



# Numerical Simulation of Rapid Magnetic Microfluidic Mixer by COMSOL Multiphysics

## 磁性流體用於微混合器之 模擬研究

Speaker: K. P. Leong (梁國邦研究生)

Supervisor: Prof. C.Y. Wen (溫志湧教授)

國立成功大學航空太空工程學系

Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University



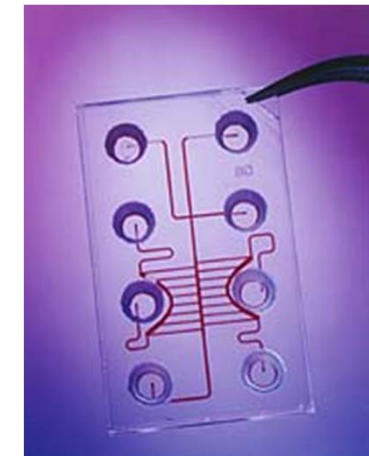
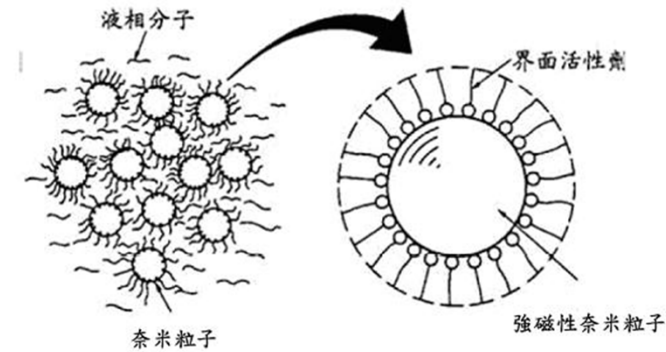
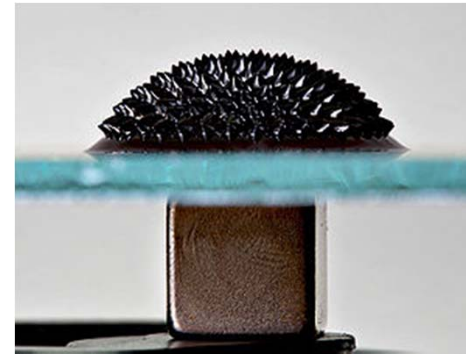
# 大綱

- ▶ 前言
  
- ▶ 實驗架構與結果簡介
  
- ▶ 研究方法
  - 公式及簡化
  - 網格立獨立性分析
  
- ▶ 模擬與實驗結果之比對
  
- ▶ 分析與結論



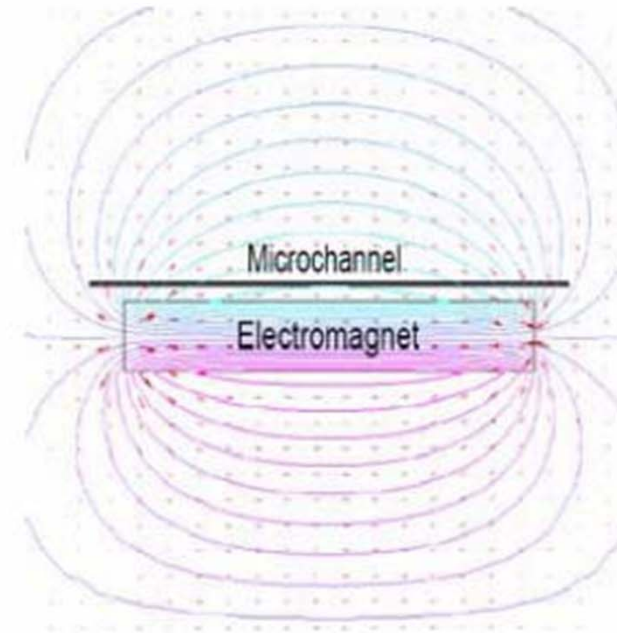
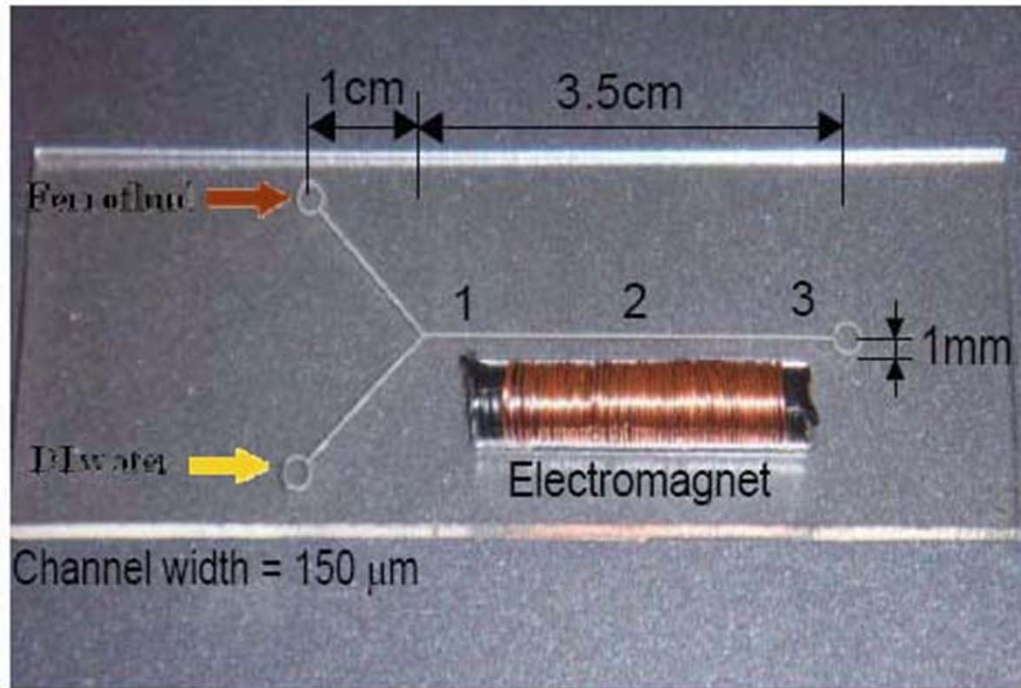
# 前言：磁性流體

- ▶ 磁性流體由懸浮於載流體當中奈米數量級的鐵磁微粒組成
- ▶ 載流體通常為有機溶液或水
- ▶ 微粒由表面活性劑包裹
- ▶ 高磁化率、順磁性





# 簡介：磁性流體用於微混合器

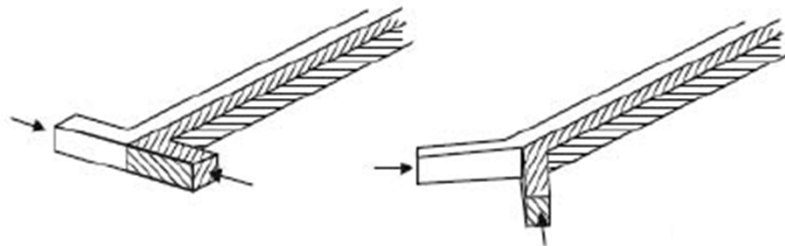


溫教授等人之實驗架設 (2009)



# 磁性流體用於微混合器之回顧

## ▶ 微混合器之重要

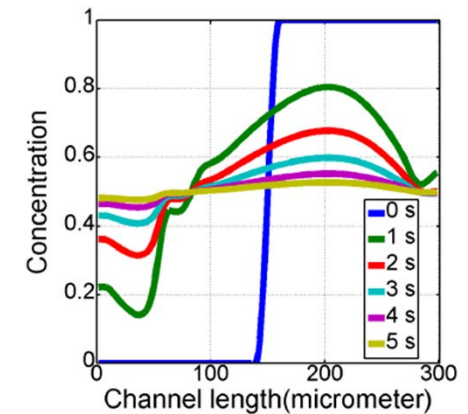
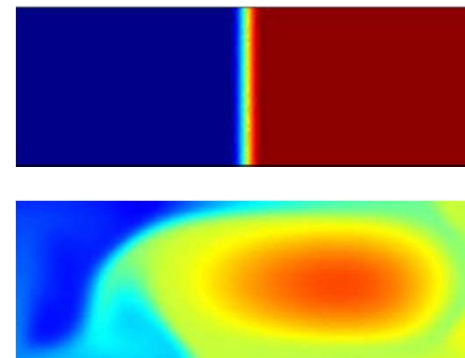
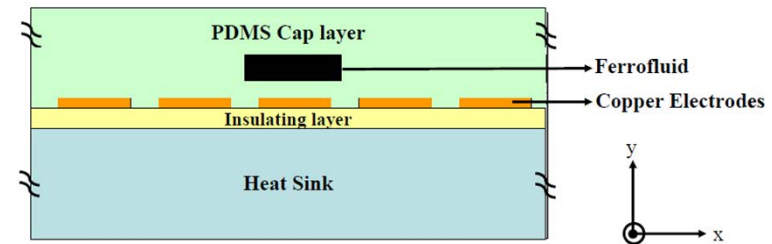


$L = 100\mu\text{m}$

$$\tau_D = \frac{L^2}{D} \quad \tau_D \text{ 混合時間}$$

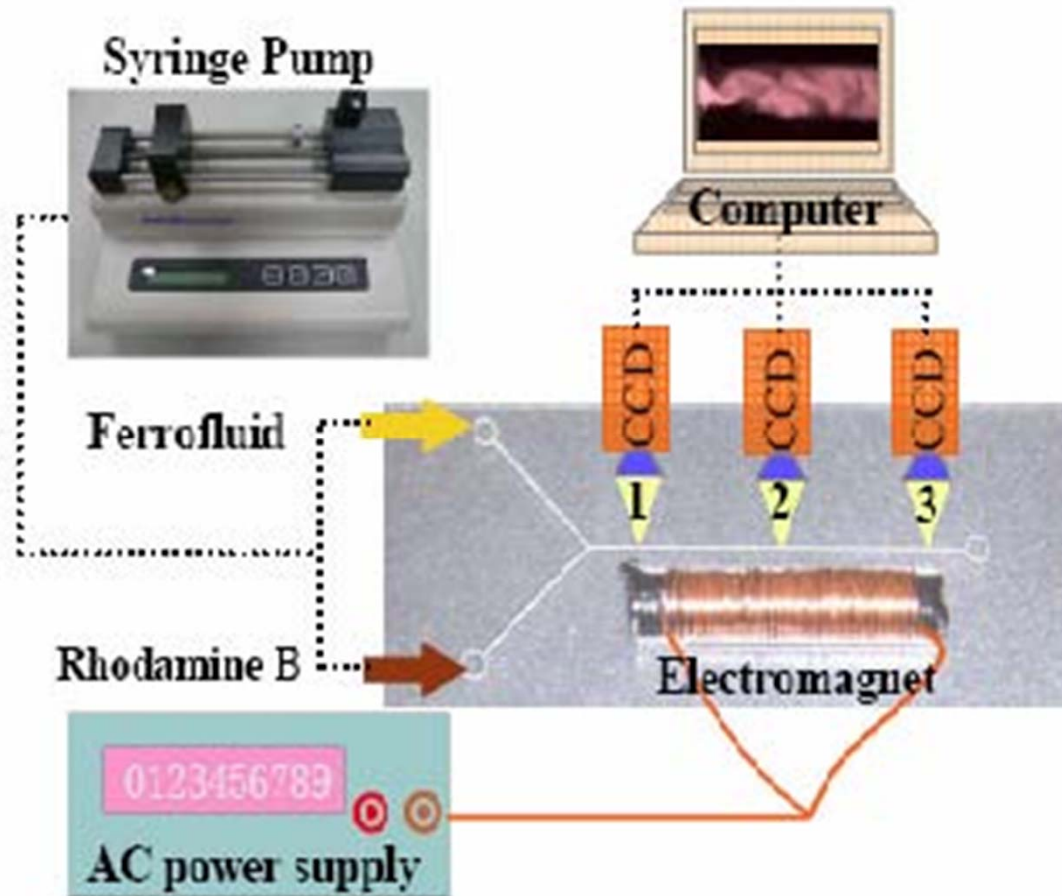
$$= \begin{cases} 10 \text{ s} & D = 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \\ 10^6 \text{ s} & D = 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \end{cases}$$

## ▶ Mao 等人之模擬



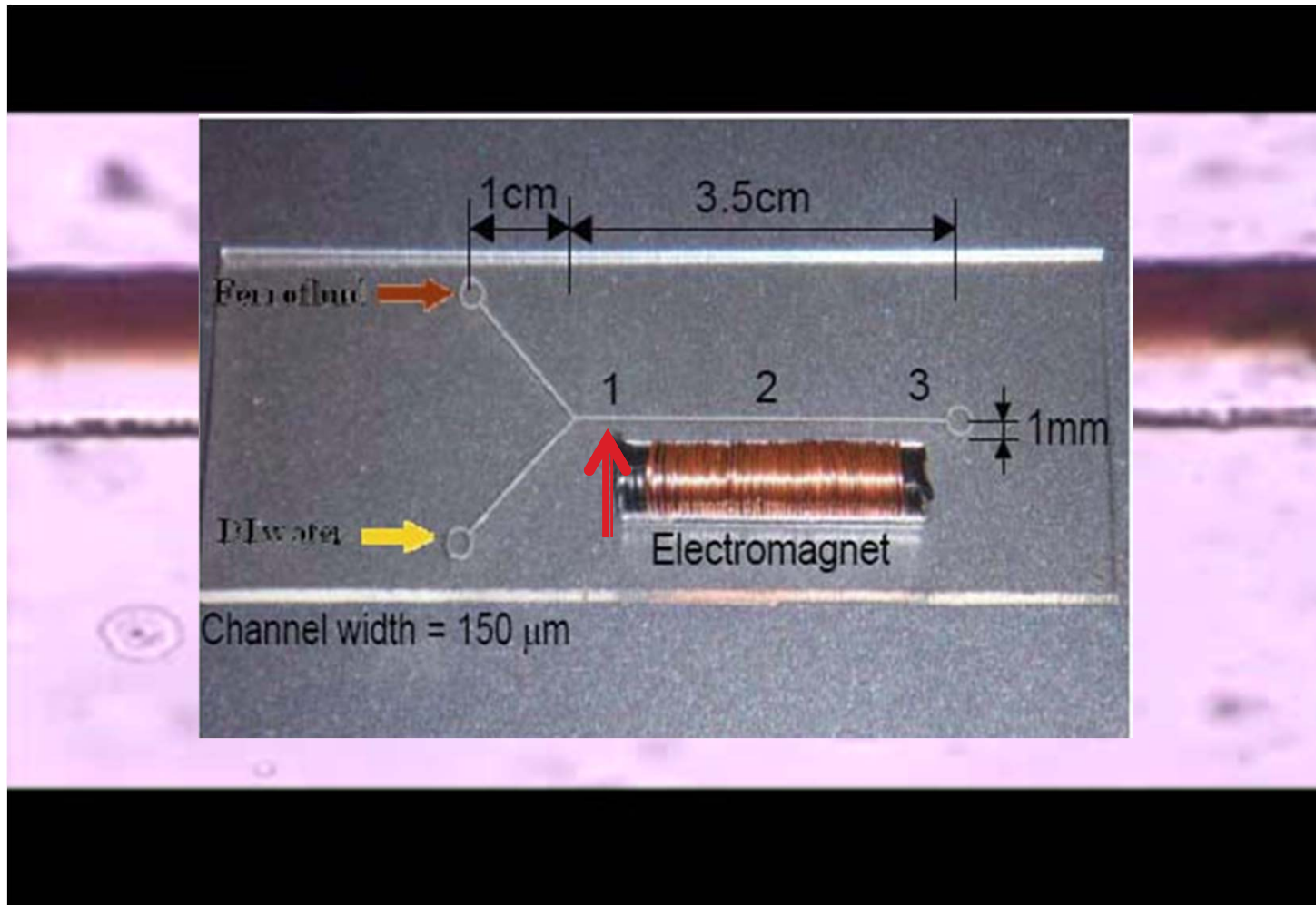


# 簡介：實驗架設



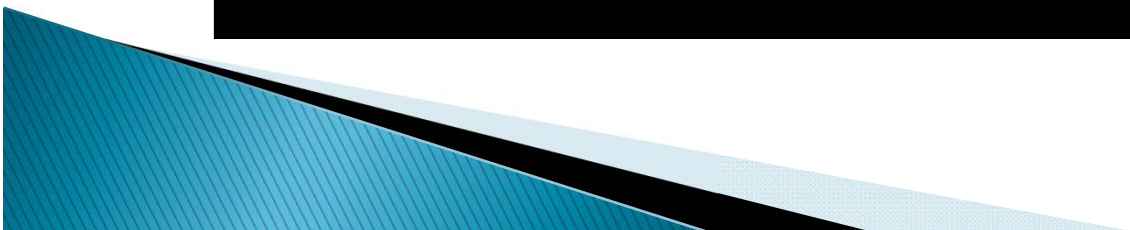
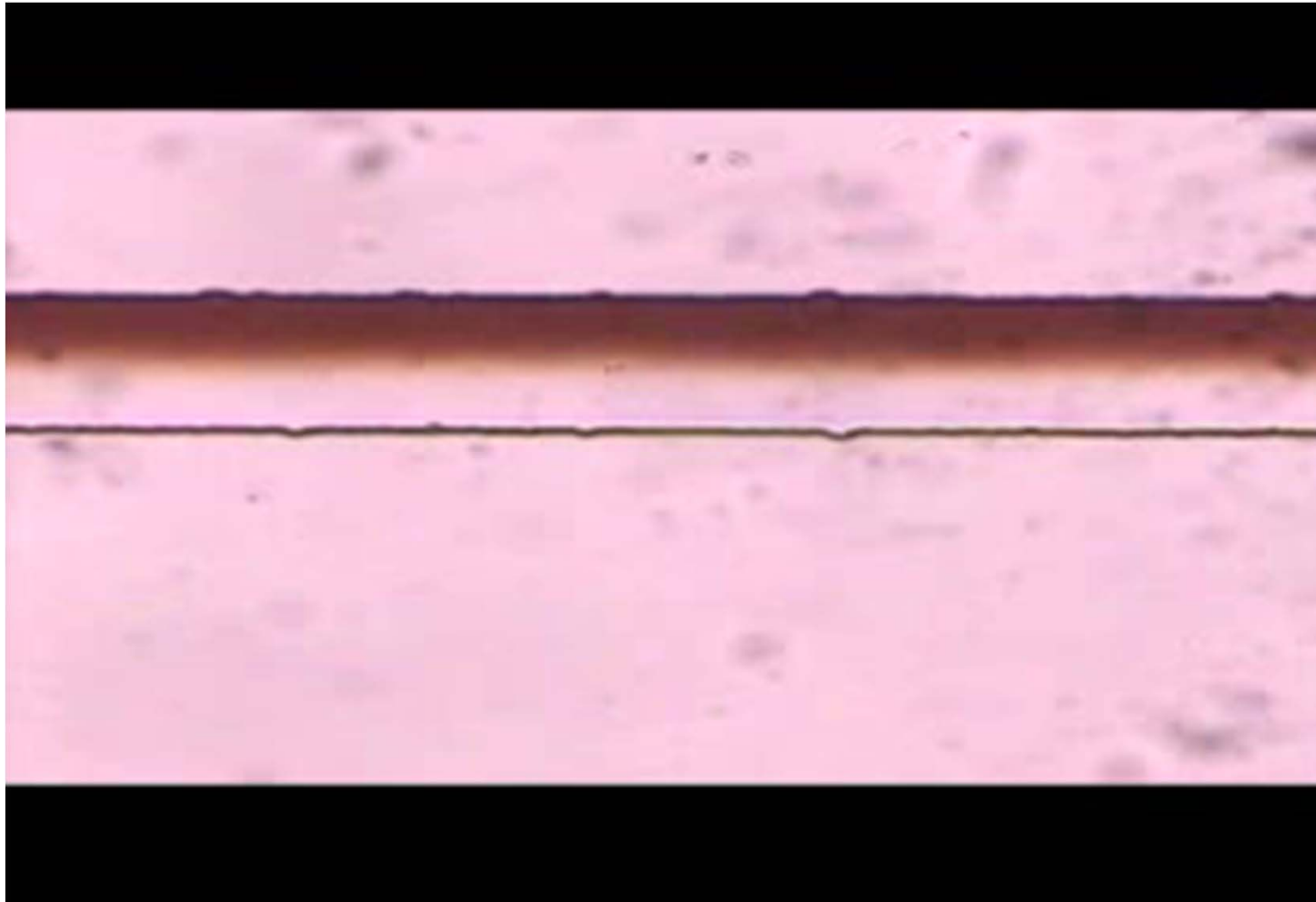


# 實驗結果： 300e 45Hz (upstream)





# 實驗結果： 600e 45Hz (upstream)





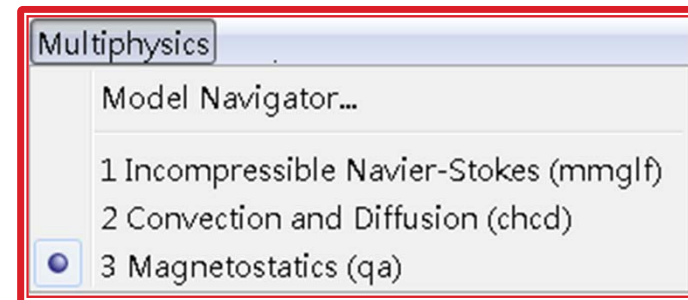


# 研究方法

- ▶ 使用軟體：COMSOL 3.4
- ▶ 物理模型：

- 1. 計算流體力學
- 2. 濃度擴散
- 3. 磁力作用

同時求解





# 多重物理模型耦合

- ▶ 連續方程式  $\nabla \cdot \vec{v} = 0$
- ▶ 濃度擴散方程式  $\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)c = D\nabla^2 c$
- ▶ 動量方程式  $\rho_0 \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \overline{F}_m$

上述的方程式中C為無因次濃度(磁流體為1，水為0)。  $\overline{F}_m$  為磁流體在磁場下所受的磁力(Magnetic Bodyforce Density)，展開為  $\mu_0(\overline{M} \cdot \nabla)\overline{H}$ ，

- ▶ 流體的動力黏度、密度、流體所受磁場力 皆是濃度(C)的函數：

$$\eta_{(c)} = \eta_m e^{R(1-c)} \quad R = \ln \left( \frac{\eta_0}{\eta_m} \right) \quad \rho_{(c)} = c\rho_m + (1+c)\rho_0$$



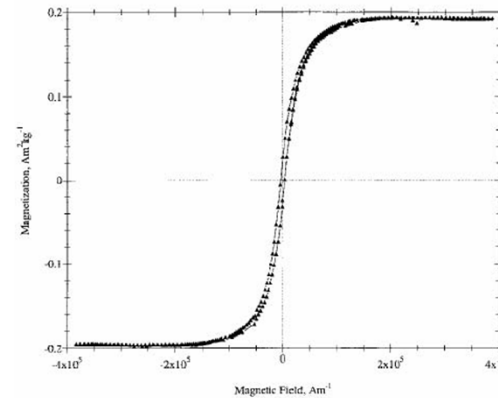
# 磁場作用模型

- ▶ 安培定律  $\nabla \cdot \vec{H} = \vec{J}$
- ▶ 高斯定律  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$
- ▶ 磁位關係  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} - \vec{M} \right) = \vec{J} = 0$$

$$\vec{M} = \alpha \tan^{-1} \left( \frac{\beta}{\mu_0 \mu_r} (\nabla \times \vec{A}) \right)$$



EMG605的磁化曲線

$$\vec{M} = \left( \frac{\chi}{\mu_0 \mu_r} (\nabla \times \vec{A}) \right)$$

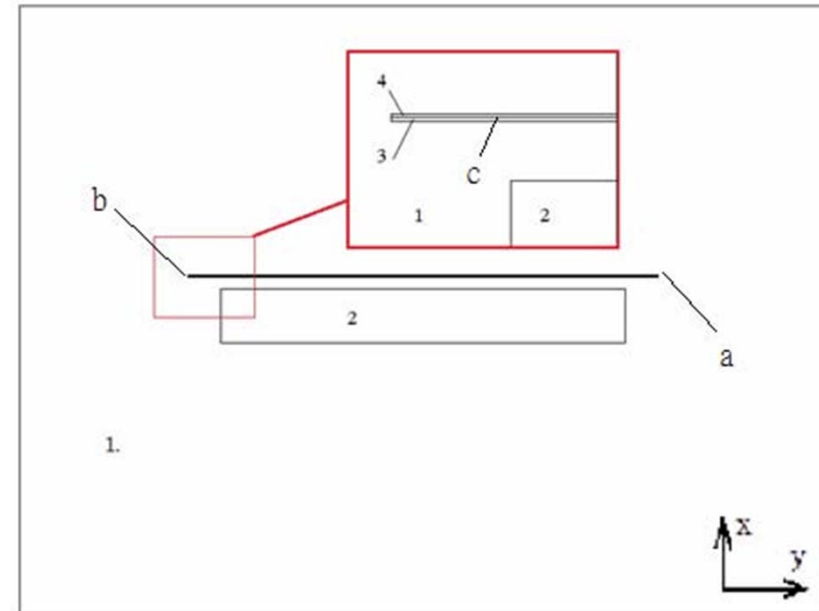
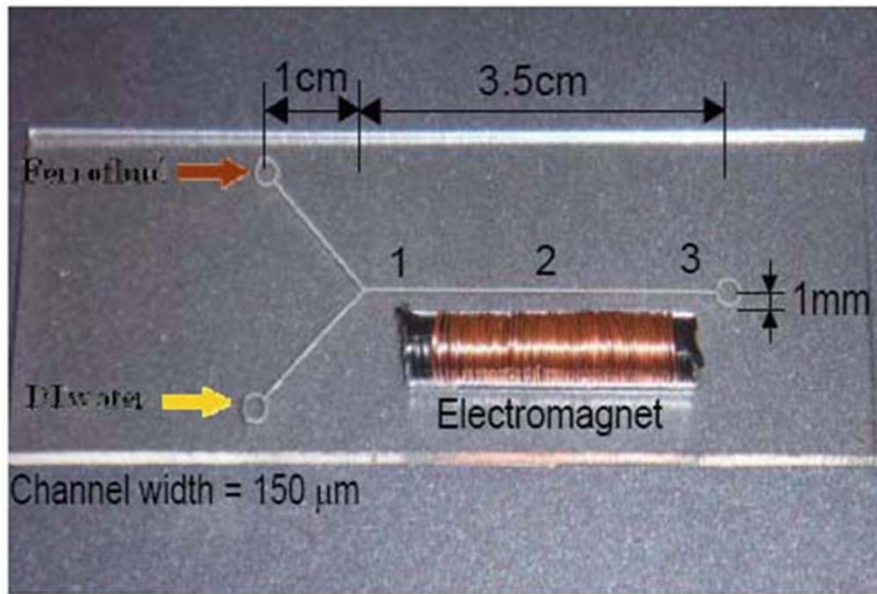
$$\vec{F}_m = \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}$$

$$F_x = \frac{\chi}{\mu_0 \mu_r^2} \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial x} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} \right)$$

$$F_y = -\frac{\chi}{\mu_0 \mu_r^2} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x \partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right)$$



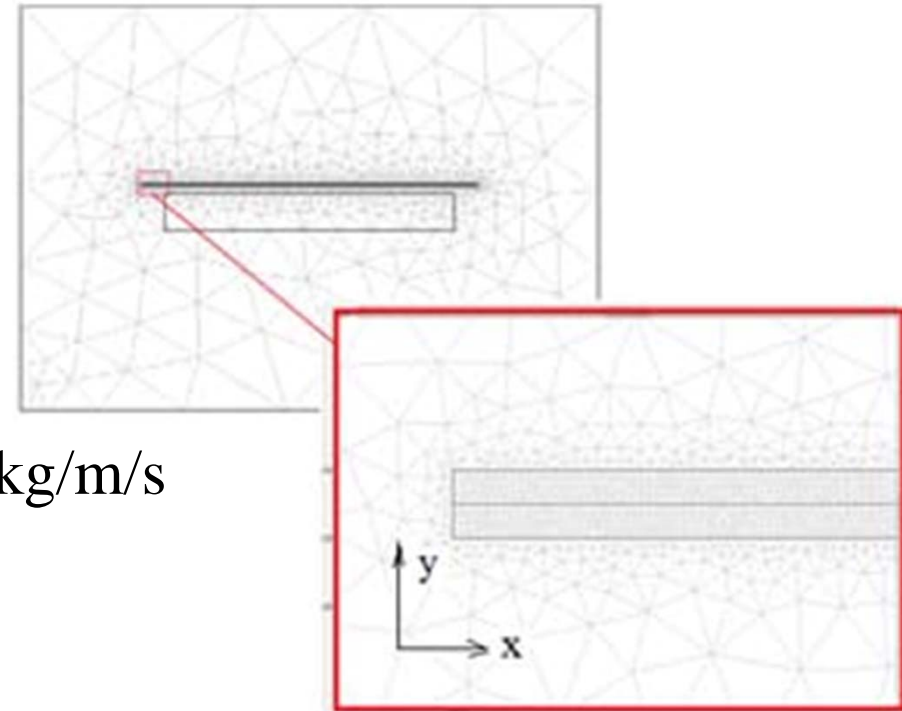
# 網格分析





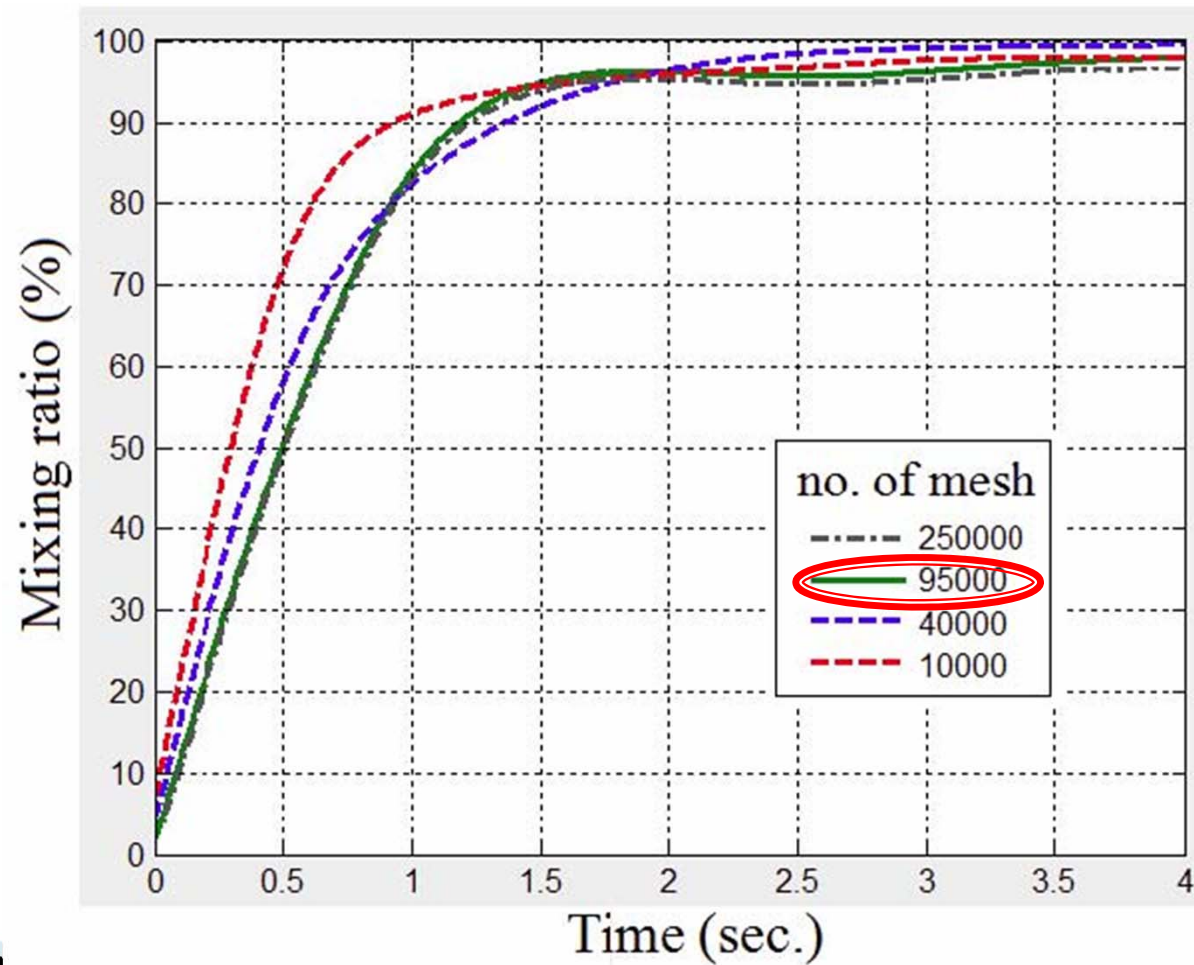
# 採用自由網格，流道區域加密

- ▶ 水基磁性流體：  
EMG 605
- ▶  $\chi_0$ (初始磁化率)=1.17 A/m
- ▶  $\eta$ (磁流體動力黏度)=0.00235kg/m/s
- ▶  $\rho$ (磁流體密度)= 1190kg/m<sup>3</sup>
- ▶  $D$ (擴散係數) = 1.0x10<sup>-9</sup>m<sup>2</sup>/s
- ▶  $V$ (流速)= 0.22mm/s



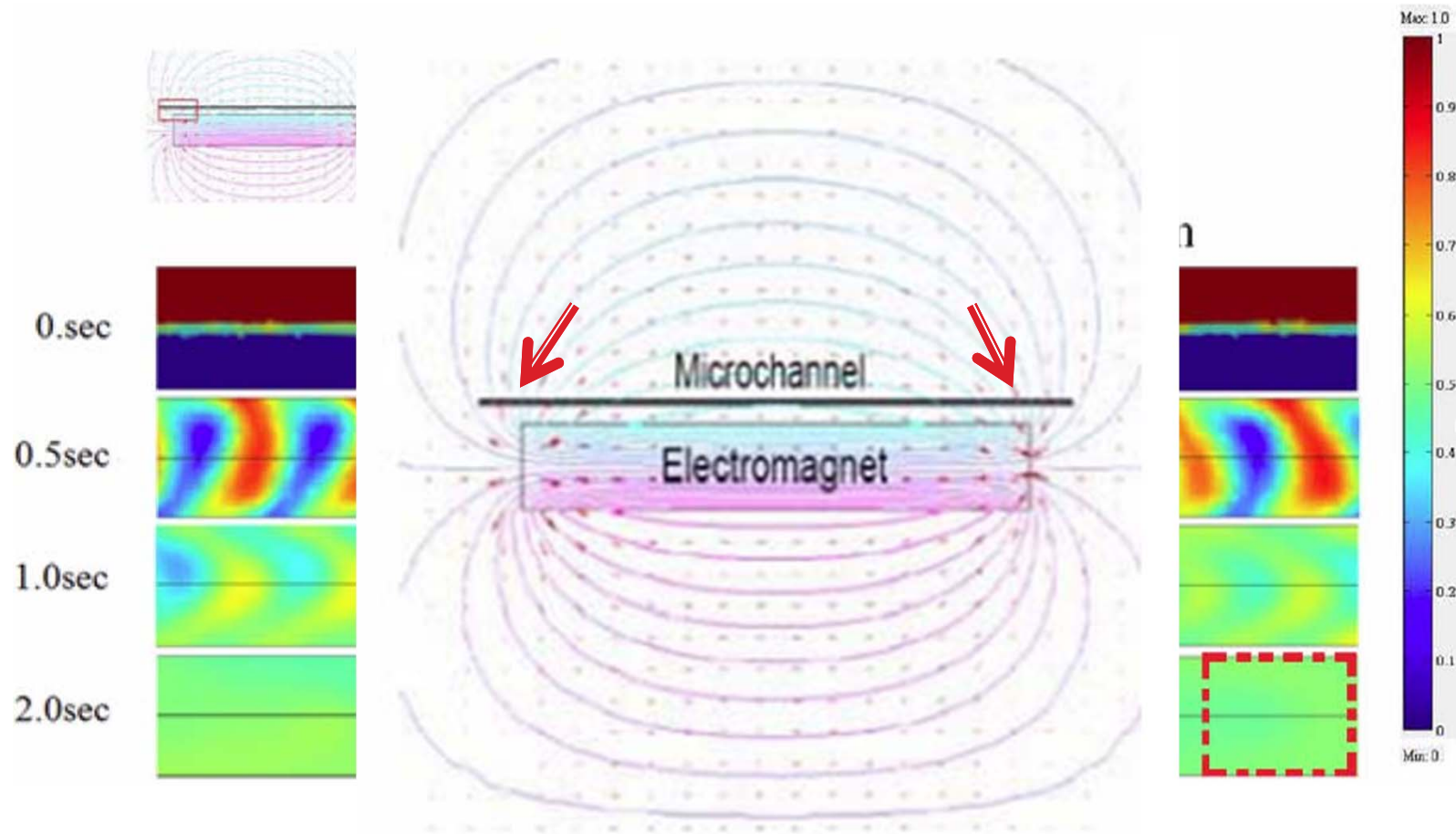


# 網格獨立性分析 case: 300e 45Hz





# AC磁場下混合情況之模擬結果

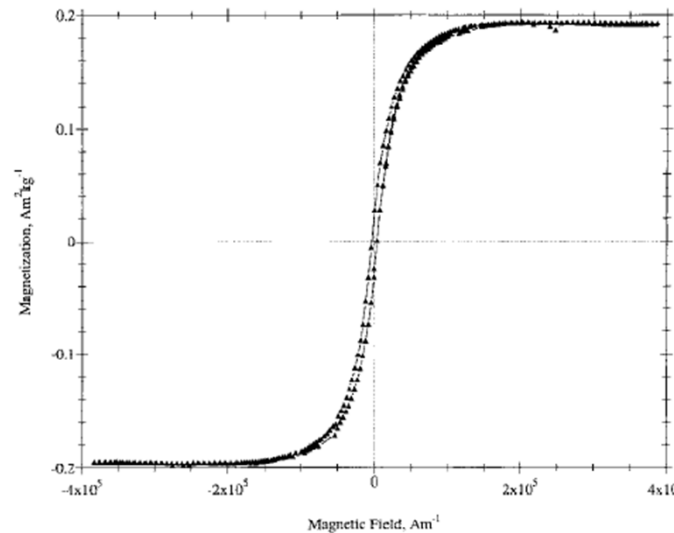


磁場強度： 60 Oe  
磁場頻率： 45Hz  
流速： 0.22mm/s



# 以DC簡化磁場分佈的可行性探討

大部分水基磁性流體(順磁性)的磁滯效應都不顯著

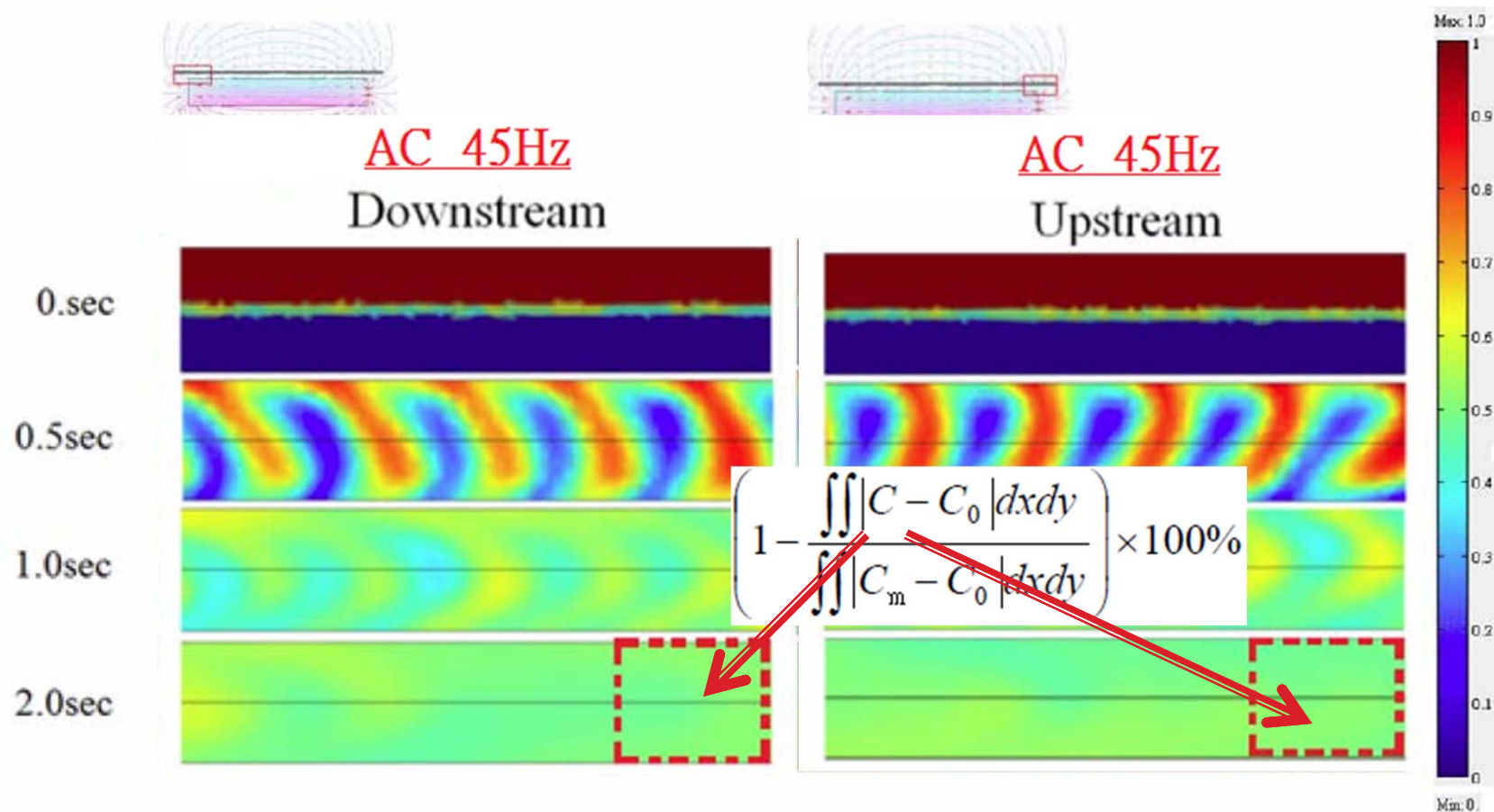


在低頻(小於10<sup>3</sup>Hz) AC電磁場操作下混合效果，與DC磁場沒明顯分別





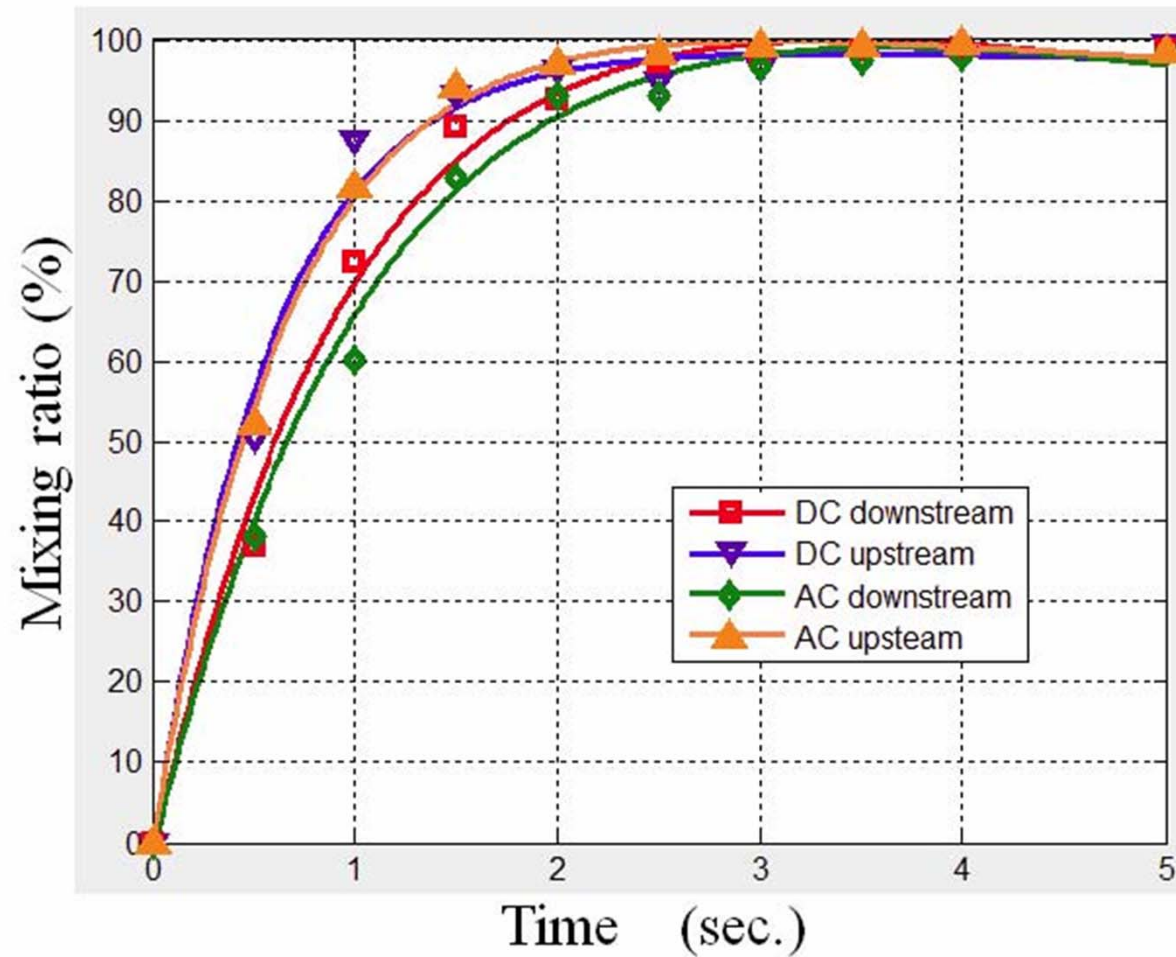
# DC磁場下混合情況之模擬結果



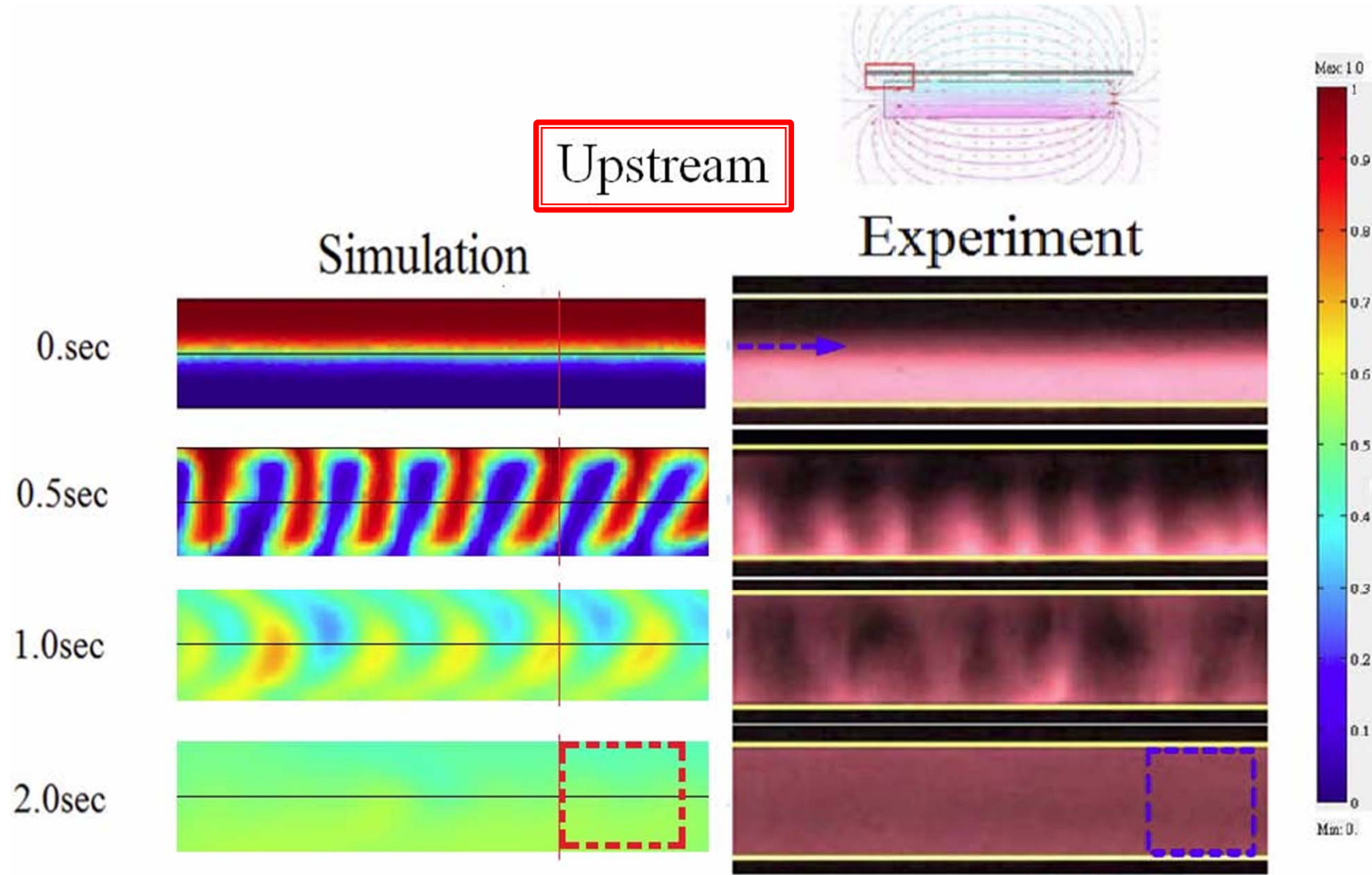
磁場強度： 60 Oe  
磁場頻率： 無  
流速： 0.22mm/s



# AC與DC結果之比對



(fitting type : exponential  $a * e^{bt}$ )



Upstream

Simulation

Experiment

0.0sec

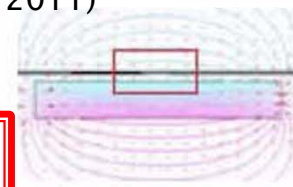
0.5sec

1.0sec

2.0sec

磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)

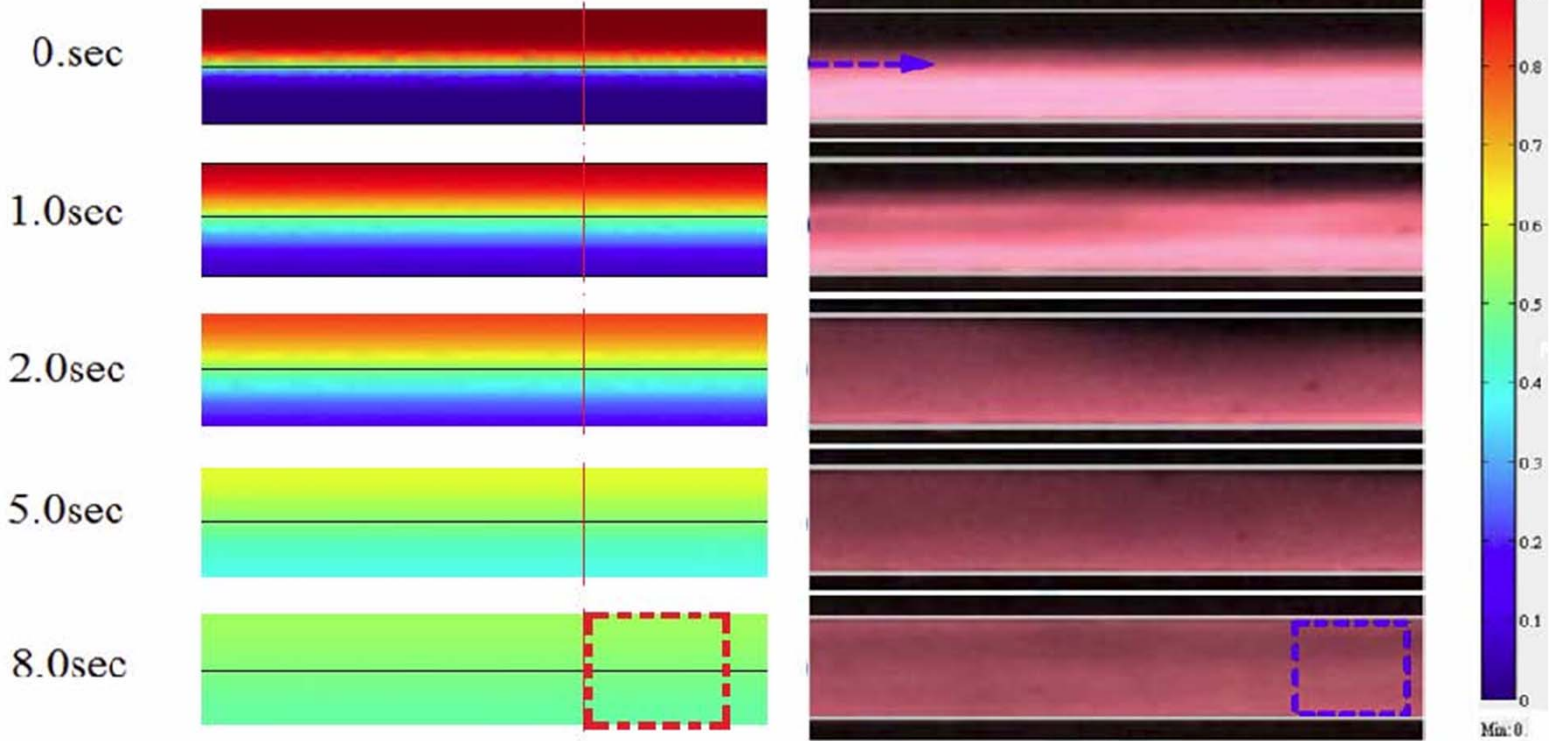
磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： AC 45Hz  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)



Midstream

Simulation

Experiment

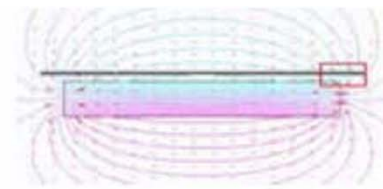


磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)

磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： AC 45Hz  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)

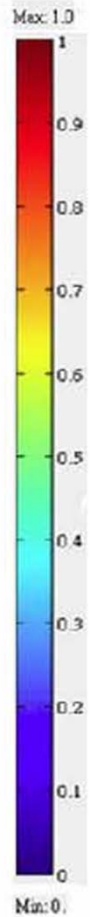
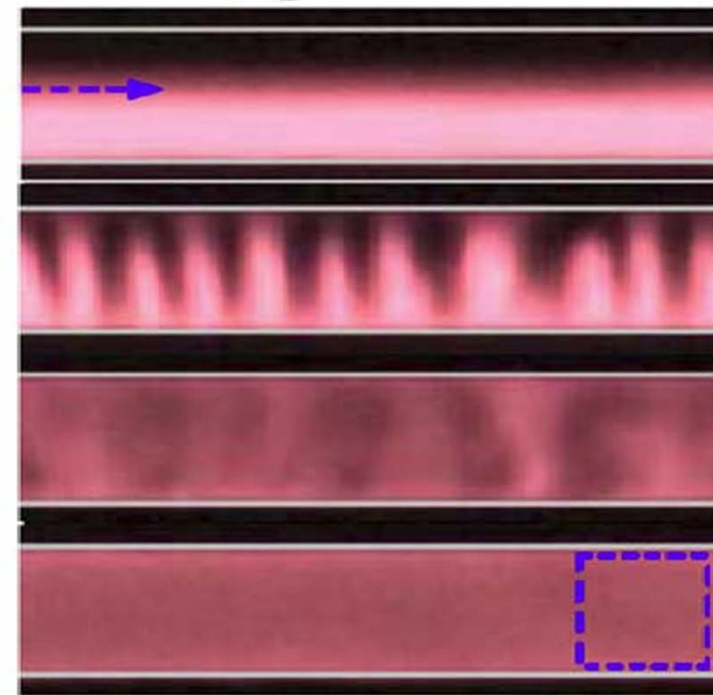
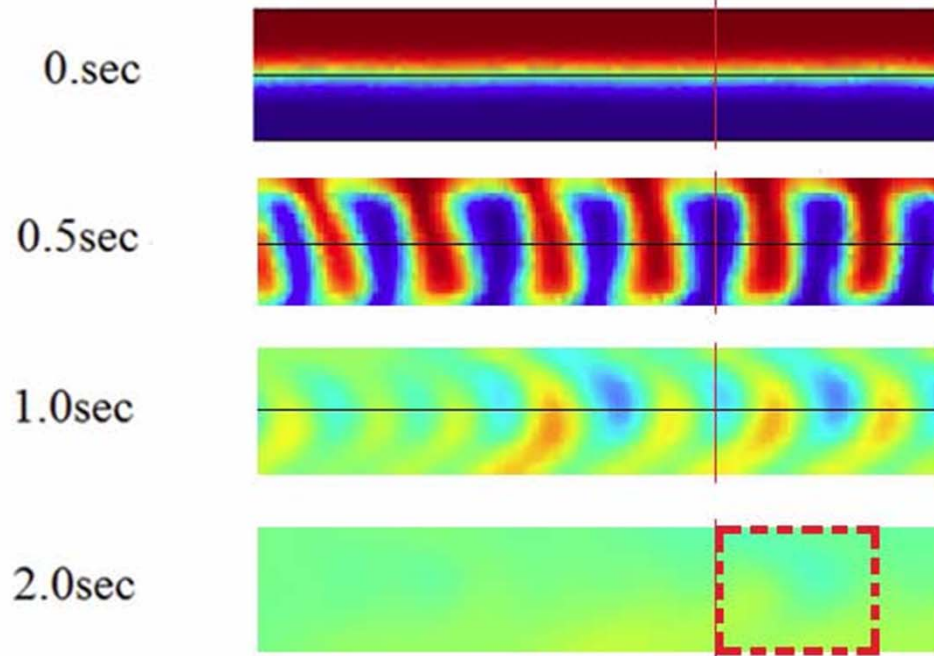


Downstream



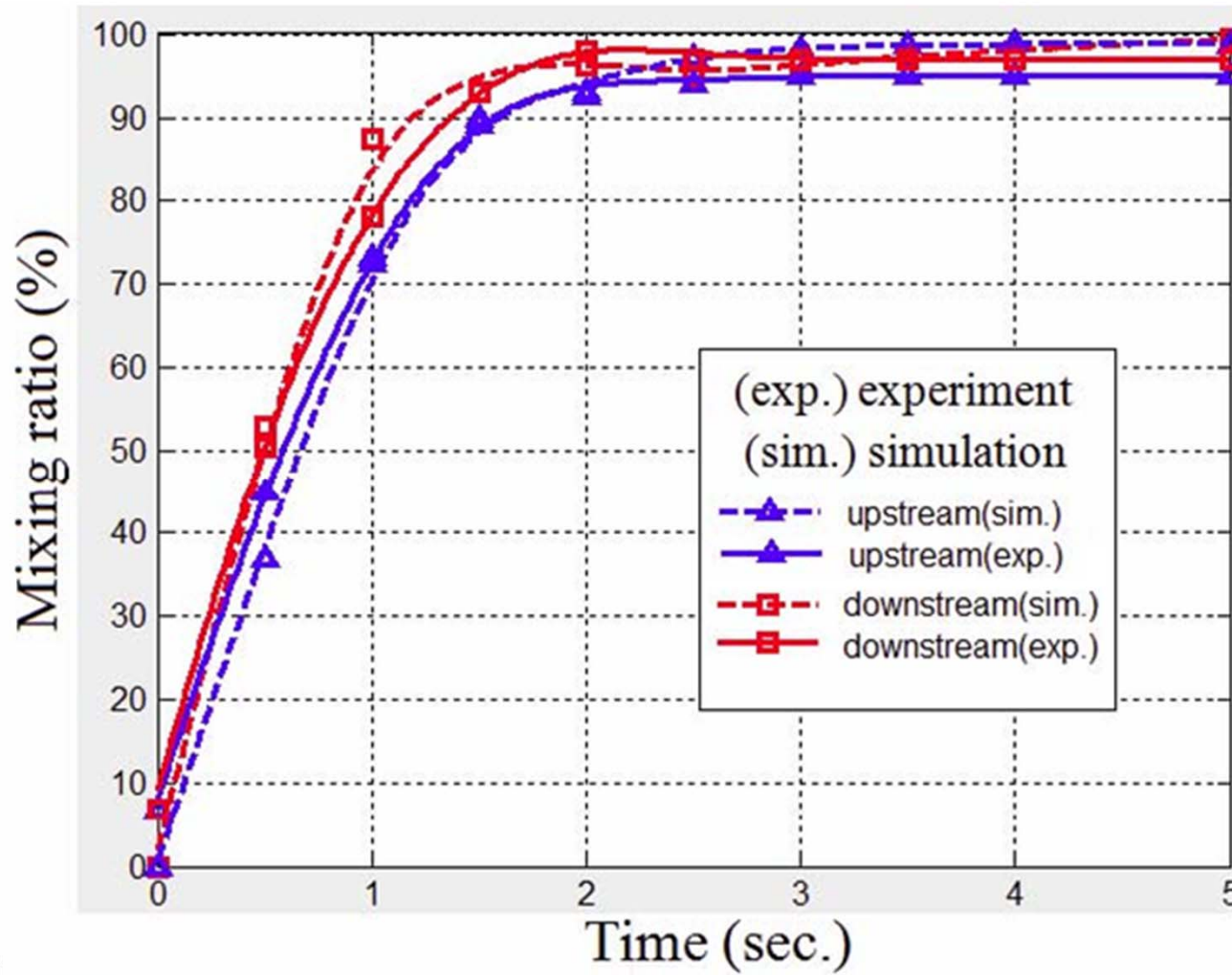
Simulation

Experiment



磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)

磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： AC 45Hz  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)





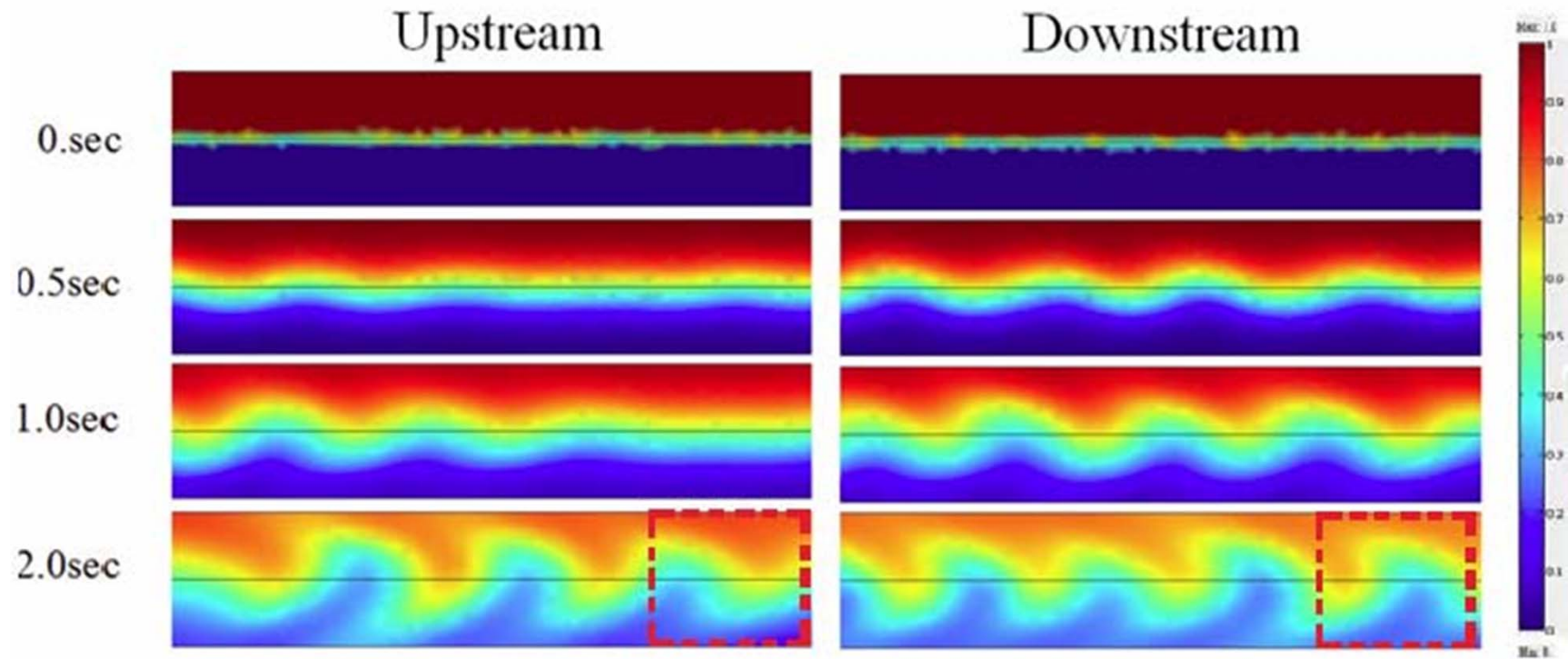
- ▶ 通過多個物理量之耦合(流體力學，電磁學，濃度擴散等)來建立簡化理論模型。
- ▶ 針對混合機制、混合時間跟效率驗證模擬能否吻合實驗之結果

## 研究主題

- ▶ 加以討論1. 磁場強度、2. 流體雷諾數之改變對混合效率造成的種種影響，為日後磁流體微混合器之實驗與開發提供參考。



# 1. 不同磁場強弱對混合效率之影響

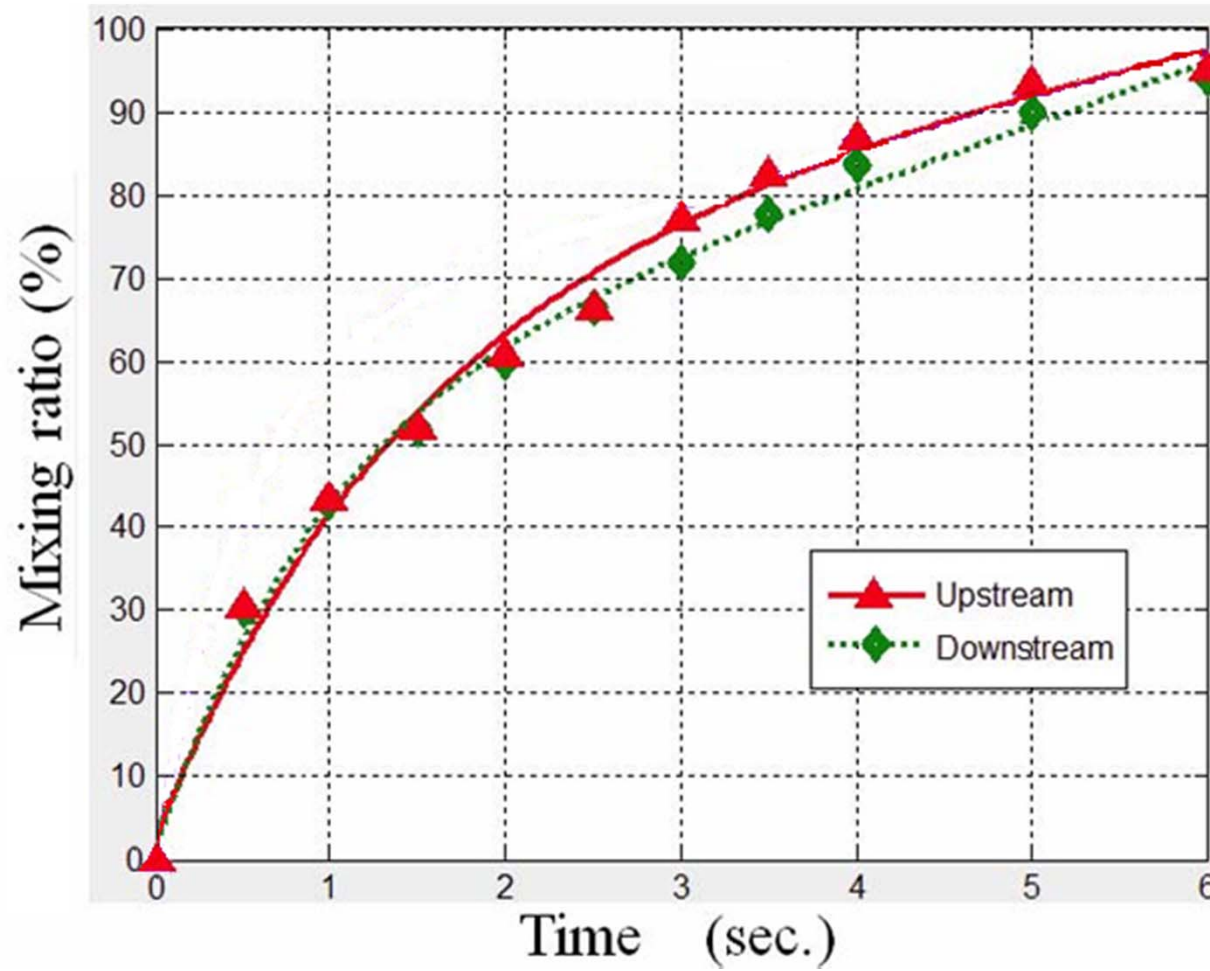


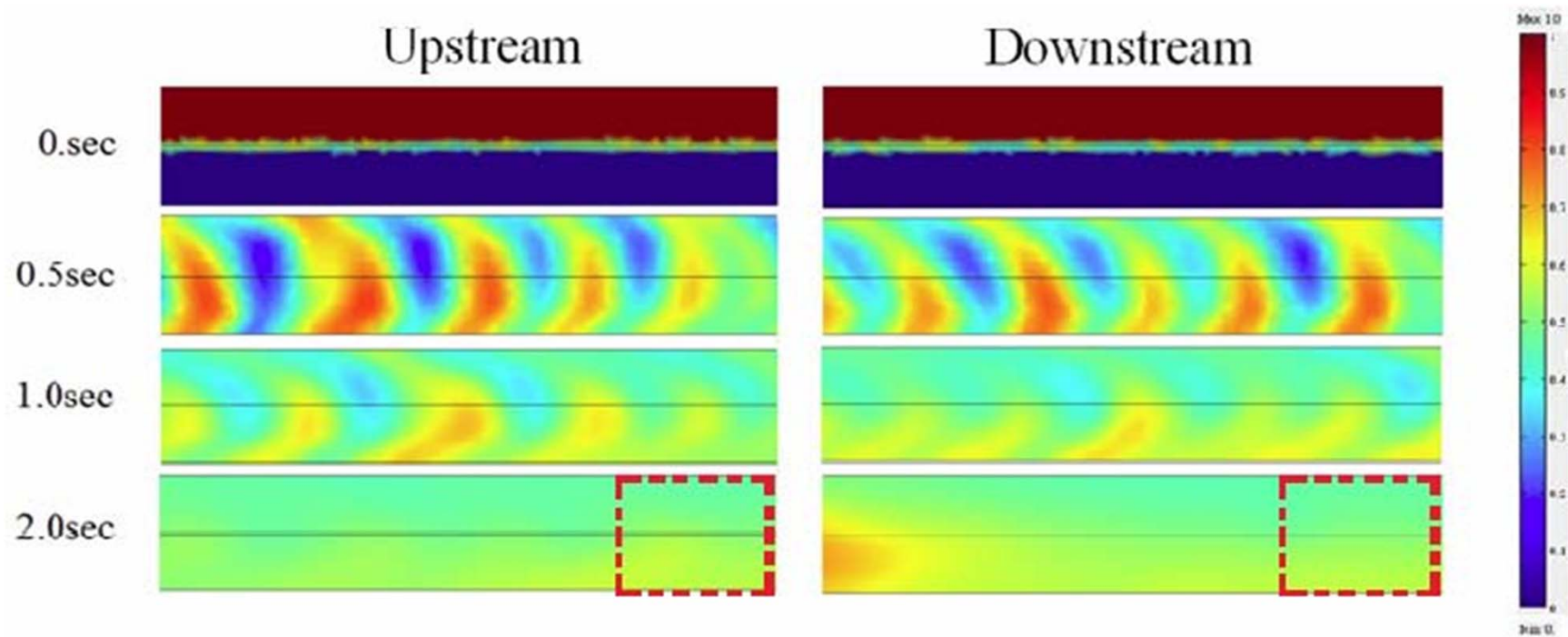
磁場強度： 30 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)





# 30 Oe

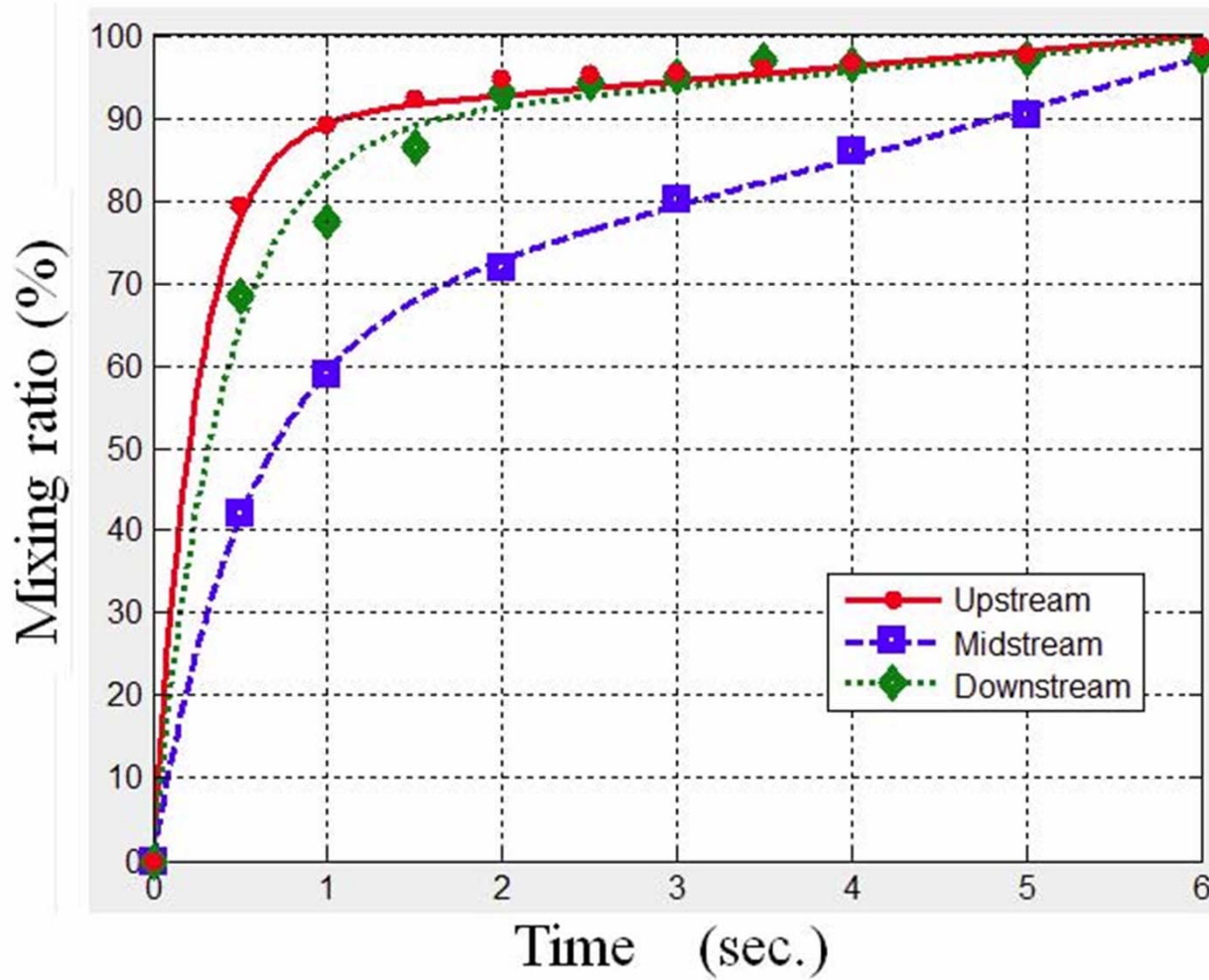




磁場強度： 90 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)

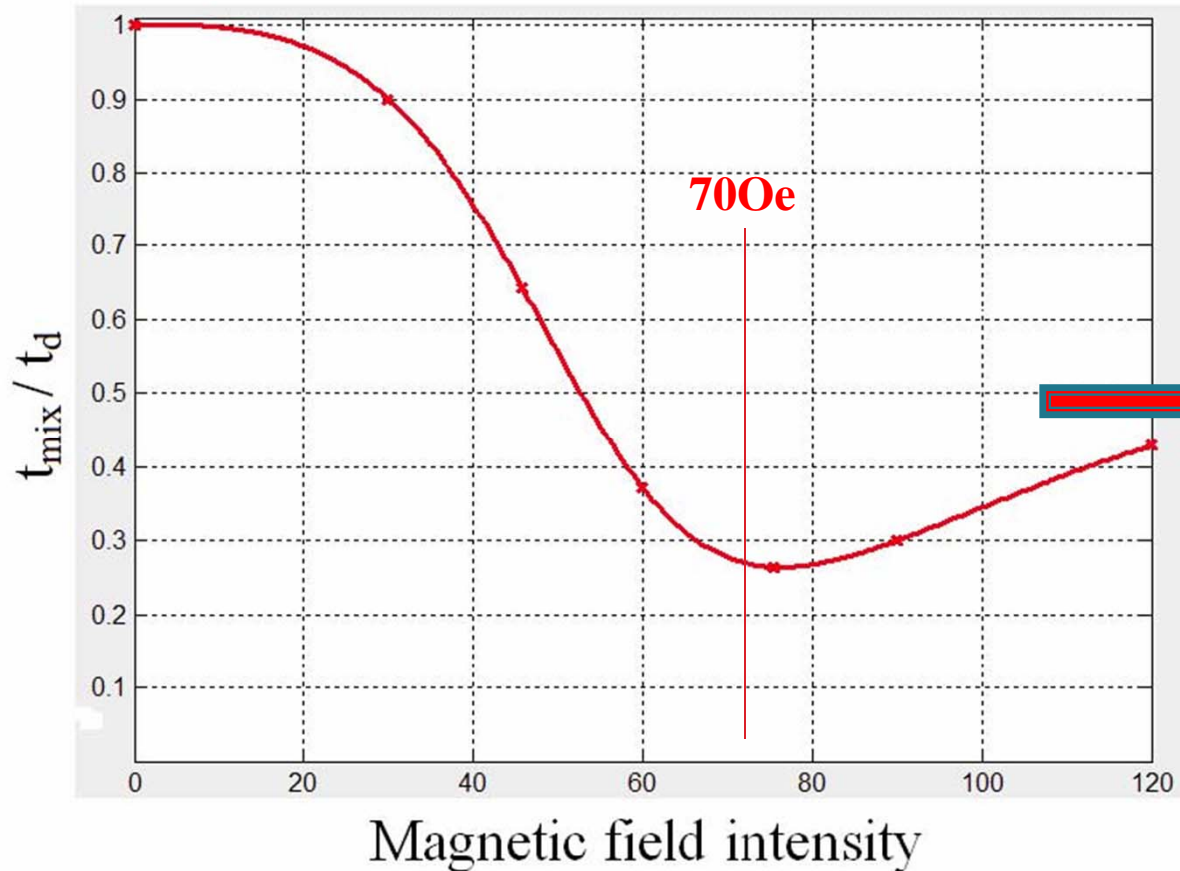


# 90 Oe





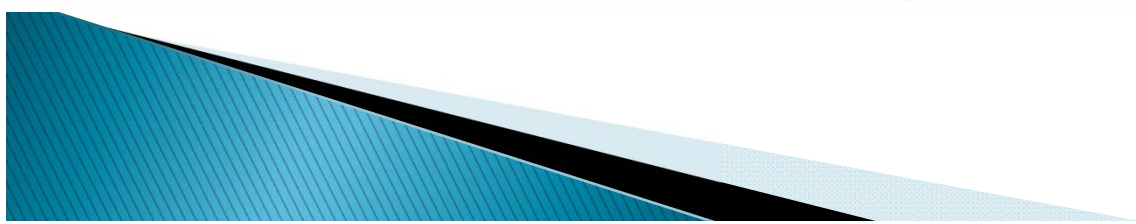
# 不同磁場強弱對混合效率之影響



$t_d$  為自由擴散所需時間  
 $L^2/D$

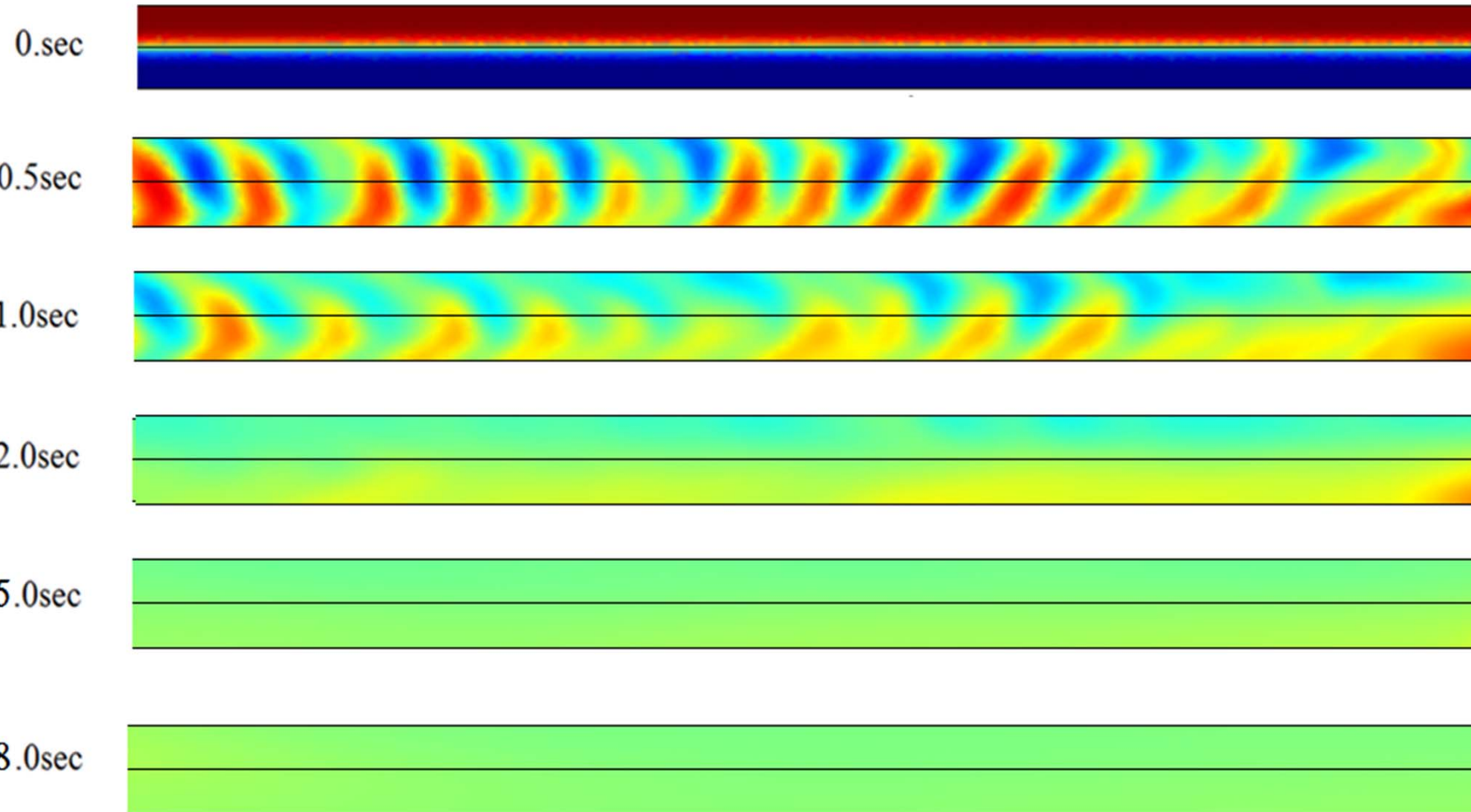
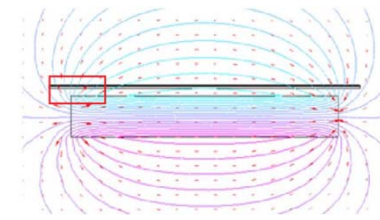
$t_{mix}$  為磁場作用下達到  
95%混合所需時間

磁流體被過大磁場  
吸引造成囤積





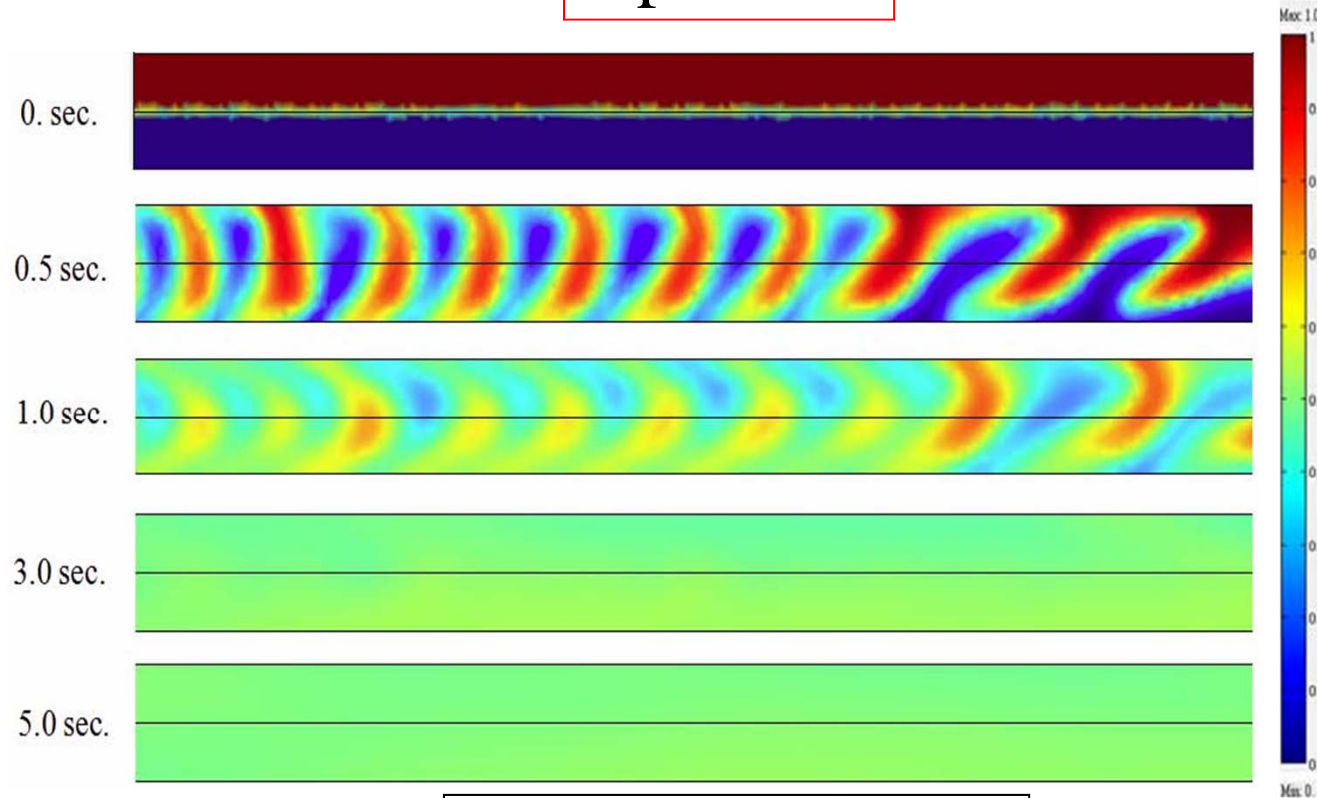
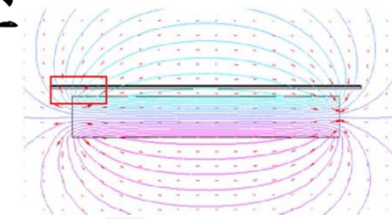
# 囤積情況 90 Oe Upstream





## 2. 不同雷諾數對混合效率之影響

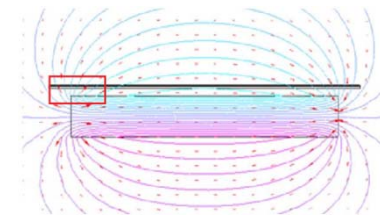
Upstream



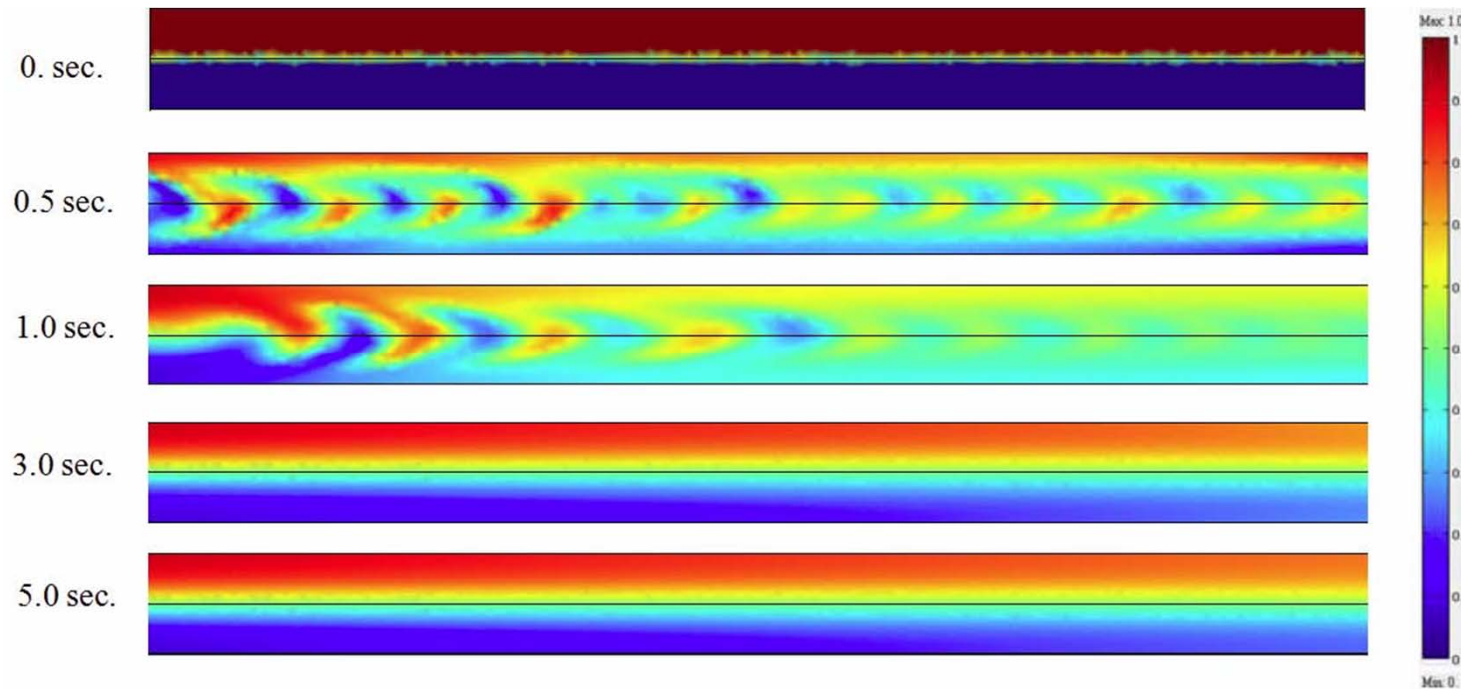
磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 0.22mm/s (Re=0.01)



# 不同雷諾數對混合效率之影響



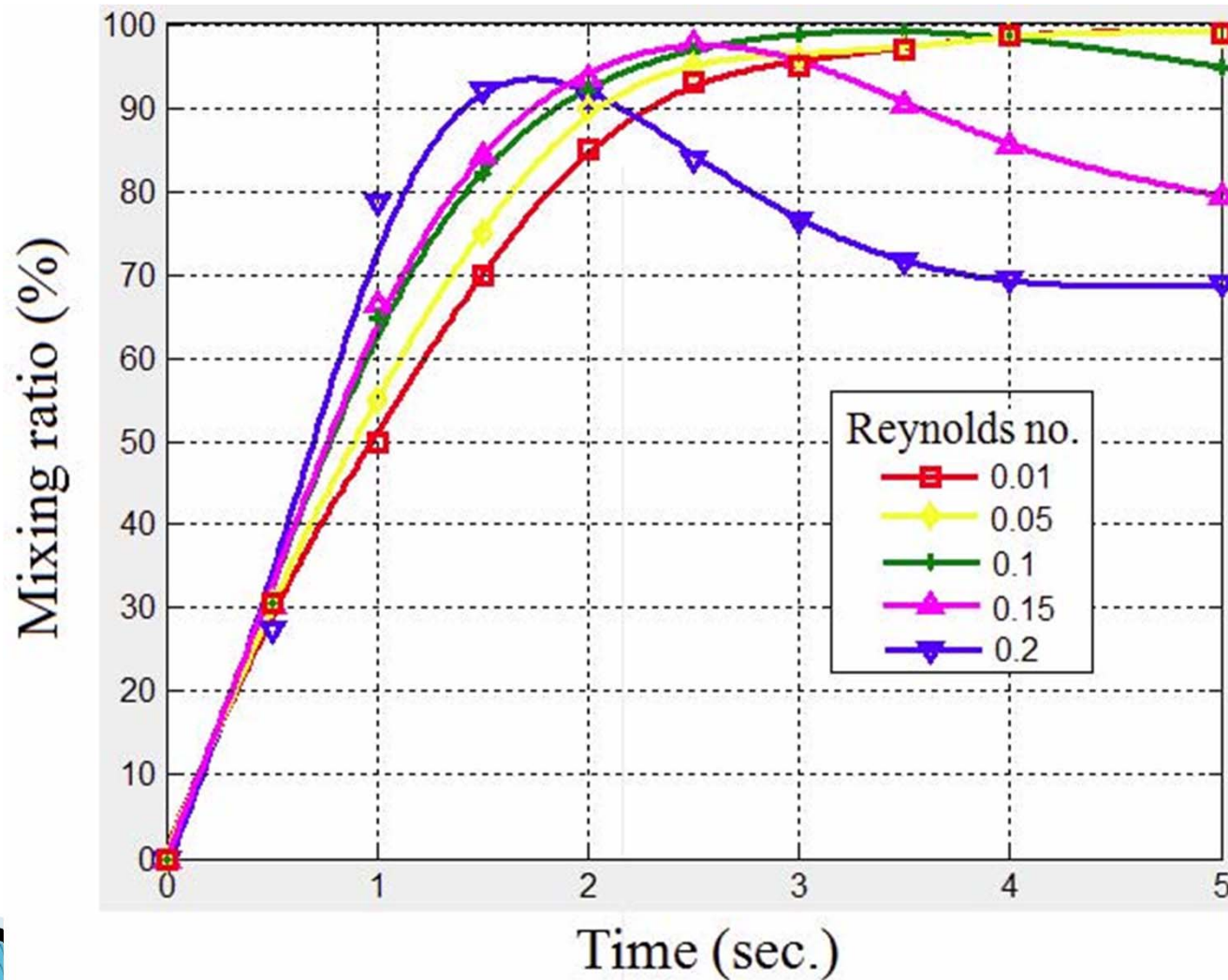
Upstream



磁場強度： 60 Oe  
電磁鐵： DC  
流速： 4mm/s (Re=0.2)



# 不同雷諾數下混合率與時間之關係圖







## 分析與結論

- ▶ 指狀化現象增加了磁流體與水的接觸面，上、下游區域皆可在兩秒內達到約 95%之混合效率，過程趨勢與實驗結果一致。
- ▶ 強度的增加，混合時間會相對增快，但趨勢一直維持到 700e 後會輕微減慢並開始有的相反情況。
- ▶ 藉由雷諾數上升，混合時間也會增快，但當雷諾數大於 0.1 時，主要原因是流速過大而把原本混合好的流體往後帶走。



~感謝聆聽~