

Phoenics User Conference in Japan, 2006

マイクロフルイディクスへの適用例

芝浦工業大学工学部

機械工学第二学科

小野直樹(助教授)

鈴木剛史(修士1年)

吉田貴洋(修士1年)

SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SIT





内容

1、マイクロフルイディクスとは？

2、Phoenics適用例

(1) 回転流れを用いたマイクロミキサーについて

(2) 微細撥水面の摩擦抵抗について

Sl 3、全体のまとめ

SIT





1、マイクロフルイディクスとは？

近年、携帯型のIT機器等の進歩に伴い、半導体分野で進歩した微細加工技術を用いてマイクロスケールの流体機器や流体マシンを作成する試みが広がっている。その適用先として、

- 1) MEMS(Micro Electro-Mechanical System)、Power MEMS
- 2) μ -TAS(micro Total Analysis System)
- 3) Lab-on-a-chip
- 4) DDS(Drug Delivery System)

などがあり、その他種々開発が進んでいる。

→このようなマイクロ流体システムに関する流体力学分野のことを**マイクロフルイディクス (Microfluidics)**と呼び、最近注目されている。





2、Phoenics適用例 その1

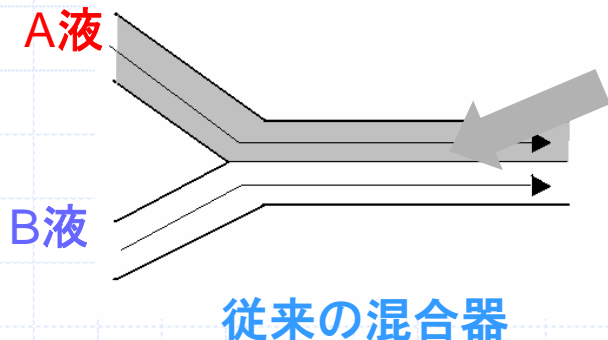
(1) 回転流れを用いたマイクロミキサーについて

Micro mixer とは・・・ μ -TASなどで使用される、ダウンサイジングの効果を積極的に利用した微小な液混合器

micro化の利点

1. 比界面積が大きくなるため、分子拡散を効率的に行え、時間の短縮ができる。
2. 試薬や廃液の低減ができる。
3. システムの小型化が可能。

↓ 従来型のミキサーの典型的な例



問題点

液体の混合は液-液界面の分子拡散でしか起こらず、時間がかかる。





数値計算の目的

(1) 新たなMixerの提案

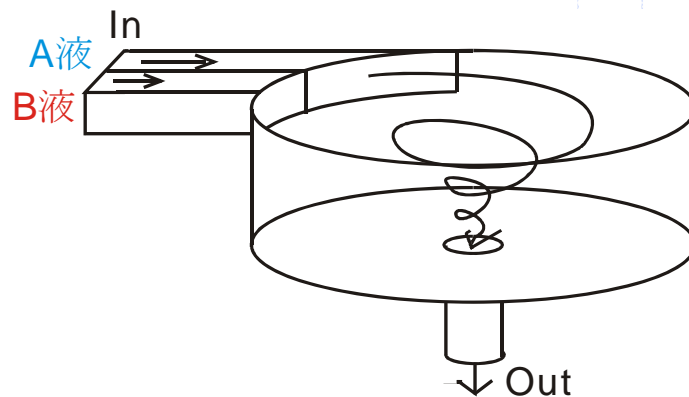
回転流れを発生させ液-液界面を増加させ、分子拡散による液体の混合を促進させ既存のmixerより効率のよいmixerを提案できないか検討する。

(2) 特性の検証

回転流れを用いたmixerの特性を検証する。

(3) 形状の検討

回転流れを用いた混合をより効率よく行える形状のmixerを検討する。



ここで扱う回転流れを用いた混合器の概略図





研究手法

PHOENICSを用いてシミュレーションを行い、計算結果を以下のように評価した。

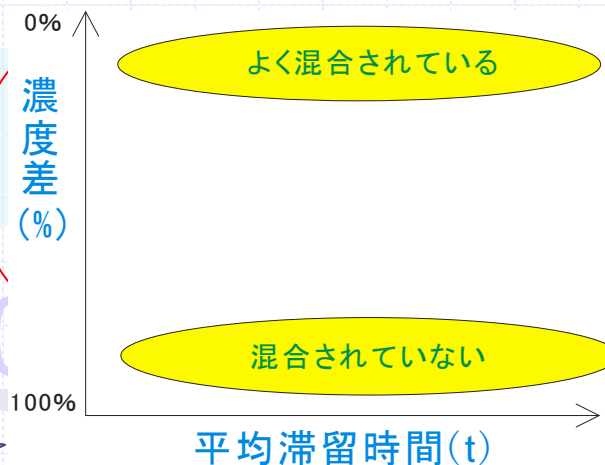
•評価方法

Micro mixerの評価法は確立されていない。そこで独自の評価法を使用した。定常計算を行い、流出口での濃度差と圧力損失(流入口と流出口の圧力差)で評価する。流入速度を変化させ、平均滞留時間—濃度差・圧力損失のグラフを作成。

平均滞留時間とは・・・Mixerの容積に関係なく、形状の特性について評価ができる。

$$t(m\text{ sec}) = \frac{V(mm^3)}{Q(mm^3/m\text{ sec})}$$

流出口での濃度差(Max-Min)



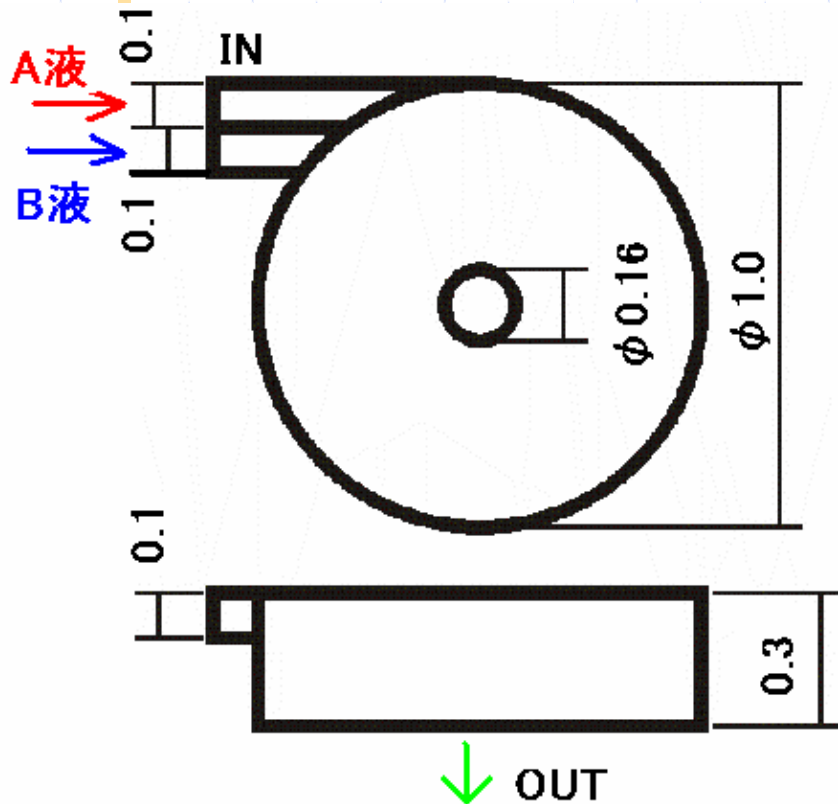
速小 ← 流速 容積 → 遅大



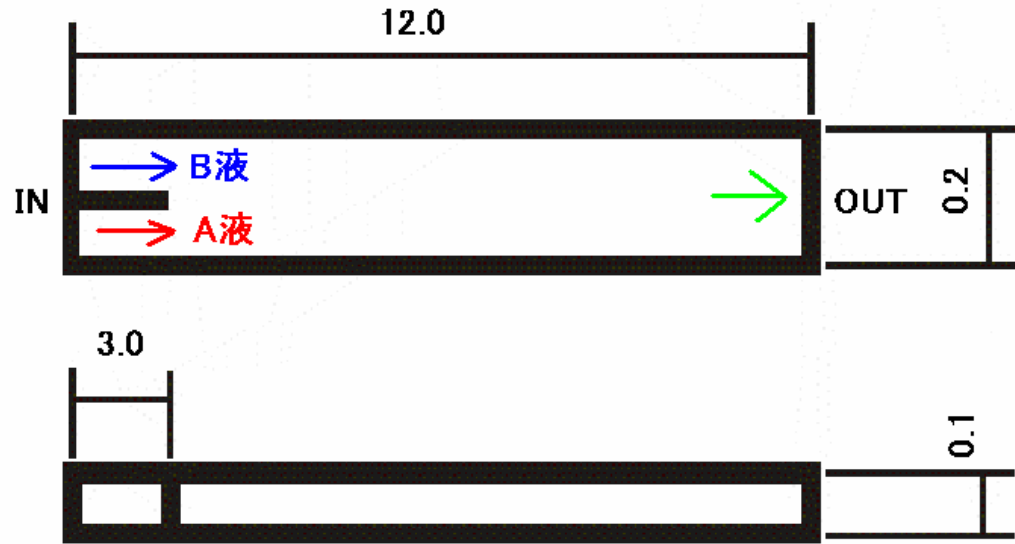


作成モデル 1

Standard model
(本研究基本モデル)



Basic (既存のチャンネル型モデル)



単位 (mm)

Model.2

(基本モデルの厚みを流入口の幅まで薄くしたモデル)

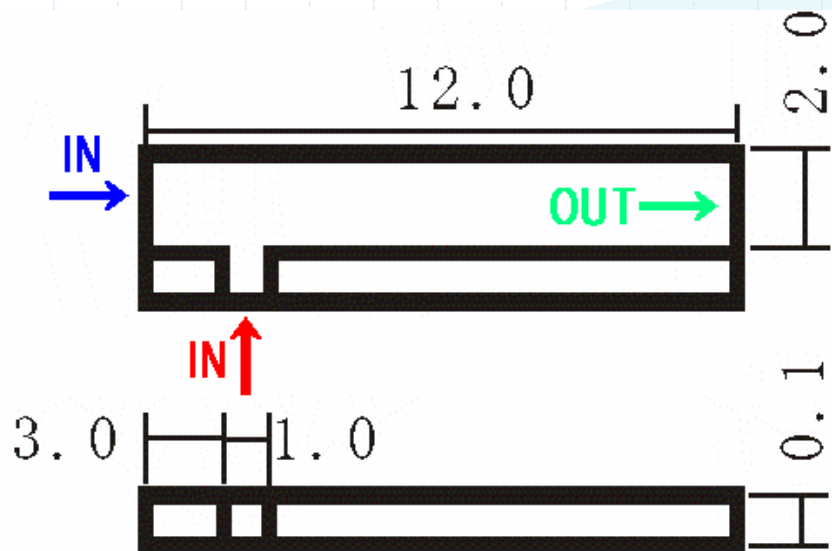
Model.3

(基本モデル流入口断面積を1/4にしたモデル)

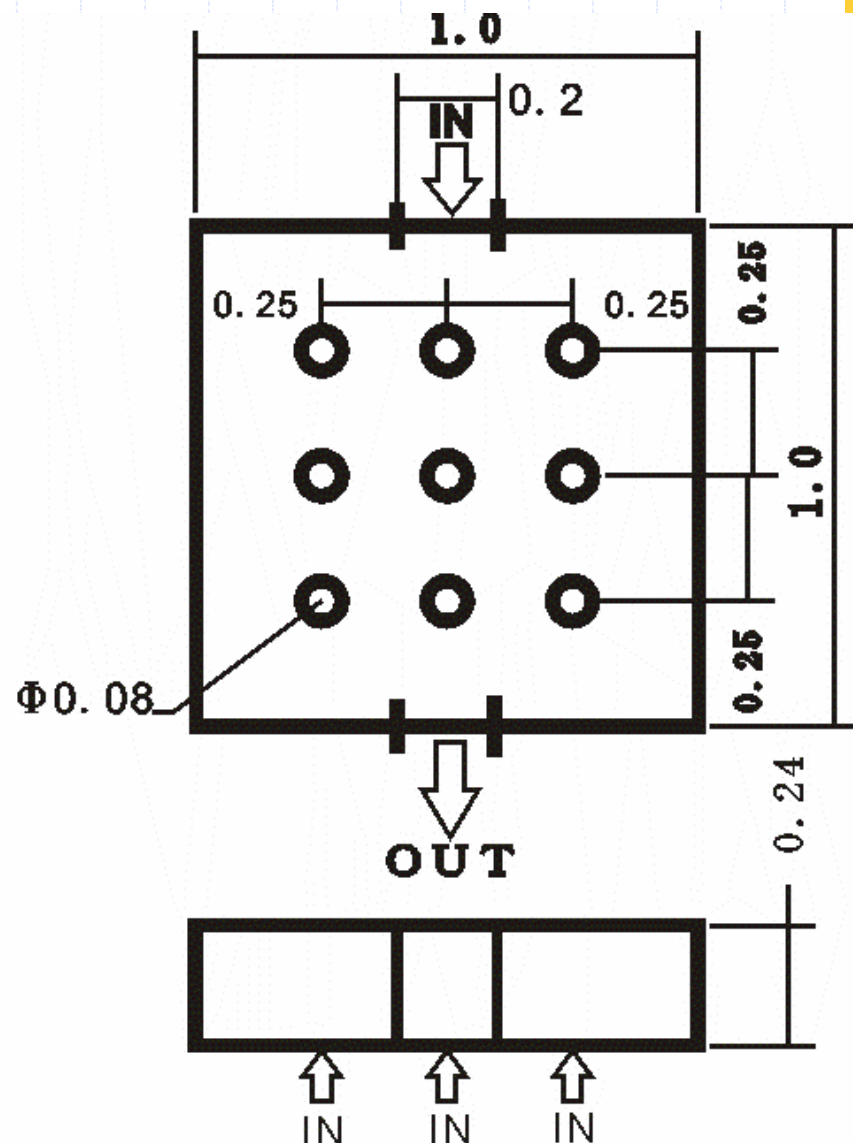




作成モデル 2



Basic2(噴き出しモデル)



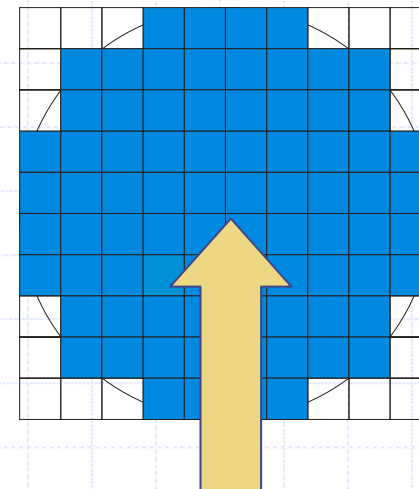
Basic3(多孔噴き出しモデル)





計算条件

- ◆ 流入させる2流体は水とし、物性値の違いはないものとする。
- ◆ 化学変化は考慮しない。
- ◆ 流入させる流体の濃度は1、0とし拡散係数は液体の拡散係数の一般的なオーダーとしてアンモニアと水の拡散係数を用いた。
- ◆ 流出口メッシュは10×10とし、濃度の値の最大値と最小値から濃度差を求める。



出口メッシュの濃度の
Max-Min

流速V(m/sec)	0.001～10.00
密度 ρ (kg/m ³)	998.23
動粘度 ν (m ² /sec)	1.006×10^{-6}
レイノルズ数Re	0.1～1000
拡散係数D(m ² /sec)	1.23×10^{-9}

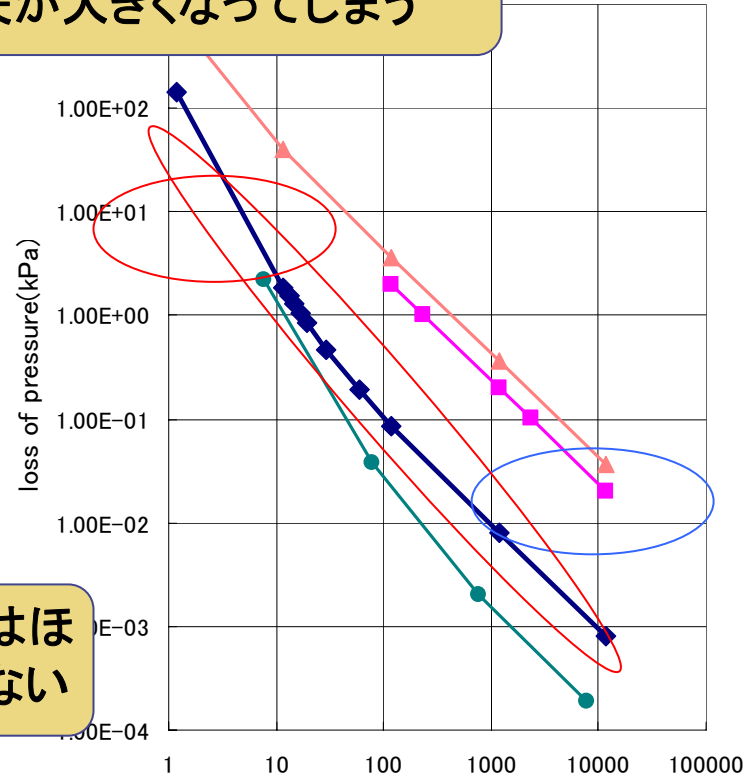
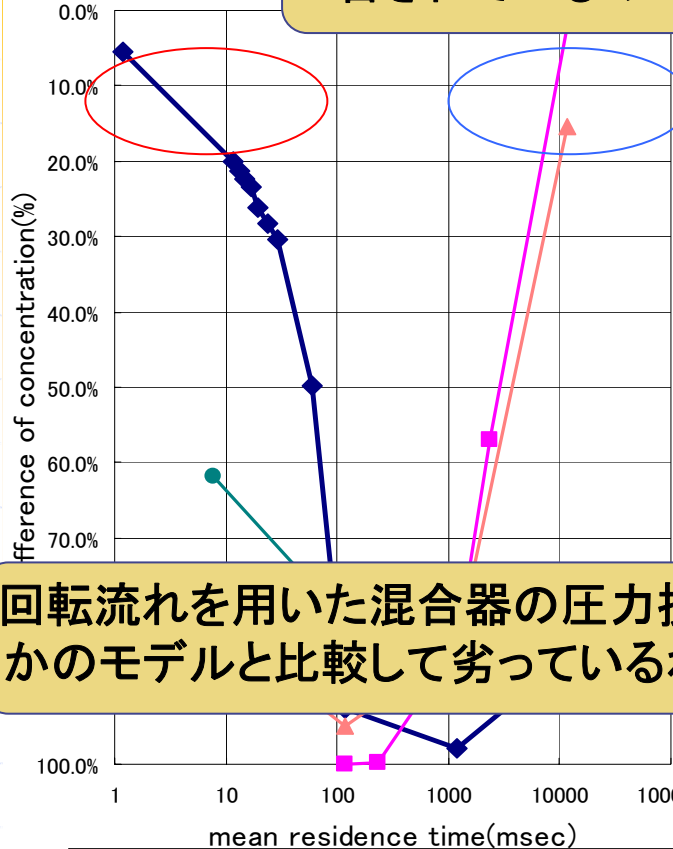
座標系	直交座標
計算モデル	Laminar(層流モデル)
繰り返し計算回数	10000回(計算結果に誤差が出ない程度に十分長く)
計算時間	約2時間
メッシュ数	(X,Y,Z)=(60,60,15)





回転流れを用いたmixerと既存のmixerの比較

渦が形成される平均滞留時間が短い領域でよく混合されているので圧力損失が大きくなってしまふ



回転流れを用いた混合器の圧力損失特性はほかのモデルと比較して劣っているわけではない

チャネル型モデルでは混合に適した平均滞留時間が長いので圧力損失はあまり問題とならない

回転流れを用いた混合器と既存の混合器の濃度差比較

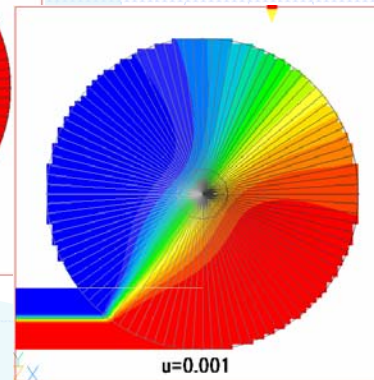
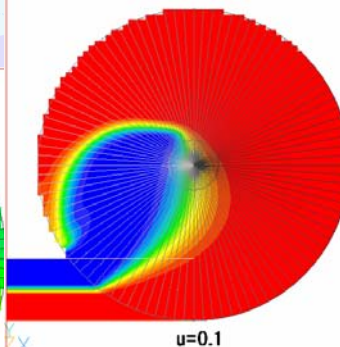
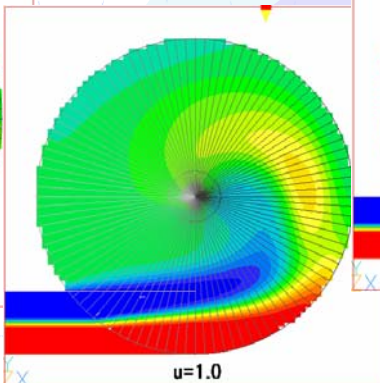
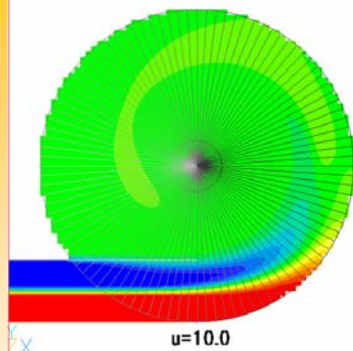
の圧力損失比較



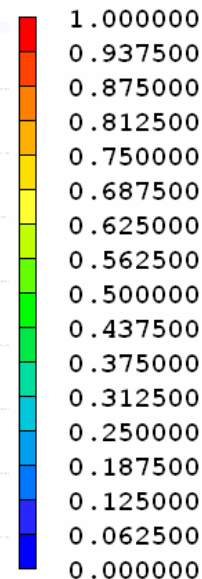


回転流れを用いたmixerと既存のmixerの比較

基本モデルの濃度分布



濃度

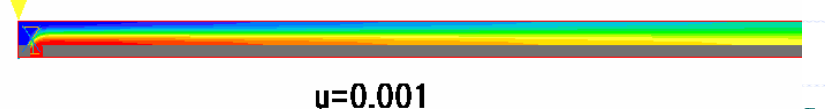
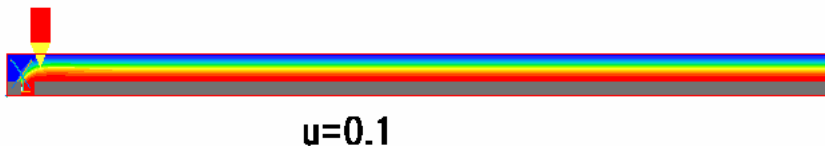
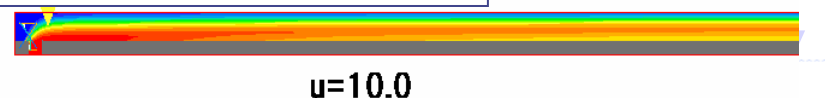


チャンネル型モデルの濃度分布



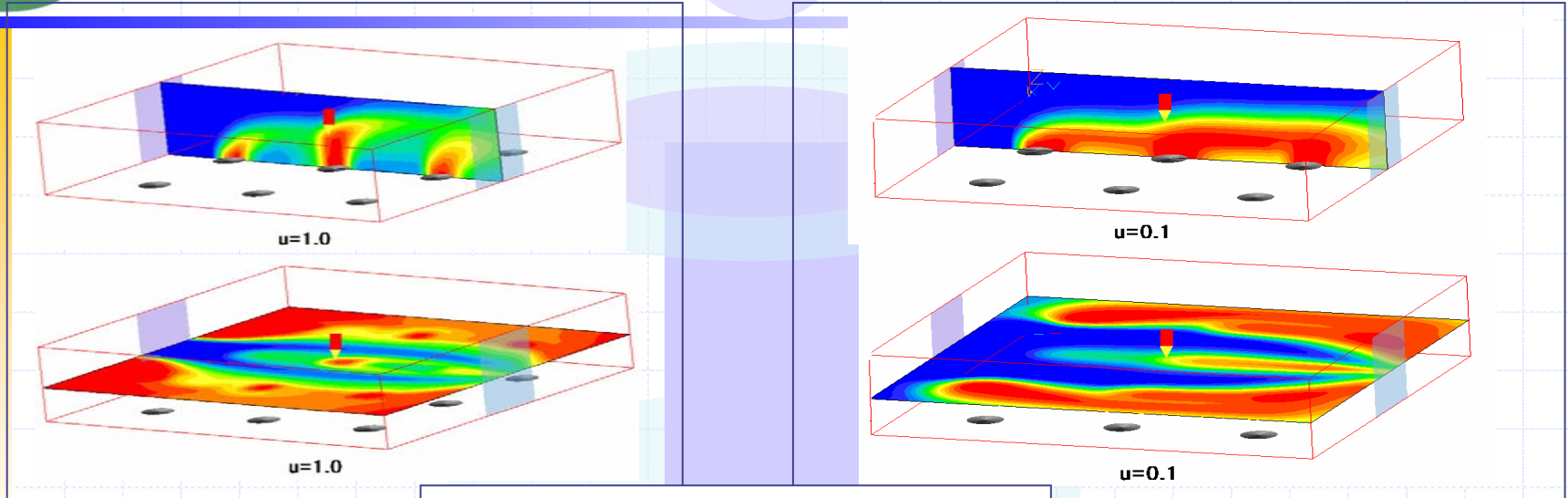
単位 u (m/s)

噴き出しモデルの濃度分布

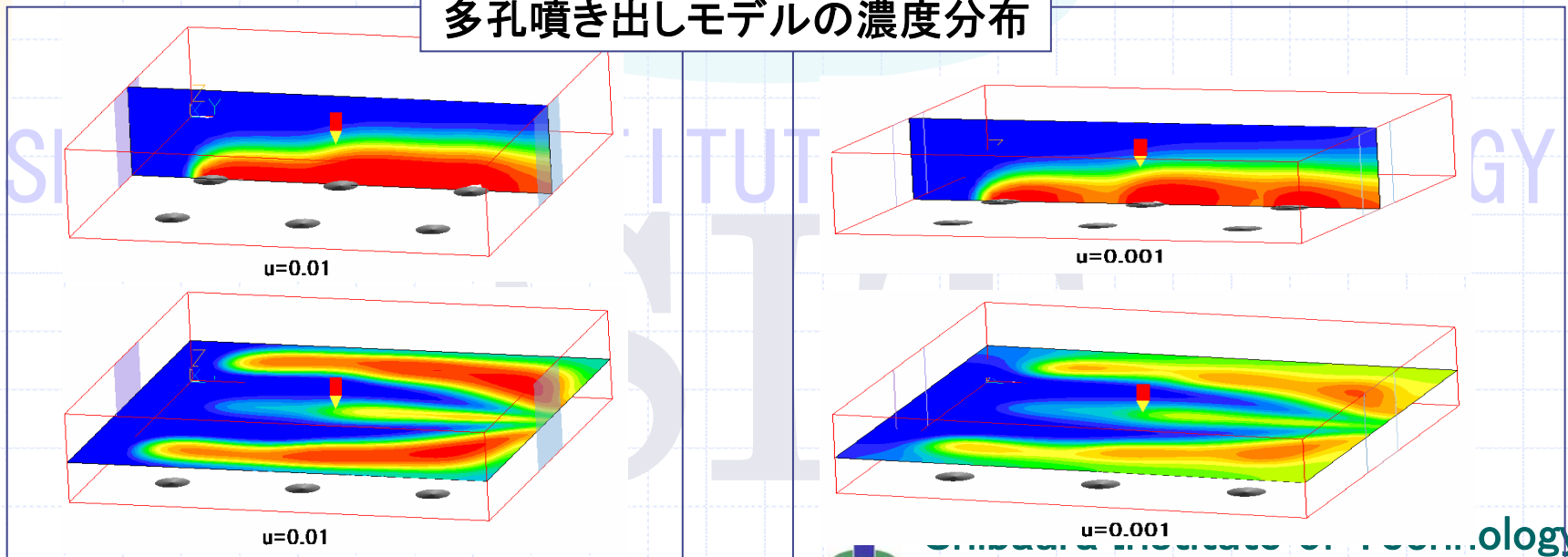




回転流れを用いたmixerと既存のmixerの比較



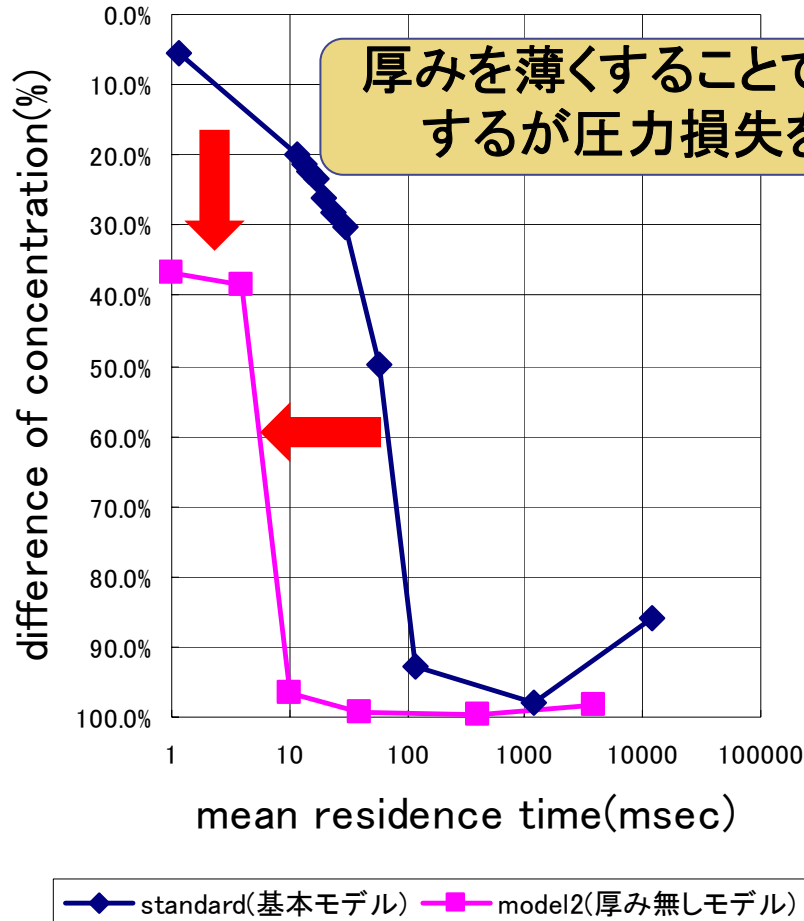
多孔噴き出しモデルの濃度分布



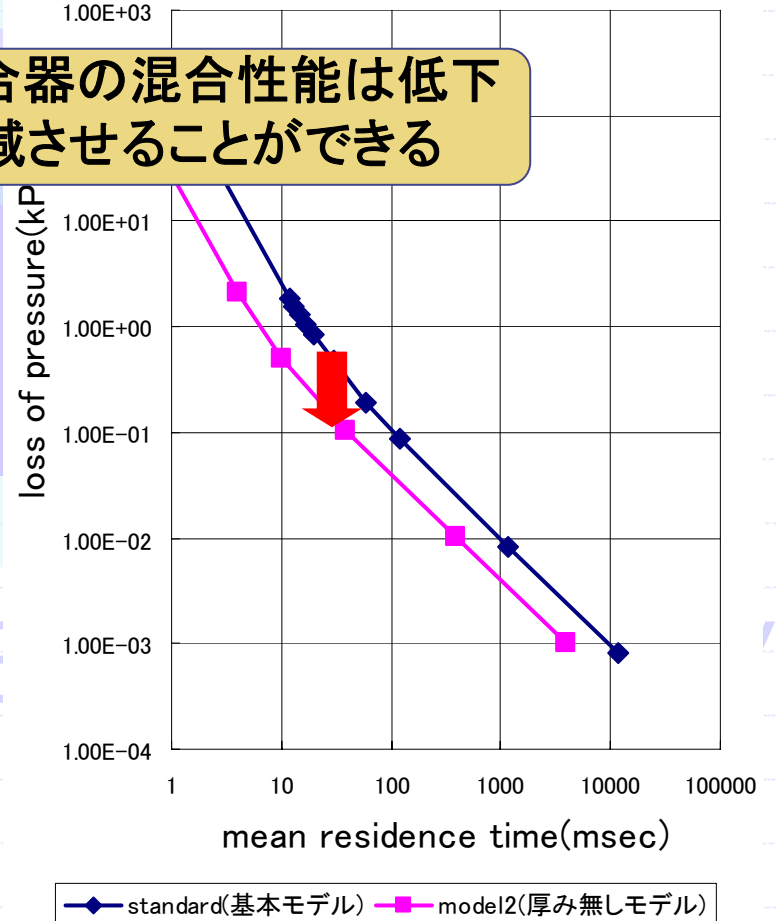


混合器の厚みの変化による比較

厚みを薄くすることで混合器の混合性能は低下するが圧力損失を低減させることができる



混合器の厚みの違いによる濃度差比較



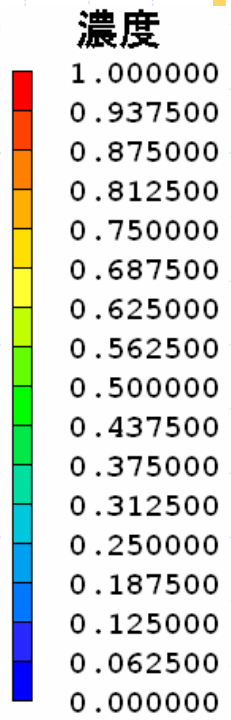
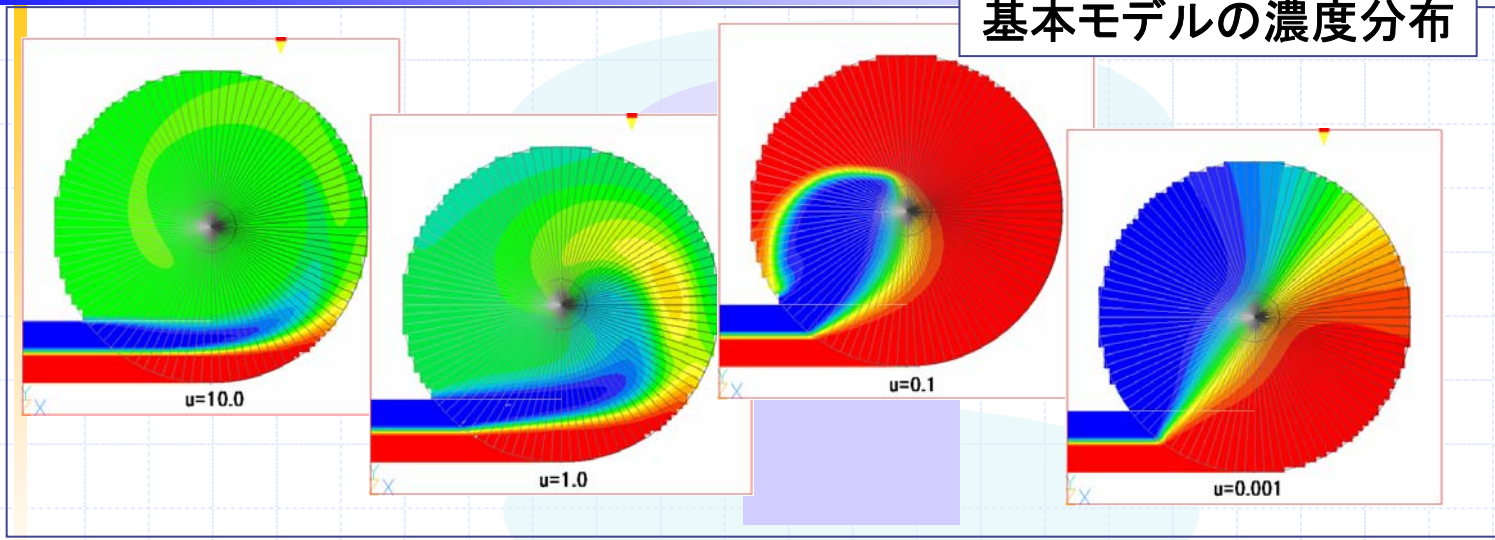
混合器の厚みの違いによる圧力損失比較



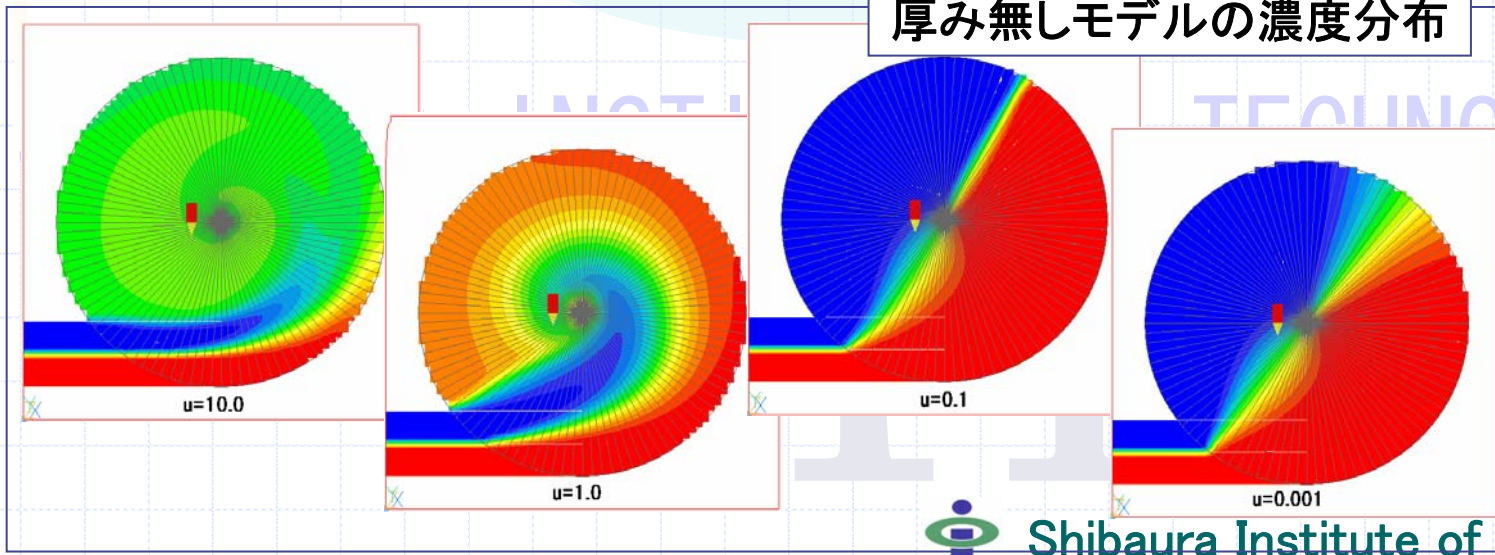


混合器の厚みの変化による比較

基本モデルの濃度分布



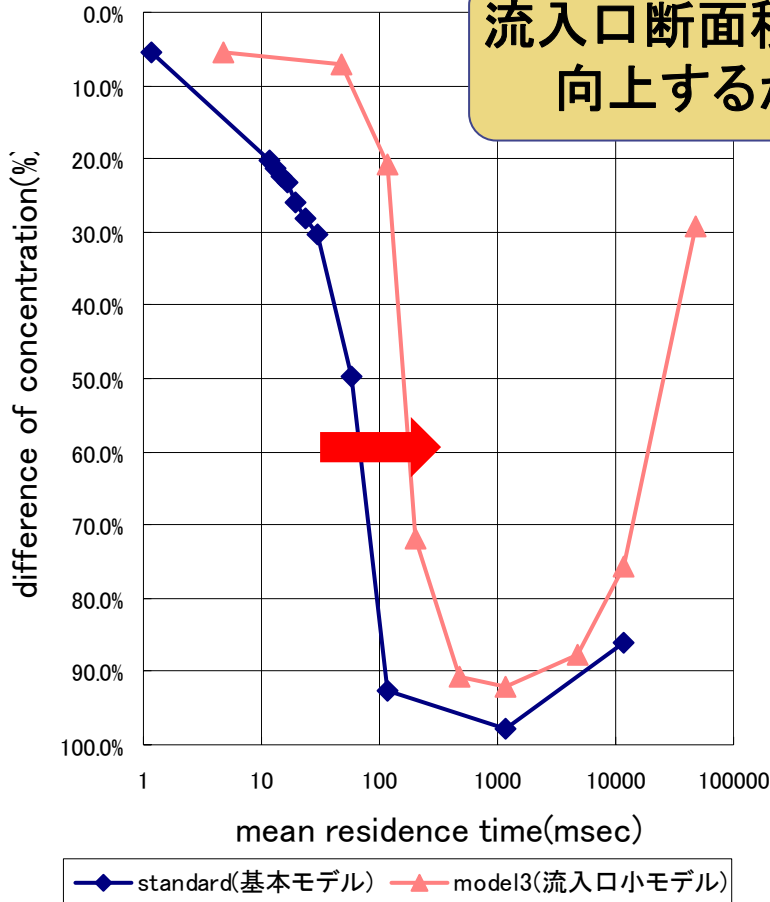
厚み無しモデルの濃度分布



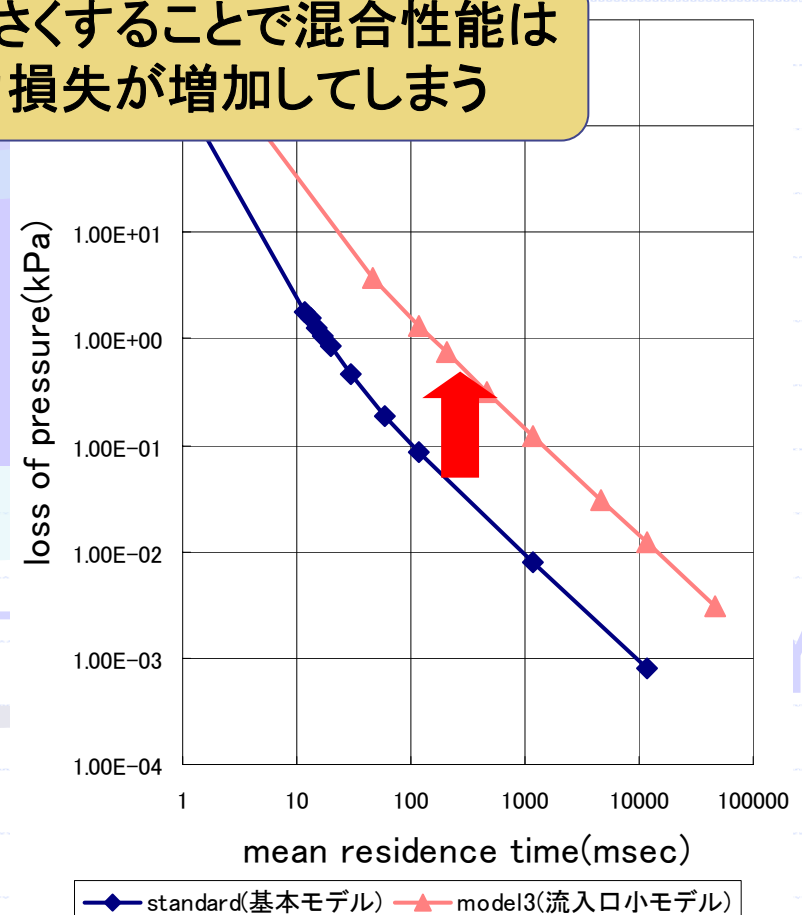


流入口断面積の違いによる比較

流入口断面積を小さくすることで混合性能は向上するが圧力損失が増加してしまう



流入口断面積の違いによる濃度差比較



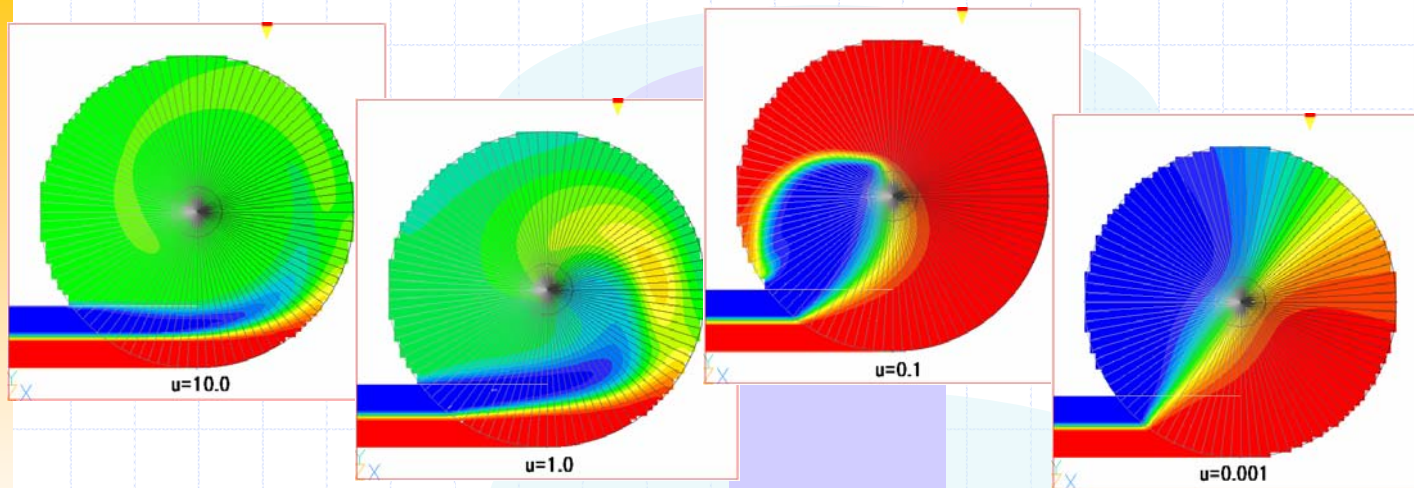
流入口断面積の違いによる圧力損失比較



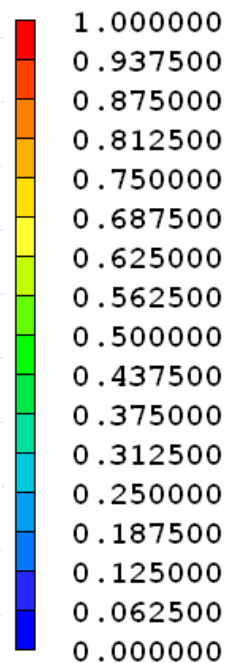


流入口断面積の違いによる比較

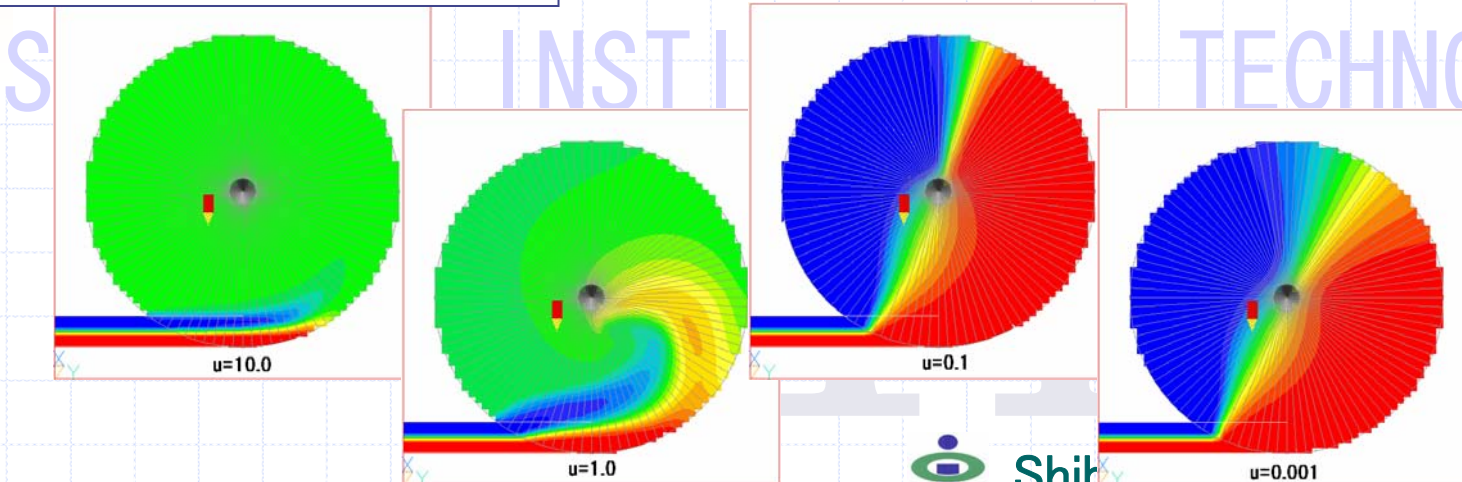
基本モデルの濃度分布



濃度



流入口小モデルの濃度分布



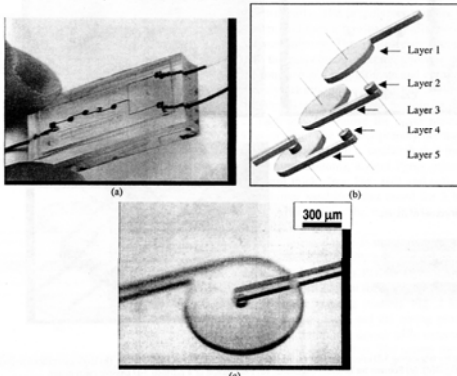
単位u(m/s)
Technology





考察と結論

1. 回転流れを用いたmixerでは、一般的なmixerと比較して、高流速域での混合が期待できる。しかし低流速域では溶液の混合に適していない。ただし混合が期待できる領域では圧力損失が大きくなる傾向にある。
2. 渦流を3次元的にし、渦の回転数を増やすため、ある程度厚みを持たせたほうが混合効率が良い。
3. 流体の比表面積、渦の回転数が増えるためMixerに対して流入口の断面積が小さいほうが効率が良い。ただし圧力損失は大きくなる。



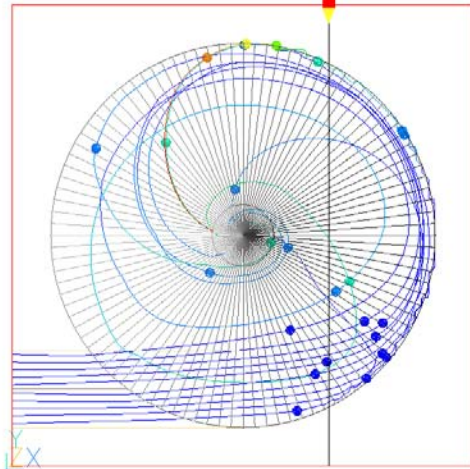
現在、フォトリソ法にて数値モデルで検討した左図のような形状のマイクロミキサーをPDMS(熱硬化性シリコン樹脂)を用いて自作している





流れの可視化例 (流速 $u=1.0\text{m/s}$)

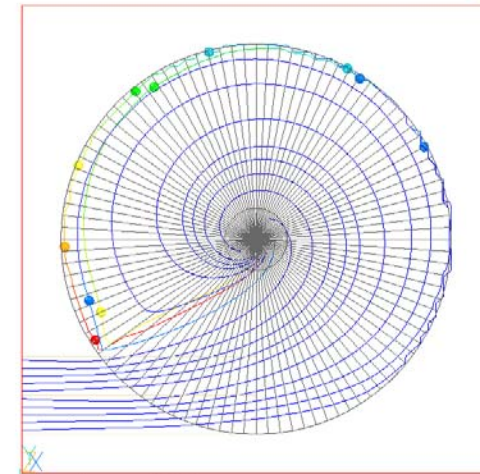
Total time
47.62042
44.64414
41.66787
38.69159
35.71531
32.73904
29.76276
26.78648
23.81021
20.83393
17.85765
14.88137
11.90510
8.928821
5.952544
2.976268
-9.125E-6



micro_model.1

Probe value
0.000000

Total time
110.9762
104.0402
97.10415
90.16814
83.23212
76.29612
69.36011
62.42410
55.48808
48.55207
41.61606
34.68005
27.74404
20.80803
13.87201
6.936004
-7.691E-6



micro_model.3

Probe value
0.000000

SHIBAUKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

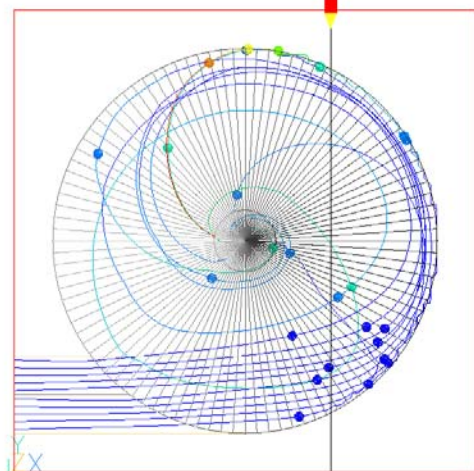
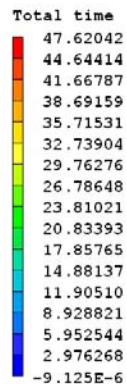
Standard model
(回転流れを用いた基本モデル)

Model 1.3
(厚み無しモデル)



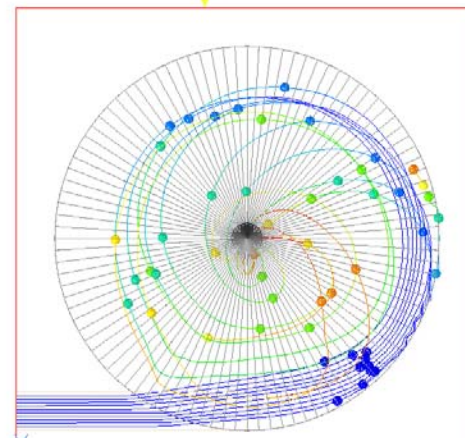
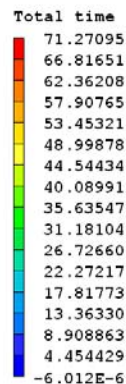


流れの可視化例2 (流速 $u=1.0\text{m/s}$)



micro_model.1

Probe value
0.000000



model.9

Probe value
0.000000

Standard model
(本研究基本モデル)

Model. 3
(流入路断面積を1/4にしたモデル)



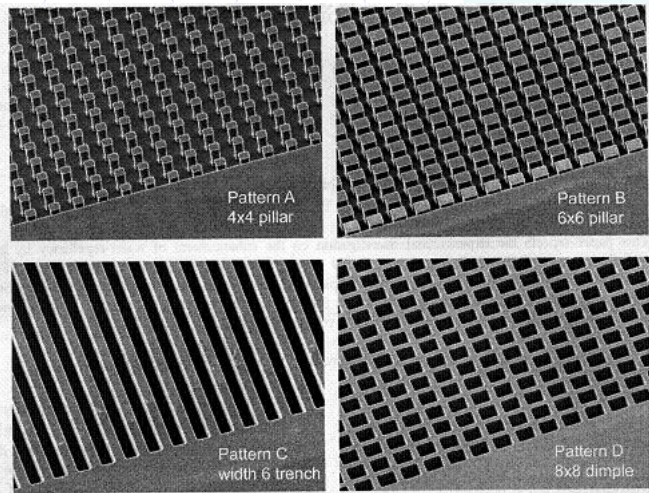


2、Phoenics適用例 その2

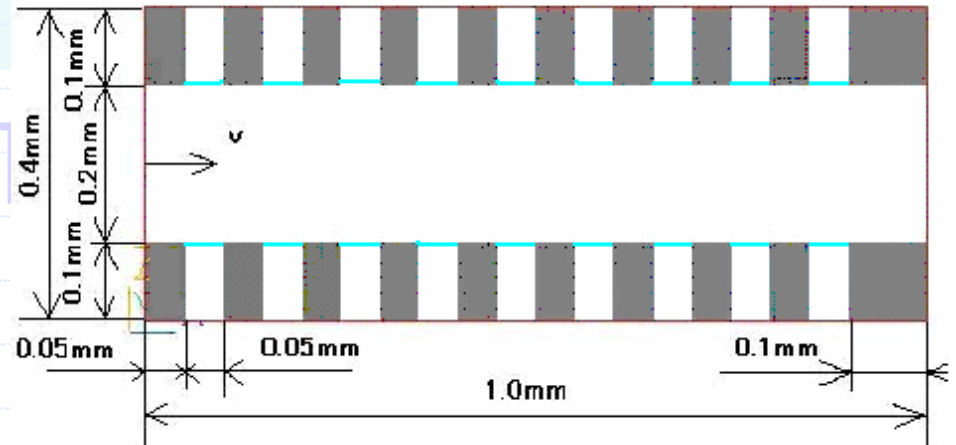
(2) 微細撥水面の摩擦抵抗について

表面張力を利用したはっ水面の研究→マイクロレベルでの加工技術の発達により可能になる。

同様の形状をマイクロチャネル(微細流路)に活かさないかを考え、微細流路内の壁面を表面張力で保持するモデルを作り、数値解析を行う。



様々な形状の撥水面の作成例
(松本他、第38回日本伝熱シンポジウム)



形状の一例 面積比55% 溝長 $l=0.05\text{mm}$ の形状



数値計算の目的



微細流路における粘性抵抗の低減をめざして、
壁面摩擦損失の低減に対する、

(1)表面張力で支持する溝長 l による影響

(2)一定の面積比の流路における

溝の刻み方の違いの影響

について数値モデルを用いて検討する。





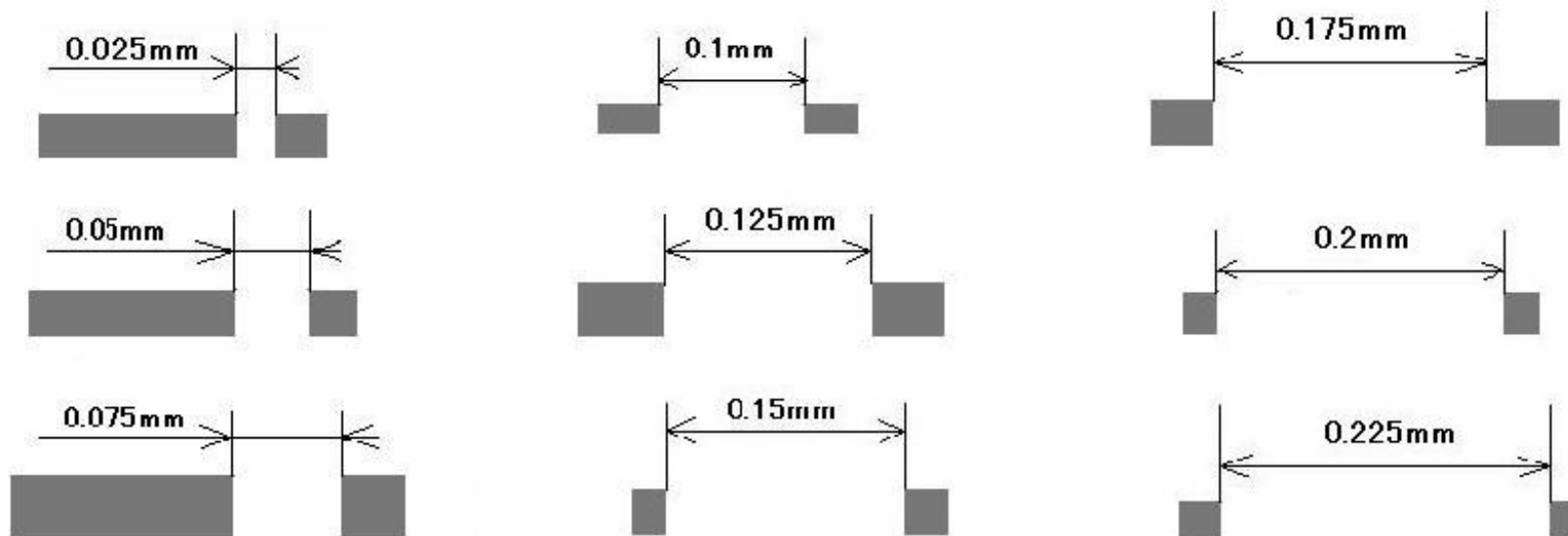
計算モデルその1

- ・溝長、位置・パターン等を変化させた2次元のモデル流路を作成し、壁面部のせん断応力、せん断力、流速を抽出。

3-1.溝長変化の計算

0.025mmから0.225mmまで0.025mm刻みで

溝長を変化させて計算。入り口流速は0.02m/sで一定。



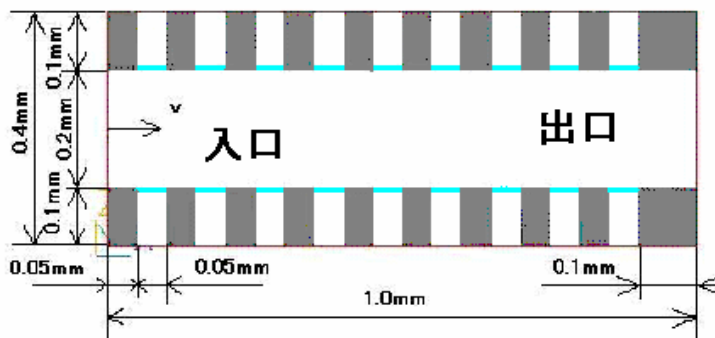


計算モデルその2

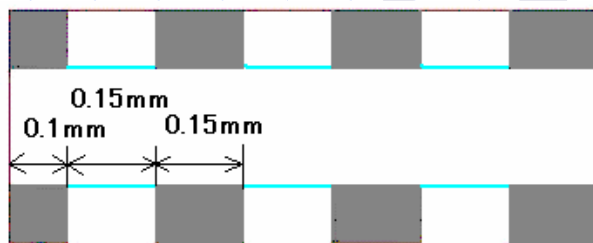
3-2.位置・パターン変化の計算

単位流路長あたりの溝なしモデルに対する面積比を55%と80%に固定し、55%の時は4種、80%の時は3種の流路パターンを作成、入り口流速 v を0.02m/s、0.2m/s、2m/sに変えて計算。

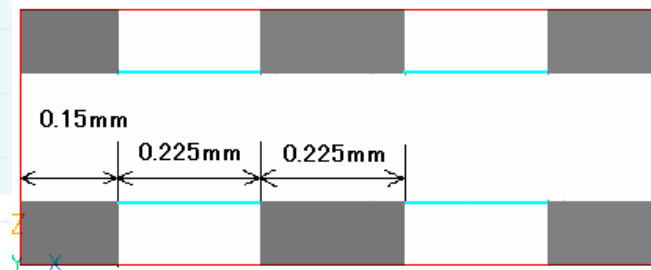
3-2-1 面積比55%の流路モデル



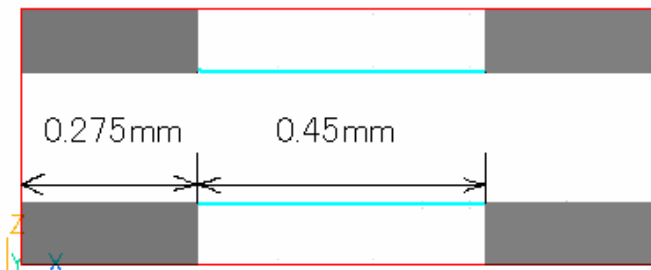
面積比55% 溝長 $l=0.05\text{mm}$



面積比55% 溝長 $l=0.15\text{mm}$



面積比55% 溝長 $l=0.225\text{mm}$



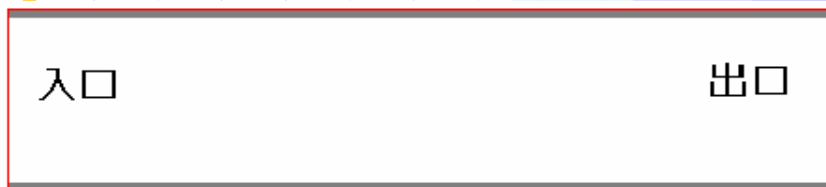
面積比55% 溝長 $l=0.45\text{mm}$



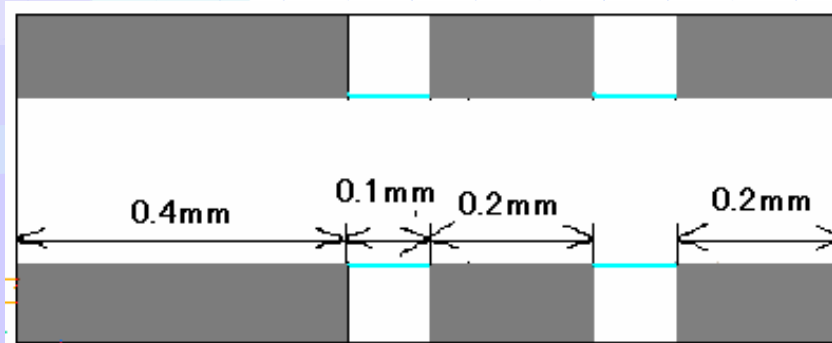


計算モデルその3

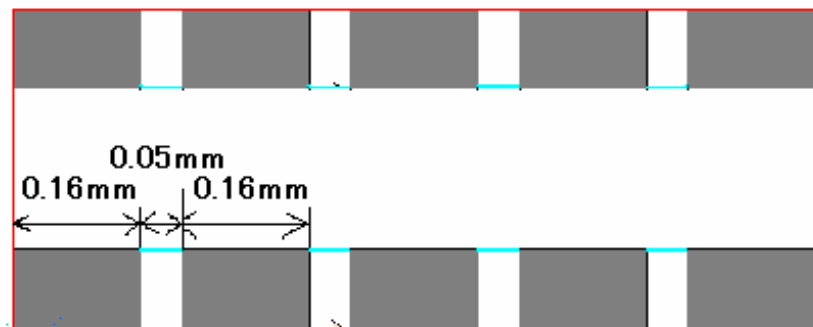
3-2-2 面積比80%の流路モデル



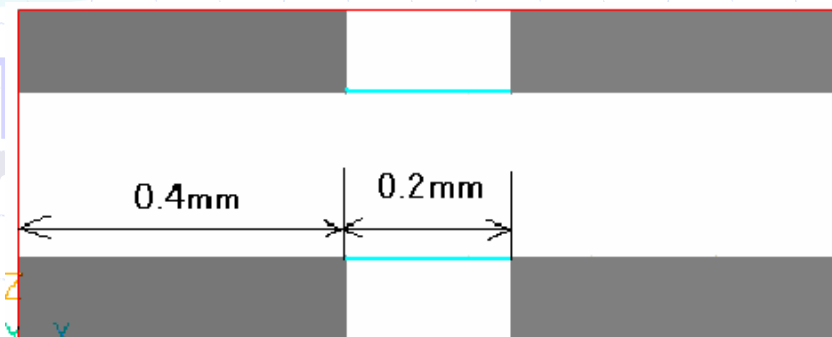
溝なしモデル



面積比80% 溝長 $l=0.1\text{mm}$



面積比80% 溝長 $l=0.05\text{mm}$



面積比80% 溝長 $l=0.2\text{mm}$





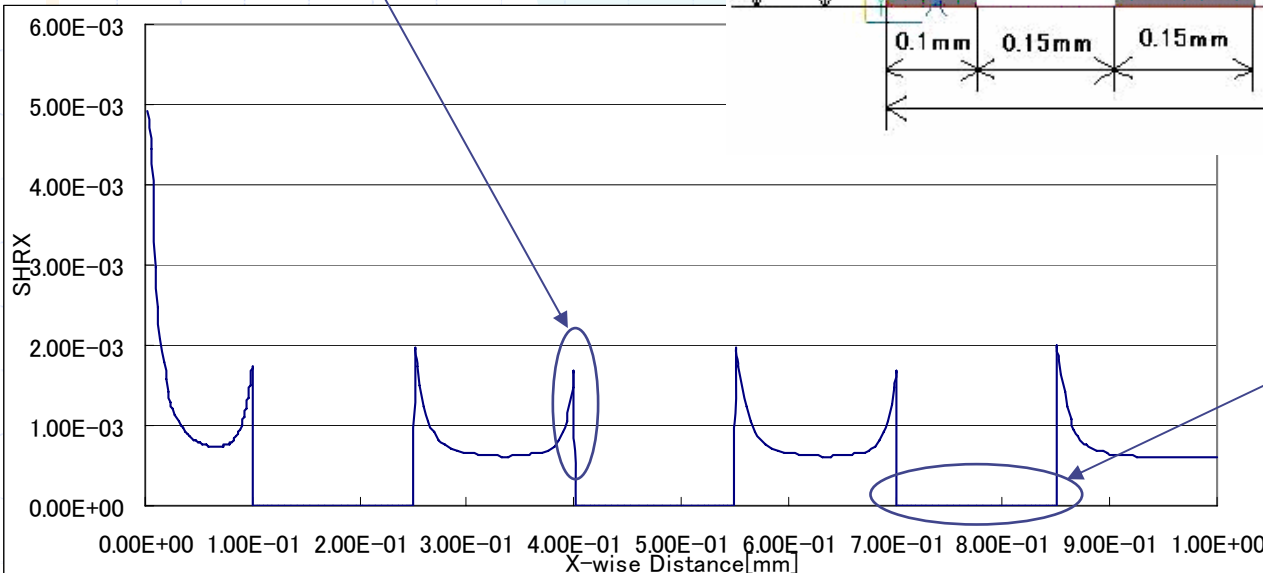
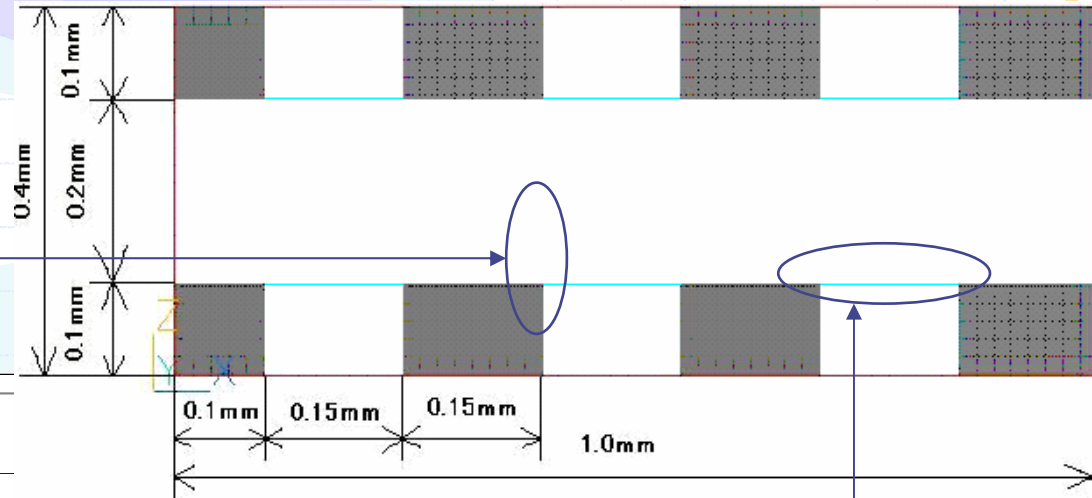
考察

(1)壁面部におけるせん断応力

(1-1)せん断応力のピーク値が溝部の前端と後端に見られる

Ex)面積比55% 溝長 $l=0.15\text{mm}$
流速 $v=0.02\text{m/s}$ の時

溝部前端でもせん断応力が認められる



表面張力で
支持する溝部分

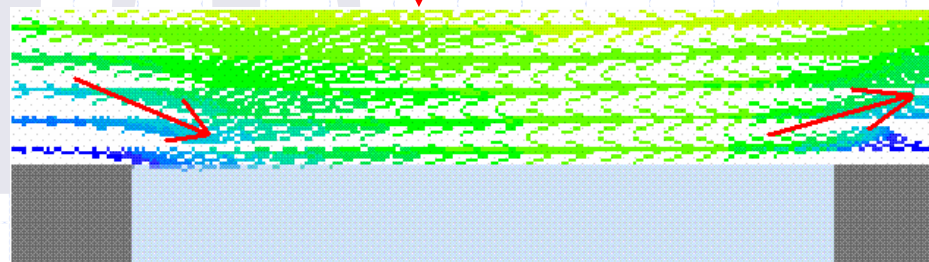
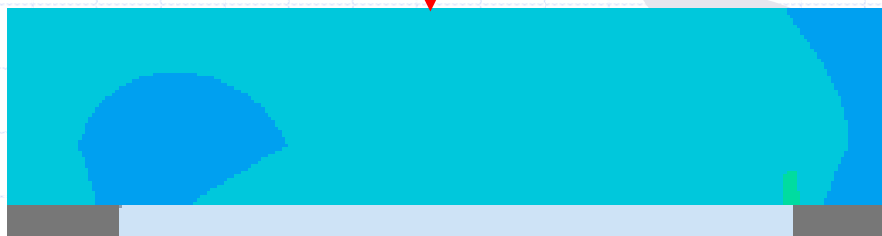
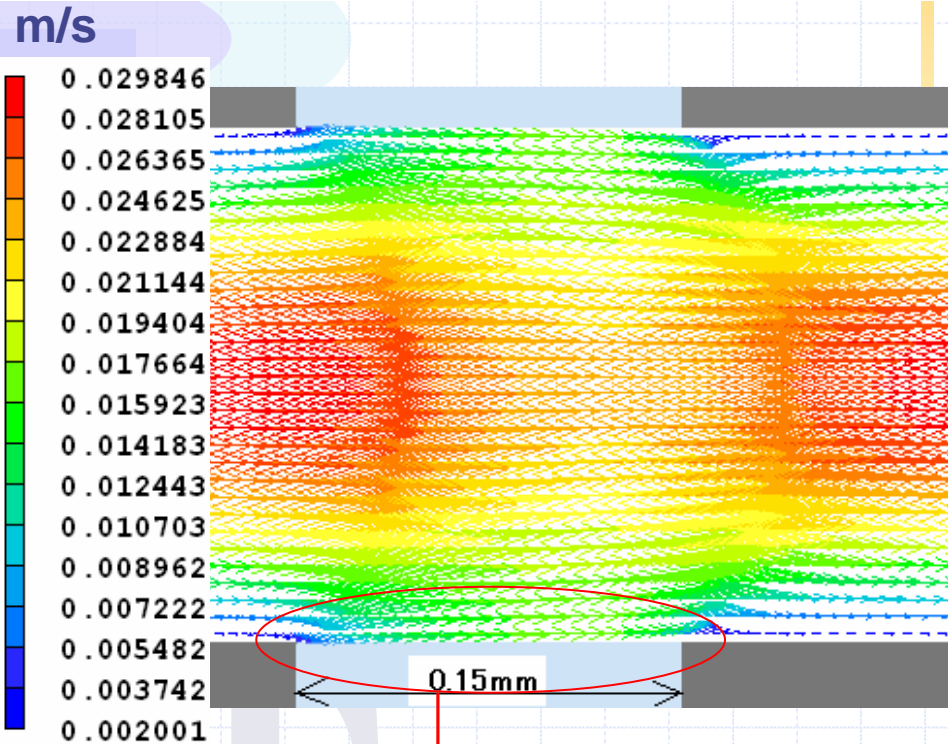
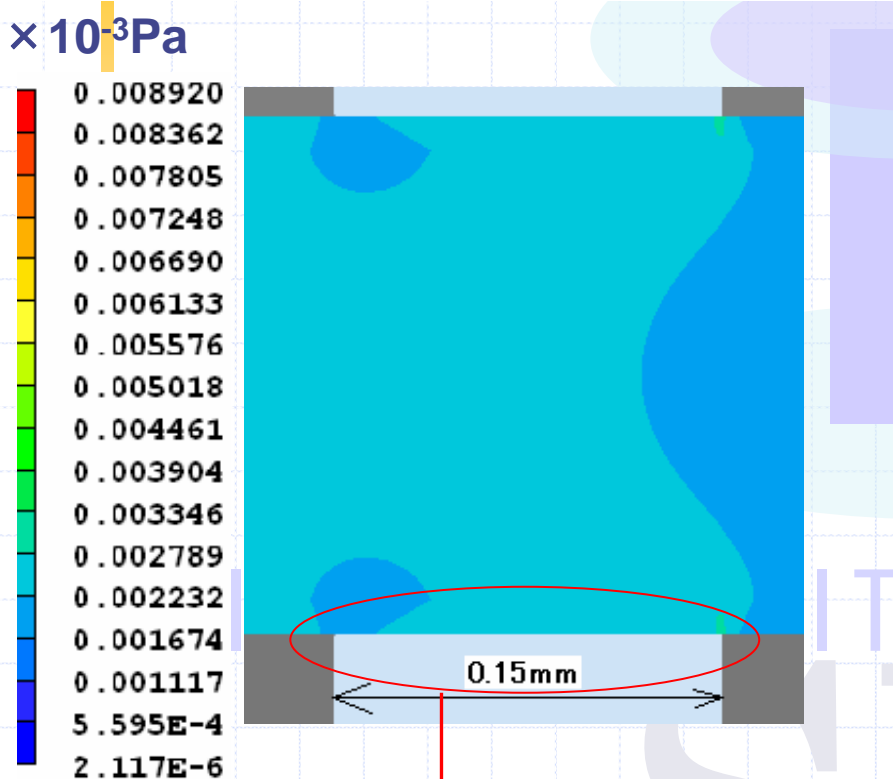
(1-2)溝部における圧力コンタ図と速度ベクトル図を観る

溝の前端部では圧力が下がり、流路中心部から流れが広がってくる。

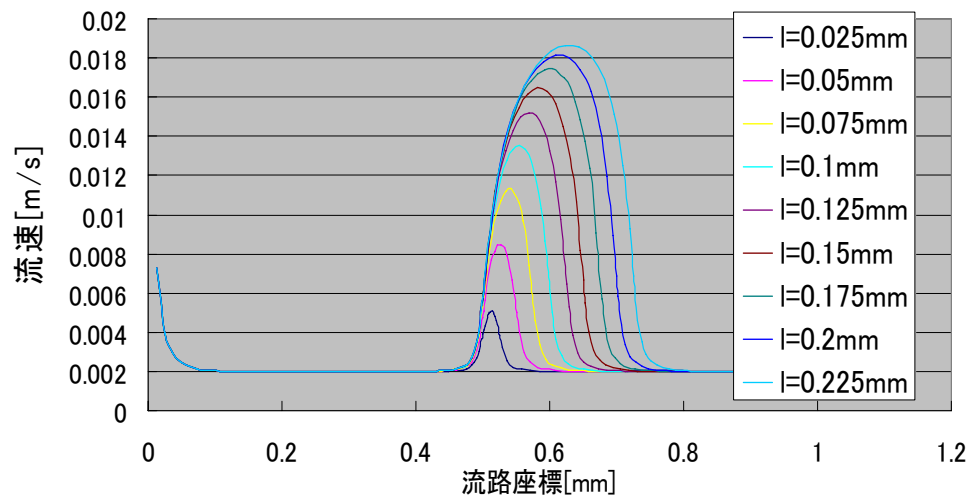
また、流れ後端部では壁面部での速度の遅い流れに乗り上げ、中心部に集まる。

圧力コンタ図

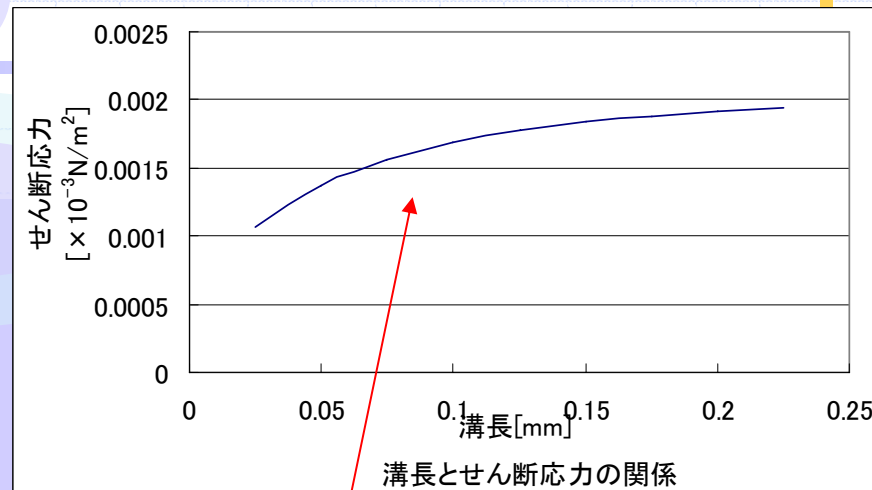
速度ベクトル図



(1-3)溝長の変化によってせん断応力はどのように変化するか



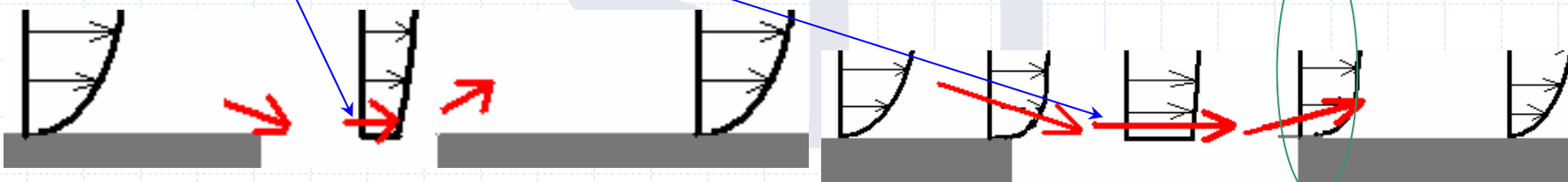
溝の長さと言速のピーク値



溝長とせん断応力の関係

溝長が長くなる程
最大流速が大きくなる

最大流速が大きくなると
特に後端でせん断応力が大きくなる





(2)溝の位置・パターンの変化で壁面抵抗は
どのように変わるか

(2-1)溝なしモデルと溝ありモデルの壁面抵抗の差を
抵抗低減率として55%と80%の各モデルについて評価

$$\text{抵抗低減率} [\%] = \frac{(\text{溝ありモデルのせん断力} - \text{溝なしモデルのせん断力})}{\text{溝なしモデルのせん断力}} \times 100$$

Table1 溝長変化の場合の抵抗低減率				
		抵抗低減率 [%]		
流速[m/s]		0.02	0.2	2
溝長[mm]				
溝なし		0	0	0
0.05		13.0	12.1	9.2
0.15		25.6	20.1	13.5
0.225		30.2	23.2	15.6
0.45		36.1	28.4	19.2
0.05(80%)		4.6	3.7	1.8
0.1		9.6	6.7	3.0
0.2		13.2	9.1	4.4

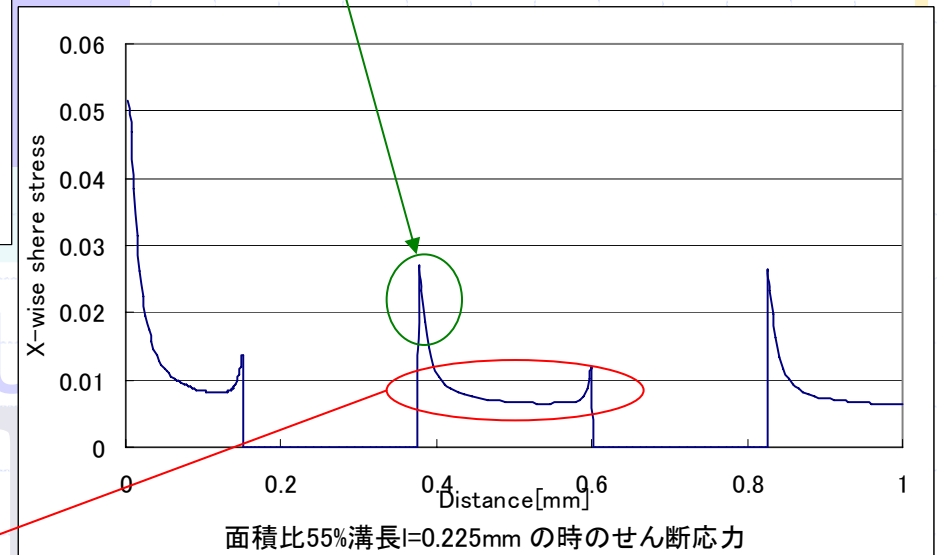
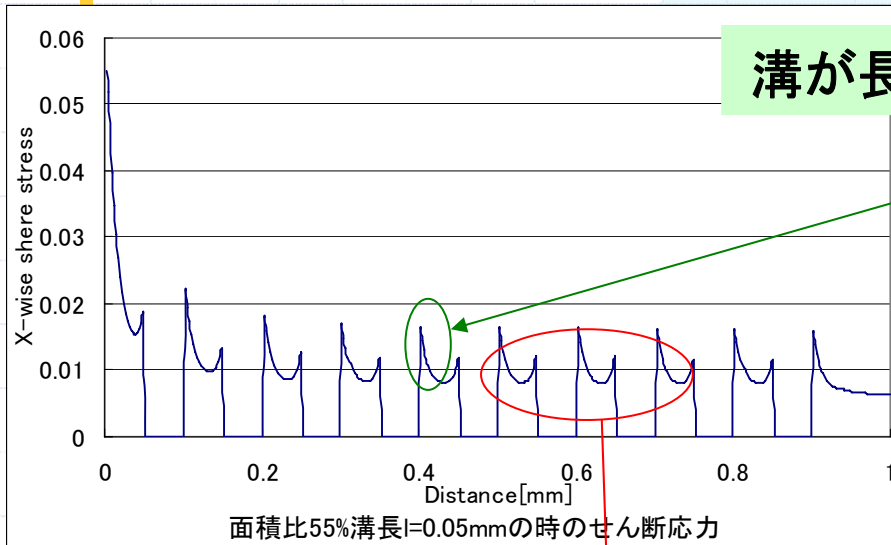
面積比が同じでも・・・

溝長が長い方が
抵抗低減率が大きくなる

(2-2)なぜ溝長が長い方が抵抗低減率が大きくなるのか

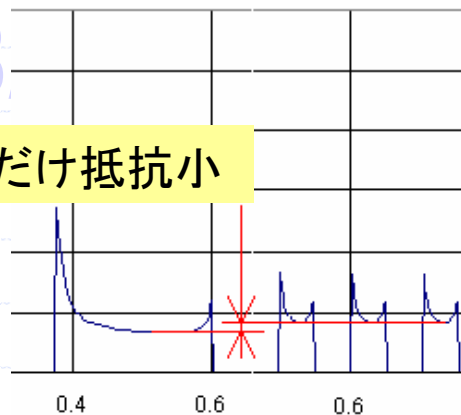
面積比55%入り口流速0.2m/sの条件で

溝長 $l=0.05\text{mm}$ と $l=0.225\text{mm}$ の場合のせん断応力を比較する



しかし...

この差の分だけ抵抗小



溝長が長いほうが前縁効果のない壁面部のせん断応力が小さい



結論

壁面抵抗をより小さくするためには

- (1)溝長の総和を大きくし、
壁面が占める面積比を小さくする。
- (2)溝を小刻みにするのではなく、
溝数が少なくても各溝長を長く取る。

→ 今後は、3次元形状の効果やメニスカス部分の影響などを含めたさらなる検討が必要である。





全体のまとめ(個人的な意見ですが、)

Phoenics User Conference
in Japan, 2006

(1) マイクロフルイディクスの分野でのPhoenicsの適用例を示した。

(2) マイクロスケールの流れでの精密な流速や濃度、温度の測定は簡単ではない。数値モデルを用いて検討しておくことは非常に重要である。

S (3) 併せてマイクロスケールの実験技術、測定技術の進歩も望まれ、数値計算と実験結果を迅速かつ簡便に比較検討できるシステムが望まれる。

