

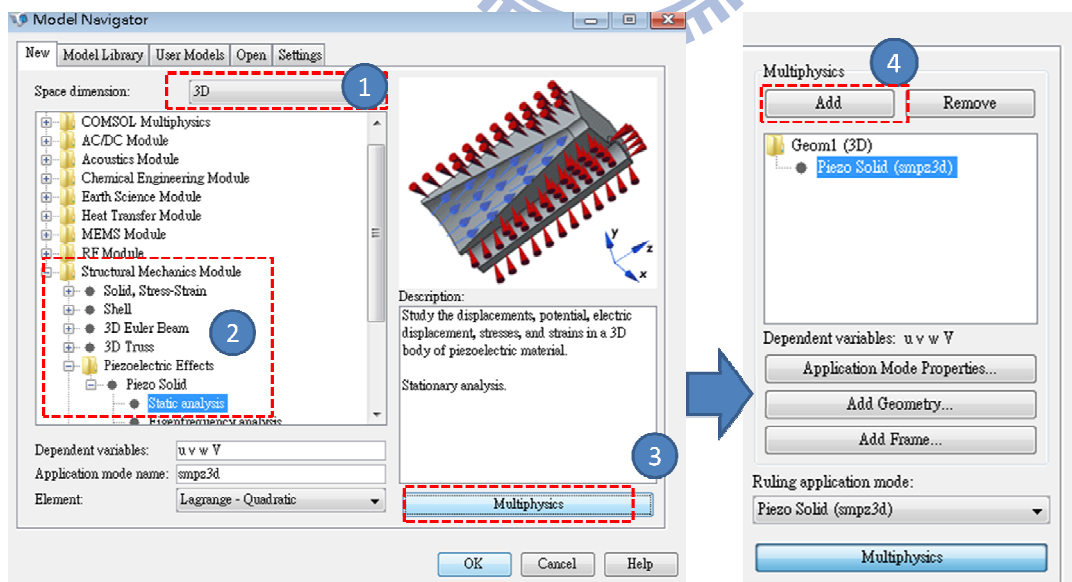
附錄 B 有限元素程式 COMSOL Multiphysics

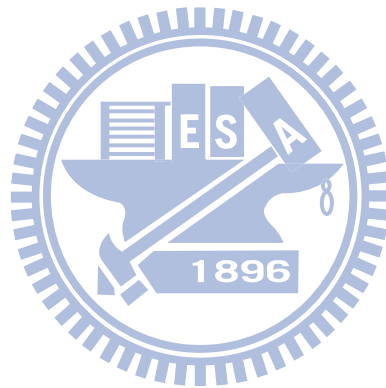
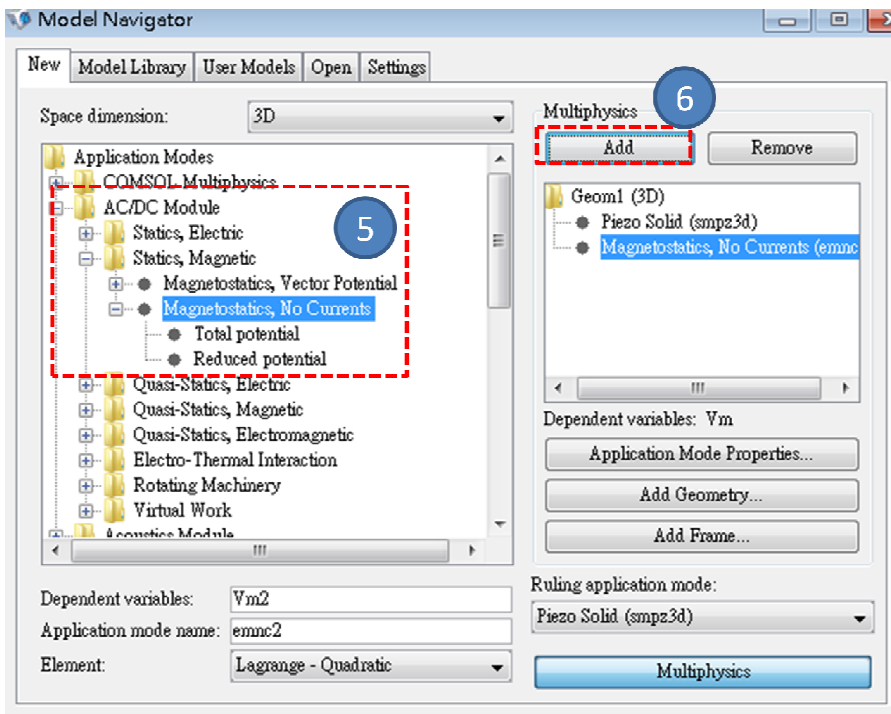
Cosmol 擁有方便的圖形介面，提供了許多的物理模型，以下會對壓電壓磁複合材料的建模步驟做詳細的說明，包含多重物理量、繪圖工具、統御域設定、邊界條件、週期性邊界條件、網格工具、求解工具。

B-1 多重物理量

壓電壓磁複合材料因為其為力、電、磁三種物理場之間的相互耦合，一開始的建模步驟為：

1. 選擇模型維度為 3D。
2. 點選結構力學模組 > 壓電效應 > 壓電實體 > 穩態分析。
3. 點選多重物理量(Multiphysics)以加入第二個物理模組。
4. 選擇加入(Add)。
5. 點選 AC/DC 模組 > 靜態,磁性 > 靜磁,無電流。
6. 選擇加入(Add)，形成兩個模組耦合分析。

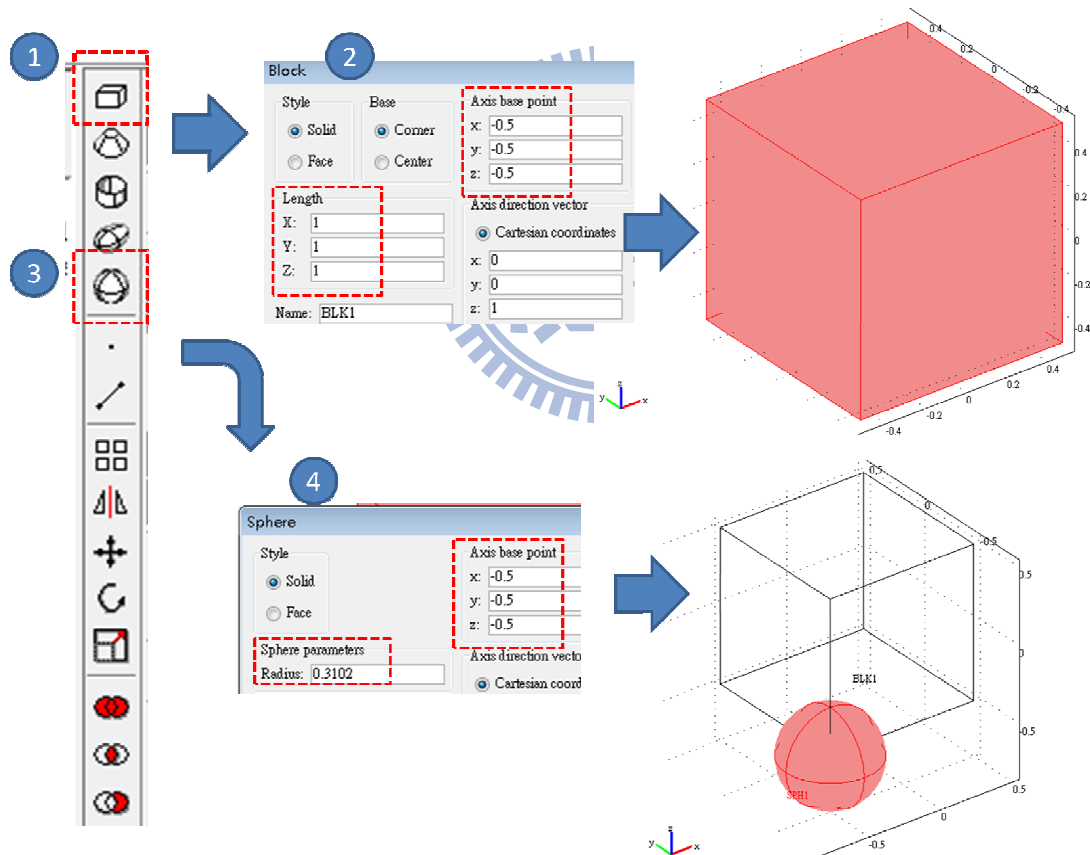




B-2 繪圖工具(立方體、球體)

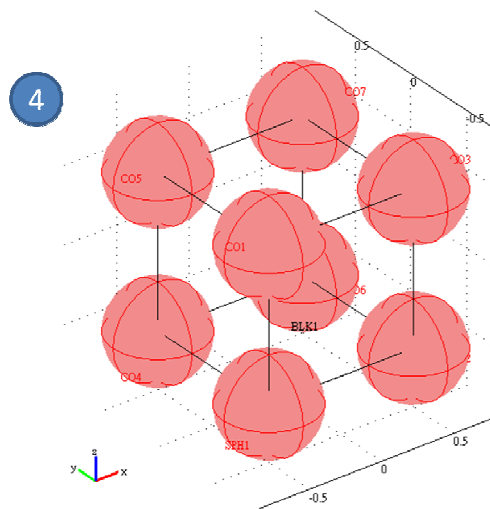
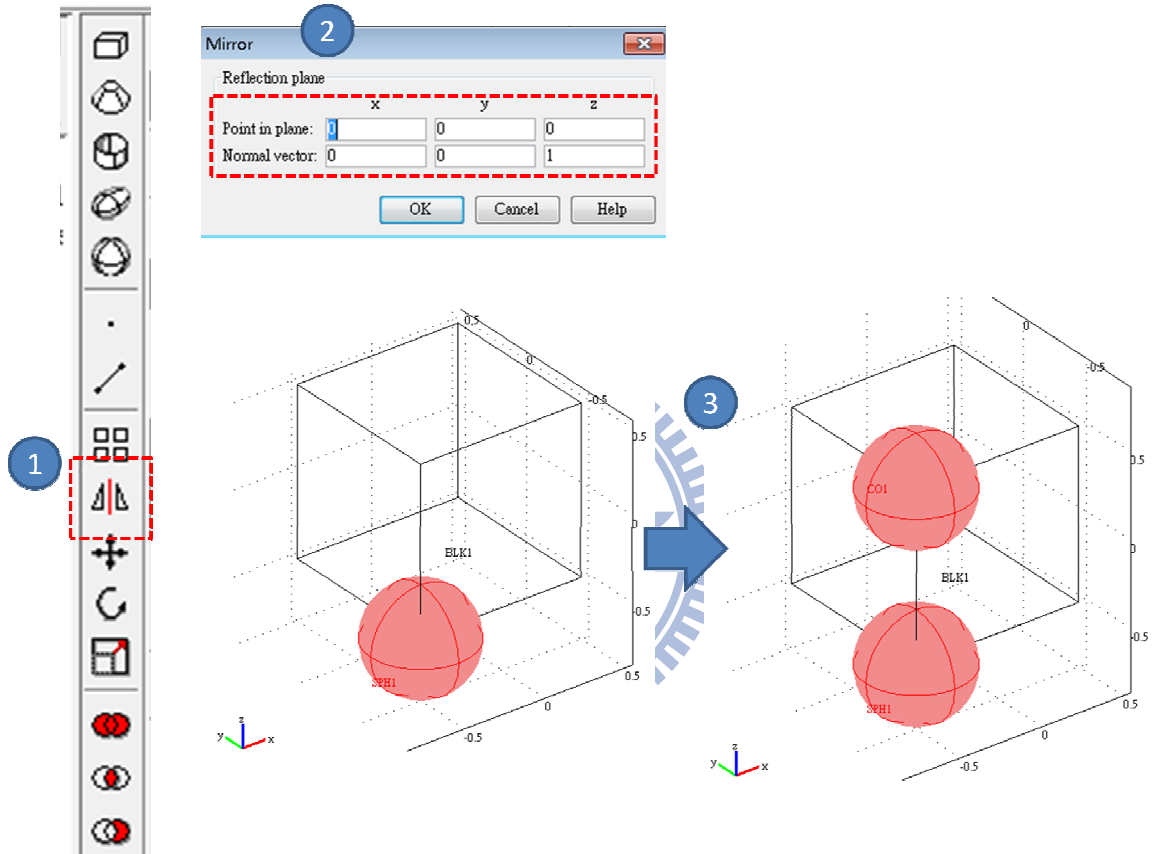
本文的結構形式為顆粒狀複合結構，會使用到立方體以及球體的繪圖工具，其建模步驟為：

1. 點選立方體。
2. 長度填入 X : 1, Y : 1, Z : 1，軸基準點填入 x : -0.5, y : -0.5, z : -0.5，其結果為中心點位於(0,0,0)，邊長介於-0.5 與 0.5 之間的正立方體。
3. 點選球體。
4. 半徑填入 0.3102，軸基準點填入 x : -0.5, y : -0.5, z : -0.5，其結果為正立方體的角落之圓球。

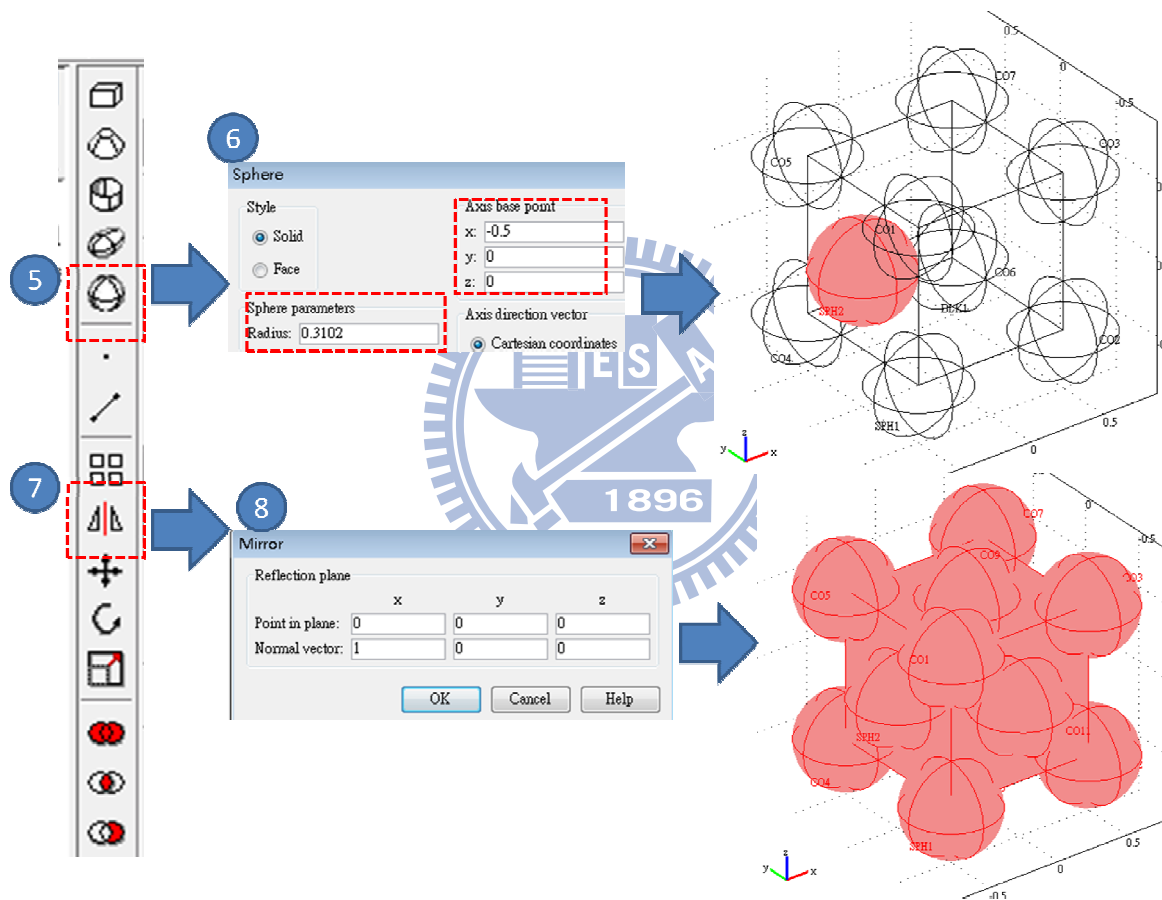


B-3 繪圖工具(映射)

1. 選擇映射工具。
2. 填入反射面上的一點，以及填入映射之法向量，其填入的值代表反射面為 $z=0$ 。
3. 映射結果為左圖至右圖。
4. 繼續進行步驟 2，使球體經由映射擴充至立方體的八個頂點，如圖所示。

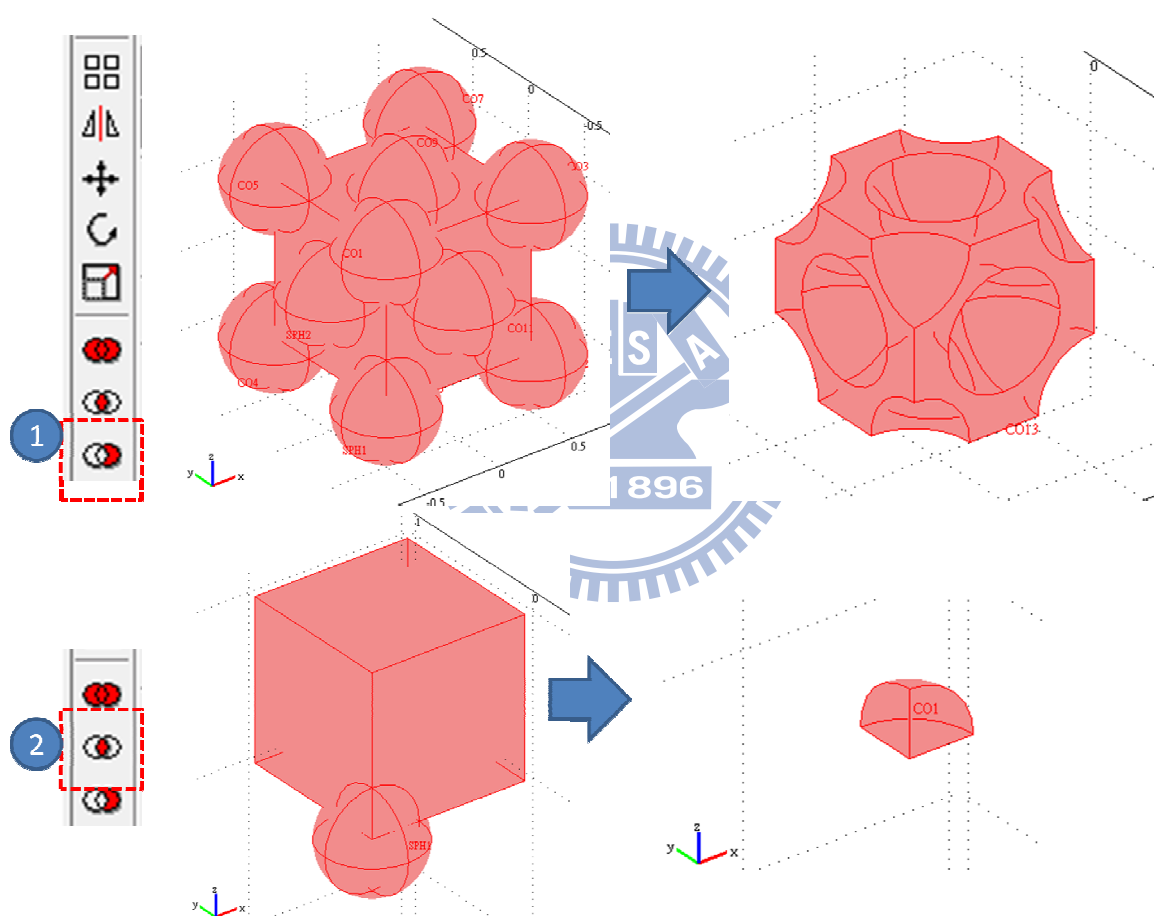


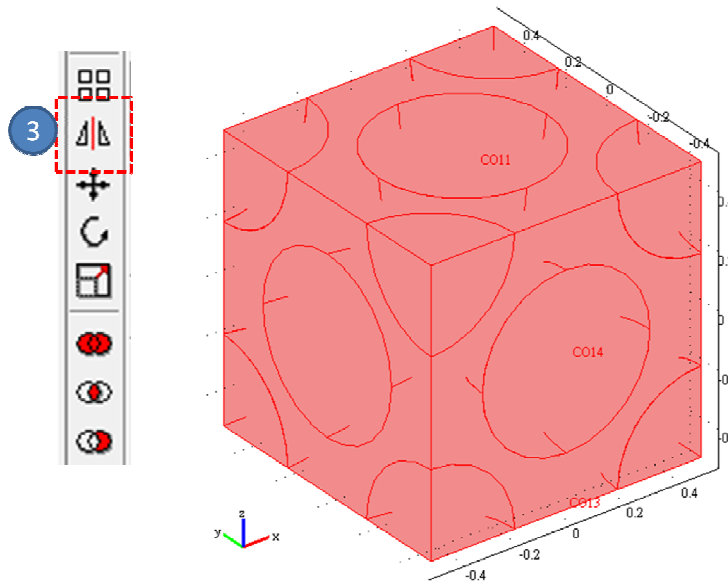
6. 點選球體。
7. 填入半徑 0.3102，軸基準點填入 $x: -0.5$, $y: 0$, $z: 0$ ，其結果為面心立方結構位於表面中心之球體。
8. 選擇映射工具。
9. 多次映射使球體映射至六個方形面中心，如圖所示。



B-4 繪圖工具(差集與交集)

1. 將前面映射的繪圖結果全選後，點選差集工具，結果如圖所示，為立方體挖空球體，其為母材之結構。
2. 另外繪製一正立方體以及一球體，點選交集工具，結果如圖所示，為 1/8 球體。
3. 使用交集工具產生之 1/8 球體與 1/2 球體，經由映射工具將內含物與母材之面心立方結構完成，如圖所示。

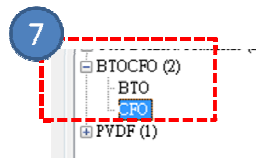
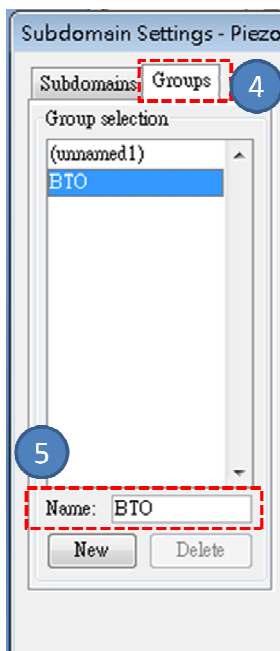
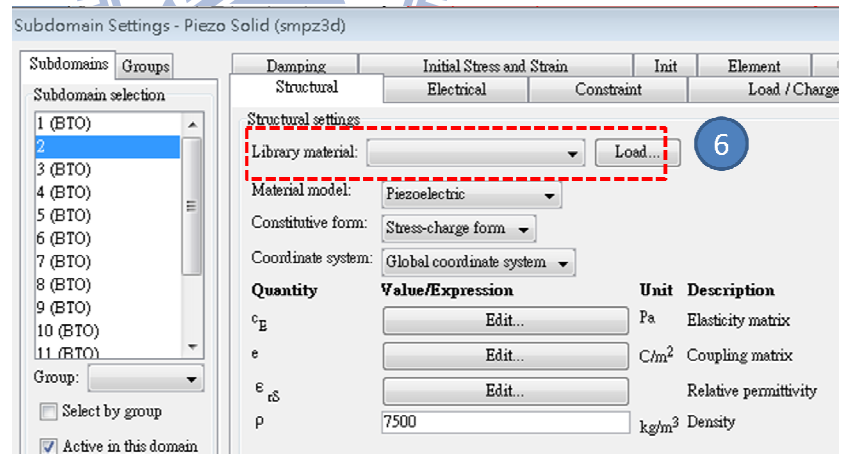
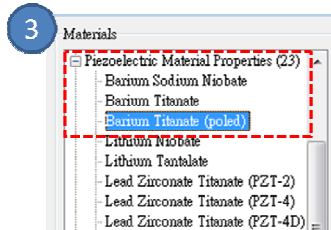
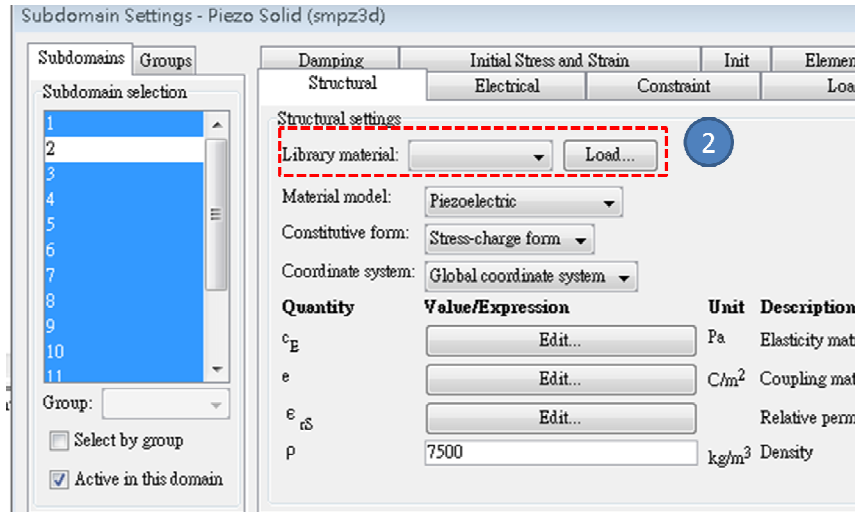
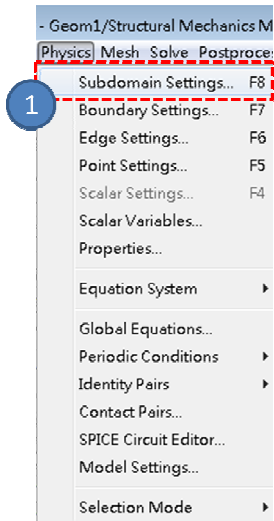




B-5 統御域設定

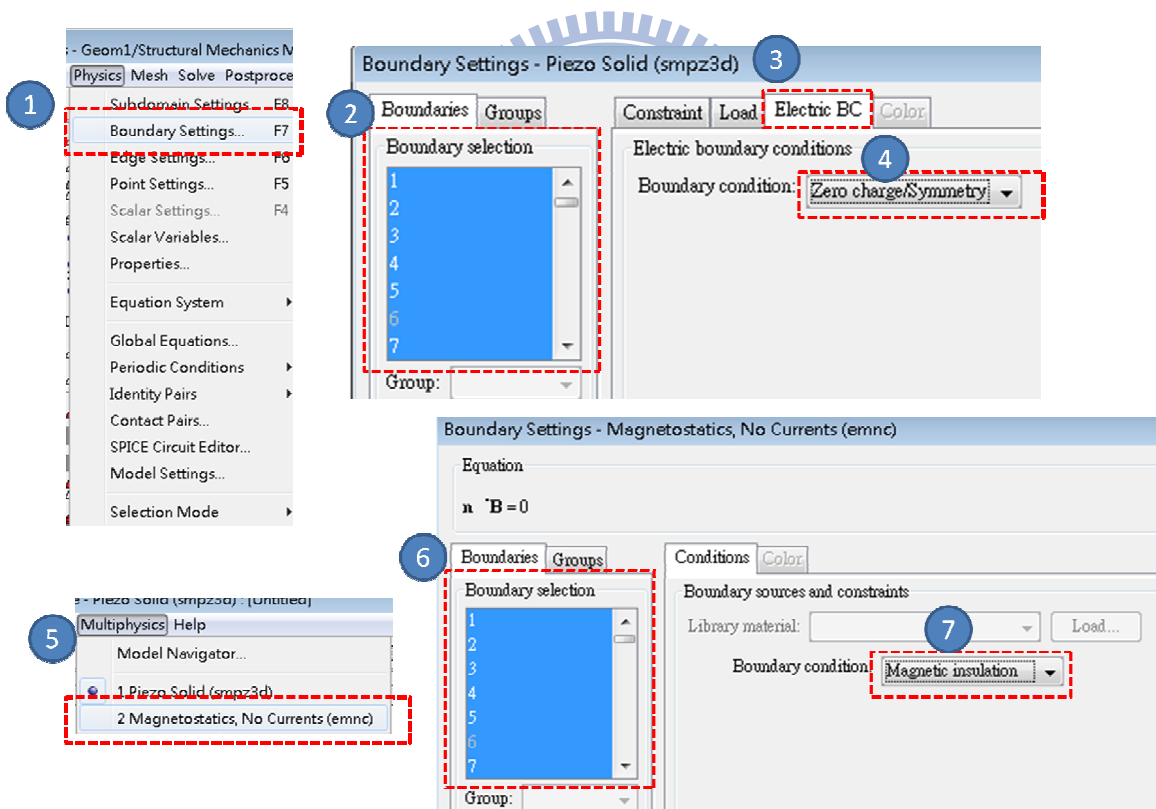
統御域設定即為材料性質之設定，其步驟為：

1. 開啓 物理量 / 統御域設定。
2. 選擇統御域標籤，除了編號 2 統御域不選取其餘皆選，於材料資料庫欄位點選”載入”。
3. 於材料資料庫內選擇壓電材料 > Barium Titanate (poled)，此材料為鐵電材料鈦酸鋇經過極化之後的材料性質。
4. 選擇群組標籤。
5. 建立為 BTO 的群組名稱，建立群組好處為將幾何繪圖刪除重繪時，群組內的統御域設定會保留，重新指定群組即可匯入完整統御域設定值。
6. 選擇統御域標籤，選取編號 2 統御域，於材料資料庫欄位點選”載入”。
7. 於材料資料庫內選擇自訂材料性質 BTOCFO > CFO。



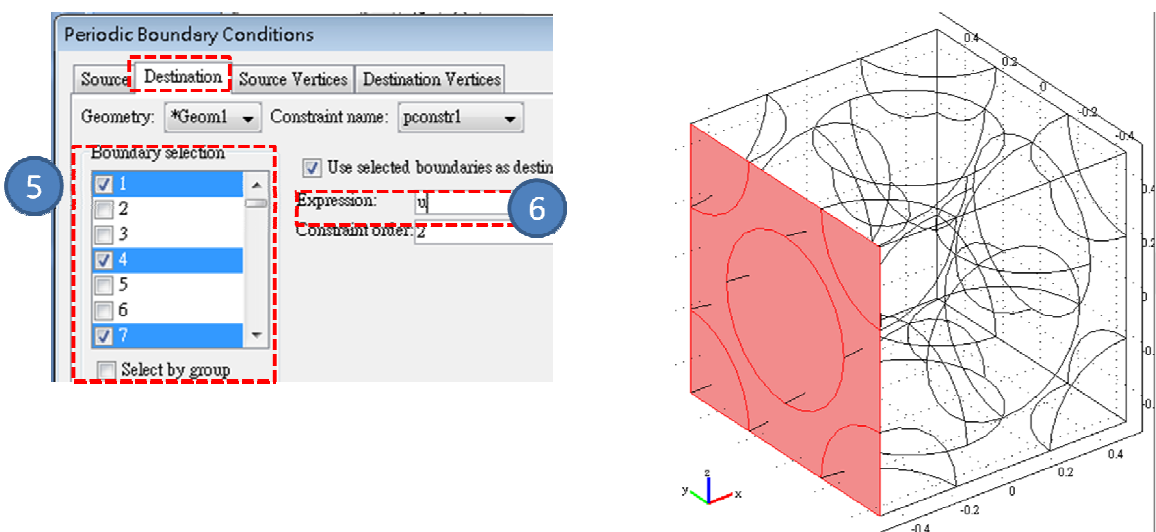
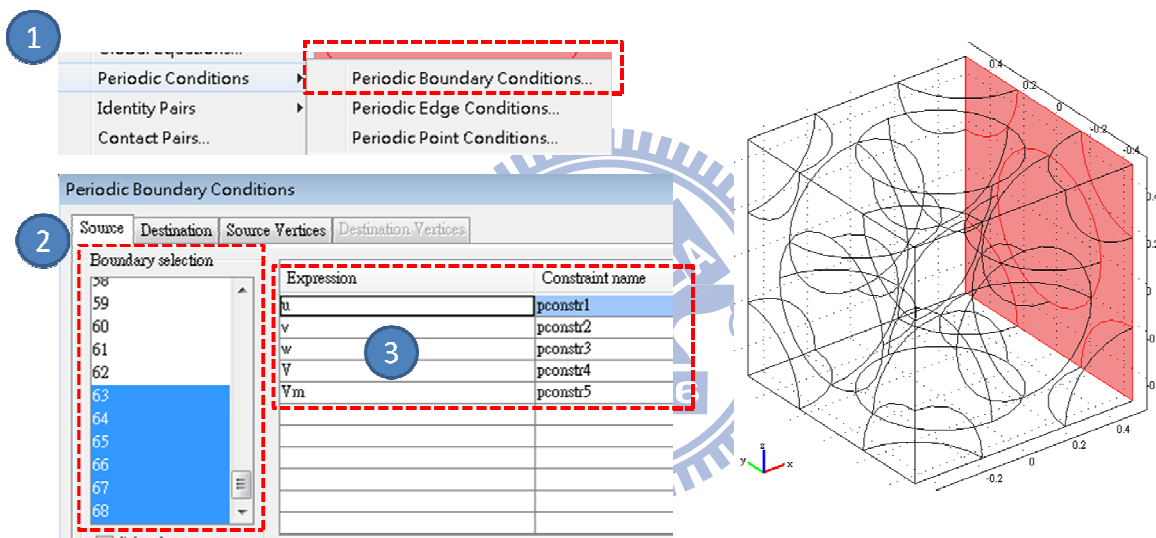
B-6 邊界設定

1. 開啟 物理量 / 邊界設定。
2. 選取全部邊界。
3. 選擇電邊界標籤。
4. 選取零電荷 / 對稱之邊界條件。
5. 開啟 多重物理量 / 靜磁,無電流模組
6. 開啟 物理量 / 邊界設定, 選取全部邊界。
7. 選取磁絕緣之邊界條件。

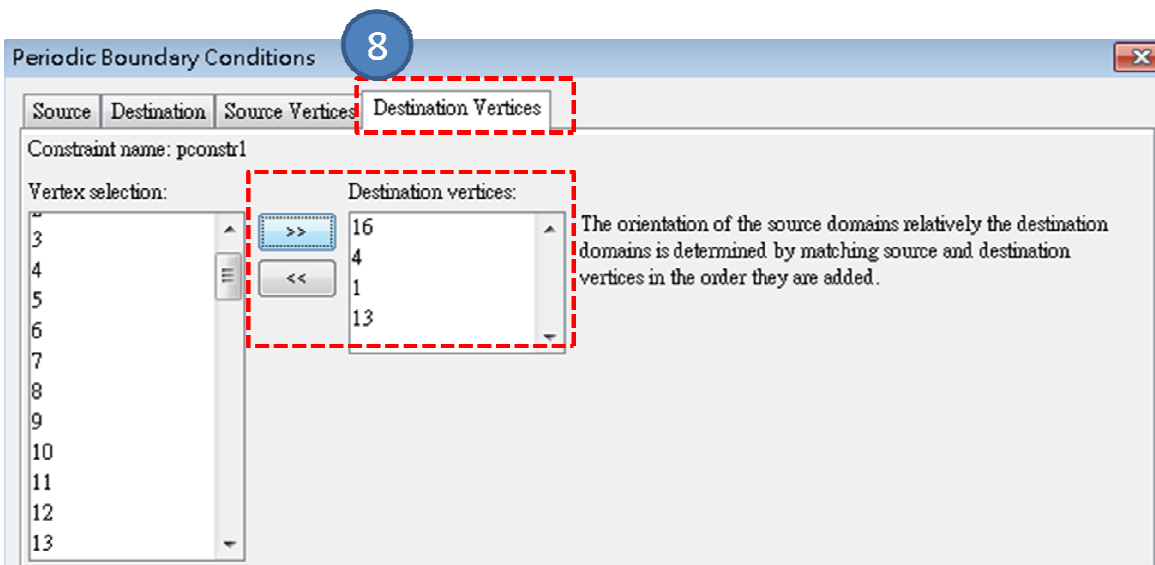
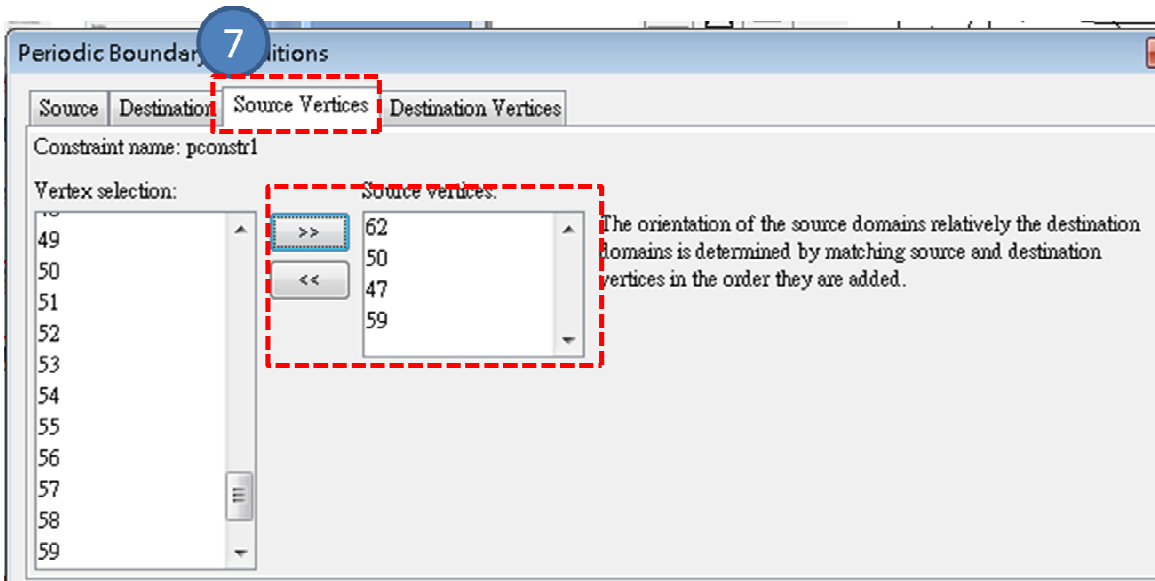


B-7 週期性邊界條件

1. 開啟 物理量 / 週期性條件 / 週期性邊界條件。
2. 選擇來源標籤，選取邊界 63 至邊界 68，如圖所示為 x 方向之邊界。
3. 填入週期性條件之表示式 u 、 v 、 w 、 V 、 V_m 五個獨立變量條件。
4. 選擇目的端標籤。
5. 選取邊界 1,4,7,11,18,21，如圖所示為 -x 方向之邊界。
6. 勾選選定邊界為目的端，填入表示式。



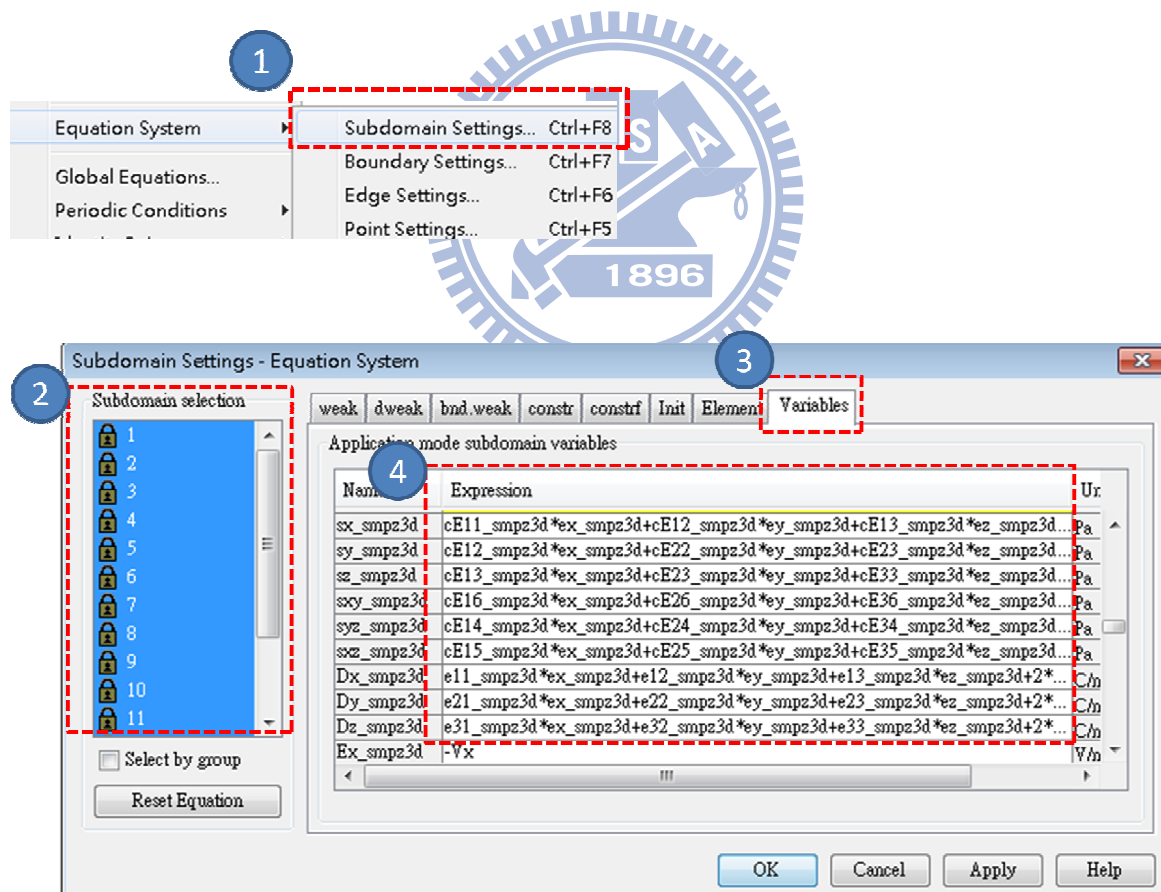
7. 選擇來源端點標籤，填入對應邊界的來源端點。
8. 選擇目的端點標籤，填入對應邊界的目的端點。
9. 重複步驟 2 至步驟 8，設定 y 方向與 z 方向之週期性邊界條件，共 15 條週期性邊界條件。



B-8 方程式系統

因為此建模為壓電模組與靜磁模組兩者耦合，靜磁模組的功能為增加一 V_m 之獨立變量，不過在壓電與磁之間的耦合，則需要依靠修改方程式系統來達成，其步驟為：

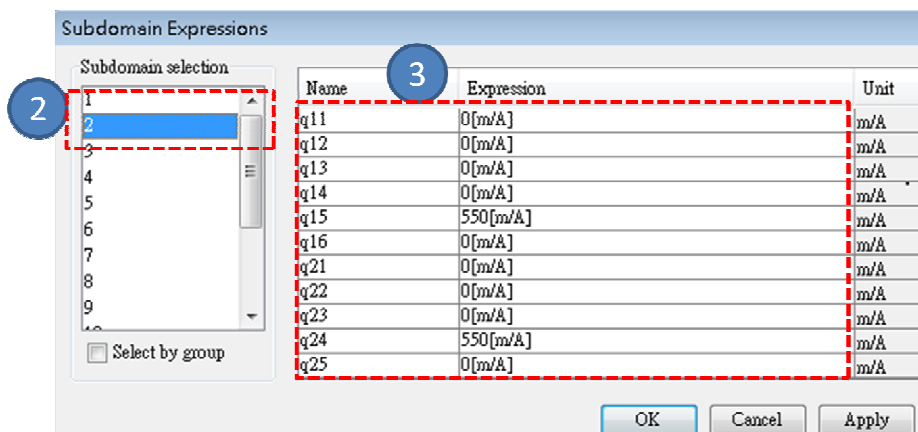
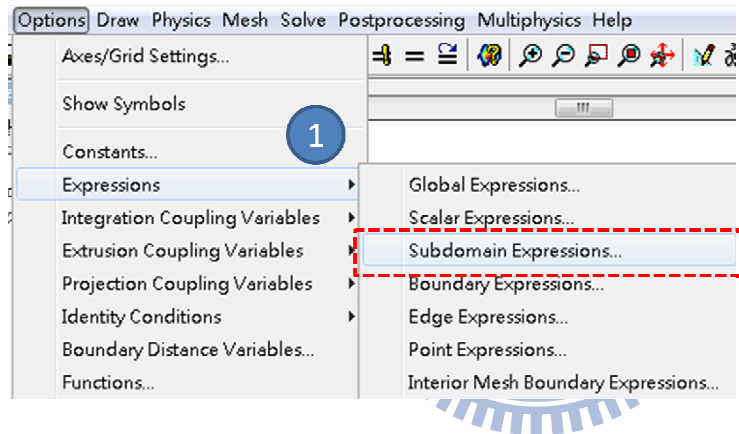
1. 開啓 物理量 / 方程式系統 / 統御域設定。
2. 選取全部的統御域。
3. 選擇變數標籤
4. 修改 sx_smpz3d 、 sy_smpz3d 、 sz_smpz3d 、 sxy_smpz3d 、 syz_smpz3d 、 sxz_smpz3d 、 Dx_smpz3d 、 Dy_smpz3d 、 Dz_smpz3d 、 Bx_emnc 、 By_emnc 、 Bz_emnc 共 12 條方程式。

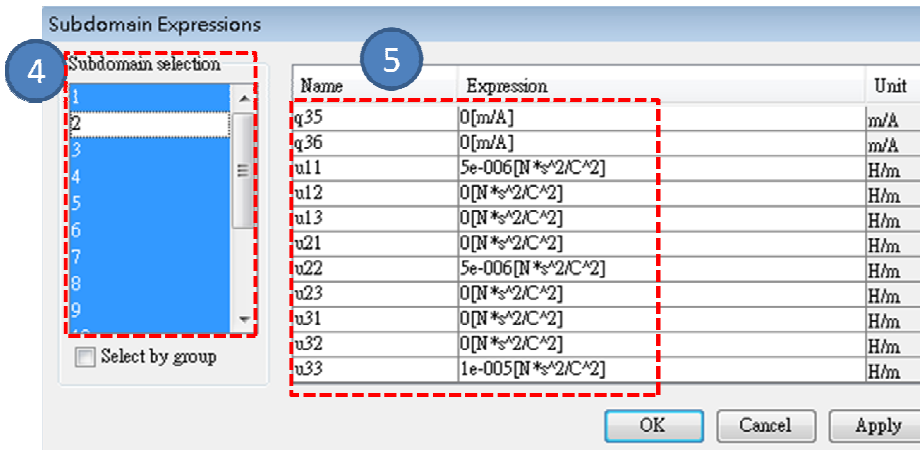


B-9 表示式(統御域表示式)

因為壓電模組中材料系數缺少壓磁係數以及磁導率，故在方程式系統中使用到的變數，需要在統御域表示式中設定，其步驟為：

1. 開啓 選項 / 表示式 / 統御域表示式
2. 選取編號 2 統御域。
3. 設定母材之壓磁係數與磁導率。
4. 選取排除編號 2 之全部統御域。
5. 設定內含物之壓磁係數與磁導率。

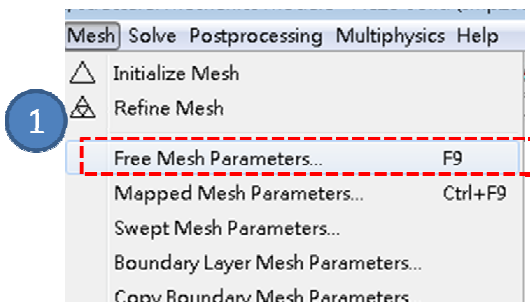


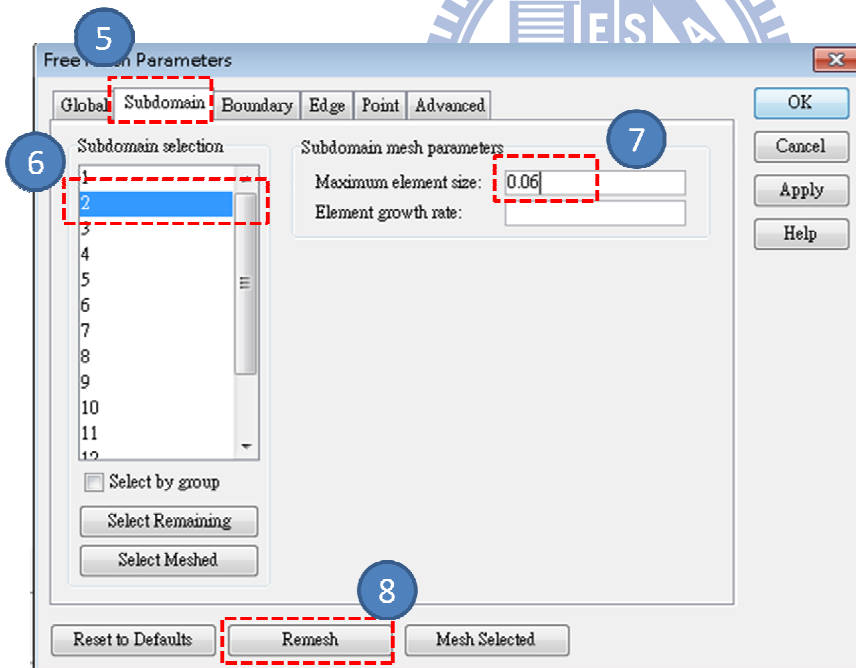
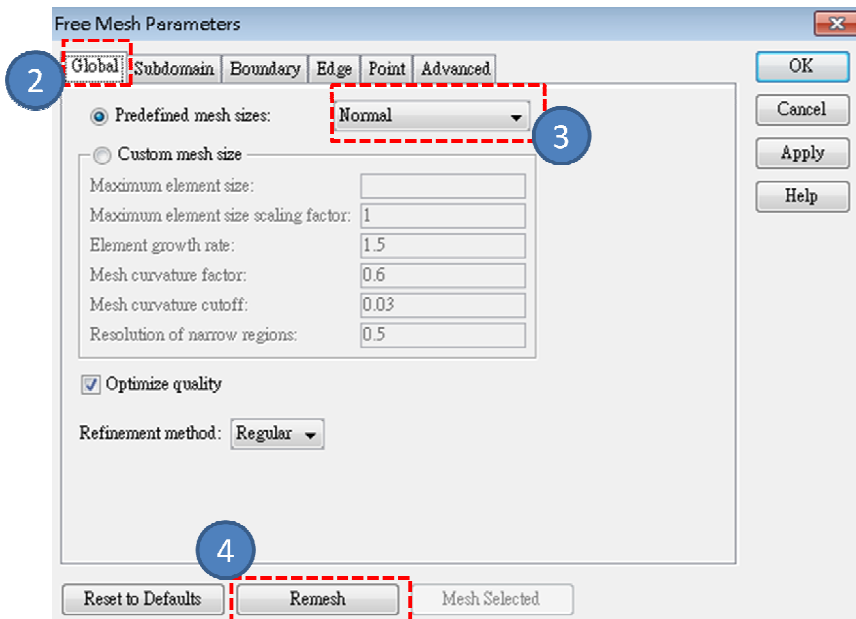


B-10 網格設定(自由網格設定)

網格設定有自由網格與映射網格，前者為三角網格，後者為四方形網格，本文求解是使用自由網格設定，其步驟為：

1. 開啟 網格 / 自由網格參數。
2. 選擇全域標籤。
3. 網格尺寸選擇正常。
4. 選取再生網格才會繪製網格
5. 部分情形需要個別統御域繪製不同的網格品質，選取統御域標籤。
6. 選取要另外繪製網格之統御域。
7. 填入最大元素尺寸，數值越小，網格品質越佳。
8. 選取再生網格。





B-11 求解器設定

1. 開啓 求解 / 求解器參數。
2. 選擇通用標籤。
3. 選擇線性系統求解器為”直接(SPOOLES)”。

