

## 第九場 『仿生減阻與推進』(2007 年 04 月 29 日)

國立高雄應用科技大學機械工程系 黃盈嘉 紀錄整理

主持人 Technology Innovation 葉仁杰 CEO：

大家好，今天很高興能夠來到國科會辦的周日閱讀科學大師的活動，科學好不容易今天有這麼大的進步，每個人都有這麼大的貢獻，我們知道科學的起緣是從對於環境的觀察，比如說我們唸物理的時候，第一個定理是牛頓被蘋果打到的動力學定律，今天我們主要的題目是在講說，生物界對我們的影響，今天我們很高興能夠邀請到成大的教授，陳政宏先生，他是文武

雙全，從建中到台大，一路走來都很順利，可以看出他在學術界是非常有成就，今天要以力學的觀點來告訴我們生物界能夠給我們什麼啟示，如果要創造新產品，要如何利用生物效率，以有效果的方式設計系統，我們以熱情的掌聲來歡迎陳政宏教授的演講。



演講者：國立成功大學 系統及船舶機電工程學系 陳政宏 副教授

謝謝，各位大家好，今天很高興大家能來聽這場演講，在正式開始之前，要先跟大家說一下，因為投影機的關係，影片效果可能不是很好，等一下的照片可能不是這麼清楚，另外我想問一下，現場還是學生的舉手一下，大專生請放下，我們今天要談仿生減阻與推進，這邊有兩張圖片，我們先簡單講一下題目的意思，怕有些人誤解，「仿生」



是模仿生物的意思，而「減阻」指的是減低阻力，而「推進」是指利用任何方式讓生物前進，它們有什麼關聯，我們來看一下，他在什麼地方需要，第一，在流體當中不會動物體可能需要，像植物，颱風來的時候可能會把樹吹倒，連根拔起。他的阻力很大，所以風大的時候，施加在樹上的壓力的大，雖然有些樹的葉子，本來是張開的，但風大的時候他會折起來，因此當風吹過時，阻力就變小了。這種情況比較少，但情況比多的是像生物，如魚、鳥、包刮人之類的生物，人類所製造出來的交通工具，潛艇、飛機、船，如這張照片，是非常有意思的。

在蘇澳港，剛好有大中小漁船排在一起，滿好玩的，還有在物體中流動的流體，也在這個範圍裡面。像氣管，我們呼吸或睡覺的時候，會打鼾，氣體流動時進入鼻子進入肺部的過程裡面，這都是一個流體力學的問題，有些人可能因為呼吸道比較狹小而造成阻塞，我們呼吸需要一定的空氣量，也就是說吸進去的空氣速度要更快，根據柏努力原理，壓力變低，就把我們氣管附近的組織拉出來，開始變成震動量，像水管也是一樣，平常開水龍頭開到某個流量的時後，會發生震動量，這也是水管常碰到的問題，我們的血管也是一樣，現在很多人有血管疾病，心臟病中風等等，這些都是血管的問題，大家也都聽過，可能膽固醇過高，或血脂肪太高的時候，很容易血管淤積，而產生問題，這也表示說，我們血液在流動的時候，也必須減低阻力，對我們人類來講，流體是無所不在的，我們生活在流體裡面，大家每天呼吸空氣，下雨的時候不但有空氣，還有水跑過來了，我們的身體裡面也是有空氣，有血液，有水在流動，在來我們動物在移動的時後，常常希望能夠節省能量，透過節省能量，達到能量的使用效率，我們就比較容易生存。

因為花一樣的力氣，我們能比別人作更多的事情，像剛剛提到的血管問題，我們身體移動時所遇到的減低阻力或提升效率，我們人造交通工具，或學術一點，我們稱為載具，不管是有人還是無人的，飛機、火箭、或太空船，這些大家都很清楚，那有人知道這些是什麼東西嗎？讓大家看一下，這是一台無人遙控的深海機器人，或稱為無人載具，目前是石油工司用的最多，像上次仿寮那邊，地震維修也派了這機器過去，這東西我們也需要考慮。我們看到這個不像潛艇或太空梭這麼流線型，其實它阻力滿大的，阻力大在其他國家，可能不會有太大的問題，但在我們這邊，可能是個問題，大家可能聽過海軍有配備一隻專門掃魚雷的魚艇，它上面有配備類是這樣的無人載具，在國外可能無問題，但在台灣海峽可能又是一個問題，台灣海峽冬天的時候風浪很大，又加上黑潮過來，因此在某些地方海流速度非常的快，國外的一些商用的水上載具速度可能就不夠快，因次有人開玩笑說，有可能還會被沖著跑，有動力螺槳也沒用，這告訴了我們減阻的重要性，那今天我們所講的仿身減阻與推進，一般來說，歸屬於工程問題，如機械或流體力學，而仿生學又跟生物有關，

今天我們說當工程跟生物學相接觸的時候，有幾個特性是不會改變的，一樣的會遵守一些物理的原理，傳統的生物學常常在研究是生物的結構、型態、類別或生態的問題。那都是一些有趣的問題，關於最近大家聽的，可能是一些生物有關的分子生物學領域，像基因、基因改造、複製生物等等這些，分子生物學其實 20 世紀才開始，特別是 DNA 結構的確定和技術確定以後，在 20 世紀才開始，但大家要有個觀念，就是它不是生物學的全部。還有很多其他的東西，那傳統生物學所講的東西，特別是偏物理的部份，常常被忽略掉，所提到的通常是化學，身體裡面的物理比較少，除了眼科，是因為光學的問題。跟骨科，骨頭負載跟運動有關，比較牽涉到力學，其他部分好像相對來講，比較不受重視，但其實裡面有很多有趣的東西，但看起來其實兩個碰在一起，好像是一個跨領域跨學科的問題，但所有跨領域跨學科都有一個特性，第一個，兩個或兩個以上的領域結合，通常會產生新的機器。或用舊的方法、舊的機器會產生出新的用法，這就會是一種創新，或是發明，另外一種，他並不是把我們既有的東西，或用過去的知識，很可能在溝通的過程裡面，構成一種新的東西，這就是跨領域跨學科的一個非常特別的地方，接下來我們開始進入主題。

剛剛很多地方都討論到需要減低阻力與增加推進，那讓我們先來看他背後基本的原理，首先，我們先來談阻力的部份，不管我們怎麼動，一般來說阻力的分類，我們以它科學機制的種類不同而造成的，第 大類就是所謂摩擦阻力的部份，平常東西與東西之前，即使是兩個物體，都會有摩擦阻力，而今天將其中一物體換為流體，也就是流體與固體有相遇速度的時候，一樣有摩擦，主要是因為流體有黏滯性

存在，這是大家都相當了解的地方。當摩擦的時候，也就是流體靠近固體表面的時候，很可能它的速度就會減少，減少之後就會產生一個邊界層的東西。這東西如果比較專業一點，可能到大學都還會提到，不過這東西的概念比較容易了解，我們先來看到左下角這張圖，看到這張圖的線條，這是一個立體的圖，因此大家想看看，這個地方是個平面，就像大家手上拿著一張紙一樣，而水流是從這方向往那方向移動過去，所以現在可以想像說，現在手拿一張紙這樣一吹，風這樣吹過去，然後呢，這是科學家研究出來結果，如果我們在這個紙上面，每固定一個地方，標一垂直線起來，大家看這細的直線，這是往高度的方向，就是跟平面垂直這方向，然後他們想辦法去量測空氣的分佈，和流過去的水流速度等，我們就畫這張圖，有好多條虛線的紙張，這代表說，離速度越近的地方，他表面就越低，越離開水面速度越高的地方，他的速度就越高，摩擦的地方表面速度會減少，這是一個很重要的特性，這東西不只是會發生在我們講的物體上面，有相對速度，譬如我們剛剛講的，即使是像這棟建築物，風來的時候這棟建築物外牆表面也是這個樣子，有的東西可以很小，但一樣有類似這樣的現象出現。

事實上，我們觀察到最大的邊界質就是我們的地球表面，當風吹過來的時候，他邊界層的厚度大的話可以有 67 公尺，小的話可能不到一公分，這邊有一堆看起來怪奇怪狀的線條，這是什麼東西呢？一開始的科學家發現速度的分佈是這樣子，後來觀察技術比較進步以後，科學家發現在很貼近物體表面的地方，大家看到像這個樣子的線條，他會變形，這線條我們想到渦漩的中心線，流體的速度會讓你捲起來，從下面往上捲出來，從這條線越往下就越越來越像馬蹄形，到這邊速度過大就跑出去了，渦漩形狀又恢復到跟這邊一樣，越往下游走形狀就會跟著改變，週而復始，而且只要有個地方有，到處都會有，這東西人類了解到現在，也不過三十多年，邊界層這理論大約也只剩有一百年左右。一百年中從發現邊界結構到現在這麼強，是經過不少時間，進步並不是很快，因為流體力學是一個比較難的問題，像大家可能看過一本書，叫費曼流利，是一個物理學家，諾貝爾獎得主，他們會覺得古典力學，也就是現在的相對論、量子力學這些東西，還有一個問題沒被解決。那就是紊流的問題，所以在 20 世紀初，在量子力學發展之前，最先端的討論都是在討論流體力學的問題，關於流體力學的方程式，在一百多年以前已經被發現了，但人類卻一直找不到解，一方面也是數學的問題。

接下來我們看，第二種阻力的來源，我們稱為壓差阻力，這可能大家就比較少聽過了，他跟摩擦阻力一樣，是我們大部分阻力的來源，壓差阻力簡單來說，就是我們在移動物體，它前後的壓力不一樣所造成的，我們舉棒球當例子，今天王建民要上場，他伸卡球很厲害

大家都知道，基本上流體力學是伸卡球唯一一個機制。其它變化球也都是流體力學的機制造成的，雖然今天不是在講變化球，不過如果各位有興趣，我們可以會後討論，我們舉棒球當例子，假設棒球是往這方向移動，那前後的壓力差會造成阻力，也就是說如果前面跟後面給他的空氣是一樣的，那他就不會有反應，那如果前面比較大後面比較小，那麼會感覺到有力量的阻擋你的球前進，這我們就稱為壓差阻力，這是因為包括空氣在內所有流體，都有所謂的黏滯性，我們不要以為只有油那些黏稠的東西才有阻力。我們喝的水，吸的空氣都有黏滯性，只是大小不一樣，這黏滯性會造成剛剛講的邊界層，既然叫邊界層，就是沿著物體表面薄薄的那層東西，從這個實驗照片我們可以看到說，如果我們在上面放上紅色染料，這個氣流的軌跡會像是這個樣子，你可以想像在黃色線跟流體會有很多的邊界層，這邊界層流到這邊還很順，你們可以看這張圖，黃色後面的線就亂掉了，這個稱為跡流，這個跡我沒寫錯，不是激動的激，是足跡的跡，足跡是說我們走過去，後面會留下痕跡，我們將物體流過去，後面留下的區域稱為跡流，這個區域通常是紊流，為什麼會這樣子，

因為邊界層會產生一個現象叫做「剝離」，剝離也就是從物體表面分開來，他原本跟物體是一起的，卻在這邊這個地方分開來，分開來這邊是一個低壓的區域，剛剛我們講過變化球，跟邊界層有很大的關係，他會影響到壓力差的分佈。接下來我們來看阻力跟摩擦的部份，只要是任何會移動的東西都擁有這兩種阻力，剛剛提到的邊界層，有個小故事可以跟大家說，大約在 100 年左右，發現的人叫 Prandtl，德國人，可能是 20 世紀最重要的力學大師，德國哥廷根有個小鎮叫多尼根，它是一所大學，Prandtl 就在那邊渡過他的後半輩子，這地方非常重視學術文化，這大學設立了好幾百年，是前四大的名校非常有名，且區民非常尊敬這些科學家或對文化有貢獻的人，偉大的數學家高斯，他也做過非常偉大的天文研究，包括數學上的黎曼、愛因斯坦等有名的物理學家，也都在這邊待過，他們也紀念歌德之類的文化大師，一直到現在還是德國航太重鎮，在流體力學方面這位人物跟這個地方都是很重要的。

再來我們看第三種阻力，不一會出現，有時候會出現，我們稱它為「興波阻力」，簡單來講，就是會造成波浪的阻力，我們來看到照片上這兩艘船，不一樣的船型，不一樣的船速，後面製造出非常漂亮的波浪出來，中間可能還有一些白色泡沫，這艘船跑比較快，所以白色泡沫比較多，有很多漂亮的波浪，但其實製造波浪是需要能量的，像海嘯等等，所需的能量非常的大，那波浪的能量哪裡來？那是由於船在行走的時候由一部份的動能貢獻出來製造波浪，這對船來講是不好的事情，能量如果都能拿來前進當然會比較好，有波浪的話，就等於把能量花在這邊去了，而造成阻力，這個阻力剛剛有提到，並不一

定會出現，只有在水面上才會出現，也就是要有流體的界面才會出現，有兩層性質不一樣的流體才會出現，波浪看起來很漂亮，但他有一定的規則，研究所會用數學來證明波浪的角度，我們來看另外一張，剛剛可能會覺得是局部而已，其實不是，這張照片是在目前最高的建築物上面，最高的建築物不是台北 101，101 是世界上最高的大樓，這棟建築物是在加拿大多倫多的電視塔，電視塔上面沒住人，只有一個電梯，上面有餐廳而已，從 500 公尺的瞭望台看下來的安納月湖，這邊有一艘船在跑，這邊也有一艘船在跑，這照的不是這麼清楚，船已經很遠了，白色泡沫也很短，而這張照片是用衛星拍的，Google 有提供 google2 的衛星照片，將衛星照片拼湊起來，可以免費上網下載。

這張照片能不能看出這是哪裡？這是一個港口，台灣的基隆港，這邊是出港的地方，火車站在這個方向，這是和平島，我們看到這裡有一艘船，白色泡沫很清楚，白色泡沫後面那塊藍色區域，這現象在衛星上面都看的非常清楚，事實上美國海軍花了很多錢去就這個問題，然後看看能不能從衛星看到這個，不管是可見光還是雷達波，能去判斷說這大概是什麼樣的船型，不同船型所造出來的區域不太一樣，這張照片也幫我們證實一件事情，中國人有句諺語「船過水無痕」，這是不對的，而是「船過必有痕」，有時候不是這麼明顯，有時候可能不是看的這麼清楚，速度快的話製造波浪的圖片就很明顯，速度慢的話，還是有，只是不容易看到而已，這就是第三種興波阻力的部份，在水面傳輸上比較常遇到這種問題，接下來，是一種更少聽到叫做「震波」的阻力，不曉的各位有沒有聽過前幾場蕭飛賓講的，他也沿用過這張圖，這是美國空軍 F18 拍的照片，剛好超音速的瞬間拍到震波，另一張是 F15 穿越超音速的照片，經過音速的時候阻力滿大的，生物大概沒有，只有人類製造的東西有這樣子，那我們看完四大類的阻力，剛剛的興波阻力不是只有船有而已，大家去看池塘裡面的生物也會看到這個波浪，這些不同的阻力都會構成我們全部的阻力，加在一起，我們剛講的四大類的阻力，會因為物體的比重不同，佔的比例也不太一樣，一般來講，摩擦阻力一直都有，速度變快，它的阻力變大了，但它佔的組成就比較少一點，而壓差阻力會比較多，這對於如何降低阻力是一個很重要的依據，既然減阻是這樣的話，那我們要想辦法怎樣減低呢？剛剛的成分有這些，那我們就想如何減低這些，第一個就是剛剛提到的摩擦阻力，跟我們平常在減低固體跟固體間的摩擦阻力是一樣的，用潤滑油去減低固體跟固體間的摩擦，那水和物體之間要如何減低摩擦阻力，我們利用比較親水或疏水的材料來做，疏水也就是遠離，讓水比較不容易附著在上面，如蓮花，常常講說出於泥而不染，是怎麼造成的呢？

請大家翻開今天發的科學發展月刊，這期的第 60 頁就剛好在講這個，大家有空可以看一下，裡面有解釋蓮花效應，就是說固體的表面可能有一些非常微小的奈米型構造，這在蓮花表面就有了，讓水不容易附著於上面，出於泥的時候水不容易附著於上面，污水就不容易附著在上面，所以我們可以看到一顆一顆的水珠流下去，所以它可以出於泥而不染，另外一種相反的，親水性才就是很容易跟水親近，那乾脆讓他完全附著於表面上，這兩種完全極端的作法都可以降低阻力，我們用這兩張黑白照片來說明一下，上面這張看起來水珠比較聚集在一起，這種情況是發生在比較疏水的時候，另一張他是比較親水的作用，表面張力無法完全將他作用，有些情況比較好的時候表面張力可以完全作用，讓液體變成圓球，當材料有疏水或親水特性的時候，會稍微改變邊界的厚度與結構，因此減低速度的部份有所變化，阻力就因此降低，第二部份，壓差阻力怎麼減少，如剛剛講的，壓差阻力邊界層可能脫離表面，前後壓力差很大，通常要解決這個方法，我們常使用流線型，或者利用其他方式使邊界層不容易分開來，像汽車，大家比較常看到，都是使用流線型，如高鐵一樣，車頭使用流線型，這樣阻力會比較低，不只是前面，後面也需要流線型，這樣才不會產生紊流，造成後面壓力差比較大，常常我們看到一些跑車，後面也是相當的平順，當然下面的部份比較不重要，他也是做方形的，這是控制邊界層的方法。

另外，講到高鐵，除了車頭用流線型減低阻力外，日本在設計 700 型時，他們還注意到阻力的問題，電車上面挖洞，可能大家會想說，跟廣告看板一樣，挖洞讓風通過，連這麼小的東西他們也很講究，上面還挖洞，一挖洞當然空氣就可以從中間跑過去，造成的效果就是說，本來一個這麼厚這麼寬的物體在那裡，他後面的激流寬度至少這麼寬，中間挖個洞，空氣從中間流過去，它就改變激流的區域，也是一種降低壓差的方式，那剛剛提到總阻力的各種原因，如果前後壓不一樣的時候，壓差阻力就會大很多，像高鐵，像跑車，他們都是屬於壓差阻力比較高的，摩擦阻力當然也有，不過如果要想辦法減低阻力的話，在壓差阻力下功夫，效果會比較明顯。

再來剛剛講過第三類興波阻力的部份，通常有三個方法，傳統像剛剛講的船製造出來的泡沫，有些是船首的地方把浪捲起來再落下去的時候，把水花的空氣帶進去造成的，如果船首的形狀修的比較正，那浪就會比較小一點，也就是我們製造浪的部份會比較少一點，在船的位置要好好考慮，前面比較擠，到後面慢慢變寬，再到後面又變擠，所以形狀很重要。第二個是人類偉大的發明，叫球型艏，在很多船上可以看到，如很多大遊輪，在水面下會有一塊突出來，本來想說越尖越好，但後來有人發現，當你製造這東西的時候，他會製造出一個波浪，會跟在這邊製造出來的波浪相抵消，相抵消的話波浪就減低了，

我們用這個特殊的裝置，他改變了流長的結構，讓原來會產生的波浪就消失掉了，另一大類，就是盡量減少跟水接觸的面積，如果能減少很多，那就能減少阻力，如少水面積的雙底船，排水的地方與接觸水面的地方會變的很窄很窄，上面會有比較寬的地方放東西或載人，離島的地方現在有很多類似的船隻，一方面減少阻力，二方面會比較穩，這張照片我要提一下，因為我們現在也在高雄，這艘船是中船建的，是到目前為止，全球華人做過最大的一艘，不管是長度還是噸量，其實最近大陸造船業也很發達，不過因為市場因素，也還沒造大這麼大的船，接下來我們來看生物的部份，生物要怎麼減阻？從物理學來看，我們看到生物實際上的減阻方式，第一個是剛剛說的減低摩差阻力，要怎麼減低摩擦阻力，通常是他的皮膚有一些特別的事物，如疏水或親水材料等等，簡單來講分兩大類，第一大類是跟鯊魚比較像，他們皮膚表面有一些特殊的構造，就像大家手中那本講的植物蓮花效應，這張圖是鯊魚的表面，他不像我們一般人工將表面磨到光滑來減阻，像加工成不規則面，那這些不規則面會改變我們的邊界結構，然後降低摩擦，另外一類就像海豚，大家可能比較熟悉，因為比較可愛看比較多，大家可以再電視上看到一層亮亮的，這是一層油脂，算是一種疏水性的材質，因此可以減低摩擦阻力。

再來我們看第二類，是減低壓差阻力的方式，剛剛提到說，形狀要流線型，我們來看到這張鳥類飛行的照片，除了翅膀以外，我們看到側面都是細細長長的，腳要飛行時都貼的尾巴，看不到，這兩張照片，這個是海獅，在水族館裡面拍的，平常我們看到它是很可愛的坐在石頭上，另一張有沒有人要猜一下是什麼動物，企鵝？對，就是企鵝，看起來有點像海豚，但事實上企鵝是鳥類，在水裡下游的哺乳類不管是海獅，鯊魚，海豚，跟海象，又或者是鳥類或魚類，生物演化到最後，他們游的形狀是非常像的，就是身體都是流線形，然後你們叫他是鰭也好，既然動物的類別是不一樣的，那就代表他們身理結構是不一樣的，他們骨頭的架構是不同的，哺乳類跟我們一樣，但下支比較短，鳥的尾巴跟魚的尾巴也不太一樣，但是基本的外觀是差不多的，因為這是他要減低阻力必然的方法，為了提高效率減低阻力，才能用最少的力氣去覓食或躲避敵人，不然就會被吃掉，也有可能形狀不好的已經被吃掉了，千百年下來，不管要怎樣，減低阻力是必然要的，剛剛是減低阻力的部份，現在我來看到推進原理的部份，一般來講要前進的話。就必須遵從兩點，第一是牛頓運動定律，作用力與反作用力這大家都學過了，另一個是動量守恆，守恆也就是說質量去乘以一個速度，會等於一個定值不變，像火箭噴出去的空氣，燃料等等，他有質量有速度，本來是不動的，但後來變成說那個方向有的動量的速度，為了要維持動量守恆，就必須以相反方向前進，所以我們可以看到說，很多推進方法都是利用這個原理，譬如說我的划槳，靠的是水的反作用力作用在槳上面，更進一步的說我們利用的是水跟空氣之

間的阻力，像帆我們風在吹就豎起來，他擋住風的前進方向，把風的動能轉成我們前進的能量，當然不只是這麼簡當，不是只有順風的時候可以前進的。

另外一個是噴射引擎，船的噴水引擎，最右邊這張圖是1960年在廣州拍的，用搖櫓的方式去前進，當然搖櫓現在沒有這麼常見，可能年紀比較大一點的小時候有坐過這樣子的船，搖櫓是對人類來講比較輕鬆的划船方式，因為它的推進效應可以比較高，但是他推進的原理是利用生物原理，什麼叫生物原理，我們等一下來看一下，生物的推進方法有很多，划水就像我們剛剛講的，鴨子划水，用噴射方式的也不少，像剛剛看到的水母，或者章魚魷魚之類的，雖然速度不快，但卻用噴射方式前進，如果是鳥類，就用鼓動翅膀的方式，這就是剛剛講跟生物原理比較像的，但其實他們所造成的結構原理是不太一樣的，像鳥或昆蟲有時候會停在空中不動，像我們剛剛看到的照片，有的懸空並不是真的停在花上面，有時候它是懸空在覓食，這時他的翅膀會造成像圖上那樣，像甜甜圈一樣的氣流，一環一環，而中間是往下的氣流，前進的時候由於速度不同，造成周圍的紊流，會導致後面氣流結構變複雜，這是屬於生命原理的部份，翅膀他是有個厚度跟特別形狀的，上表面根下表面的氣流或水流速度不一樣，上表面比較慢壓力就比較小，這原理在很多地方都可以用到，就像剛剛講的，搖櫓跟我們等下看到的例子，另一個擺尾的方式，這是比較常看到的，生物學常把魚類游泳的方式分為三大類，第一大類是像鰻魚這樣全身都在扭動的，從頭擺到尾的，這種效率滿高的，但比較適合低速前進的魚類，所以大家在水族館可能滿常看到這一種的，另外一種是下半身在動，那另外一種是像鮪魚、鯊魚等游的比較快的，他們最後面一段尾鰭的地方還在擺動，效率雖然沒這麼高，但可以達到比較高的速度。

生物推進的方式人類一直很好奇，有人看到鳥在飛就想飛，有人就去學裝翅膀，結果跳下來就摔死了，魚類游泳也是，狗爬式，蛙式，自由式，蝶式，現在有些選手仰式好就自由式反過來，他們在一出來以後先潛到比較下面去，並沒有浮在水面上趕快擺手，游到超過一半才開始浮起來，而蝶式就跟魚一樣動下半身，這很早就有人想去研究了，在1936年的時候，有個英國人叫Gray開始研究海豚，他去計算海豚每天吃多少東西，然後把這些食物的熱量計算起來，他就得到海豚一天當中吃進去多少熱量，然後扣掉生命維持所需要的能量，最後將海豚的模型拿到實驗室去量，看消耗多少，海豚游的速度大概可以測量出來，所以就在實驗室量流速跟阻力是多少，然後去計算需要多少能量，後來發現不得了，克服阻力所需要的能量竟然比吃下去的能量還要多，而且多到七倍以上，如果相差不多，可能世計算誤差或測量誤差，可是相差了七倍，有點不太可能，所以變成一個謎團，當然一定有科學解釋可以解釋的，只是當時不知道位什麼，所以後來才開

始去研究怎麼回事，這個謎後來慢慢被解開了。

簡單講，就跟我們一般機械原理學的一樣，游泳跟我們一般的機械原理一樣，效率不可能超過百分之一百的，熱力學第二定律告訴我們不可能有超過百分之一百的機器，有的話通常在騙人的，所以海豚怎麼辦到的，達到百分之七、八百的效率，後來發現，他確實需要很多的能量，但當他在動時的阻力大小跟在實驗室模型時不太一樣，這是他研究方面的誤差，第二個就是說，他推進的能量並不需要海豚本身，去燃燒身體的化學能，去儲存於身體的肌肉，或將甘糖轉為動能，不是來自於這些，而是來自於流體裡面本來就有的，這牽扯到生物的前進方式，如下面這個擺尾的圖，這是1969年觀察魚的流場所畫出來的渦漩，有壓力差就有推進產生，從上面看渦漩的形狀，渦漩週而復始，後面就會固定產生一個渦漩的形狀，這是假設在靜止的水流裡面的事情，他所要前進的能量都來自於魚自己本身，但實際上呢，於在游泳的情況不會有這種情形，水流在流的時候，比如說通過一顆石頭，後面會產生激流，會有很多渦漩的出現，所以在前進的機制裡面，這是成對的渦漩，或許他只要擺動一遍就好，另外一個渦漩水裡面就有了，所以他大部分的能量是來自於水裡面本來就有的動能，這就是謂何他能不費力就能游這麼快的速度，這機制是最近20年的事情，壓力差是怎樣，後面激流是怎樣，很慢才知道，我們的飛機很早就空中飛了，那後面的流場怎樣應該已經在風洞實驗裡面觀察的很清楚了，為何高科技的東西搞這麼清楚，而這麼小的東西搞不清楚？

我們要了解一個問題，做生物的研究不是這麼簡單的問題，他會動，先不考慮做研究要先通過醫學研究的審查，合不合人道的精神，有沒有倫理或道德問題，先撇開這些問題不看，我們要在實驗室觀察魚的游泳就已經滿困難的，他不會這麼聽你的話，舉個例子來講，這是麻省理工學院做的研究，他們在前面擺一個圓柱體，所以就會產生渦漩，他們把魚丟到水槽裡面去，讓魚游泳，可是我們觀察的設備，有攝影機跟雷射光，然後用兩個方向去看，一個正面，一個從下面去看它，雷射光打的位置跟攝影機拍的位置都是固定的，因此我們要等到魚游過來才能看到一絲畫面，那我們要觀察很多時間才有辦法去分析，如果是船或潛水艇就比較簡單，只要模型固定在上面就好，這就是為何做生物實驗這麼困難，這是他們觀察的結果，這是它們擺動的情況，紅色藍色是水裡面的渦漩，深淺代表強度，越深的代表越強，黑色的小箭頭是流體流動的方向，這是2003年的研究論文，最近10年才有辦法慢慢去了解，這是另外一個例子，可能大家會看的更清楚，將真的魚丟到裡面去，還要考慮怎麼養他，然後在水槽丟入觀察的顆粒，不能對他有毒性，還要在上面加裝網子，以免不想游或游到沒力了被水沖走，然後捲到螺旋槳，所以觀察上非常辛苦，攝影機架設的位置觀察尾鰭擺動的情形，然後從三個不同的面，水平垂直跟徹

面去看，尾鰭動的結果，黃色的箭頭是製造出的流長速度，從速度箭頭可以看到，這邊可能有渦漩的出現。

將結果用示意圖畫出來，比較容易懂，鰭在擺動會產生渦漩，不同方式產生的渦漩就會往下游跑，往下跑就會碰到尾鰭，所以我們剛剛提到尾鰭在擺動時怎麼產生速度的？有一部分是利用前面已經製造出來的渦漩，再加以利用，等於能量會被回收再利用，但若完全不相干，就各自獨立，那他效率到底多高？在 2006 年的論文中終於有人研究出來了，這邊有四種顏色四條線代表四種不同的鯨豚類，他們的效率大概 0.75~0.9 左右，大部份的區域大概 0.8~0.9 之間，橫軸是與擺動頻率跟參數有關，也就是在不同的情況下效率都有 0.75 以上，為何 0.75 很高？大家應該知道沒有 100% 的機器，有時候扣掉一些摩擦損失，可以到達 95%~97% 這麼高的效率，不過那可能是馬達之類的東西，用來推進的東西，像機車的引擎，只有 35%~45%，現在好像還沒聽說有超過 50%，所以我們車子燒這麼多的化學能，真正去推動車子的不到一半，鯨豚類最大能量可以達百分之九十左右，這張圖同樣的四種動物，顏色一樣。

橫軸我們稍微看一下，叫推進係數，就是推力跟速度的比，縱軸一樣是效率，這條件作一個代號，這是我們一般人類用來推進船的螺槳，單一個螺槳跟葉片，看到我們在不同的情況下，最高效率只到 0.7 而已，這是目前人類螺槳科技的極限，稍微偏離最好的狀況一點點，效率馬上低下來，可能只有六成五成而已，如果設計會製造不好，可能只有 50~60%，甚至有 40% 的情況，跟船的推進力來比，鯨豚類的效率很高，再來我們看另外一類，昆蟲，因為在空氣中飛，所以也不好做研究，也是最近才搞的比較清楚一點，之前利用高速攝影機去拍攝它翅膀的振動，像蜂鳥振動之快，每秒振動幾千次的，我們現在才有這麼高速的攝影機，能夠去看的比較清楚，那昆蟲應該沒這麼快去看清楚，剛剛講於在實驗室不好研究，那昆蟲就更難研究，近十年來昆蟲的研究才比較清楚一點，方法通常是抓一些昆蟲來，然後把腳黏在白色桿子上，然後擺在風洞上，用風去吹他，這樣的話就比剛剛的魚好一點，至少可以固定他在某一個地方，然後用高速攝影機去拍，觀察他運動的情形，這是他擺動的方式，紅色是他下去的時候翅膀的相對位置，藍色是轉一個角度提上來的位置，這跟我們游蛙式有點類似，再推出去跟縮進來要不一樣才行，完全一樣阻力也差不多，往這方向的力量跟往那方向的力量一樣，那就不會產生前進的力量，所以兩個方向要不一樣力量他才能得到前進的力量，其實最近研究才發現，他不只是生力的問題而已。

這兩張是電腦模擬的，他們觀察到用類似的材質去震動，用電腦模擬的方式去算，藍色紅色的是渦漩，黑色的是他的翅膀的狀況，後

面那張照片大家可以看到，蝴蝶很漂亮，會忽上忽下忽左忽右，我們直升機也沒他這麼厲害，怎麼做到的，一樣，想辦法去控制渦流的流長，跟魚在擺尾是一樣的，剛剛提到生物會利用渦流，可是他怎麼知道渦流在哪裡？多大多小？他一定要能知道，才能相對的去吸收能量回來，生物就是有像我們皮膚一樣去感應一些東西，我們跑步的時候不會思考怎麼去跑，上樓梯的時候也一樣，去想腳該怎麼動，他就自然會動了，可是機器人直到前幾年才會爬樓梯，走已經很久以前就會走了，可是爬樓梯，要到前幾年才做的出來，生物有時候很奇妙，像剛剛講的船過水有痕，水中動物在捕食的時候，他怎知道前面有食物可以吃，像海獅海豹長長的鬚鬚據說就是有這種功用，前面有食物游過去時候造成小小的不同，他的鬚鬚就感應出來，追蹤著痕跡去跑，據說這是其中一種方法，至於怎麼感應的，這可能就較偏人工智慧，再來我們看人類的部份，我們做了些什麼。我們從模仿，和減阻的部份，第一個，表面構造剛講過，你改變邊界的構造可以去剪阻，所以我們可以學鯊魚，這是人工可以做出來的表面結構，像這樣，中間有突起來，寬度可能是零點幾個 mm，所以並不是要小於向奈米等級，鯊魚減阻我們稱為微毫溝的方式，這些表面結構會造成我們邊界層的改變，我們來看這兩張圖，橫軸是距離固體的高度，縱軸是速度大小，很多點是實驗結果，我們用一條線來代表他光華平板的狀態，如果我們加上這種東西以後，就改變了上面的狀況，所以速度就變高了，速度提高以後，也就是摩擦造成的量比較少，所以我們阻力也沒這麼大。

這是放大以後看的，那我們從另外一個角度來分析，左邊這張圖的縱軸是能量大小，橫軸是頻率，紊流的渦流裡面的頻率，那我們在平滑的平板，紊流的流量是這麼大的，加上這能量之後，他在某個範圍的能量就變小了，也就是說我們讓他產生紊流的部份就比較少，也就是我們沒有耗費能量去產生流體的紊流，當然效率會比較好。這是第一個減少摩擦阻力的方法，模仿生物表面的鯊魚結構，所以有另外一種東西出現，叫做鯊魚裝，喜歡游泳的人可能知道，從 2001 年雪梨奧運開始，國際游泳選手穿的就是鯊魚裝，之前減阻的方法是盡量脫光衣服，讓皮膚直接接觸水，減少摩擦阻力，但是我們的皮膚還是不夠好，畢竟我們不是海豚，不會分泌油脂，所以開始改用沙魚裝，他是由特殊纖維造成的，所以表面有些像鯊魚的皮膚結構，能夠讓我們的邊界層改變，所以鯊魚裝通常是連身泳裝，從脖子以下開始包到腳，甚至於帶的泳帽也要考慮一下，雖然姿勢的影響比較多，但對於一流的選手則差很多，往往差一個手臂就是冠亞軍之分，所以差個一點點效果就會表現出來，這是減少摩擦阻力的部份，那請問各位有沒有什麼問題，或剛剛有沒有什麼聽不太懂的？可以先問一部分的問題。

Q1：想請問關於搖櫓的身翼？

A：這就比較複雜一點，機翼的身翼大概就比較能了解，他就固定一些位置跟形狀，他空氣這樣流過去，通過上表面跟下表面可能比較不太一樣，那搖櫓，櫓是在動的，他動的時候要轉方向，轉方向也剛好配我們船在前進，往一邊擺的時候有側方向的力量，船在前進櫓也是在前進的，水相對於櫓是斜著進來的，其力量的分力其中一部份就貢獻於船移動的方向。

接下來我們看一下剛剛講的泳裝，第二個方法，有人想到用柔順性的表面，一般來講船都是硬梆梆的木殼，那他們想到海豚會減阻，是否除了他們分泌的油脂外，是它們皮膚構造的問題，因為他們的皮膚都是軟的，所以有人想到是否可以利用軟的物體，如彈簧這類的東西，當邊界層留過去的時候，邊界層其實是紊流，裡面有渦旋忽大忽小，這時候由於很軟所以就變形，那一變形就造成流場結構跟著改變，這是另一種去改變構造的方式，不過這個很難研究，這是一個流體跟固體耦合的問題，因為固體受到流體壓力時，引響它就會變形，一變形以後因為形狀改變，又引響了流體的流場，所以互相影響的交互作用，比較簡單的是固體的問題，如飛機，停在地面時會變成這個樣子，在高空時會變成這個樣子，會往上面翹一點點，又或者房子在地震時會搖晃，而船受到壓力的影響他也是會變形的，雖然比較小一般看不出來，這是流體跟固體非常複雜的問題，也許以後是一個研究的方向，有人想到一個放式，這方式如果太被動，我們可以換一個主動一點的，我們主動去調整下面的一些控制機構，去改變形狀，看能不能改變流長，這些都一樣，很複雜，要知道怎樣改變才是對的，才能減少阻力，否則可能會增加阻力，然後在控制也要很適當的去控制，然後感測出現在的狀況，所以我要用什麼方式？

這方面也是很困難。另外一種比較簡單，可能是塗料的部份，就像是海豚表面有油脂，人類可以去製造一些疏水或親水的東西來降低摩擦阻力，這是我們系上的老師，根中正理工所在作的研究，他們用一些不同的塗料去比較，去限制原來的阻力。另一種是用動態，比如海豚分泌油脂，在我們的交通工具上分泌出一些東西出來，流到空氣或水裡面，像美國航太小組，曾經使用石油做實驗，他在機翼表面弄了很多小動量孔，並從裡面噴出空氣來，或同樣性質的流體，他在空中飛，噴出來的油是空氣，效果也不錯，另外一種是水裡面我們噴氣泡，這些氣泡會有作用，但要控制在比邊界層還小的某個特殊區域裡面，才比較有作用，能夠改變邊界層的構造，所以他不太好控制。

他船的形狀很特別，我們為了減低壓差阻力使用流線型，氣泡可能一下子就跑掉，要控制不是這麼好控制，所以效果從 0%到 100%的都有，再來另一個噴出來的不是氣泡，而是高分子聚合物，他們在船的表面上挖洞，噴出高分子聚合物，效果不錯，像圖上我們看到的減阻效果，有的不好，有的還滿高的，既然有比較好的效果，那就拿來用吧，但他還是不太實用，船要跑一趟這麼遠，今天如果是噴水的，從海水裡面吸一點拿來噴，或是空氣也可以，但高分子聚合物需要另外製造，所以要提高成本，也不知道對環境有沒有影響，環保問題也還沒考慮，所以這個目前只存在於實驗室當中。

再來我們看仿生科技的部份，就跟我們想要學鳥飛一樣，在海裡面也是一樣，想學魚游泳，看到游阿擺阿，好像真的很輕鬆，的確真的很輕鬆，效率這麼高，我們就在想我們的船隻能不能這樣，早在 1848 年到 19 世紀初 1929 年，英國美國就有想出方式，比如說一塊板子讓他上下動，或兩塊交錯的動，或像這樣，垂直的這塊是硬的，橫的這塊是軟的，然後硬的這塊挪到前面去，軟的用繩子去轉動，硬的這塊轉動，軟的就會向魚鰭一樣，雖然會動，但效率不是很高，就像開始人類學飛行一樣，一拍翅膀就摔死，結果不甚理想，我們為何想學鳥一樣，因為不管是現在的機車汽車，都很吵，這是一個缺點，機器太吵，像軍事單位美國海軍，特別有興趣，如果我們製造出來的交通工具不這麼吵，敵人就不容易發現我們了，所以要安靜一點，就比較難辨識。

另外一方面，就是希望他推進效率可以很高，我們剛剛看到，鯨豚的推進效率可以達到百分之七十，但其實了解作動的方式很困難，因為我們要了解如何作動的方式才是正確的，還沒搞清楚就去做，就會碰到問題。另外一大類，垂直螺槳，不知道這能不能稱為仿生，其實它是一個大圓盤，圓盤做垂直的轉動，從上面看像這張圖，葉片是深黃色的部份，他附著於一個黃色的圓盤上面，小的黃圓盤附著在大的圓盤上面，也會跟著大圓盤轉動，中間有連桿去改變角度，整艘船也會跟的葉片前進，一前就會變成這個樣子，這就是我們稱的擺線，上面的葉片調整適當的角度就會產生推力，如果我們把它的軌跡畫出來就像這個樣子，你看比較粗的地方就是葉片的形狀。那這樣做有什麼好處呢？這要控制好滿重要的，因為曾經有人做過研究，葉片在靠近漩渦的地方動，跟遠離漩渦的地方動，造成的結果是不一樣的，葉片一樣，速度一樣，只要角度的高低不同，效率可以差到一百，所以魚控制鰭是很重要的，所以這種擺動的效率可以到百分之七十，跟我們一般的螺槳是差非常多的。有人提出了鯨尾推進輪，因為看起來就像鯨魚的尾巴一樣，不過機器也還沒做出來，最早的是麻省理工學院所做的機器鮪魚，他們在實驗室裡面做出機構的樣子，那後來三菱重工也做了機器魚，三菱是很大的造船廠與軍火工業等，對機器人一直

有很高的興趣，所以才來做機器人，連外皮都模仿佛像機器人一樣，不像美國，看起來就是機器人的樣子，有人有提過將快絕種的魚記錄下來，在水族箱裡模擬，讓後代可以看到魚是怎麼擺動。美國海軍做這方面的研究當然有他的軍事用途，不管是徵查還是攻擊敵人，就像一條真的魚，誰會去注意，如果裝的是炸藥，游到你旁邊再爆炸，或是偵查，游到你旁邊偵查，你也不會發現，所以他們對於這個有著很高的興趣，技術也慢慢成熟，現在已經有一些遙控，或者不需遙控的水上載具出現。

目前研究的生物很多，比較人類跟生物之後，如果我們的尺度越小，敏銳度可能會越好，我們剛剛看到很多，奈米級、微米級的結構，這些就可能比較有前途，大的東西我們用工程去想可能比較好，生物學家最近也了解到說像我們看到海獅海豹，不同的生物有相識的效果，很多都是必然的物理定律、條件，造成我們必須這樣子做，也就是不同的來源，會趨向同樣的結果，表示很多環境會誘導我們走的方向，不管是天擇還是我們人類的發明，相觀甚遠，也不見得完全一樣，相異的地方其實也滿多的，雖然說仿生很好玩也很有趣，但其實人類也並不一定要完全仿生，自然的原則可以給我們一些典範，一些啟事，但未必永遠都是適合我們的，所以我們要搞清楚，它到底是什麼回事，什麼範圍不去用它，再來我們看到這麼多的仿生跟研究，我們發現說，以後可能要更了解力學原理，去控制方法，看製造一些精密的材料，可能要許多跨領域的研究跟合作，機械類的、材料、流體力學、甚至是電機類的，比如說我們系上的實驗室，我們的船要研究它的流場，結果我們用雷射光，牽扯到光學，用雷射光去量測又牽扯到影像技術，才有辦法把流場搞清楚，再來是流體力學方面的研究，其實現在很多東西要研究，是必須跨領域合作的，那仿生當然也是一樣，需要很多跨領域的知識，剛剛講很多減阻與推進都是機械類的東西，但我們需要很多生物方面，電機方面的知識，所以最後一點，題外話，時間也不多了，因為需要跨領域的知識，所以我們不得不思考我們過去受的教育，今天很抱歉在最後十分鐘跟各位講一個秘密，我是生物白痴，然後你們來聽白痴講的演講，為何會這樣呢？

因為高中分組的關係，其實大部分的人並沒有這麼明確的性向，哪個方面是非常強的，哪個方面是非常弱的，所以現在很建議，高中的時候不要這麼明確的分組，可以後續分流，有人很明顯的沒關係，就讓他去發展他強的地方，但大部分的人可能不是這麼清楚，我們不是跟人比較，而是跟自己比，看自己哪些科目學的好，哪些科目學的不好，那另外我們也需要比較多的背景知識，有的比較應用，有的比較基礎，那像我們剛剛看到的研究，缺很多應用可以馬上用到的東西，最近可能會用到的，那就去發展可能會用到的東西，那之前學的基礎夠不夠多，可能是關鍵，所以我們限在大學很多在講通識教育，

其實通識教育很多在講高中太早分流的後果，原本高中要學的東西拖到大學通識教育來彌補，多累，不是很好，其實大學通識應該教些跨領域的東西，所以現在很多人，修雙學位也是很好的事情，以已知的知識用到另外一個領域去，再晚到研究所再轉換跑道也不遲，我有一個朋友沒考過聯考，因為它是資優生，國中升高中，高中升大學都是保送的，建中保送台大物理系，現在他是音樂系研究所的教授，他大學的時候是我音樂系社團的同學，他寫毛筆字很好，繪畫素描很強，大學時候念物理系，後來去學崑曲、歌仔戲這些東西，那個社團是古典音樂的社團，唸研究所他去考現在的北醫大傳統戲曲，出國到德國唸書唸音樂學，然後他用振動的角度去研究為何聲音這麼好聽，為何樂器發聲是這個樣子，他現在是大學教授，他做了一個很好的研究所轉換跑道，但把知識融合，在國外這種例子非常多，甚至從自然組的跨到人文社會，都有，這可以帶給我們非常多的知識進展，所以當有一天唸到不想念的時候，不要以為是白念的，或許有一天會用到也不一定。

主持人：

大家可以看到，陳教授講論文講的很好，給我們一個很好的觀念，現在我們開放給大家來問問題，看有什麼問題，國科會準備了一些小禮物給提問的人，我們先開放給學生先發問，一個人發問時間大約一分鐘。

Q2：陳教授你好，我剛有三個問題就是，你剛阻力原理下方那個圖，我不太清楚你那是什麼意思，能麻煩教授能再更詳細的說明一次嗎？還有剛剛所講左下方的那個圖，要如何控制他，而用途用又是什麼？還有 power point 所提到，該怎麼拼麻煩說一下。

A：你是說剛剛左邊這一張嗎？這部份是一個平面，想像做像棒子一樣，在板子的不同位置，去量它速度，細線是他垂直方向，虛線是在這地方所量到的速度，離開板子越高，速度越快，離開板子越近，速度越慢，而右邊這邊可能比較難了解，在表現上面，流場會有一些小渦漩出現，我們畫曲線代表渦漩，用一條線代表渦漩的中心線，所以這是科學家看到的一個結構。然後第二個是垂直螺槳的結構，我們現在某些葉片，在圓盤上的某個位置，然後他會繞著圓盤走，但圓盤又整個會前進，所以他一邊轉，一邊又要前進，轉出來的軌跡就會像這樣，有時後轉的比較快就像這樣，由於前進速度跟旋轉速度不同的關係，所以軌跡會變成這樣不同的形狀。第三個問題比較簡單，poull powen，上網應該可以找到很多，不過因為有商業用途，所以需要授權。

Q3:教授你好我想請教兩個問題，第一個是一般人在觀察流體流速的時候，他必須用些道具不然怎麼去紀錄，另外想問關於人類在做鯊魚裝，是按照鯊魚的紋路嗎？還是有經過研究過這紋路，還是純粹模仿而已。

A：第一個問題關於說，怎樣測量速度，剛剛秀給大家看的是最新的方法，其實測量速度的方法有很多種，用很久的方法是拿一根管子，像飛機測量風速一樣，利用壓差的原理直接伸到流場去量，但任何伸進流場的東西都會產生激流，所量到的流場就不是這麼準，所以這個方法拿來研究是不恰當的，後來也有一些方法也是會伸進流場的，現在我們就不用這些方法，因為會改變原來的流場，特別是我們要研究這麼精細結構的時候，所以現在我們的方法是用雷射去觀察，因為雷射觀察不會改變它的流場，但是打進去水或空氣是透明的，看不清楚，就像我們現在在空氣中並沒有看到一束雷射光，有時候會看到是因為有些煙或灰塵反光造成的，一樣的道理，我們在水裡面或空氣裡面，放一些菸進去，這些空氣非常非常的小，也非常非常的輕，所以他會跟的原來得流場跑，不會去改變流場，所以雷射光打上去，這些東西會反光，這些東西有很多種，最便宜的如二氧化碳粉末，比較貴的如鍍銀的中空玻璃球，做成很小很小顆的都有，他的直徑可能只有  $1\mu\text{m}$ ，所以會有一個點一個點，所以雷射光拍下來背景都是黑的，但會有一顆一顆小小白色的點，將他照相起來，再用其他方式去分析，利用影像處理的時候去算速度出來，因為顆粒會跟流場移動，所以拍兩照片，並去比對這兩張照片，兩張照片的時間差是知道的，看影像去知道一顆小顆的顆粒它在這兩張照片上的位置改變多少，這通常要用數學的理論去做，這也是剛剛講的，要用到跨領域，比如附立葉轉換，或加一點人工智慧的東西，影像本身也要處理，有時候環境一些不好的，我們也需要影像的處理將它變好，才有辦法算出來，但做不好的時候就真的算不出來，另外，鯊魚皮應該是布的纖維，我所知道結構是比較規則的V字型，小的V字型，跟真的鯊魚皮有點出入，至於是不是最好的，就不清楚了。

Q4：請問一下陳教授，剛剛講到主動壁減阻法，可以做出這麼細微的機構，去干擾邊界層，那這個主動壁要放在哪裡？要多大才能有效的去干擾邊界層。

A：這問題問的非常好，因為不知道，剛剛講的很複雜，所以並不是很清楚全部的機構，當然在某個情況之下是知道的，有些很小的機構要用到微機電的技術，那微機電的技術線再做一些微小的泵，微小的齒輪，和微小的連桿，用這些東西組合，讓它可以動作，剛剛提到要有一些監控系統在前面，才能知到流場怎麼動，有一部份的微小機制是了解了，但不知道怎麼去控制，這牽扯到所謂紊流控制的問題，全面

性的現在好像不是很清楚，因為這牽扯到渦漩怎麼去控制它，等於說我們要完整的了解渦漩現在的位置等等，所以一方面要控制它是比較困難，二方面我們的技術還沒完全，還不像其他技術那麼的足夠，

主持人：

謝謝各位的提問，由於時間已經差不多了，如果需要留下來跟演講者討論的話，歡迎大家留下來，今天的節目就到此為止。