

摘要

本研究以 zig-zag path 管道自製、設計聲子晶體，並結合空腔(cavity)形成類似電路學的 RLC 共振結構，透過 COMSOL 軟體模擬出其理論之特徵頻率，使空腔中心聲壓達到穩定的放大效果。利用無響室的環境進行實驗，藉由放大電路將聲壓轉為電訊號並以聲源頻率、裝置距離和空腔尺寸作為變因，發現我們自製的聲子晶體可成功將電壓放大約 2.6 倍。此種聲子晶體具有體積小、構造簡單、可擴充為多晶體結構等特性，在未來可結合壓電材料，將其製成兼具發電與降噪功能之環保裝置。

研究目的

- (一)研究如何利用 COMSOL 軟體來模擬聲子晶體的不同變因之模態分布
- (二)研究聲子晶體在不同頻率下之聲音放大倍率
- (三)探討聲子晶體在不同距離下之聲音放大倍率
- (四)探討聲子晶體在不同空腔大小下之共振效能
- (五)分析聲子晶體的隔音效果

研究過程及方法

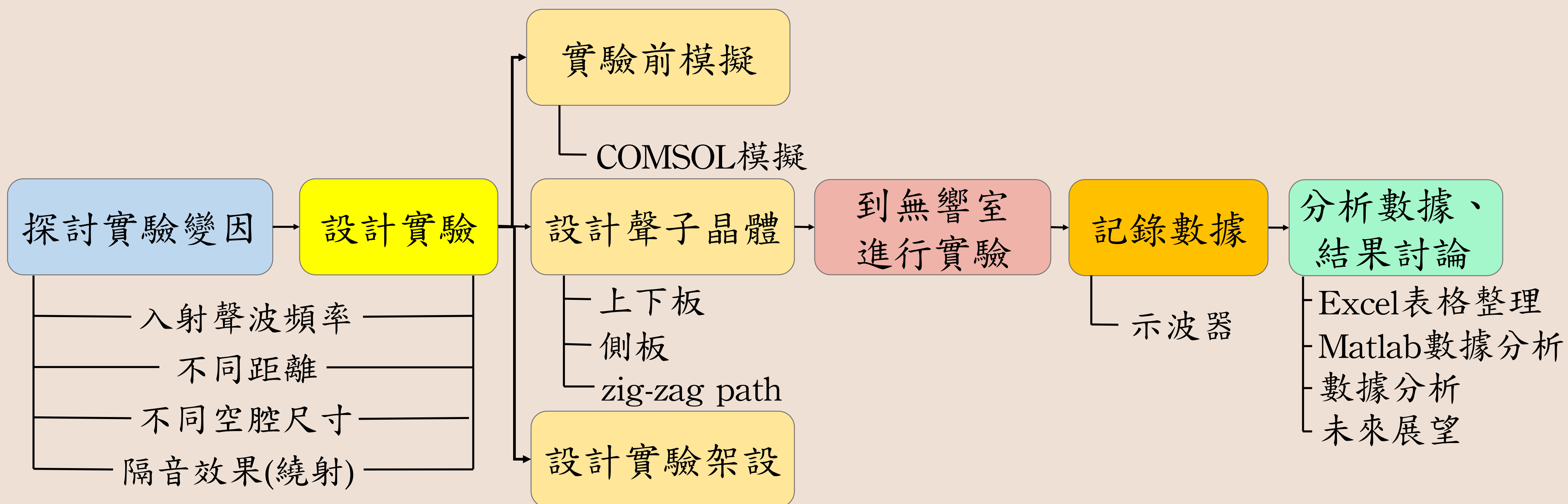


圖 1、研究流程圖

實驗原理

圖 2、聲子晶體聲學結構

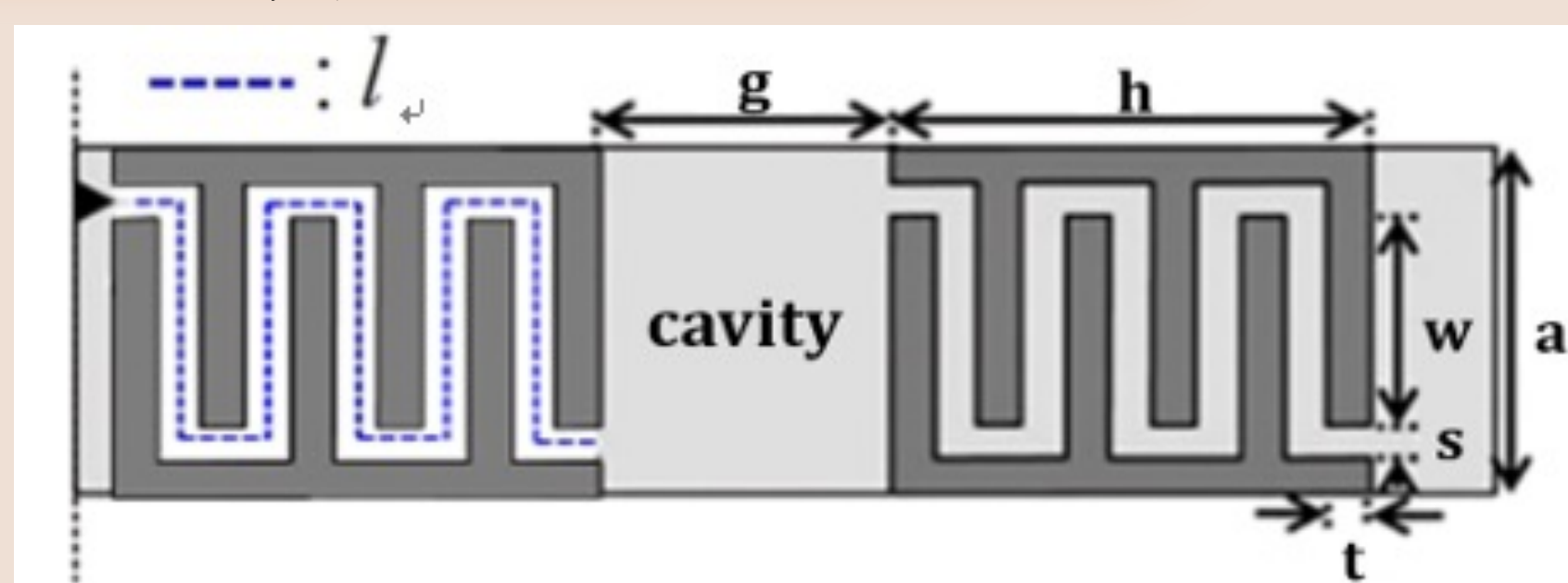


圖 3、等效力學系統

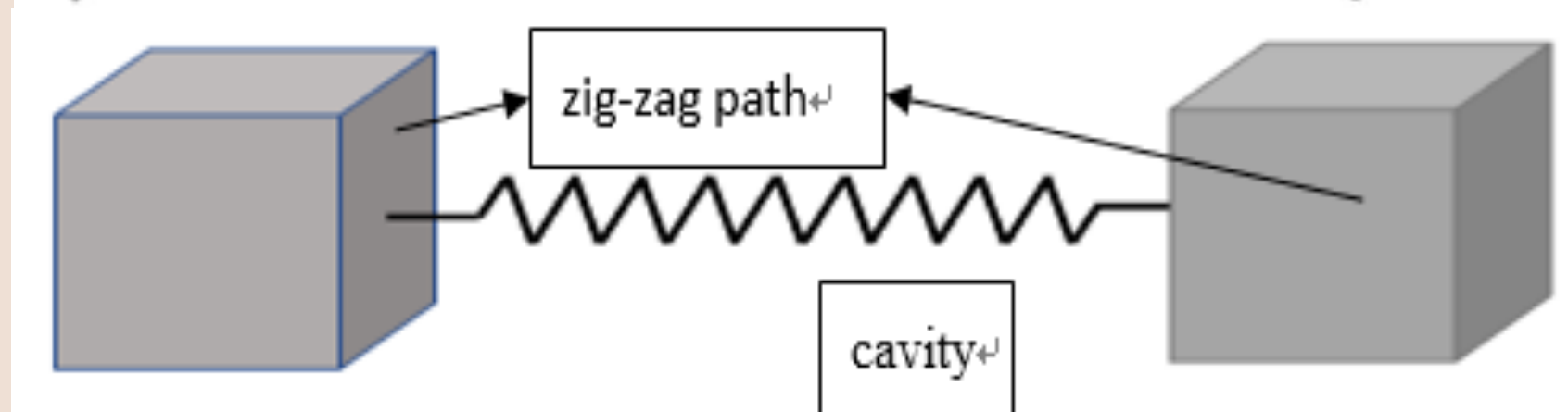


圖 4、等效電路

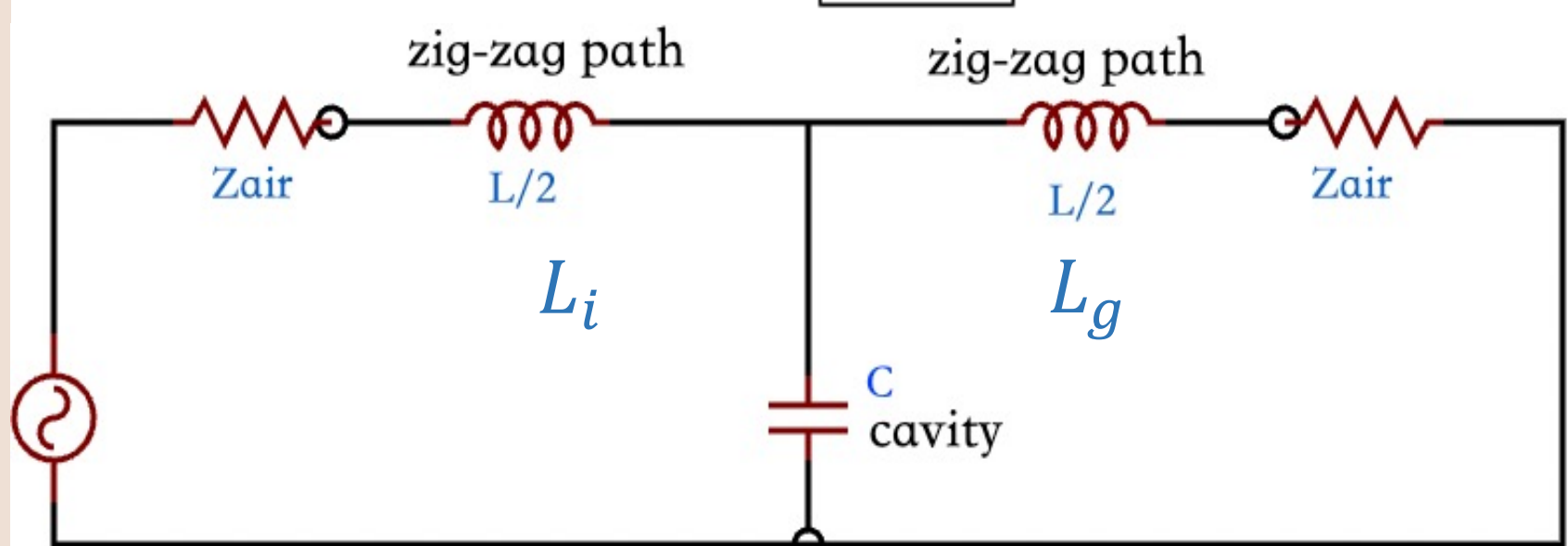


表 1、代號對照表

代號	a	s	l	g	m
意義	聲子晶體截面積	管道截面積	管道總長度	空腔寬度	質量
代號	C	ρ_0	V_0	c_0	
意義	力順(為彈性係數倒數)	介質密度	空腔體積	介質中聲音速度	

由力-聲振動系統中的公式：

$$m = \rho_0 l_0 s, \quad C = \frac{V_0}{\rho_0 c_0^2 s^2}$$

$$L_{eff} = 2\rho_{air} l s$$

$$C_{eff} = \frac{ag}{\rho_{air} c_{air}^2 s^2}$$

$$L_{eff} = \frac{L_i L_g}{L_i + L_g}$$

$$L_i = L_g = \frac{L}{2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{eff} C}} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C}}$$

$$\Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4}{LC}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

COMSOL模擬



- 結構形狀
- 空氣
- 邊界條件
- 網格形狀
- 頻率
- 聲源
- 網格尺寸

圖 6、COMSOL模擬流程圖

實驗裝置設計

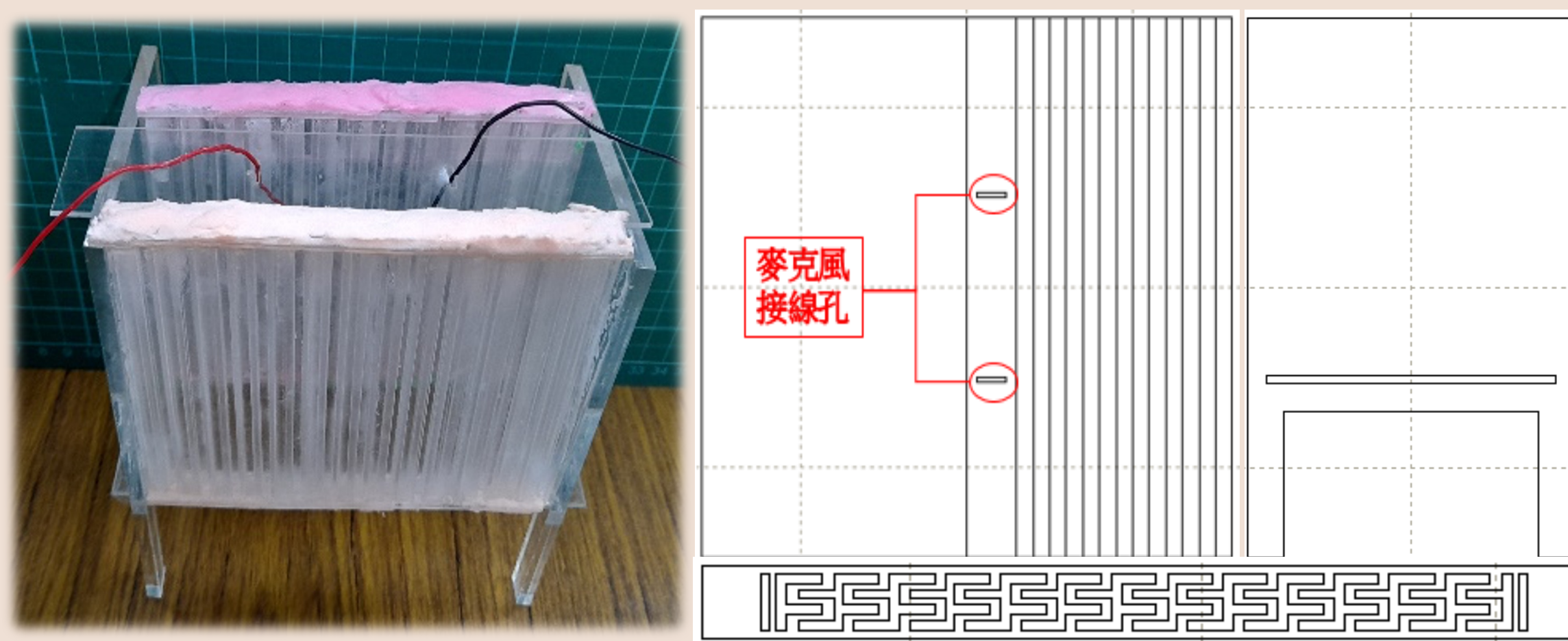


圖 7、自製聲子晶體

圖 8、聲子晶體設計圖

實驗架設

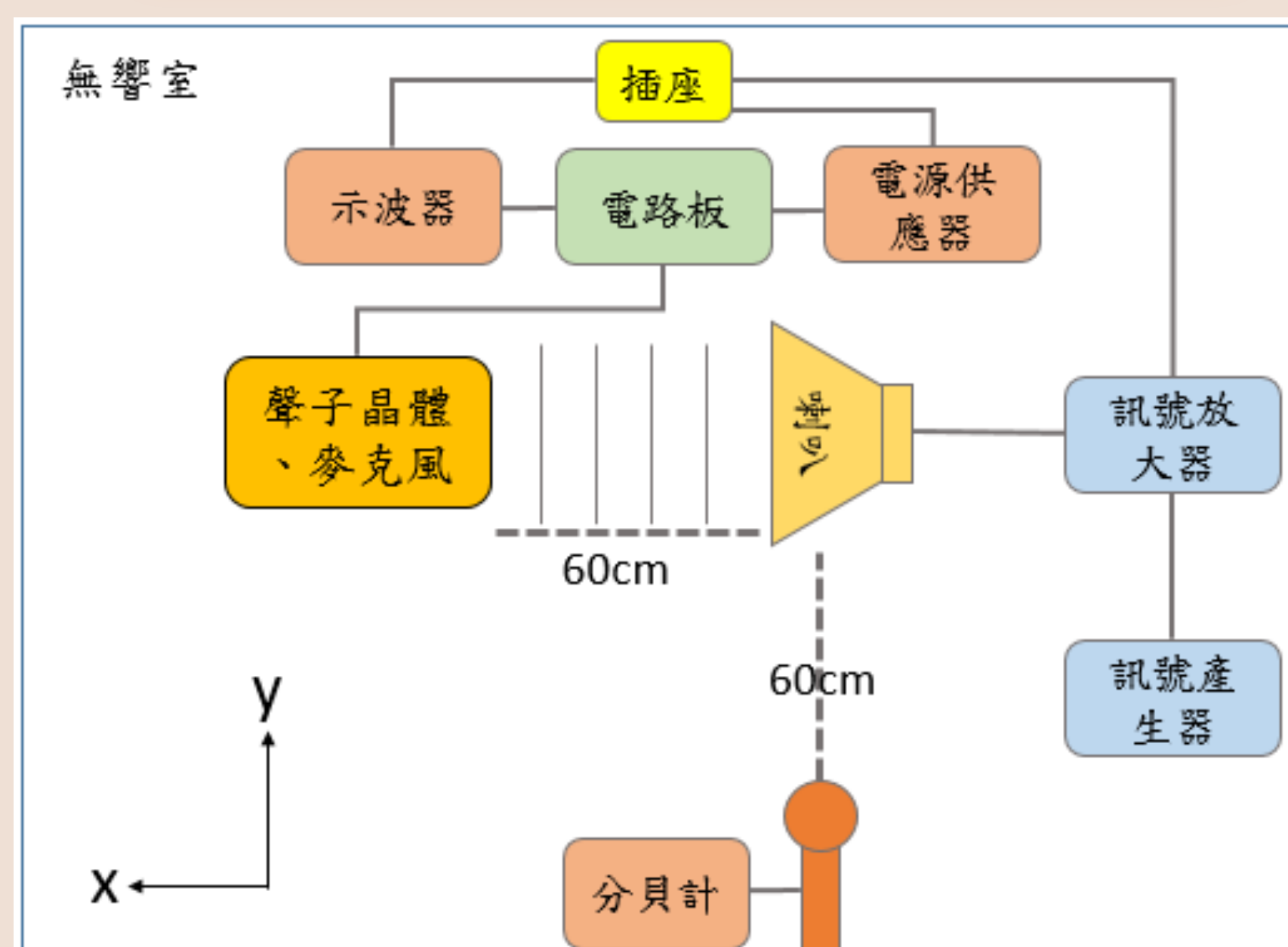


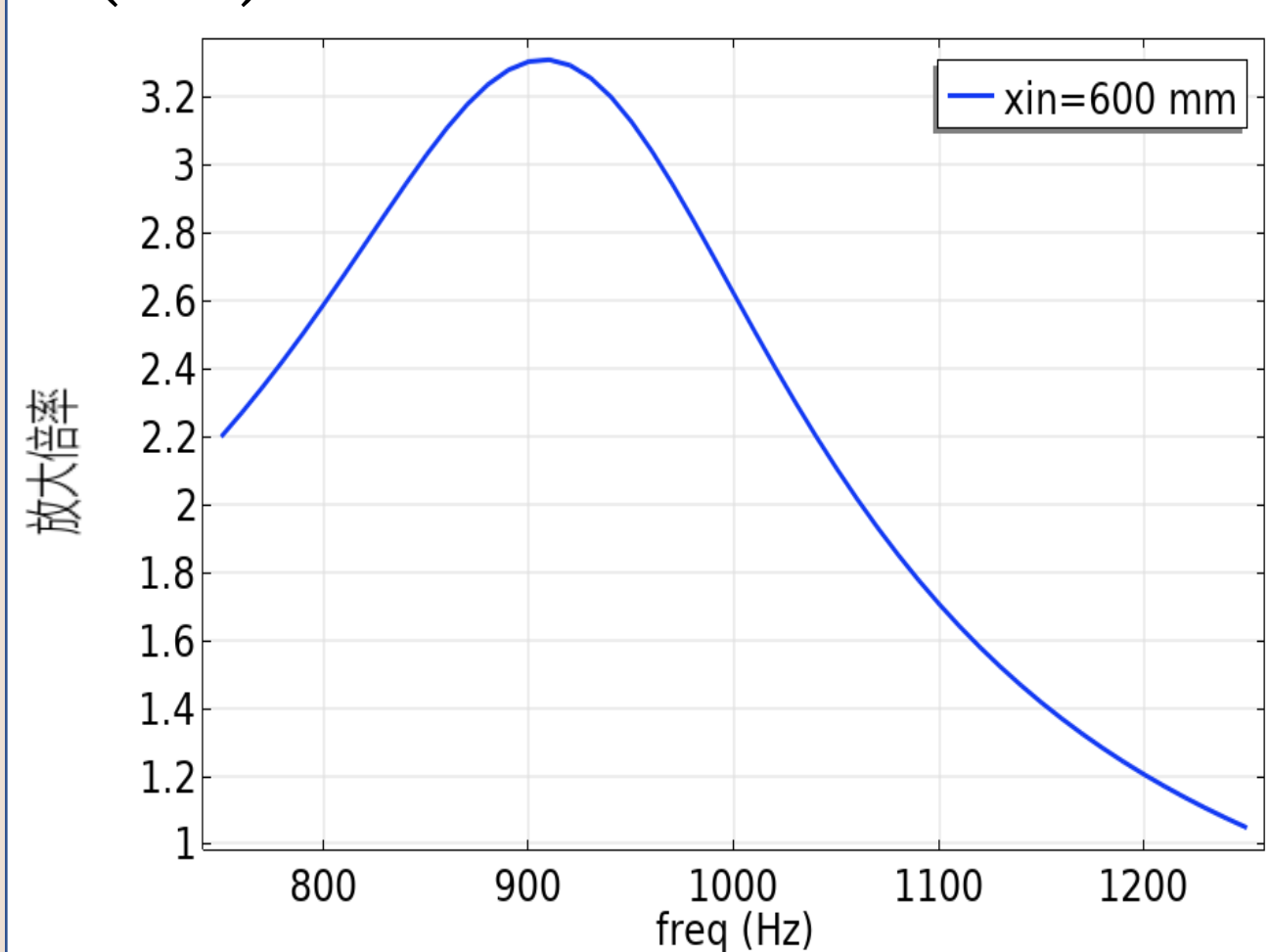
圖 9、實驗架設俯視示意圖

研究結果

一、研究聲子晶體在不同頻率下之聲音放大效率

$$\text{頻率公式：} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4}{LC}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

(一)COMSOL模擬



(二)實驗結果

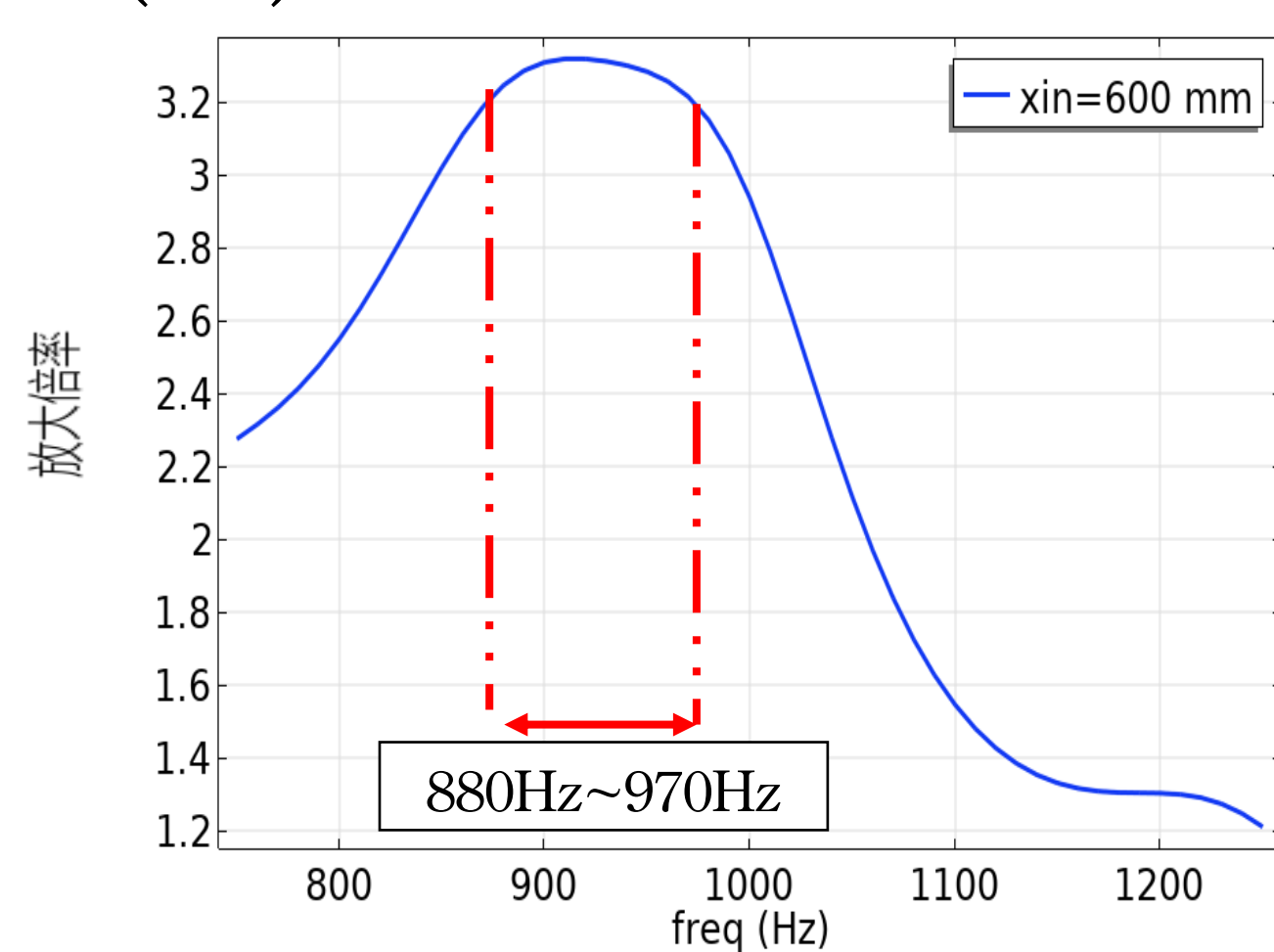


圖10、模擬不同頻率下放大倍率((右)考慮喇叭結構)

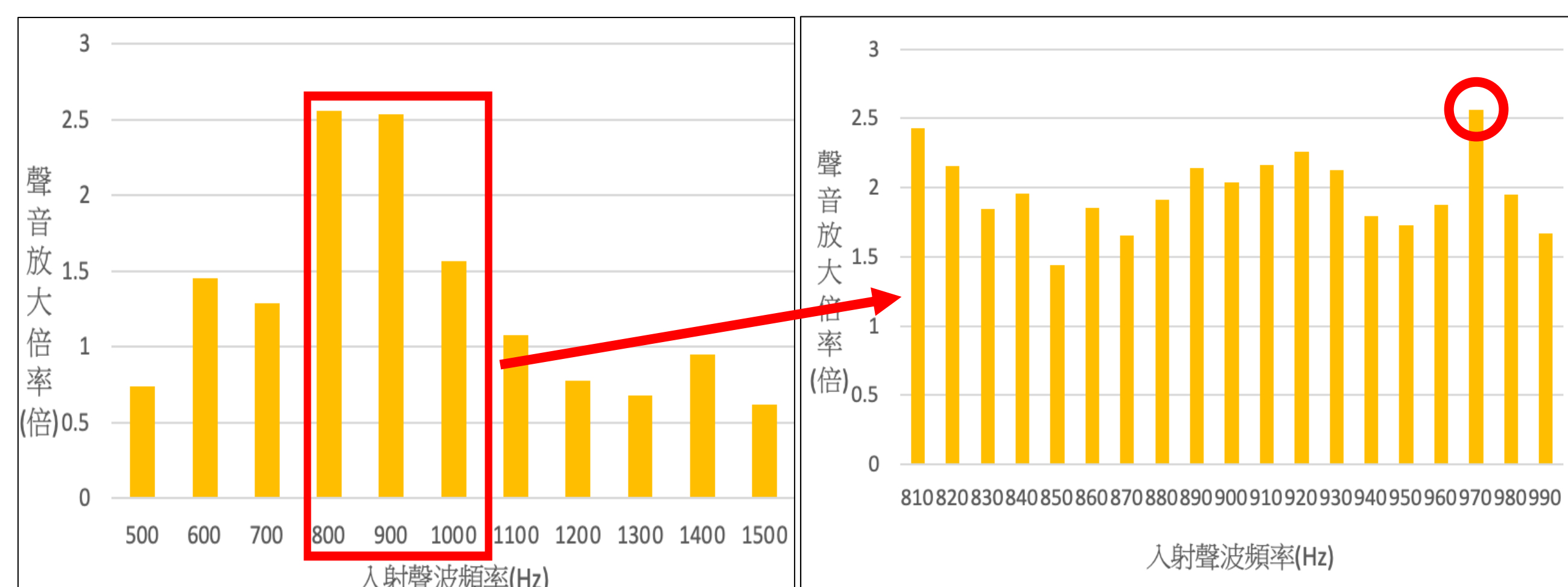


圖11、頻率粗調、細調與聲音放大倍率之關係圖

(三)討論

在單一聲子晶體模擬中，原先設計共振頻率為1000Hz，考慮熱黏滯與外部空氣後共振頻率下降。經推導後得知會有輻射阻抗，等效電路方程式需修正為 $L_n = nL + \Delta L$ 、 $C_n = \frac{C}{n}$ 。

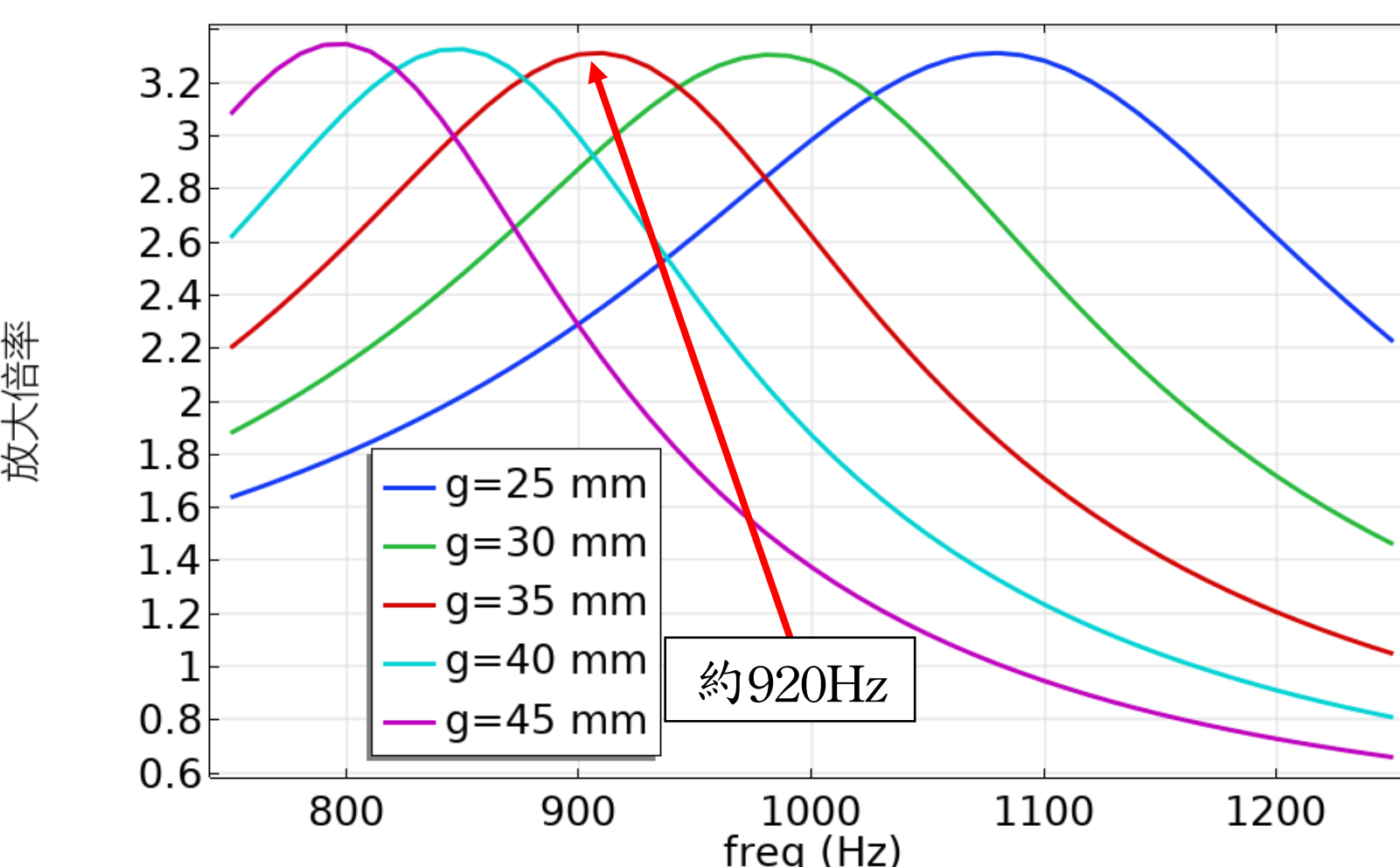
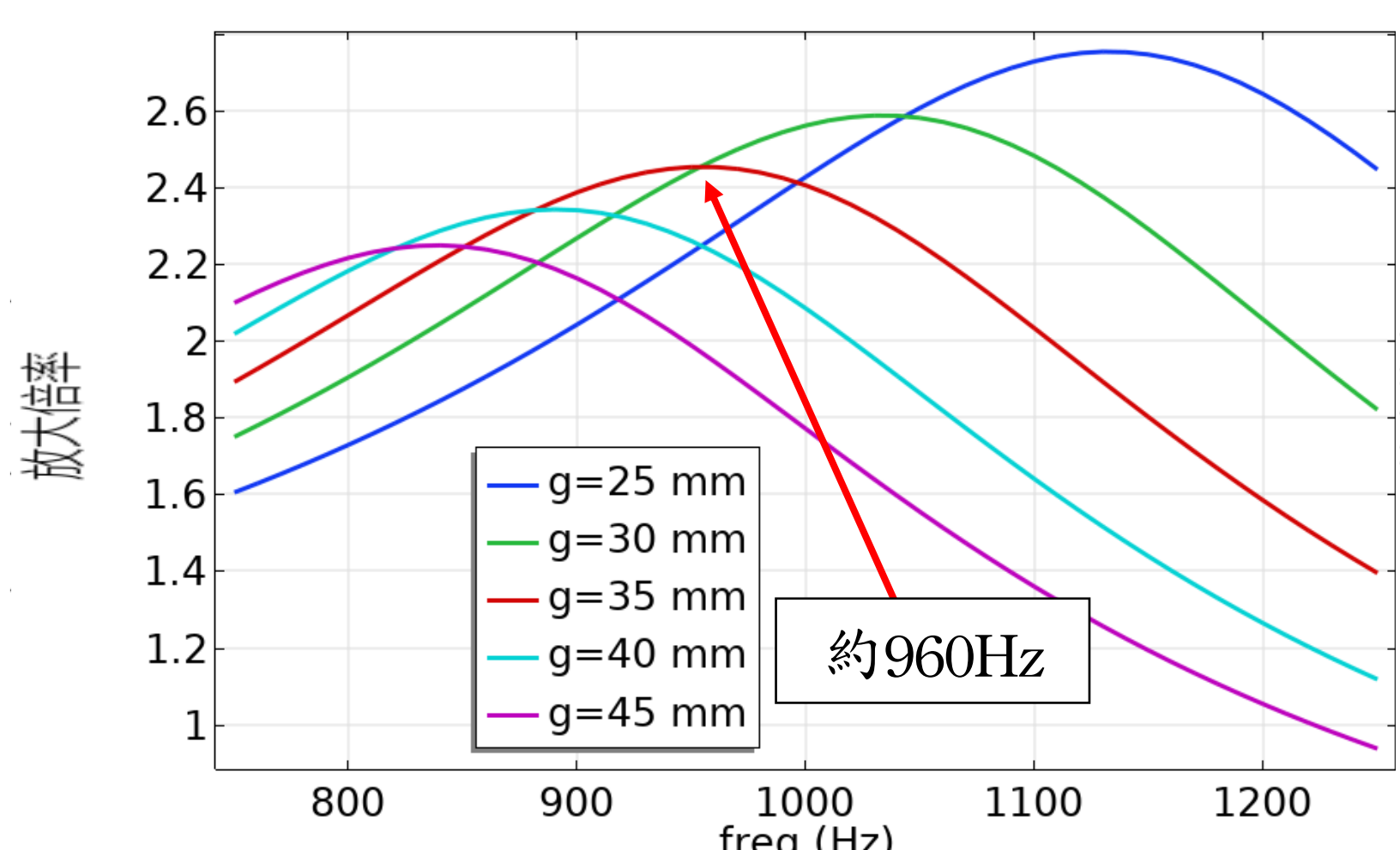


圖12、(左)考慮熱黏滯 (右)考慮外部空氣

實驗可由圖12(右)中看到，考慮喇叭結構在880~970Hz間峰值會有頻寬，與實驗結果相符。因手工製作的聲子晶體黏接處可能破壞週期結構，故峰值頻寬較模擬寬，且放大倍率2.6倍也較低於模擬的3.25倍，但仍有不錯的放大效果，且實際噪音也有頻寬可與實驗對應。

二、探討聲子晶體在不同距離下之聲音放大效率

(一)COMSOL模擬

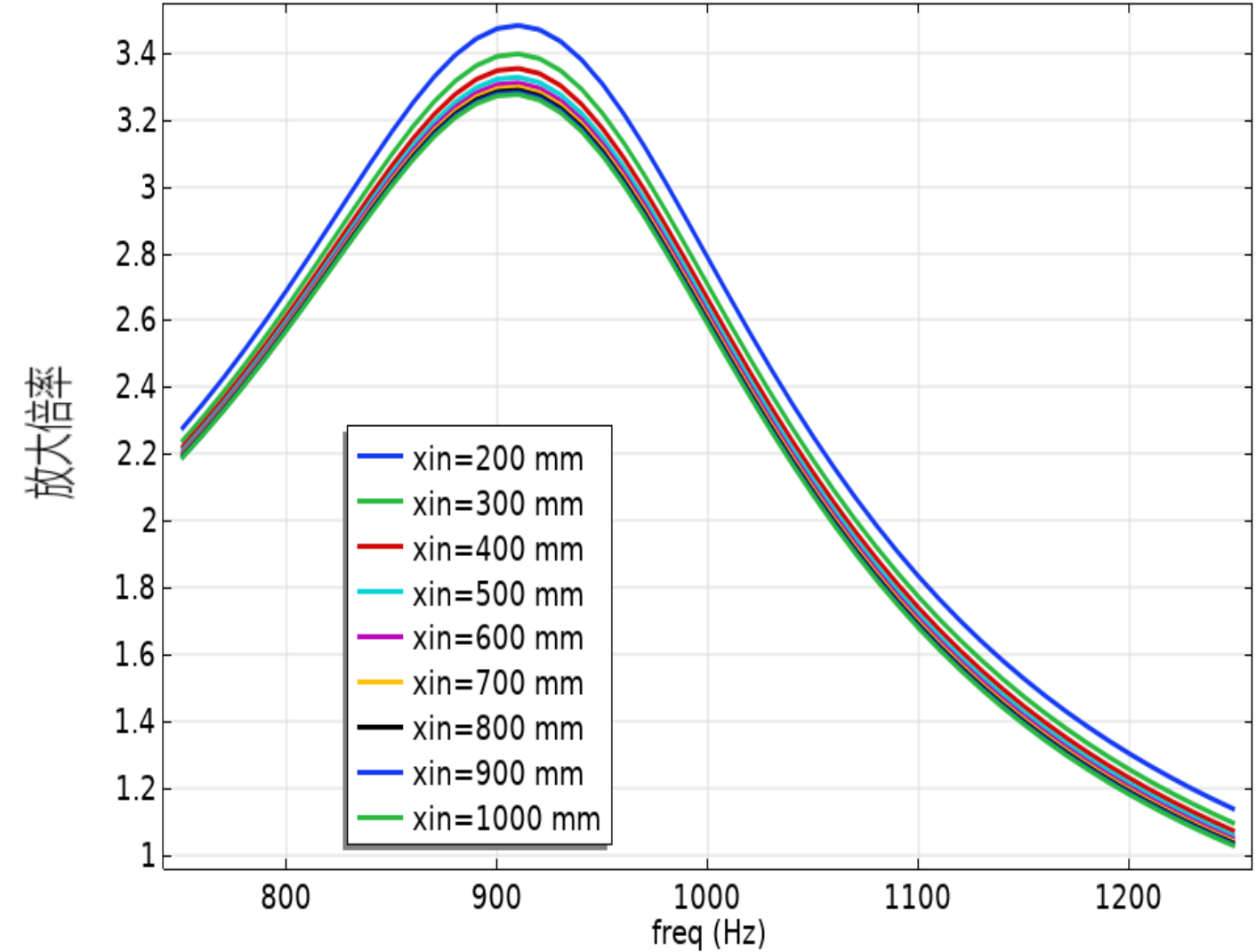


圖13、模擬不同距離下放大倍率

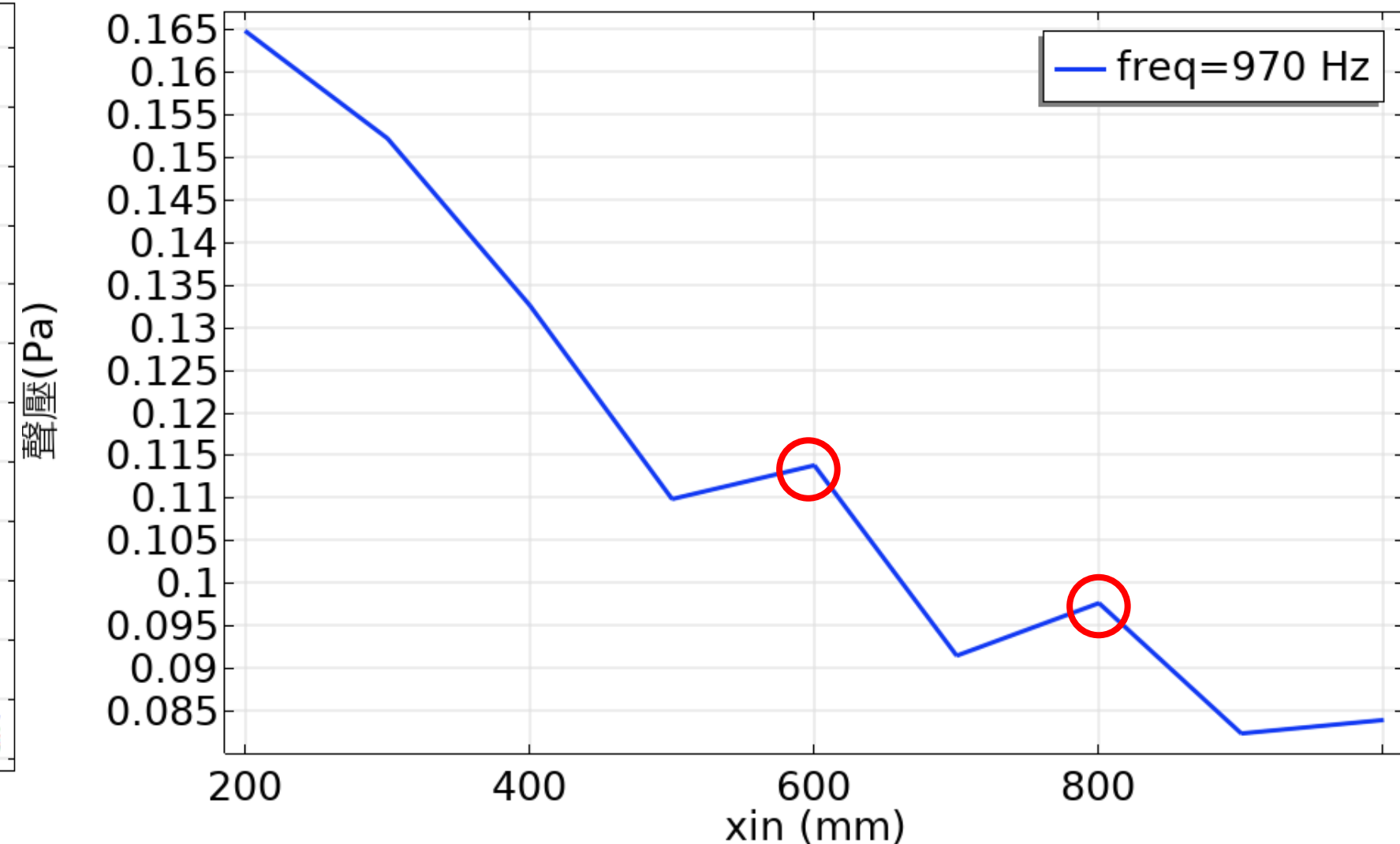


圖14、模擬不同距離下放大聲壓(考慮喇叭結構)

(二)實驗結果

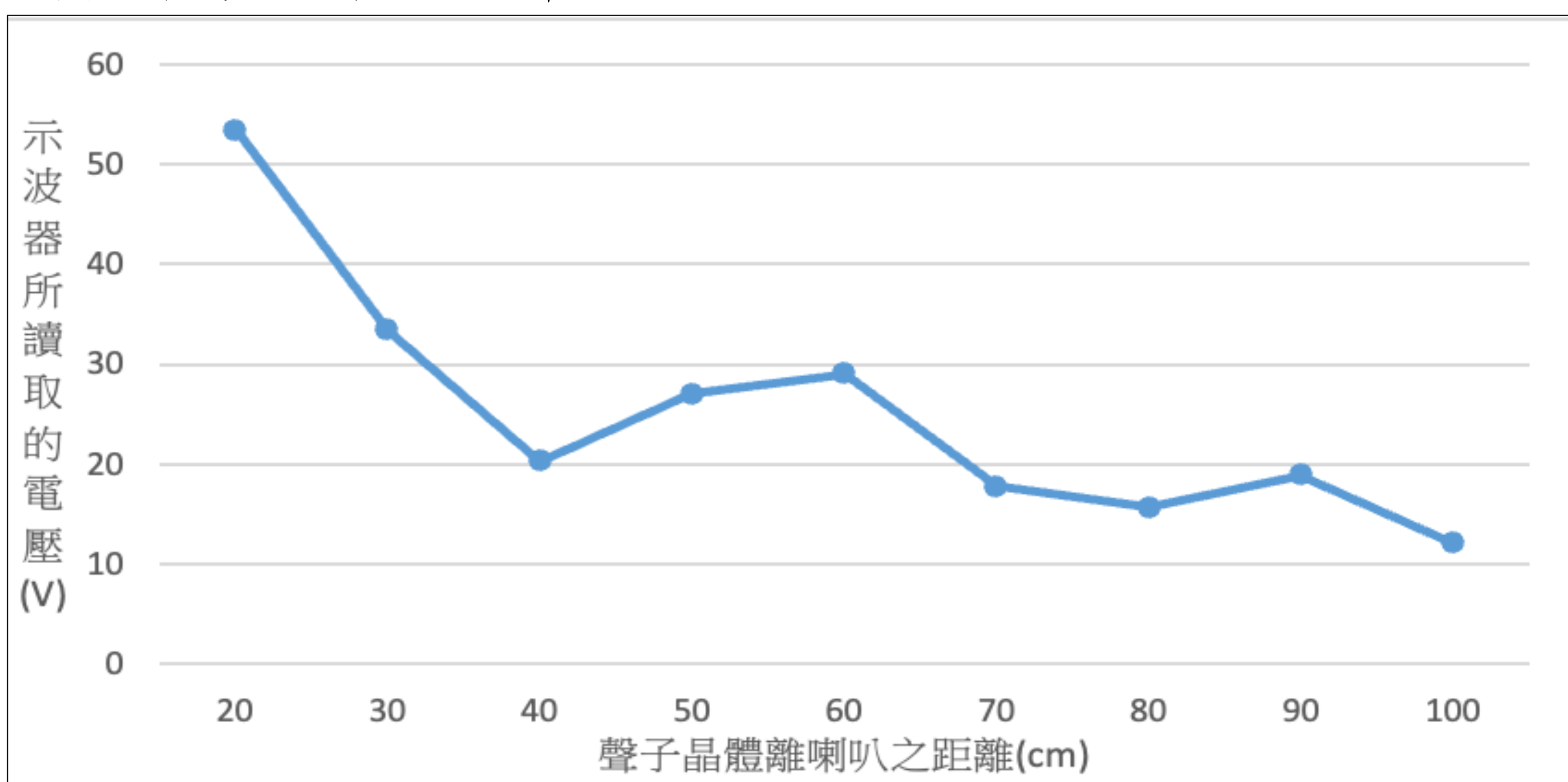


圖15、聲子晶體離喇叭之距離與其電壓之關係圖

(三)討論

在模擬可以看到，聲子晶體離喇叭越遠放大倍率越趨近於一定值。因放大倍率=內部聲壓/背景壓力場，而柱面波距離較近時衰減率斜率較大，因此放大倍率較大。

而實驗可看到600mm處有一上升，在考慮喇叭結構進行模擬後，可以看到圖14中的600mm、800mm處也有上升，實驗結果與模擬有相關性。我們推測原因為，在考慮喇叭結構後，喇叭與聲子晶體間會有反射波，因此在60cm處剛好產生了駐波的現象。

三、探討聲子晶體在不同空腔大小下之共振效能

(三)討論

(一)COMSOL模擬

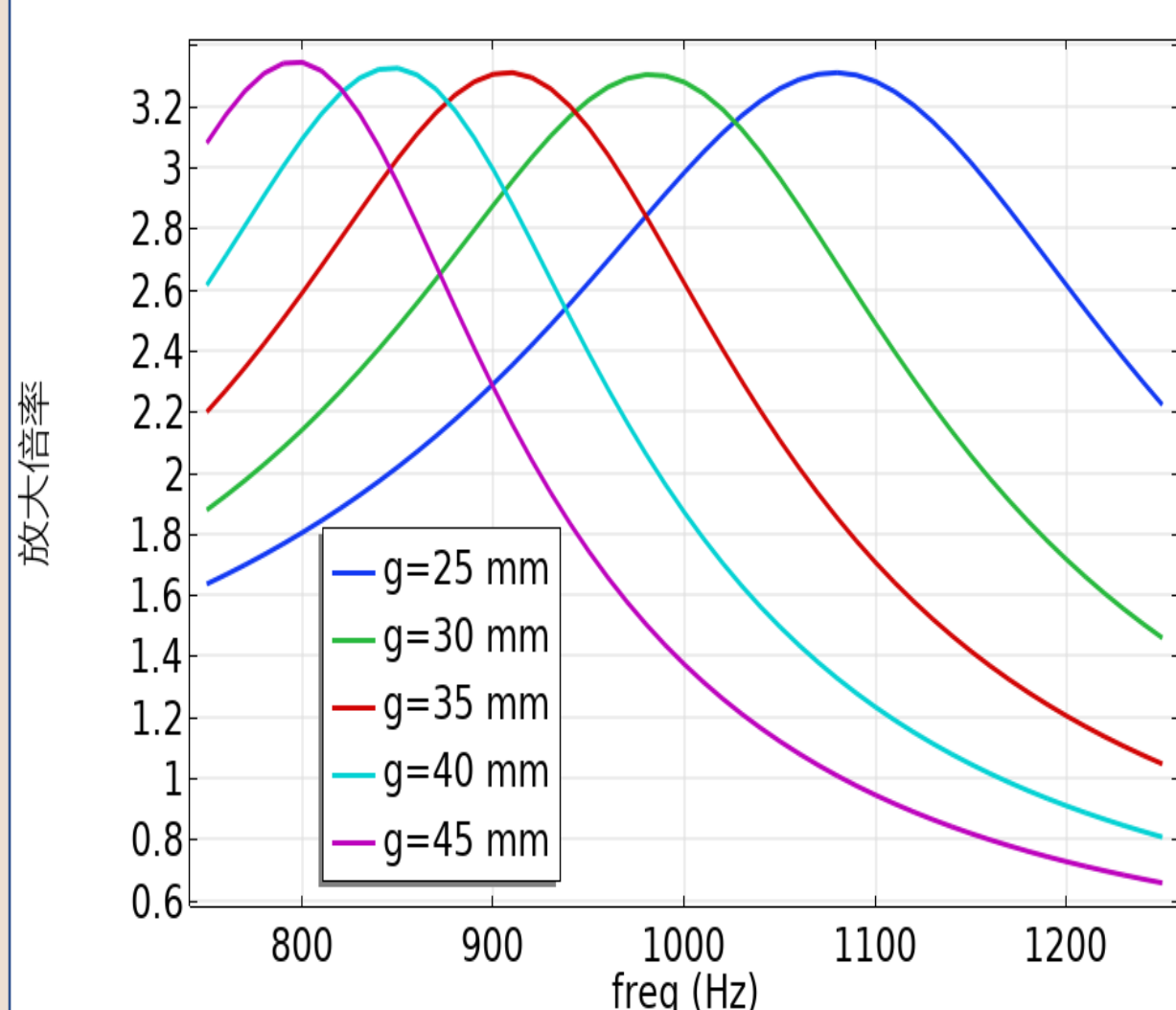


圖16、模擬不同空腔大小放大倍率

(二)實驗結果

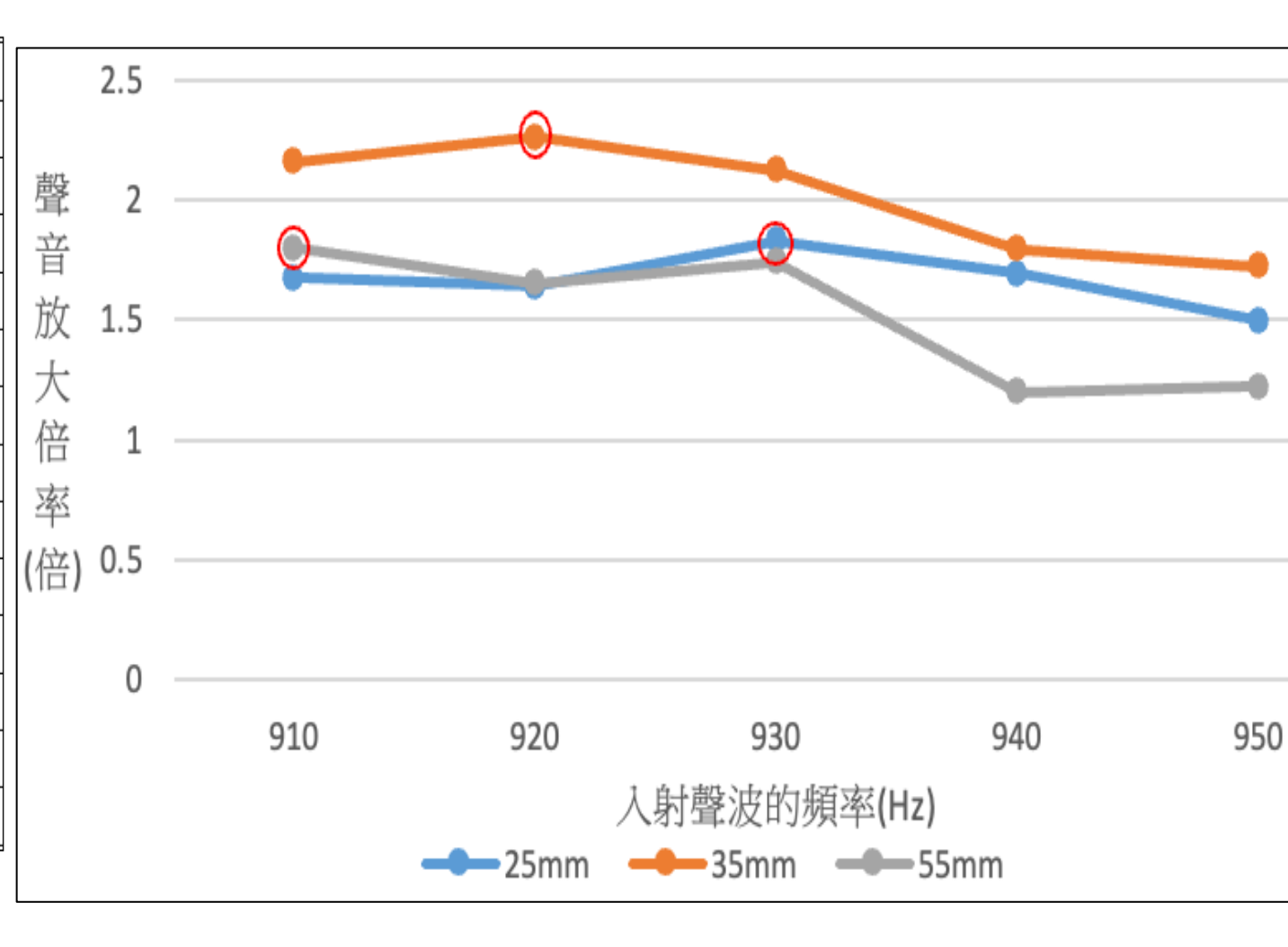


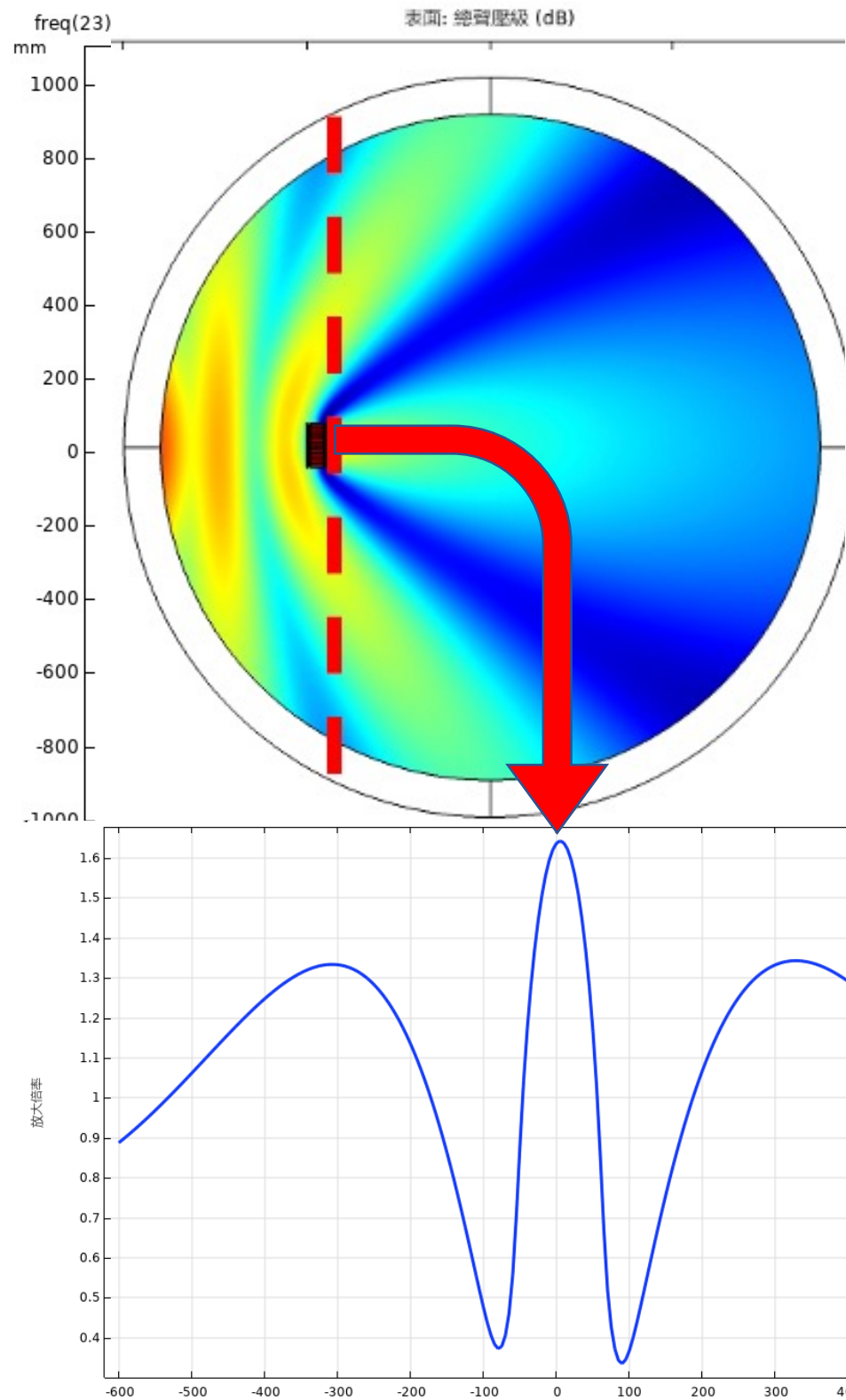
圖17、不同空腔大小放大倍率

在模擬中，改變不同空腔大小共振頻率也會隨之改變，原理同兩端開口管駐波頻率。放大倍率在模擬中未明顯改變，推測為輻射阻抗的增加及柱面波影響，造成其放大倍率不變。

在實驗中，共振頻率如同模擬的改變一樣，然而放大倍率仍是原先設計的35mm最佳，我們推測與手工製作聲子晶體黏接處有關。

四、分析聲子晶體的隔音效果

(一)COMSOL模擬



(二)實驗結果

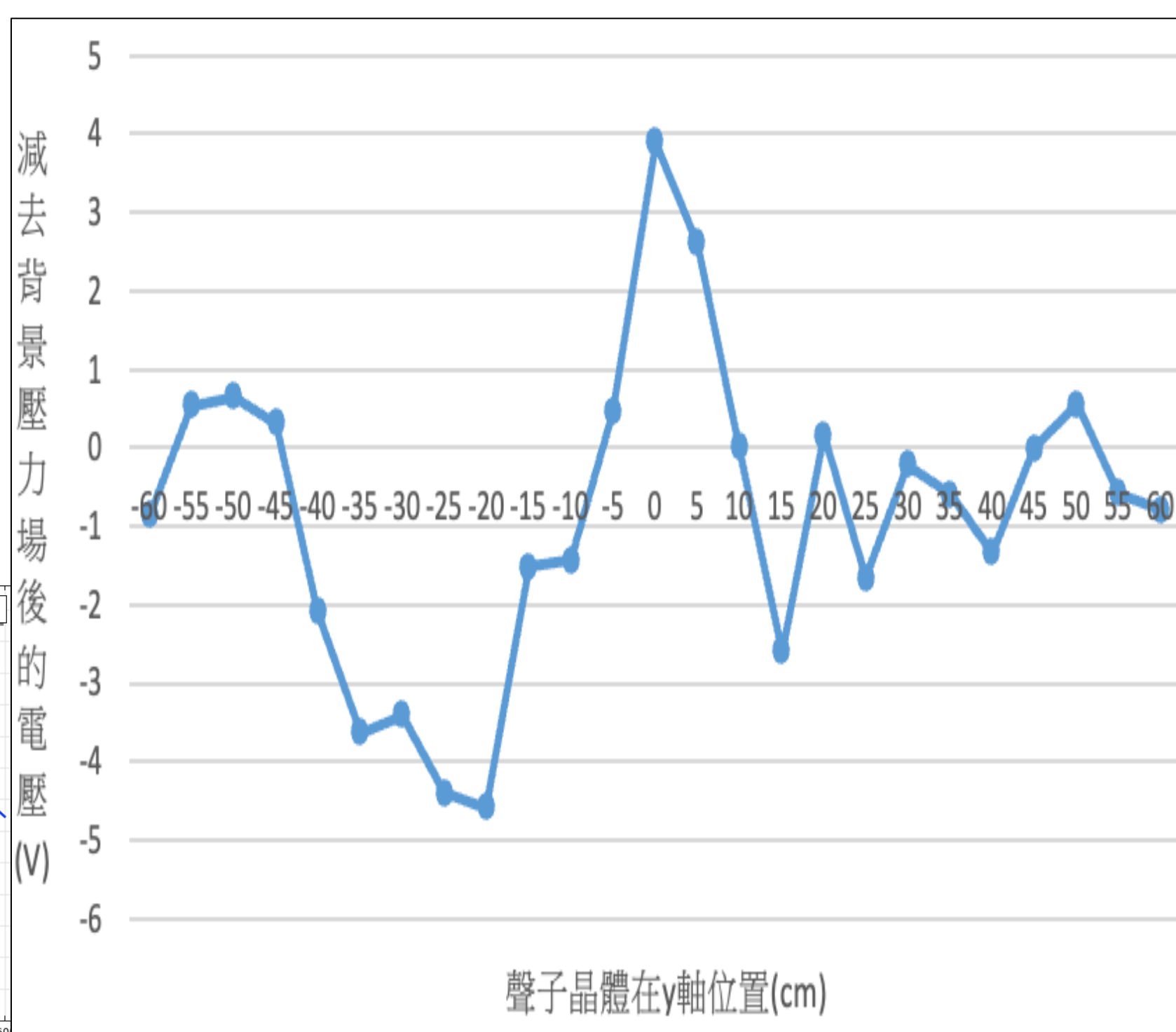


圖18、繞射聲場分佈與W型曲線圖19、有聲子晶體的電壓減去背景壓力場的電壓

(三)討論

從模擬與實驗的結果看到，聲子晶體的共振並未使聲子晶體後方有降噪的效果，反而還因為繞射造成噪音放大的效果。在經過模擬的確認後，可以得知繞射現象發生原因為管道繞射，而非邊角繞射所產生的。

(一)聲子晶體的隔音效果

未來展望

1. 阻抗管之運用

優化聲子晶體隔音效果的測量方法，設計符合阻抗管尺寸的zig-zag path，並在阻抗管內部進行測量，避免繞射的產生。

2. 隔音效果

運用聲子晶體的通帶(Band-pass)現象，藉由控制空腔尺寸而達到阻隔噪音或發電的效果。

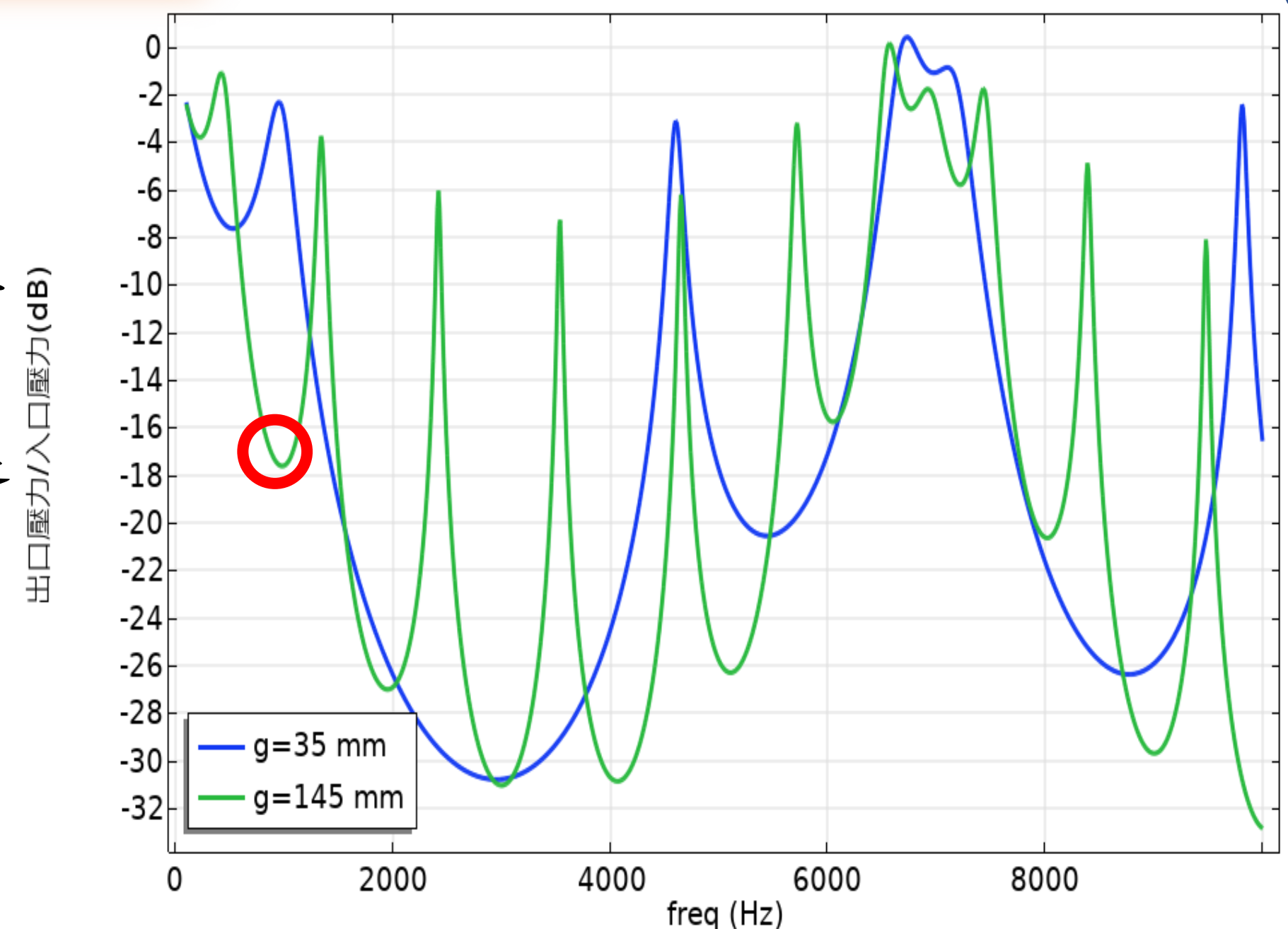


圖20、空腔大小的改變造成的降噪圖

(二)聲子晶體結合壓電片之可行性

將聲子晶體與壓電材料結合，使其產生實質發電效用。聲子晶體的空腔中聲音確實有放大，這可使壓電片振動幅度增加，進而提升發電的可行性。

(三)聲聚焦

利用聲子晶體不同通道不同相位，來製造凹面鏡聚焦效果，搭配聲子晶體共振讓發電效益最佳化。

(四)研究聲源不同角度下對聲子晶體之放大效果影響

模擬中發現聲子晶體與入射聲波的夾角越大，其放大倍率也會越大。相關實驗則有待日後驗證。

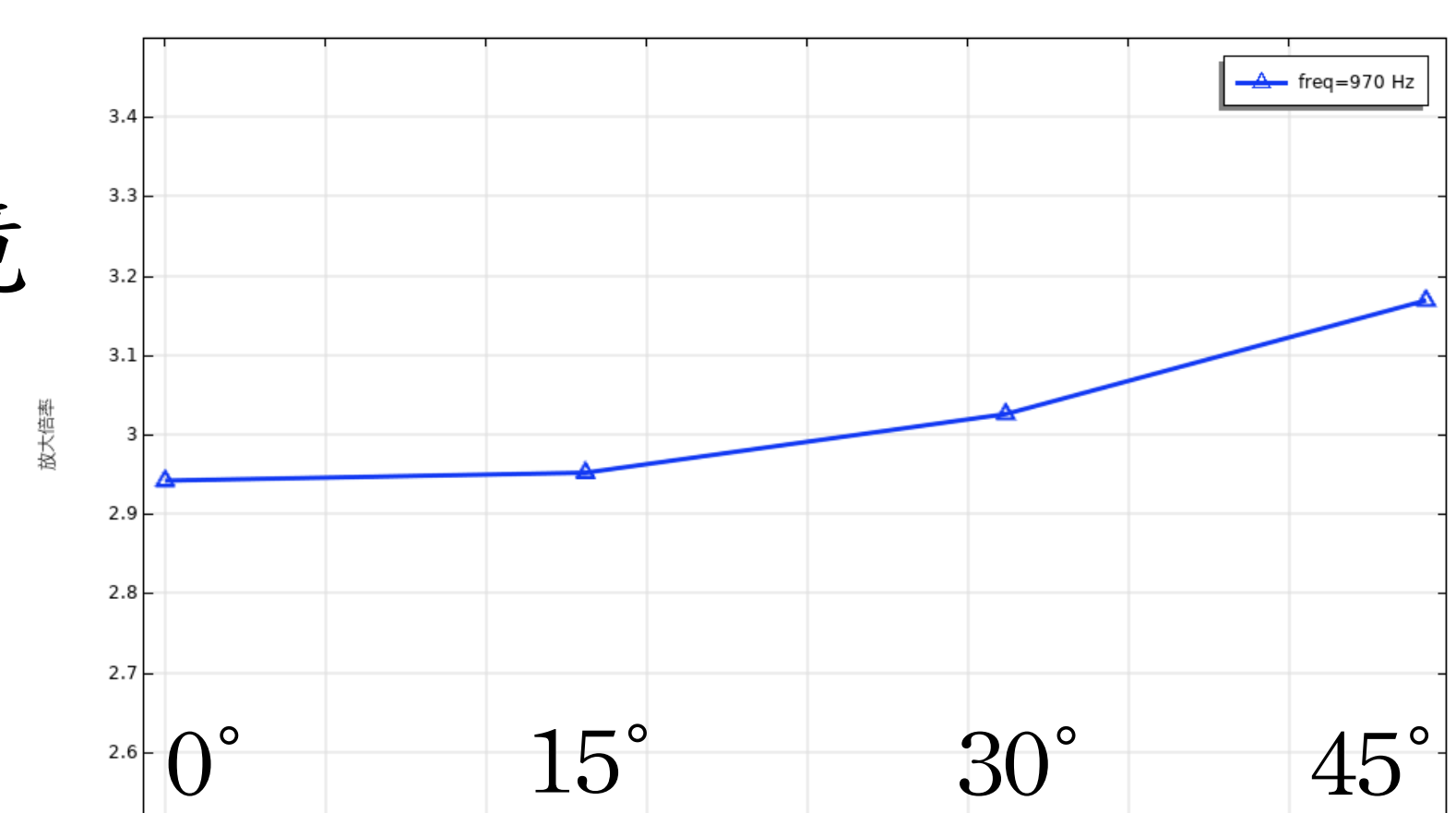


圖21、聲源不同角度下放大效果

結論

- 一、在入射聲波為910~990Hz時皆能使聲子晶體之預設標準組有聲音放大效果，具最佳聲音放大倍率的頻率為970Hz，利用陣列式聲子晶體元件，其聲音放大倍率可達約2.558倍。
- 二、利用COMSOL模擬可限縮實驗的探測範圍，加速實驗上特徵頻率與腔體尺寸的確認，並藉由模擬的模態圖觀察聲壓分佈與繞射現象。
- 三、本研究藉由模擬與實驗，可確認聲子晶體的空腔越大，其特徵頻率越小。在入射聲波為910~950Hz、聲子晶體的zig-zag path固定的情況下，聲音放大倍率最好的空腔大小還是預設標準組的35mm。
- 四、聲子晶體的隔音效果尚待定，聲子晶體在實驗時有繞射的情況產生，且實驗結果可發現具有與模擬相似的W型曲線。在模擬中，若是結合空腔大小改變與通帶(Band-pass)的現象，可具有下降18dB的效果。