

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051816

點水蜻蜓款款飛—以泡膜研究蜻蜓拍翅的流場
模式

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 林婕柔	指導老師： 馮愛蓮 金佳龍
---------------	---------------------

關鍵詞：泡膜、流場可視化、蜻蜓

摘要

對飛行的興趣源於宮崎駿電影「天空之城」，電影中之鼓翼機有著蜻蜓的翅膀，親自探討後，反而引起我對流場可視化方法的興趣，經研究決定以泡膜研究主軸，設計實驗使用自製泡泡水、簡易拍翼機及定速滑軌進行實驗，實驗後發現泡膜黏滯係數與空氣相似，所以可以以泡膜模擬空氣流動情形，然後使用泡膜研究蜻蜓懸停及飛行、滑行時翅膀拍動造成的流場變化，比對研究結果與煙流研究結果之差異。將拍翼機以不同方向置入泡膜進行實驗並錄影，再用 Image J 分析影片中泡膜顏色，用 Excel 計算泡膜厚度後，以 Matlab 得到厚度圖並計算流量，了解氣體流向。未來希望可以將此研究方法應用於更多流體力學研究。

壹、 研究動機

選擇物理專題後，最重要的就是決定自己要做的題目，再想清楚前，老師提供了幾組以前學長姊的專題作品說明書給我們參考，希望我們能從其中找到靈感，有一個就真的引起了我的注意，該項目研究的是昆蟲飛行時氣流的變化。我立刻聯想到了宮崎駿電影：天空之城中的一種飛行器，電影中稱之為鼓翼機。一個想法突然



圖片 1

出現在我的腦海裡。鼓翼機有著蜻蜓的翅膀，若用他們的研究方法以泡膜研究蜻蜓飛行的原理，我或許可以真的將宮崎駿的鼓翼機製作出來，經過研究後，反而對流場可視化的方法產生興趣，因此，我決定以用泡膜研究蜻蜓為題，由小地方開始研究，希望未來可以藉由此研究，發明更完整的流場可視化方法。

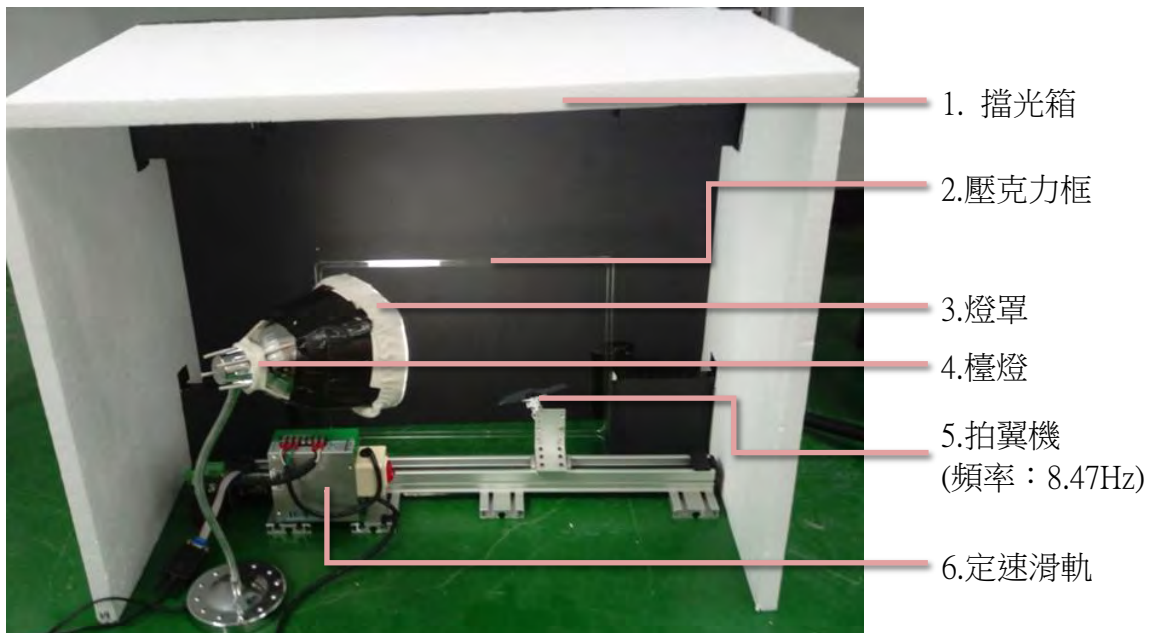
貳、 研究目的

因想研究流場可視化，設計一套薄膜流場觀測法。利用蜻蜓懸停拍翅的方式進行研究，討論利用此觀測法，下列之物理關係。

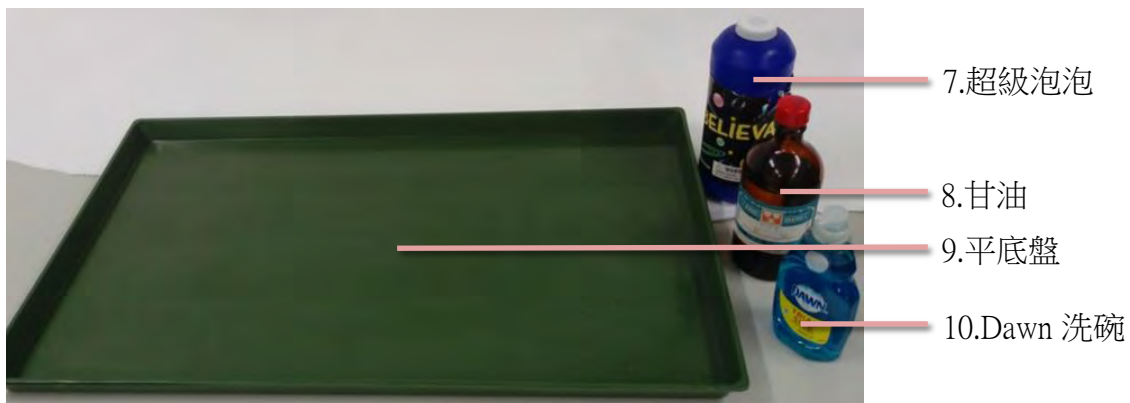
- 一、 計算泡膜之黏滯係數
- 二、 計算蜻蜓懸停及滑行翅膀拍動時的泡膜厚度變化
- 三、 研究蜻蜓懸停及滑行翅膀拍動時的泡膜流速
- 四、 探討蜻蜓懸停及滑行翅膀拍動時升力與渦流之關係

參、 研究設備及器材

一、 器材擺放位置圖



圖片 2



圖片 3

二、 其他器材

1. 相機(Sony RX100V)
2. 筆記型電腦
3. MatLab
4. 筷子(直徑 0.5cm)(圓柱體)

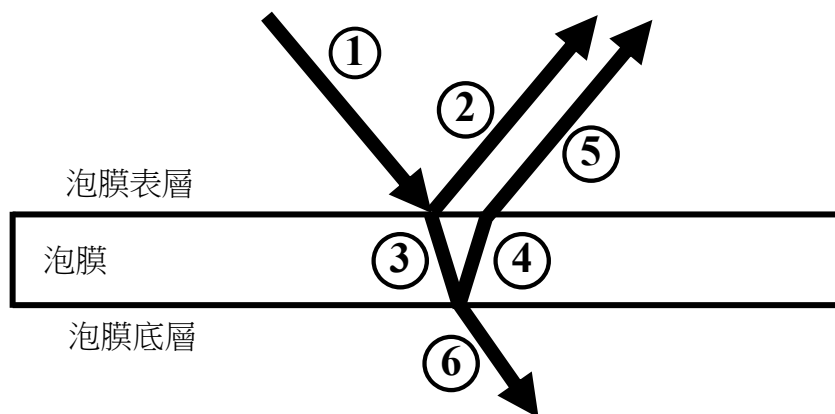
肆、 研究過程或方法

一、 實驗原理

(一) 自製肥皂水與空氣黏滯係數相近

20°C 空氣的動黏係數為 $1.52 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ ，與自製肥皂水 $2.33 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 相近，且有明顯色彩擾動，故可以使用肥皂水作為觀測流場改變的工具。

(二) 薄膜干涉



圖片 4

因泡膜有厚度，所以斜射入泡膜的光走三個途徑，我們看到的泡膜顏色則為反射光 1 和反射光 2 產生之建設性干涉的結果

1. ①→②：反射波 1

光在泡膜表面反射，造成波反向(入射波與反射波相位相反，也就是一個 180°的相位差)

2. ①→③→⑥：

光經過泡膜，並在泡膜表層與底層各發生一次折射

3. ①→③→④→⑤：反射波 2

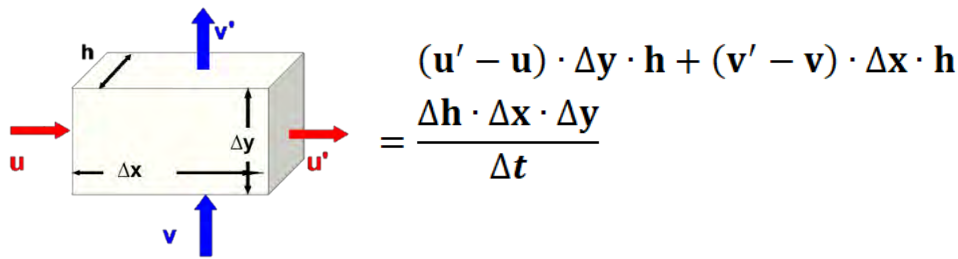
光在經過泡膜表面時發生折射，並在底層反射，回到表層又折射，得到此反射波與介面共發生 3 次作用，但因介質不改變相位，所以唯一影響相位之因素為泡膜厚度。由此可知當泡膜厚度為 d ，入射角為 60° ，折射率經實驗得知為 1.3 時，光程差為 $2d \times 0.96$ ，相位改變了 $\frac{2d \times 0.96}{\lambda} \times 2\pi$

4. 由上述得知，反射波 1 有一個 $180^\circ = \pi$ 的相位差，反射波 2 的相位差則為由光程差造成的 $\frac{2d \times 0.96}{\lambda} \times 2\pi$ ，總共的相位差為 $\frac{2d \times 0.96}{\lambda} \times 2\pi - \pi$ 。建設性干涉的條件

為相位差 = $2(m - 1)\pi$ ，也就是 $\frac{2d \times 0.96}{\lambda} \times 2\pi - \pi = 2(m - 1)\pi$ ，得出 $d =$

$$(m - \frac{1}{2})\lambda / 2 \times 0.96, \text{ 大約等於 } (m - \frac{1}{2})\lambda / 2$$

(三) 利用質量守恆原理討論厚度與速度的關係



圖片 5

二、前置步驟

(一) 定速滑軌

1. 使用 CSIM SLIM9-340E2 型定速滑軌
2. 輸出指令

(二) 泡膜

1. 混和比例：

洗碗精：超級泡泡水：甘油：蜂蜜 = 1：1：1：1/50

2. 混和成分說明：

(1) DAWN 洗碗精：

可起泡，卻太黏稠，不持久，且洗碗精為藍色，彩度不足。

(2) 超級泡泡水：

提供彩度，缺點是會稀釋清潔劑，使泡膜容易破裂。

(3) 甘油：

稀釋洗碗精並使其維持一定黏度。

(4) 蜂蜜：

冬天時，甘油不易和泡泡水混和，故加入蜂蜜，維持穩定。

(三) 拍翼機

1. 組裝骨架



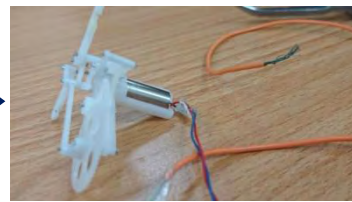
圖片 6

2. 裝上齒輪



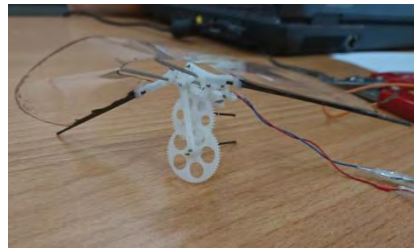
圖片 7

3. 裝上馬達



圖片 8

4. 黏上塑膠片翅膀

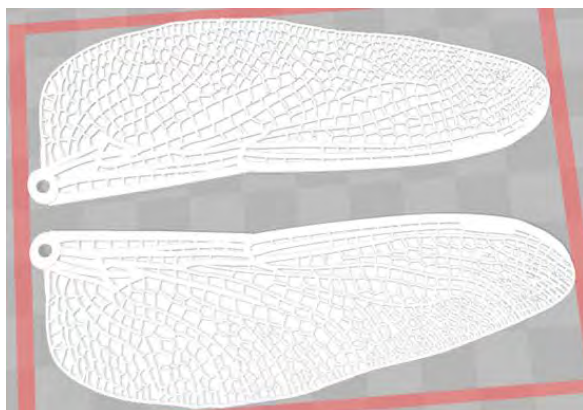


圖片 9

(四) 光源

1 顆 E14 晝光色省電螺旋燈泡裝於檯燈上，燈罩外加反光紙板圍成錐形，最後罩上白色透光布。

(五) 翅膀



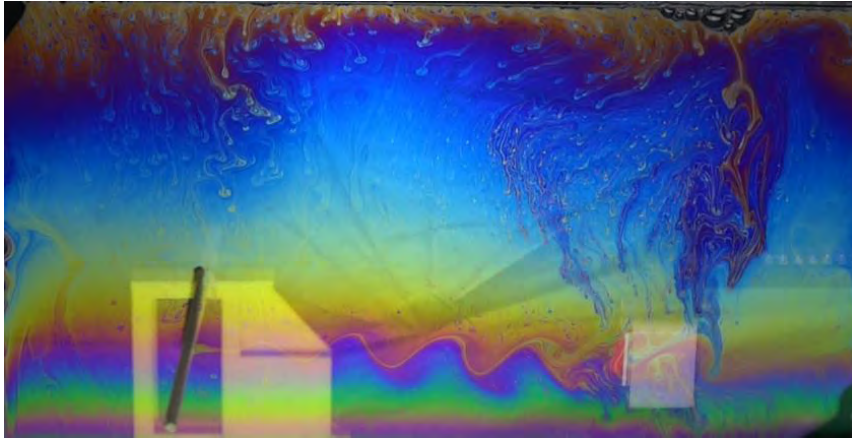
圖片 10

1. 軟翅：塑膠膜上剪下
2. 硬翅：從裝蔬果之塑膠盒找光滑面剪下
3. 翅脈翅:3D 列印

三、 實驗步驟

(一) 測量黏滯係數

1. 固定筷子(圓柱體)
2. 以不同速度拖曳筷子(圓柱體)，劃過泡膜



圖片 11

3. 以攝影機記錄，同時觀察渦流
4. 分析:

(1) 將轉速換算成 SI 制速度

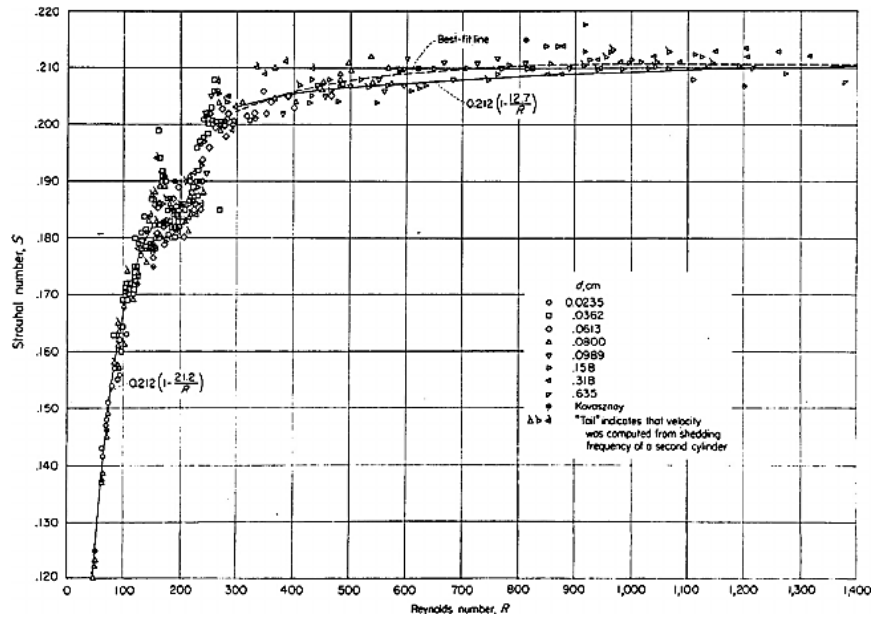
在滑軌上量出 30cm 並標記，以同轉速拖曳，並記錄跑過 30cm 所需時間，重複 8 次，平均。再測下一個轉速，並重複以上動作。轉速 100 與 200 無法產生渦流，因此不計算其速度。

圖表 1

轉速(rpm)	速度(m/s)	速度理論值(m/s)
100	無紀錄	0.2400
200	無紀錄	0.4800
250	0.2069	0.6000
300	0.2326	0.7200
350	0.2804	0.8400
400	0.3000	0.9600

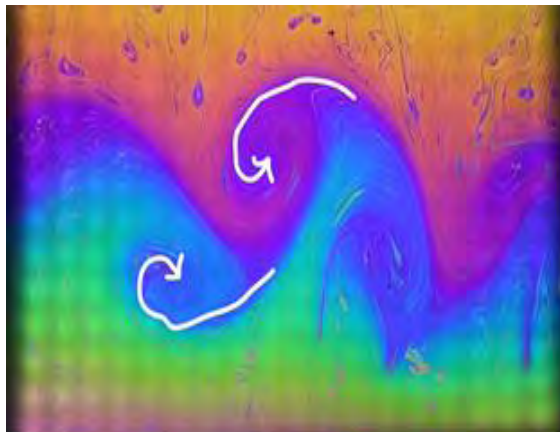
(2) 參考 St-Re 圖

圖表 2

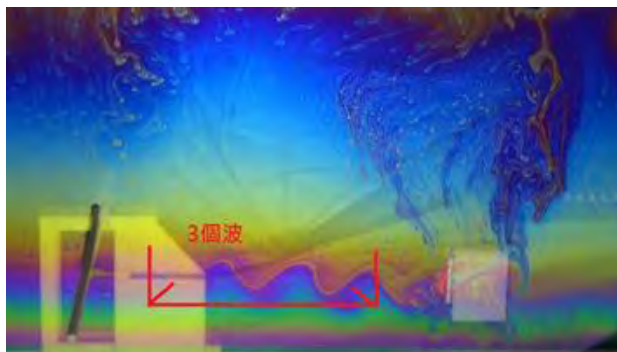


➡ 由圖可知，當 $25 < Re < 200$ 時，St-Re 數據可視為線性關係

(3) 測量卡門渦街(Carman vortex street)波長



圖片 12



圖片 13

➡ 求平均波長

(4) 帶入公式 $St = \frac{F \cdot d_c}{U}$

(St : *Strouhal Number* ; Re : *Reynolds Number* ; F : 渦流釋放頻率 ;
 d_c : 圓柱直徑 ; U : 自由流的速度) , 可得史綽荷數

(5) 設雷諾數數值介於 25~200 間 , 將史綽荷數代入 Roshko 經驗關係式 $St =$

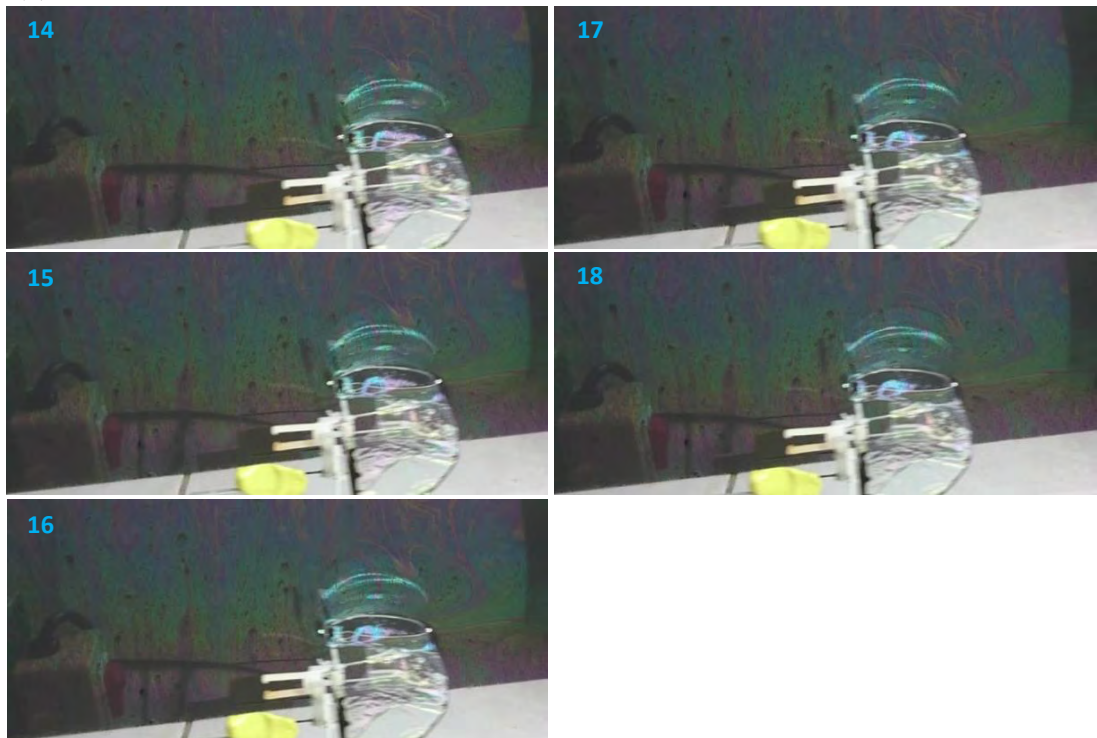
$$\frac{F d_c}{U} = 0.212 - \frac{4.5}{Re} , 25 < Re < 200 , \text{便得出雷諾數}$$

(6) 將史綽荷數與雷諾數代入公式 $Re = \frac{U d_c}{\nu}$, ν 為動態黏滯係數 , 即取得泡膜的動態黏滯係數

(二) 研究翅膀拍動時的流場模式

1. 定速滑行拍翅

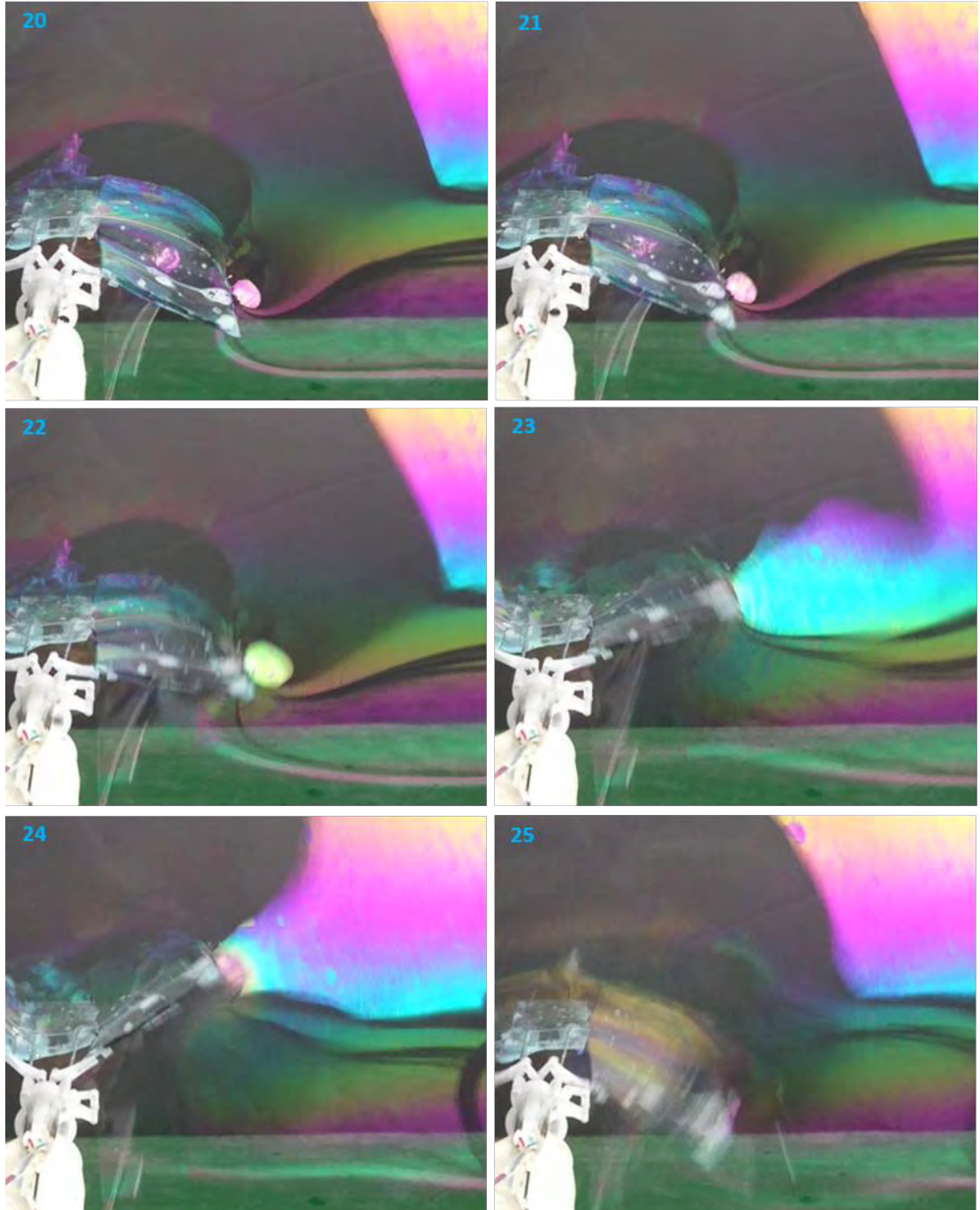
- (1) 設定定速滑軌 , 輸入指令 , 設定轉速
- (2) 將拍翼機裝上定速滑軌
- (3) 將拍翼機一邊翅膀穿過泡膜至翅膀露出一半
- (4) 啟動拍翼機和定速滑軌
- (5) 觀察渦流 , 以相機紀錄



圖片 14-19

2. 懸停拍翅(正)

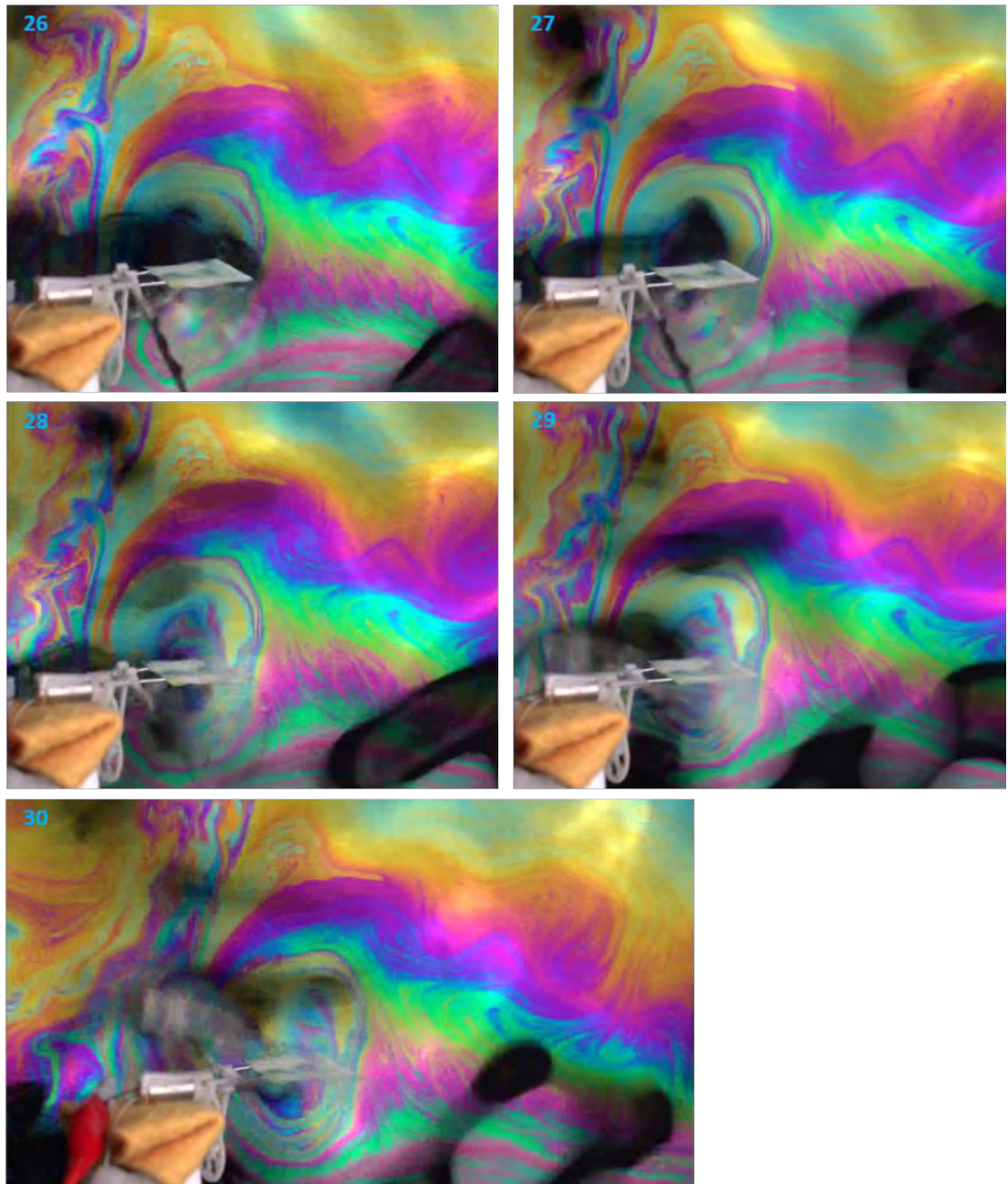
- (1) 將拍翼機由頭部水平穿過泡膜至翅膀露出一半
- (2) 固定拍翼機
- (3) 啟動拍翼機
- (4) 觀察渦流
- (5) 以相機紀錄



圖片 20-25

3. 側向拍翅

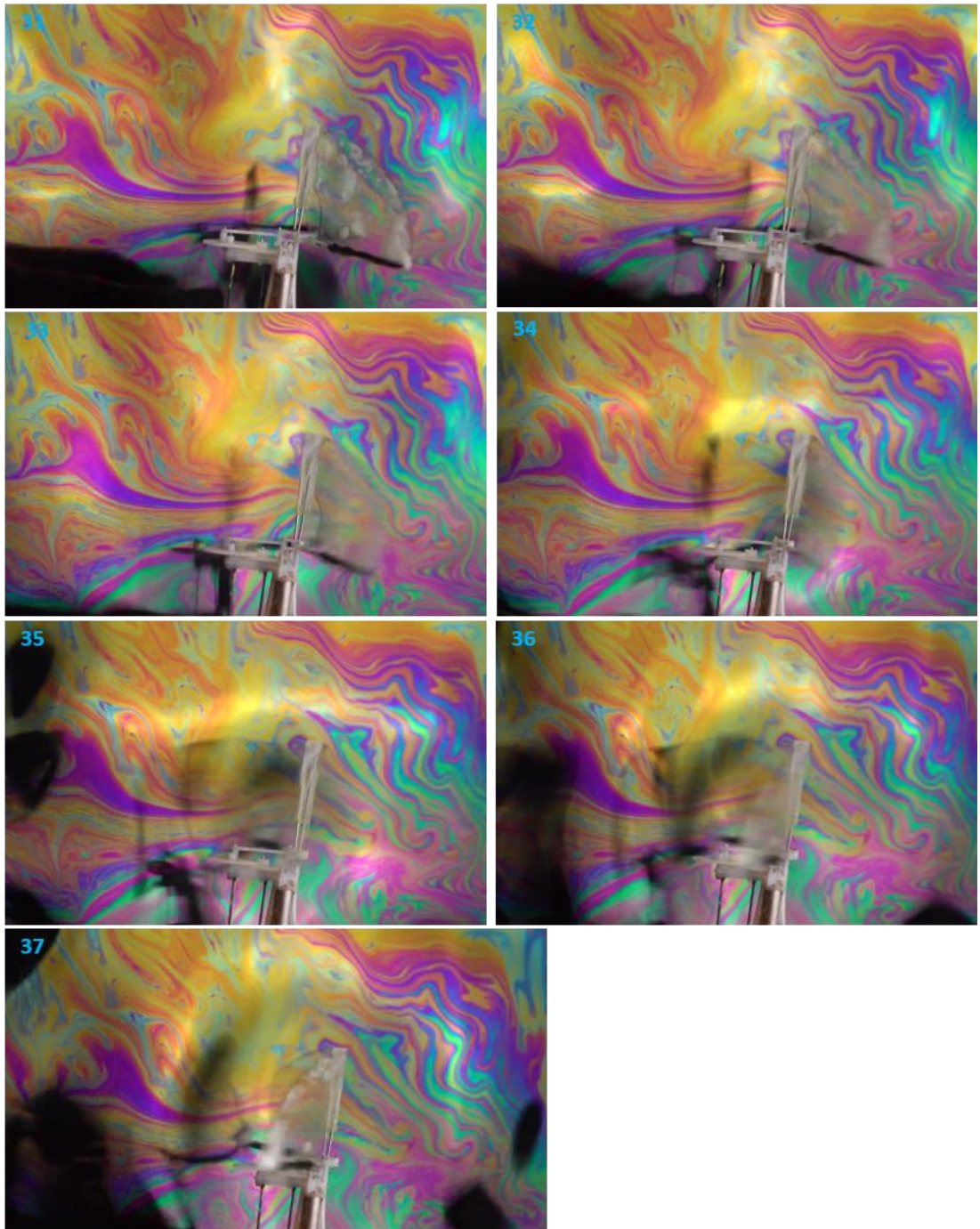
- (1) 將拍翼機一邊翅膀水平穿過泡膜至翅膀露出一半
- (2) 固定拍翼機
- (3) 啟動拍翼機
- (4) 觀察渦流
- (5) 以相機紀錄



圖片 26-30

4. 直立拍翅

- (1) 將拍翼機一邊翅膀水平穿過泡膜至翅膀露出一半
- (2) 固定拍翼機
- (3) 啟動拍翼機
- (4) 觀察渦流
- (5) 以相機紀錄



圖片 31-37

四、 分析方法

(一) 剪輯實驗影片

1. 將影片中每張照片都分別存取下來
2. 運用 “ XnView ” 將照片精確剪下所需的部分 (每組照片的每張照片被剪下的部分需完全相同)
3. 使用 “ Image J ” 軟體將剪下之照片的 RGB 分離，個別存檔

(二) 進行厚度比對

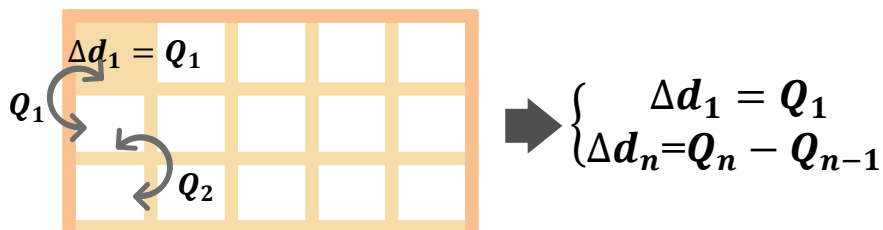
1. 將泡膜厚度比對表的泡膜部分剪下，進行 RGB 分離
2. 將泡膜 RGB 數值表加上厚度匯出成 Excel 圖表
3. 把照片之 RGB 數值匯入 Excel 中，與泡膜厚度圖放在一起，形成四個工作表
4. 添加第五個工作表，寫入程式，在工作表加上驅動指令按鈕
5. 按下按鈕即開始分析
6. 匯入不同組照片時需更改參數

(三) 製作厚度圖、等高線圖

1. 利用 “ Matlab ” 將厚度表繪製成厚度圖

(四) 計算泡泡水流動速度

1. 使用 Matlab 將前後兩張照片每個像素位置之後度數值相減
2. 假設泡泡水無水平流動，只向下流
3. 因每個像素格面積相等，假設每個像素體積只與厚度相關
4. 計算其流量
5. 由流量計算流速



伍、 研究結果

一、 動態黏滯係數

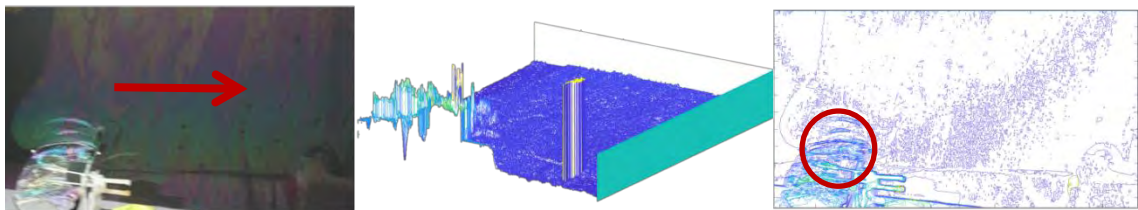
圖表 3

	轉速(rpm)	速度(m/s)	St	Re	$\nu(\text{m}^2/\text{s})$
1.	250	0.2069	0.115	46.39175	2.23×10^{-5}
2.	300	0.2326	0.120	48.91304	2.38×10^{-5}
3.	350	0.2804	0.140	62.50000	2.24×10^{-5}
4.	400	0.3000	0.137	60.00000	2.50×10^{-5}

平均動黏滯係數為 $2.33 \times 10^{-5} (\text{m}^2/\text{s})$ ，其與 20°C 空氣動態黏滯係數 $1.52 \times 10^{-5} (\text{m}^2/\text{s})$ 相近，因此我們可以使用泡膜模擬空氣的流動

二、 定速滑行

紅箭頭為拍翼機前進方向，可觀察到氣體受翼前緣影響，產生流動，並可由厚度圖觀察到流動處厚度遠高於其他位置，由等高線圖可看到翼前緣上的泡膜流動的情形及造成的厚度差異。

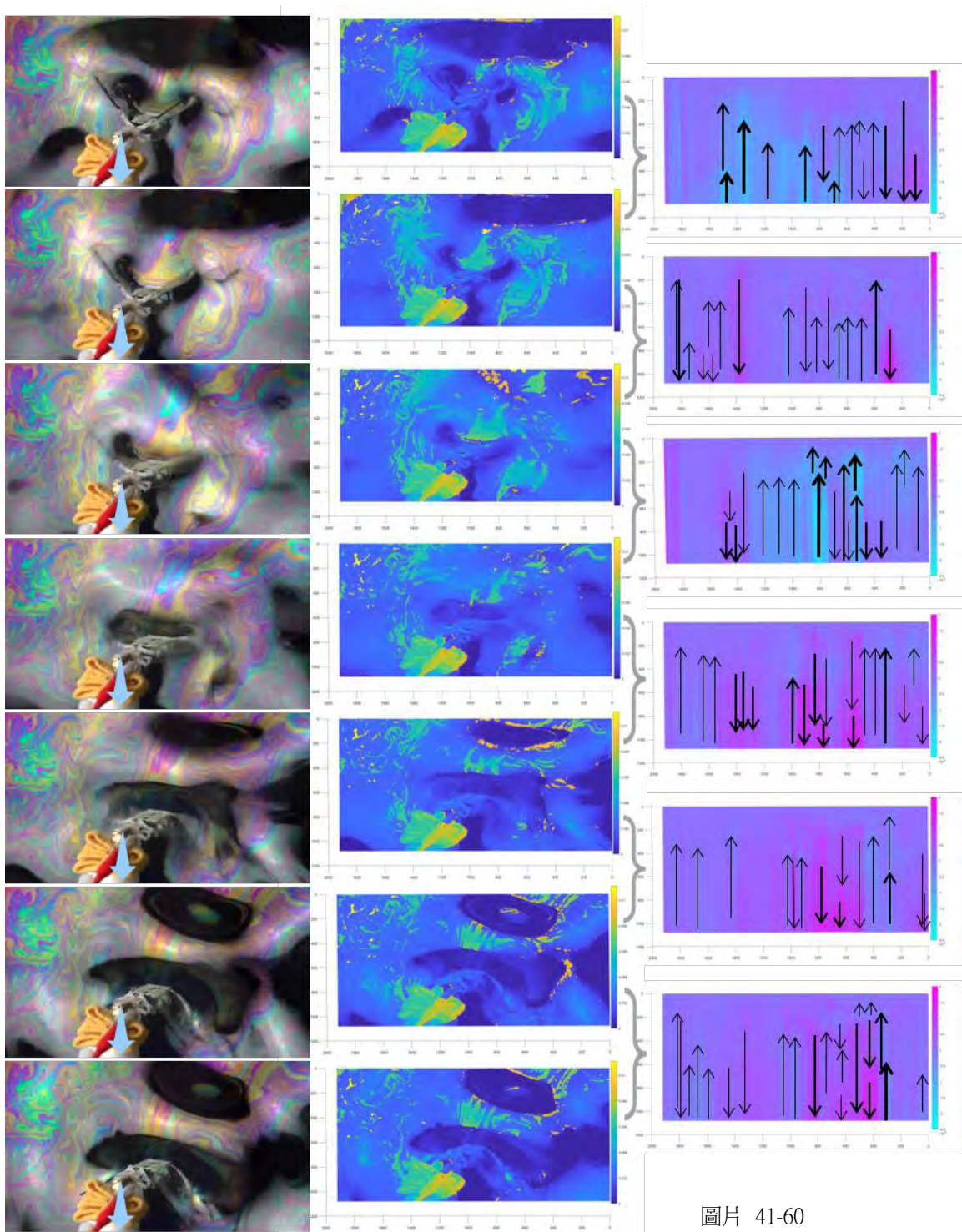


圖片 38-40

三、 懸停拍翅

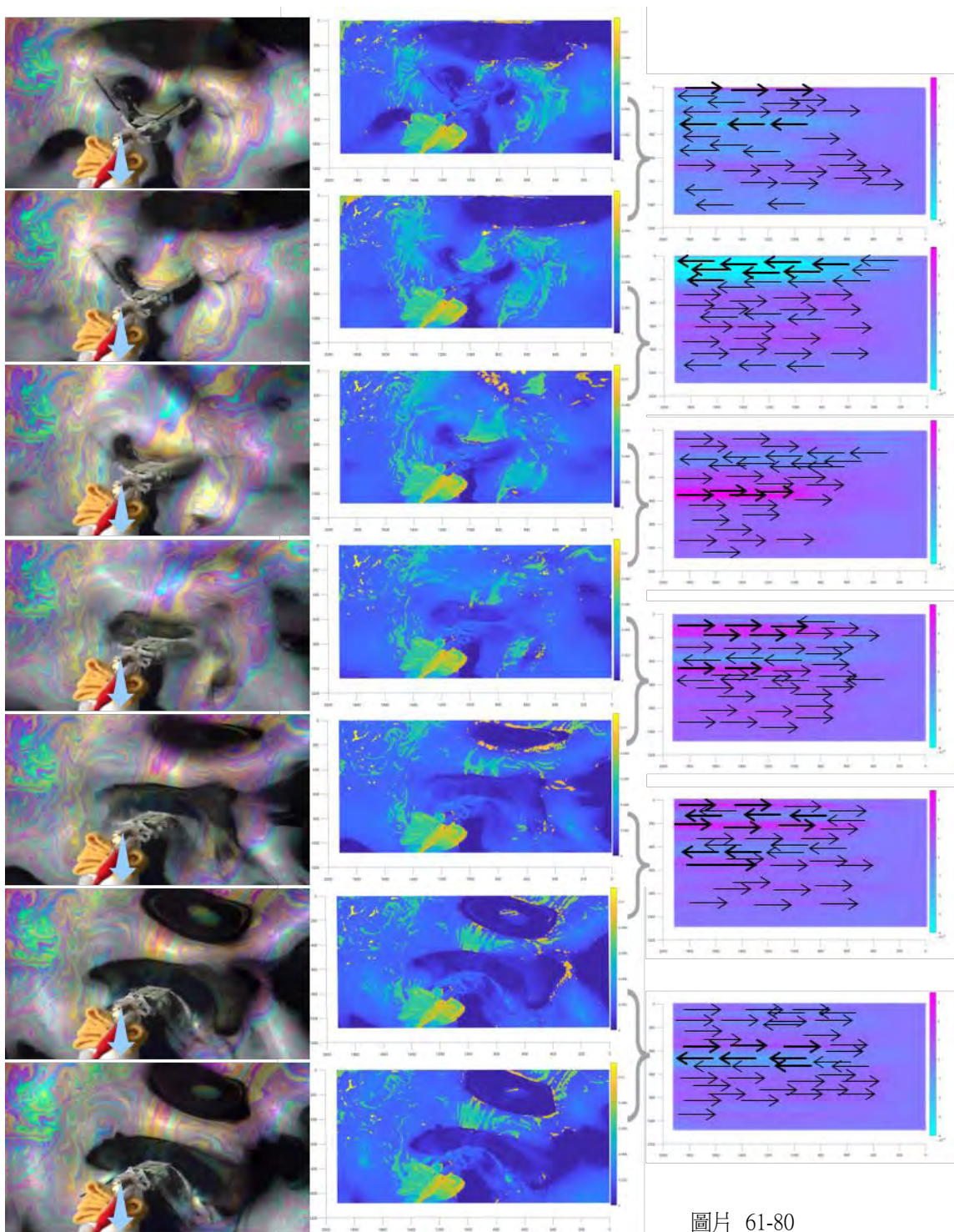
由上面三張圖可看到泡泡水往兩翼中間流，往下拍時，翼側出現明顯渦流，但在厚度圖中皆難以辨認，可能原因為計算時的誤差，流量圖中可看到渦流造成的流量改變。

(左：實驗原圖 / 中：厚度圖 cm^3 / 右：流量圖(向下為正)(cm^3/sec)，藍色箭頭代表拍動方向)



圖片 41-60

(左：實驗原圖 / 中：厚度圖 cm^3 / 右：流量圖(向右為正)(cm^3/sec)，藍色箭頭代表拍動方向)

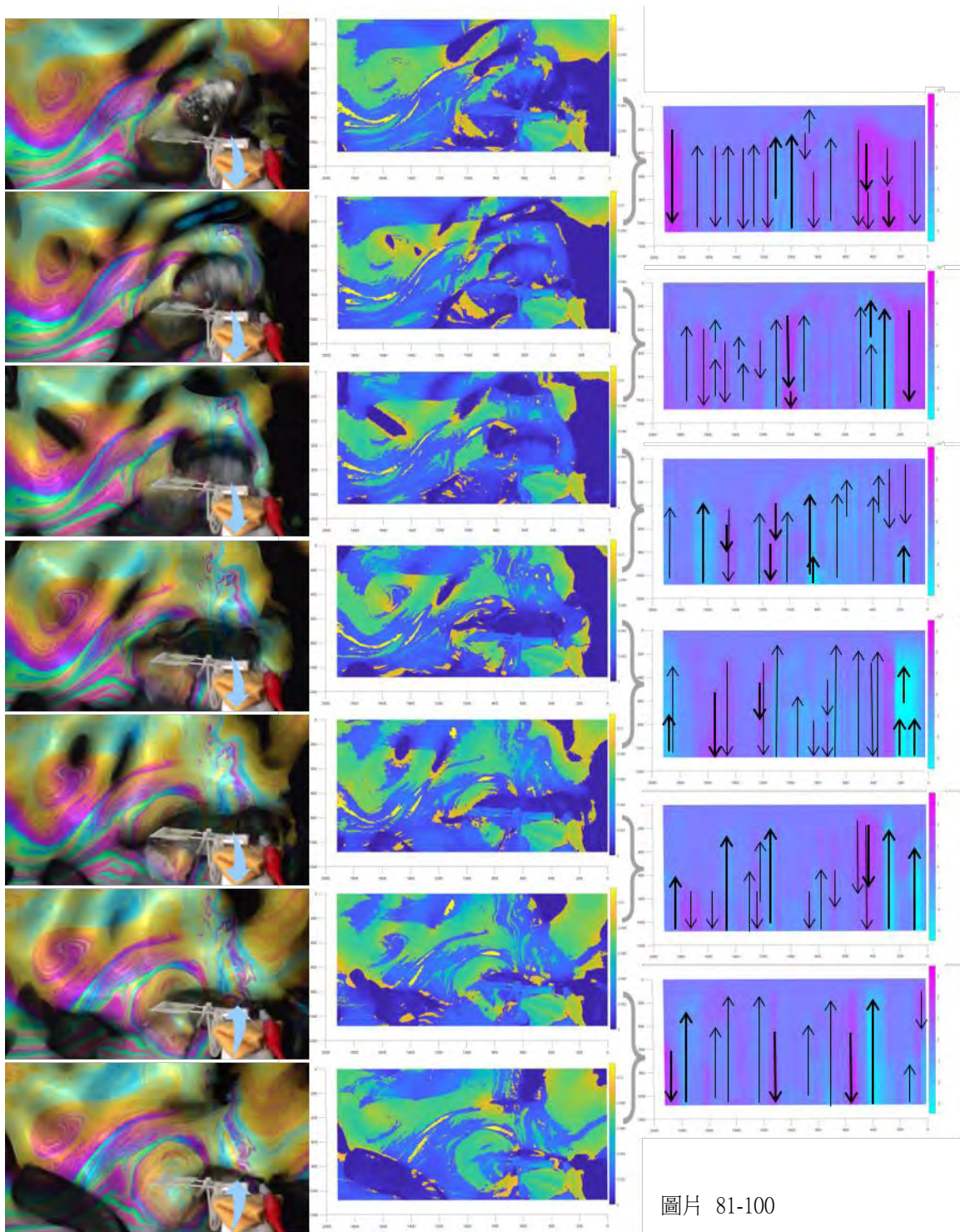


圖片 61-80

四、側向拍翅

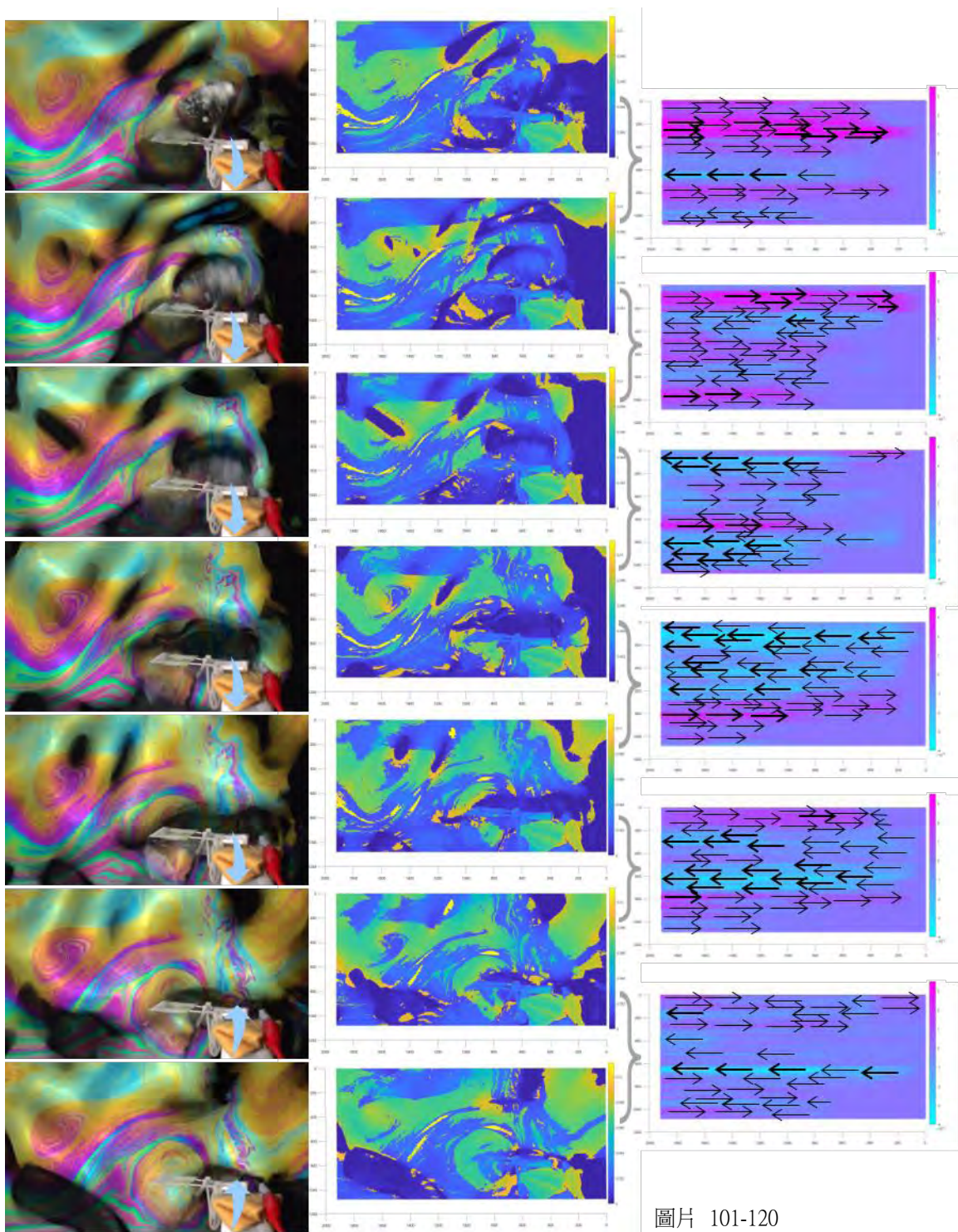
由上面三張圖可看到拍翼機正往下拍，渦流出現在翅翼兩側，翼前緣渦流較小，翅膀往上拍時泡泡水少量被翼前緣被往上帶動，由流量圖中也可看到這點，並看到渦流造成的流量改變。

(左：實驗原圖 / 中：厚度圖 cm^3 / 右：流量圖(向下為正)(cm^3/sec)，藍色箭頭代表拍動方向)



圖片 81-100

(左：實驗原圖 / 中：厚度圖 cm^3 / 右：流量圖(向右為正)(cm^3/sec)，藍色箭頭代表拍動方向



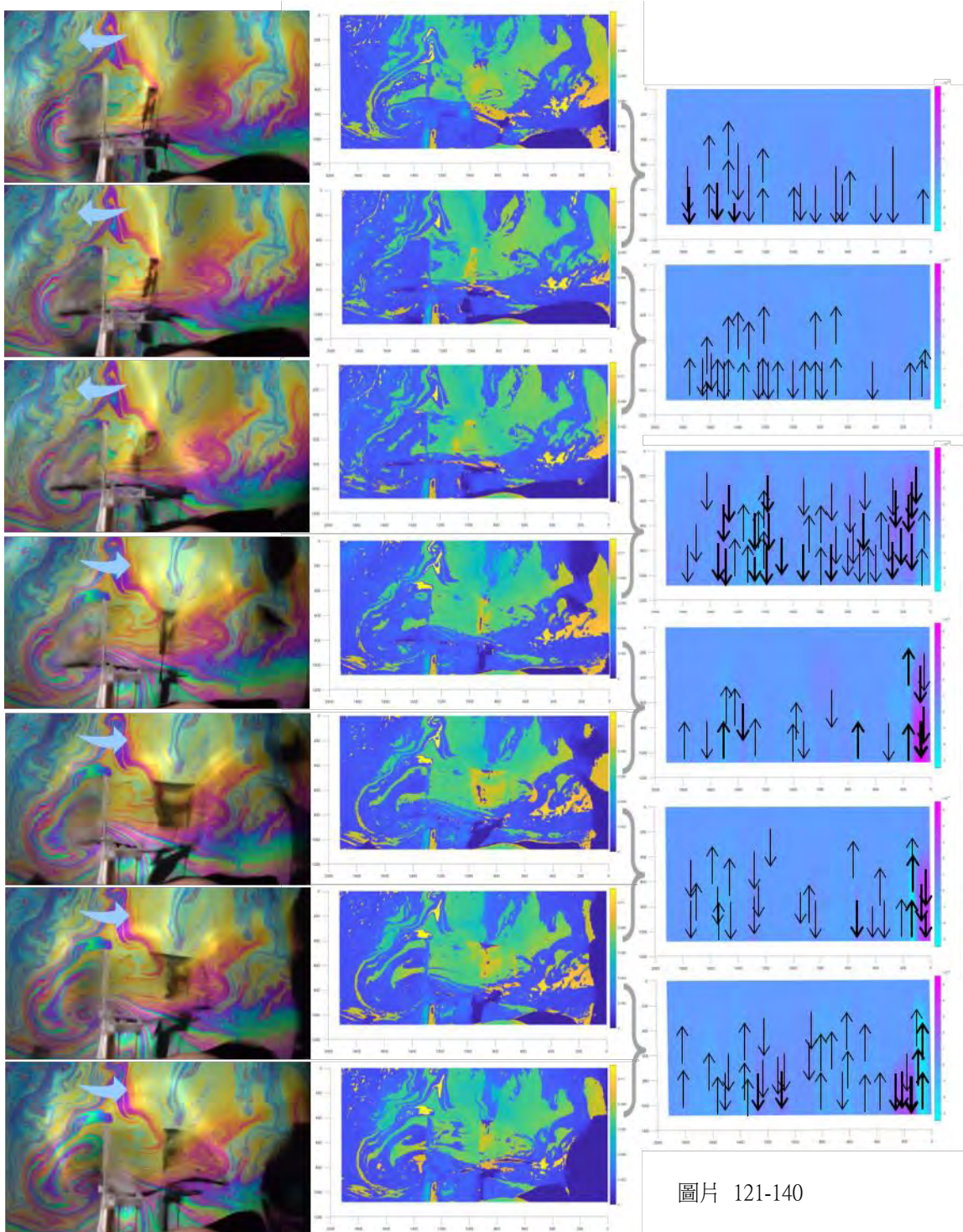
圖片 101-120

向)

五、 直立拍翅

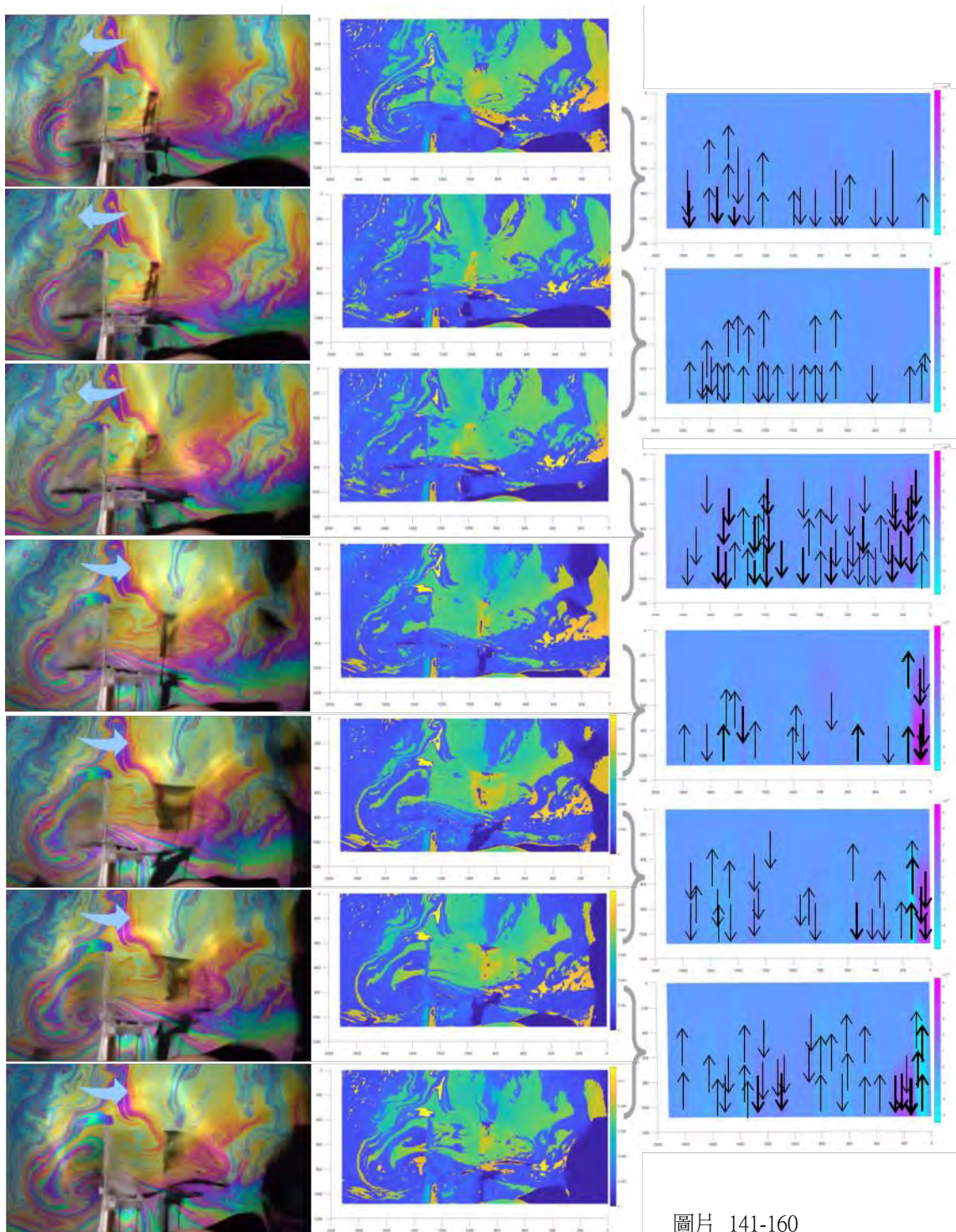
由上面三張圖可看到拍翼機正往右拍，渦流出現在翅翼左側，可惜在厚度圖中看得不太清楚，可能是由於比對上的誤差，流量圖中可看到渦流造成的流量改變。

(左：實驗原圖 / 中：厚度圖 cm^3 / 右：流量圖(向下為正)，藍色箭頭代表拍動方向)



圖片 121-140

(左：實驗原圖 / 中：厚度圖 cm^3 / 右：流量圖(向右為正) ，藍色箭頭代表拍動方向)

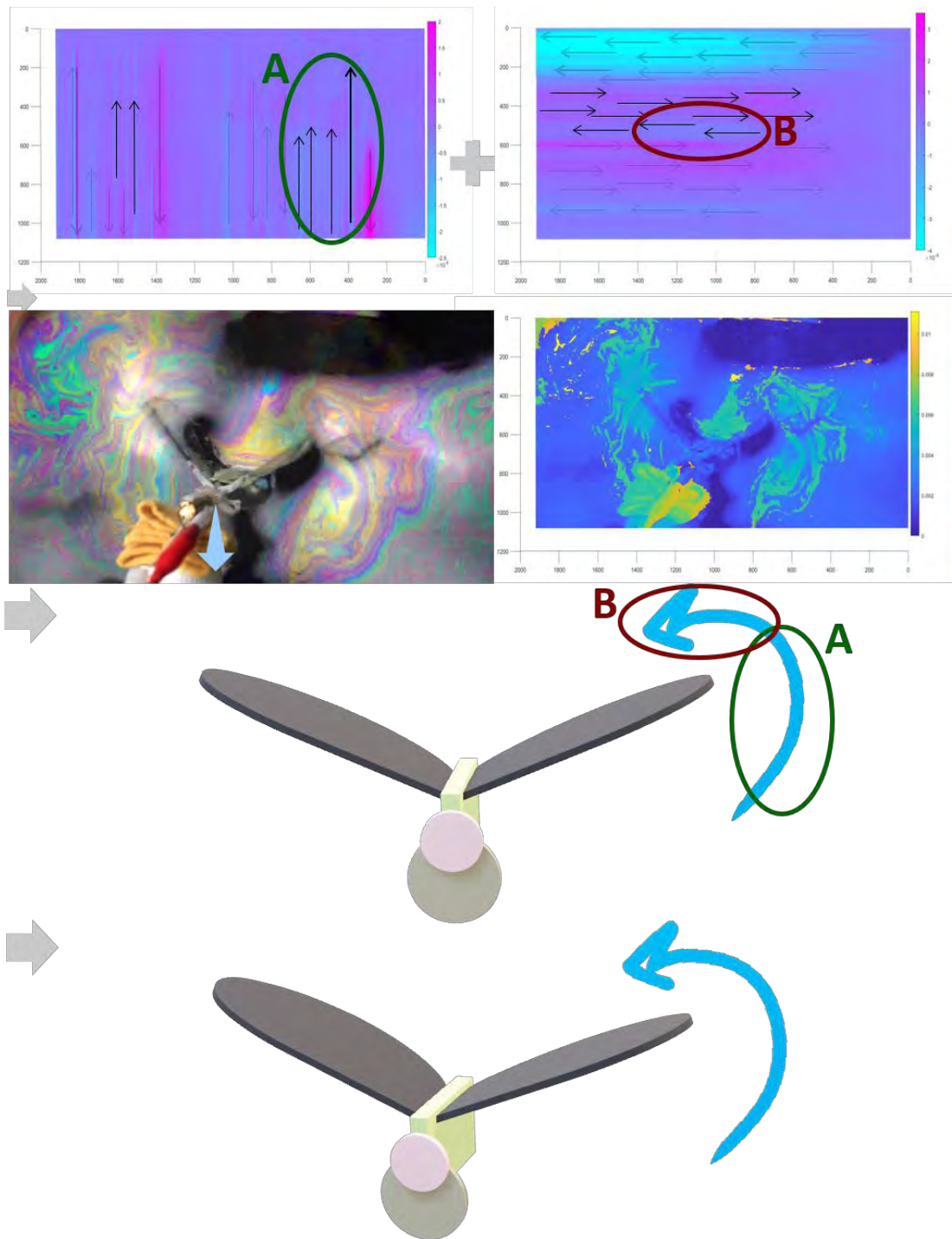


圖片 141-160

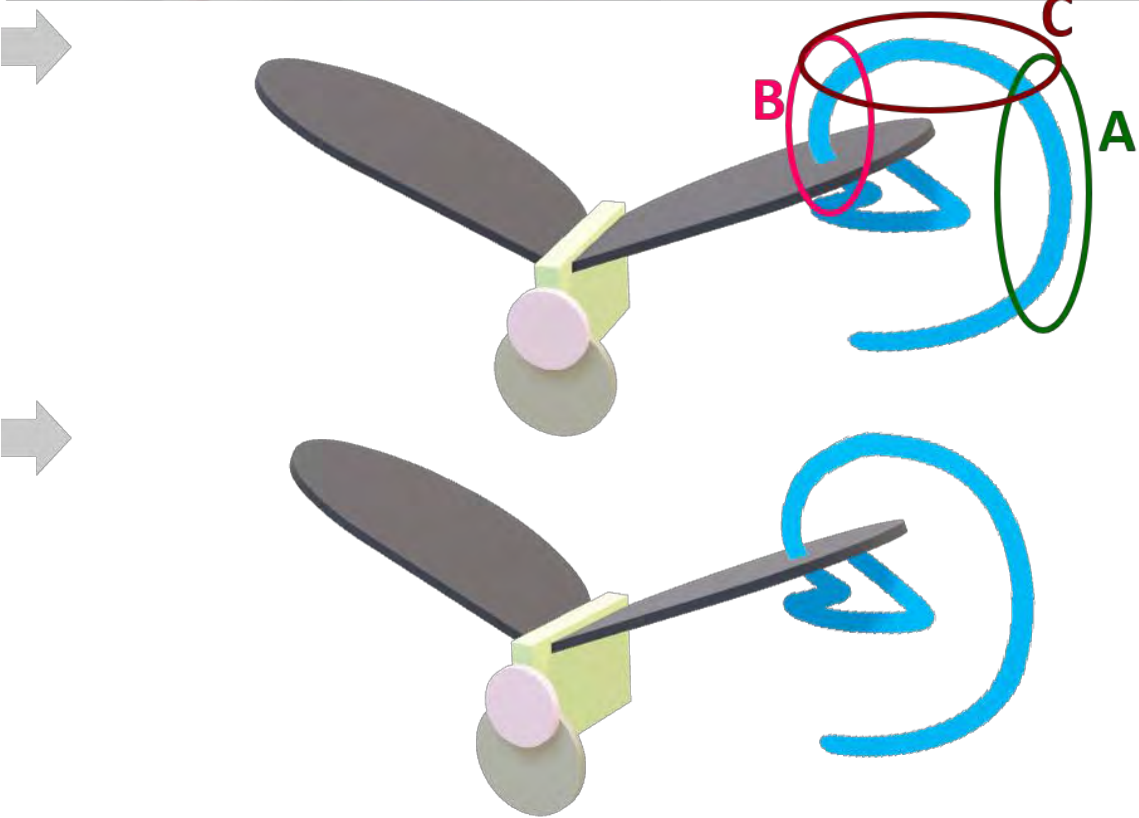
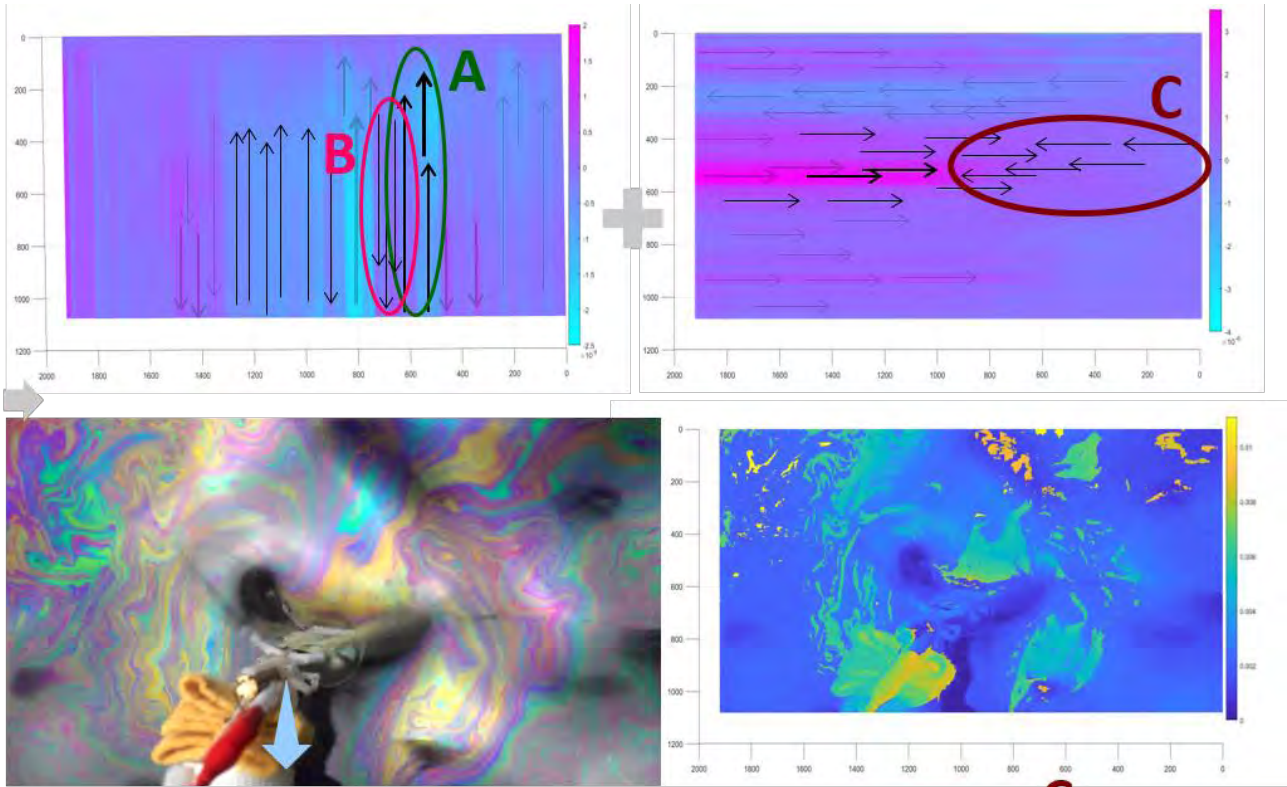
陸、 討論

一、 懸停拍翅

將橫、縱兩個方向之厚度圖合併觀察討論，我們可以發現翼側泡泡水在拍翼機往上拍的時被帶動向上流，但當其又往下拍的時泡泡水又被往下帶，經此過程，在左右兩邊翅膀各產生一順時鐘、一逆時鐘渦流，均由下往上流動。



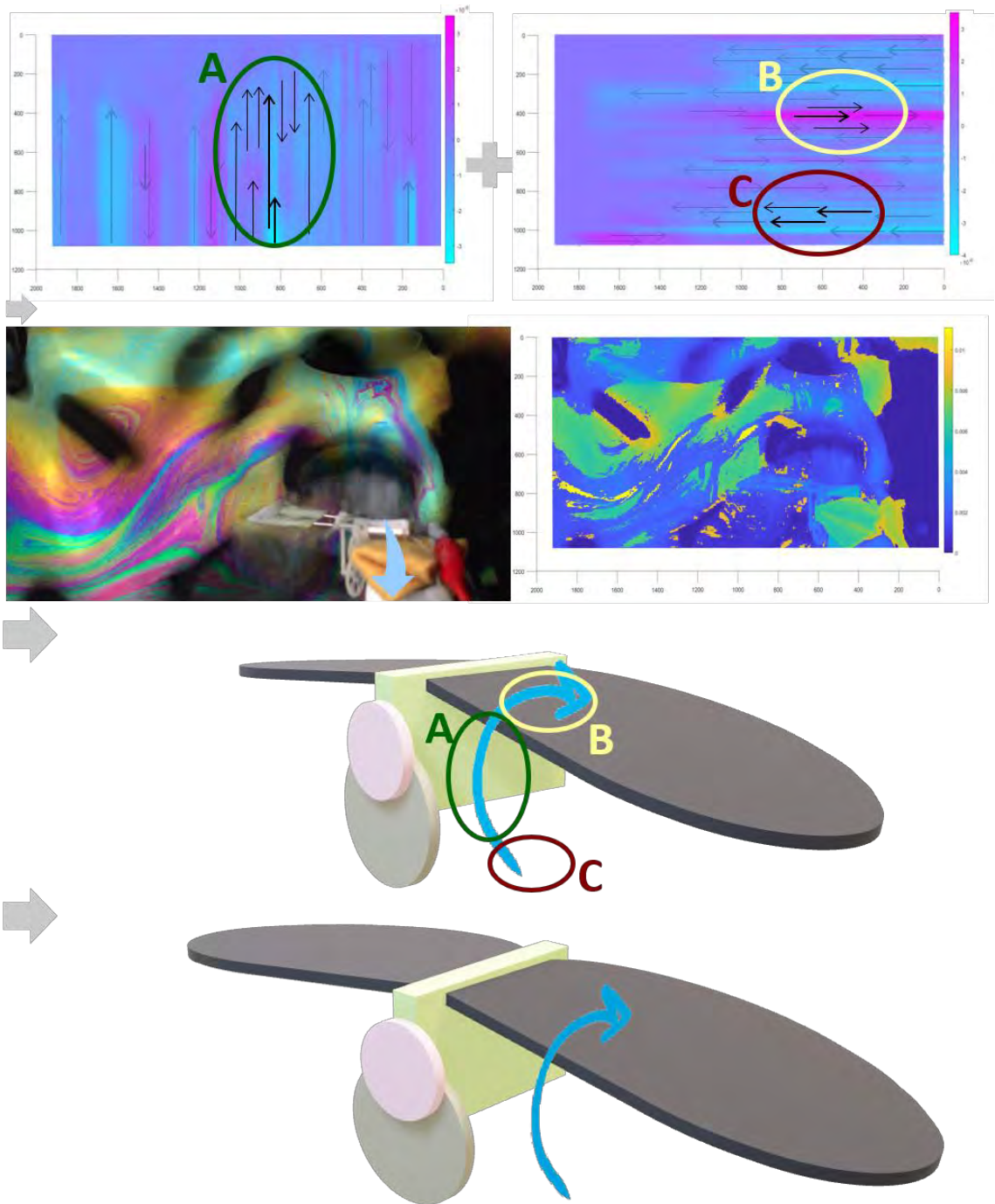
圖片 161-166



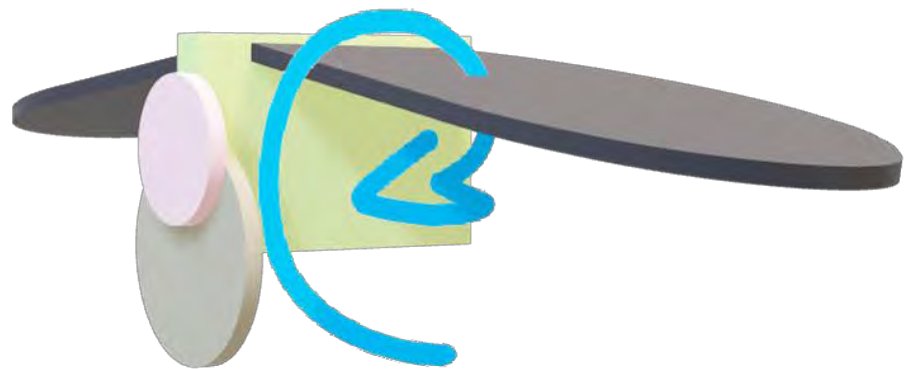
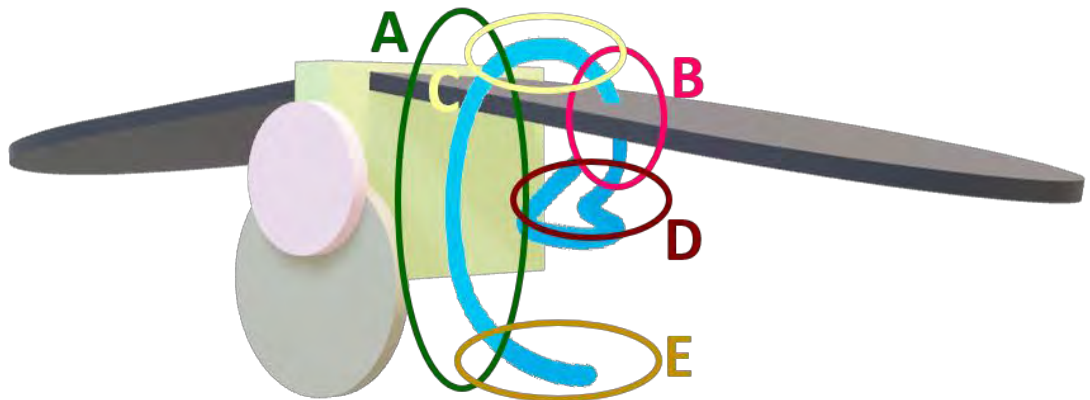
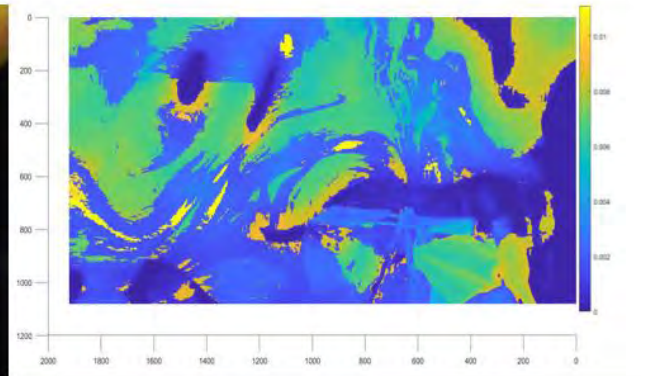
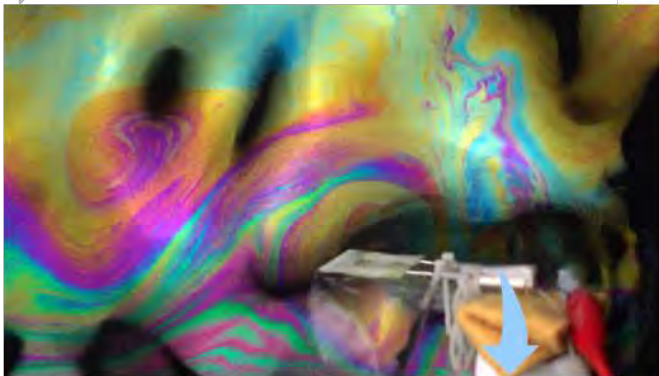
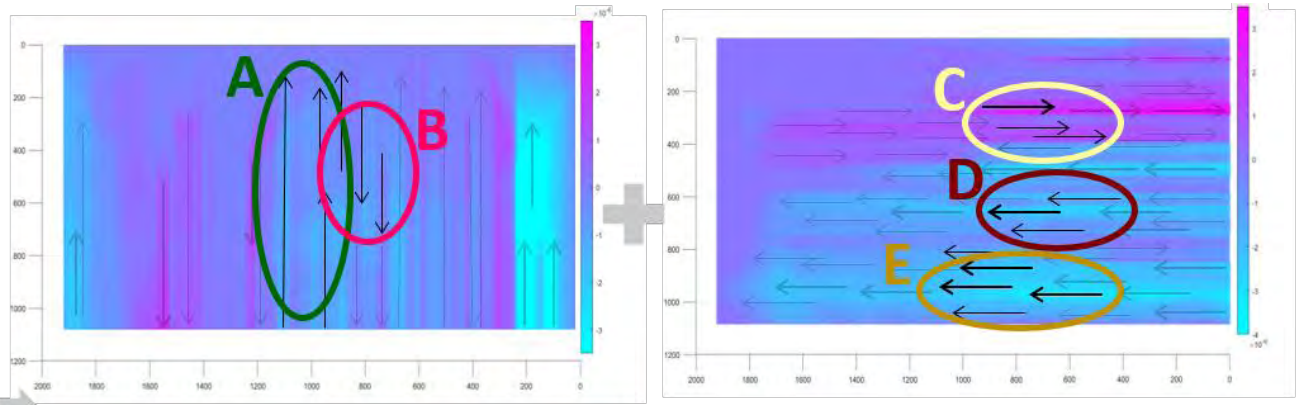
圖片 167-172

二、 側向拍翅

與前者同，透過將不同方向之厚度圖合併觀察討論，我們可以發現翼前側泡泡水在拍翼機往上拍的時被帶動向上流，但當其又往下拍的時泡泡水又被往下帶，經此過程，產生翼前緣渦流(Leading Edge Vortex)，在翼前側往上流，翼上前方往後流，最後在翼上方往下流。



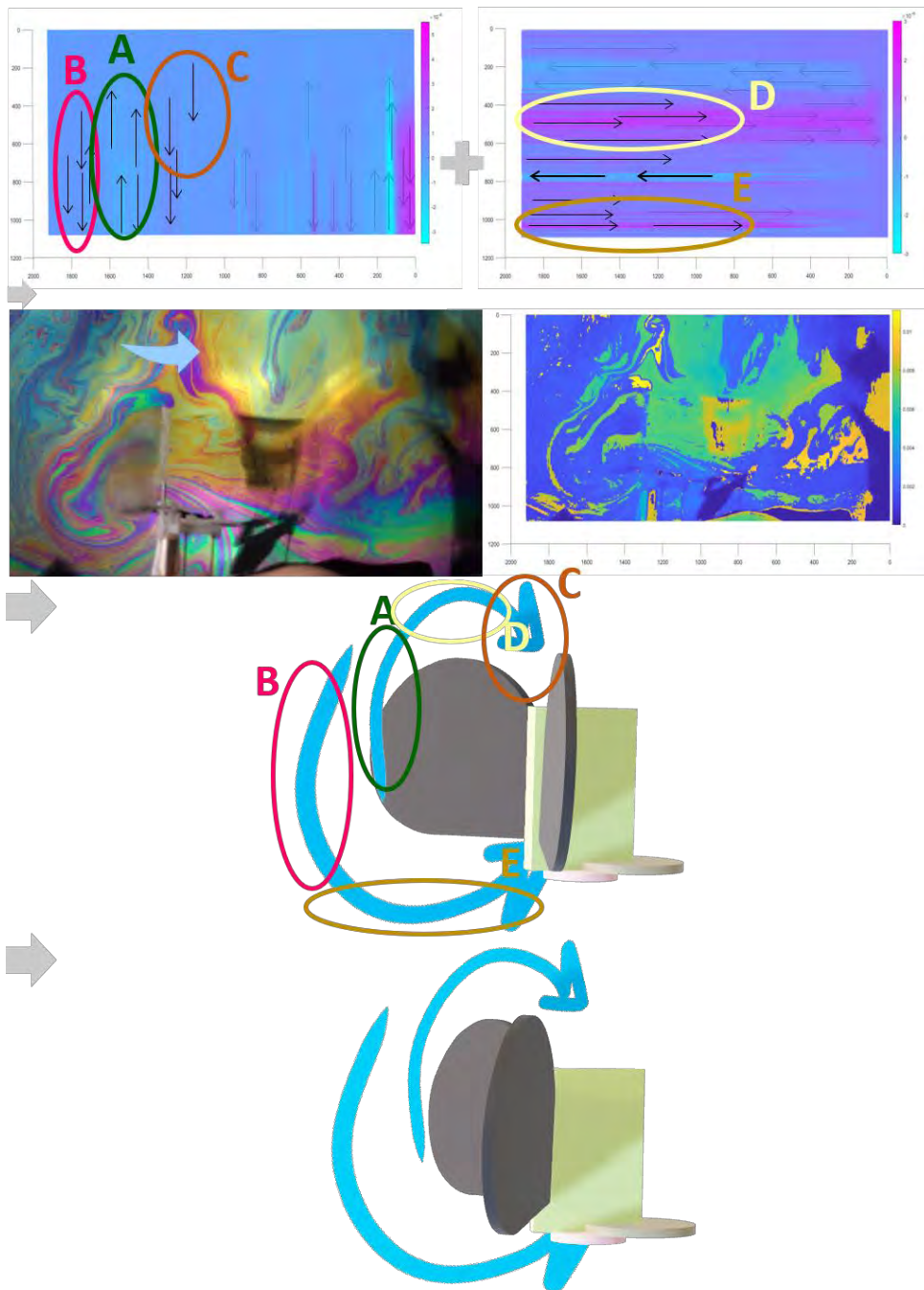
圖片 173-178



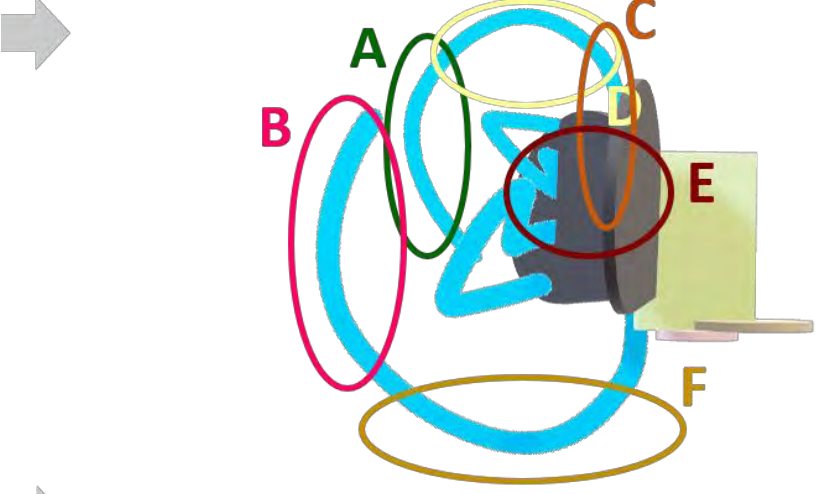
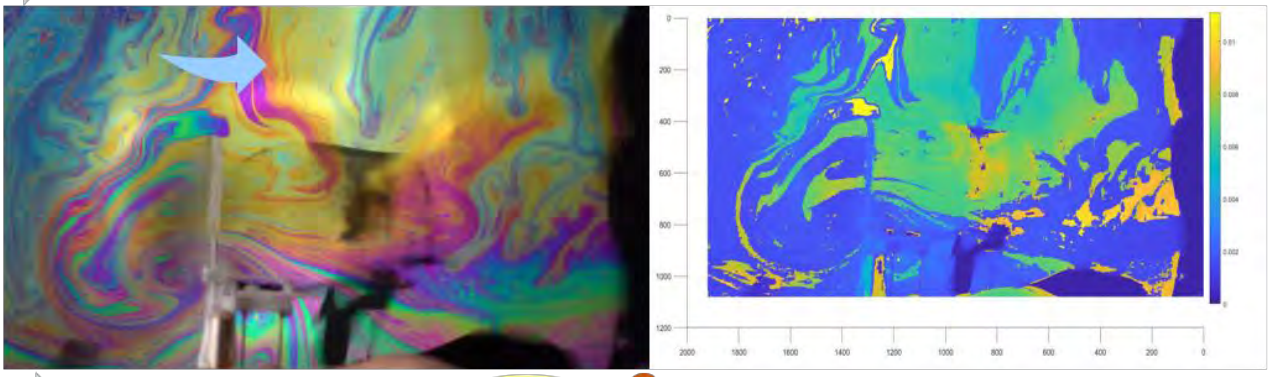
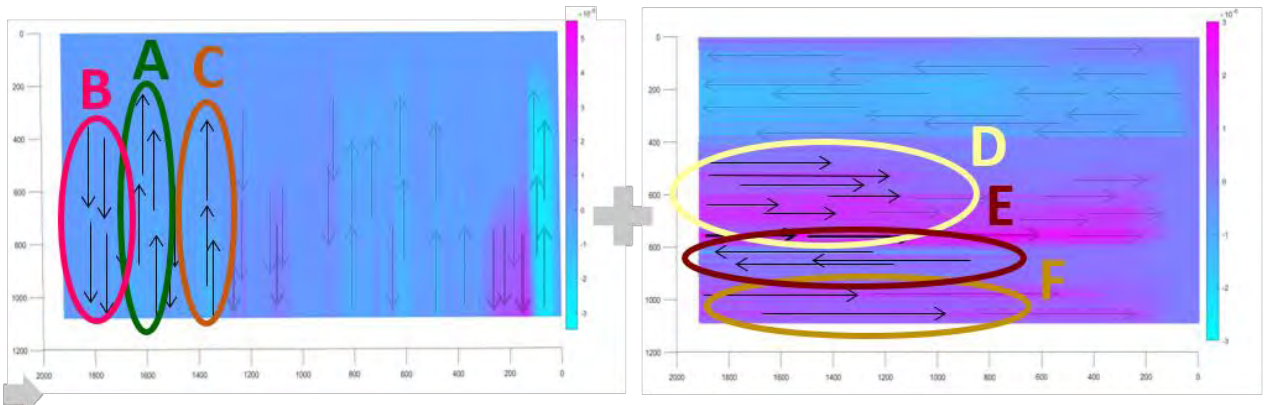
圖片 179-184

三、 直立拍翅

與前者同，透過將不同方向之厚度圖合併觀察討論，我們可以發現翼前側泡泡水在拍翼機往上拍的時被帶動向上流，但當其又往下拍的時泡泡水又被往下帶，經此過程，產生翼前緣渦流(Leading Edge Vortex)和翼後側渦流，兩者方向不同，前側為逆時鐘，後側為順時鐘。



圖片 185-190



圖片 191-196

柒、 結論

經實驗得知，泡膜的動態黏滯係數為 $2.33 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 與 20°C 空氣相似。後由照片分析可計算出泡膜厚度及其流量，由此研究方法觀察到蜻蜓飛行拍動翅膀時，帶動氣體流動，產生各種渦流，如翼前側渦流或者翼後側渦流。運用泡膜來進行流場可視化簡單方便，只需泡泡水、框架即可進行實驗，直接用肉眼即可觀察到渦流出現情形，且與其他研究方法不同的是，分析時，可藉由得知泡膜厚度計算流量並了解其流向，此外還可研究翅膀每一個切面的渦流產生情形，相較風洞煙流等方法容易研究。未來可望研究渦流與升力之間的關係，並進行水洞實驗，將其結果與泡膜比對。

捌、 參考資料及其他

- [1]黃柏銜與蔡宗翰與魏禕良 (2013)。昆蟲拍翅的氣流研究 2013 年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。
- [2]溫志湧與郭威伸 (2006)。二維網格紊流之實驗分析。科學與工程技術期刊第二卷，3，85-93。
- [3]章本新與黃諺恩 (2016)。Bubble film with vortex。2016 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯。
- [4]苗志銘與戴昌賢 (2008)。拍翼式飛行器之研發與製作—子計畫四：拍翼式飛行器之氣動力特性模擬與分析研究成果報告(精簡版)。
- [5]康耀鴻與馬榮華與李威廷 (2011)。撲翼飛行器發展及其驅動機構—文獻回顧。工程科技與教育學刊第八卷，4，623-641。
- [6]嚴凱傑與朱柏憲(2009)。製作奈米的肥皂泡膜。中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會作品說明書。

【評語】 051816

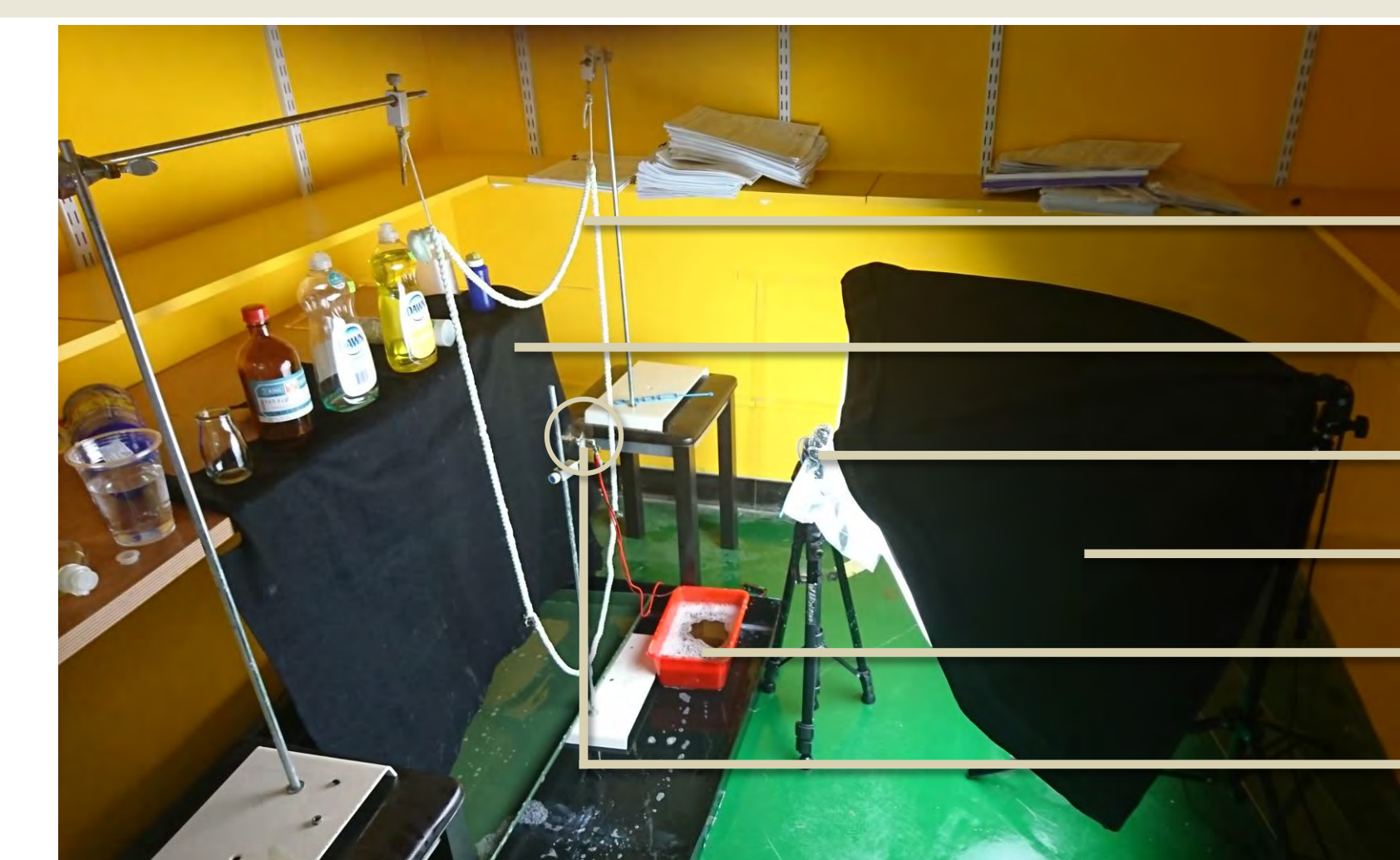
本實驗利用薄膜流場觀測經蜻蜓飛行拍動翅膀時所帶動之空氣流場對薄膜流場的影響，實驗測得泡膜的動態黏滯係數為 $2.33 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ (與 20°C 空氣相似)、泡膜厚度及其流量，以及在其中產生的各種渦流，是一項認真的作品，且作者對其中現象有足夠的了解。薄膜流場本身是一個觀測 2D 流場的好工具，可以針對科學性的問題測量。但是本實驗觀測經蜻蜓飛行拍動翅膀所造成的 2D 流場，科學性有限。而利用光干涉推算拍翅所產生的流場，亦缺新穎構思。

壹、研究目的

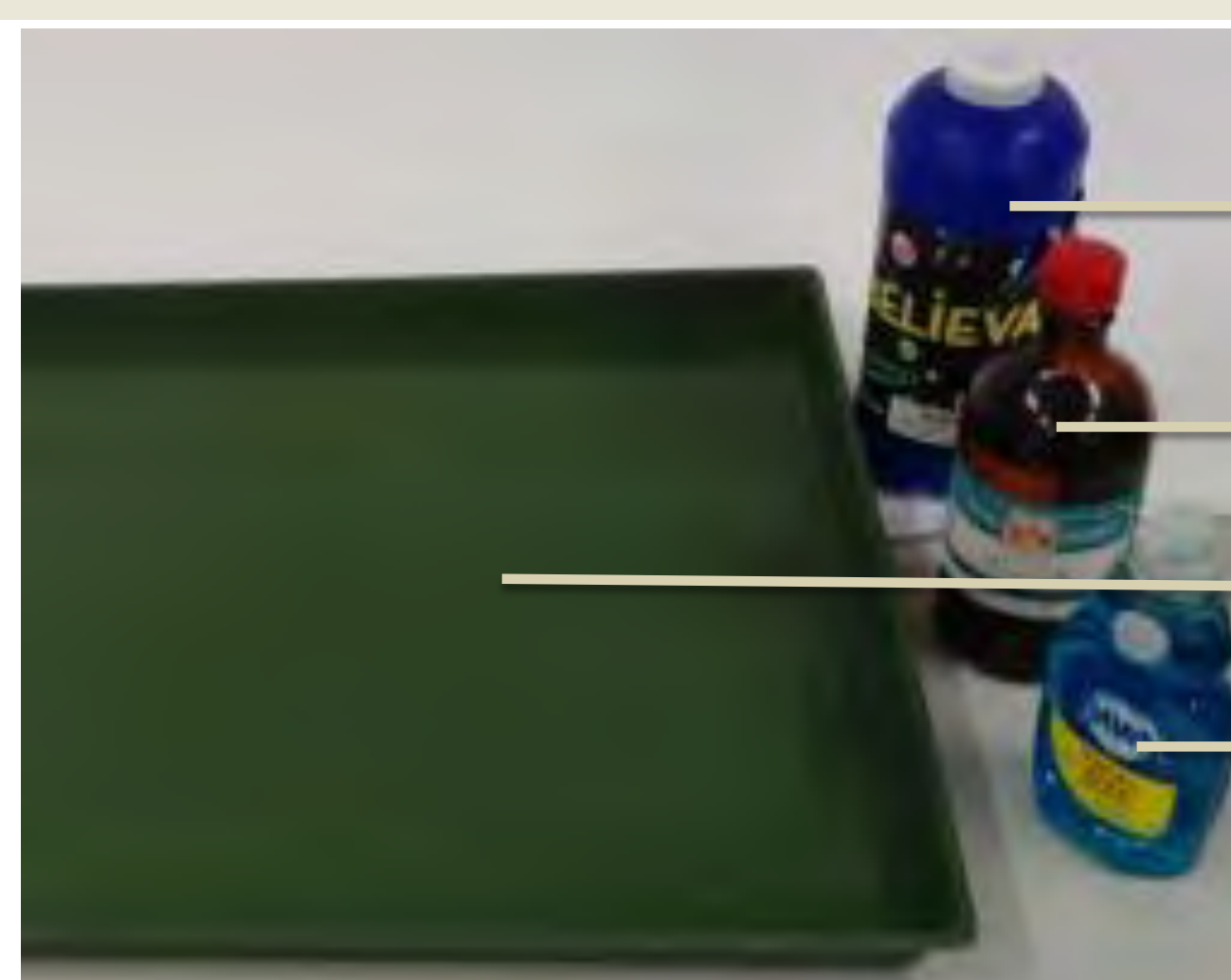
因想研究流場可視化，設計一套薄膜流場觀測法。利用蜻蜓懸停拍翅的方式進行研究，討論利用此觀測法，下列之物理關係。

- 一、計算泡膜之黏滯係數
- 二、計算拍翼機懸停及滑行翅膀拍動時的泡膜厚度變化
- 三、研究拍翼機懸停及滑行翅膀拍動時的泡膜流量
- 四、探討拍翼機懸停及滑行翅膀拍動時產生的渦流

貳、研究設備及器材



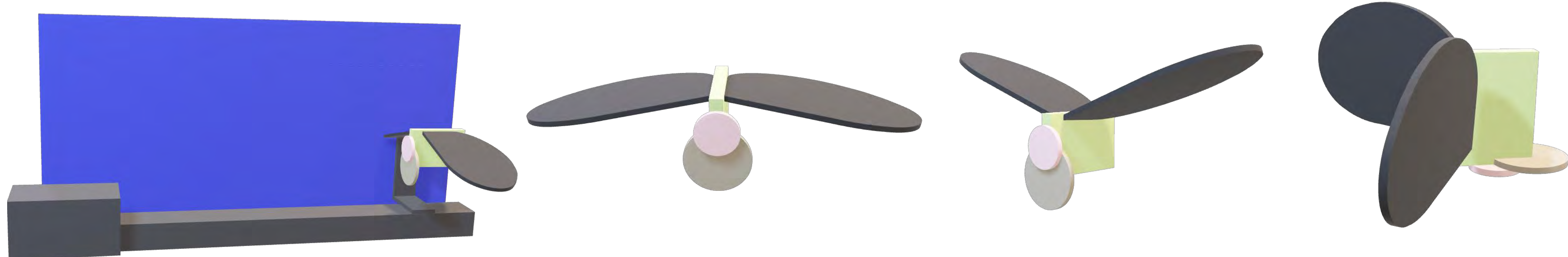
1. 泡膜框
2. 黑幕
3. 相機
4. 攝影燈
5. 肥皂溶液
6. 拍翼機



7. 超級泡泡水
8. 甘油
9. 大托盤
10. Dawn 洗碗精

參、研究方法

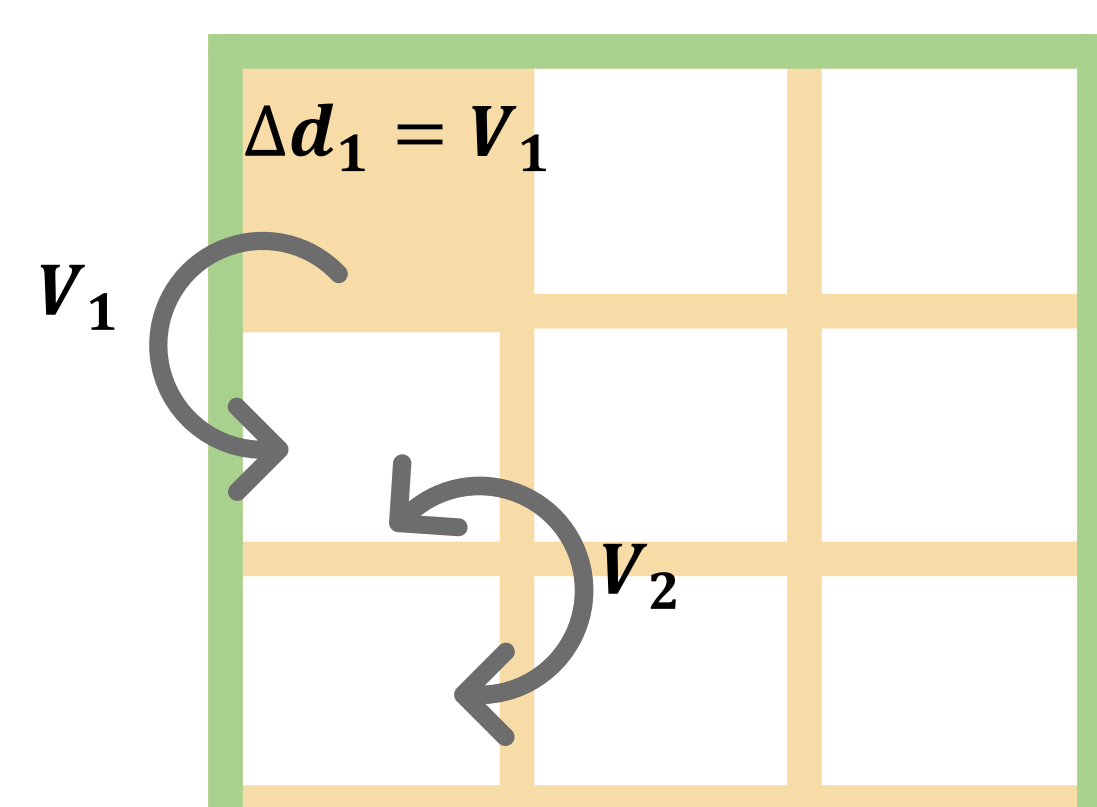
- 一、調製泡泡水
超級泡泡水：甘油：Dawn 洗碗精 = 1：1：1 (冬天時加入整體溶液的0.02%的蜂蜜)
- 二、測量動態黏滯係數
將筷子固定於定速滑軌上，以不同速度使其滑過泡膜，以相機記錄
- 三、研究蜻蜓懸停及滑行時的流場模式
將拍翼機分別以懸停、側向、直立、不同傾角等方法穿入泡膜中，開啟拍翼機，觀察其造成之渦流，以相機記錄；將拍翼機固定於滑車上，使其滑行，以相機紀錄



四、分析方法

1. 使用Free Video to JPG Converter 將影片中之每一影格擷取出來
2. 使用軟體XnView剪下擷取下的照片中的要分析同一部份
3. 將剪下的照片放入ImageJ中分析其RGB值，分別儲存成Excel表格
4. 將照片之RGB值及泡膜顏色厚度比對表放入Excel中進行比對
5. 使用Matlab繪製厚度圖及計算流速
6. 計算泡膜流速：

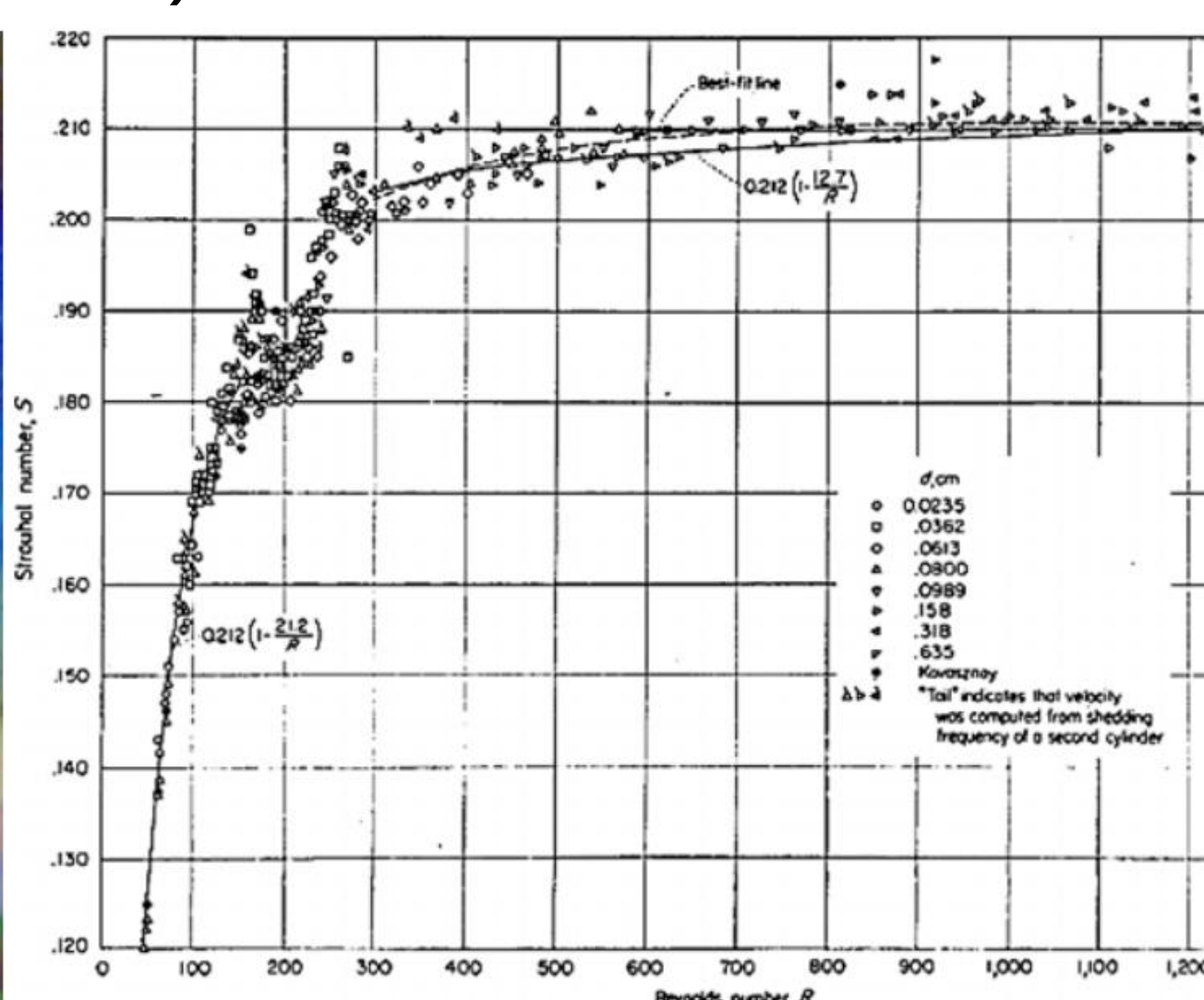
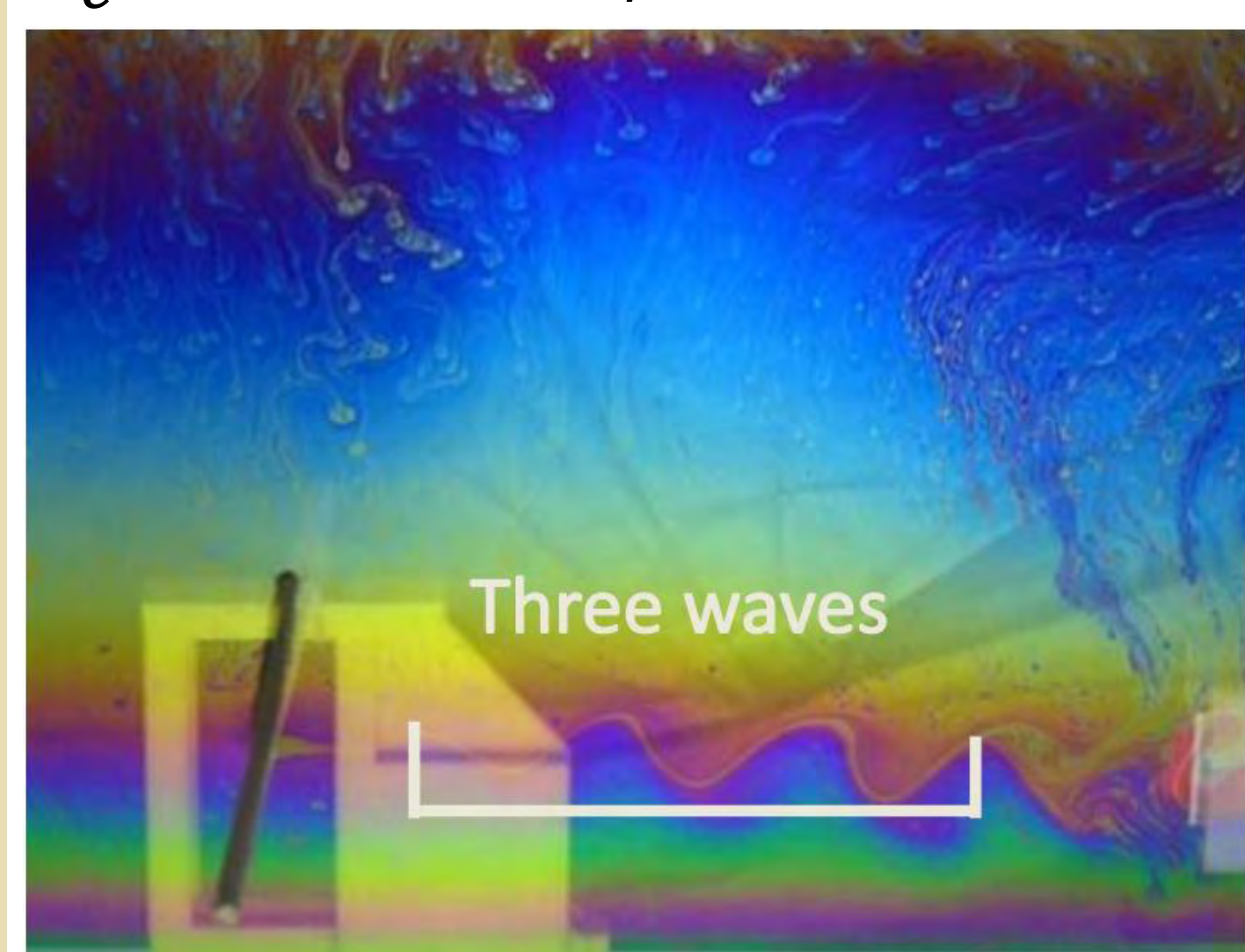
- (1) 設首張照片厚度值矩陣為 A_{mn} ，次張照片厚度值矩陣為 B_{mn} ，體積矩陣為 V ，流速矩陣為 Q
- (2) $D=A-B$ (為兩張照片之間的厚度差異)
- (3) 設 $D_{11} = V_{11}$ ， $D_{12} = V_{12}$ ， $D_{13} = V_{13}$ 以此類推... $\rightarrow D_{1j} = V_{1j}$
- (4) V_{11} 流入， V_{21} 流出，兩者造成 D_{21}
 $\rightarrow V_{11} - V_{21} = D_{21}$
 $\rightarrow V_{ij} = V_{(i-1)j} - D_{ij}$



肆、研究結果與討論

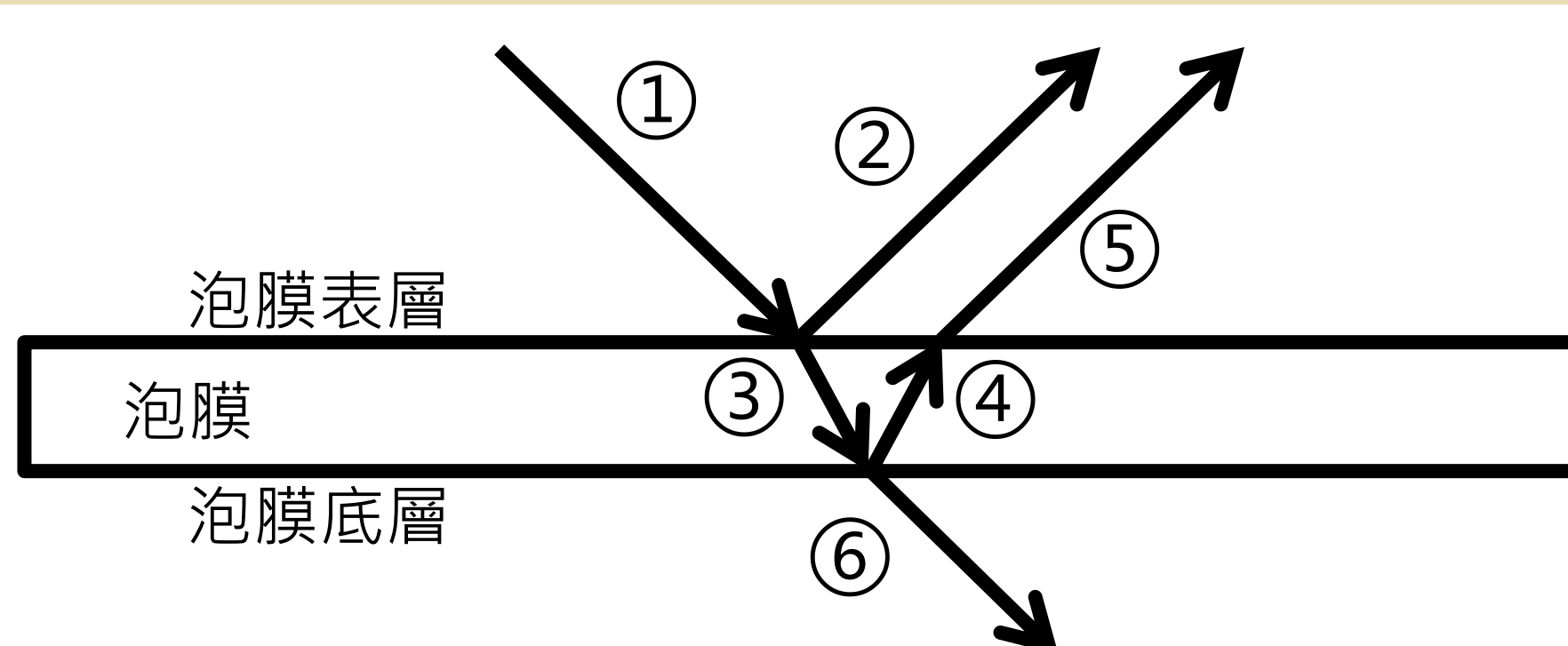
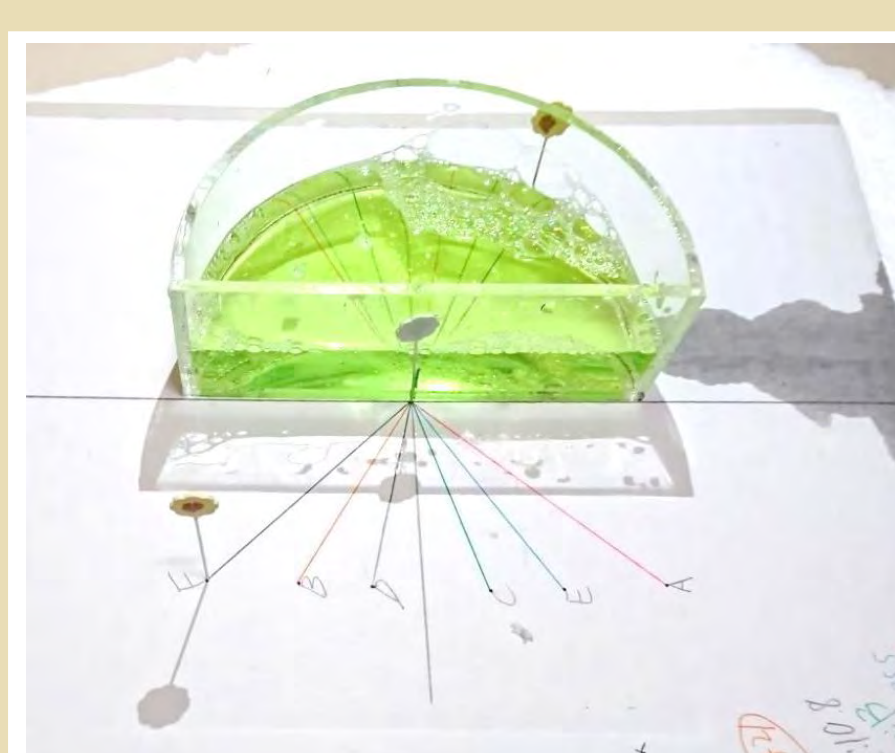
動態黏滯係數

帶入公式 $St = \frac{Fd_c}{U}$ (St : Strouhal Number ; Re : Reynolds Number ; F : 渦流釋放頻率 ; d_c : 圓柱直徑 ; U : 自由流的速度) , 可得史綽荷數。設雷諾數介於25~200間，將史綽荷數代入



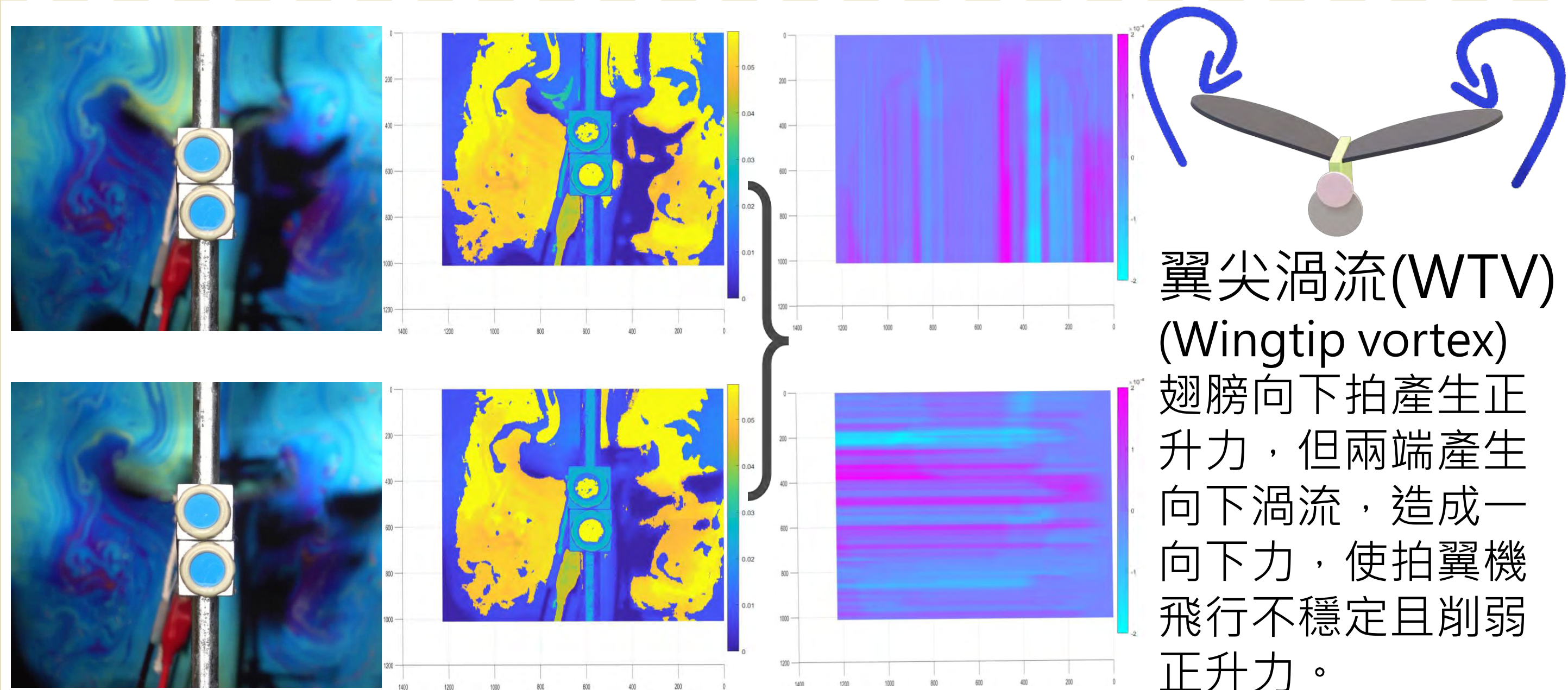
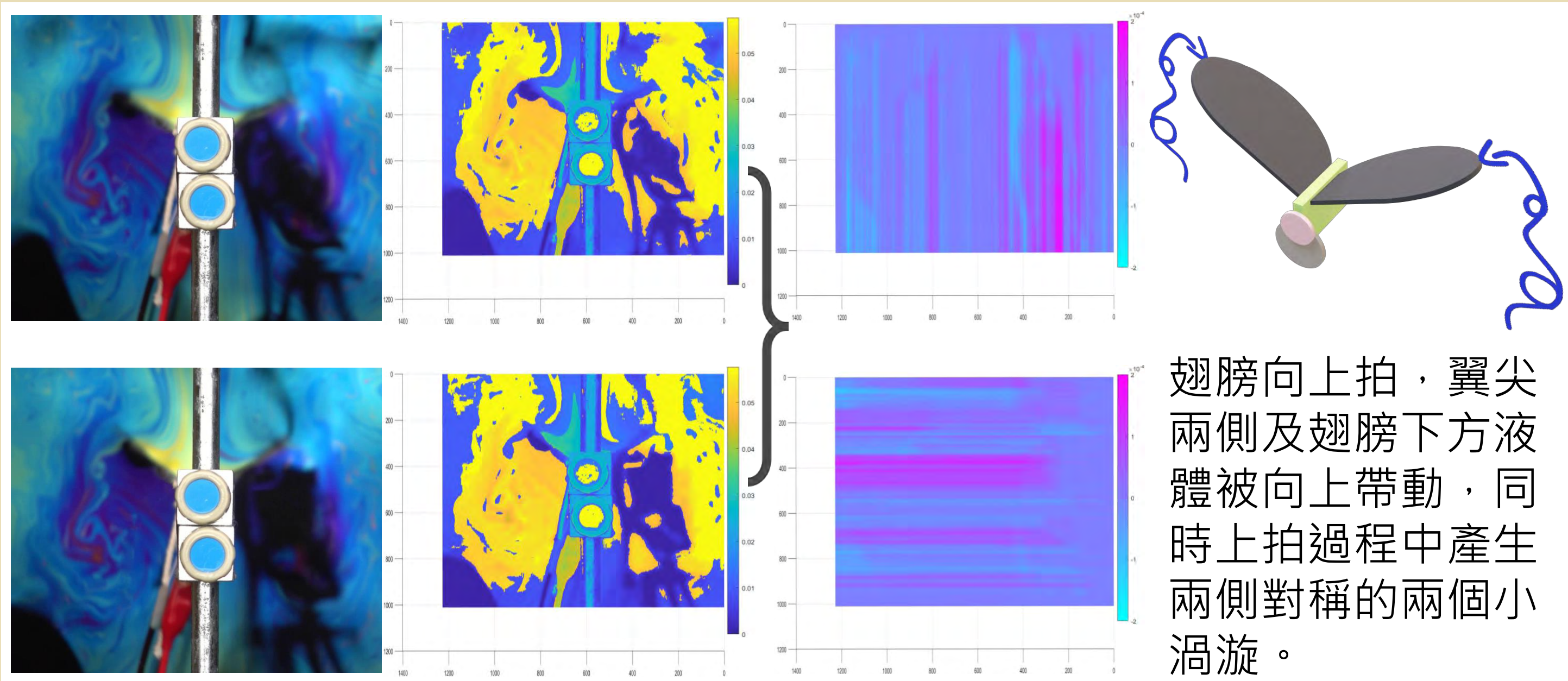
Roshko經驗關係式
 $St = \frac{Fd_c}{U} = 0.212 - \frac{4.5}{Re}$, $25 < Re < 200$,
 便得出雷諾數，
 最後將史綽荷數與雷諾數代入公式 $Re = \frac{Ud_c}{\nu}$, ν 為動態黏滯係數，即取得泡膜動態黏滯係數為 $2.33 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 與 20° 空氣 ($\nu_{20^\circ\text{C air}} = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)數量級相同。

折射率

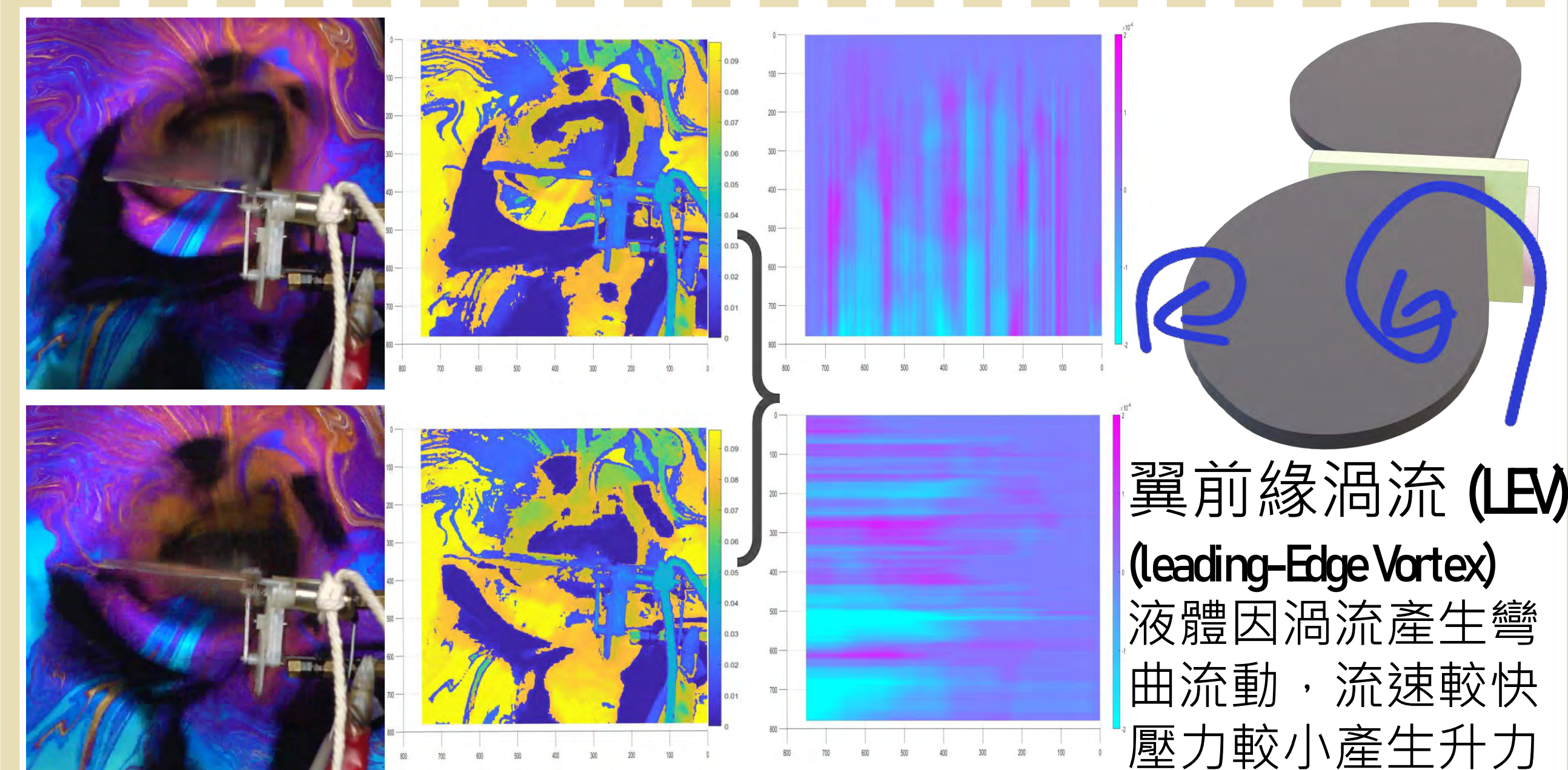
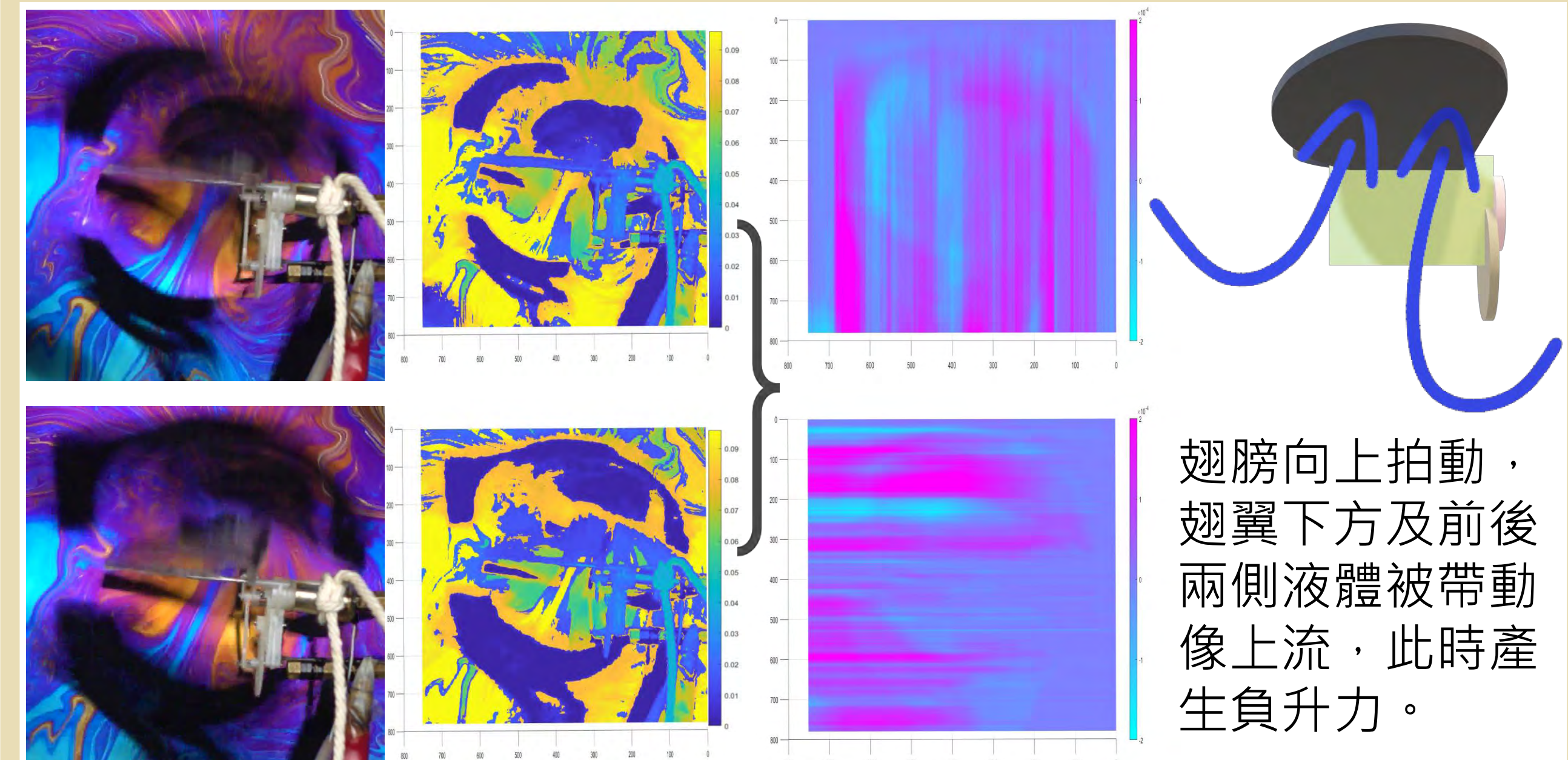


用視差法計算泡泡水折射率，將實驗數據代入公式 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 空氣之折射率代入1，得泡泡水之折射率為1.3。使用薄膜干涉理論，計算後得到泡膜顏色厚度比對表，用於之後的分析。

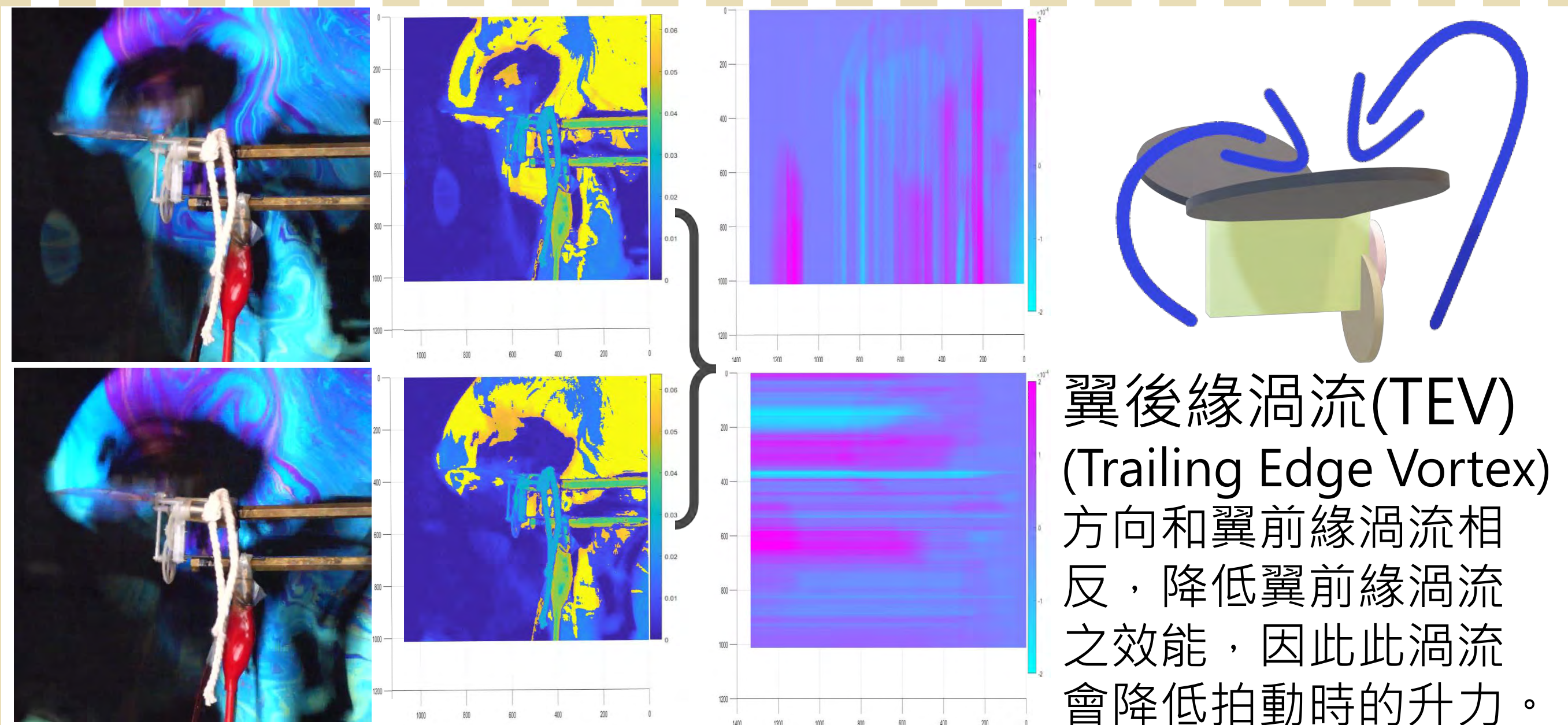
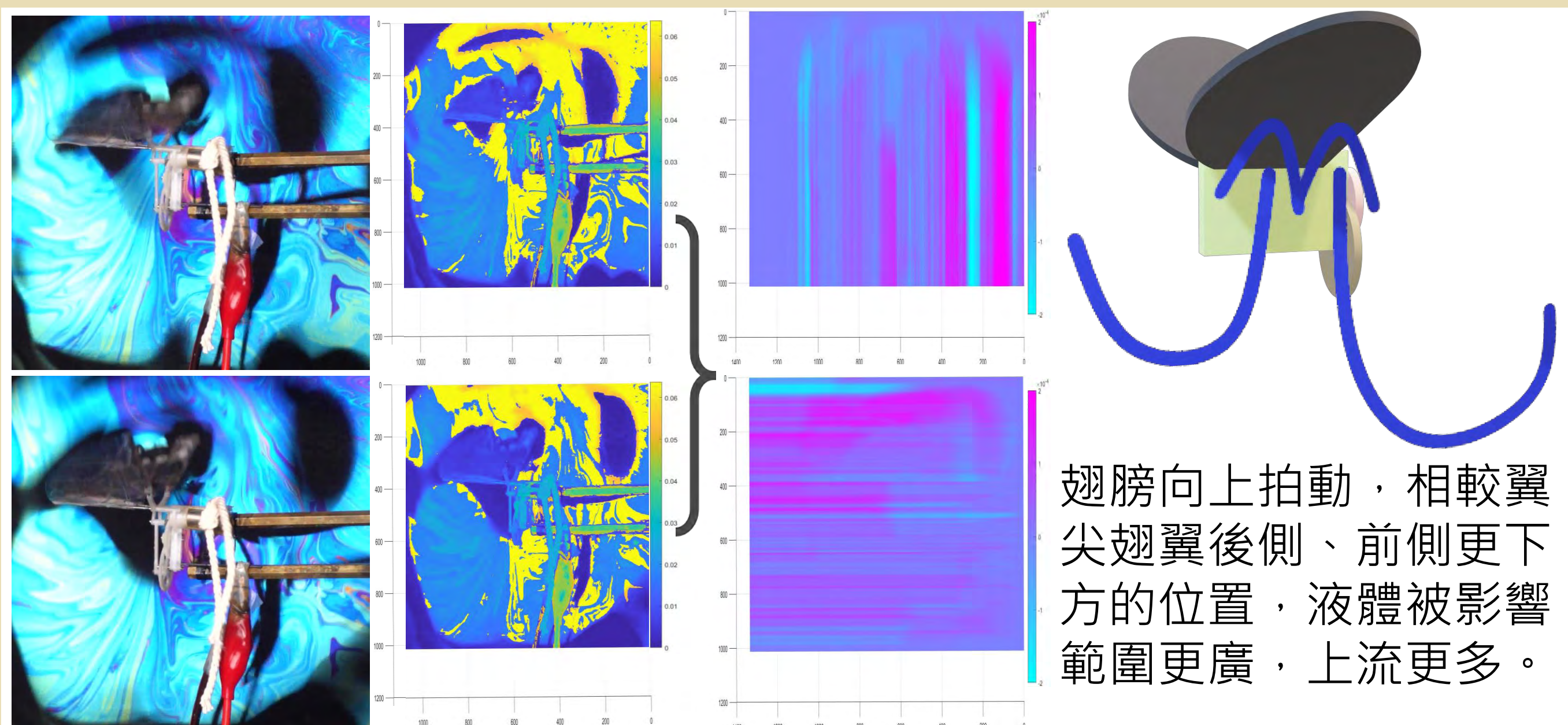
正向拍翅



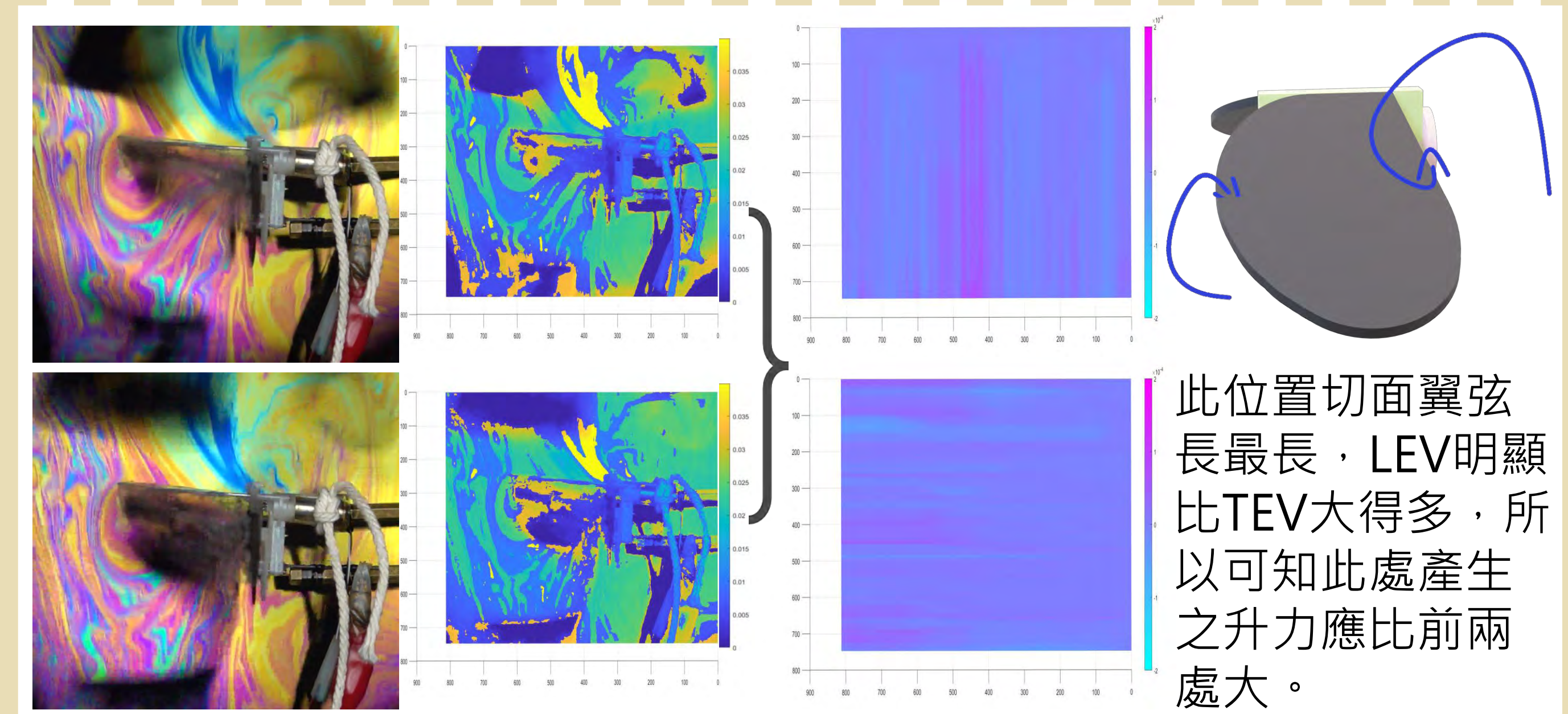
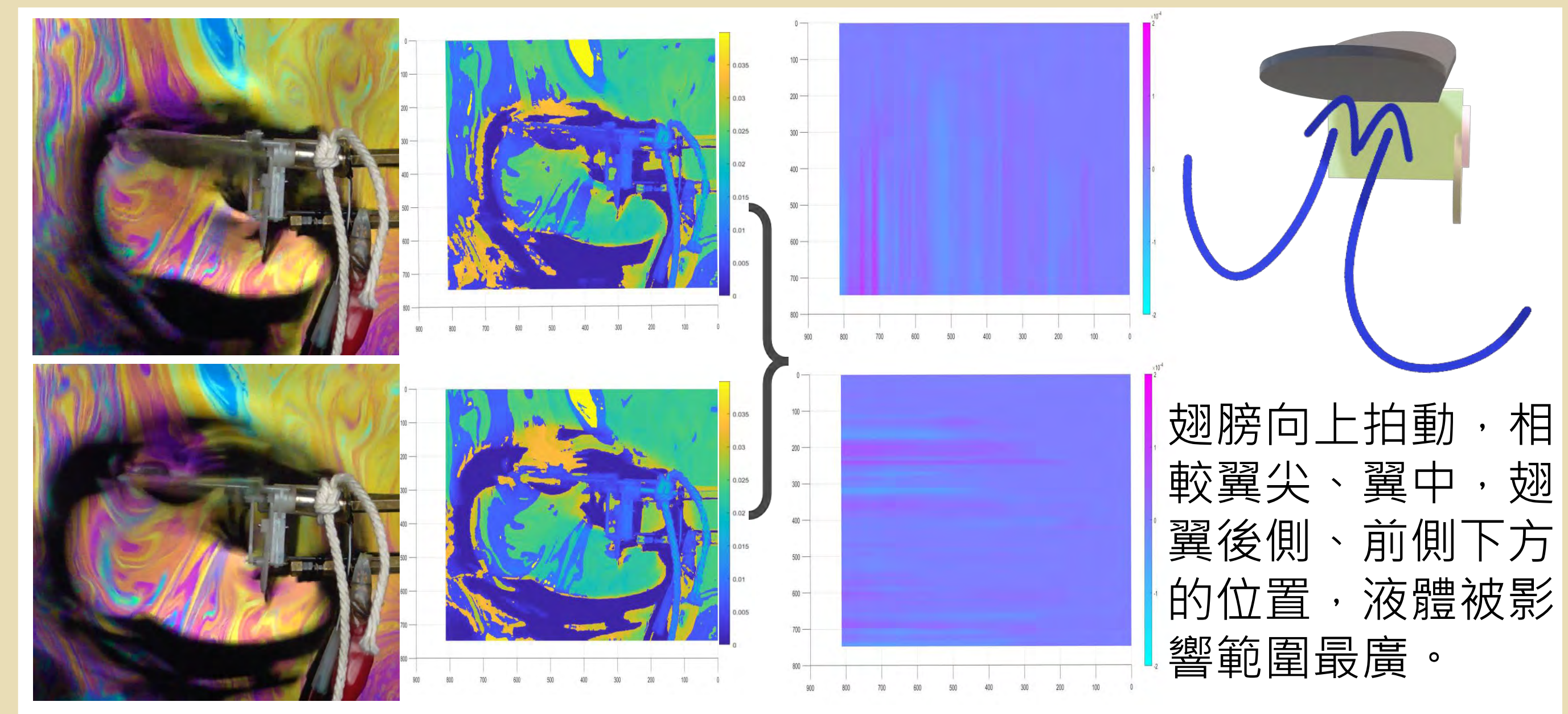
側向拍翅(翼尖)



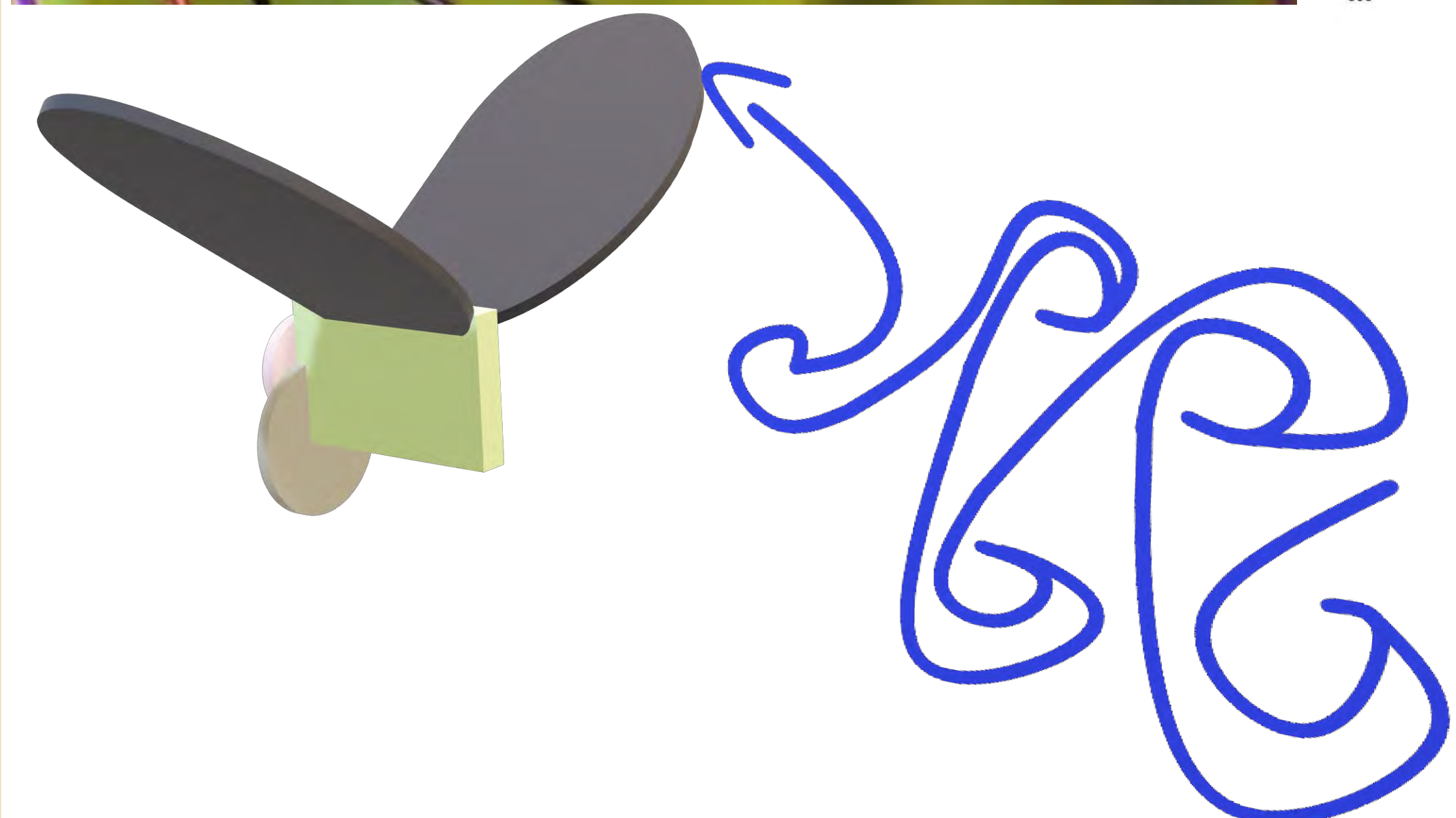
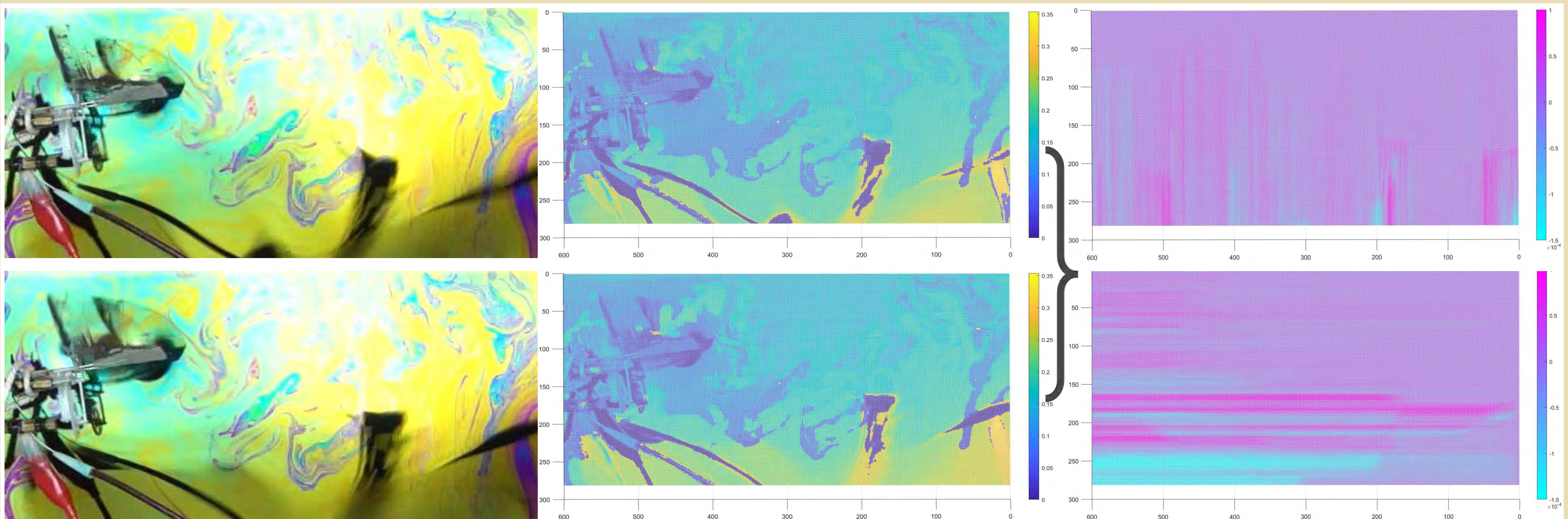
側向拍翅(翼中)



側向拍翅(翼根)

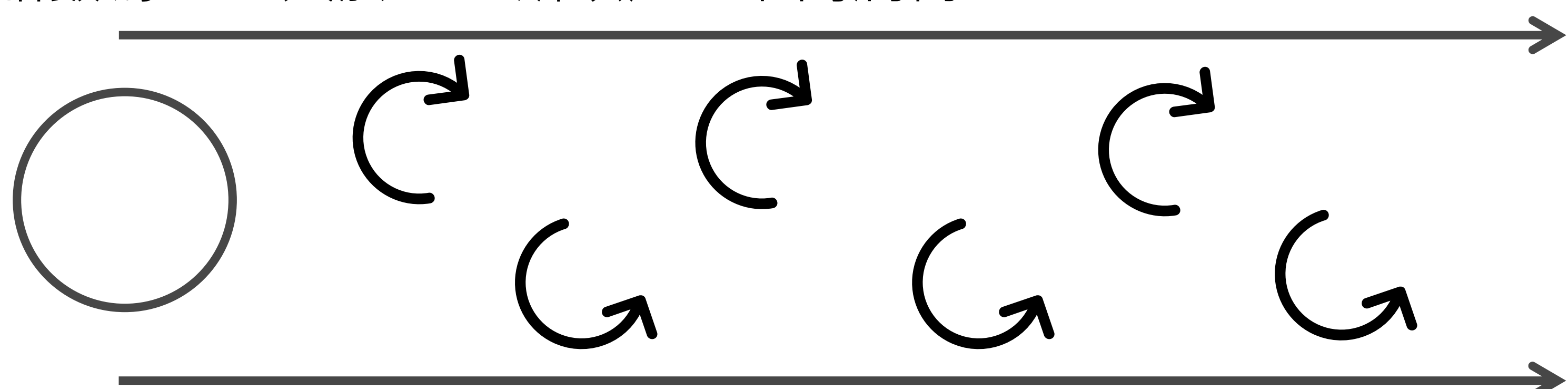


側向滑行拍翅

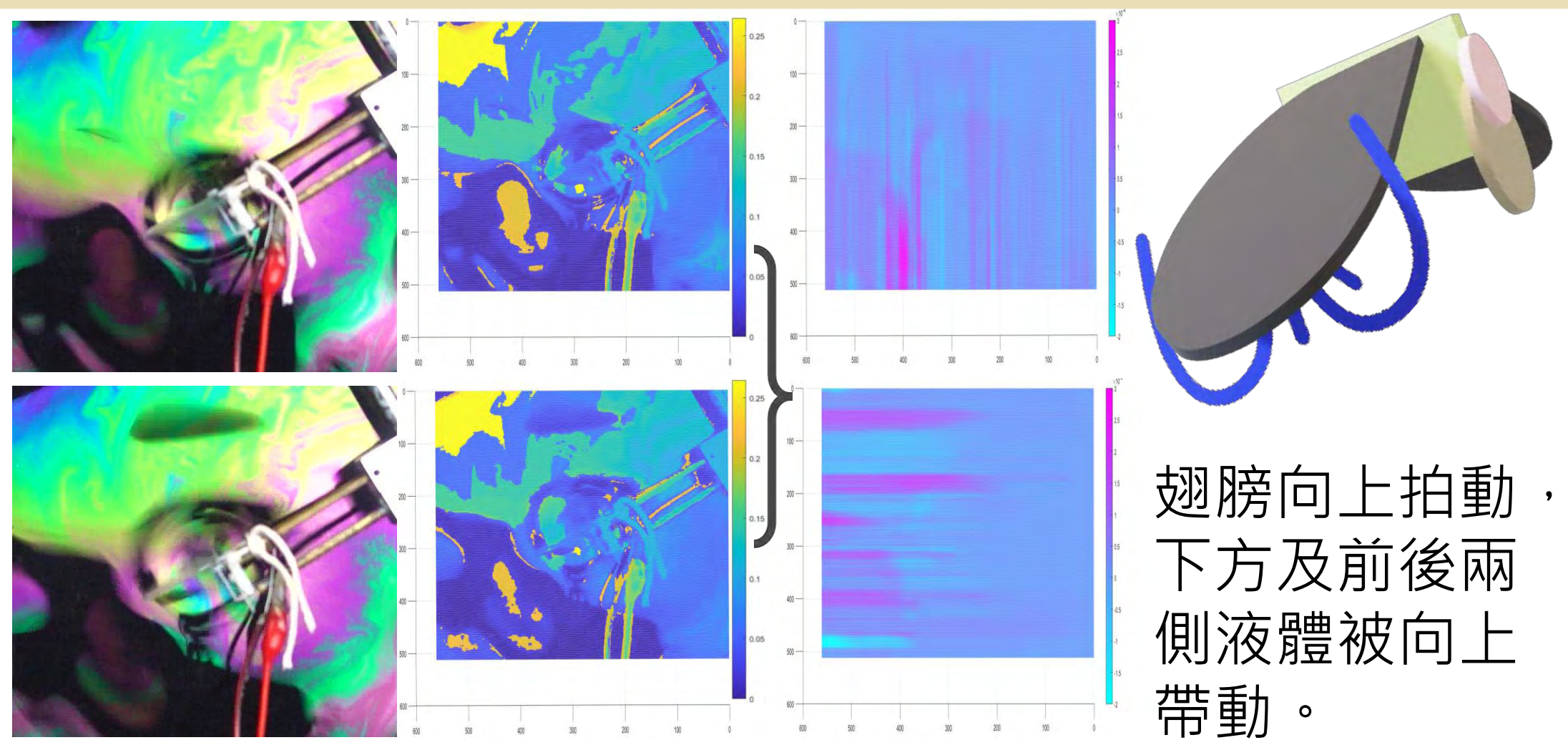


卡門渦街序列(Kármán vortex street)：

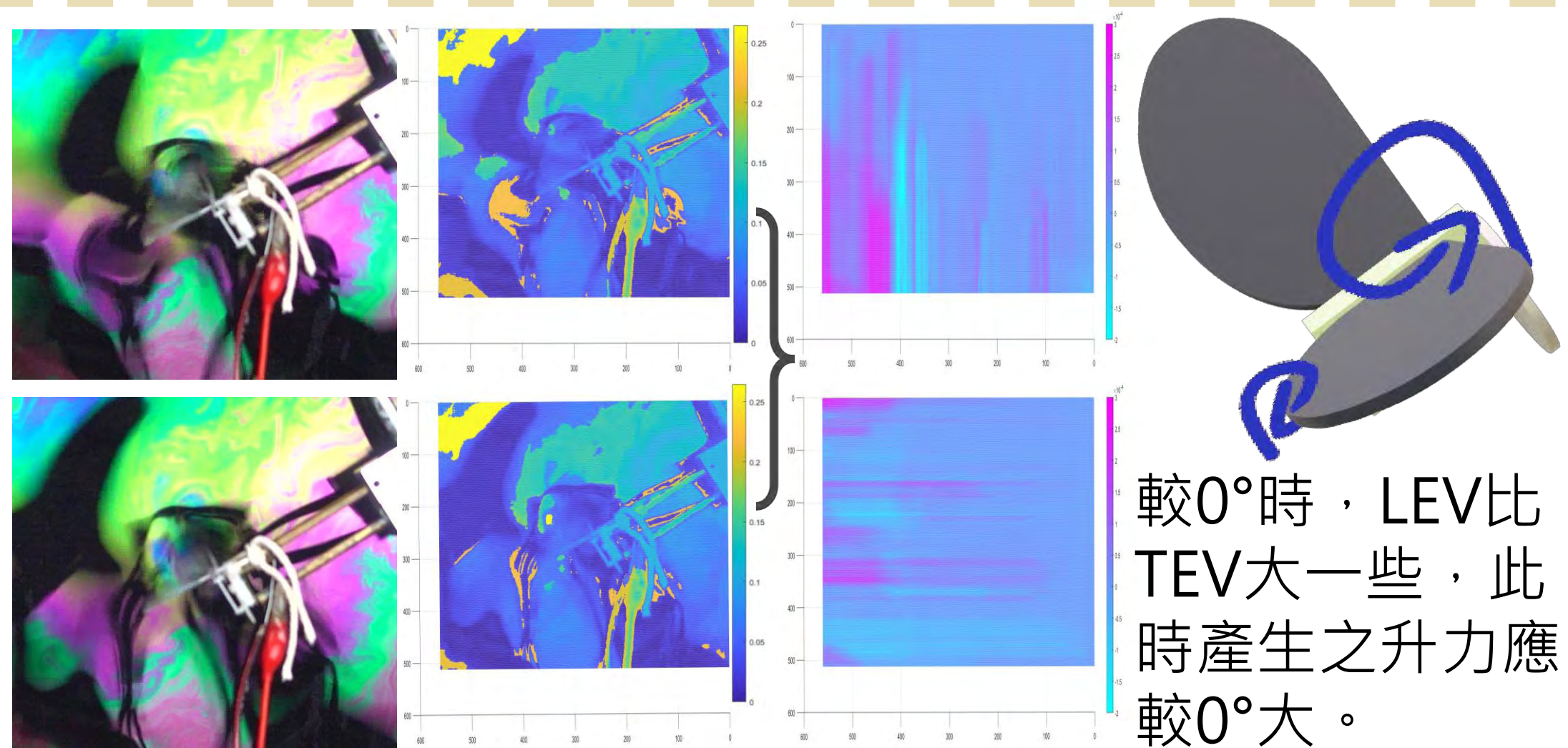
在拍翼機拍動時產生渦流，經過後渦流停留在原地並向外發散，且因雷諾數為55，大於47，所以產生卡門渦街。



側向拍翅(30°)

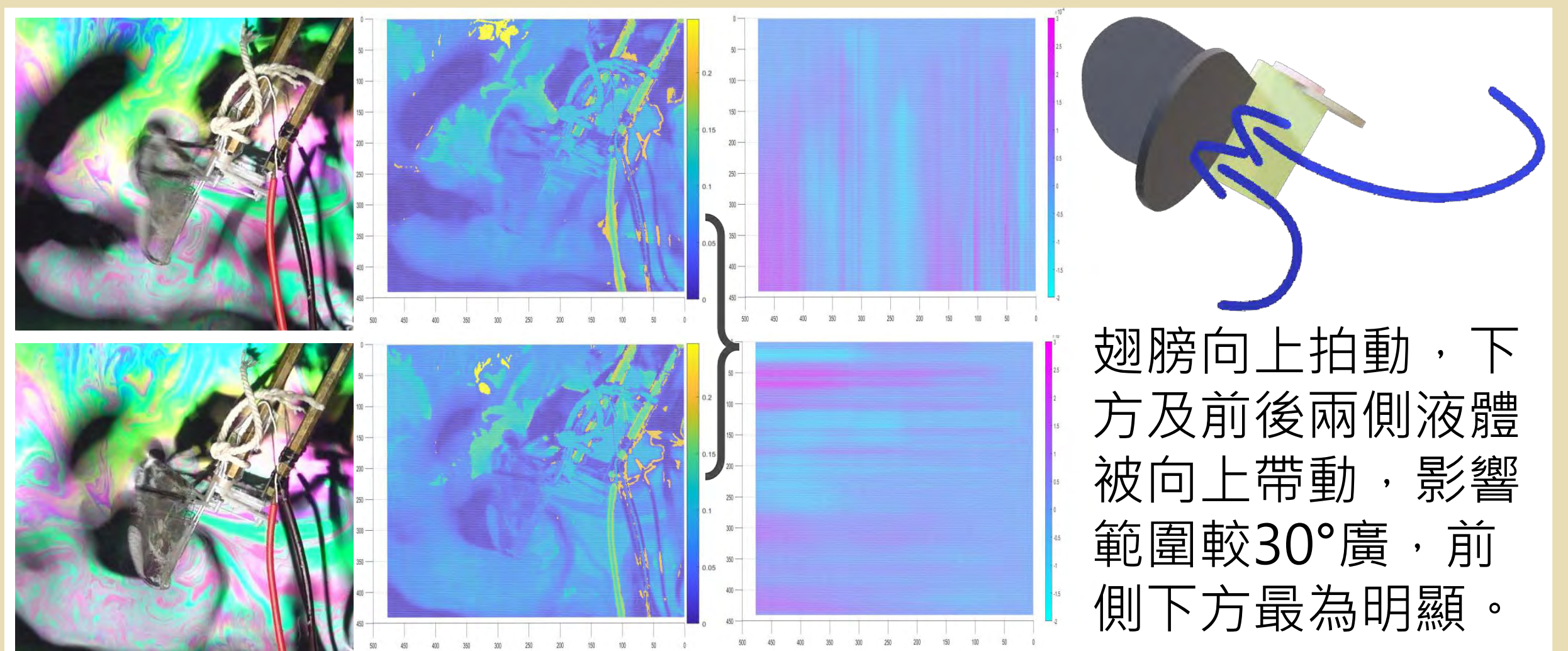


翅膀向上拍動，下方及前後兩側液體被向上帶動。

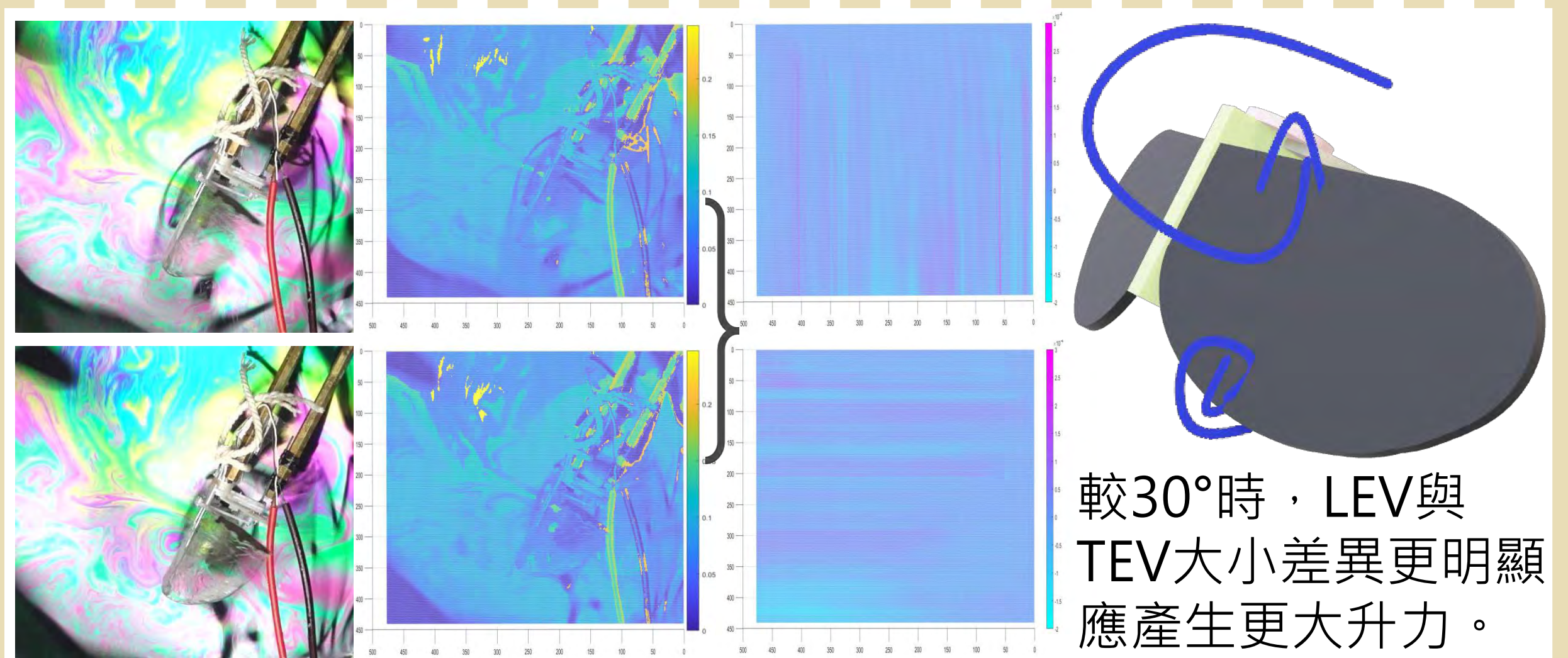


較0°時，LEV比TEV大一些，此時產生之升力應較0°大。

側向拍翅(60°)

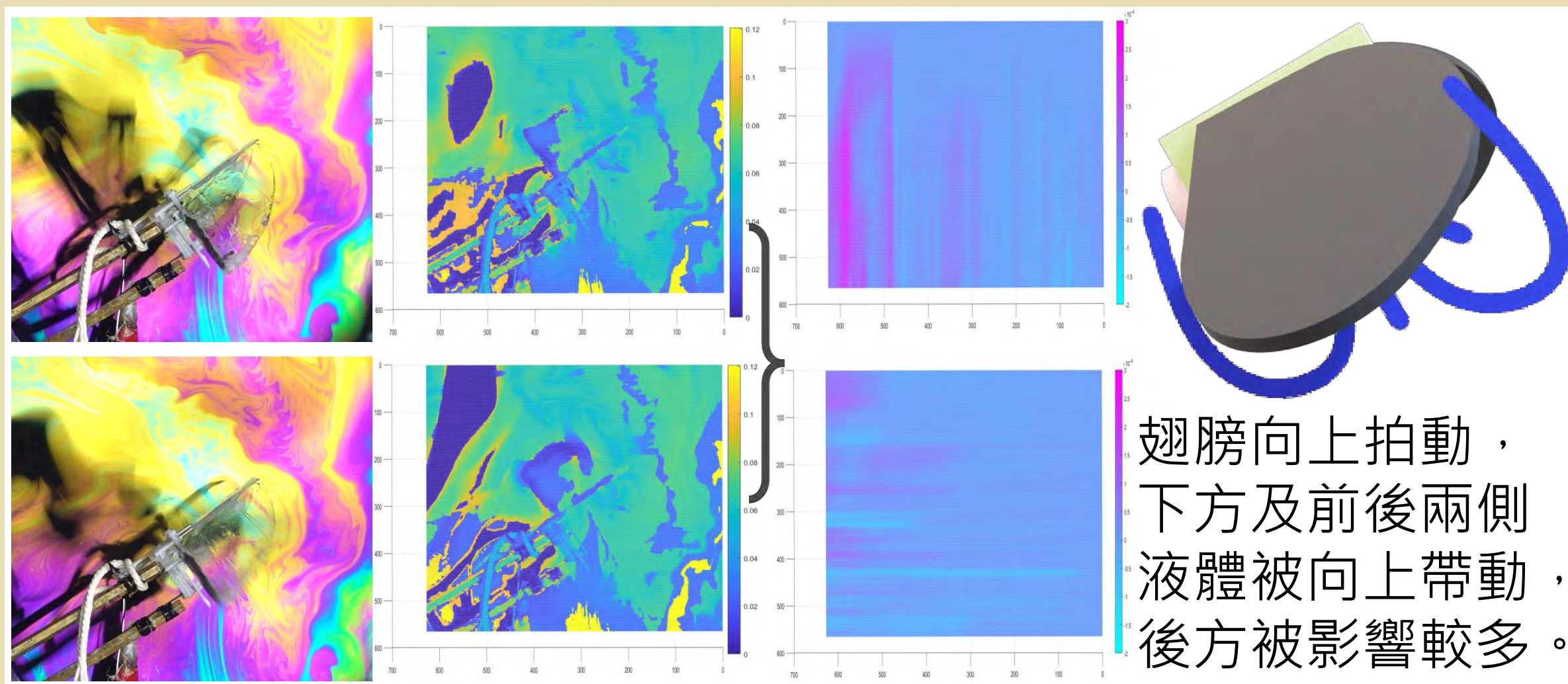


翅膀向上拍動，下方及前後兩側液體被向上帶動，影響範圍較30°廣，前側下方最為明顯。

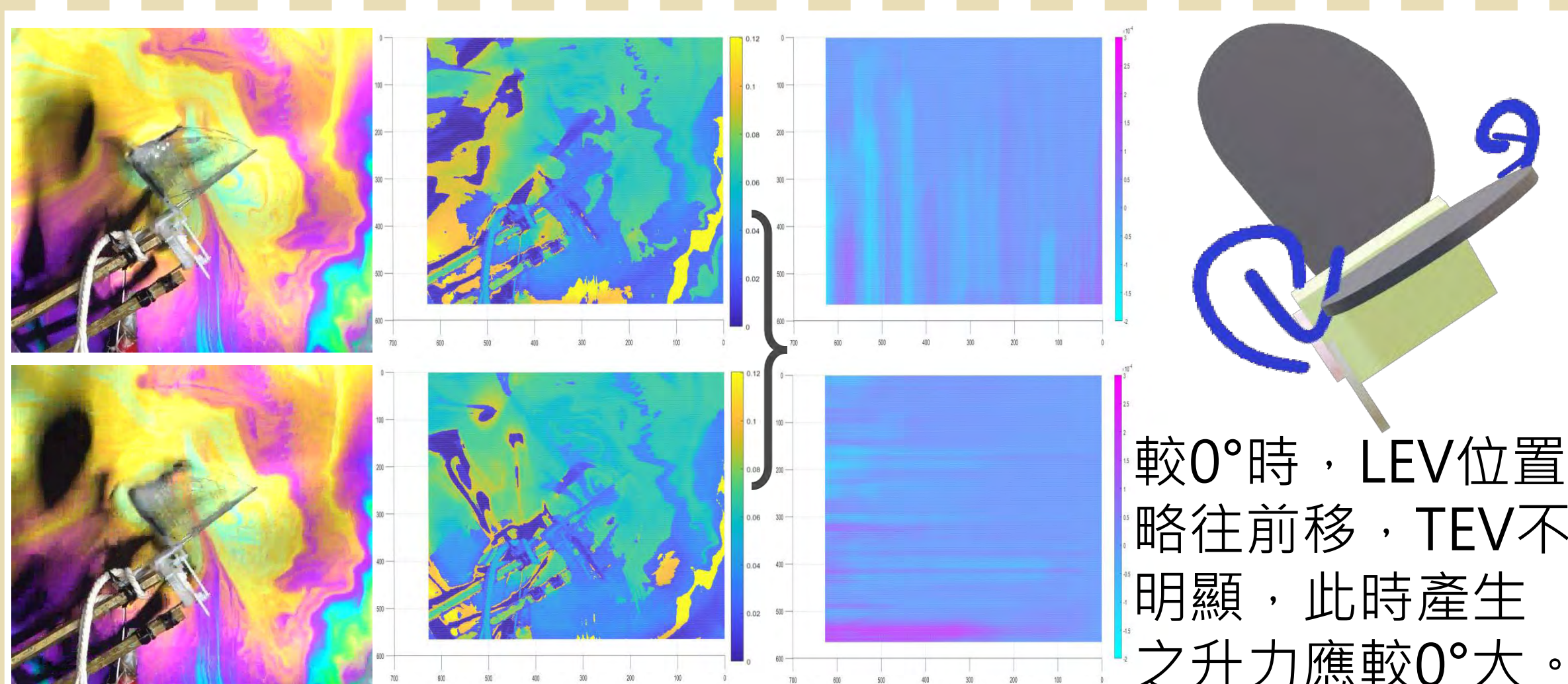


較30°時，LEV與TEV大小差異更明顯，應產生更大升力。

側向拍翅(-30°)

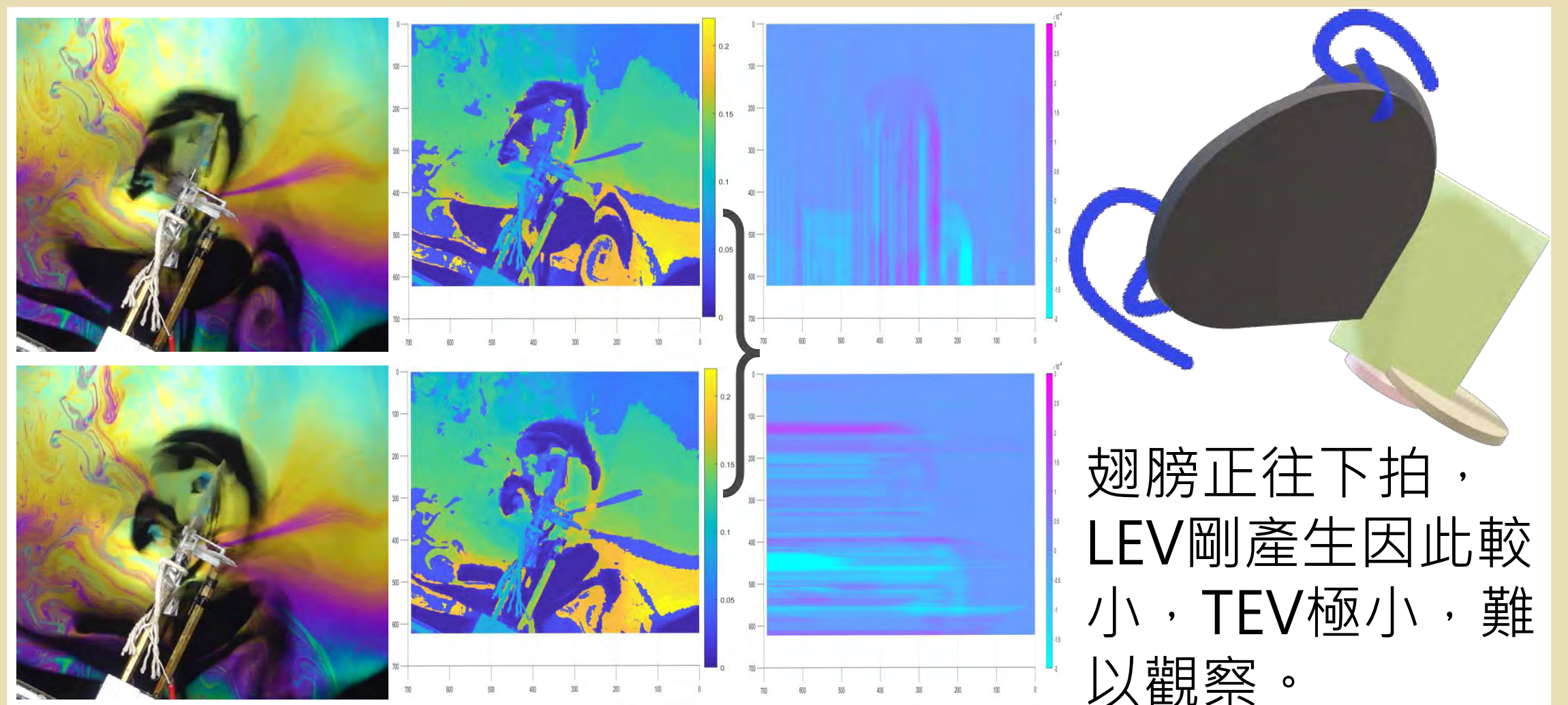


翅膀向上拍動，下方及前後兩側液體被向上帶動，後方被影響較多。

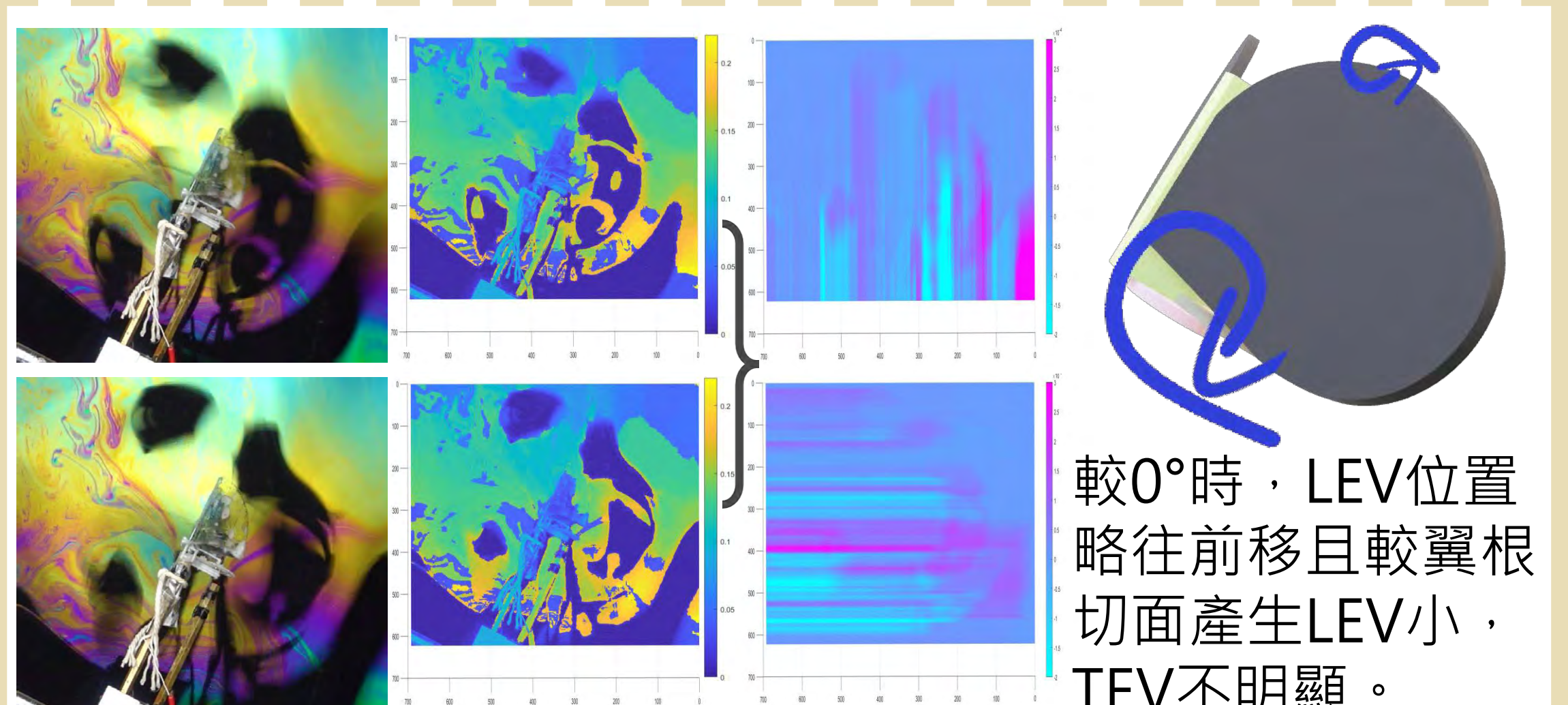


較0°時，LEV位置略往前移，TEV不明顯，此時產生之升力應較0°大。

側向拍翅(-60°)

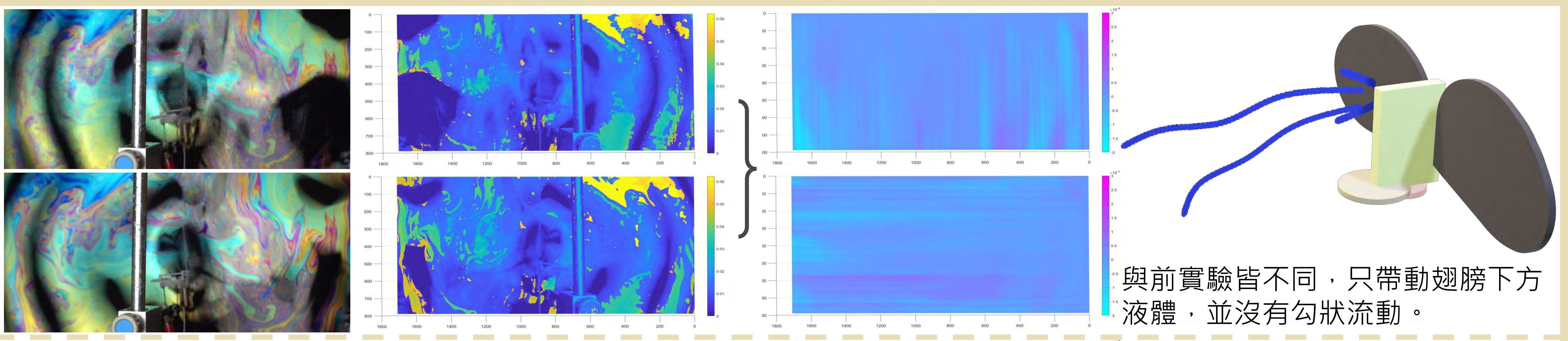


翅膀正往下拍，LEV剛產生因此較小，TEV極小，難以觀察。

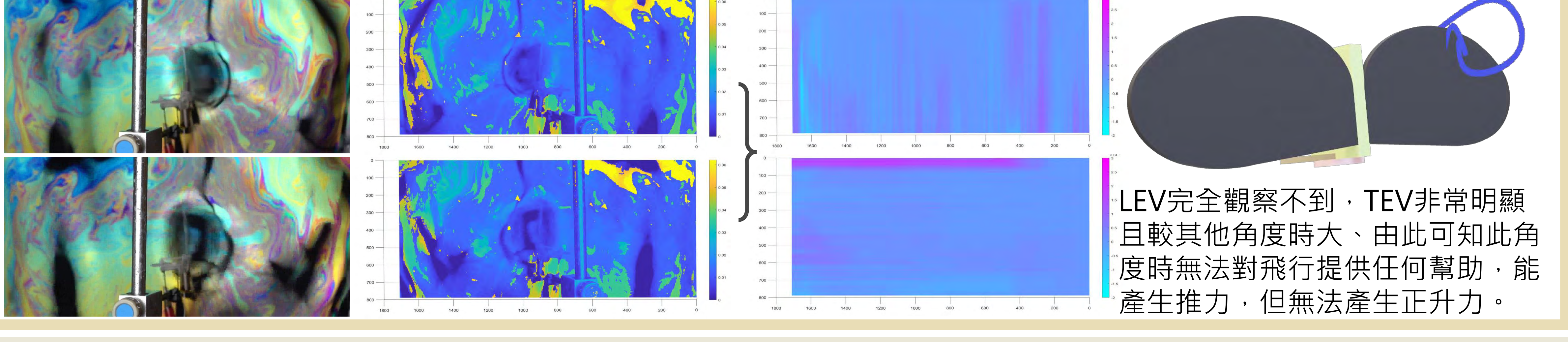


較0°時，LEV位置略往前移且較翼根切面產生LEV小，TEV不明顯。

側向拍翅(90°)



與前實驗皆不同，只帶動翅膀下方液體，並沒有勾狀流動。



LEV完全觀察不到，TEV非常明顯且較其他角度時大，由此可知此角度時無法對飛行提供任何幫助，能產生推力，但無法產生正升力。

伍、結論

經實驗得知，吾人調配出的肥皂溶液之動態黏滯係數為 $2.33 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$ ，其恰與 20°C 空氣數量極相似，並完成泡膜厚度流量分析，觀測拍翼機懸停及滑行之時產生之渦流。使用泡膜法進行流場分析，觀察顏色改變，因光波長以奈米為單位，因此可得奈米級觀測結果，相較於煙流法可得更精確之研究結果，且實驗成本較低但受測物大小受限於泡膜大小，未來希望能進行實驗使用環形泡膜避免邊界條件之影響，並藉由目前實驗結果改進拍翼機再進行實驗。

陸、參考資料

- [1]黃柏銜與蔡宗翰與魏禕良 (2013) • 昆蟲拍翅的氣流研究 • 2013年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。
- [2]溫志湧與郭威伸 (2006) • 二維網格紊流之實驗分析 • 科學與工程技術期刊第二卷，3，85-93。
- [3]黃心綸 (2014) • 二維準定常拍翼流場及其泡膜顯像(未出版的博士論文) • 臺北：淡江大學機械與機電工程學系。
- [4]苗志銘與戴昌賢 (2008) • 拍翼式飛行器之研發與製作—子計畫四：拍翼式飛行器之氣動力特性模擬與分析研究成果報告(精簡版)。
- [5]康耀鴻與馬榮華與李威廷 (2011) • 撲翼飛行器發展及其驅動機構 - 文獻回顧 • 工程科技與教育學刊第八卷，4，623-641。
- [6]嚴凱傑與朱柏憲(2009) • 製作奈米的肥皂泡膜 • 中華民國第49屆中小學科學展覽會作品說明書。