

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

## 流固耦合模擬分析技術之探討

出國人	服務機關：台灣電力公司
	職 稱：機械工程師
	姓 名：陳瑞麒
	出國地區：日本
	出國日期：97年8月5日至8月18日
	報告日期：97年10月3日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：流固耦合模擬分析技術之探討		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
陳瑞麒	機械工程師	台灣電力公司
出國期間：97年8月5日至97年8月18日		報告繳交日期：97年10月3日
出國 計畫 主辦 機關 審核 意見	<input type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」) <input type="checkbox"/> 3.內容充實完備. <input type="checkbox"/> 4.建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 5.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7.退回補正,原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他_____	
層轉 機關 審核 意見	<input type="checkbox"/> 1.同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 2.退回補正,原因：_____ <input type="checkbox"/> 3.其他處理意見：	

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時,不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容,出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人：	單位 主管：	主管處 主管：	總經理 副總經理：
------	-----------	------------	--------------

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：流固耦合模擬分析技術之探討

頁數 31 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：陳瑞麒/台灣電力公司/綜合研究所/

機械工程師/ (02) 80782277

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：97年8月5日至8月18日 出國地區：日本

報告日期：97年10月3日

分類號/目

關鍵詞：流固耦合、汽機葉片、有限元素法

內容摘要：(二百至三百字)

綜合研究所刻正從事電廠汽機葉片壽命評估及破損案件肇因評估之工作，經常必須從事汽機葉片的各類力學問題模擬分析。以往都是固力人員分析固力問題，流力人員分析流力問題，但有些問題是流、固混合的問題，其困難度較高，為精進技術及突破瓶頸，因此擬定此實習計畫，以便吸取國外廠家之經驗。

本計畫之目的在學習國外廠家對流固耦合力學問題模擬分析之技術與經驗，藉以提供本所在從事相關問題模擬分析時之參考，重點在於迴轉機轉子之相關問題，包括有限元素分析之各種技巧，流、固兩種軟體間互相配合的方式，邊界數據的傳遞，因此其困難度及複雜度均相對提高，但其分析結果也較貼近實際問題的真實性，更有助於問題肇因之釐清。

本報告的內容包括流固耦合的理論、ANSYS Multi-physics在流固耦合的功能、驗證實例與運用案例，最後提出感想與建議。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

# 目 錄

出國報告書審核表	
出國報告書提要	
目錄 .....	I
第壹章、前言 .....	1
1-1、出國緣由 .....	1
1-2、出國目的 .....	1
1-3、出國行程 .....	1
第貳章、實習內容 .....	2
2-1、流固耦合的理論 .....	2
2-2、ANSYS Multi-physics在流固耦合的功能 .....	10
2-3、驗證實例與運用案例 .....	20
第參章、感想與建議 .....	31

# 一、前言

## 1-1、出國緣由

綜合研究所刻正從事電廠汽機葉片壽命評估及破損案件肇因評估之工作，經常必須從事汽機葉片的各類力學問題模擬分析。以往都是固力人員分析固力問題，流力人員分析流力問題，但有些問題是流、固混合的問題，其困難度較高，為精進技術及突破瓶頸，因此擬定此實習計畫，以便吸取國外廠家之經驗。

## 1-2、出國目的

本計畫之目的在學習國外廠家對流固耦合力學問題模擬分析之技術與經驗，藉以提供本所在從事相關問題模擬分析時之參考，重點在於迴轉機轉子之相關問題，包括有限元素分析之各種技巧，流、固兩種軟體間互相配合的方式，邊界數據的傳遞，因此其困難度及複雜度均相對提高，但其分析結果也較貼近實際問題的真實性，更有助於問題肇因之釐清。

## 1-3、出國行程

8/5	台北→東京
8/6~17	實習「流固耦合模擬分析技術之探討」
8/18	東京→台北

## 二、 實習內容

綜合研究所目前正從事各電廠汽機葉片壽命評估及破損案件肇因評估工作，其方法包括以有限元素法模擬分析汽機葉片的各種力學行為，或利用各種量測技術進行自然頻率及振動量之量測，量測的結果可以用來驗證有限元素法模擬分析模型之正確性，再以分析模型來模擬預測葉片的各種力學特性，以找出汽機葉片破損之肇因。

在實際的案例中，有些較複雜的問題通常牽扯到流力和固力兩大領域，這種流固耦合的問題在分析技術上難度較高，分析人員必須同時熟悉流力和固力的分析軟體。此次前往 ANSYS 日本分公司與相關人員就流固耦合議題進行廣泛的討論，交換彼此的心得，同時也蒐集了相關的資料，經整理之後概述如下。

### 2-1 流固耦合的理論

流固耦合模擬分析的意思是說欲分析的問題同時包含了流體力學和固體力學的範疇，利用有限元素法進行數值解析時必須計算流力和固力的運動方程式，而且彼此的結果會互相影響對方。舉例如圖 1 所示，流體動力計算出來的壓力會作用在固體結構上，而固體結構計算出來的位移變形會影響流場，因此兩者之間即產生了耦合作用。

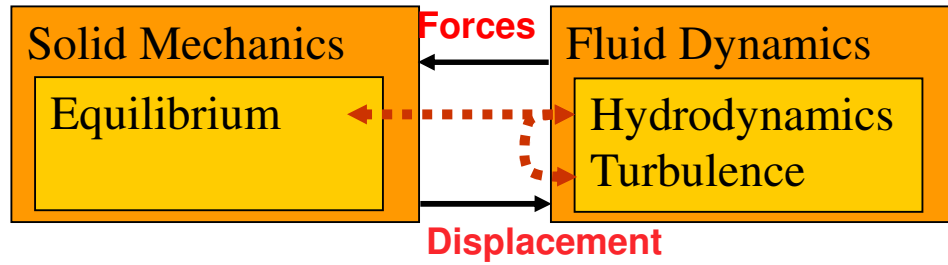


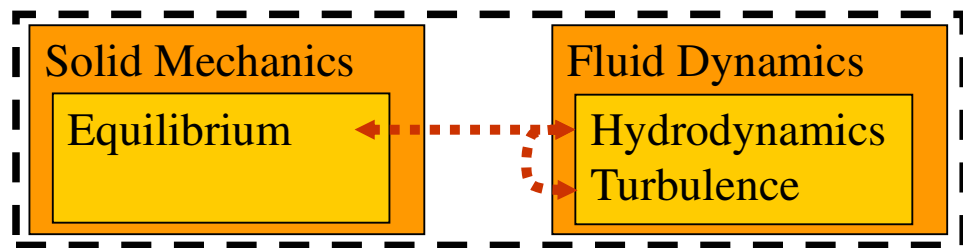
圖 1

耦合的方式依據其計算的流程可分成單向耦合（Unidirectional Coupling）和雙向耦合（Bidirectional Coupling）兩種。單向耦合的意思是說其中一種物理場計算出來的結果必須當作另一個物理場的邊界條件，反之不然，因此兩種物理場間不必做疊代運算（Iteration）。雙向耦合的意思是說其中一種物理場計算出來的結果必須當作另一個物理場的邊界條件，反之亦然，當使用弱耦合方法計算時，兩種物理場間必須做反覆運算以便達到收斂（Convergence）。

在雙向耦合的問題中，依其耦合的程度可區分成強耦合問題和弱耦合問題。強耦合問題是指問題本身屬高度非線性問題，兩種物理場間依賴性強，例如含結構挫屈（Buckling）的流固耦合問題。弱耦合問題是指問題本身屬線性問題，兩種物理場間依賴性弱，例如熱應力問題。

流固耦合問題在所有的耦合問題中屬於最困難的一類，這是因為他本質上就屬於耦合問題，其流體和固體本身的特性差異甚大（例如其方程式中的勁度矩陣），以及附加質量和黏滯矩陣效應等因素。

強耦合問題在解方程式矩陣時是將流、固聯立方程式矩陣一起解，並同時更新所有的系統自由度，如圖 2 所示，因此流、固的變數是同時解出來，故此法又叫做直接法（Direct Method）。它的好處是在每個步進（Step）中就可將聯立方程式矩陣一起解出，對強耦合問題而言此法的收斂性強。而其缺點為：（1）必須針對每一種耦合問題量身訂製一個專用的程式，因此其功能便不可能寫得很完善，例如人機介面、網格化功能、積分點的數值積分法等。（2）由於聯立方程式矩陣中包含流、固兩種勁度（Stiffness）矩陣，其值差異甚大，在工程數學上這種矩陣叫做 ill-conditioned 矩陣，這種矩陣比較難解。（3）對於自由度較多的線性問題，反而需耗費較多的計算時間。



$$\begin{bmatrix} \Lambda_{ii}^f & \Lambda_{ic}^f & \mathbf{0} \\ \Lambda_{ci}^f & \Lambda_{cc}^f + \Lambda_{cc}^s & \Lambda_{ci}^s \\ \mathbf{0} & \Lambda_{ic}^s & \Lambda_{ii}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varphi_i^{*f} \\ \Delta \varphi_c^{*fs} \\ \Delta \varphi_i^{*s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_i^f \\ \mathbf{R}_c^{fs} \\ \mathbf{R}_i^s \end{Bmatrix}$$

$\Lambda$  : effective mass matrix of coupled system

$\Delta \varphi$ : increment of variation vector

$\mathbf{R}$  : residual vector of coupled system

圖 2



強耦合法的數值計算流程如圖 3 所示，在時間步進迴圈中還有流固耦合疊帶迴圈，在每個迴圈當中必須解耦合 聯立矩陣、更新解答及網格，最後判斷是否收斂。

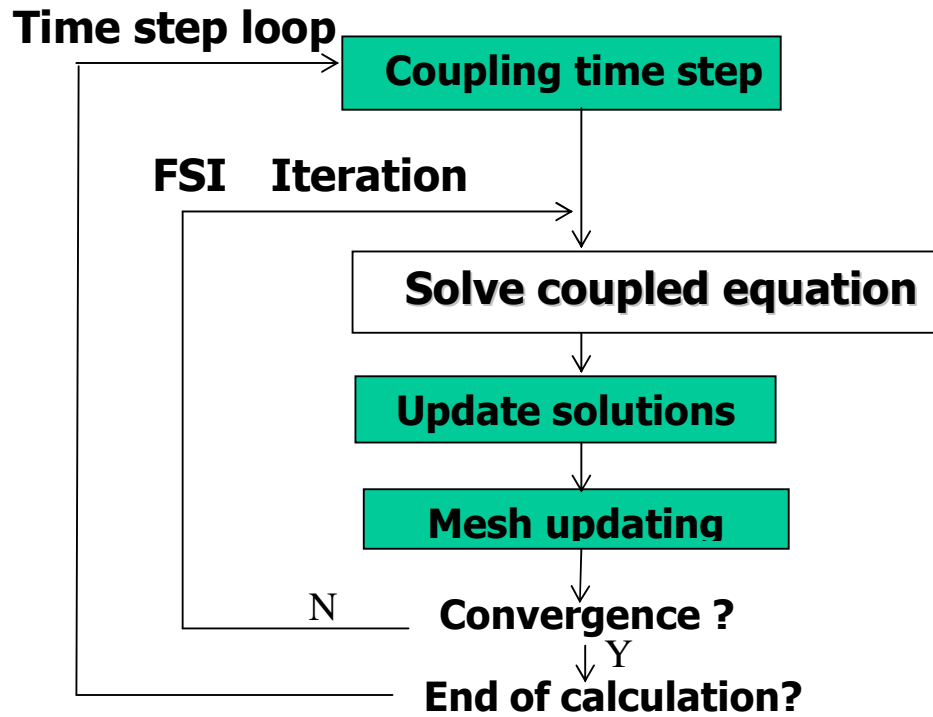


圖 3

弱耦合問題可先解流或固其中一個物理場，而將流固交界面的結果傳遞至另一物理場作為其邊界條件，然後再解另一物理場，同樣的，將流固交界面的結果傳回至前一物理場作為其邊界條件，依此循序疊代下去，直至收斂為止，如圖 4 所示，因此此法又稱做疊代法（Iterative Method）。

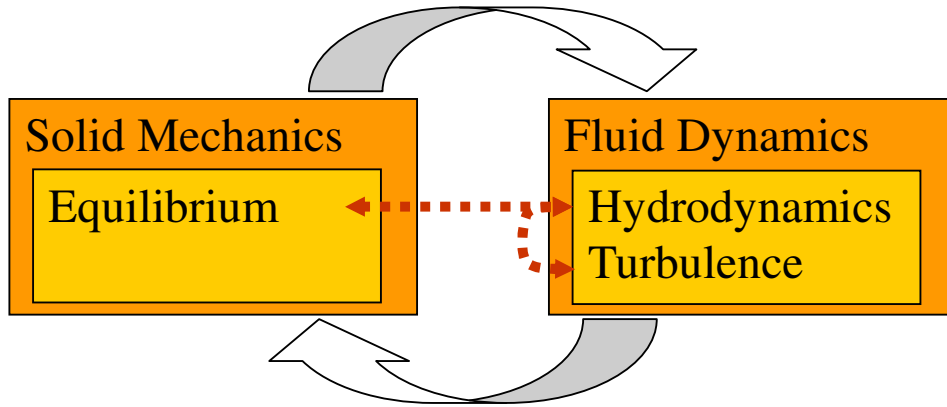


圖 4

對弱耦合的問題，可將圖 2 的聯立方程式矩陣中有關流、固交互影響的項加以簡化，變成如圖 5 所示的兩組方程式矩陣，第一組是有關流體的部分，第二組是有關固體的部分，其中加入了附加矩陣 (Added Matrix) 項  $\Lambda_{add}^f$ ，這是為了修正將原聯立方程式矩陣簡化後造成的影響。這樣，兩組方程式矩陣各自獨立，較易於解之，而流固交界面的邊界條件則以負載傳遞 (Load Transfer) 的方式完成。

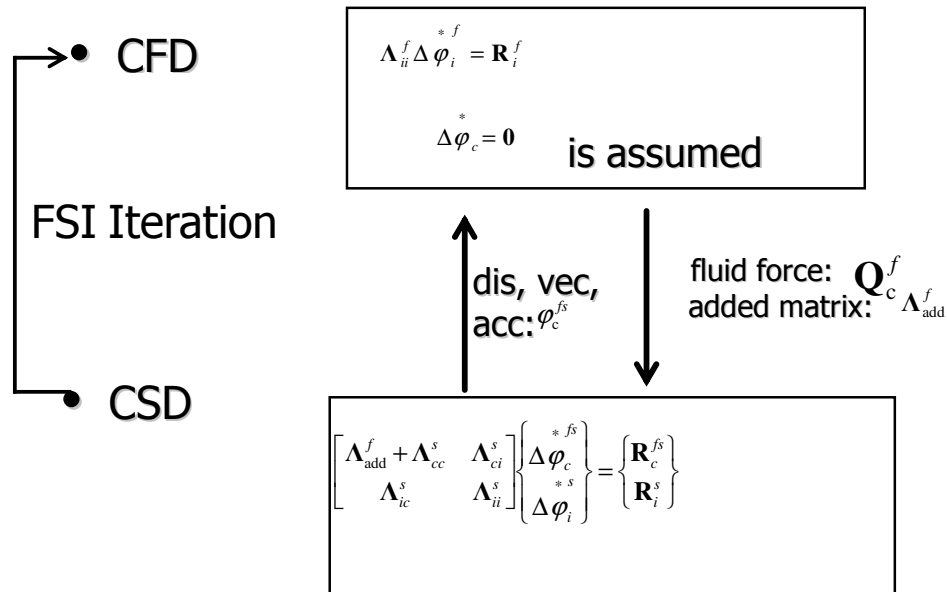


圖 5

弱耦合法的好處是：（1）目前市面上有關流體或固體的泛用型分析軟體很多，其功能大致都發展的相當完整，因此只要利用中介軟體（Interface Software）將其整合在一起，即可對任一流固耦合問題進行分析，而不必專門針對此一流固耦合問題另行發展一套分析軟體，而且又可保有該軟體原有的優點。（2）可進行各類型問題的模擬分析，且流固交界面的網格不必一致，因而減少許多麻煩。（3）針對弱耦合問題而言，此法比直接法節省計算時間。

弱耦合法的缺點是：（1）流固交界面邊界條件的負載傳遞需利用各種鬆弛技巧（Relaxation Technique）。（2）遇到強耦合問題時收斂性較慢，甚至會發散，因而無法求解。

目前市面上的軟體在處理弱耦合法有三種方式：（1）利用檔案的方式在兩軟體間進行資料傳遞。（2）在單一軟體中即包含流體和固體的分析能力，如 ANSYS-Flotran。（3）利用中界軟體將流體和固體的分析軟體整合在一起，如 MPCCI 和 ANSYS MFX。

利用弱耦合法進行流固耦合分析時有幾個關鍵點必須注意：（1）流固交界面資料的鏡射（Data Mapping）和內插演算法（Interpolation Algorithm）。（2）使弱耦和法變強的數值方法，如時間步進的控制、非線性疊代、高級負載鬆弛法等。（3）如果兩套軟體分別在不同硬體上執行，如何透過網路技術做資料的傳遞。

在流固耦合的問題中，通常結構體都會做大變形的位移，使得流場的網格必須做大幅度的變動，因此如何進行網格的轉換（Mesh Morphing）以避免網格的嚴重扭曲（Distortion），甚至於網格必須重劃（Re-meshing），因此這兩種技巧就顯得相當重要，圖 6 就是舉蝴蝶閥在轉動時流場網格變化的情形。

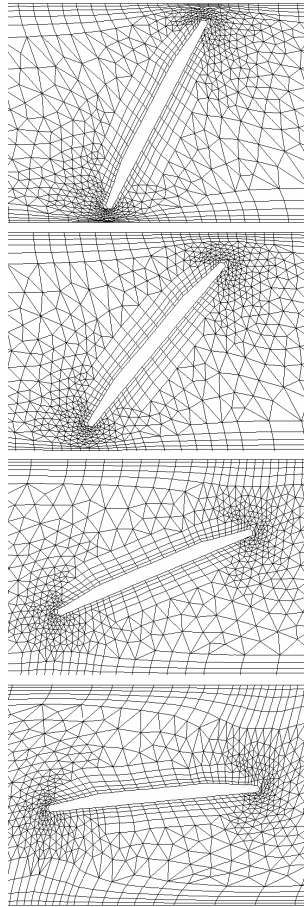


圖 6

目前市面上在做流固耦合分析的商用軟體大致有三種發展趨勢：（1）利用第三者的中界軟體將分屬兩家不同公司的流體和固體的分析軟體整合在一起，如 MPCCI，這種方式彈性

較大，但不適合強耦合的問題，圖 7 顯示其分析架構。(2) 流體和固體的分析軟體屬於同一家公司，因此可發展其專屬的中界軟體和人機界面，如 ANSYS Workbench II。(3) 量身訂製的專屬軟體，如 ADINA，其耦合性強但較缺乏彈性。

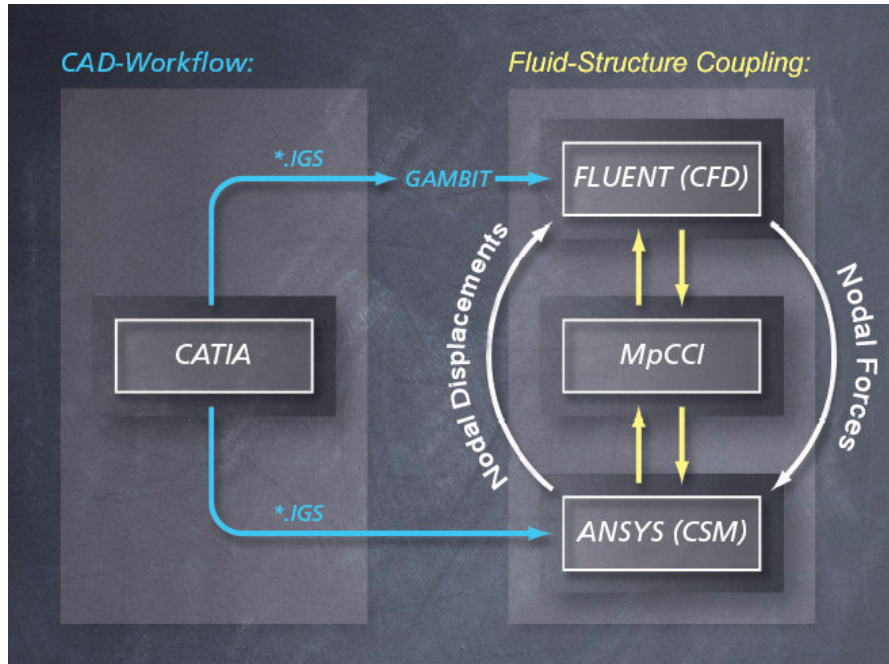


圖 7

在進行多重物理耦合問題的模擬分析之前，有幾個問題必須先思考清楚：(1) 這真的是一個多重物理耦合的問題嗎？(2) 有多少種物理場牽涉其中？(3) 他是單向或雙向耦合的問題？有那些資料必須在物理場間傳遞？(4) 他是強耦合或弱耦合的問題？(5) 你可以針對每一個物理場單獨求解而沒有問題嗎？(6) 哪一種才是解決你問題的最佳方法？

## 2-2 ANSYS Multi-physics 在流固耦合的功能

如圖 8 所示，ANSYS Multi-physics 是專門用來解多重物理場耦合問題的泛用型分析軟體，具有統一的人機界面環境，並且包含建模、前、後處理的功能模組，因此操作上相當方便。ANSYS 從 1970 年代就開始發展多重物理場耦合問題的分析功能，從熱應力分析開始，一直到目前的 MFX/CFX 流固耦合功能，未來將繼續發展新一版的 MFX Driver 流固耦合模組。

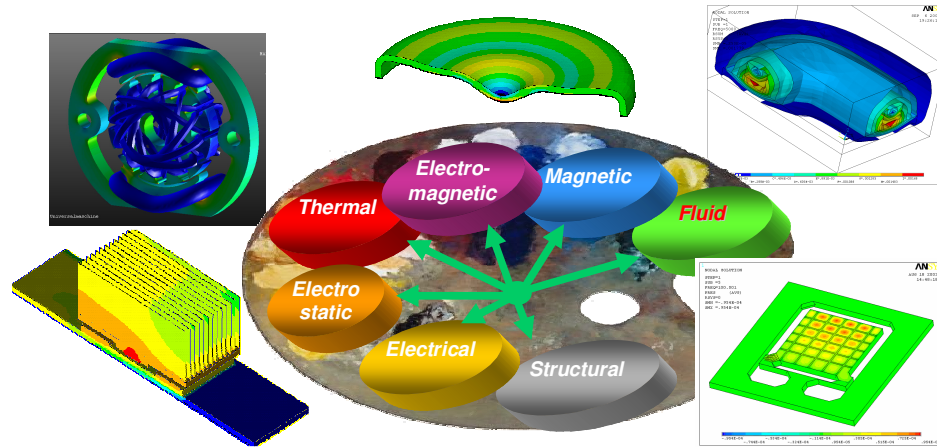


圖 8

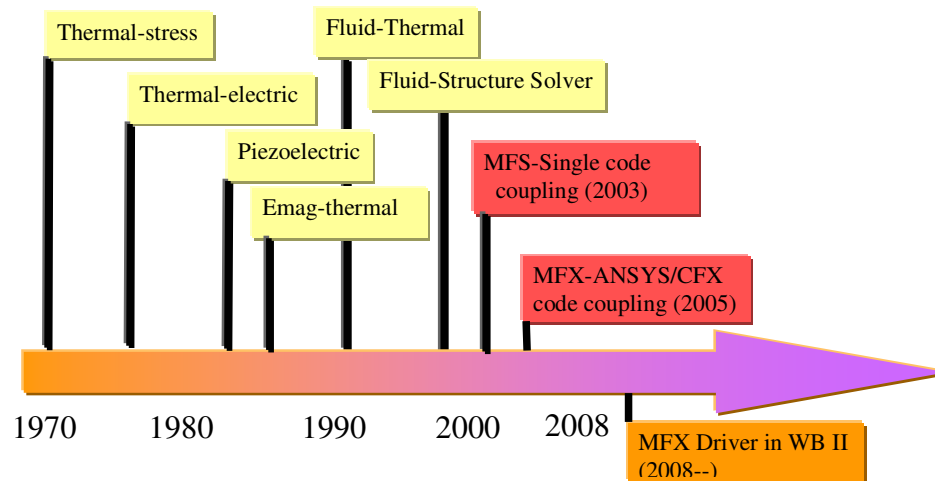


圖 9

ANSYS/CFX 的流固耦合 (Fluid Structure Interaction) 功能包含兩個部分：基本流固耦合和進階流固耦合。基本流固耦合功能只能處理單向耦合問題。進階流固耦合功能可處理單向、雙向耦合問題，它不但包含基本流固耦合功能，同時還包括：  
(1) Multi-field MFS external field import, (2) Multi-field MFX- Multiple code solver, (3) FLOTRAN based FSI (Multi-field MFS – Single code solver) 等三種耦合方式。

Multi-field MFS external field import 是將第一個物理場在流固耦合交界面的結果以檔案的方式輸入到第二個物理場當作邊界條件，然後再解第二個物理場，因此只能處理單向耦合問題。Multi-field MFX- Multiple code solver 是以 ANSYS 軟體來解固力場，以 CFX 軟體來解流力場，兩軟體間流程的控制及資料傳遞的問題則由內含的中界軟體解決。FLOTRAN based FSI 則是在 ANSYS 固力軟體中包含了 FLOTRAN 流力軟體，一個有限元素模型中同時包含了結構元素和流力元素，有點類似直接法的味道。

如圖 10 所示，許多流固耦合的問題還包含了熱傳的效應，而且其影響很大，這更增加了分析的困難度，同時解流場和熱傳的問題通常叫做共軛熱傳 (Conjugate Heat Transfer, CHT)。一般在解熱應力問題時都是先用溫度元素解溫度場，再用位移元素解應力場 (溫度場當做初始條件)，然而在流固耦合的分析中，以目前 ANSYS 版本的功能無法如此操作，而是必須使用同時含有溫度及位移自由度的元素，將溫度場和應力場一次解出。

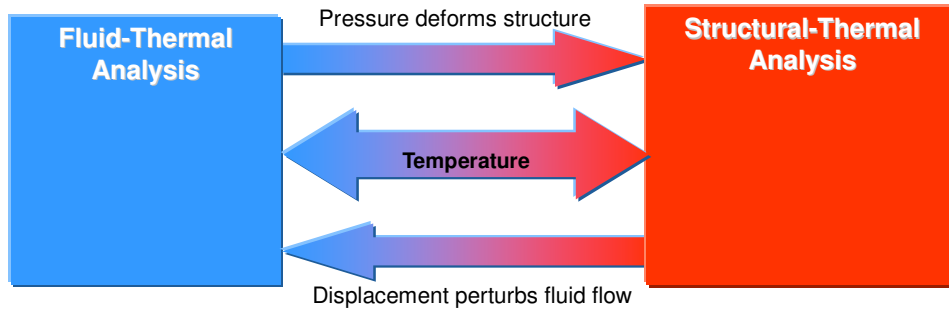


圖 10

目前 ANSYS 在流固耦合方面的最新版本是 MFX，我們就來簡述一下它的計算流程。如圖 11 所示，固力軟體 ANSYS 負責當主控程式，流力軟體 CFX 當副控程式，主控程式負責資料的鏡射（Mapping）、負載傳遞的內插、時間迴圈和疊代迴圈的控制、收斂條件的檢驗等，主、副控程式間有 5 個同步查核點。由於主、副控程式亦可分別在不同台電腦上執行，因此它們之間的溝通主要是透過網路封包來執行，這樣也可以分攤電腦的負荷。

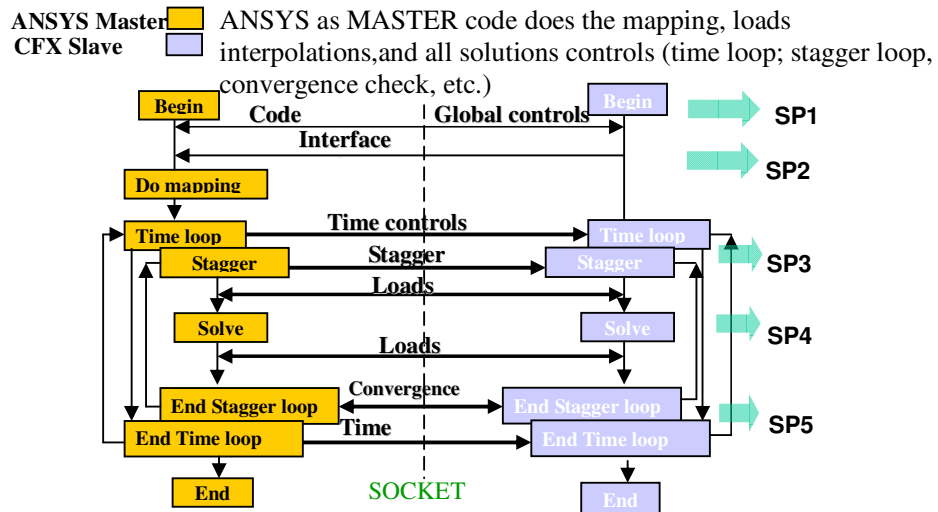


圖 11



在疊代迴圈中，ANSYS 和 CFX 可同時執行，亦可循序執行（誰先執行皆可利用 ANSYS 指令控制），如圖 12 所示。

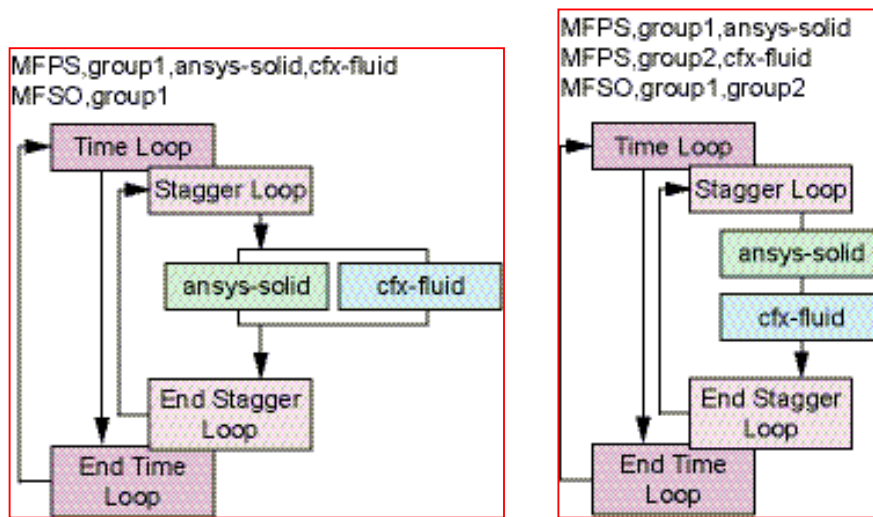


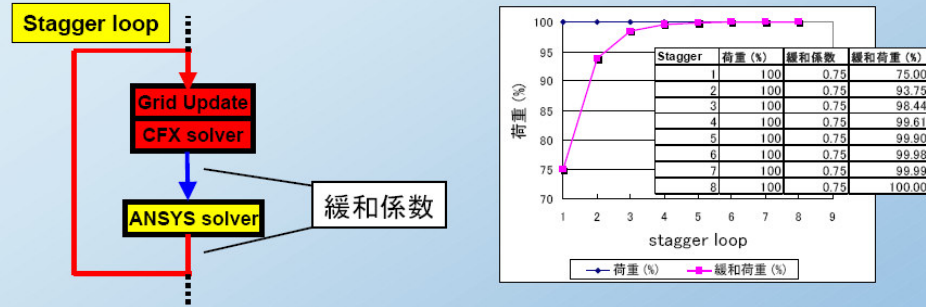
圖 12

MFX 主要的技術特點有：（1）強健而有效率的界面鏡射（Mapping）與負載傳遞內插技術，包括 Conservative 及 Profile preserving 等方法，（2）自動時間步進（time stepping）和次循環（sub-cycling），（3）界面負載傳遞和場解（Field Solution）的緩和（Relaxation）技術，（4）隱式交錯疊代（Stagger Iteration）和收斂檢驗，（5）在 CFX 中有進階的網格轉換（Mesh Morphing）技術，（6）ANSYS 和 CFX 間單位的轉換，（7）可以從前一次計算結果中任一個收斂時間點起，繼續重新計算。

界面負載傳遞的緩和技術可以用圖 13 來解釋，舉例而言，當 CFX 要將其計算出來的壓力施加到 ANSYS 上時，它並不是一次就全部加上去，而是用緩和係數來控制其壓力施加的百分比，逐次的施加下去，直到解收斂為止。這樣的好處是當問題容易發散時，可藉由緩和係數來控制解的收斂性。

## Stagger loopの効果

- 緩和係数を使用し、転送データを徐々に負荷することにより収束計算効率の向上が可能。



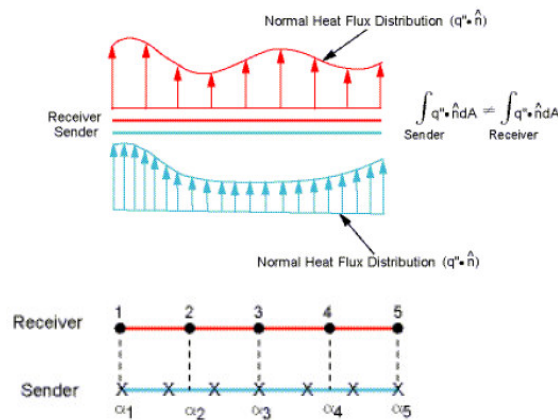
- 収束条件。(eが負の値(-)となると収束と判断)

$$e = \frac{\log\left(\frac{\Phi}{\Phi_{\min}}\right)}{\log\left(\frac{\Phi_{\max}}{\Phi_{\min}}\right)}$$

e: 収束値  
 Φ: 転送データのL2ノルム  
 Φ<sub>max</sub>: 収束基準値 (MFCONVコマンドVALUE引数)  
 Φ<sub>min</sub>: "100"とセット

圖 13

負載傳遞内插技術中 Profile preserving 的方法如圖 14 所示，它將接收端的節點鏡射到發送端，然後再做內插。這種方法如果將接收端和發送端分別作整體積分，其值並不相等，如果是用在力或熱通量的狀況下，就會產生無法平衡的情形，因此這種方法較適用於位移和溫度的內插。



Profile Preserving Interpolation - Load Imbalances

圖 14

Profile preserving 的方法如果接收端的網格較密集，就可以將發送端的數據忠實的內插出來，如圖 15 所示；如果接收端的網格較稀疏，內插出來的數據就會失真，如圖 16 所示。

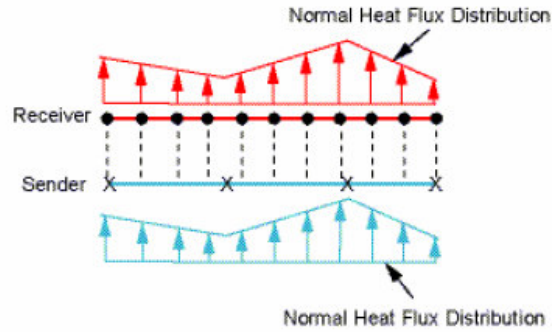


圖 15

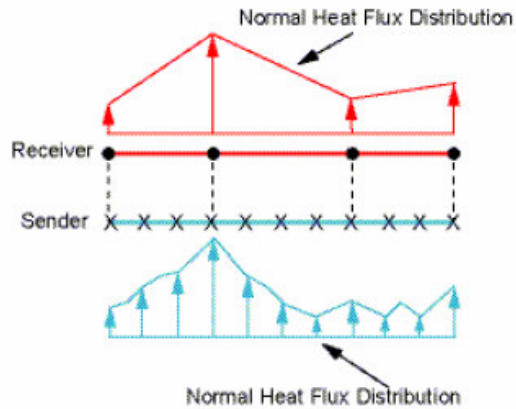


圖 16

負載傳遞內插技術中 Conservative 的方法如圖 17 所示，它是將發送端節點上的值按比例分攤到接收端，因此其接收端和發送端的整體積分自然會相等，如果是用在力或熱通量的狀況下就能達到平衡。

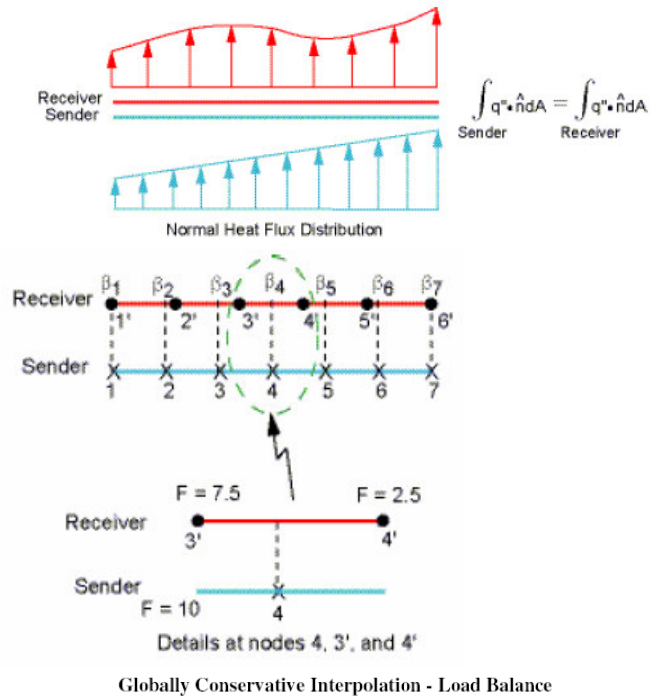


圖 17

Conservative 的方法如果發送端的網格較密集，接收端就可以將發送端的數據忠實的內插出來，如圖 18 所示；如果發送端的網格較稀疏，接收端內插出來的數據就會失真，如圖 19 所示。

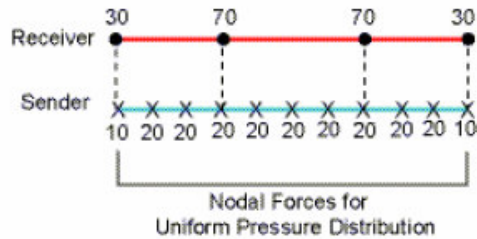


圖 18

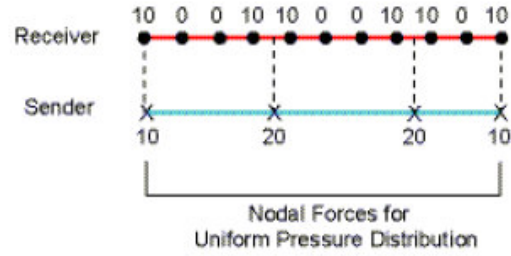


圖 19

圖 20、21 舉例一個溫度場在傳遞時，依據不同的內插方式造成的結果。CFX 是發送端，如果結構側的網格較細，使用 Profile preserving 的結果較佳，如果結構側的網格較粗，使用 Conservative 的結果較佳。

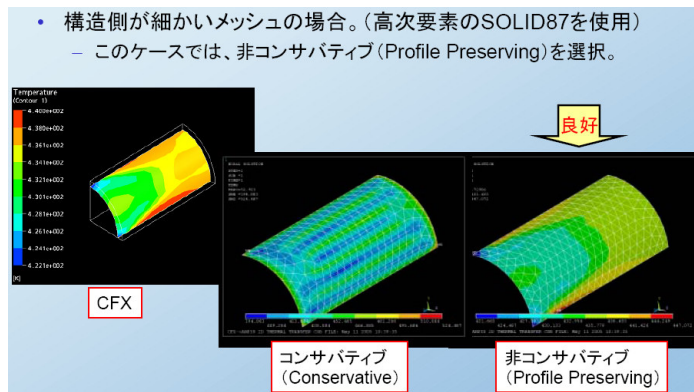


圖 20

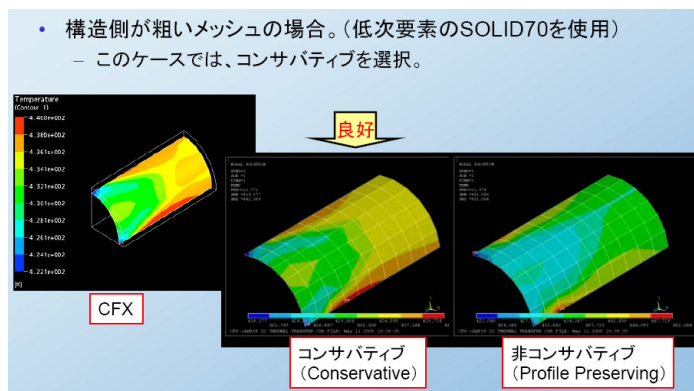


圖 21

ANSYS 11 最新版本的流固耦合功能中增加了一個 Conservative Profile Preserving (CPP)的內插法，它不但保有原來 Profile Preserving 的特點，而且使力或熱通量在整體或小區域的積分均能平衡，等於是集兩種方法的優點於一身。

當 ANSYS 和 CFX 在執行的過程中，我們可以隨時透過圖形視窗和文字視窗來監測其執行情形，包括 ANSYS 和 CFX 方程式矩陣收斂的情形、流固交界面資料收斂的情形、ANSYS 和 CFX 輸出結果的監測、自訂監測點的執行情形等，如圖 22 所示。

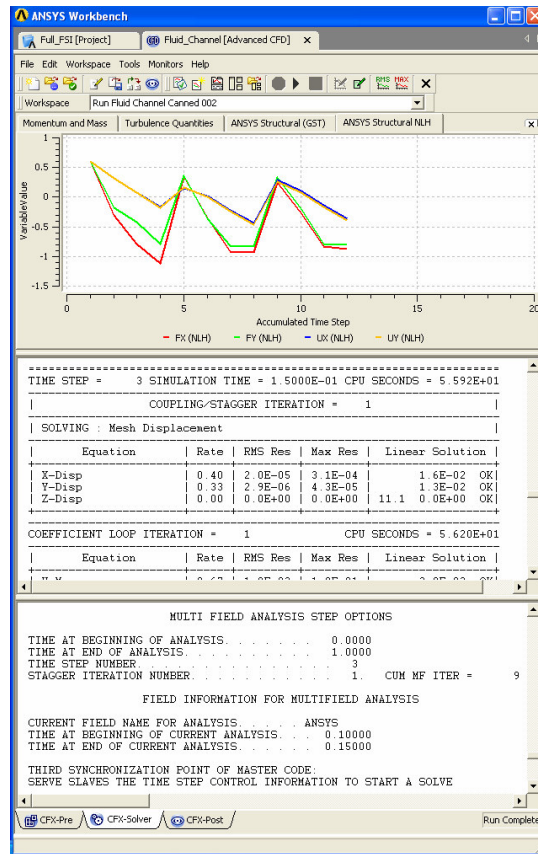


圖 22

ANSYS/CFX 在流固耦合方面的優點總結如下：(1) 容易使用：所有的操作都在統一的人機介面環境 Workbench 中。(2) 收斂性強：利用緩和技術、自動時間步進等數值技巧達成。(3) 保有軟體各自的特點，包括 CAD 的建立、網格的產生、結構和流體的模擬等。(4) 軟體的彈性大：可單機執行或平行運算，流、固兩軟體可同時執行或循序執行，流、固的網格在交界面不必一致，預留與其他 CAE 軟體耦合的空間。

未來新版的 MFX 將如圖 23 所示，採用模組化的方式，將所有的驅動程式均放入此模組中，供其他的軟體呼叫使用。而其計算流程則如圖 24 所示，MFX Driver 扮演中界軟體的角色，負責時間迴圈和疊代迴圈的控制、收斂條件的檢驗、同步點的查核等，而資料的鏡射、負載傳遞的內插等則由流、固軟體自行負責。

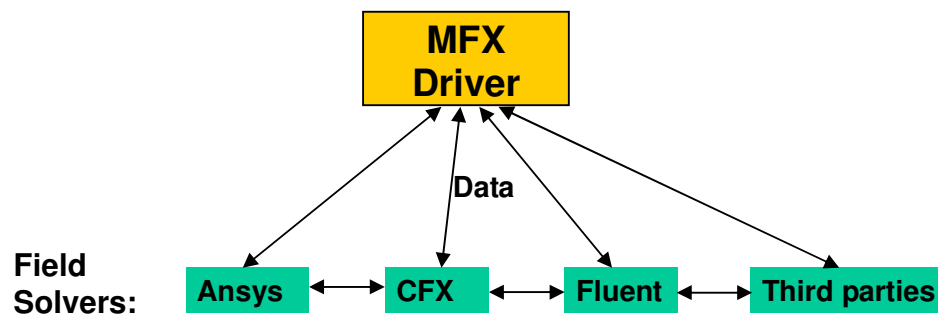


圖 23

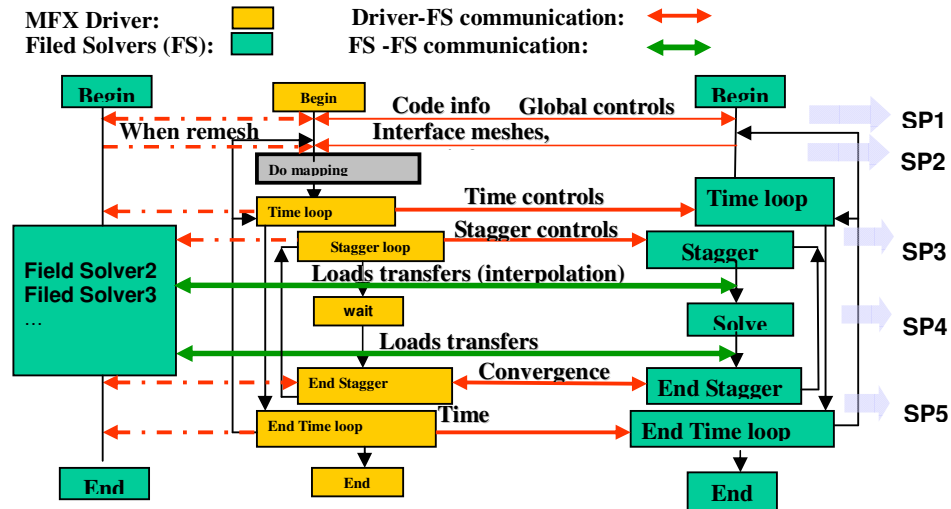


圖 24

### 2-3 驗證實例與運用案例

本節列舉一些驗證實例與運用案例來說明流固耦合問題的使用情形。首先舉一個飛機機翼顫振 (Flutter) 的分析，圖 25 是機翼的幾何尺寸，圖 26 是流場的幾何，分 3 種不同網格粗細的模型來進行分析。圖 27 是流場的 Stream Line 分布，流場計算出來的壓力將作用在機翼上，而機翼因受壓力而變形將會影響流場的壓力分布，這是一個典型的雙向流固耦合問題。

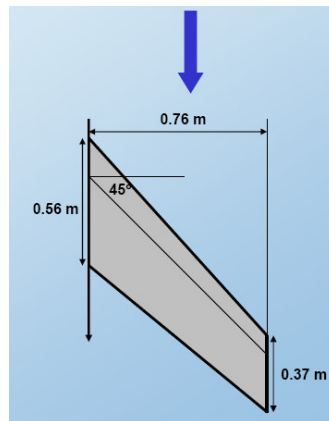


圖 25



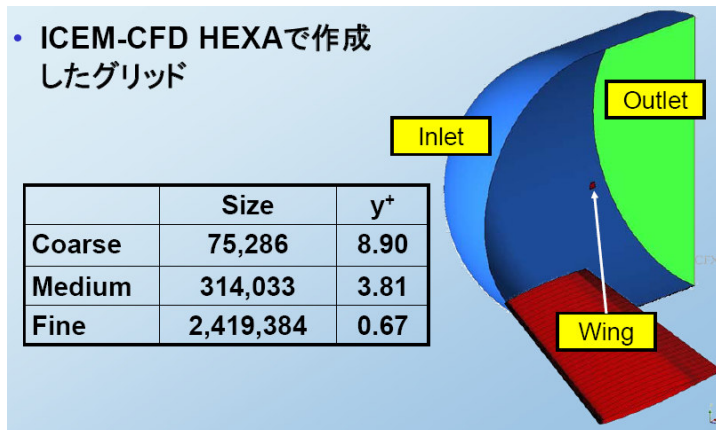


圖 26

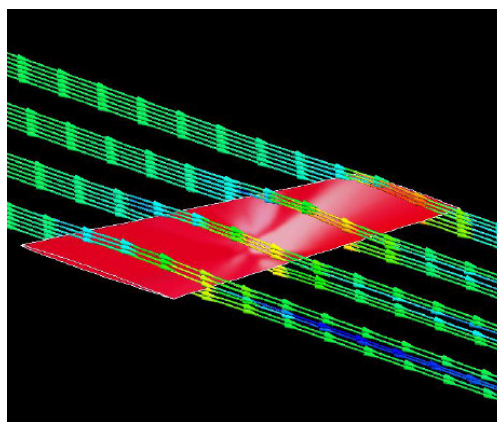


圖 27

經由機翼的模態分析，機翼的第一個自然頻率為 9.59Hz，為 Bending Mode，第二個自然頻率為 38.16Hz，為 Torsional Mode，如圖 28 所示。ANSYS 的分析值與實驗值比較非常接近，這驗證了 ANSYS 分析模型的正確性，同時經由機翼的模態分析可幫助我們了解機翼的物理特性。

接下來進行機翼的顫振分析，圖 29 是顫振分析結果的頻譜圖，在約 14 Hz 時機翼的振動最大，此時其變形隨時間而越來越大，這是因為流固整體系統的阻尼變為負值所造成。

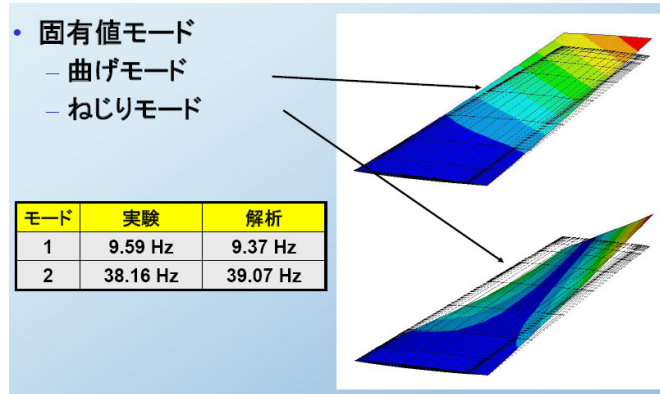


圖 28

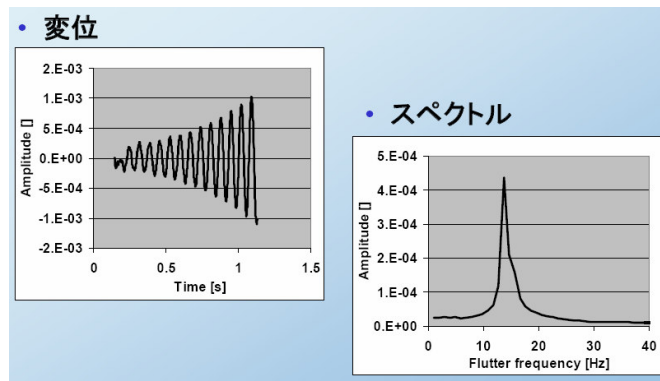


圖 29

接下來進行一些參數分析，當流場的節點數增加時顫振頻率也越來越靠近實驗值，如圖 30 所示。圖 31 表示當時間步進（Time Step）夠小時，交錯疊代（Stagger Iteration）次數的影響不大，當時間步進變大時，交錯疊代次數必須加大才能達到結果的收斂，這在圖 32 的振幅隨時間變化中亦可看出。圖 33 表示分析的結果雖然與實驗有稍許差距，但其定性上的趨勢是一致的。

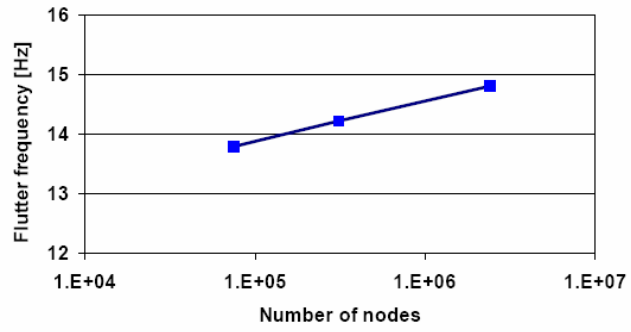


圖 30

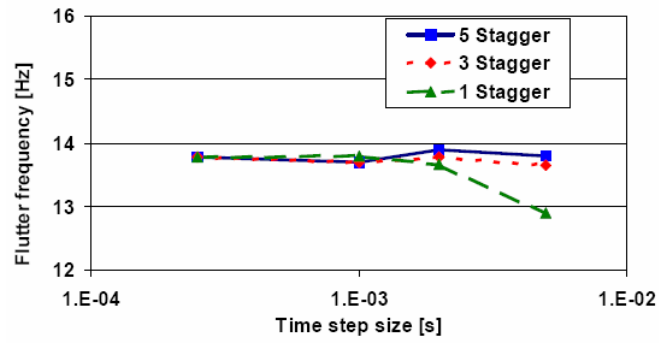


圖 31

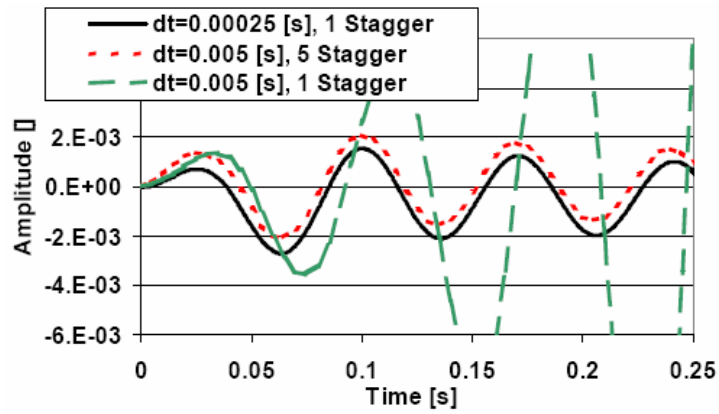


圖 32

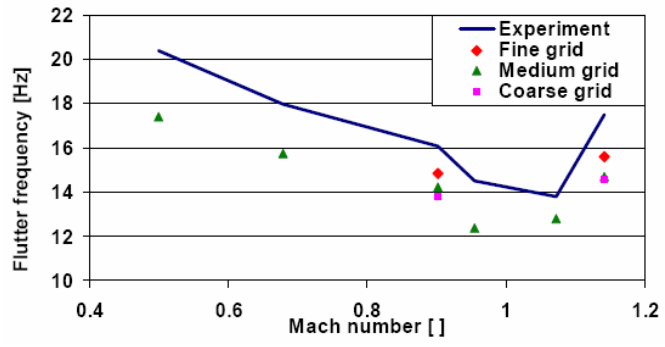


圖 33

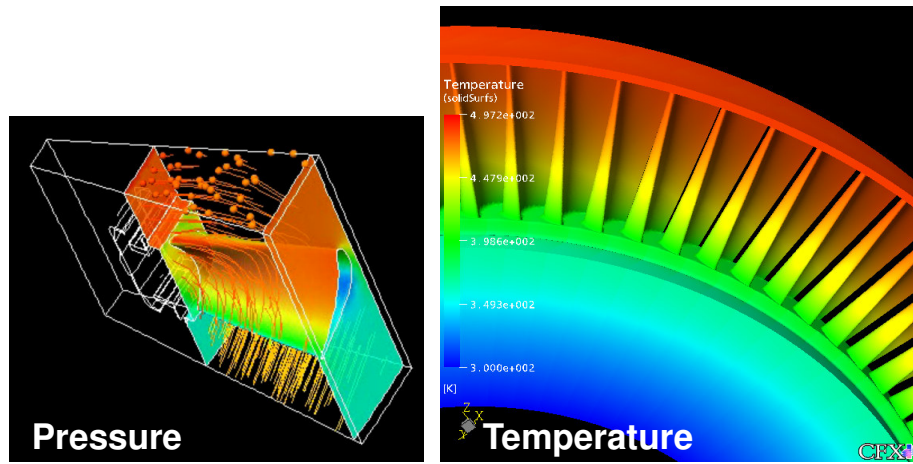


圖 34

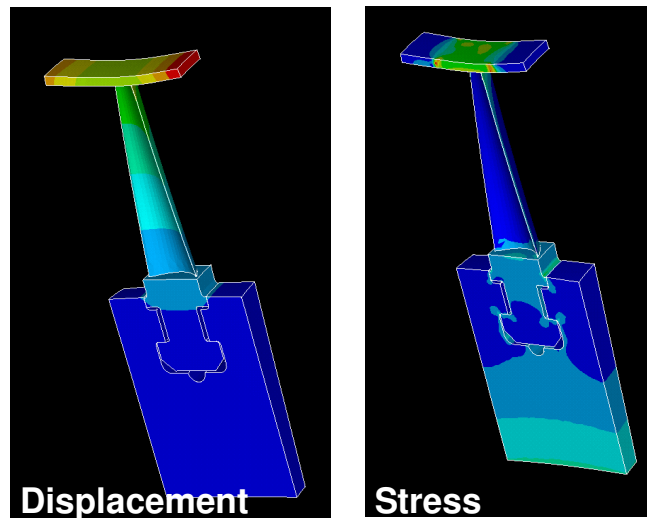


圖 35

接下來的例子是氣機葉片的熱應力分析，由於氣機葉片經常要承受高溫高壓的燃氣衝擊，因此時常發生龜裂的問題，這是一個流、固、熱三者耦合的問題。圖 34 顯示 CFX 計算出來的壓力場和溫度場的分布情形，這兩個場作用在氣機葉片上，因而使得葉片產生變形及應力，如圖 35 所示，但由於變形的量很小，因此不會對流場造成太大的影響，這是一個單向的流固耦合問題。

圖 36 是一個三葉式壓力閥開關時的流場分析，當壓力脈衝到達閥門時三個閥門即被推開，待壓力釋放後閥門隨即關上，這是一個暫態的雙向流固耦合問題。

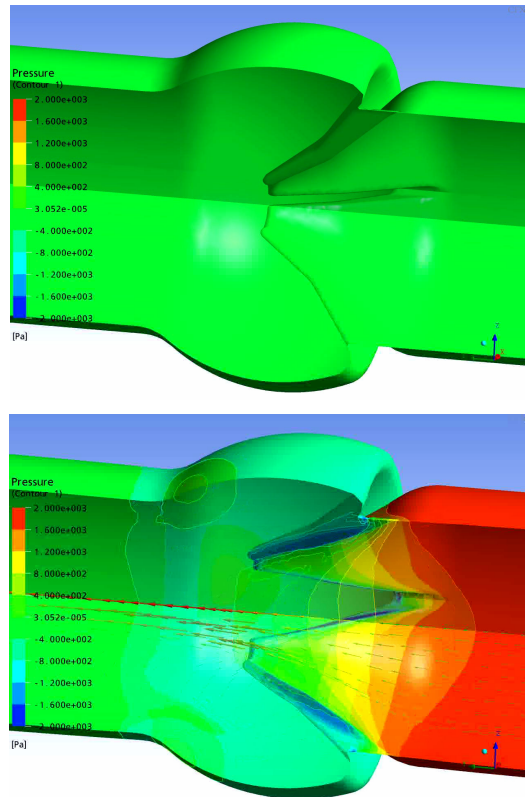


圖 36

圖 37 是一個振動板的例子，流體流經一個平板後，平板受流體壓力作用而變形，由於平板是一彈性體，因此會回彈，造成平板來回擺動，平板的變形會造成流場產生變化，如圖 38 所示，這是一個暫態的雙向流固耦合問題。

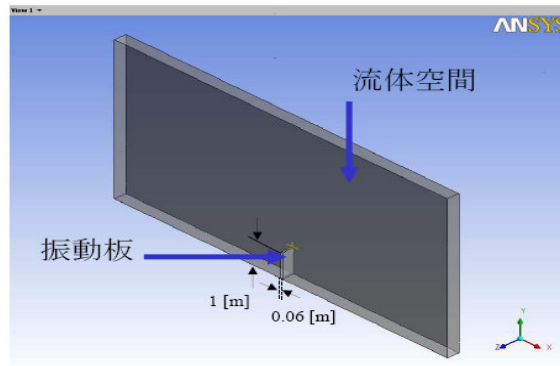


圖 37

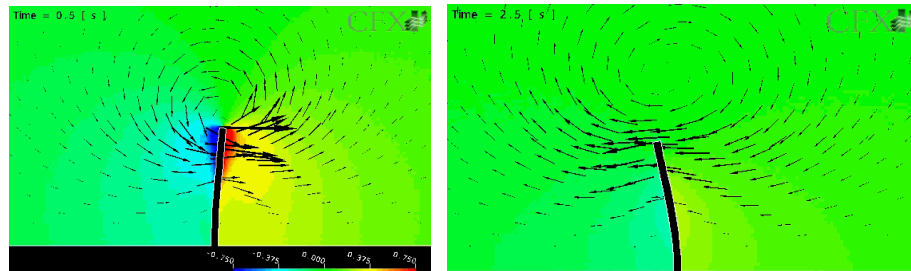


圖 38

圖 39 是模擬動脈受心臟脈動產生的血壓作用下變形的情形，血液的壓力作用在血管壁上使其產生變形，而血管壁的變形又會造成血壓的變化，如圖 40 所示，這是一個暫態的雙向流固耦合問題。



圖 39

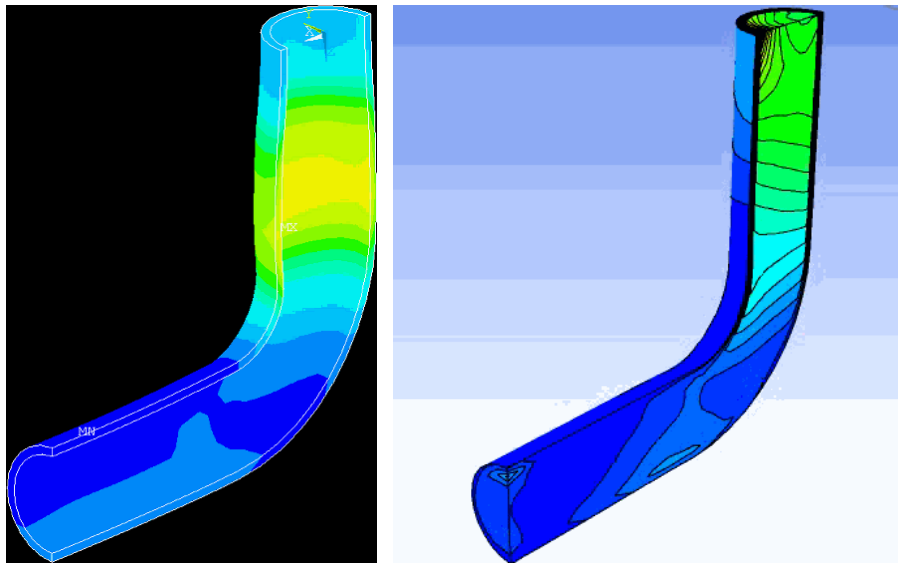


圖 40

圖 41 是模擬雙金屬片受流體熱變化時所產生熱變形的情形，由於銅和鐵的熱膨脹係數不一樣，當其受流體溫度場的影響後，所產生的熱變形也不一樣，但因其彼此被拘束住，就會產生彎曲變形，如圖 42 所示，但此彎曲變形對溫度場的影響不大，這是一個暫態的單向流固耦合問題。

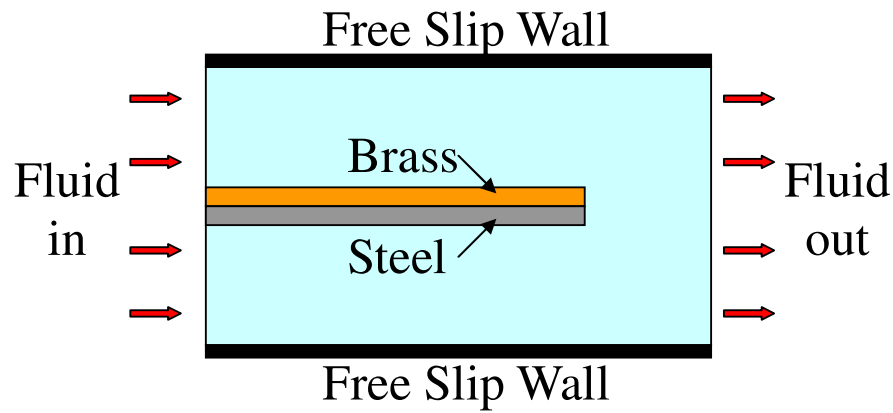


圖 41

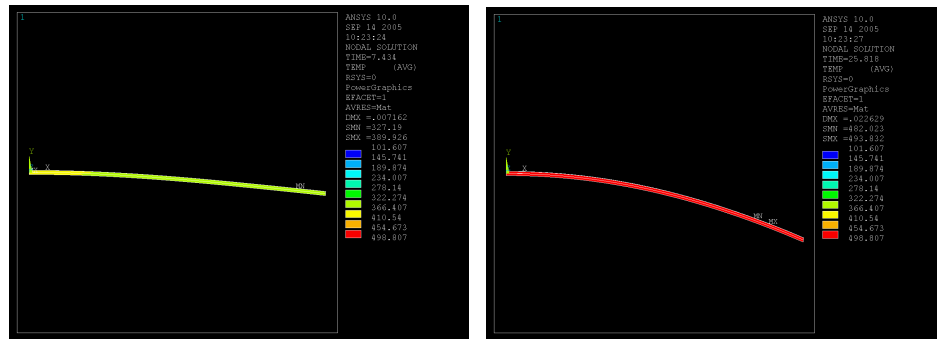


圖 42



圖 43 是模擬圓柱顫動的情形，當流體流經圓柱時在其後端產生渦漩（Vortex），此渦漩造成圓柱上下振動，而圓柱的上下振動又會對流場產生影響，這是一個暫態的雙向流固耦合問題。

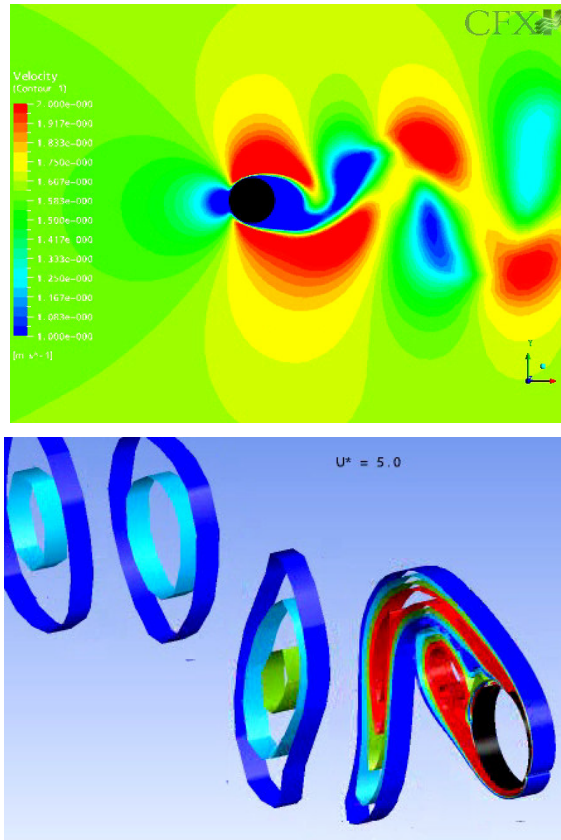


圖 43

最後一個例子是壓力限制閥，如圖 44 所示，當流體壓力作用在球閥上的合力大於彈簧作用在球閥上的力量時，球閥開始往上移動，造成壓力的釋放，如圖 45 所示，最後球閥又會因彈簧的作用力而關閉，這是一個暫態的雙向流固耦合問題。

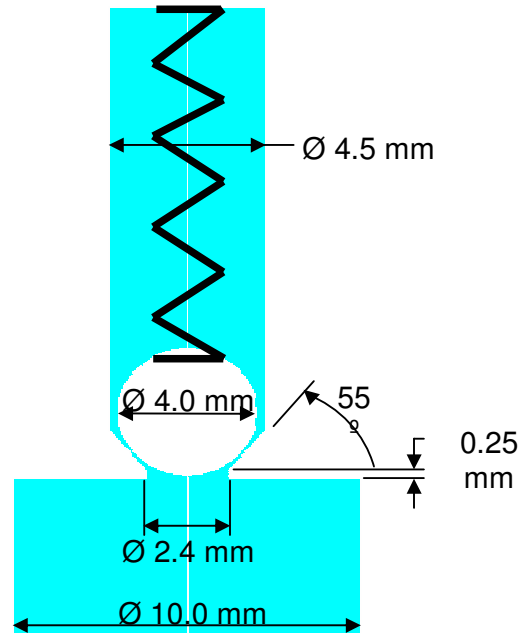


圖 44

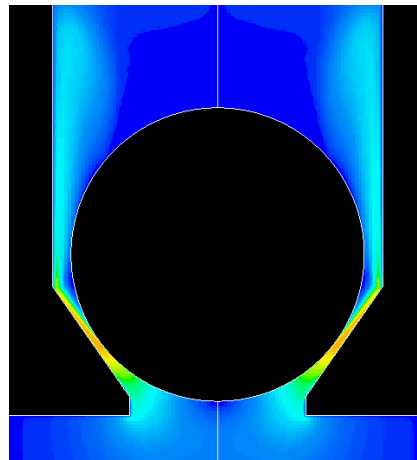


圖 45

### 三、感想與建議

- 1、電廠有一些較棘手的問題都是屬於流固耦合的問題，此一問題由於牽扯到流力與固力兩大範疇，因此分析上較為複雜，困難度較高。但這是一塊新興的領域，預料未來勢必發展迅速，綜研所身為台電的研究單位，應及早投入，掌握先機。
- 2、流固耦合分析包含結構應力分析與流體力學分析兩大領域，同時兼具此兩種分析技術的人員不多見，綜研所應及早培養相關人力。
- 3、目前市面上用來分析流固耦合問題的軟體大致分成三類：  
(1)專門量身訂做的套裝軟體，如 ADINA，(2)利用中介軟體與既有的流、固軟體溝通，如 MpCCI，(3)將既有的流、固軟體整合在一個發展環境中，如 ANSYS/CFX。
- 4、欲分析流固耦合問題必須先擁有一套良好的分析軟體，ANSYS/CFX 結合了兩套功能強大的泛用型分析軟體，且具有統一的發展環境，較容易上手，綜研所可從此點切入。
- 5、流固耦合分析較能正確的呈現出實際問題的特性與結果，如此更能掌握問題的肇因，並尋求因應之道。
- 6、流固耦合分析的結果必須利用實測的數據來加以驗證，如此更能增加模擬分析結果的可信度。
- 7、流固耦合分析的運用非常廣泛，所獲得的效益頗高，值得深入研究。