また、レデューサ直下には乱流境界層発達を促進させるための多孔質メッシュも接続可能で有る。

3.3　まとめ

以上の設計に基づき、平成 19 年度中に各コンポーネントの製作まで実施した。平成 20 年度では、耐震を考慮して装置の設置を実施し、先ず、以下のシェイクダウン試験を実施して装置健全性を確認する。

(1) タッピング試験による装置固有振動数の評価
(2) 流量特性試験（高 Re 数条件の確認）
(3) 助走部における速度分布の評価（完全発達乱流の確認）
(4) シングルエルボにおける全圧損係数の評価

以上を確認した後、シングルエルボにおける PIV 可視化試験と壁面圧力計測試験を開始する予定である。

4　コールドレグ 1/15 縮尺流動試験の数値解析

4.1　解析体系および条件

ここでは、前述のダブルエルボ体系の 1/15 縮尺流動試験の解析を行った。また、比較検討のためのシングルエルボ体系での解析を実施した。解析コードは Fluent ver6.3 を用いた。1/15 縮尺流動試験の解析モデル及びシングルエルボ体系の解析モデルを図 14、15 にそれぞれ示す。配管断面のメッシュ分割は両解析モデルにおいて同一であり、壁面近傍を細かくしている。壁面第 1 メッシュ幅は 0.14mm（y+=1.8～7.4）とした。1/15 縮尺流動試験の解析モデルの総メッシュ数は約 21 万であり、シングルエルボ体系の総メッシュ数は約 12 万である。解析モデルの入口条件は、Re=43000（入口平均流速 0.62m/s）の条件における試験により得られた半径方向速度分布を周方向 45°毎に値を代入して、その間は Fluent 解析上で補間した。解析モデル入口の流速分布を図 16 に示す。乱流モデルは LES（Large-Eddy-Simulation）、時間離散化手法は 2 次精度 Implicit、空間離散化手法は中心差分、タイムステップは 0.001 秒として解析を実施した。出口境界は出口圧力境界条件とした。本検討における非定常解析は、定常解析結果を初期条件とした。つまり、非定常解析の 0 秒時の結果は定常解析結果である。

なお、乱流モデルは RSM（レイノルズ応力モデル）を用いた解析も実施したが、現状の Fluent コードでは時間離散化が Implicit しかないため、エルボ下流における揺らぎ挙動を捉えることができなかった。

4.2　解析結果

4.2.1　シングルエルボ体系解析

シングルエルボを用いた 1/15 縮尺流動試験は実施していないが、2 段エルボの存在による 1 段エルボ部の流況への影響を調べるため、まずシングルエルボ体系の解析を実施した。図 17、18 に配管中心断面における瞬時値の流速コンター及び流速ベクトルをそれぞれ示す。定常解析結果（0 秒時）では、エルボ内及びエルボ出口近傍においてのみ高流速領域が生じているが、非定常解析の瞬時値では、エルボ下流においても最大流速レベルの流速が発生していることがわかる。図 17 及び 18 より、0.5 秒時における流速分布は他の結果と傾向が異なっている。これより、0.5 秒までの非定常解析は解析時間が短いことから、定常解析結果の影響を残した流動挙動であることが示唆される。図 17、18 のエルボ部を拡大した結果を図 19、20 にそれぞれ示す。エルボ内において、曲がり 45°付近から剥離が生じており、剥離渦の一部と考えられる逆流構造剥離が見られる。これはホットレグ配管の 1/10 縮尺試験結果（Re=50,000）と一致している [10)]。また、エルボ内での最大速度は約 1.1m/s となっており、入口平均流速の 1.8 倍程度に達する。これらの結果は、前述の 1/15 縮尺流動試験の第 1 エルボ内のおける流動と同様である。図 21 にエルボ後流での剥離部に着目した流速ベクトルを示す。図より、剥離内の流れは複雑な流動が存在し、また非定常性が強く、時間によりベクトル向きが大きく変化していることがわかる。図 22、23 にエルボ出口から 0.2D 下流における瞬時値の 2 次流れ流速コンター及び 2 次流れ流速ベクトルをそれぞれ示す。図より、試験結果で見られた管壁近傍の高速流れ及びその内側の双子渦が確認された。解析において、双子渦の間に高速領域が生じており、管壁近傍の高速流れと共に非定常性が強いこ

とがわかる。また、入口平均流速と同等の高速流れが管壁近傍に生じており、この流れが剥離域に流れ込んでいることから、剥離域内の流動変動は大きくなると考えられる。図 24 に、解析出口境界での軸方向流速成分のコンターを示す。0.5 秒時では対称な流速分布となっており、解析時間が短いことから非定常な流動成分が解析出口まで伝播していないように見える。1.0 秒以降の瞬時値の結果は、複雑な流速分布を示しており、エルボ内での剥離に起因する流れの乱れがエルボ下流まで広範囲にわたって影響することが確認できた。

4.2.2　ダブルエルボ体系解析

次に、2 段エルボを用いた 1/15 縮尺流動試験の数値解析結果を示す。図 25、26 に、第 1 エルボ全体の配管中心断面における瞬時値の流速コンター及び流速ベクトルをそれぞれ示す。シングルエルボ体系の解析結果と同様に、エルボ内で高速領域が発生しており、この高速領域が第 2 エルボ入口まで拡がっていることがわかる。これより、第 2 エルボ内の流動は第 1 エルボの影響を強く受けることが確認された。図 27、28 に図 25、26 のエルボ部を拡大した結果をそれぞれ示し、図 29 にエルボ後流での剥離部に着目した流速ベクトルをそれぞれ示す。エルボ内において曲がり 45°付近から剥離が生じ、剥離渦の一部と考えられる逆流構造剥離が確認された。また、エルボ内での最大速度は約 1.1m/s となっており、入口平均流速の 1.8 倍程度に達している。さらに、剥離内の流れは複雑な流動が存在し、また非定常性が強いことが確認された。これらは、シングルエルボ体系の解析結果と同一の傾向を示している。図 30、31 に第 1 エルボ出口から 0.2D 下流における瞬時値の 2 次流れ流速コンター及び 2 次流れ流速ベクトルをそれぞれ示す。図において、上が第 2 エルボの内側であり、下が第 2 エルボの外側である。シングルエルボ体系の解析結果と同様に、管壁近傍の高速流れ、その内側の双子渦及び双子渦の間の高速領域が確認された。管壁近傍の高速流れは、第 2 エルボ外側が強くなっている傾向がある。これは第 2 エルボ内のエルボ外側に強く働く遠心力の影響を受けているためと考えられる。図 32 に、第 2 エルボ部全体の配管中心断面の流速コンターを示す。第 2 エルボ出口から解析出口境界まで、約 14D の長い配管ストレート部があるが、エルボ内での剥離に起因する流れの乱れは解析出口境界まで広範囲にわたって影響していることが確認される。図 33、34 に第 2 エルボ部に着目した配管中心断面の流速コンター及び流速ベクトルをそれぞれ示す。図より、第 1 エルボ内の流速分布と大きく異なっていることがわかる。第 2 エルボ内において剥離領域が形成されておらず、内壁側と外壁側に高速領域が存在していることが確認できる。第 2 エルボ内の最大流速は内壁側において約 1.25m/s となっており、第 1 エルボ内の最大流速より速い流れであり、入口平均流速の 2.0 倍程度まで達している。これらは、試験結果と同様の傾向である。図 35、36 に第 2 エルボ出口から 0.2D 下流における瞬時値の 2 次流れ流速コンター及び 2 次流れ流速ベクトルをそれぞれ示す。図より、第 1 エルボ下流で形成された双子渦は生じておらず、偏った 1 つの旋回構造が形成されていることがわかり、第 1 エルボ下流の流動構造と大きく異なっていることが確認できた。また、高速領域は第 2 エルボ内側の第 1 エルボ外側に形成されており、解析結果の流動構造は試験結果を再現している。図 37 に、解析出口境界での流速コンターを示す。図より、時間毎に流動分布が大きく異なり、図 32 で説明したように、エルボ内での剥離に起因する流れの乱れの影響は解析出口境界まで伝播していることが確認できる。

4.2.3　複数エルボ効果の検討

シングルエルボ体系解析、1/15 縮尺流動試験（ダブルエルボ体系）解析及び既往研究（ホット

レグ 1/3 縮尺試験[8]と 1/10 縮尺試験[10]）の試験結果を比較するため、図 38 にエルボ出口から下流位置における配管中心の時間平均流速分布を示す。なお、1/15 縮尺流動試験は時間平均流速分布など定量的なデータを取得していないため、ここでは比較の対象としていない。図(a)～(d)より、第 2 エルボ出口の流速分布は、第 1 エルボ出口及びシングルエルボ出口の流速分布と大きく異なることが確認できる。また、シングルエルボ体系解析とダブルエルボ体系解析の第 1 エルボの解析結果を比較すると、エルボ出口 0.18D 下流までは概ね一致しているが、エルボ出口 0.4D 下流以降は差異が大きくなっている。この原因は、ダブルエルボ体系解析の第 1 エルボ出口下流の流動特性は、下流ほど第 2 エルボの影響を強く受けるからである。既往研究と比較した流速分布を図 38(b’)と(e)に示す。剥離領域内の流速分布を比較した図 38(b’)を見ると、解析結果は両方の試験結果と流速分布が異なっており、配管半径方向の逆流領域高さを過小評価している。1/3 縮尺試験（配管径～420mm）はレイノルズ数が非常に高く（～3.2×10^6）、流動構造が全く異なると推測される。一方、1/10 縮尺試験（配管径～120mm）はレイノルズ数が 50,000 であり、本解析条件と近い。ただし、本解析では入口長さを十分にとった入口発達乱流条件であるため、エルボへの流入条件の違いが影響していることが原因の一つと考えられる。図 38(e)より、エルボ出口から 0.62D 下流においても、試験結果と解析結果で流速分布の有意な差異が生じていることが見られる。このような試験と解析結果の差異については、解析モデルの適用性など今後も検討を続ける必要がある。

試験では測定していないが、配管の構造健全性を評価する上で重要な圧力に関する解析結果を示す。図 39 に、ダブルエルボ体系解析の配管中心断面の圧力分布を示す。なお、圧力分布は定常解析の結果である。図 39(a), (b)は第 2 エルボ部の全圧分布及び静圧分布である。全圧はエルボ外側、エルボ内側及びエルボ入口上流において高くなっており、概ね図 32(a)に示した流速分布と同様な分布を示している。静圧は、高流速域のエルボ内側で低くなっていることが確認された。図 39(c), (d)は第 1 エルボ部の全圧分布及び静圧分布である。全圧は、剥離域及びそれに起因する低速域において低くなっている。静圧は、高流速域及び剥離域を含む低速域において低くなっている。エルボ外側において、静圧が高くなっているが、これは流れの淀み成分が大きいことを示している。図 40 に、第 1 エルボ下流の配管断面圧力分布を示す。図 40(a), (c), (e)より、エルボ下流に流れるに従い、エルボ内側の剥離域内の全圧が回復していき、配管中心側に低全圧域が移行していくことが確認された。図 40(b), (d), (f)より、静圧はエルボ下流に流れるに従い、解析出口側、つまり第 2 エルボ内側において低下していくことが確認された。これは、第 2 エルボ内側の流速が高くなっていることを示している。図 41 に、第 2 エルボ下流の配管断面圧力分布を示す。コンターの幅を考慮すると、第 1 エルボ下流と比較して、全圧及び静圧ともに変化は小さいことがわかる。図 42、43、44 に、シングルエルボ体系解析のエルボ下流、ダブルエルボ体系解析の第 1 エルボ下流及び第 2 エルボ下流の壁面圧力変動をそれぞれ示す。180°はエルボ内側であり、150°はホットレグ 1/3 縮尺試験において剥離域境界と評価され、大きい圧力変動が計測された箇所である。図 42 より、シングルエルボでは、エルボ出口の圧力変動がエルボ出口 0.25D 及び 0.5D 下流の圧力変動より大きいことが確認された。また、180°と 150°において有意な差は生じなかった。図 43 より、1/15 縮尺流動試験体系の第 1 エルボ下流の圧力変動は、図示した範囲では有意な差は見られなかった。図 44 より、エルボ出口 0.25D 及び 0.5D 下流では、150°における圧力変動は 180°における圧力変動より大きいことがわかる。この原因として、図 10 及び図 35 に示したように、第 2 エルボ出口下流では、高速領域がエルボ内側の 180°から離れていることが考えられる。図 45、46、47 に、シングルエルボ体系解析のエルボ下流、ダブルエルボ体系解析の第 1

エルボ下流及び1/15縮尺流動試験体系の第2エルボ下流の壁面圧力変動のパワースペクトル密度をそれぞれ示す。全ての図において、有意なピークは見られなかった。また、シングルエルボ体系と比較すると、1/15縮尺流動試験体系の第1エルボ下流及び第2エルボ下流の壁面圧力変動のパワースペクトル密度は数 10Hz 以上の高周波成分の振幅が大きいことがわかった。ホットレグ1/3 縮尺試験より、剥離に起因する卓越周波数は数 Hz となることを予想していたが、本解析は、解析時間が短いことから、低周波成分の分解能が低いため、卓越周波数を捉えることができなかった可能性もある。そのため、長時間の解析を実施して、壁面圧力変動のパワースペクトル密度を評価する必要がある。

4.3　まとめ

以上、1/15縮尺流動解析を実施し、可視化試験結果と流速分布の傾向は概ね一致していることを確認した。また、試験を実施していないシングルエルボ体系での解析を行った結果、ダブルエルボ体系での第1エルボ下流の流動構造は第2エルボの存在により影響されることを明らかにした。

5　結論

本研究では､ナトリウム冷却大型炉の 1 次系コールドレグ配管内の流動特性を把握するために、平成 19 年度は 1/15 縮尺流動試験装置を用いた試験を実施するとともに、スケール効果を確認するために実施する 1/7 縮尺流動試験装置の設計・製作を実施した。また、1/15 縮尺試験を対象とした非定常流動解析を実施した。

1/15 縮尺流動試験装置を用いてレイノルズ数約 43000 の条件で、3 次元曲り 2 段エルボ内における流動構造の PIV 可視化試験を実施し、第 1 エルボ内では低速域（剥離領域と渦放出領域）が形成されるのに対し、第 2 エルボでは剥離領域が形成されず旋回流が存在していることを確認した。さらに、第 1 エルボで放出された剥離域が成長しながら第 2 エルボ中心部に輸送されている可能性を指摘した。今後、より高いレイノルズ数領域において速度変動特性、全圧力損失係数、壁面圧力等の定量的な評価を実施する。

1/7 縮尺流動試験装置の設計・製作を実施した。設計及び機器の設置・固定に関して、本研究で対象となる低周波の固有振動数を極力抑制することに留意した。平成 20 年度以降は、耐震を考慮して装置の設置を実施した後、試験を進めていく。

1/15 縮尺流動試験を対象とした非定常流動解析を実施し、解析は試験結果で見られた第 1 エルボ内の高速域、剥離渦の一部と考えられる逆流構造、第 1 エルボ出口領域に形成される高速域を再現できた。また、第 2 エルボにおける流動場については、試験結果で見られた内壁側と外壁側の高速域及び剥離領域が形成されていないことを解析で捉えることができた。これらより、本解析は試験結果の定性的な流動特性を概ね再現できることを確認した。今回は Fluent コードを用いたが、計算負荷の小さな RANS で解析するため、今後は STAR-CD コードを用いて試験解析を行っていく。

謝辞

本研究を実施するに当たり、東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻の吉田和弘氏、佐藤司氏に多大な協力を頂きました。また、FLUENT コードによる解析の実施に当たっては、(株) NESI 和田明氏にご協力頂をきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

1) M. Hishida, S. Kubo, M. Konomura, M. Toda, “Progress on the Plant Design Concept of Sodium-Cooled Fast Reactor,” J. Nucl. Sci. Technol., 44(3), pp. 303−308 (2007).
2) S. Kotake, T. Mihara, S. Kubo, K. Aoto, M. Toda, “Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan (1): Current Status of JSFR Development,” Proc. of the 2008 Int. Congress on the Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'08), Anaheim, California, USA, ICAPP’08-8226 (June 8-12, 2008).
3) 山野秀将、上出英樹、大島宏之、宇都成昭、小竹庄司、渡辺収「Na 冷却高速炉における大口径配管の流力振動評価に関する研究　(1) 全体概要」日本原子力学会 2008 年春の年会, 大阪（2008/3/26～28）.
4) H. Yamano, S. Kubo, K. Kurisaka, Y. Shimakawa, H. Sago, “Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan (2): Technological Feasibility of Two-Loop Cooling System in JSFR,” Proc. of the 2008 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP’08), Anaheim, California, USA, ICAPP’08-8231 (June 8-12, 2008).
5) T. Nakamura, T. Shiraishi, Y. Ishitani, H, Watakabe, H. Sago, T. Fujii, A. Yamaguchi, M. Konomura, “Flow-induced Vibration of a Large-diameter Elbow Piping based on Random Force Measurement caused by Conveying Fluid,” Proc. of the 2005 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Denver, Colorado, USA, PVP2005-71277 (July 17-21, 2005).
6) T. Fujii, M. Konomura, H. Kamide, A. Yamaguchi, M. Toda, “Thermal-Hydraulic Design for Reactor Upper Plenum and Large Diameter Piping for an Innovative Sodium-Cooled Fast Reactor,” Proc. 13th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICONE13), Beijing, China, ICONE13-50210 (May 16-20, 2005).
7) K. Hirota, Y. Ishitani, T. Nakamura, T. Shiraishi, H. Sago, H. Yamano, S. Kotake, “Flow-induced Vibration of a Large-diameter Elbow Piping in High Reynolds Number Range; Random Force Measurement and Vibration Analysis,” Proc. 9th International Conference on Flow-Induced Vibrations (FIV2008), Prague, Czeck Republic (June 30 – July 3, 2008).
8) T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, M. Konomura, A. Yamaguchi, T. Fujii, “Resistance and Fluctuating Pressures of a Large Elbow in High Reynolds Numbers,” J. Fluids Eng., 128, pp.1063-1073 (Sep. 2006).
9) T. Shiraishi, H. Watakabe, H. Sago, H. Yamano, S. Kotake, “Pressure Fluctuation Characteristics of the Short Radius Elbow Pipe for FBR Nuclear Plant in the Postcritical Reynolds Regime,” Proc. The 2nd International Conference on Jet, Wakes and Separated Flow (ICJWSF-2), Berlin, Germany, (Sep. 16-19, 2008).
10) Y. Iwamoto, K. Yasuda, M. Sogo, H. Yamano, S. Kotake, “Study on Flow-Induced-Vibration Evaluation of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor (4) Experiments on the 1/10-Scale Hot Leg Test Facility in Reynolds Number of 50000 and 320000,” Proc. of the 6th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), Okinawa, Japan (Nov. 24-27, 2008).
11) K. Aizawa, H. Yamano, S. Kotake, K. Fujimata, “Numerical Calculation of Fluid Flow within a

Large-Diameter Piping with a Short-Radius Elbow in JSFR," Proc. of the 7th Int. Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS7), Seoul, Korea, NUTHOS7-037 (Oct. 5-9, 2008).

12) K. Aizawa, S. Nakanishi, H. Yamano, S. Kotake, S. Hayakawa, O. Watanabe, K. Fujimata, "Study on Flow-Induced-Vibration Evaluation of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor (1) Sensitivity Analysis of Turbulent Flow Models for Unsteady Short-Elbow Pipe Flow," Proc. of the 6th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), Okinawa, Japan (Nov. 24-27, 2008).

13) Y. Eguchi, T. Murakami, H. Ohshima, H. Yamano, S. Kotake, "Study on Flow-Induced-Vibration Evaluation of Large-Diameter Pipings in a Sodium-Cooled Fast Reactor (2) A Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Short-Elbow Pipe," Proc. of the 6th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS6), Okinawa, Japan (Nov. 24-27, 2008).

14) K. Yuki, M. Okumura, H. Hashizume, S. Toda, N.B. Morley and A. Sagara, "Flow Visualization and Heat Transfer Characteristics for Sphere-Packed Pipes," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 22, pp. 632−648 (2008).

15) 吉田和弘、結城和久、橋爪秀利、山野秀将、小竹庄司「Na 冷却高速炉における大口径配管の流力振動評価に関する研究　(6) コールドレグ 1/15 縮尺試験におけるエルボ管内流れの PIV 計測」日本原子力学会 2008 年春の年会，大阪（2008/3/26～28）.

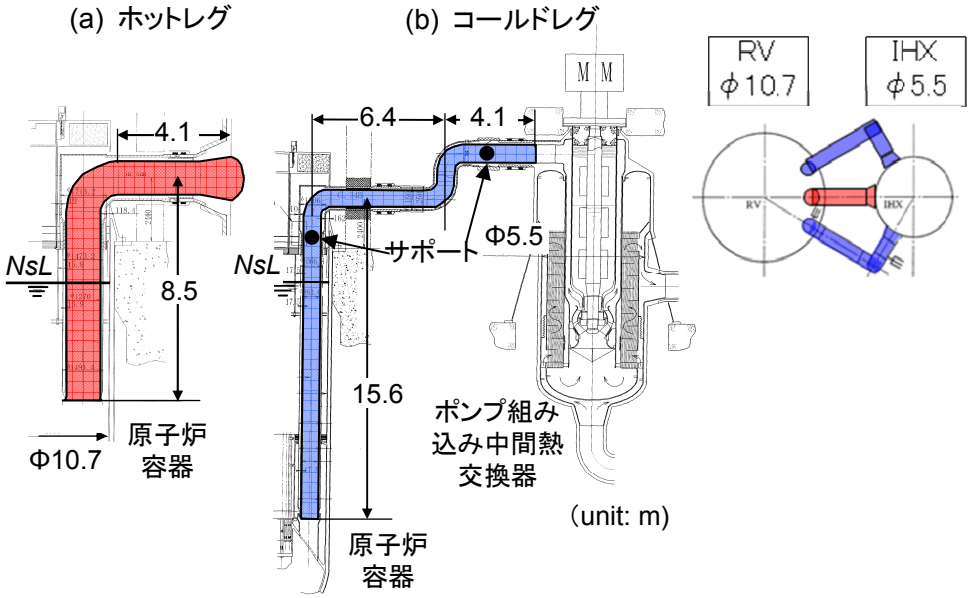


図 1： 2 ループ型ナトリウム冷却大型高速炉の 1 次主冷却系配管

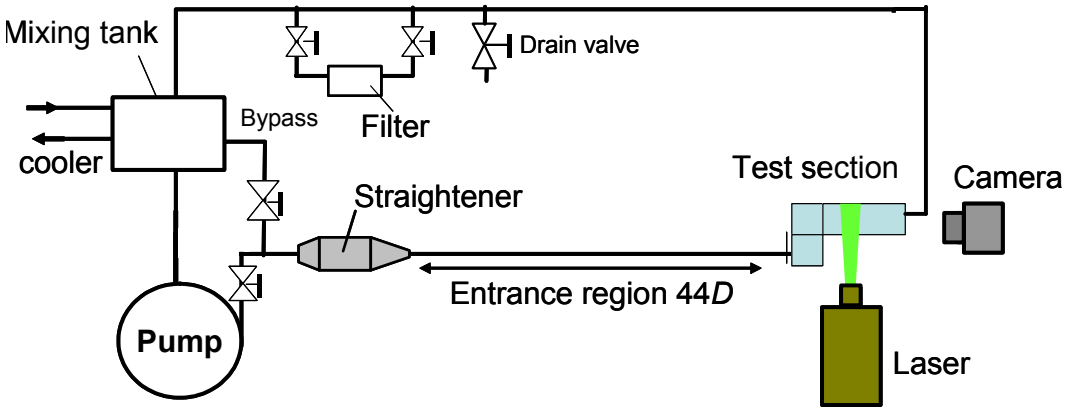


図 2： コールドレグ 1/15 縮尺流動試験装置図

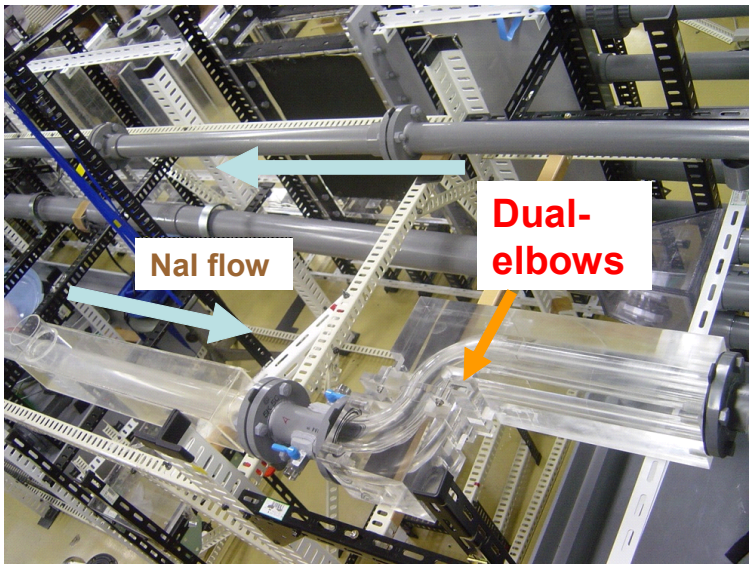


図 3： 2 段エルボ試験部

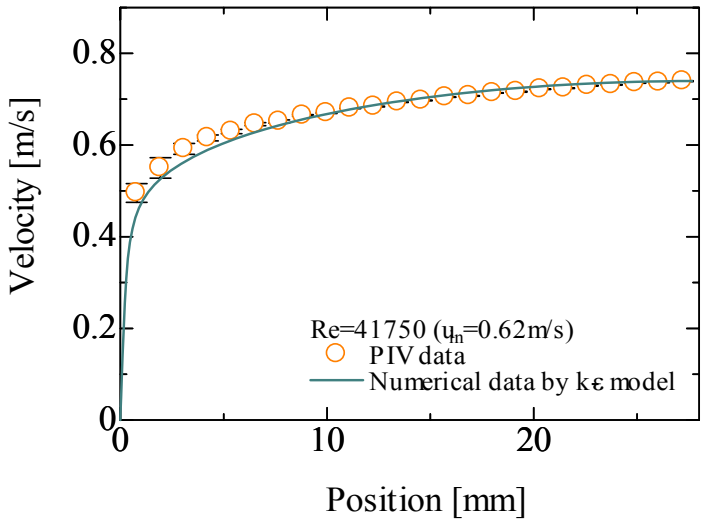


図 4： エルボ入口の流れ方向流速分布(**Re~42000, U_{in}=0.62m/s**)

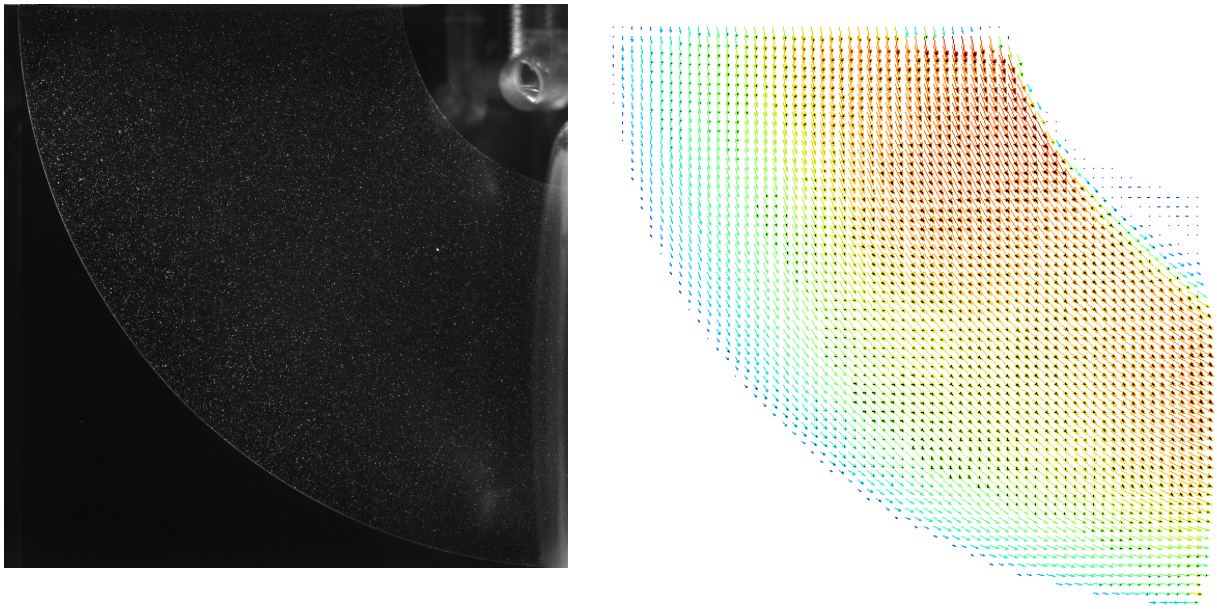


図 5： 屈折率調合 **PIV** 計測によるトレーサ粒子像と時間平均流速ベクトル

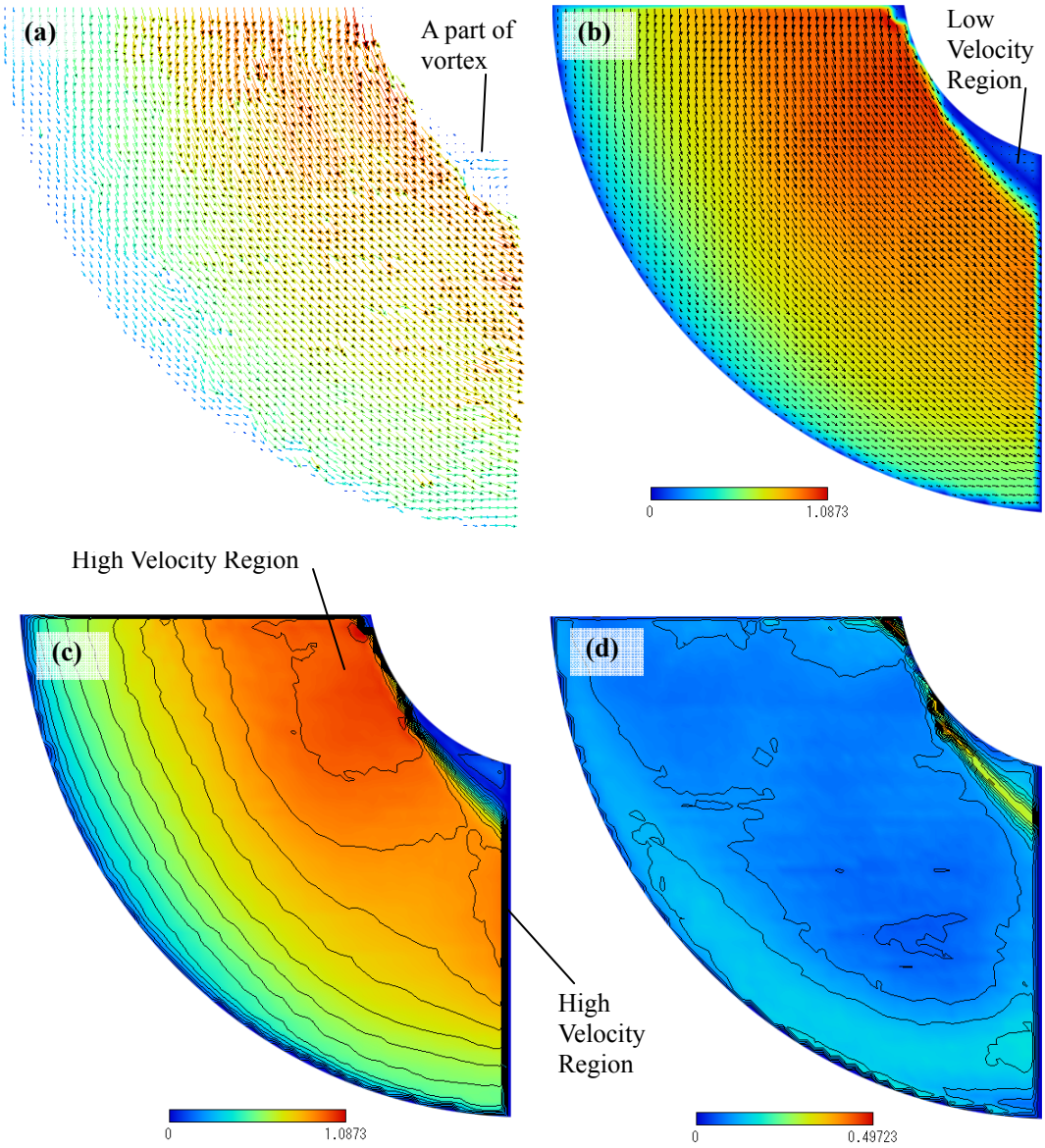


図 6： 第 1 エルボにおける流動状態（(a)瞬時流動場，(b)平均流速場，(c)等速度線図 ，(d)面内速度変動の RMS 値）

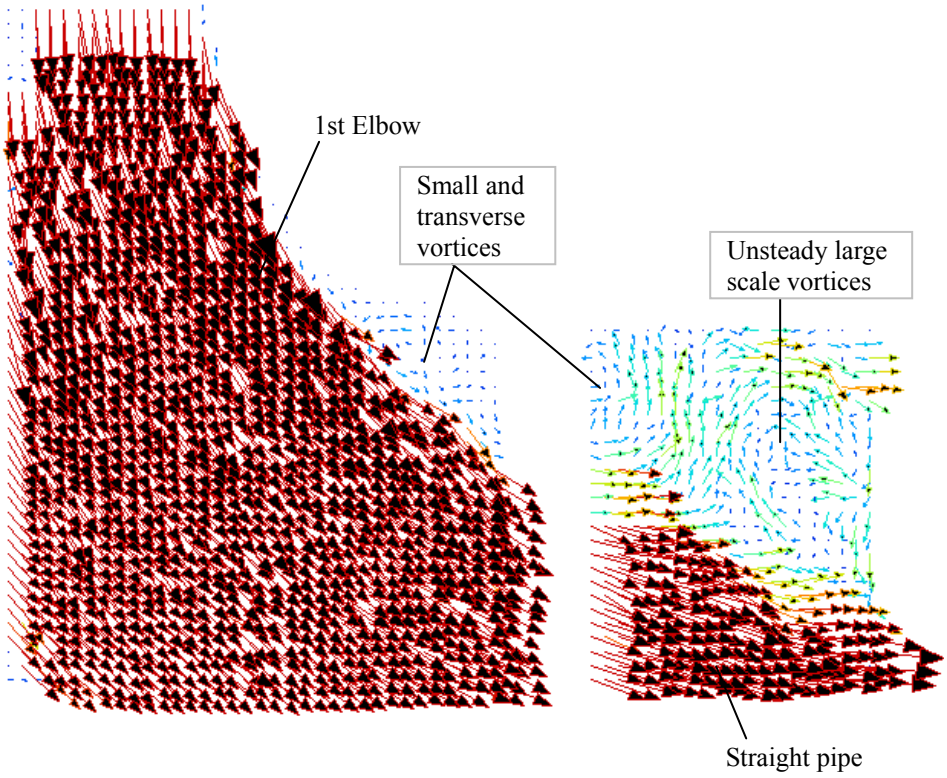


図 7： 剥離領域に着目した瞬時流動場

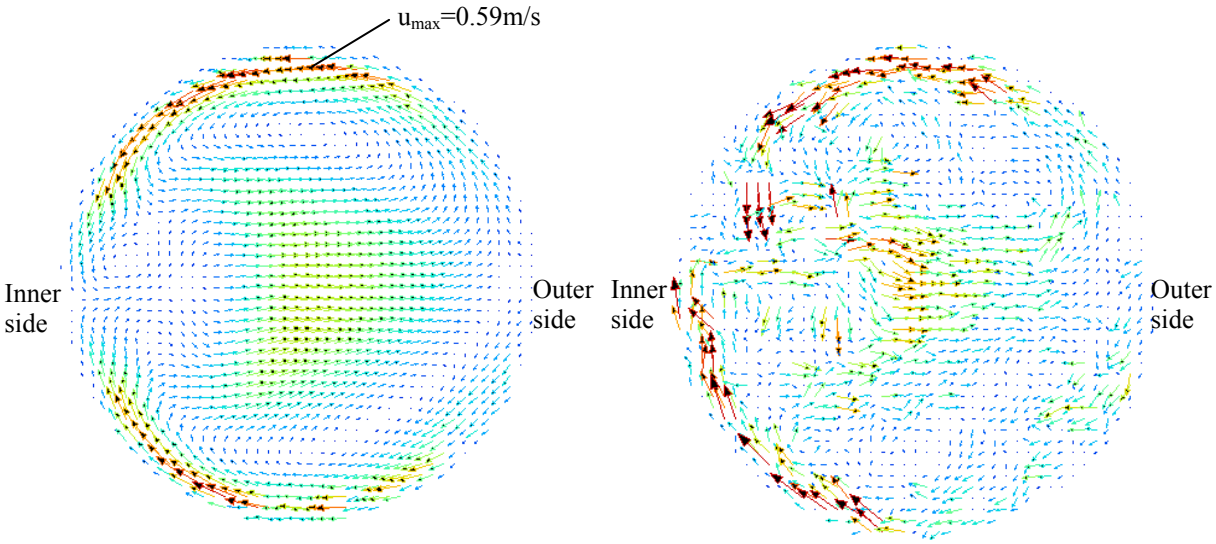


図 8： 第 1 エルボ下流 0.2D における 2 次流れ（左図：時間平均流動場、右図：瞬時流動場）

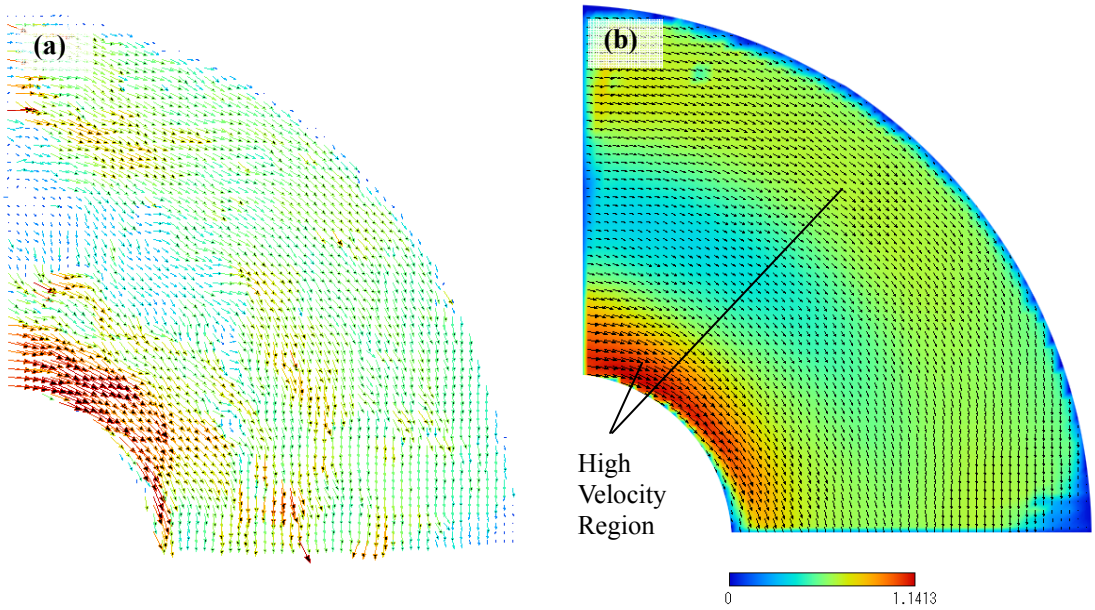


図 9：第 2 エルボにおける瞬時流動場及び時間平均流動場

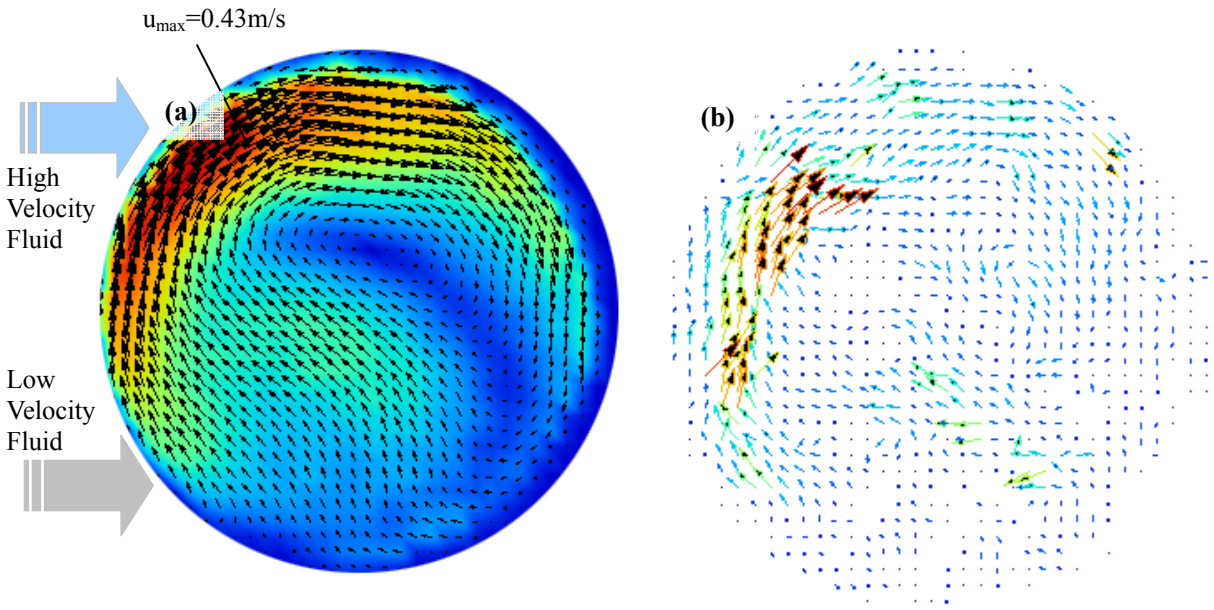


図 10：第 2 エルボ下流 0.2D における 2 次流れ（左図：時間平均流動場、右図：瞬時流動場）

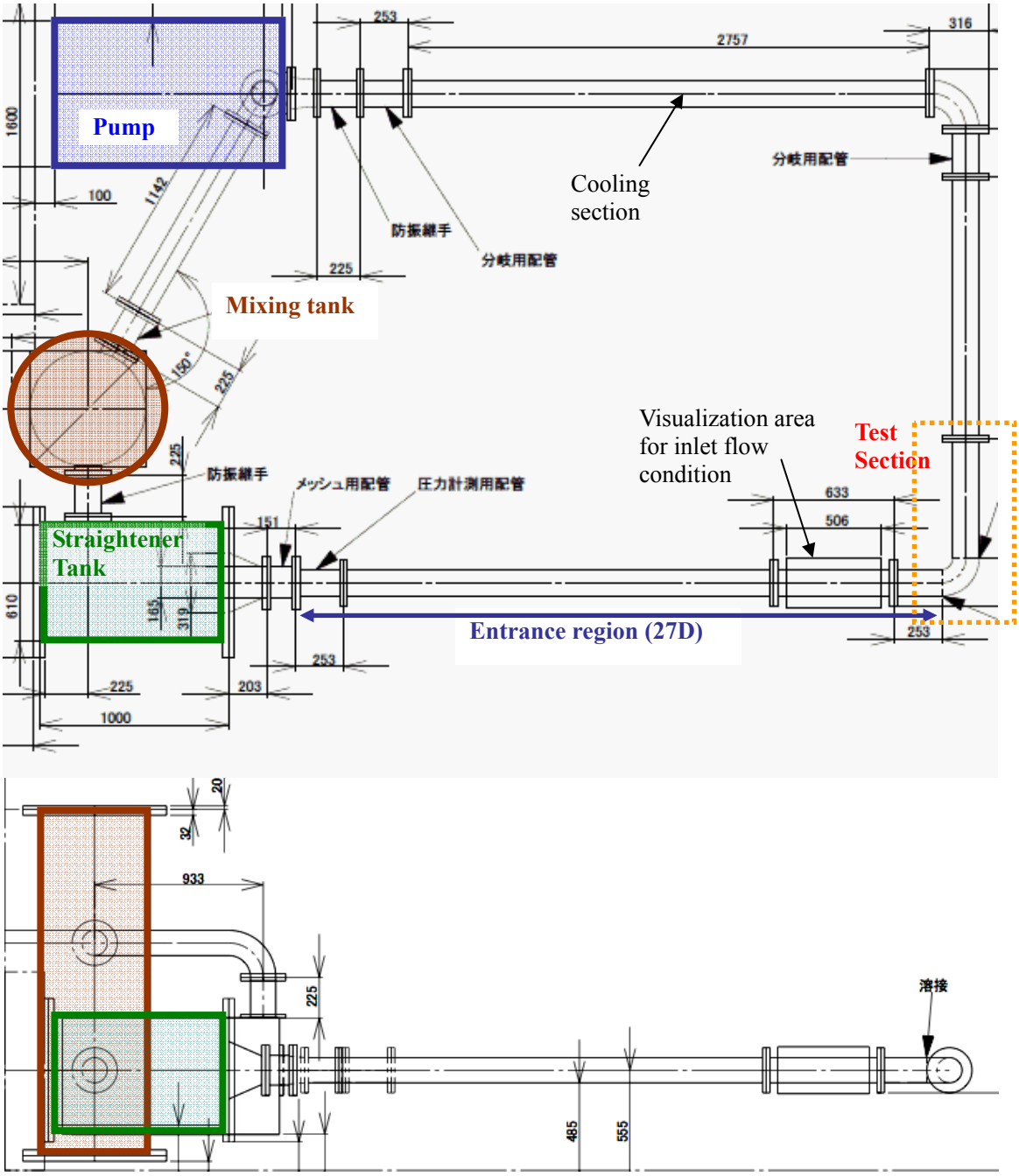


図 11： コールドレグ 1/7 縮尺流動試験装置（上図：上面図、下図：側面図）

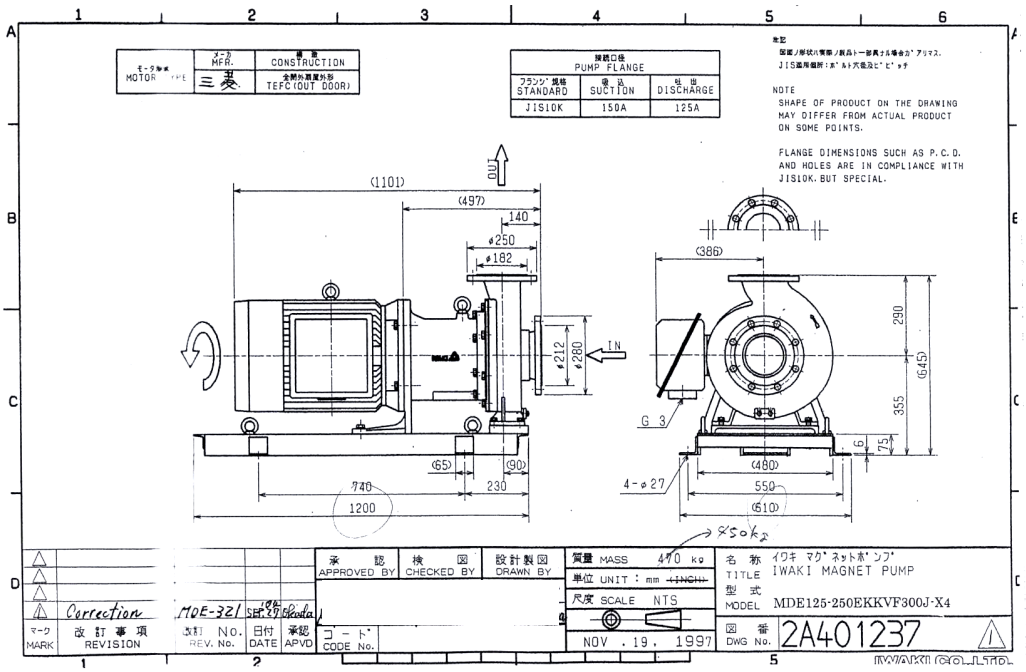


図 12： 循環ポンプ設計図

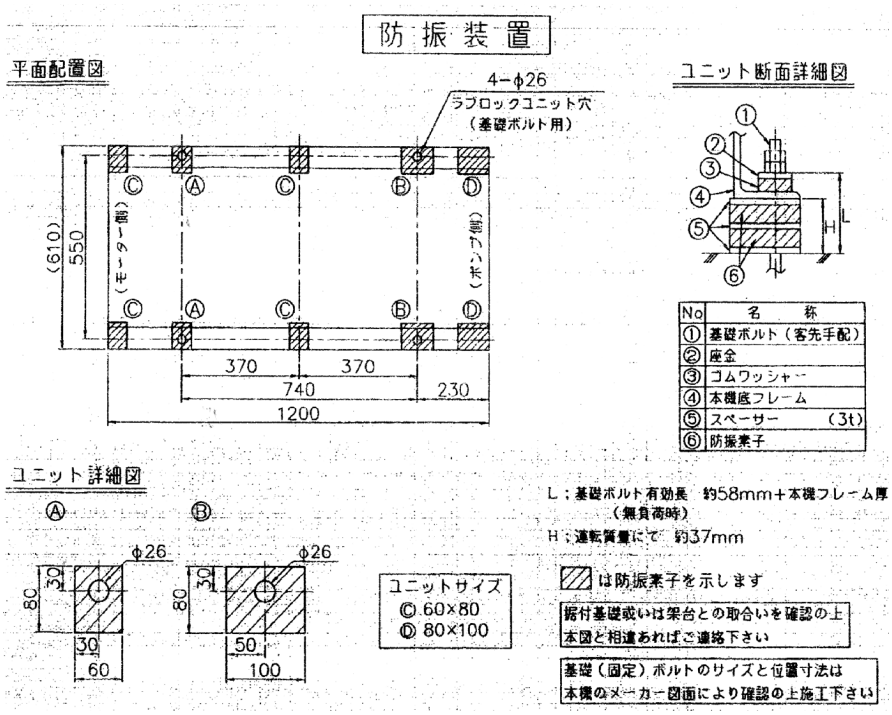


図 13： 振動吸収ゴム設計図

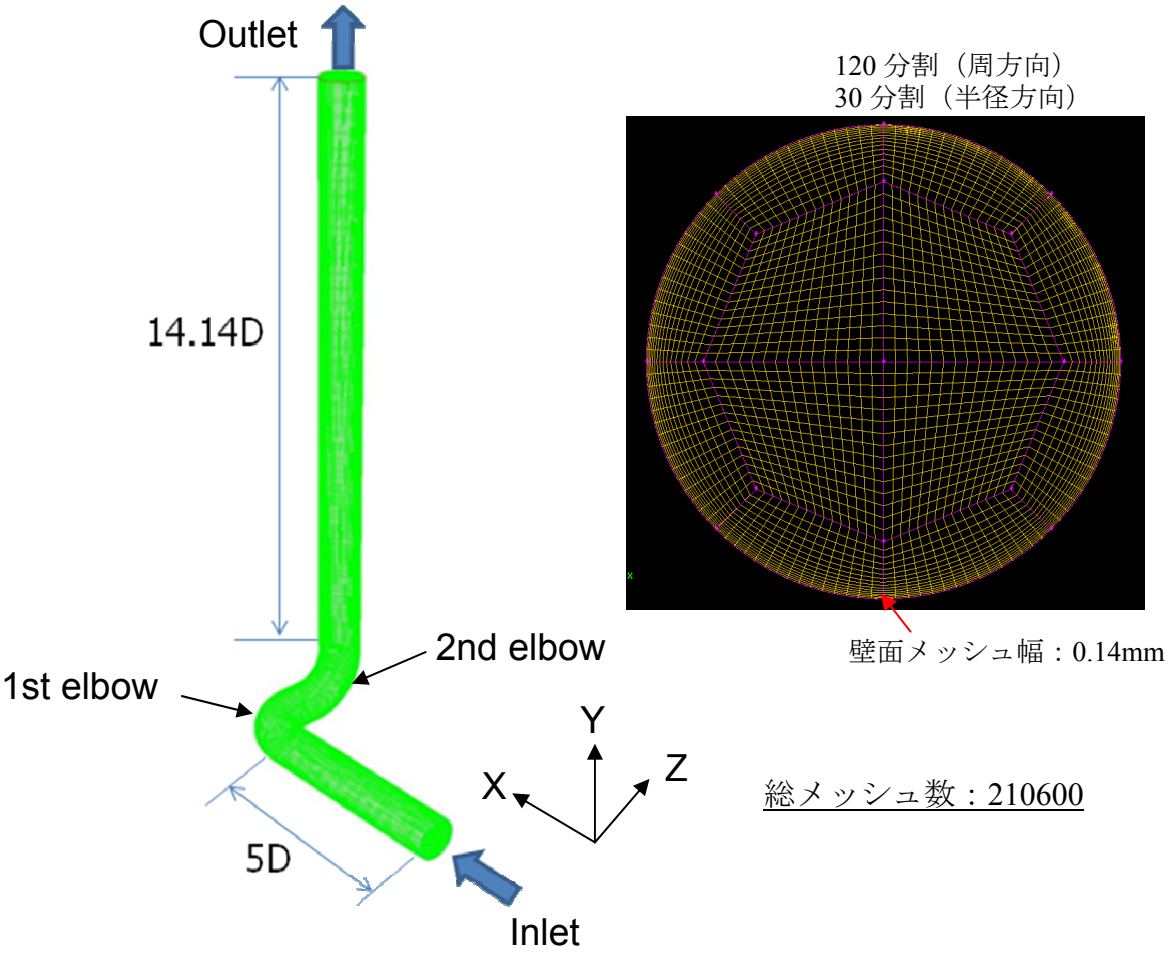


図 14： コールドレグ 1/15 縮尺流動試験の解析モデル

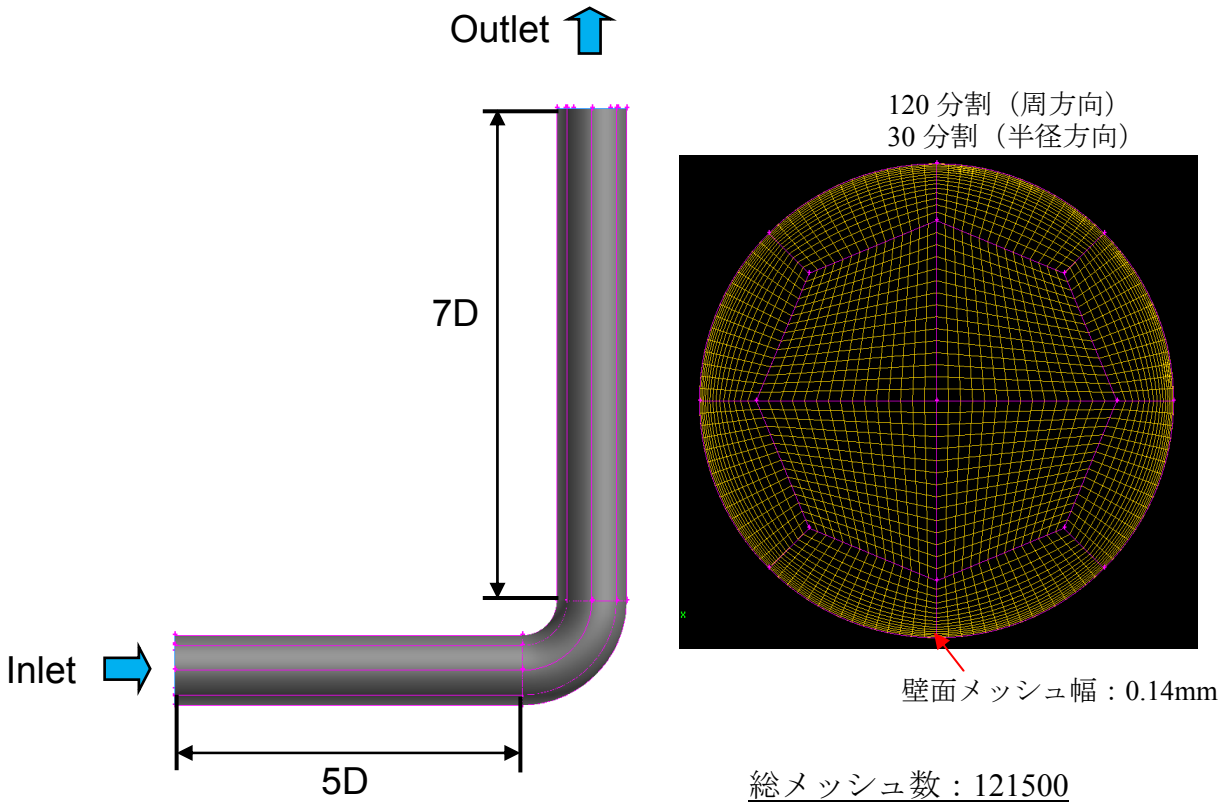
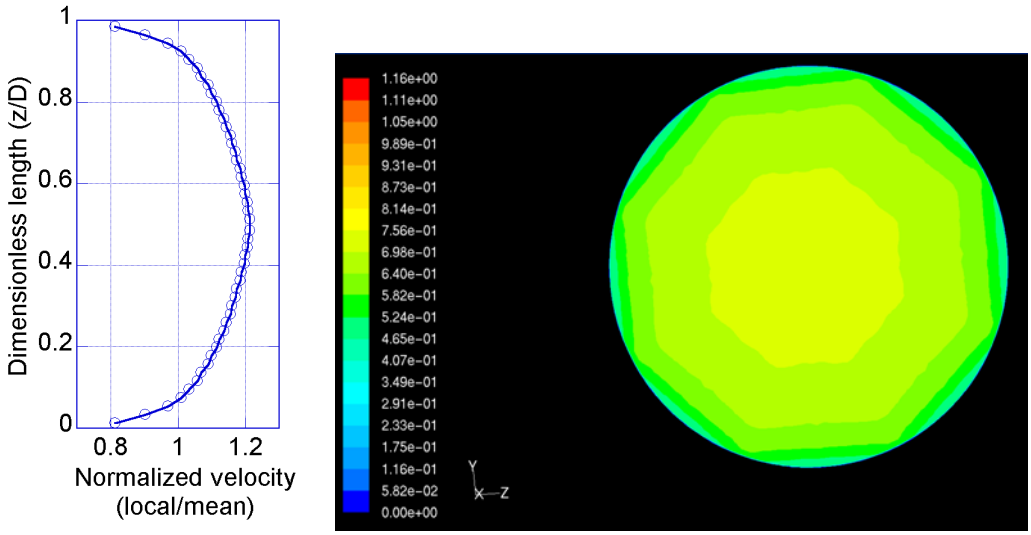


図 15：シングルエルボ体系の解析モデル



(a) Velocity profile at the pipe center **(b) Cross-sectional velocity profile**

図 16： 解析モデル入口の流速分布

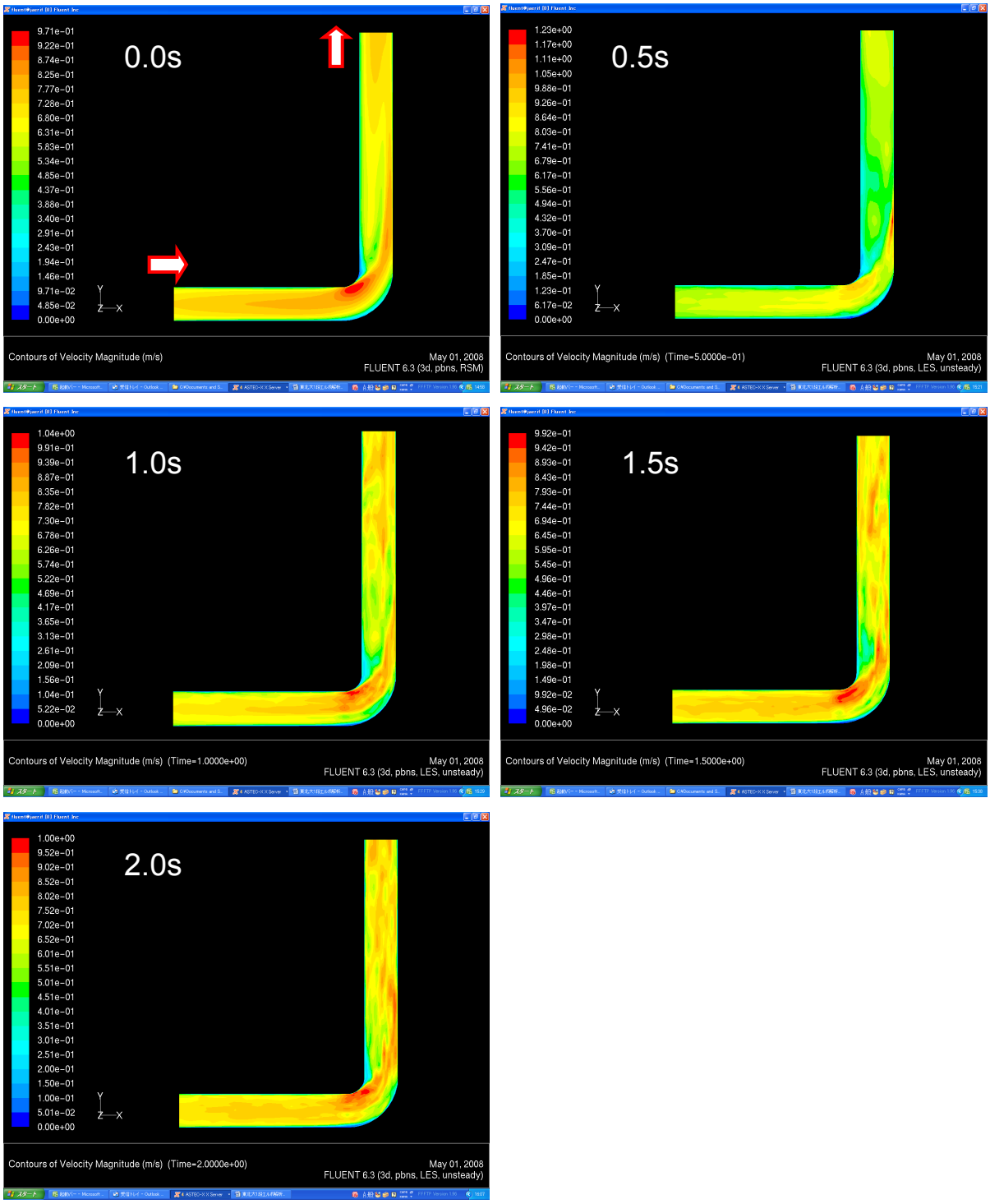


図 17： シングルエルボ体系解析における流速コンター

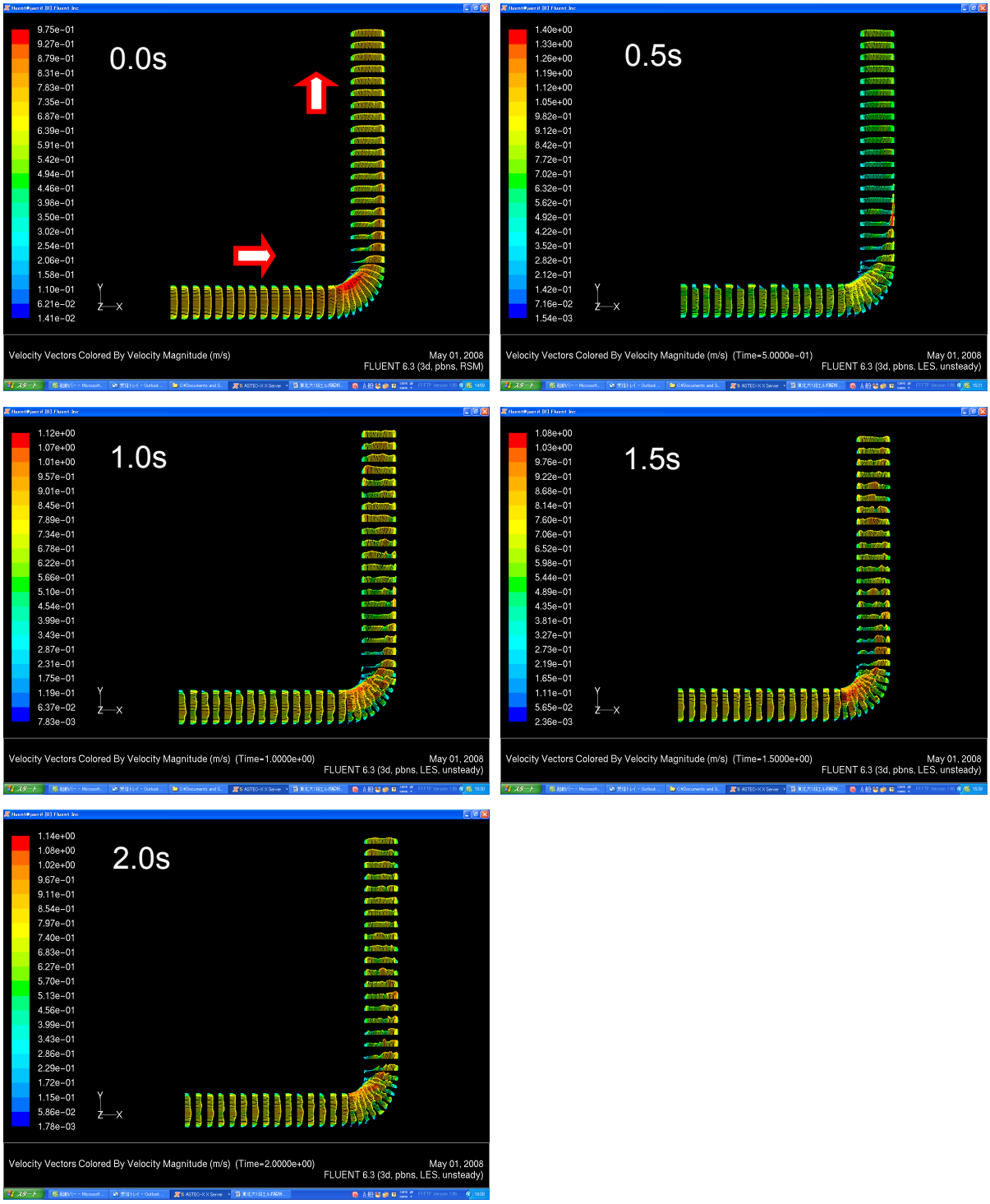


図 18： シングルエルボ体系解析における流速ベクトル

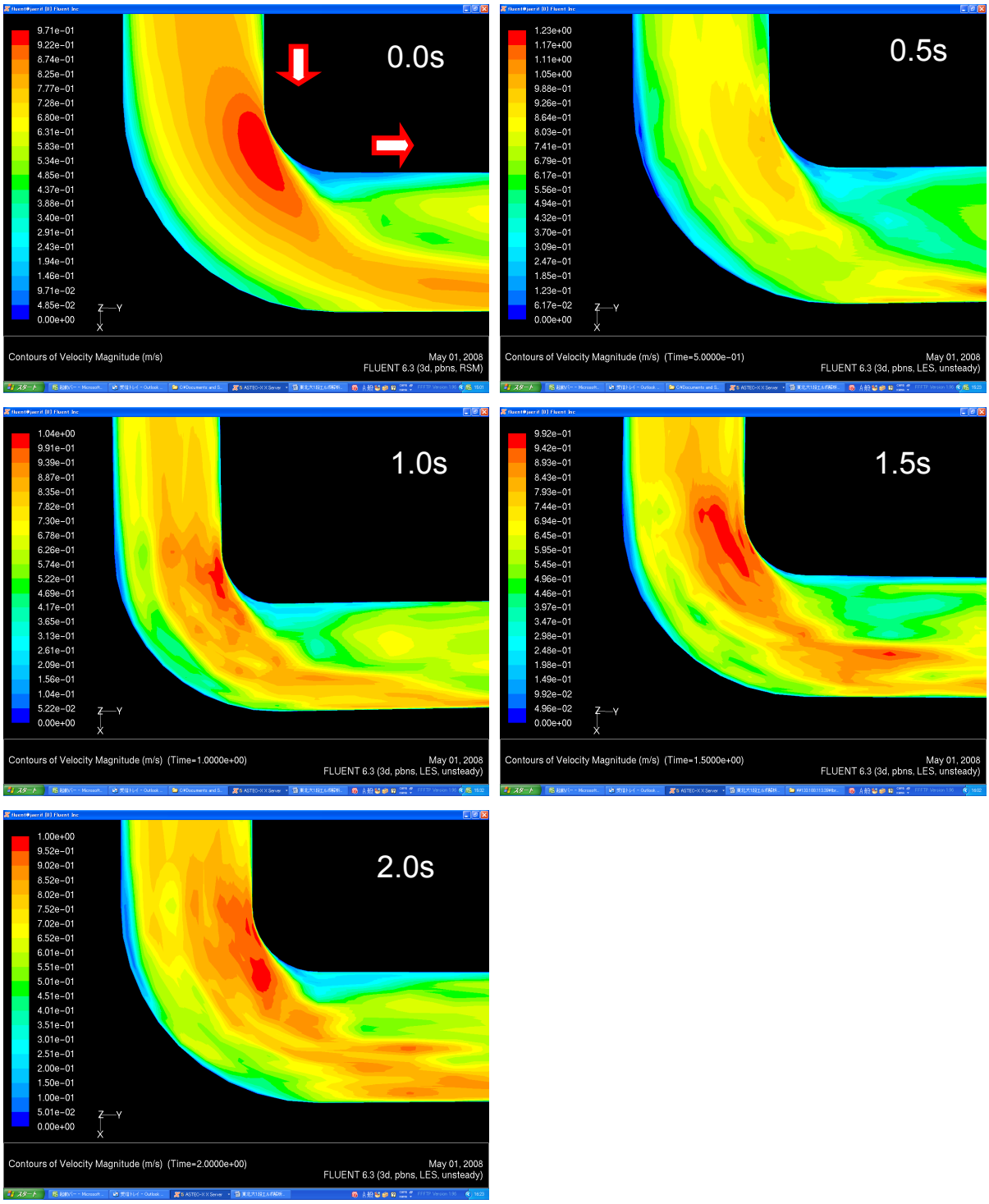


図 19： シングルエルボ体系解析における流速コンター（エルボ部拡大）

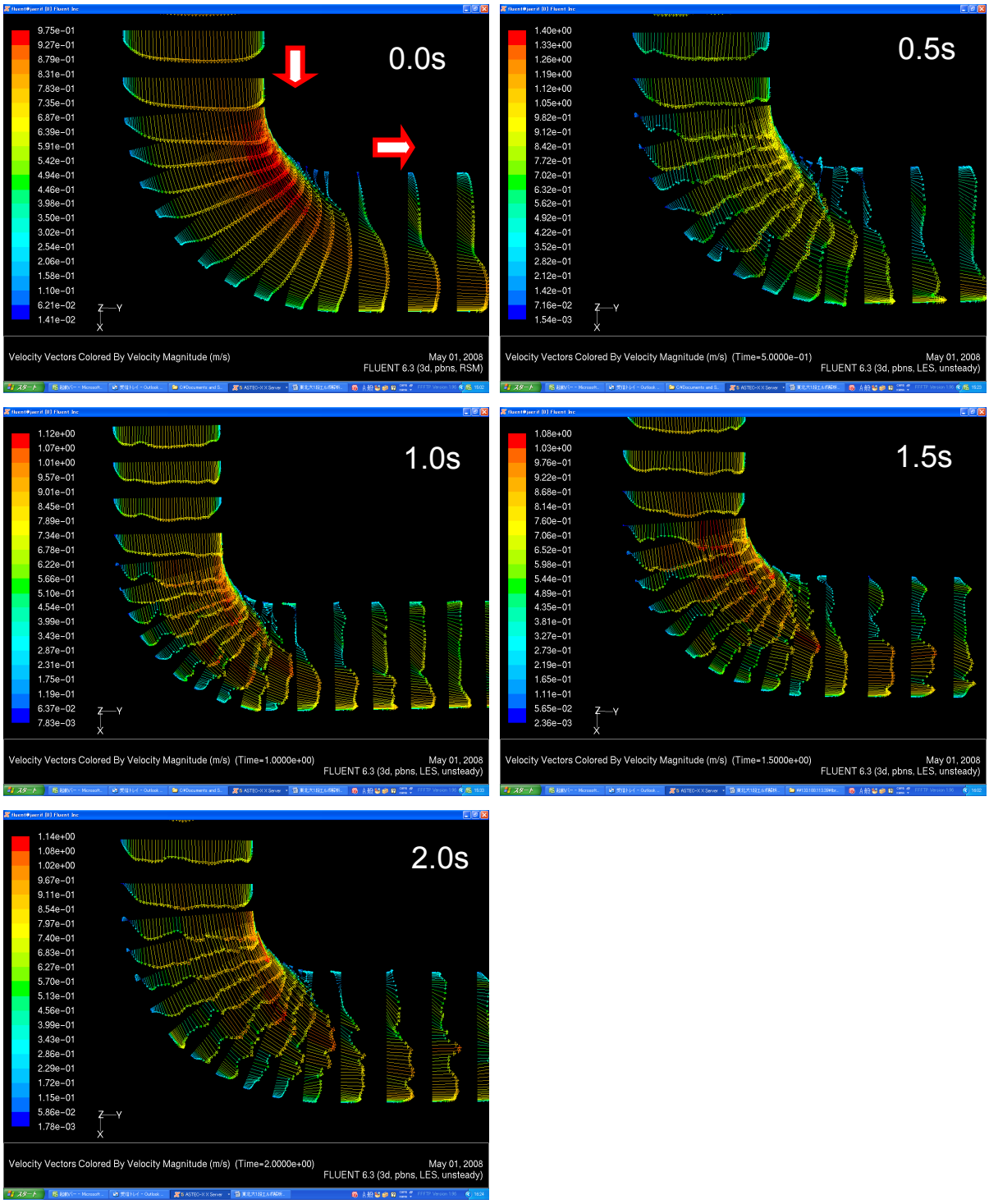


図 **20**： シングルエルボ体系解析における流速ベクトル（エルボ部拡大）

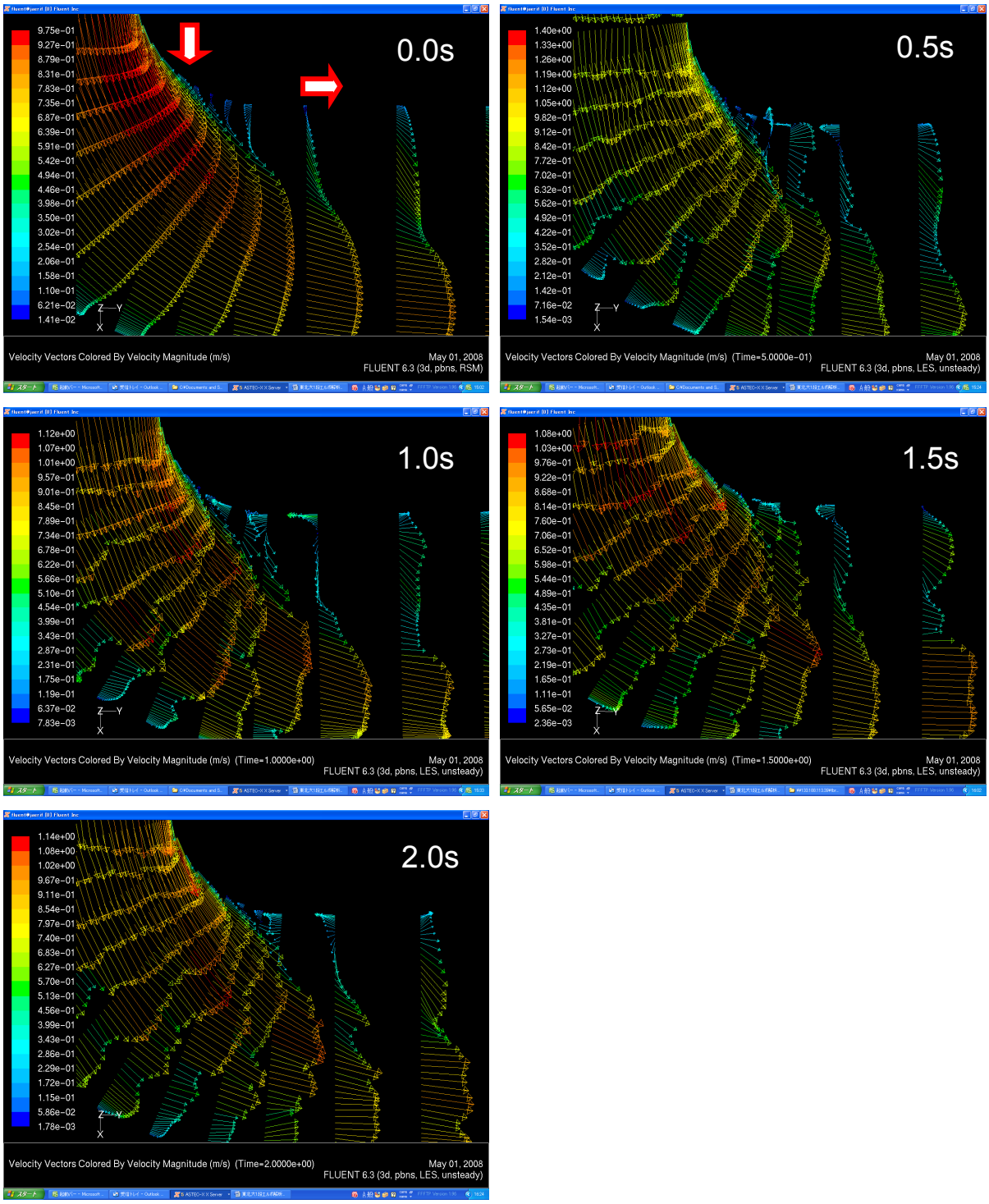


図 21： シングルエルボ体系解析における流速ベクトル（エルボ後流での剥離部拡大）

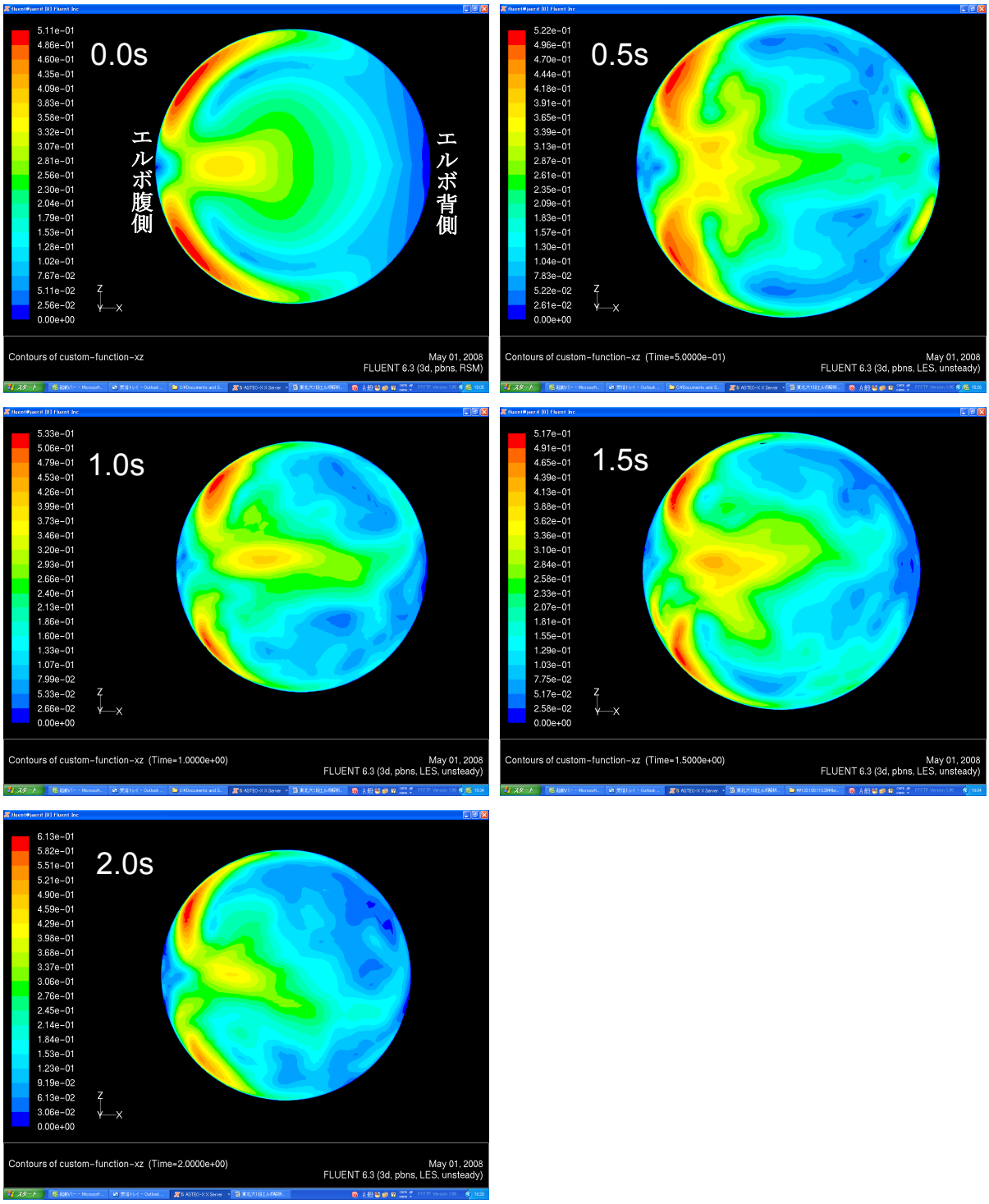


図 22： シングルエルボ体系解析におけるエルボ出口から 0.2D 下流での２次流れ流速コンター

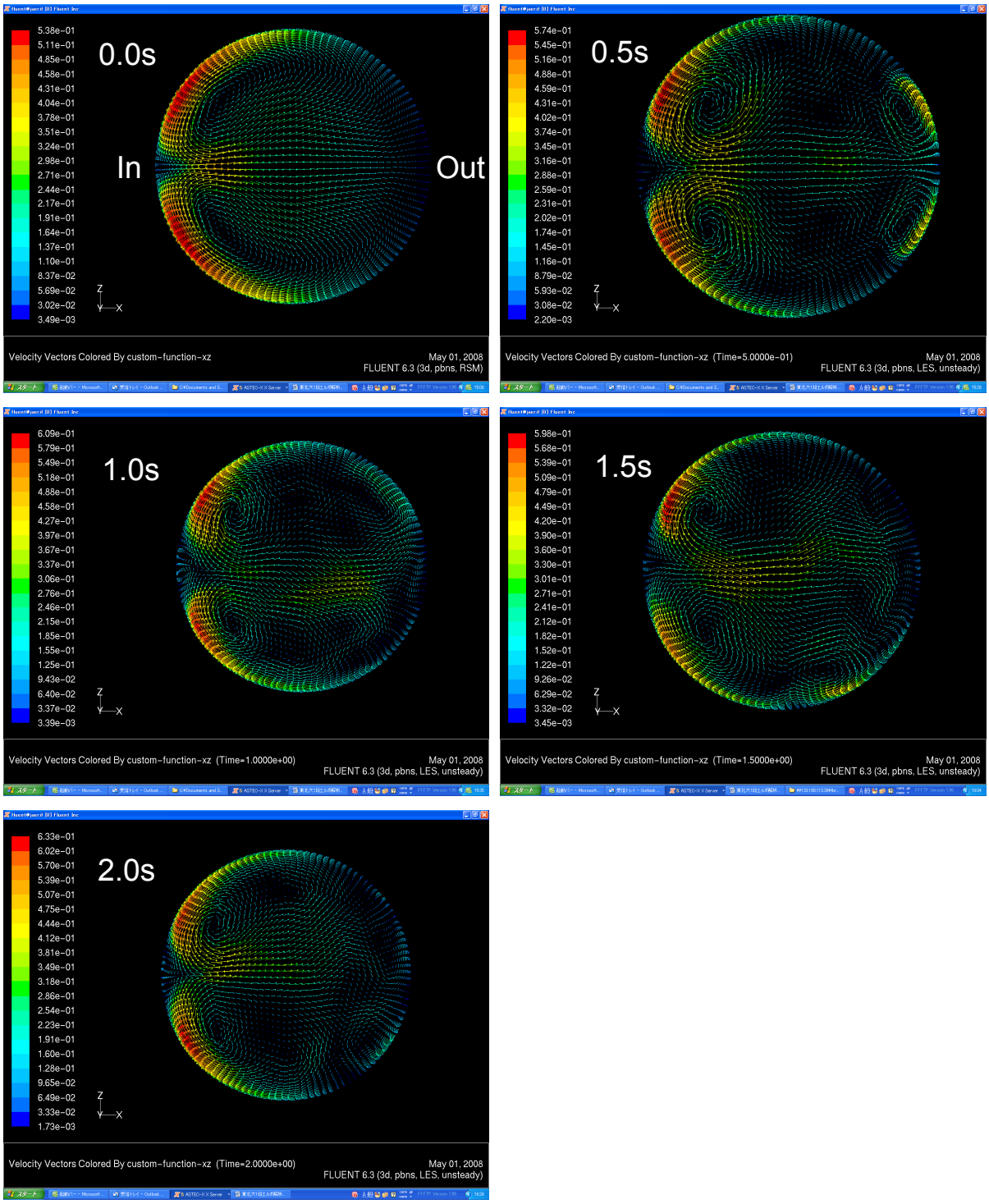


図 **23**： シングルエルボ体系解析におけるエルボ出口から **0.2D** 下流での２次流れ流速ベクトル

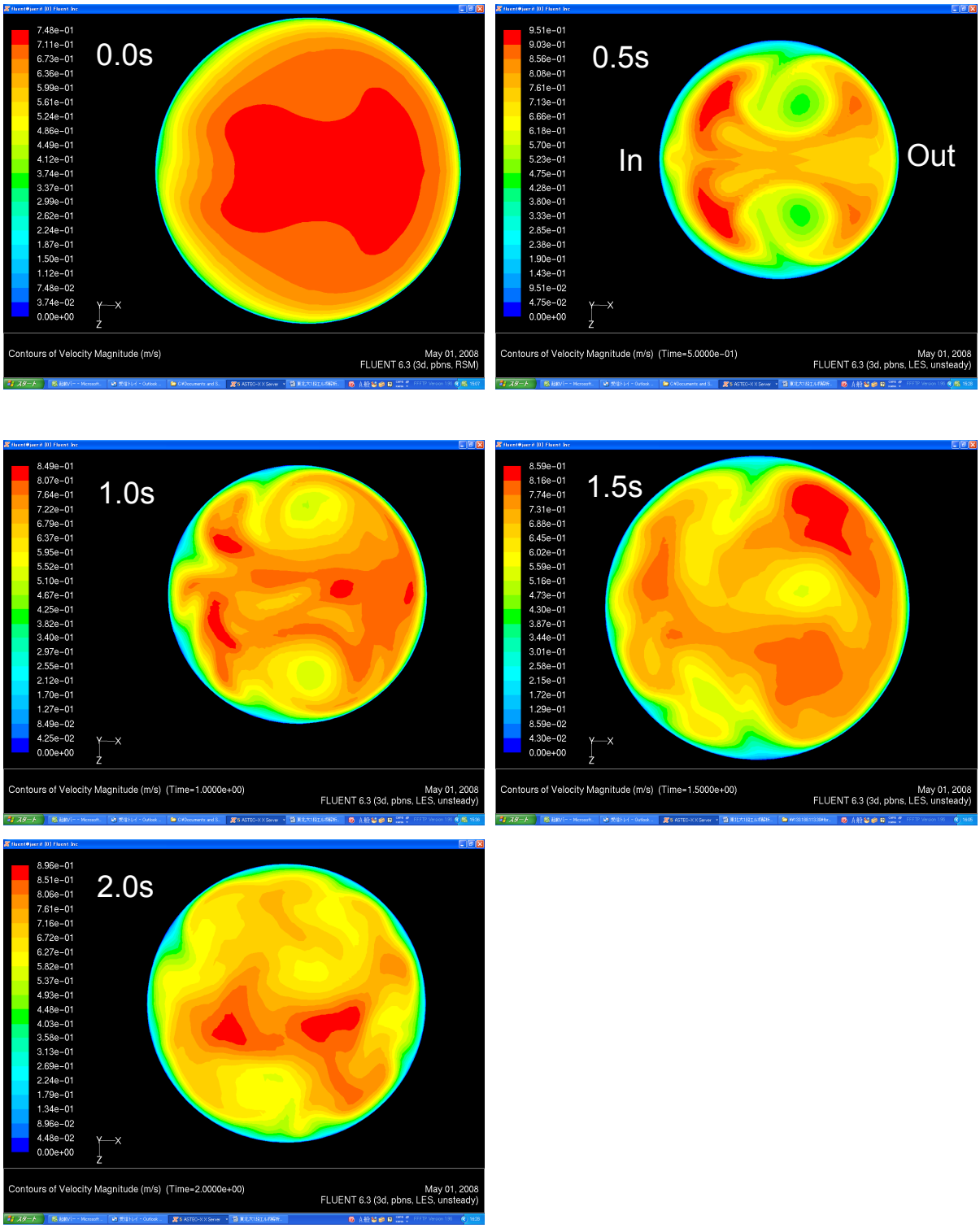


図 24： シングルエルボ体系解析における出口境界での軸方向流速コンター

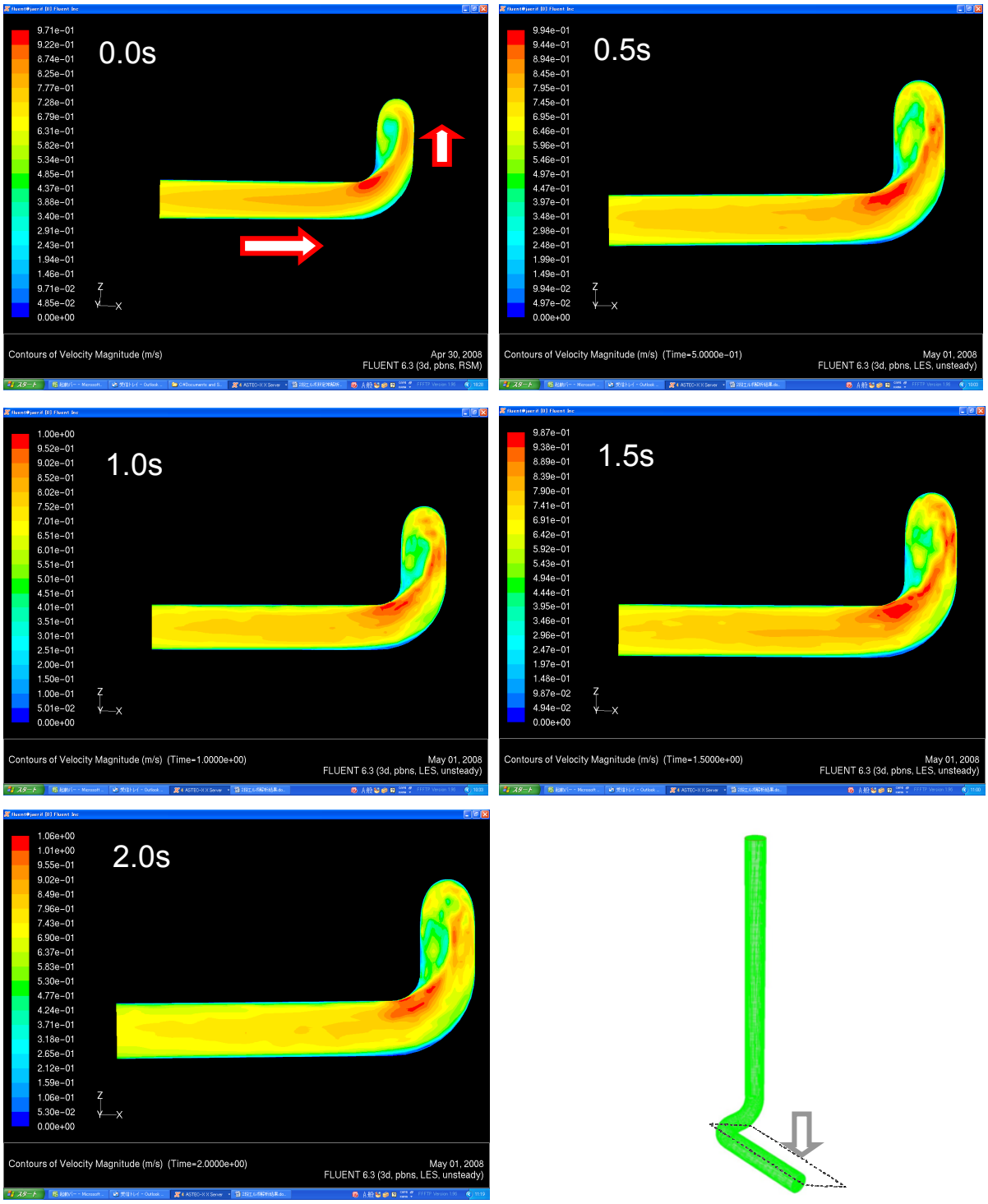


図 25： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部全体の流速コンター

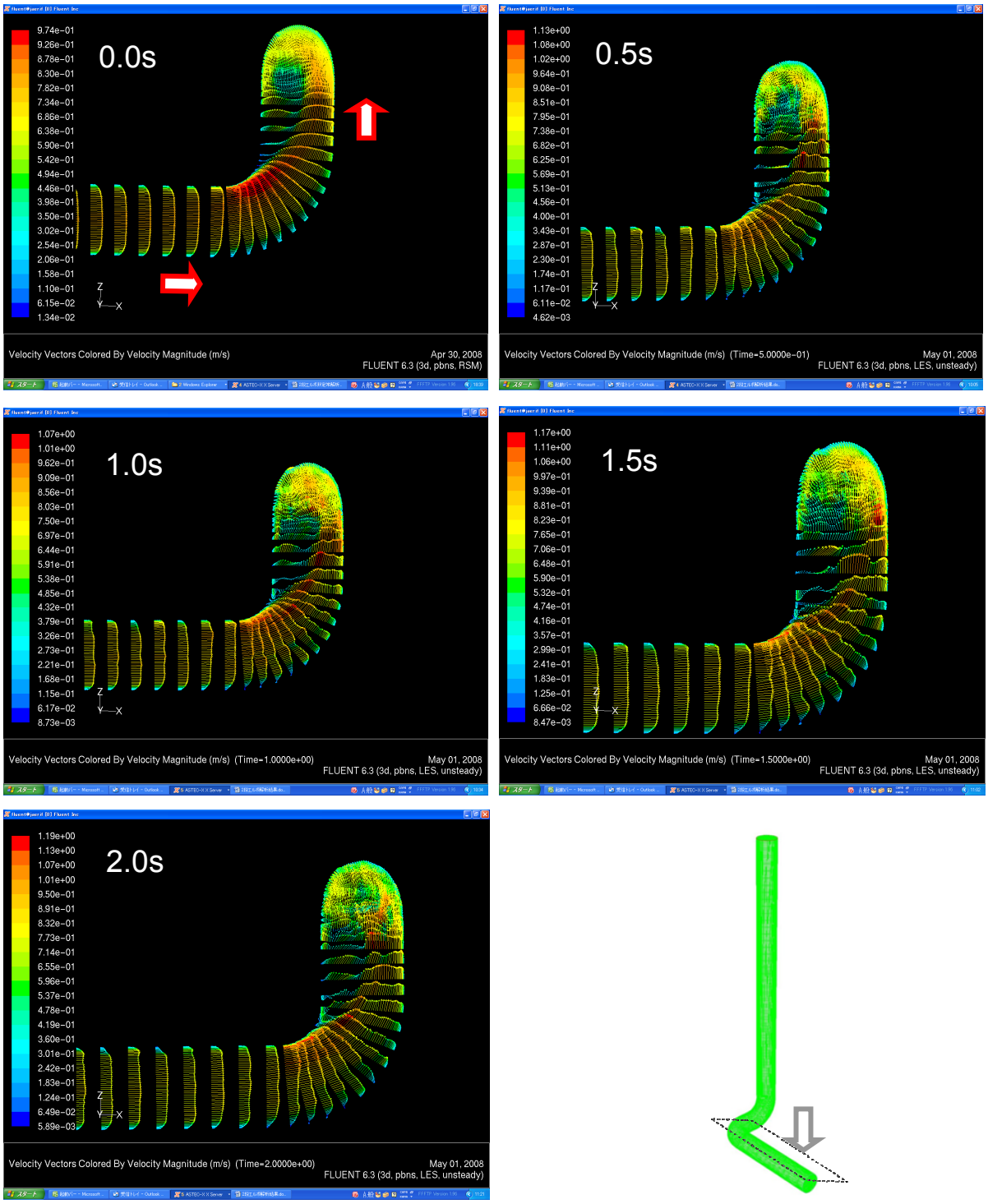


図 26： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部全体の流速ベクトル

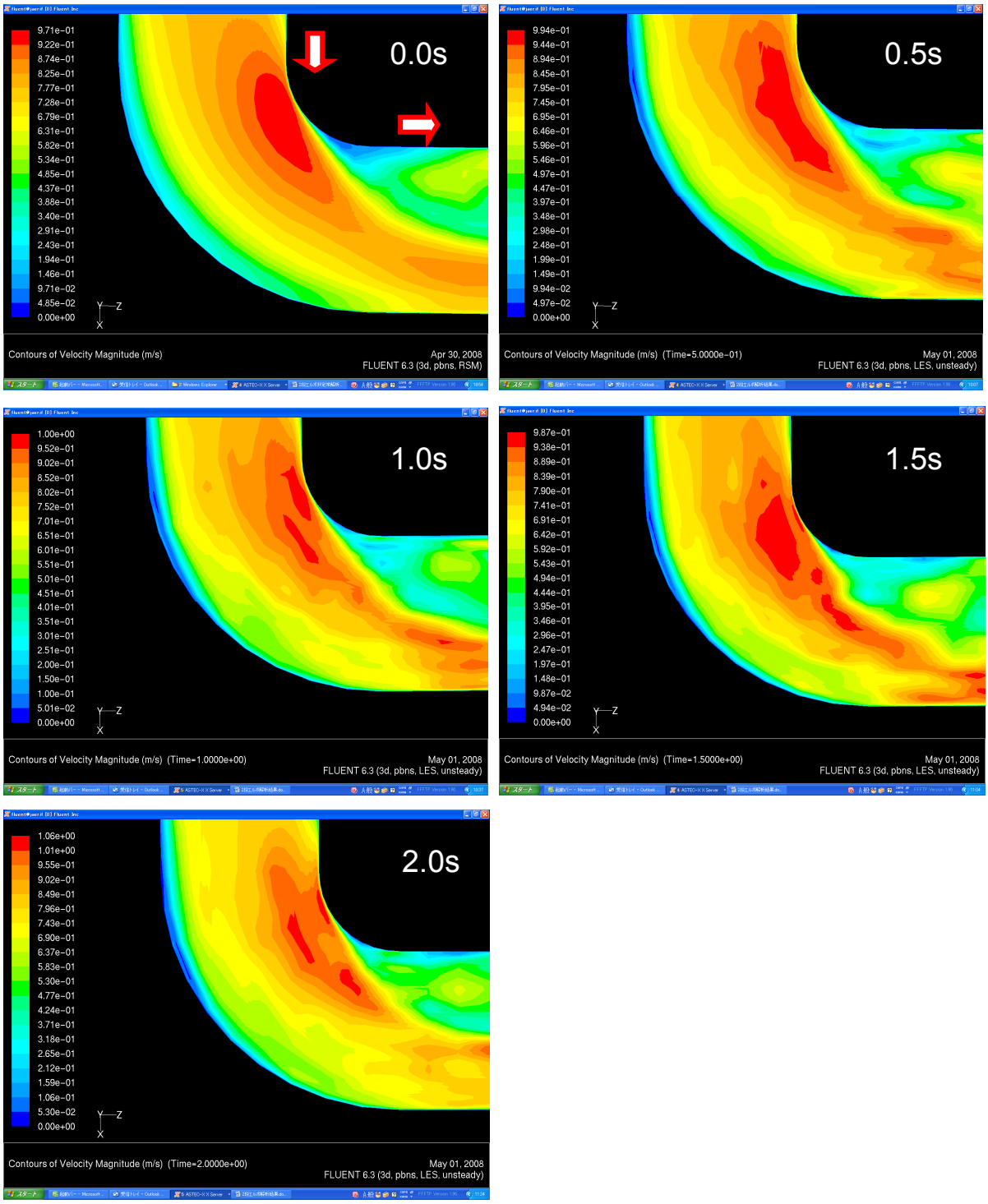


図 27： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部の流速コンター（エルボ部拡大）

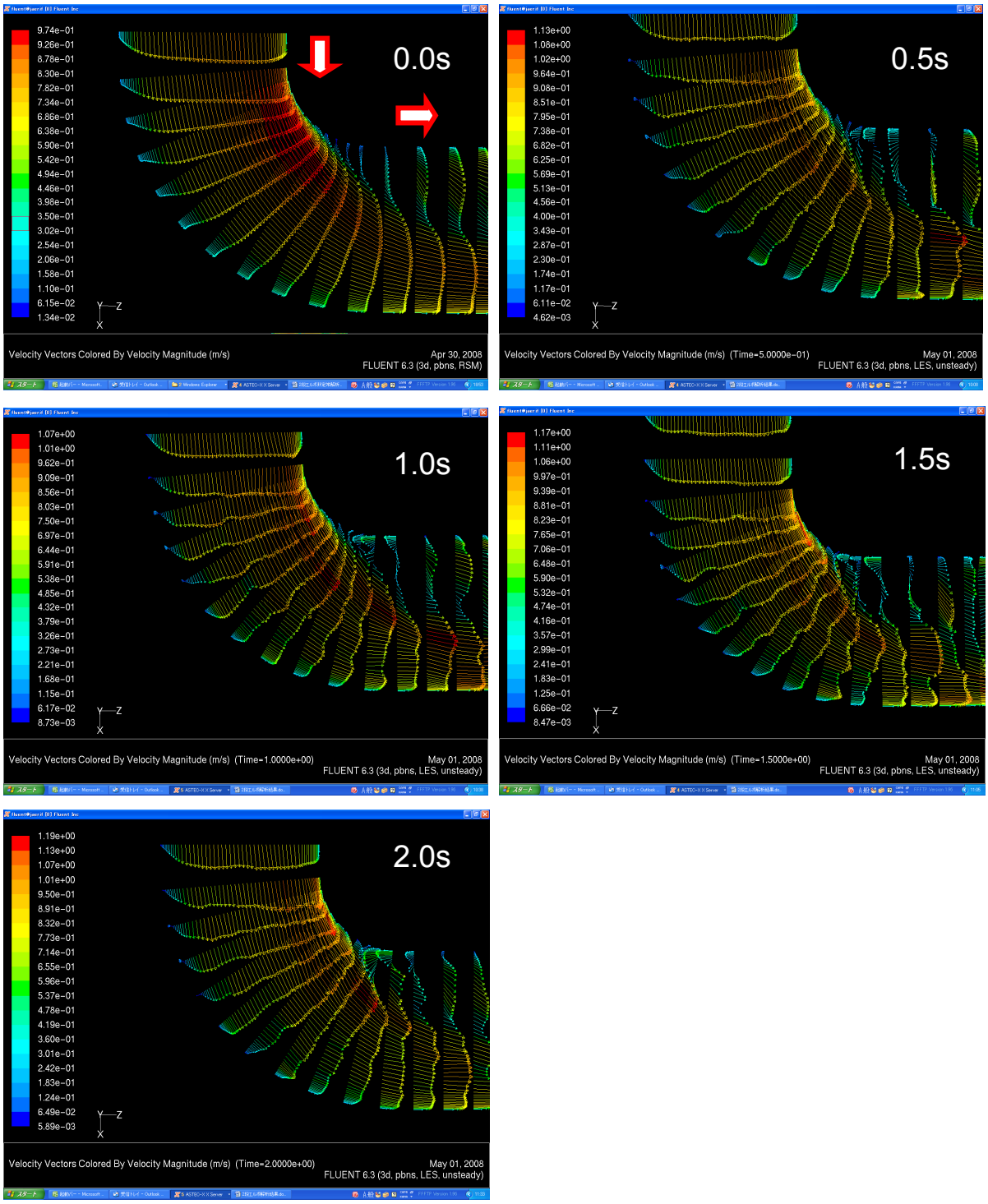


図 28： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部の流速ベクトル（エルボ部拡大）

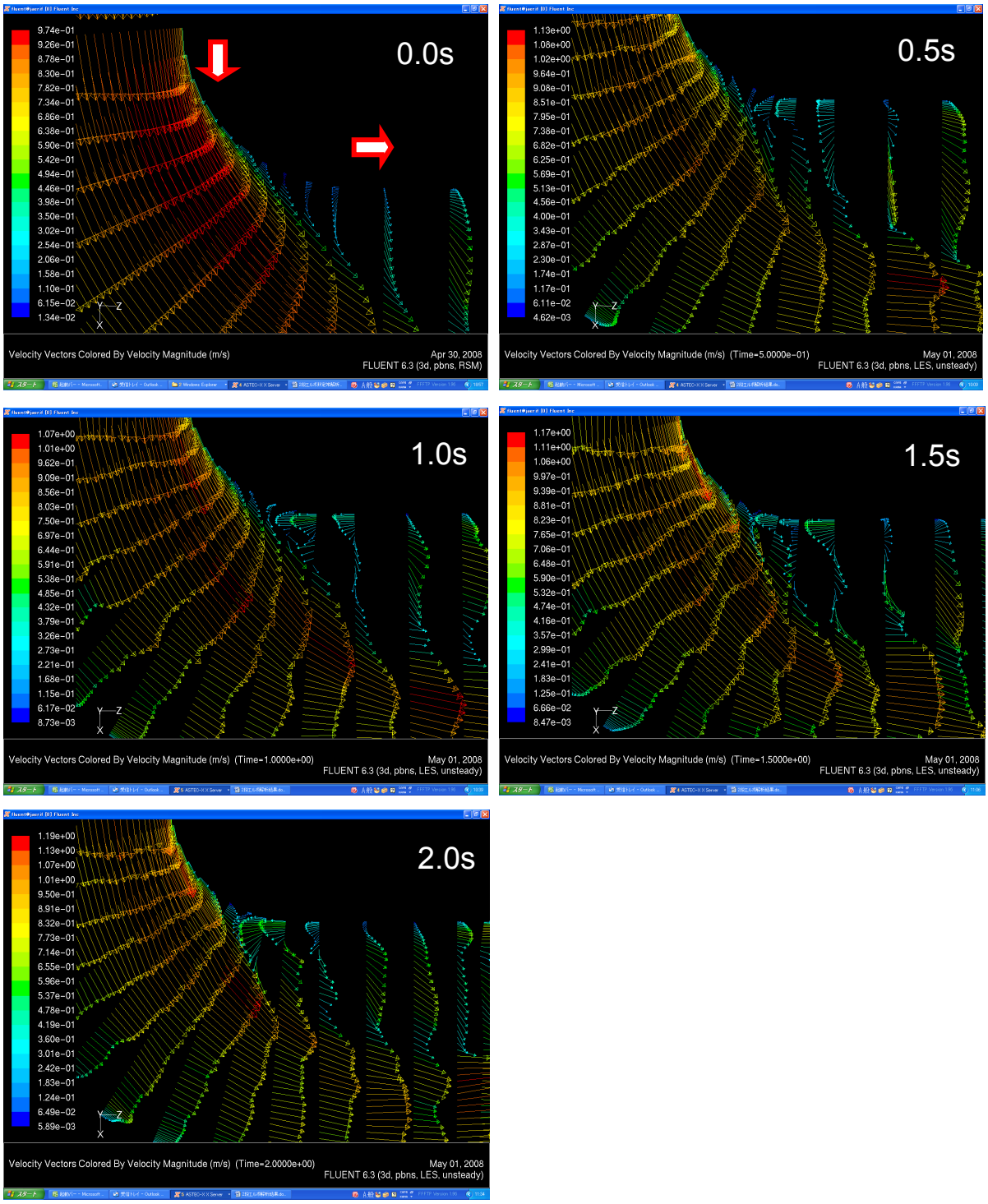


図 29： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ部の流速ベクトル
（エルボ後流での剥離部拡大）

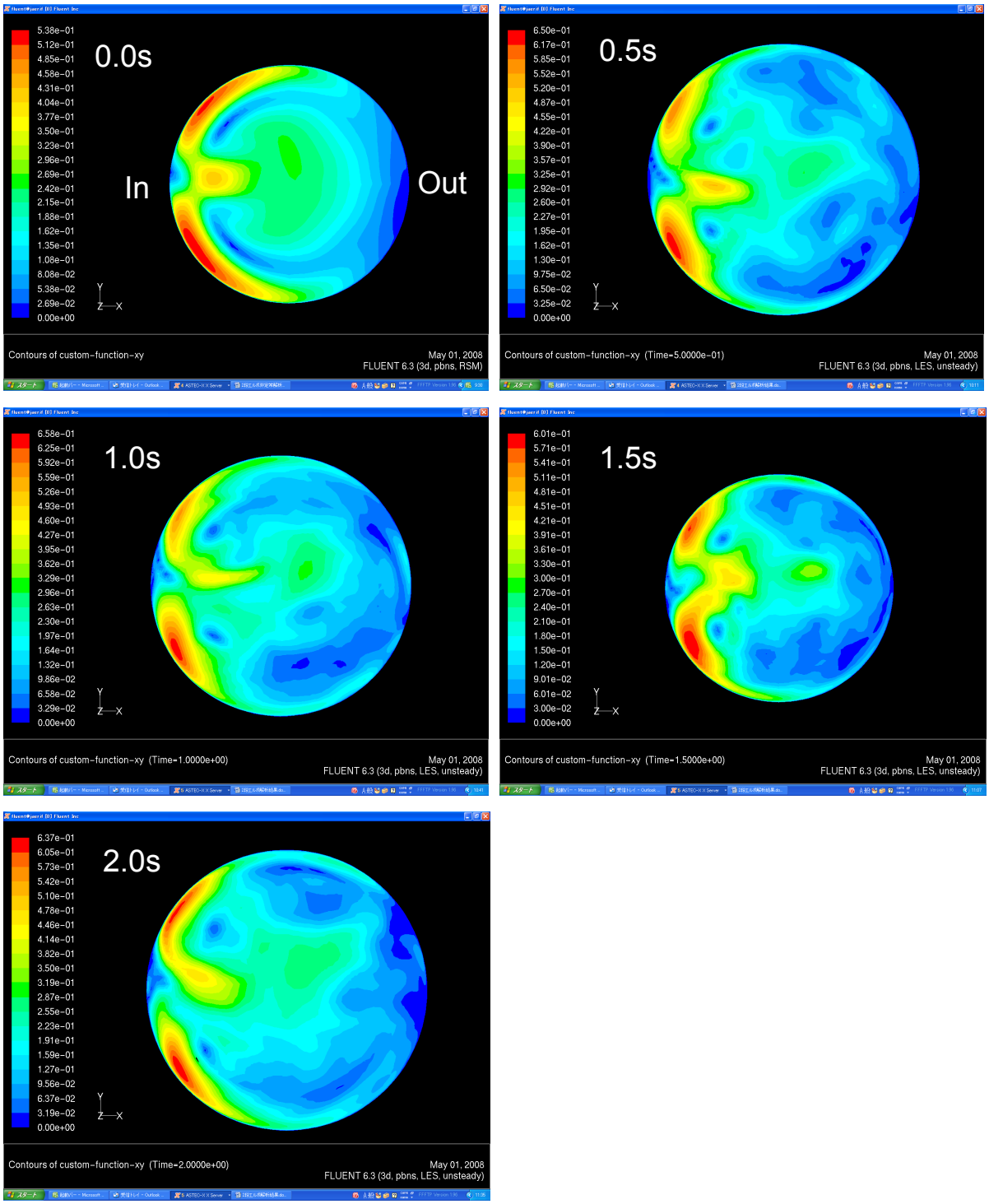


図 30： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ出口から 0.2D 下流での
２次流れ流速コンター

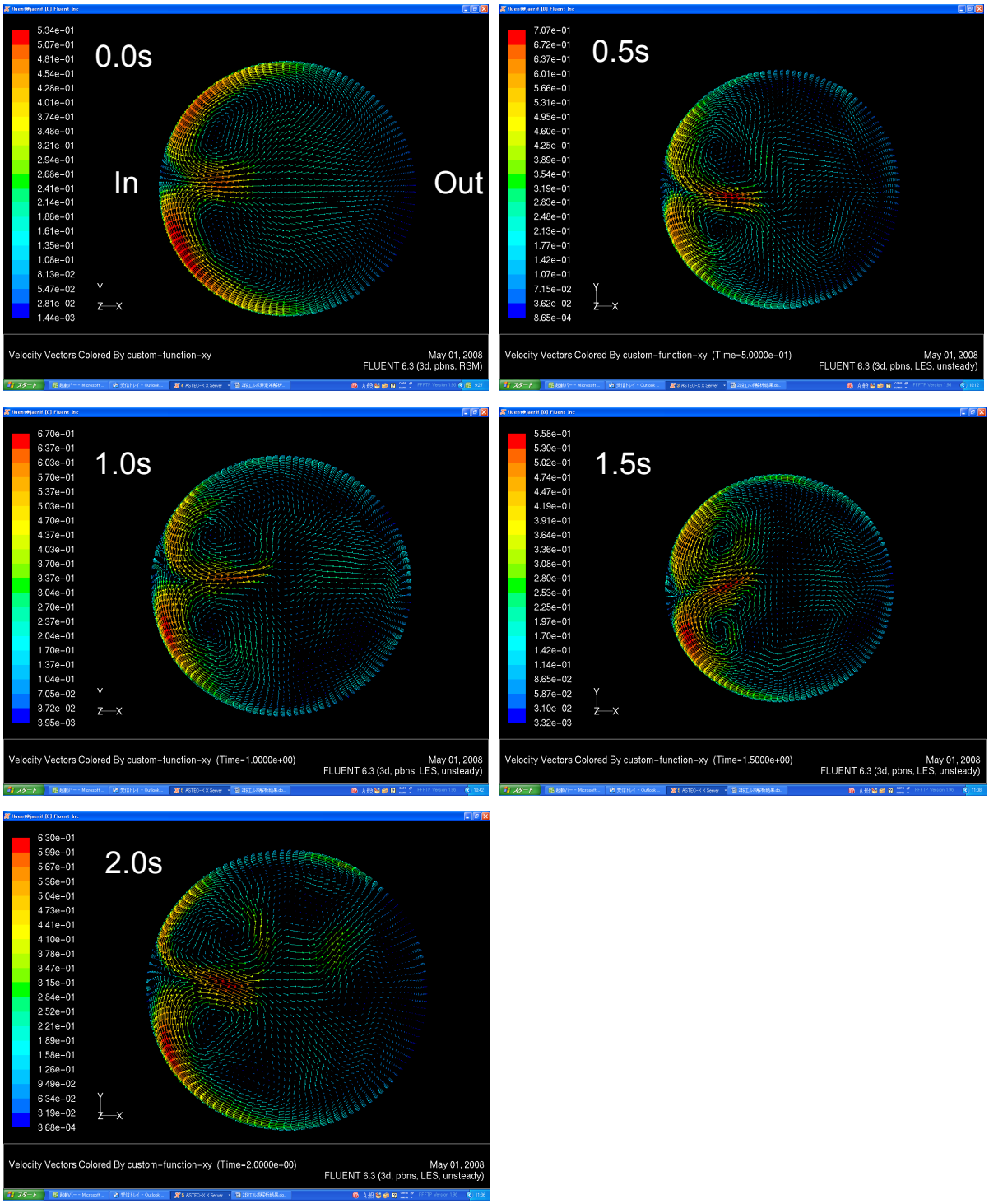


図 31： ダブルエルボ体系解析における第１エルボ出口から 0.2D 下流での
２次流れ流速ベクトル

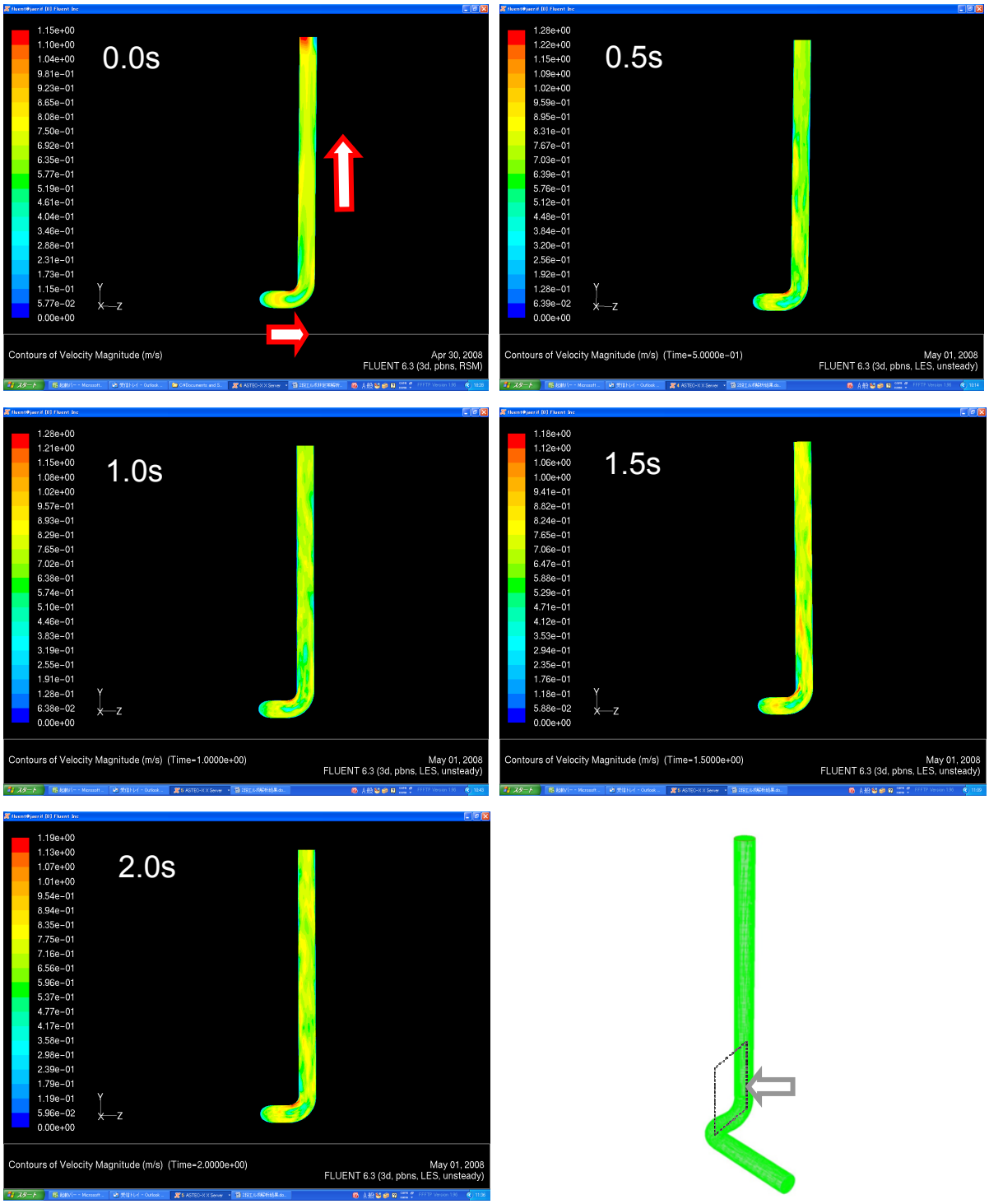


図 32： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ部全体の流速コンター

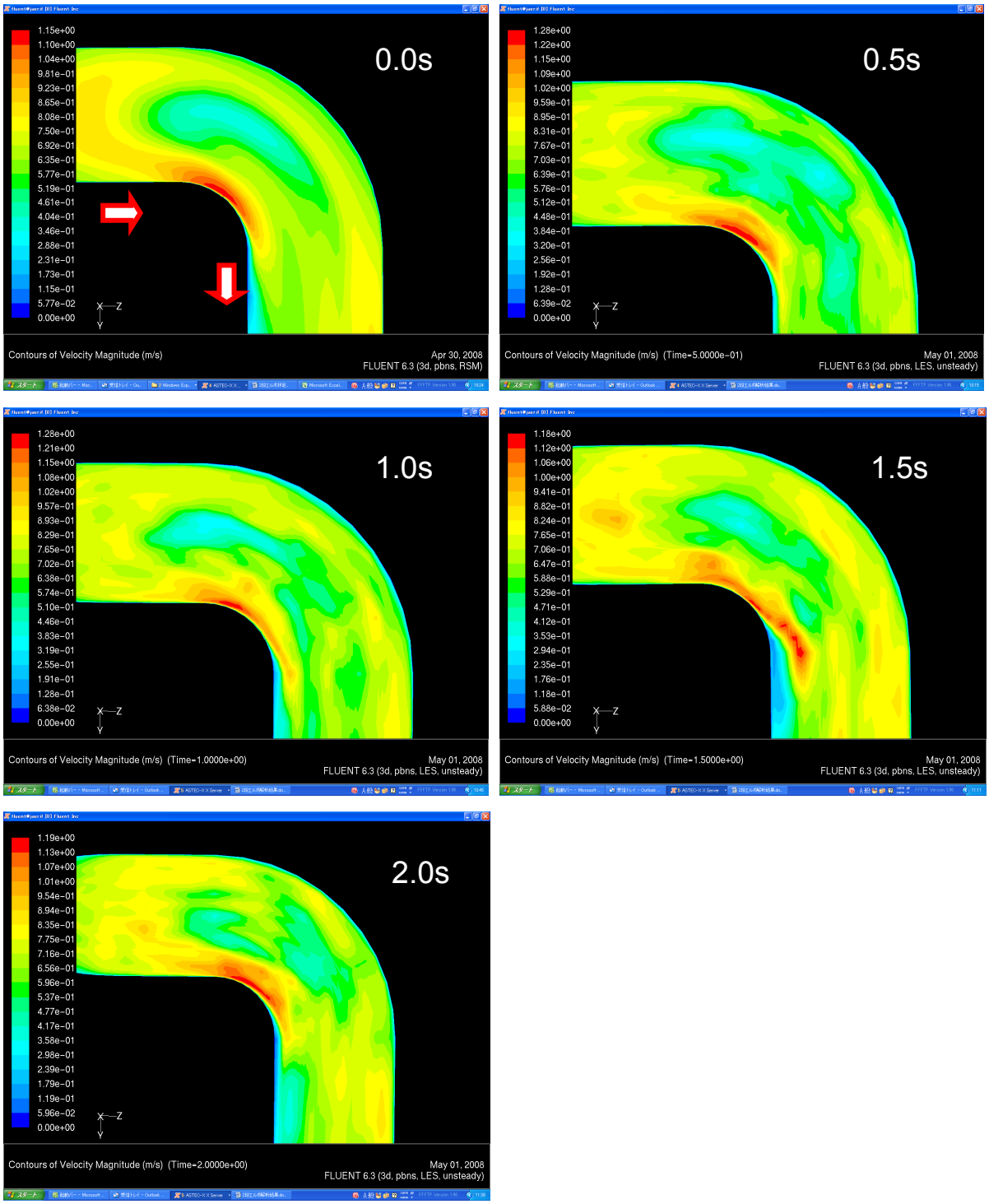


図 33： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ部の流速コンター（エルボ部拡大）

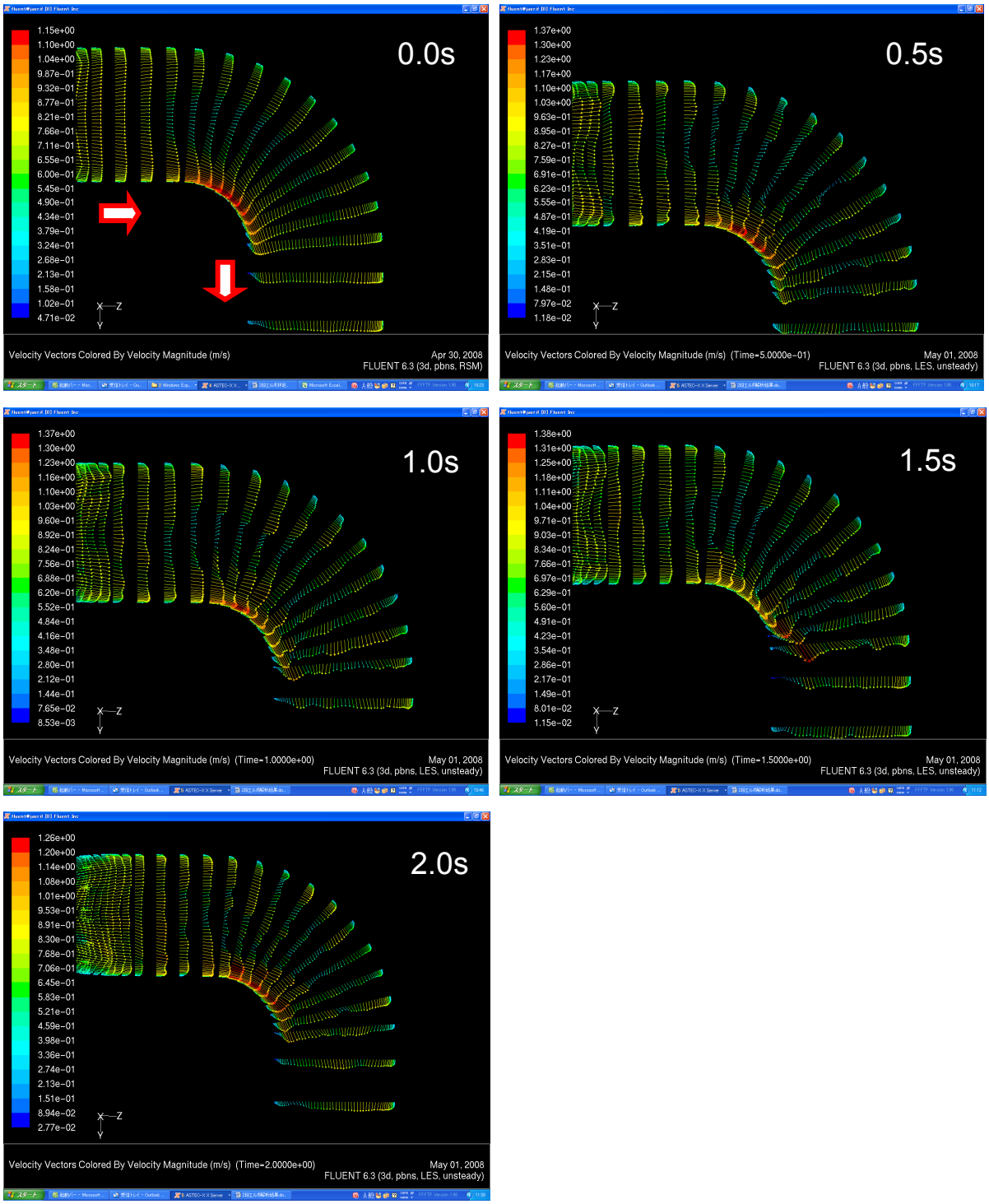


図 34： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ部の流速ベクトル（エルボ部拡大）

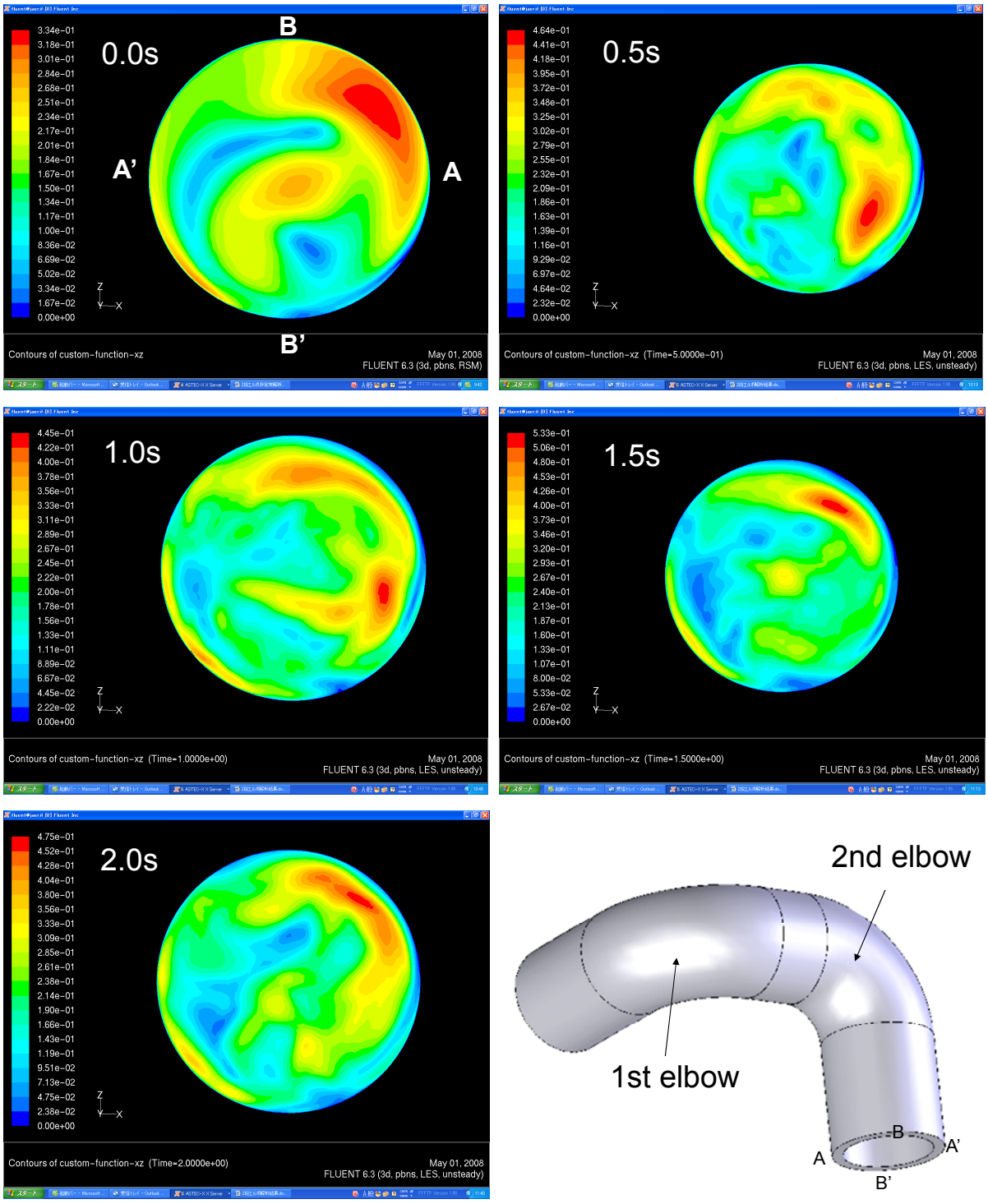


図 35： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ出口から 0.2D 下流での
２次流れ流速コンター

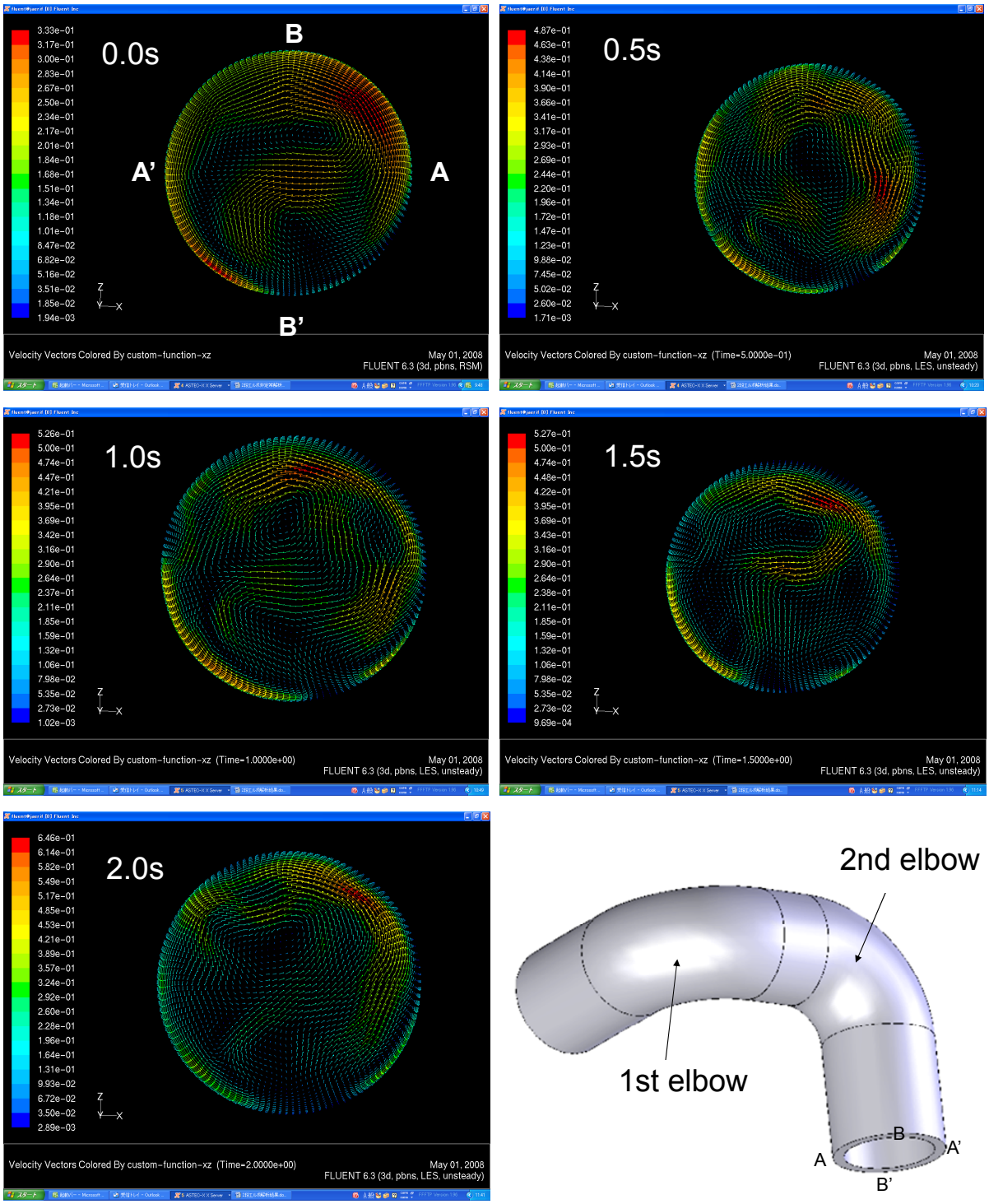


図 36： ダブルエルボ体系解析における第２エルボ出口から 0.2D 下流での
２次流れ流速ベクトル

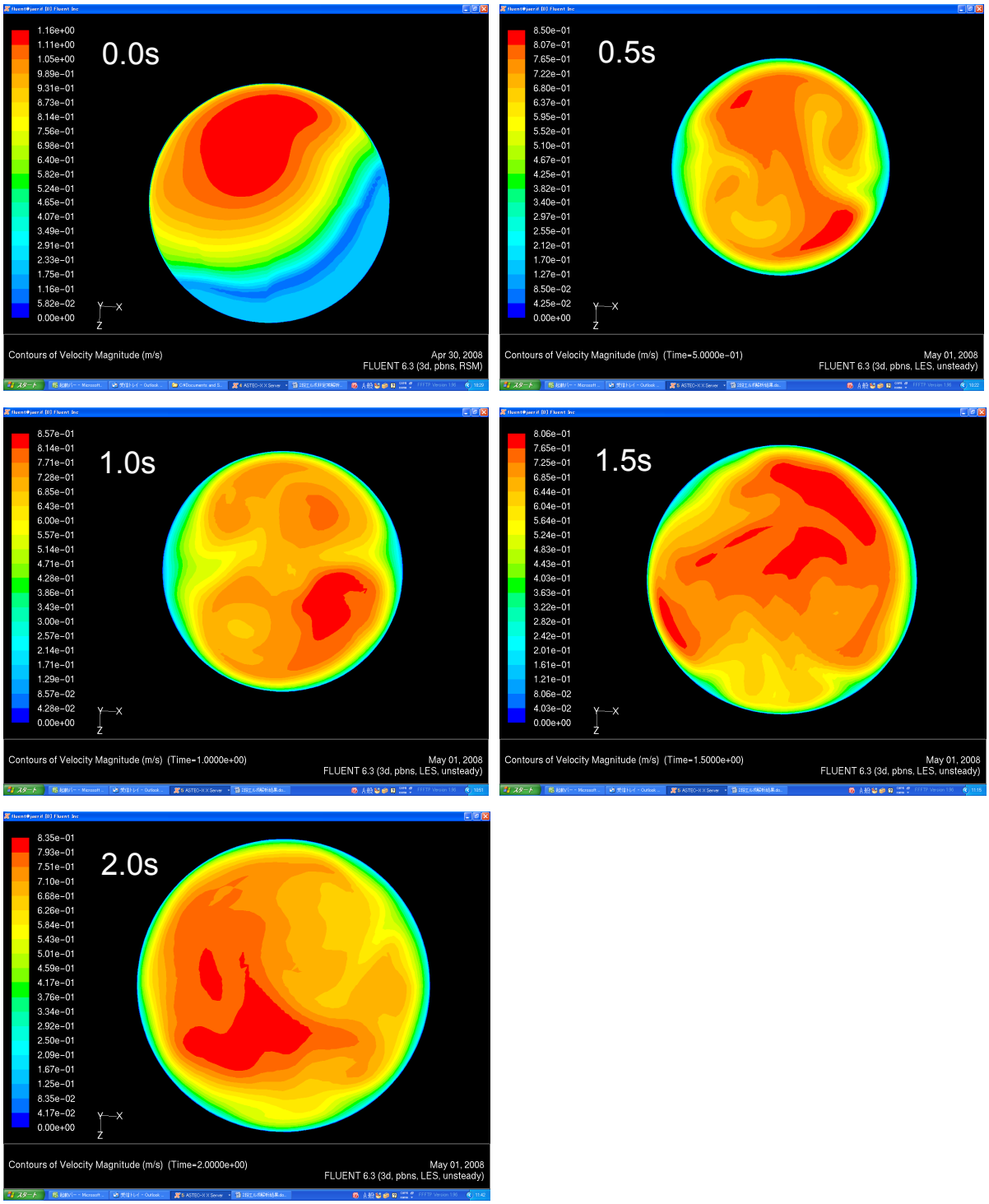
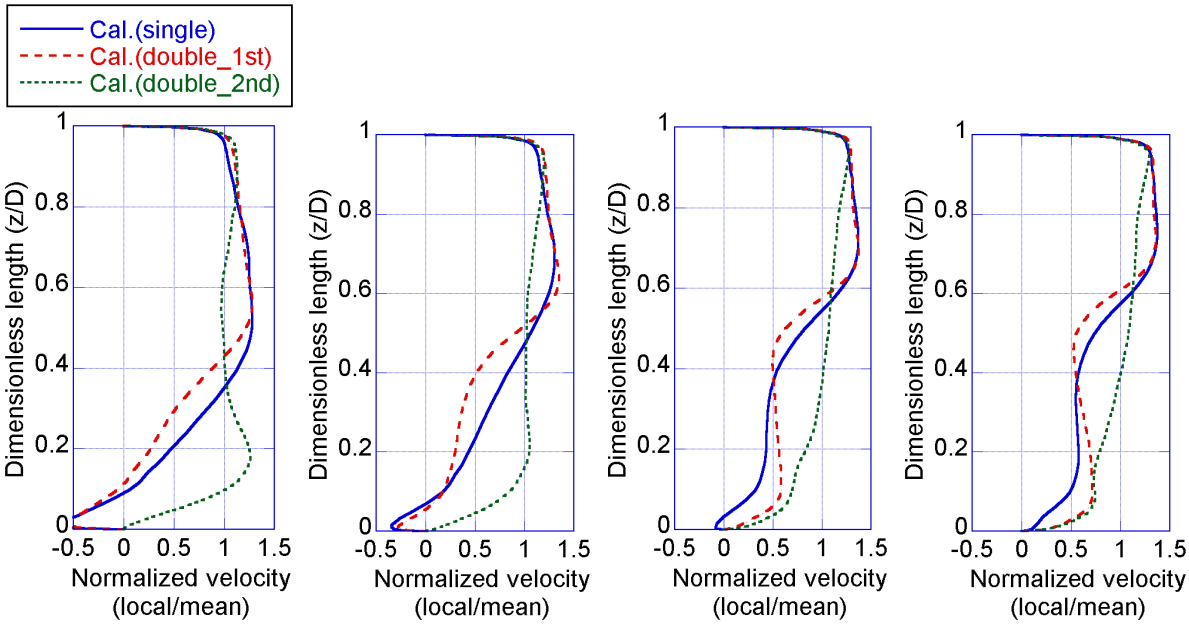
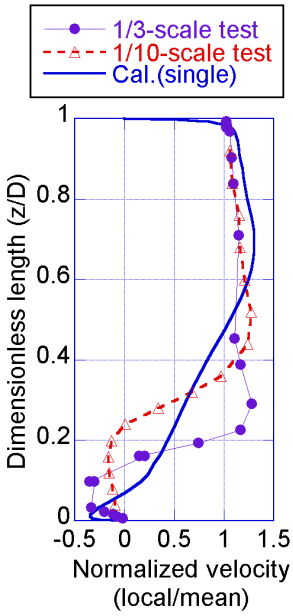


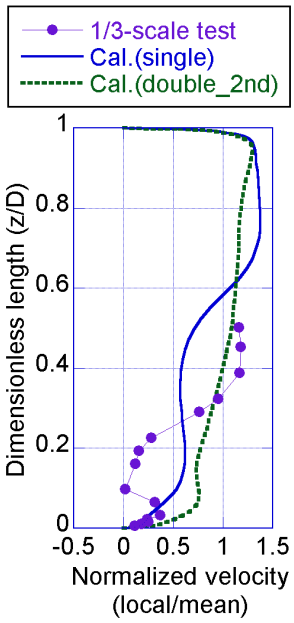
図 37： ダブルエルボ体系解析における出口境界での流速コンター



(a) 0.0D (b) 0.18D (c) 0.4D (d) 0.57D

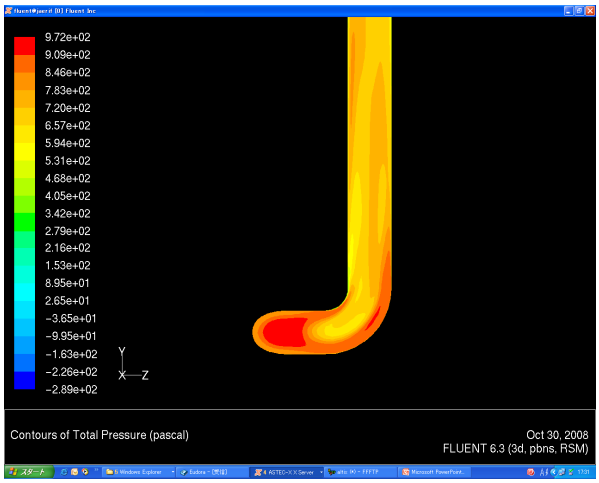


(b') 0.18D

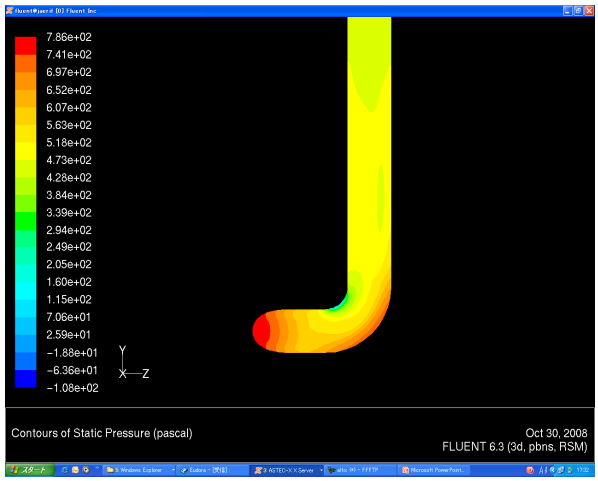


(e) 0.62D

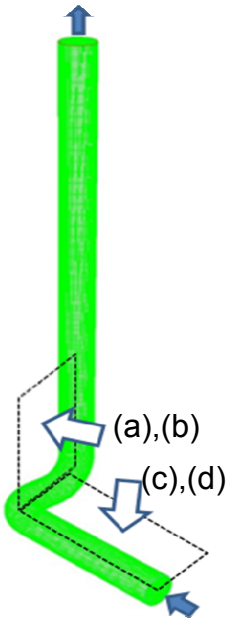
図 38：エルボ出口から下流位置における配管中心の時間平均流速分布

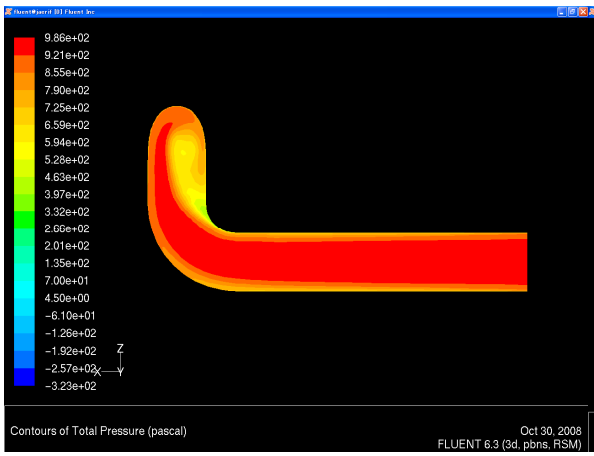


(a) Total pressure at 0.0D

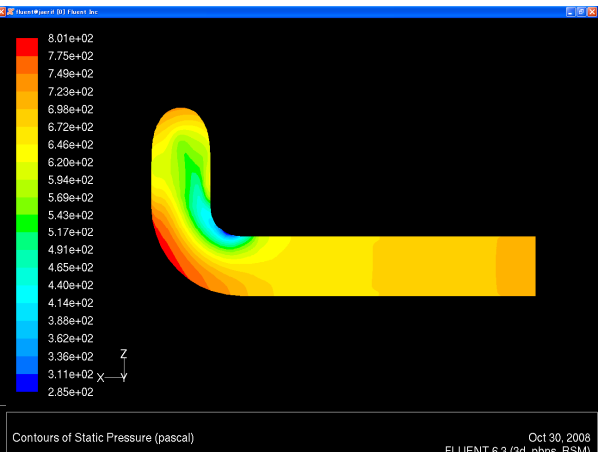


(b) Static pressure at 0.0D



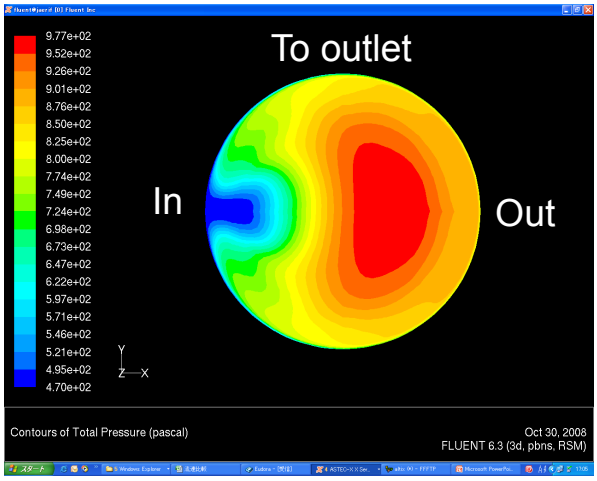


(c) Total pressure at 0.0D

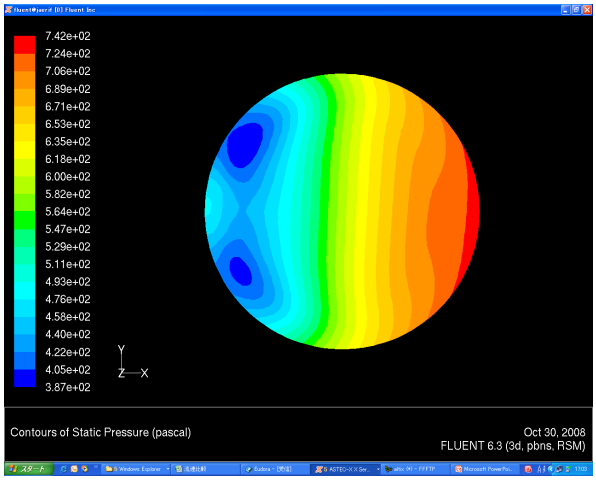


(d) Static pressure at 0.0D

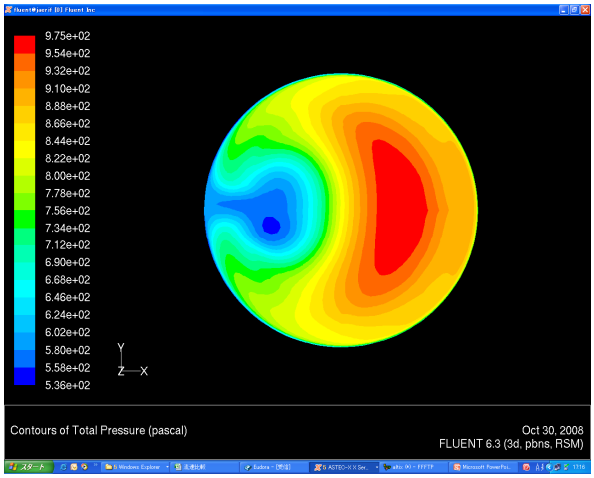
図 39： ダブルエルボ体系における配管中心の圧力分布



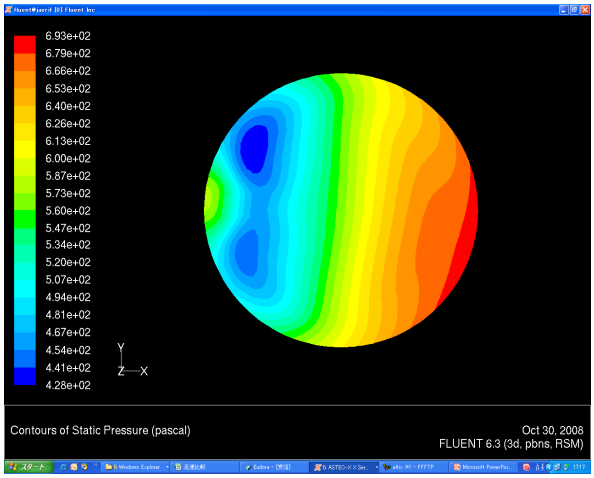
(a) Total pressure at 0.0D



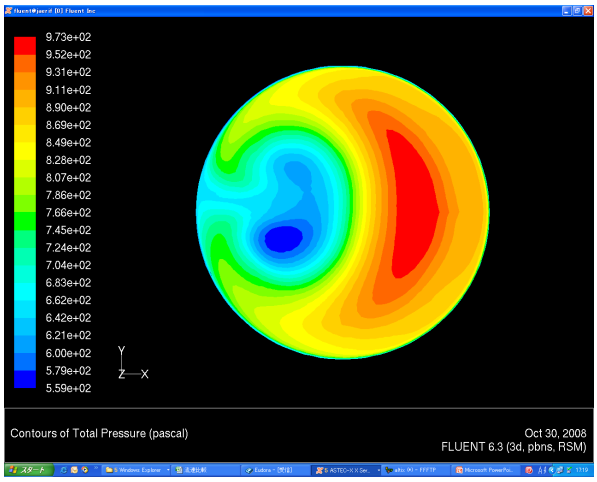
(b) Static pressure at 0.0D



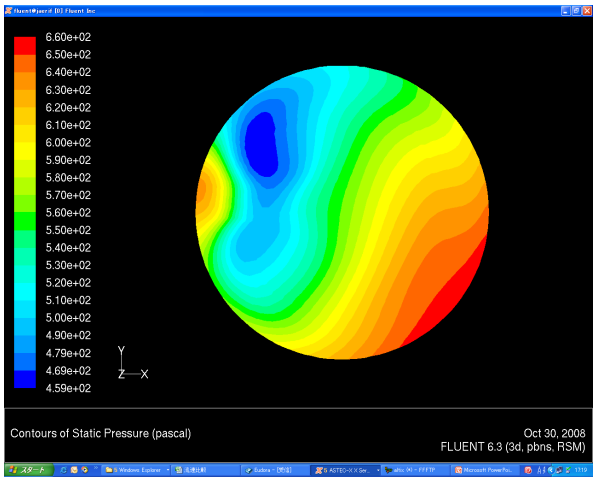
(c) Total pressure at 0.18D



(d) Static pressure at 0.18D

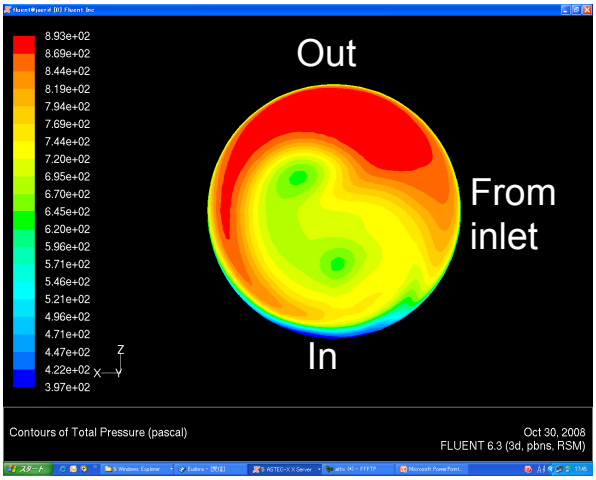


(e) Total pressure at 0.4D

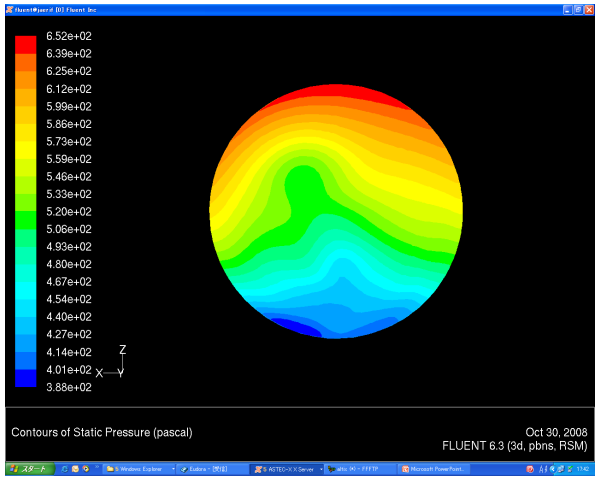


(f) Static pressure at 0.4D

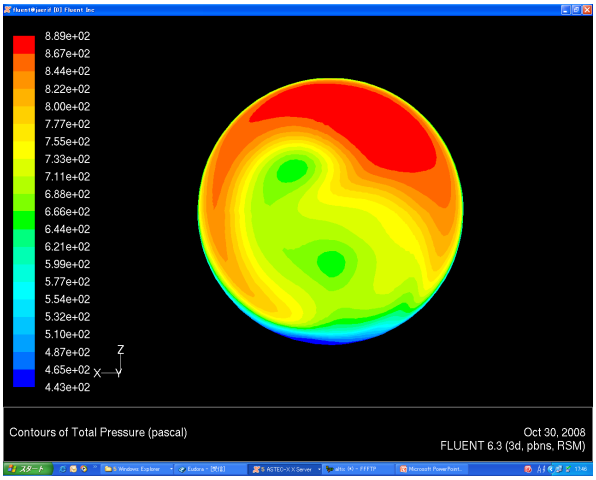
図 40： ダブルエルボ体系における第 1 エルボ後流での断面圧力分布



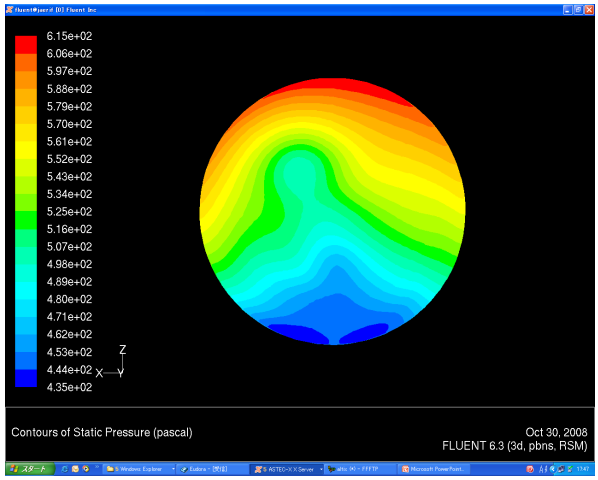
(a) Total pressure at 0.0D



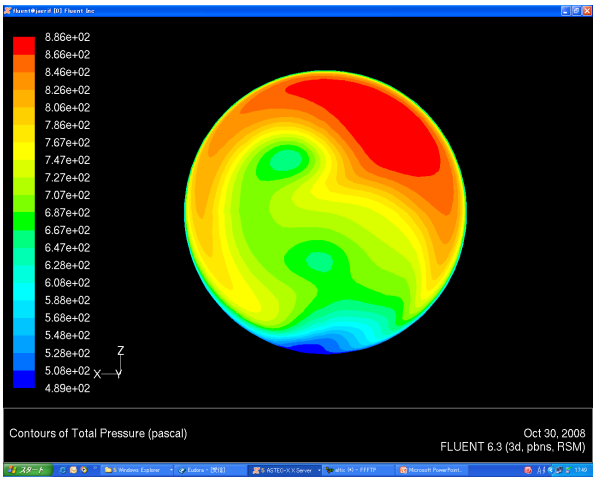
(b) Static pressure at 0.0D



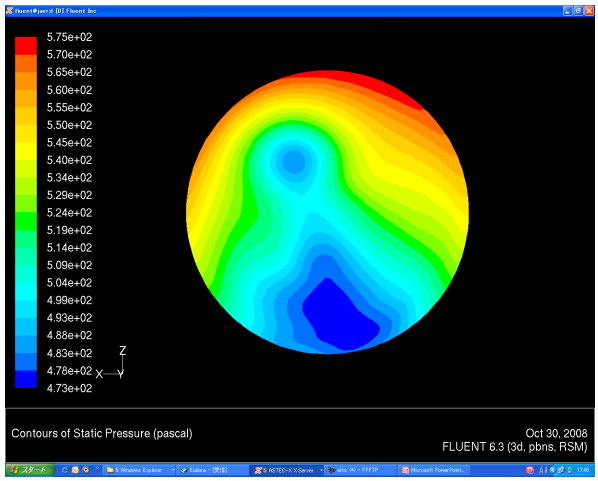
(c) Total pressure at 0.18D



(d) Static pressure at 0.18D



(e) Total pressure at 0.4D



(f) Static pressure at 0.4D

図 41： ダブルエルボ体系における第 2 エルボ後流での断面圧力分布

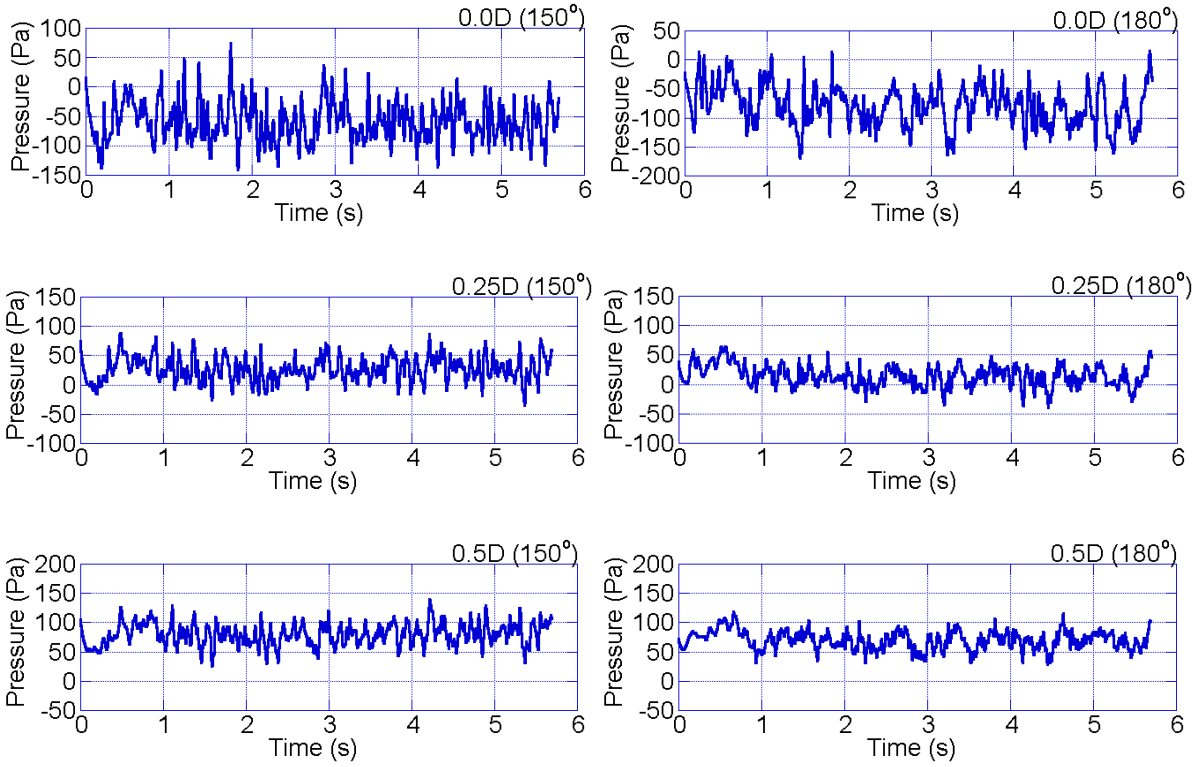


図 **42**： シングルエルボ体系におけるエルボ後流の各位置での壁面圧力変動

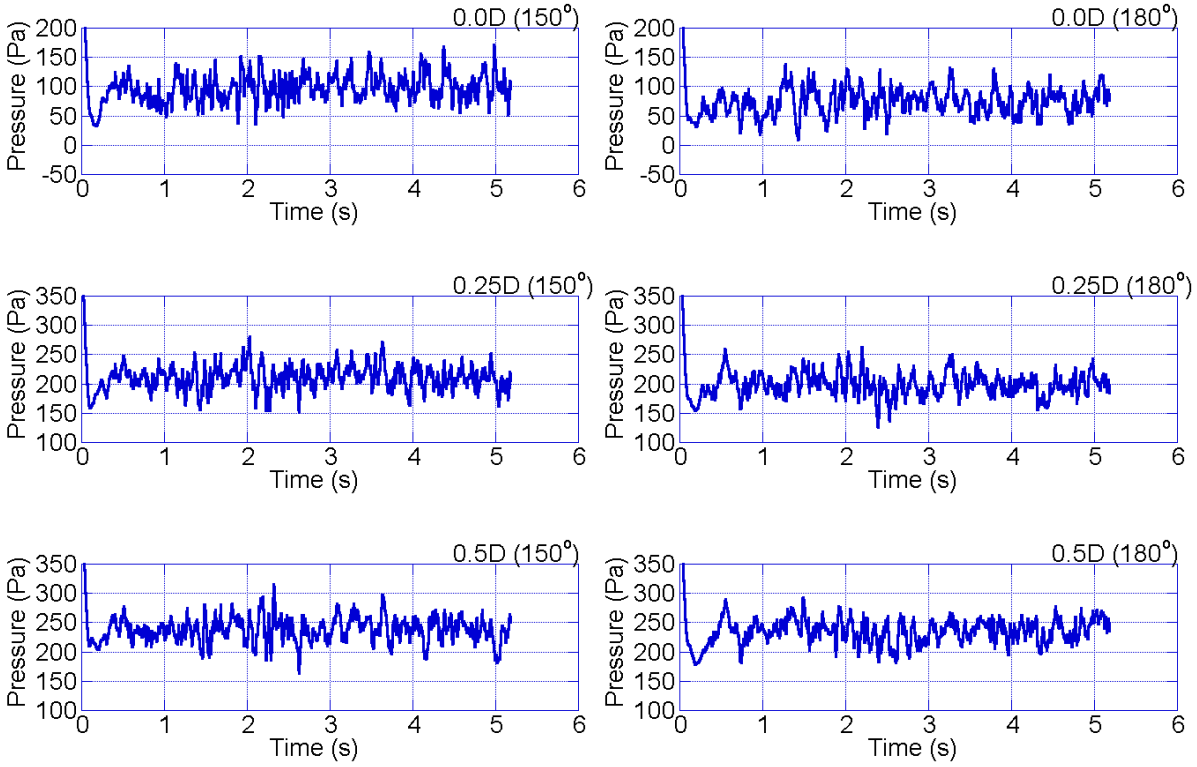


図 43： ダブルエルボ体系における第 1 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動

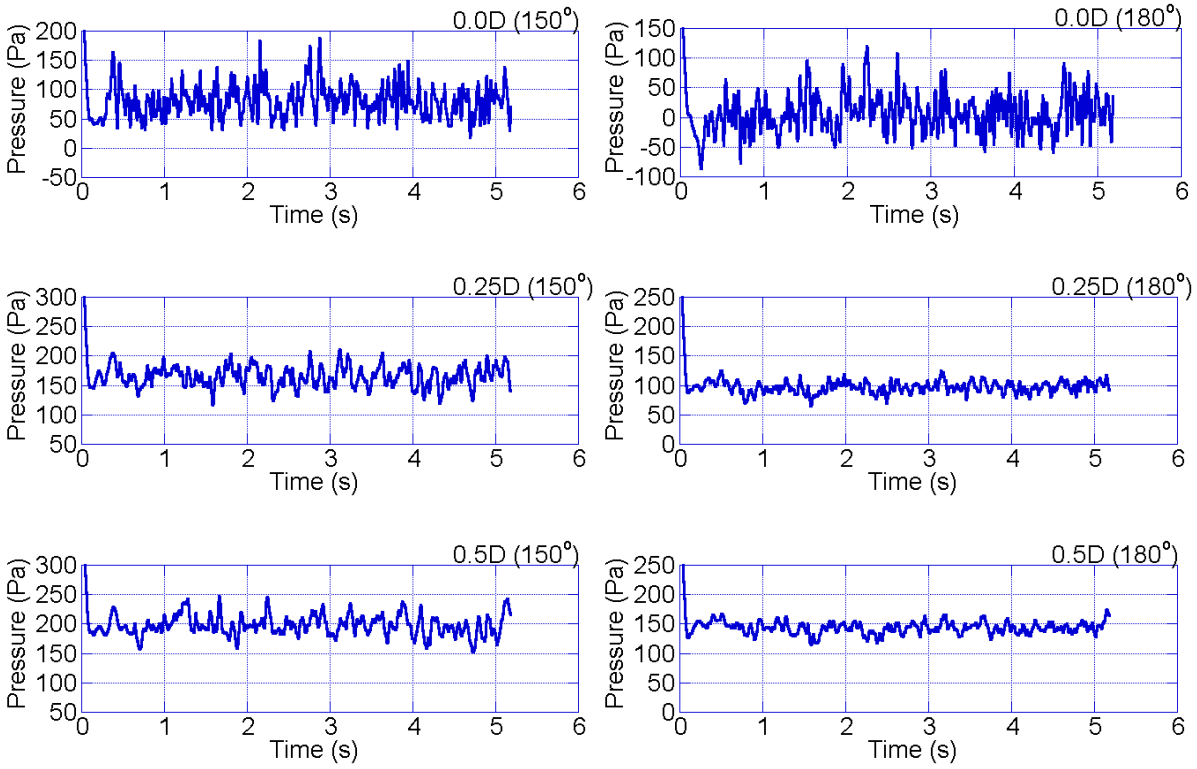


図 44： ダブルエルボ体系における第 2 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動

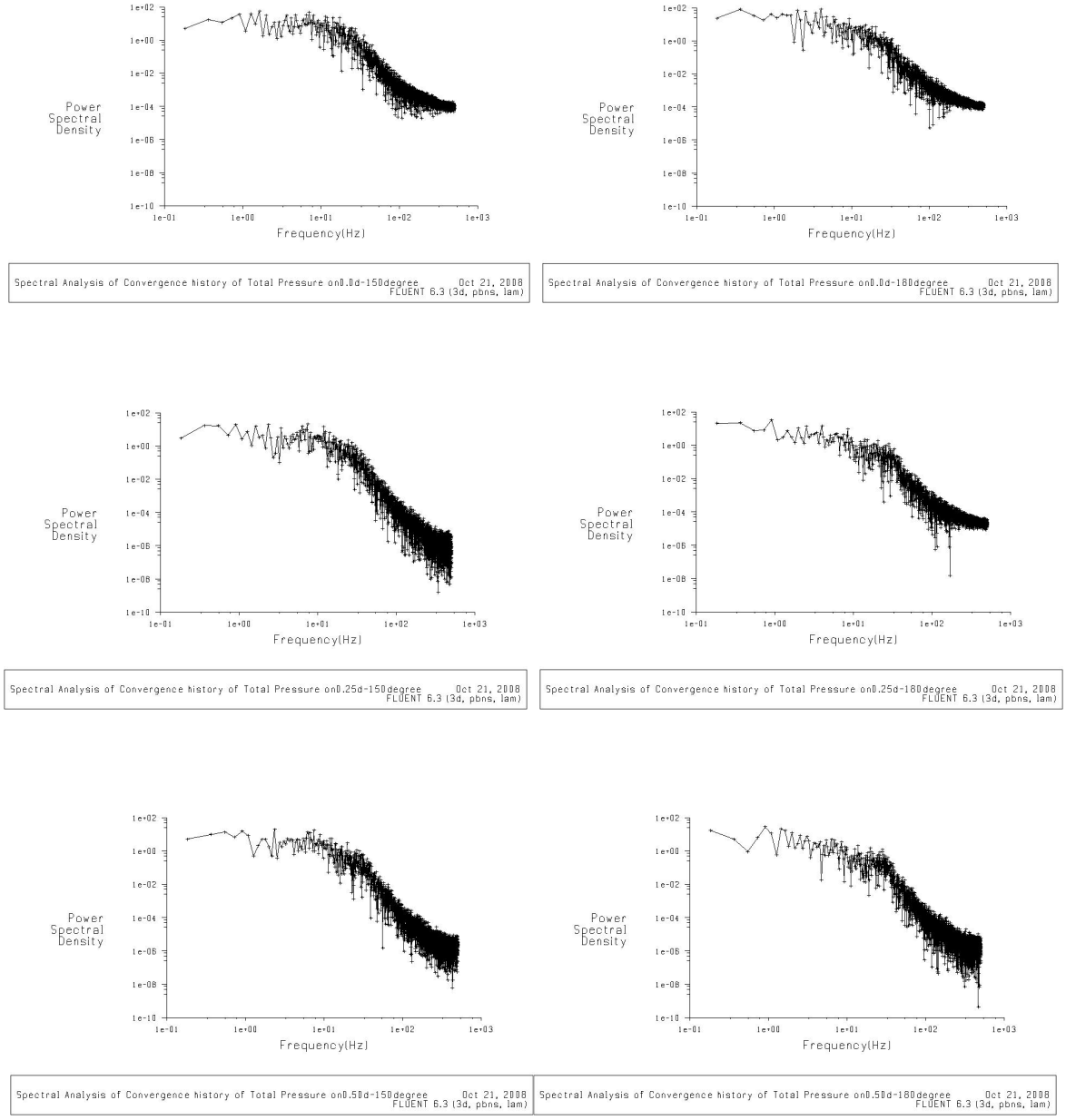


図 45： シングルエルボ体系におけるエルボ後流の各位置での壁面圧力変動の
パワースペクトル密度

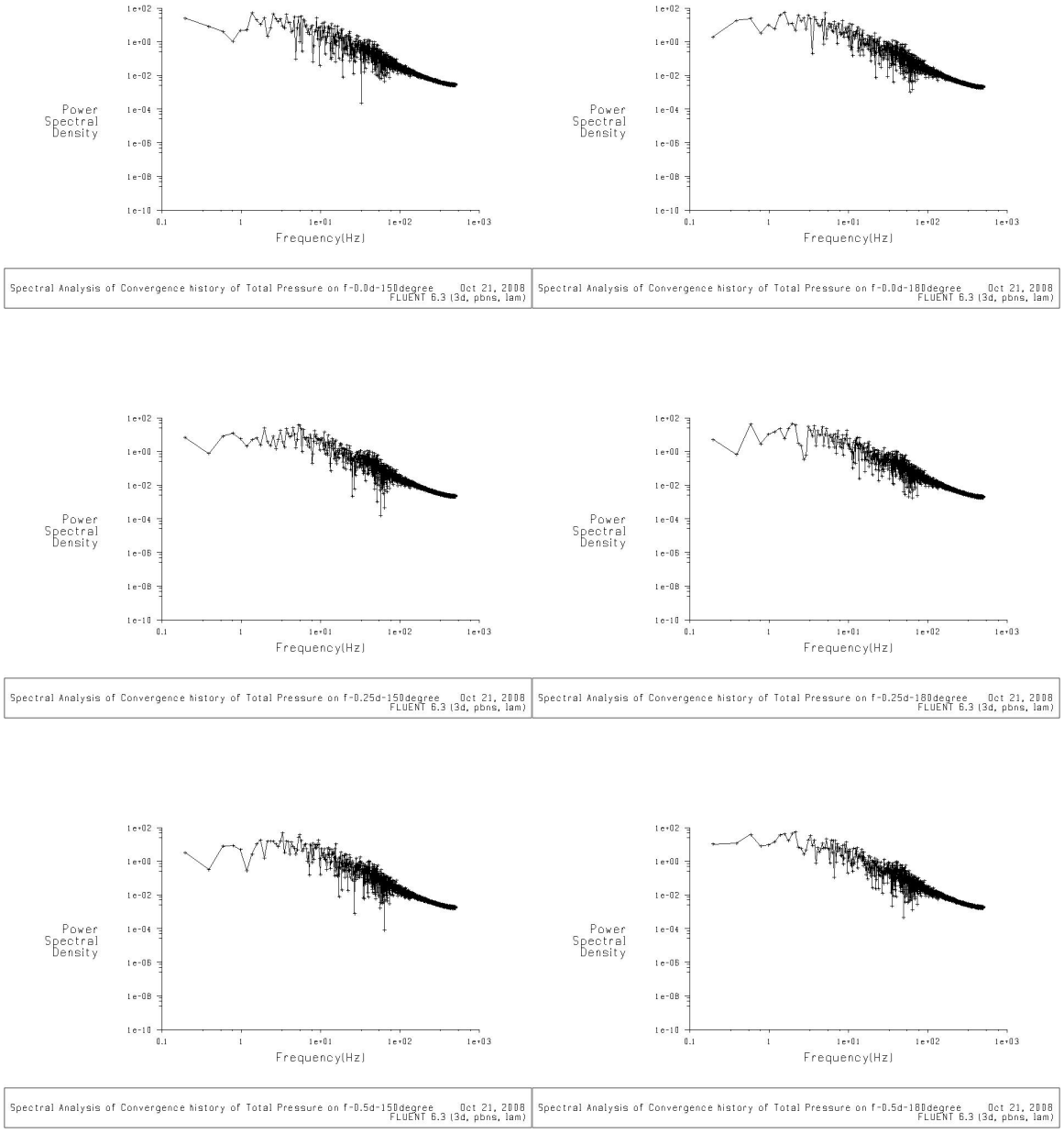


図 46： ダブルエルボ体系における第 1 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動のパワースペクトル密度

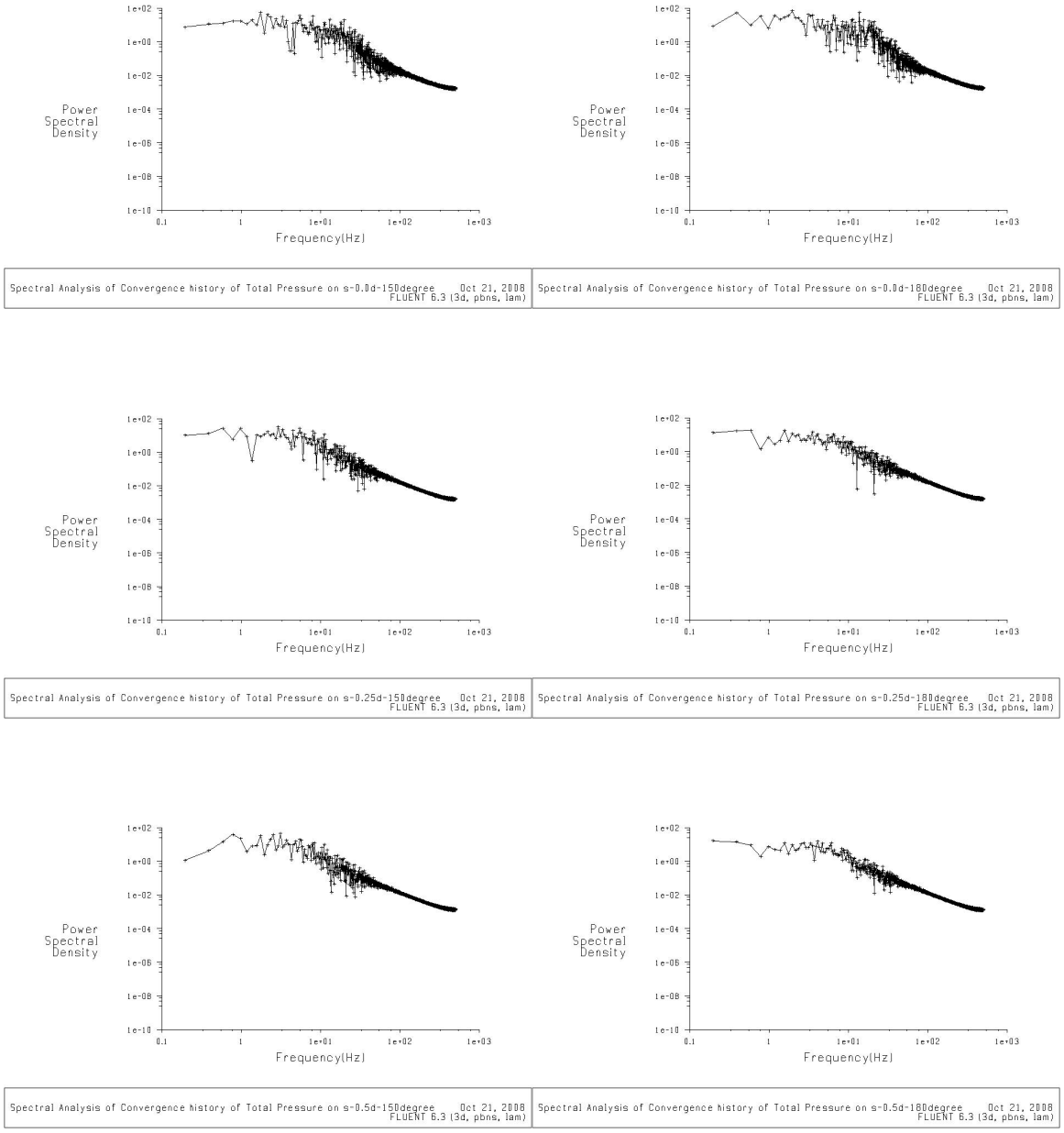


図 47： ダブルエルボ体系における第 2 エルボ後流の各位置での壁面圧力変動のパワースペクトル密度

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（Ｘ線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=1l=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています