

吸音材吸音係數檢測範例之探討
-以吸音筒為例

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 95 年 12 月

095301070000G2024

吸音材吸音係數檢測範例之探討
-以吸音筒為例

研究人員：楊閔隆

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 95 年 12 月 31 日

Architecture and Building Research Institute
Ministry of the Interior
Research Project Report

095301070000G2024

**Investigation on sound absorption
coefficient testing example -
A case study of acoustic barrel**

By

Min-Lung, Yang

December 31, 2006

目次

表次	III
圖次	V
摘要	VII
ABSTRACT	IX
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二節 研究目的	1
第三節 研究方法	2
第二章 文獻回顧	5
第一節 迴響室法吸音係數量測	5
第二節 駐波管法吸音係數量測	6
第三節 反射法吸音係數量測	6
第四節 量測不確定度簡介	7
第三章 吸音筒吸音係數試驗	9
第一節 迴響室法試驗方式簡介	9
第二節 實驗室設備及試件規格	10
第三節 試驗規劃	11
第四節 試驗結果分析	15
第五節 吸音筒配置設計實作	19
第四章 吸音係數量測不確定度之研究	23
第一節 分析模型介紹	23
第二節 A類標準不確定度評估	23
第三節 B類標準不確定度評估	25
(一) B類不確定因子定性分析	26
(二) B類不確定因子定量分析	26
(三) B類組合標準不確定度	31
(四) B類標準不確定度之等效吸音面積	32
第四節 組合及擴充不確定度	34
第五章 建議與結論	37
第一節 吸音筒吸音係數試驗	37

第二節 吸音係數量測不確定度分析.....	38
附錄一 95 年度自行研究計畫期中審查會議紀錄	39
附錄二 95 年度自行研究計畫期末審查會議紀錄	41
參考書目	43

表次

表 1 吸音筒吸音係數試驗結果	13
表 2 吸音筒配置方式優缺點比較	19
表 3 A 類標準不確定度各頻率等效吸音面積平均值及不確定度值	22
表 4 迴響室迴響時間標準差及衰減曲線斜率	25
表 5 空間音場音壓位準量測不確定度	26
表 6 迴響室容許溫濕度變化範圍(ISO 3741 table 4).....	28
表 7 各頻率音壓位準 B 類不確定度評估結果	29
表 8 含(不含)試件迴響室之迴響時間及標準差	31
表 9 B 類標準不確定度之等效吸音面積	31
表 10 各頻率等效吸音面積之組合及擴充不確定度	32
表 11 吸音材吸音係數及 U_{95} 擴充不確定度	32

圖次

圖 1 迴響時間計算方式	7
圖 2 吸音筒試件樣式	9
圖 3 吸音筒懸吊規則排列	10
圖 4 吸音筒懸吊散亂排列	10
圖 5 吸音筒置地站立規則排列	11
圖 6 吸音筒置地站立散亂排列	11
圖 7 吸音筒置地站立緊靠方形排列	11
圖 8 吸音筒置地站立緊靠長形排列	12
圖 9 吸音筒置地平躺規則排列	12
圖 10 吸音筒置地平躺散亂排列	12
圖 11 吸音筒 1/3 倍頻吸音係數量測結果	14
圖 12 吸音筒實際吸音係數量測結果	14
圖 13 吸音筒懸吊擺設分析結果	16
圖 14 吸音筒置地站立擺設分析結果	16
圖 15 吸音筒置地站立緊靠擺設分析結果	17
圖 16 吸音筒置地平躺擺設分析結果	17
圖 17 國際會議廳改善前狀態	18
圖 18 國際會議廳改善後情形	18
圖 19 國際會議廳音場改善後迴響時間曲線	20
圖 20 量測不確定度分析使用之吸音材	23
圖 21 迴響室 500Hz 頻率衰減曲線	26
圖 22 迴響室 1000Hz 頻率衰減曲線	26
圖 23 迴響室 2000Hz 頻率衰減曲線	27
圖 24 吸音板吸音係數量測曲線	33
圖 25 吸音板吸音係數評估曲線	33

摘 要

關鍵詞：ISO 354、吸音筒、吸音係數、量測不確定度、ISO GUM

一、研究緣起

本所國際會議廳音環境改善工程使用吸音筒及吸音板等材料以減少會議廳之迴響時間，實務設計上吸音筒的配置方式與吸音效果有密切關係，然而吸音筒配置方式與吸音效能的關係甚少有 ISO 標準實驗室之實測資料。為充分發揮吸音筒的吸音效能，本文設計一系列吸音筒配置方式，研究吸音筒最佳的擺設位置。另外，本所音響實驗室為了申請 TAF 國家實驗室認證，文中亦以吸音係數實驗室為例，分析試驗結果之量測不確定度，作為申請認證之重要資料。

二、研究方法及過程

吸音筒最佳配置方式方面，文中以 ISO 354 迴響室法之試驗規範為主要參考依據，由於 ISO 354 規範中並未清楚規定建議之吸音筒數量及試驗時吸音筒之配置方式，在本研究中共使用 16 支設計 8 種不同的吸音筒擺設位置，研究吸音筒配置方式與吸音效能之相關性，8 種不同的配置方式包括：1.懸吊規則排列，2.懸吊散亂排列，3.置地站立規則排列，4.置地站立散亂排列，5.置地站立緊靠方形排列，6.置地站立緊靠長形排列，7.置地平躺規則排列，8.置地平躺散亂排列等八種。

關於吸音係數試驗結果之量測不確定度評估方面，該評估係依據 ISO GUM 之評估程序探討試驗過程中 A 類及 B 類之不確定度範圍。最後，並分析試驗結果之 U_{95} 擴充不確定度。

三、重要發現

由吸音筒配置方式之研究結果顯示，將吸音筒以置地平躺貼近反射面之配置方式可獲最佳的吸音效能，其吸音係數為 $\alpha_w = 0.7m^2/支$ ；而吸音筒以懸吊方式配置時其吸音係數為 $\alpha_w = 0.65(H)m^2/支$ ，高頻音吸音效果甚優，較吸音筒以置地平躺者高約30%左右。在量測不確定度評估方面，試驗過程中各項影響因子對量測不確定度之影響程度，以空間音場的量測不確定度為最主要的不確定度來源。若要降低試驗結果之量測不確定度值，提高迴響室法中空間音場迴響時間之量測精度為首要。

四、主要建議意見

1. 由吸音筒配置方式之試驗結果得知，將吸音筒以置地平躺貼近反射面之配置方式可獲得最佳的吸音效能。因此本所國際會議廳之改善例即建議以此方式配置，使各頻率之吸音效能較為平均，並獲得最高的吸音係數。
2. 吸音筒之配置方式雖與吸音效能相關，然而依照何種配置方式進行試驗仍應以實際應用為主。即試驗方式應與現場施工方式相近之配置方式進行試驗，以免與設計結果有甚大落差。
3. 本文探討之吸音係數量測不確定度已供實驗室申請 TAF 認證之用，該實驗室並以獲得認證通過。

ABSTRACT

Keywords: ISO 354, Acoustic barrel, Sound absorption coefficient, Measuring uncertainty, ISO GUM

The popular testing method of sound absorption coefficient is reverberation room method whose theories are very strong and complete. ISO 354, a standard of reverberation room method, is the principal reference in the research whose target is to study the sound absorption coefficient lab in ABRI. Because the standard of ISO 354 hasn't regulated the appropriate quantities of acoustic barrel and the configuration of these acoustic barrels, eight kinds of configuration are studied in the research with sixteen acoustic barrels. Those configurations include 1.absorbers suspend regularly, 2.absorbers suspend arbitrarily, 3.absorbers stand regularly, 4.absorbers stand arbitrarily, 5.absorbers stand close(type 1), 6.absorbers stand close(type 2), 7.horizontal absorbers place regularly, and 8.horizontal absorbers place arbitrarily. From the result, the best absorptive performance is that acoustic barrels are placed horizontally and closely to a reflective surface. The absorptive effect of high frequency tone performs better about 30% as acoustic barrels are suspended than as they are placed horizontally and closely to a reflective surface.

With regard to the evaluation of measuring uncertainties on sound absorption coefficient testing procedures, the standard of ISO GUM is adopted to evaluate the ranges of uncertainties in type A and type B. The expanded uncertainty of U_{95} of testing result is proposed. From the results, the main uncertainty of reverberation room method comes from the uncertainty of spatial factor.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

國人生活水準逐漸提高後，追求更高層次的生活品質變成下一階段的基本需求。所謂更高層次的生活品質不外乎要求健康與寧靜的居住空間，不僅要求居住空間所使用之建材應合乎環保與健康的需求，寧靜之居所更是國人企盼的生活空間。經統計，人們一天平均有 90% 的時間是在室內活動，因此室內的各種環境與我們的生活息息相關。以吸音材料為例，室內適度地配置吸音材料以控制室內空間的迴響時間(reverberation time, RT)，就可以避免空間之迴響時間過長干擾舒適度。本研究配合本所建築音響實驗館吸音材吸音係數測試實驗室的營運，以吸音筒之吸音性能檢測為例，研究各種吸音筒配置方法對吸音係數試驗結果的影響，並以此研究成果作為後續類似吸音單體試驗之依據。最後，並進行一系列重複性試驗以及 ISO GUM 之評估指引，分析吸音係數試驗結果之量測不確定度。

第二節 研究目的

關於吸音筒之吸音性能檢測方式，ISO 354 規範中並未清楚規定建議的試件數量及試驗時試件的配置方式，而是僅將吸音筒等吸音材料視為不連續的吸音單體進行測試。然而吸音筒的配置方式對吸音係數測試結果之影響為何，係一值得深入探討的課題。本研究將 16 支吸音筒規劃八種不同的配置方式，研究不同的配置方式與吸音係數測試結果的關係。本研究的試驗結果可供室內空間設計者在進行室內音環境改善時之設計參考，以利當使用該類吸

音單體時可規劃最佳的數量及配置方式，以獲取最好的吸音效果。本研究成果亦將作為本所國際會議廳音環境改善案中，吸音筒配置方式之設計依據，以期獲得最佳的吸音效能。

本研究為配合建築音響實驗館吸音材吸音係數測試實驗室之檢測業務，除了探討吸音筒配置方式與吸音係數試驗結果的關係之外，另為研究本實驗室執行各項吸音係數檢測時隱含之量測不確定度範圍，本文亦將依照 ISO GUM 之規定分析測試結果之量測不確定度範圍。本研究完成之量測不確定度評估程序可作為本所實驗室申請 TAF 國家實驗室認證之參考資料，提供完整的量測不確定度評估範圍。

第三節 研究方法

本研究共採用 16 支吸音筒進行試驗，吸音筒之安裝方式分為懸吊、置地站立與置地平躺三種配置模式進行試驗，其中，吸音筒之相對位置可分為規則排列與隨機散亂排列。本文研究的吸音筒配置方式共分為八種：1.懸吊規則排列，2.懸吊散亂排列，3.置地站立規則排列，4.置地站立散亂排列，5.置地站立緊靠方形排列，6.置地站立緊靠長形排列，7.置地平躺規則排列，8.置地平躺散亂排列等以上八種配置方式。為了減少試驗過程中各項不確定度對試驗結果的影響，進行上述八項試驗時實驗室的溫、濕度及儀器設定皆相同。

至於吸音係數量測不確定度研究方面，本文依照規範 ISO 354[1]之吸音係數量測規定進行試驗，重複性試驗部分以連續進行 30 組相同試驗程序，並紀錄各試驗結果，據以分析該結果之變異以求得其 A 類不確定度。至於試驗過程中影響 B 類不確定度之影響因子，依照 ISO 「量測不確定度表示方式指

引」之評估方式，分析試驗過程中可能的不確定度來源，並提出各影響因子之定性與定量分析結果。最後，計算各影響因子之組合不確定度以求得試驗過程中存在的 B 類不確定度值。

第二章 文獻回顧

第一節 迴響室法吸音係數量測

關於吸音材吸音係數之量測標準方法，一般常用的方法可分為管內法及迴響室法兩種，其中以迴響室法的測試結果在工程的應用最為廣泛。迴響室法測定吸音材吸音係數係以聲音隨機漫射之方式量測，即聲音由四面八方隨機入射至吸音材料時之能量損失比例。

試驗方式可分為脈衝響應積分法(Integrated impulse response method)以及噪音中斷法(Interrupted noise method)兩種，脈衝響應積分法係以手槍、氣球爆破、火花激振(spark gap)或其他足夠頻寬與能量之脈衝作為發音源；而噪音中斷法係以揚聲器輸出連續頻譜之寬頻帶或特定頻帶之訊號作為發音源。噪音中斷法係於試驗空間內產生穩定的音壓後突然將音源停止發聲，使音波在封閉空間內隨機漫射衰減，其延續的聲音即成為迴響，而迴響時間之定義亦是以音壓衰減 60dB 所需要之時間為基準。以迴響室法計算迴響時間(T_{60})的公式稱之為沙賓(Sabine)公式，其關係式如下：

$$T_{60} = \frac{0.162V}{S\alpha + 4mV} \quad (2.1)$$

式中， V ：迴響室空間體積(m^3)

S ：吸音材料面積(m^2)

α ：材料吸音率

m ：空氣吸音係數(m^{-1})

迴響室試驗法中國際上通用量測規範如 ISO 354 及 ASTM-C423[2]等，其評估等級分別為 α_w 及 NCR 或 SAA。日本使用的迴響室法量測規範為 JIS-A1409[3]及 JIS-A6301[4]，而我國國家標準於 CNS 9056[5]亦有關於吸音

係數量測方法之規定。

第二節 駐波管法吸音係數量測

相較於迴響室法之量測設備及程序，使用駐波管量測吸音係數之管內法是方便快捷及程序簡易之量測方法。其與迴響室法最大的不同為管內法所測得之吸音係數皆是聲音以90度垂直吸音材的入射角度量測，而不是讓聲波以隨機漫射的方式入射至吸音材，管內法量測所得之結果與實際情況稍有差異。使用駐波管量測吸音係數的方法很多，如使用單頻音(pure tone)或寬頻音(broad-band random noise)作為輸入訊號，量測用麥克風可使用一支、兩支或多支麥克風擷取音壓，最後再依據相關理論進行吸音係數分析。該法僅限使用小試件為樣本，因此試件之尺寸及邊界等效應無法於管內法中顯現。

關於駐波管法的相關研究十分豐富[6-8]，亦有相當多的理論分析及實測研究，該理論之關係式如下：

$$p_+(x, \omega, t) = A \exp[i(\omega t - kx)] \quad (2.2)$$

$$p_-(x, \omega, t) = B \exp[i(\omega t + kx)] \quad (2.3)$$

$$\frac{p_{\min}}{p_{\max}} = \frac{1-r}{1+r} \quad (2.4)$$

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (2.5)$$

管內法的試驗規範如ISO 10534-1[9]、ISO 10534-2[10]及CNS 13208[11]等。

第三節 反射法吸音係數量測

上述迴響室法或駐波管法僅限於實驗室內量測使用，並不適用於試驗吸音材料於實際環境之吸音特性。因實際環境中各項變異因子對於材料的吸音特性影響甚為複雜，迴響室法或駐波管法無法模擬材料用於現場實際環境之

行為，上述兩種試驗方法量測所得之試驗結果因試驗環境與實際環境迥異，其試驗結果運用於實際環境時是否可符合設計要求，並不容易獲得明確的答案。然而，反射法之測試方式係以現場量測結果計算材料之吸音係數，其基本關係式為

$$\alpha(f, \vartheta) = 1 - |R_p(f, \vartheta)|^2$$

式中， R_p 為距反射面 z 距離量測所得之阻抗； f 為聲波頻率、 ϑ 為聲波入射角度。

反射法的相關研究甚多[12-13]，因此也發展出許多分析理論，研究成果延伸出各種改良式的測試方法，如無環境特性噪音法(EA-noise method)係以直接量測聲波波速進行吸音係數之計算[14]。

第四節 量測不確定度簡介

量測之目的乃在於求得受測量(measurand)之真值，並給予受測量一定量表示之量測結果。然而，對於該量測結果，因限於受測量之均勻性、代表性或量測儀器之精準度、系統偏差以及量測人員之經驗與熟練度等因素，所謂的真值幾乎是無法於實際的量測行為中獲得。因此，對於量測結果之描述必須包含量測值之不確定度範圍，方可說是完整的表示結果。關於量測結果偏差程度的表示方式可分為量測誤差與量測不確定度兩種；前者以古典誤差理論之觀念求得，後者則為現代誤差理論之核心。對於量測誤差的表示方式，因受測量之真值不易求得，故使得量測誤差之表示難於實際之量測行為中有效使用。而量測不確定度係用來表示真值合理的分布區間，及其離散模式與可接受的可靠度範圍。此一觀念為計量科學中較新穎的概念，目前已被國際組織及世界各國所認同，量測不確定度的應用具有廣泛性與普遍性，且表示

方式可用於比對不同國家彼此的量測結果，進而取得相互承認與共識。

依據 ISO 頒佈的「量測不確定度表示方式指引(Guide of the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM)」指出[15]，量測不確定度之計算方法應分為 A 類與 B 類兩種評估方式。所謂 A 類評估方式係以次數分配模式為基礎，利用統計原理分析實驗數據；而 B 類評估方式乃以經驗上的機率分配模式為基礎，利用統計分析以外的方式進行評估，該方法適用於評估無法量測或不需進行量測之項目，利用機率分配原理推導其可能之不確定度範圍[16-18]。依據 ISO/IEC 17025[19-20]測試與校正實驗室能力一般要求之規定，其中第 5.4.6 節明文規定實驗室應清楚分析評估測試結果之量測不確定度，對於測試實驗室則應具備且應使用估算量測不確定度之程序。即使某些案例下，所執行之試驗可能無法依據有效之計量與統計理論進行嚴謹的量測不確定評估，該試驗之測試結果仍應試圖鑑定所有不確定度之成分，並做出合理的估算，且應確保分析結果之報告形式不會造成對不確定度的錯誤印象。合理的量測不確定度估算應依據對試驗方法的確認，並利用先前的試驗經驗與足夠的數據做分析，以獲得合理的不確定度估算結果。

第三章 吸音筒吸音係數試驗

第一節 迴響室法試驗方式簡介

吸音材吸音係數的量測方法相當多種，但以迴響室法試驗所得結果，係較受大眾所公認之試驗法。依據ISO 354規範，本試驗係採用噪音中斷法量測迴響室內各頻率之音壓衰減曲線，計算方式為：

$$L_p(t) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (3.1)$$

其中， $L_p(t)$ ：N組衰減曲線在時間 t 時刻之音壓位準平均值(dB)

$L_{pn}(t)$ ：第n個衰減曲線在 t 時刻之音壓位準(dB)

以整體平均法(Ensemble averaging)評估數條衰減曲線之平均值。由音壓位準衰減曲線可計算各頻率之迴響時間，其定義為各頻率音壓位準衰減60dB所需時間即為該頻率之迴響時間，如圖1。

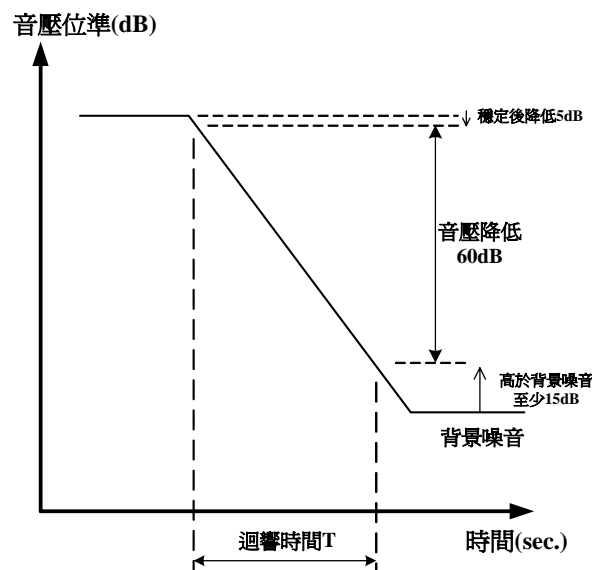


圖 1 迴響時間計算方式

關於吸音材試件樣式，可分為平面吸音體(plane absorber)與分散式吸音體(discrete sound absorber)兩類，本試驗研究之吸音筒係屬於第二類試件，依ISO 354規定之吸音係數計算方式為：

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (3.2)$$

其中：

α_s = 1/3 倍頻之吸音係數；

S = 吸音筒數量(或吸音材面積)；

A_T = 試件等效吸音面積(吸音力)，為含試件之迴響室等效吸音面積(A_2)減去空迴響室之等效吸音面積(A_1)，單位 m^2

式(3.2)中等效吸音面積(A_T)之計算公式為：

$$A_T = A_1 - A_2 = 55.3V \left[\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right] - 4V(m_2 - m_1) \quad (3.3)$$

式中，

V = 迴響室之室容積，單位 m^3 ；

c_1 、 c_2 = 空迴響室及含試件迴響室之聲音傳播速度，單位 m/s ；

$c = 331 + 0.6t$ (t 為攝氏溫度 $^{\circ}C$)

T_1 、 T_2 = 空迴響室及含試件迴響室之迴響時間，單位 $sec.$ ；

m_1 、 m_2 = 空迴響室及含試件迴響室之音功率衰減係數，單位 m^{-1} ；由試驗時之溫、濕度依據ISO 9613-1查表所得。

第二節 實驗室設備及試件規格

本實驗室之室容積為 $350m^3$ ，最低截止頻率為80Hz。該實驗室設計之操作頻寬為80~5kHz，在空調及照明開啟的條件下，其背景噪音等級為NR-5

(12.6dB)。量測及音源設備方面，本試驗採用5支B&K/Type 4943-L-001之隨機音場麥克風進行同步量測，音源則採用JBL指向性音源。

第三節 試驗規劃

本試驗使用市面上易取得之吸音筒樣式進行試驗，吸音筒之直徑為22cm，長度為1m，表面包覆彈性玻纖布，內部填充48kg/m³之玻璃纖維(glass wood)，吸音筒兩側端板為鍍鋅鋼板，詳圖2。

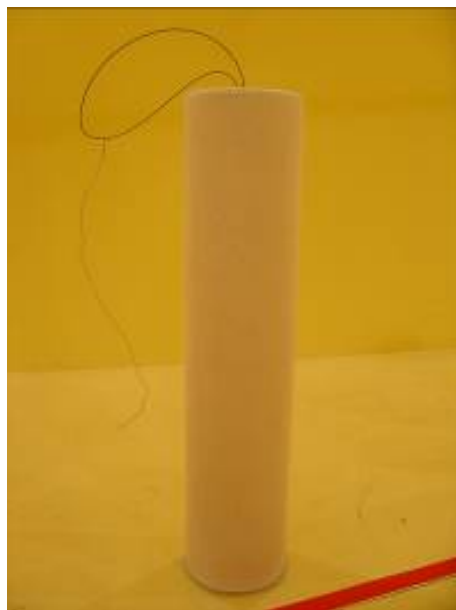


圖2 吸音筒試件樣式

吸音筒屬於不連續性的吸音單體，其吸音性能以每支吸音筒之吸音力計。本試驗為能獲得明顯的迴響時間變化，共使用 16 支吸音筒進行試驗。試驗方法係依照 ISO 354 的規範進行，然而關於吸音筒的安裝方式於規範中並未明確規定，僅建議儘量依照實際之安裝方式進行試驗，然而吸音筒配置方式之差異亦將影響吸音筒之吸音性能。為研究不同安裝配置方式對於吸音筒

吸音力之影響，本試驗共規劃八種不同的吸音筒配置方式進行分析比較。配置方式分別為：1.懸吊規則排列，2.懸吊散亂排列，3.置地站立規則排列，4.置地站立散亂排列，5.置地站立緊靠方形排列，6.置地站立緊靠長形排列，7.置地平躺規則排列，8.置地平躺散亂排列等，如圖 3~圖 10 所示。試驗進行過程中，除了吸音筒的擺放位置不同外，其餘條件如溫度、濕度、音源功率及無試件之空白試驗結果等在試驗進行階段均保持不變，以期獲得客觀的比較結果。



圖 3 吸音筒懸吊規則排列



圖 4 吸音筒懸吊散亂排列

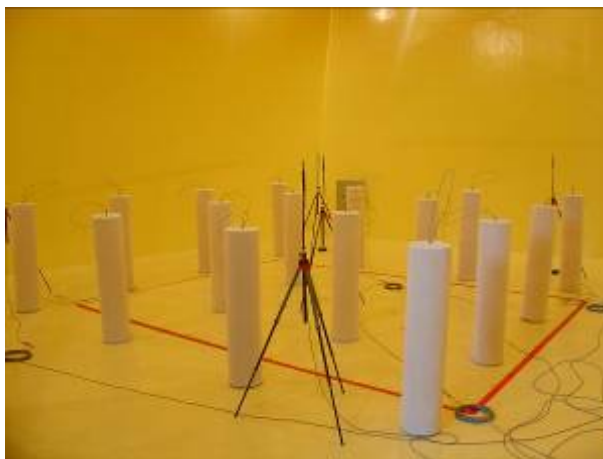


圖 5 吸音筒置地站立規則排列



圖 6 吸音筒置地站立散亂排列



圖 7 吸音筒置地站立緊靠方形排列

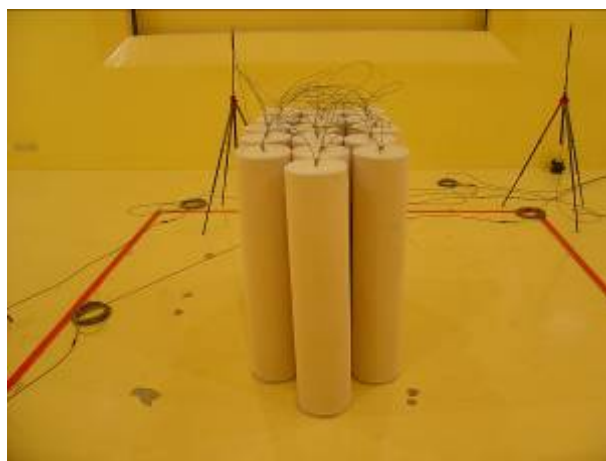


圖 8 吸音筒置地站立緊靠長形排列



圖 9 吸音筒置地平躺規則排列



圖 10 吸音筒置地平躺散亂排列

第四節 試驗結果分析

依據ISO 354之試驗方法並以ISO 11654[21]之規範進行宣告，其試驗結果彙整如表1所示。由試驗結果顯示，除了將吸音筒以緊靠放置的排列方式其吸音係數之宣告值偏低外，其餘的配置方式如：懸吊、置地站立或平躺對試驗結果並無顯著差異。其中，吸音係數宣告值以吸音筒置地平躺的配置方式可獲得最佳的吸音效果，該配置方式之吸音係數可達 $\alpha_w = 0.7$ 。另外，各類試驗中若採相同的配置但不同擺設做設計時，無論是規則排列或散亂排列對吸音係數之宣告值並無影響。分析研究所得各種吸音筒配置方式與 α_s 吸音係數量測曲線如圖11所示，而計算1/3倍頻帶吸音係數之平均值求得之 α_p 實際吸音係數曲線示於圖12。

表 1 吸音筒吸音係數試驗結果

吸音筒配置方式	試驗方式	試驗結果	吸音係數 α_w (m ² /支)
1.懸吊規則排列	詳圖 3	詳圖 13	0.65(H)
2.懸吊散亂排列	詳圖 4		0.65(H)
3.置地站立規則排列	詳圖 5	詳圖 14	0.6
4.置地站立散亂排列	詳圖 6		0.6
5.置地站立緊靠方形排列	詳圖 7	詳圖 15	0.3
6.置地站立緊靠長形排列	詳圖 8		0.3
7.置地平躺規則排列	詳圖 9	詳圖 16	0.7
8.置地平躺散亂排列	詳圖 10		0.7

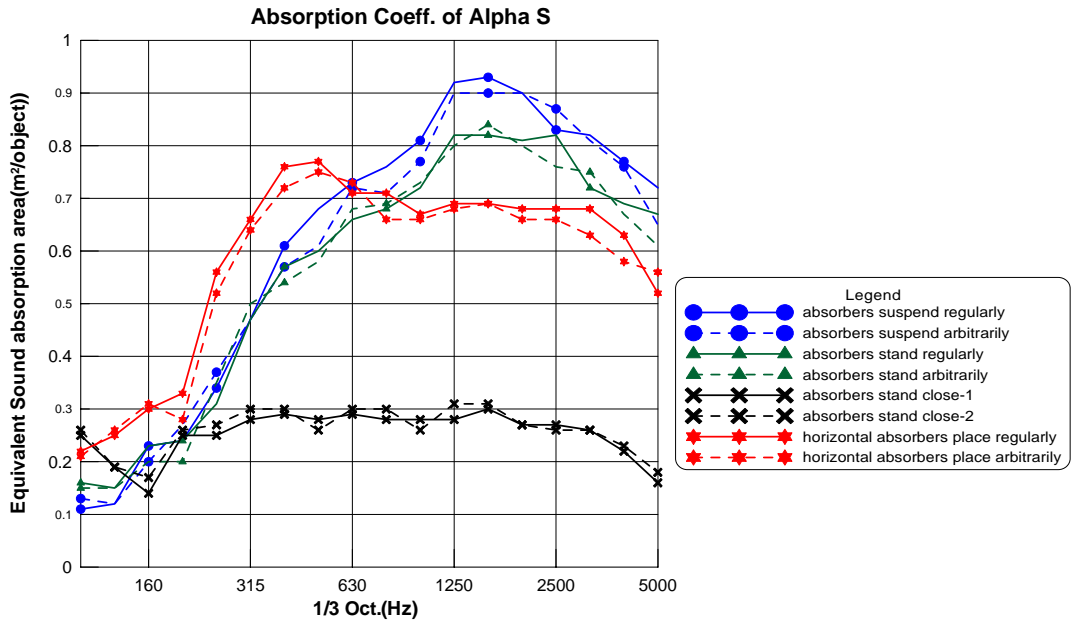


圖 11 吸音筒 1/3 倍頻吸音係數量測結果

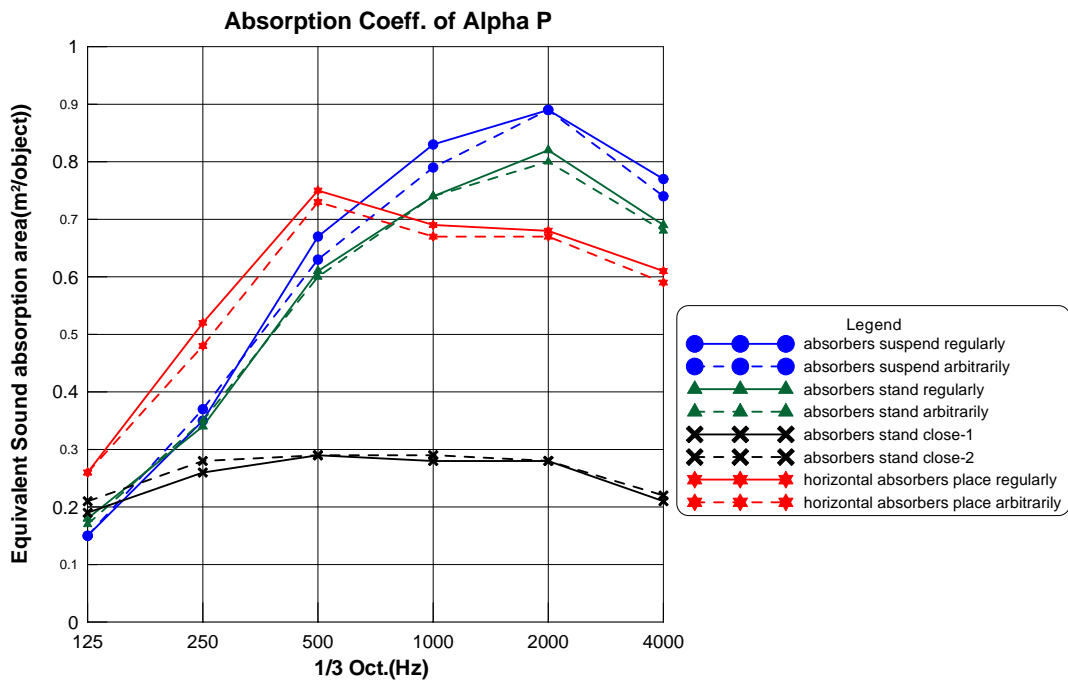


圖 12 吸音筒實際吸音係數量測結果

由圖11與圖12之試驗結果顯示，雖然吸音筒置地平躺的配置方式可獲得最高的吸音係數宣告值，然而頻率在1000Hz以上的試驗結果中，吸音筒以懸吊方式配置可獲得最佳的吸音效果，吸音筒置地站立之配置方式次之；相反

地，吸音筒以置地平躺方式配置時之吸音效果為以上三種配置方式最差者。若比較頻率在500Hz以下之試驗結果顯示，將吸音筒置地平躺的擺放方式其吸音效果最佳，而吸音筒無論採懸吊或置地站立之配置方式在頻率500Hz以下之試驗結果幾乎一致，其吸音效果皆不若將吸音筒置地平躺之配置方式。另外，將吸音筒置地站立緊靠的配置方式，雖然在各頻率之測試結果皆不如本文所研究的其他各種配置，然而在低頻100Hz之試驗結果卻為各項試驗中最優者，表示將吸音筒緊靠的配置方式對100Hz的吸音效果較佳。

分析各種吸音筒配置方式與ISO 11654加權參考曲線之關係顯示，懸吊、置地站立、置地站立緊靠以及置地平躺等四種配置方式之分析結果如圖13～圖16所示。當吸音筒以懸吊及置地站立的配置方式試驗時，其試驗結果於1000Hz以上的吸音效果甚佳，但受限於250Hz的試驗結果偏低，因此整體試驗結果之加權吸音係數 α_w 分別為 $\alpha_w = 0.65(H)$ 及 $\alpha_w = 0.6$ ，其結果顯示將吸音筒以懸吊方式擺放時對高頻音有不錯的吸音效果。若吸音筒的配置方式為置地平躺時，各頻率之吸音係數測試結果與加權參考曲線相近，顯示吸音筒以置地平躺的配置方法其吸音效果相當均勻，其加權吸音係數可達 $\alpha_w = 0.7$ 。而將吸音筒緊靠的配置方式因外露的吸音面積最小，造成整體的吸音效果最差，其加權吸音係數僅 $\alpha_w = 0.3$ 。

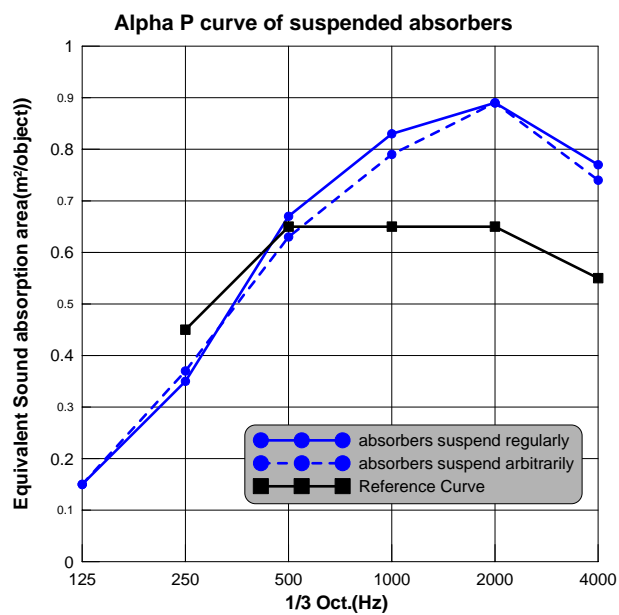


圖 13 吸音筒懸吊擺設分析結果

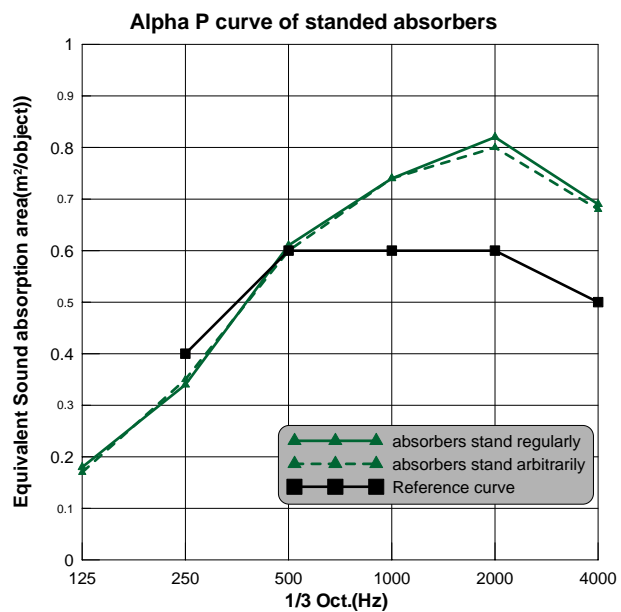


圖 14 吸音筒置地站立擺設分析結果

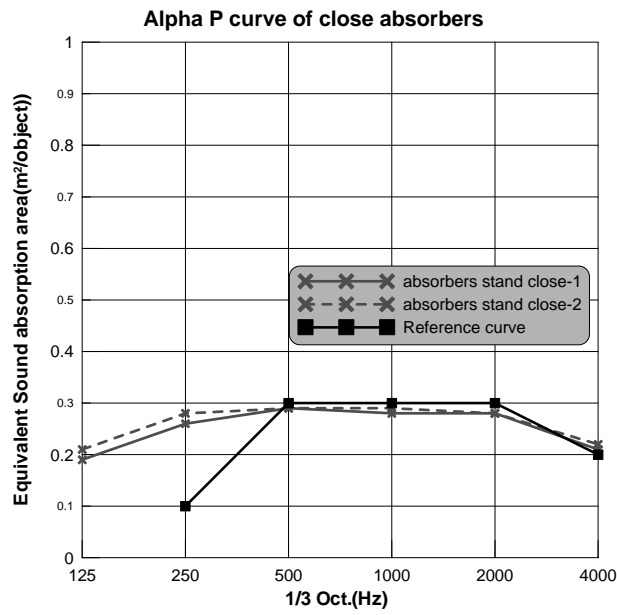


圖 15 吸音筒置地站立緊靠擺設分析結果

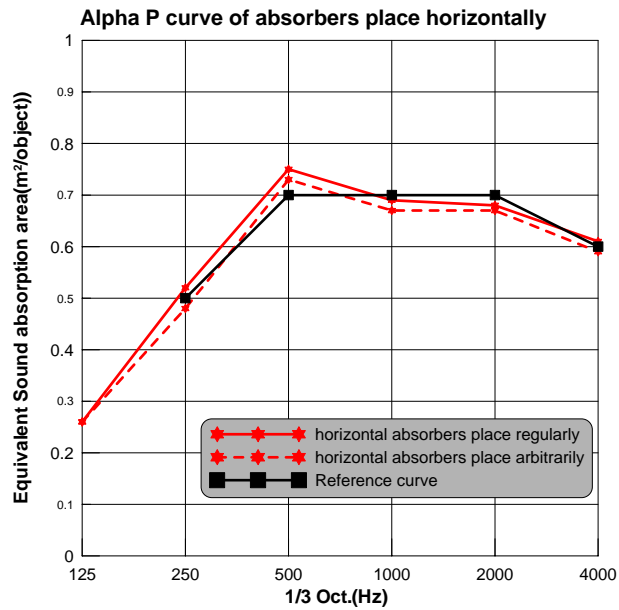


圖 16 吸音筒置地平躺擺設分析結果

第五節 吸音筒配置設計實作

由以上試驗分析結果得知，若以配置方式與吸音係數宣告值之關係做比較，將吸音筒以平躺貼近反射面的方式可獲得最佳的吸音效果。依此設計原

理，運用於本所性能實驗中心國際會議廳之音場改善工程上，本所國際會議廳改善前之設備狀態如圖17，改善前該空間迴響時間之測試結果於500Hz及1000Hz均約為1.4秒，已接近音樂廳之音響效果，會議進行時會造成嚴重的迴音干擾，影響語音清晰度。



圖 17 國際會議廳改善前狀態

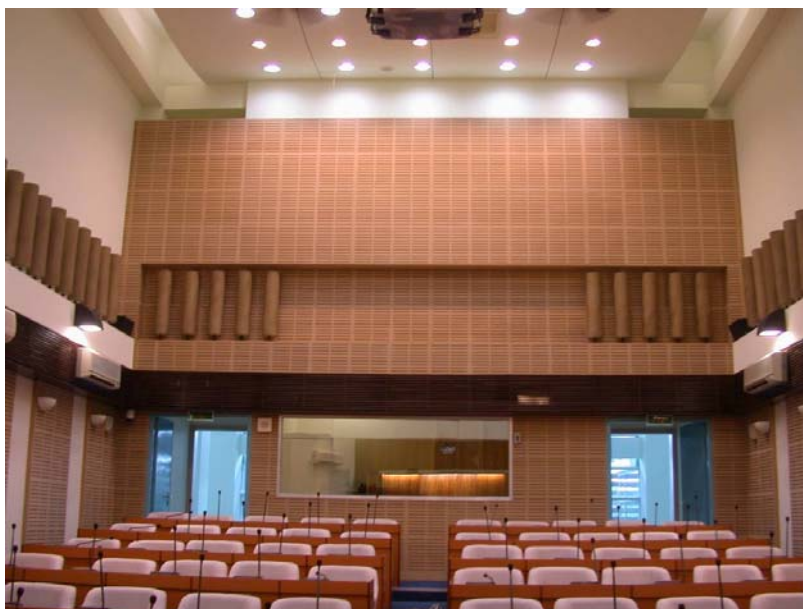


圖 18 國際會議廳改善後情形

一般會議廳對於500Hz及1000Hz迴響時間的設計為0.8秒以下，為了降低本所國際會議廳音場之迴響時間，本改善案另於會議廳兩側與後方牆面共配置面積125m²之吸音板，以及於兩側及後方橫樑上裝設50支吸音筒，用於減少該空間的迴響時間。吸音筒之配置方式係直接架設於橫樑上並貼近牆體反射面，設計方式與本研究採用的置地平躺配置方式相似，本改善案施工完竣之情形如圖18所示。比較完工前、後迴響時間之現場量測結果顯示，500Hz及1000Hz之迴響時間已低於0.8秒，如圖19，符合一般會議場所之迴響時間設計要求。由3.4節之分析結果顯示，吸音筒以貼近反射面之配置方式或置空懸吊的配置方式各有優缺點，貼近反射面之配置方式各頻率之吸音效果較為平均，雖高頻音的吸音效果不若懸吊配置的效果佳，但整體評估結果其吸音係數最高。然而，置空懸吊的配置方式雖對高頻音的吸音效果甚佳，其吸音效率較貼近反射面的配置方式高出約30%，但對250Hz之低頻音吸音效果稍差，吸音係數僅約0.35左右，故置空懸吊配置的吸音係數整體評估略低於前者。本改善案採用以上兩類配置方式之優缺點比較彙整如表2。

表 2 吸音筒配置方式優缺點比較

配置方式	懸吊排列	貼近反射面排列
優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高頻音吸音效果佳。 2. 配置方式經適當規劃可做到控制迴響時間的設計。 3. 可作為室內空間設計手法之一。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 不影響既有空間之挑高設計。 2. 不影響室內照明。 3. 施工方式較為簡易，且不易發生墜落問題。 4. 施工完成後對視覺的影響較小。 5. 吸音性能之整體表現各頻率較為平均。
缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 樓高過高者不易架設施工。 2. 影響下方使用空間之照明。 3. 施工不確實時可能發生物體墜落的危險。 4. 降低視覺上室內空間高度，造成壓迫感。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高頻音之吸音性能不若懸吊式排列之配置方式。 2. 置於角落或牆面易導致蜘蛛結網沾污灰塵。

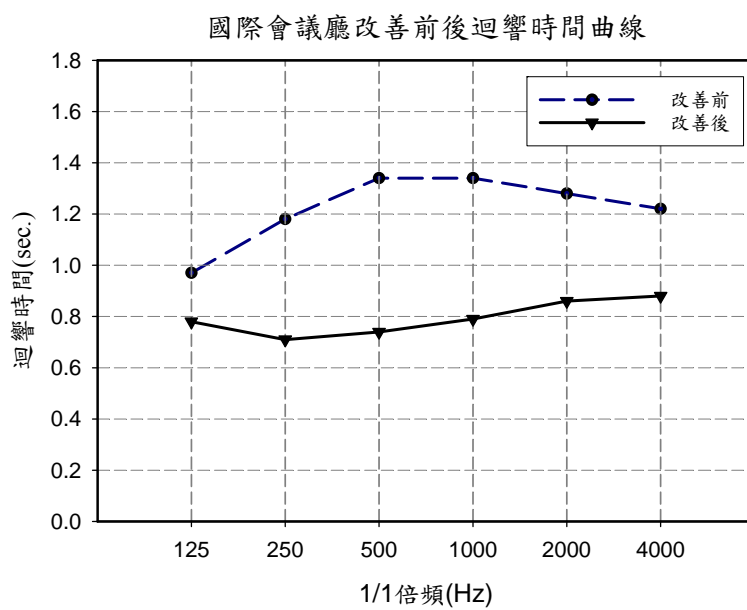


圖 19 國際會議廳音場改善後迴響時間曲線

第四章 吸音係數量測不確定度之研究

第一節 分析模型介紹

量測結果之不確定度表示係用於反映對量測值缺乏明確的瞭解，以及意味著對量測值有效性之可疑程度，對於此可疑程度的分布模式，在 A 類標準不確定度表示上係以常態分布(Normal distribution)做假設，而 B 類標準不確定度一般以矩形分布或依校正報告提供之分析數據及分配模式作計算。

在 A 類標準不確定度評估法中，一般是以相同條件下進行一系列重複性試驗觀測所得，假設重複性試驗中的數值變化係由於未能將觀測中各影響量保持不變所造成，因此 A 類不確定度中本身即隱含著隨機與系統不確定度。若要以數學模式描述重複性觀測之變化是十分困難的，為簡化分析模式，通常 A 類標準不確定度之分配模式以常態分布作假設。在 B 類標準不確定度評估中，探討吸音係數量測過程中儀器及環境對量測不確定度造成的影響程度，並對各項不確定因子作定性及定量分析。A 類標準不確定度估計值係建立在機率分布之基礎上，而 B 類標準不確定度估計值則是以既有設備之不確定度分布為基礎，兩類不確定度依據不確定度傳播定律(Uncertainty Propagation Law)計算組合標準不確定度(Combined Standard Uncertainty)與擴充不確定度(Expanded Uncertainty)。

第二節 A 類標準不確定度評估

評估 A 類標準不確定度係根據重複量測所得之量測值頻率分布(Frequency Distribution)情形，再推導出機率密度函數(P.D.F.)來計算標準不確定度。A 類評估法主要是用來評估重複性及隨機性之觀測值所導致之可能

變異，評估方式包括計算一組量測值之平均值、標準差或計算迴歸曲線之標準差，經由變異數分析(ANOVA)計算標準差。本文以 ISO 354 規範研究吸音材吸音係數之 A 類標準量測不確定度，實務上用的分析方式由量測 30 組迴響室之迴響時間，再以(3.3)式計算試件各頻率之等效吸音面積之平均值與標準差，作為 A 類標準不確定度之評估結果。

評估步驟係於幾乎完全相同的試驗環境及儀器設定下進行，分析 1/3 倍頻下各頻率之吸音係數。分析步驟如下：

- (1) 以相同吸音材料進行 30 次的迴響時間量測(吸音材料面積為 11.72m²)
如圖 20 所示，並紀錄各次試驗數值。
- (2) 以(3.3)式計算各頻率之等效吸音面積平均值。
- (3) 以統計方法計算 30 次重複性試驗等效吸音面積之算術平均數及標準差(不確定度)，如表 3。

表 3 A 類標準不確定度各頻率等效吸音面積平均值及不確定度值

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
平均值(m ²)	1.80	1.78	3.40	5.21	5.68	8.54	9.14	10.22	9.77
U _A (m ²) ±	0.059	0.056	0.057	0.062	0.054	0.064	0.104	0.129	0.124
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
平均值(m ²)	11.02	10.67	10.58	10.38	10.66	10.60	10.69	11.98	11.98
U _A (m ²) ±	0.085	0.061	0.066	0.084	0.071	0.090	0.090	0.176	0.238



圖 20 量測不確定度分析使用之吸音材

基於量測值為常態分佈之基本假設，根據機率分布原理30組樣本之抽樣已趨近於常態分布之結果，因此上述所得之算術平均數及標準差計算結果可以用來表示受測量母體(population)之平均值及標準差。

第三節 B類標準不確定度評估

量測之不確定度係由於量測人員對於受測量及影響因子認知不完整所造成的，即使使用修正因子進行修正，該量測結果亦只是對受測量的一個估算值。由於實際的量測行為無法於一個完美的環境下完成，因此影響 B類量測不確定度的因子可能包括如下[22-24]：

1. 量測儀器之不確定度
2. 受測量本身的不確定度
3. 外部來源或所引用資料的不確定度
4. 量測方法與程序造成的不確定度

5. 量測人員對於儀器的操作技巧
6. 儀器之解析度或刻度識別能力
7. 樣本取樣之不確定度
8. 環境因子

(一) B類不確定因子定性分析

本文主要探討吸音材於吸音係數檢測過程中，可能的B類量測不確定度因子。該類因子的特性為難以統計方式進行評估，或是以統計之方式進行評估是無意義的。因此對於B類不確定度之分布範圍無法經由重複性試驗獲取，再以統計方法分析求得，而係直接給定或推估其分配模式以求得不確定度。B類不確定度可能的來源包括：儀器設備部分、人為部分以及自然環境部分，而其不確定度之評估可藉由參考物質之校正報告書、以往的測試數據、製造商提供之規格、儀器之校正報告或經驗等方式進行估算。

依據ISO 354標準規定之吸音係數檢測試驗流程，試驗過程中隱含的不確定度因子可分為以下五項：

1. 麥克風本身的量測不確定度
2. 試驗空間音場的不確定度
3. 量測數值解析度之影響
4. 試驗人員操作技術與經驗之差異
5. 試驗過程中環境溫、濕度及大氣壓力之變異

(二) B類不確定因子定量分析

由上述探討吸音係數檢測過程中可能隱含的量測不確定度項目，以下再分述說明各項不確定度因子的分析方法及其不確定度範圍：

1. 在麥克風本身的量測不確定度方面：本實驗室所使用的麥克風係依據

工研院量測中心之校正報告量測結果，該結果在 95% 信心水準下之擴充不確定度為 0.08dB。該機率分配型態為常態分配， $k=2.0$ ，因此 $u_{mic} = \pm 0.08/2 = \pm 0.04dB$ 。

2. 空間音場的不確定度方面：吸音材吸音係數實驗室係一不規則的七面體結構，迴響室內任兩側相對之反射面皆不平行，以避免駐波的產生。該空間雖假設為均勻音場，即空間內各點所測得之音壓值均假設相等，然而，空間中依然存在音壓分布隨量測位置不同而變異之關係。本迴響室之室容積為 $350m^3$ ，經實測迴響室內 5 處迴響時間分析得知，該空間內各頻率迴響時間量測結果之標準差，及迴響時間衰減曲線斜率之平均值如表 4 所示。其中，迴響室內 500Hz、1000Hz 以及 2000Hz 之迴響時間衰減曲線如圖 21~23，因此該試驗空間內迴響時間與音壓位準之關係式可假設為線性，其關係式為：

$$P = aT + b \quad (4.1)$$

式中， P = 音壓位準(dB)； a = 迴響時間衰減曲線斜率(dB/sec.)； T = 迴響時間(sec.)； b = 衰減曲線截距(dB)。因此，該音場之量測不確定度 u_{sp} 為：

$$u_{sp} = \sigma_p = \left[\left(\frac{dP}{dT} \right)^2 \cdot \sigma_T^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

其分析結果如表 5 所示。

表 4 迴響室迴響時間標準差及衰減曲線斜率

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
RT 標準差(sec.)	0.72	0.43	0.50	0.27	0.38	0.19	0.25	0.21	0.17
RT 衰減曲線斜率(dB/sec)	-3.89	-3.68	-3.85	-3.74	-4.47	-4.62	-5.65	-6.26	-7.40
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
RT 標準差(sec.)	0.15	0.19	0.13	0.15	0.13	0.10	0.10	0.09	0.06
RT 衰減曲線斜率(dB/sec)	-6.86	-6.52	-7.13	-8.19	-9.03	-10.2	-12.1	-15.0	-20.2

表 5 空間音場音壓位準量測不確定度

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
u_{sp} (dB)±	2.81	1.58	1.91	1.01	1.71	0.85	1.43	1.29	1.25
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
u_{sp} (dB)±	1.04	1.26	0.93	1.25	1.18	1.00	1.19	1.29	1.22

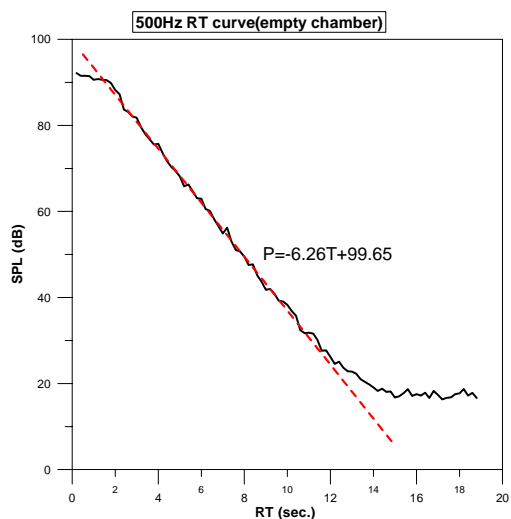


圖 21 迴響室 500Hz 頻率衰減曲線

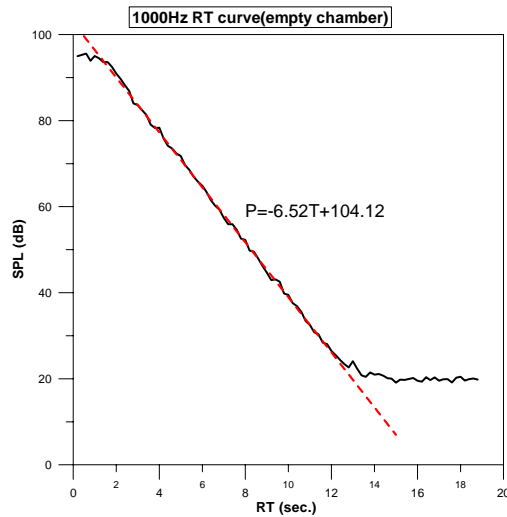


圖 22 迴響室 1000Hz 頻率衰減曲線

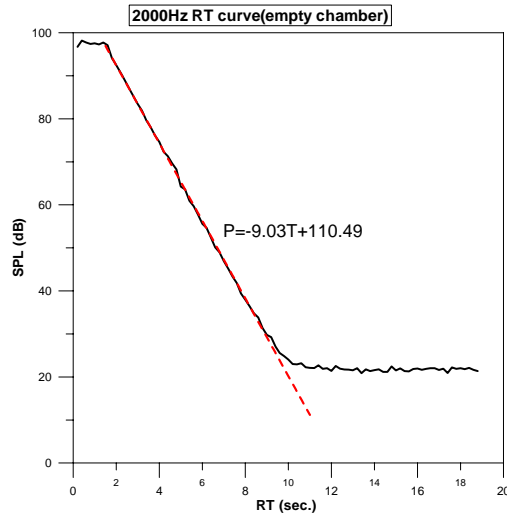


圖 23 迴響室 2000Hz 頻率衰減曲線

3. 量測數值解析度方面：本所音響館所使用的麥克風為 B&K/Type 4943-L-001 以及 Pulse-3560E 之 10 頻道分析儀，該儀器組設定之量測數值解析度為 0.01dB，因此其不確定度之範圍為 $\pm 0.005\text{dB}$ 。假設其機率分配型態為矩形分配，則量測數值解析度之不確定度 u_{res} 為：

$$u_{res} = \pm 0.005 / \sqrt{3} = \pm 0.003\text{dB}。$$

4. 試驗人員操作技術方面：本所音響實驗室採用自動化設備，並制訂吸

音係數檢測之標準作業程序(SOP)，清楚要求試驗操作人員試驗進行之作業程序及應注意事項，儘量避免因人為因素造成量測結果之偏差或數值運算錯誤。關於試驗操作人員之人為不確定度方面，可以直接假設其不確定度甚小而忽略。

5. 環境之溫、濕度及大氣壓力變異方面：關於溫度因子的不確定度方面，依據麥克風規格書表示，麥克風頻率響應之溫度因子為 $-0.01\text{dB}/^{\circ}\text{C}$ ($-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$)、濕度之影響因子為小於 $0.1\text{dB}/\text{RH}100\%$ ，而大氣壓力因子為 $-0.008\text{dB}/\text{kPa}$ ；依據 ISO 3741[25]對於量測過程中迴響室之溫度及濕度變化範圍限制，如表 6 所示，要求溫度之變化不得超過 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度的變化不得超過 $\pm 10\%$ ；在大氣壓力變化方面的限制為 $\pm 1.5\text{kPa}$ 。因此，溫度因子之不確定度限定範圍為 $\pm 0.05\text{dB}$ ；濕度影響因子之不確定度限定範圍為 $\pm 0.01\text{dB}$ ；大氣壓力因子之不確定度限定範圍為 $\pm 0.012\text{dB}$ 。假設溫度、相對濕度及大氣壓力之機率分配型態均為矩形分配，則溫度因子之不確定度為 $u_{temp} = \pm 0.05/\sqrt{3} = \pm 0.03\text{dB}$ ；相對濕度因子之不確定度為 $u_{RH} = \pm 0.01/\sqrt{3} = \pm 0.006\text{dB}$ ；大氣壓力因子之不確定度為 $u_{atm} = \pm 0.012/\sqrt{3} = \pm 0.007\text{dB}$ 。綜上分析，各項環境因子變異所造成的不確定度組合為：

$$u_{env} = \pm \left[u_{temp}^2 + u_{RH}^2 + u_{atm}^2 \right]^{1/2} = \pm 0.03\text{dB} \quad (4.3)$$

表 6 迴響室容許溫濕度變化範圍(ISO 3741 TABLE 4)

音響試驗室容許溫濕度變化範圍			
溫度變化範圍 θ 攝氏 °C	相對濕度變化範圍(%)		
	<30%	30% to 50%	>50%
$-5 \leq \theta < 10$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	$\pm 1^{\circ}\text{C} \pm 5\%$	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
$10 \leq \theta < 20$	$\pm 3\%$	$\pm 3^{\circ}\text{C} \pm 5\%$	$\pm 10\%$
$20 \leq \theta < 50$	$\pm 2^{\circ}\text{C} \pm 3\%$	$\pm 5^{\circ}\text{C} \pm 5\%$	$\pm 5^{\circ}\text{C} \pm 10\%$

(三) B類組合標準不確定度

依本所實驗室吸音係數測試之標準作業程序及使用設備，探討測試過程中 B 類不確定度各因子之影響程度。依 ISO 354 規範之試驗方法，本實驗室係以噪音中斷法來進行試驗，並以統計原理分析試驗結果，迴歸求得迴響室內之音壓衰減曲線。關於試驗設備之配置方式，係依據 ISO 354 之建議擺設。其規定為：麥克風與音源之距離至少 2m、麥克風與迴響室邊界或試件之距離至少為 1m、麥克風間距至少 1.5m，試驗結果須量得該空間中至少 12 處之音壓位準衰減曲線[26]。依照上述規定之要求，本實驗室共配置 5 隻麥克風同步進行量測，以方便檢測程序之進行。

依 4.3.2 節分析之 B 類不確定度影響因子及不確定度數值，在麥克風、量測數值解析度及環境因子等方面之不確定度必須以 5 隻麥克風進行計算。因此，5 隻麥克風量測結果之組合不確定度為[27]：

$$u_{mic,V} = \pm\sqrt{5} \cdot 0.04 = \pm 0.09dB \quad (4.4)$$

5 隻麥克風量測數值解析度之組合不確定度為：

$$u_{res,V} = \pm\sqrt{5} \cdot 0.003 = \pm 0.007dB \quad (4.5)$$

5 隻麥克風在環境因子上之組合不確定度為：

$$u_{env,V} = \pm\sqrt{5} \cdot 0.03 = \pm 0.07dB \quad (4.6)$$

綜合以上之分析結果，各項影響因子對吸音係數試驗過程所產生的 B 類不確

定度，其組合不確定度如表 7 所示，其計算公式如下：

$$U'_B = \pm \left[u_{mic,V}^2 + u_{sp}^2 + u_{res,V}^2 + u_{env,V}^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

由表 7 顯示，吸音係數檢測過程之 B 類組合不確定度以低頻的量測結果變化範圍最大，約達±2.82dB，中、高頻之不確定度變化範圍約為±1.2dB。

表 7 各頻率音壓位準 B 類不確定度評估結果

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
U'_B (dB)±	2.82	1.59	1.91	1.02	1.71	0.86	1.43	1.29	1.25
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
U'_B (dB)±	1.04	1.27	0.94	1.26	1.18	1.00	1.20	1.29	1.23

(四) B 類標準不確定度之等效吸音面積

表 7 之分析結果顯示吸音係數試驗過程中 B 類之音壓位準量測不確定度，為了與 A 類標準不確定之等效吸音面積量測不確定度合併計算，必須將表 7 所得之音壓位準量測不確定度轉換成 B 類之等效吸音面積量測不確定度。由(4.1)式迴響室迴響時間與音壓位準之關係式可求得迴響室含試件與不含試件之迴響時間量測不確定度，如(4.8)式

$$dT = dP/a \quad (4.8)$$

式中， dT = 含(不含)試件之迴響時間量測不確定度，單位：sec.； a = 含(不含)試件迴響室之迴響時間衰減曲線，單位：dB/sec.。再由(3.3)式計算迴響時間量測不確定度與等效吸音面積(A_T)之關係，等效吸音面積與空迴響室迴響時間(T_1)及含試件迴響室之迴響時間(T_2)之關係式如下：

$$\frac{\partial A_T}{\partial T_1} = \frac{-55.3V}{c_1 T_1^2} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial A_T}{\partial T_2} = \frac{55.3V}{c_2 T_2^2} \quad (4.10)$$

$$U_B^2 = \sigma_{A_T}^2 = \left(\frac{\partial A_T}{\partial T_1}\right)^2 dT_1^2 + \left(\frac{\partial A_T}{\partial T_2}\right)^2 dT_2^2 \quad (4.11)$$

(4.9)與(4.10)式中假設含與不含試件之吸音試驗其聲音之空氣傳遞速度相同，以室溫為 22.5°C 計算，則 $c_1 = c_2 = 344.5 \text{ m/sec.}$ ，迴響室之室容積 $V=350\text{m}^3$ 。(4.8)~(4.10)式之計算結果如表 8 所示，而 B 類標準不確定度之等效吸音面積分析結果 U_B 示於表 9。

表 8 含(不含)試件迴響室之迴響時間及標準差

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
dT ₁ (sec.)	0.72	0.43	0.50	0.27	0.38	0.19	0.25	0.21	0.17
T ₁ (sec.)	15.42	16.31	15.59	16.05	13.43	12.99	10.62	9.58	8.11
dT ₂ (sec.)	0.58	0.28	0.29	0.13	0.18	0.07	0.10	0.08	0.07
T ₂ (sec.)	12.27	10.78	9.00	7.57	6.38	4.63	4.05	3.56	3.40
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
dT ₁ (sec.)	0.15	0.19	0.13	0.15	0.13	0.10	0.10	0.09	0.06
T ₁ (sec.)	8.75	9.20	8.41	7.33	6.64	5.86	4.97	4.00	2.97
dT ₂ (sec.)	0.06	0.07	0.05	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04
T ₂ (sec.)	3.35	3.37	3.38	3.22	3.12	2.93	2.64	2.22	1.99

表 9 B 類標準不確定度之等效吸音面積

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
$U_B \text{ (m}^2\text{)} \pm$	0.27	0.17	0.23	0.14	0.28	0.18	0.36	0.36	0.37
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
$U_B \text{ (m}^2\text{)} \pm$	0.31	0.37	0.28	0.40	0.39	0.36	0.48	0.62	0.70

第四節 組合及擴充不確定度

由表 3 之 A 類標準不確定度及表 9 之 B 類標準不確定度分析所得之等效吸音面積，兩類不確定度之組合可計算出吸音材等效吸音面積之量測不確定度，其組合及擴充不確定度如表 10 所示，其中本文係以 95% 之信心水準下評估擴充不確定度，其擴充係數取 $k=2.0$ 。

表 10 各頻率等效吸音面積之組合及擴充不確定度

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
組合不確定度(m ²)	0.28	0.17	0.24	0.15	0.28	0.19	0.37	0.39	0.39
擴充不確定度(m ²)	0.56	0.35	0.47	0.30	0.57	0.39	0.74	0.77	0.79
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
組合不確定度(m ²)	0.32	0.38	0.29	0.41	0.40	0.37	0.49	0.65	0.74
擴充不確定度(m ²)	0.65	0.76	0.58	0.82	0.80	0.74	0.98	1.29	1.47

本研究所使用之吸音板面積為 11.72m^2 ，以(3.2)式計算吸音板於各頻率之吸音係數量測值，以及在 95% 信心水準下之擴充不確定度分析值示於表 11。以 1/3 倍頻表示之吸音板之吸音係數量測曲線及 U_{95} 擴充不確定度分析範圍如圖 24 所示，依 ISO 11654 吸音係數評估標準宣告之加權吸音係數為 $\alpha_w = 0.85(H)$ ，該吸音板在高頻的吸音效果較宣告之吸音等級高，其評估曲線如圖 25。

表 11 吸音材吸音係數及 U_{95} 擴充不確定度

頻率(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630
吸音係數	0.15	0.15	0.29	0.44	0.48	0.73	0.78	0.87	0.83
擴充不確定度 U_{95}	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	0.06	0.07	0.07
頻率(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
吸音係數	0.94	0.91	0.90	0.89	0.91	0.90	0.91	1.02	1.02
擴充不確定度 U_{95}	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.08	0.11	0.13

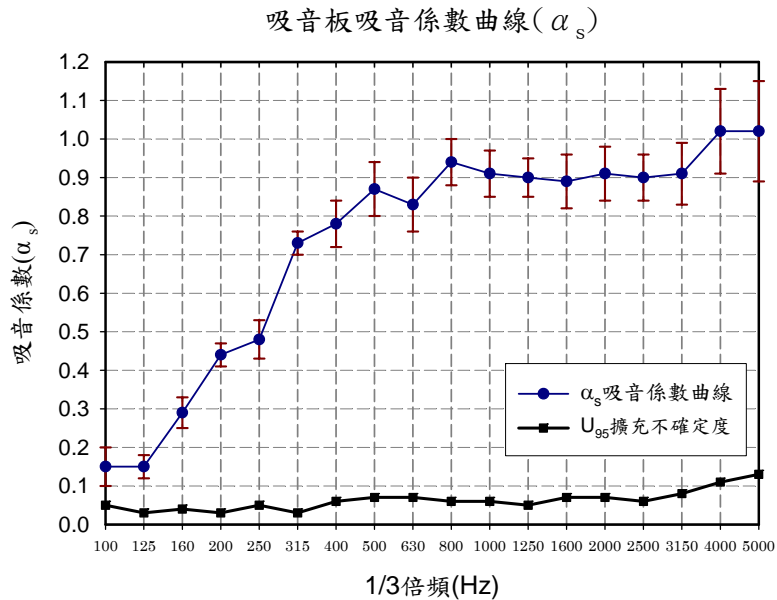


圖 24 吸音板吸音係數量測曲線

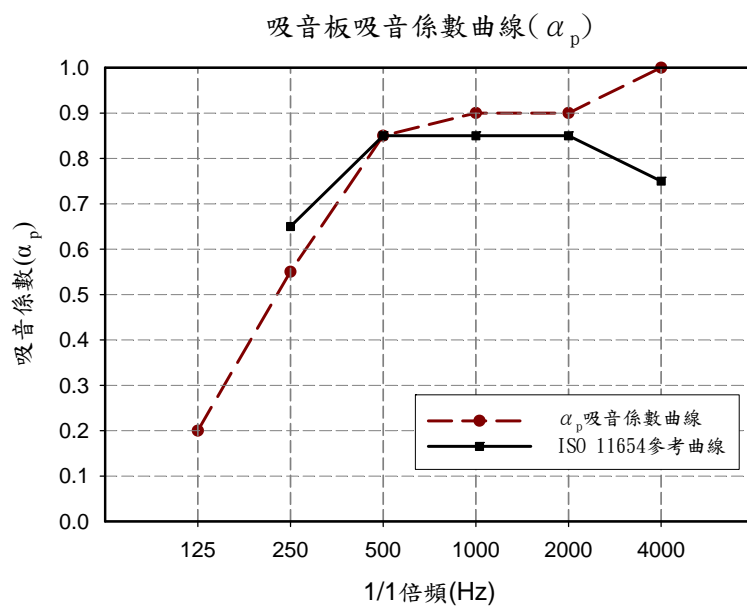


圖 25 吸音板吸音係數評估曲線

第五章 建議與結論

第一節 吸音筒吸音係數試驗

吸音筒之吸音性能係由該構造內吸音棉所提供，因此吸音筒吸音效果與吸音筒裸露的面積成正比。若是將吸音筒緊靠在一起，則吸音筒實際裸露的面積將大幅減少，致使有效的吸音面積銳減，影響吸音筒之吸音效果。由本研究進行之試驗結果，吸音筒的配置方式以平躺於地面的方式可獲得最大的吸音係數量測值。應用於實務改善工程的作法係將吸音筒貼近於室內兩側牆面上，依迴響時間的設計範圍配置適當數量的吸音筒。

由本研究分析 8 種吸音筒配置方式與吸音效果之關係提供以下建議與結論：

1. 以相同配置方式比較散亂擺設與規則擺設之差異時顯示，其吸音效果與規則或散亂擺設並無明顯差異，依吸音係數宣告方式而言兩者有相同的吸音效果。然而，應用於實務上建議採用規則擺設的排列方式，力求一致性與美觀。
2. 由本文之分析結果得知，吸音筒以懸吊及貼近反射面的配置方式可獲的較高的吸音效果。兩種配置方式各有利弊，其中吸音筒採懸吊配置方式時高頻音的吸音效果甚佳，優於貼近反射面者約 30% 左右。設計者若以吸收高頻音為主，將吸音筒以懸吊配置之設計方式可獲得最高的吸音效能。
3. 吸音筒採貼近反射面之配置方式其各頻率之吸音效果十分平均，應用於室內空間之噪音控制改善時，該配置方式是目前較常使用的方法。
4. 本所國際會議廳採用吸音筒及吸音板減少空間內之迴響時間，吸音筒之配置方式係以貼近反射面之方式擺設，經完工驗收測試得知其 500Hz 及 1000Hz 之迴響時間已降至 0.8 秒以下，可有效減少回音之干擾。

5. 本研究係以實驗室等級之試驗方法進行試驗，而實際環境之吸音行為係現場等級之試驗方法，兩者試驗結果之差異性為日後研究之課題。

第二節 吸音係數量測不確定度分析

本研究依照 ISO GUM 指引分析吸音係數試驗過程中隱含的 A 類及 B 類不確定度，由本文分析結果可得到以下結論：

1. 本研究之量測不確定度結果業已向 TAF 申請實驗室認證，並協助本所音響館吸音係數實驗室獲得認證。
2. 經 30 次重複性試驗分析 A 類標準不確定度之等效吸音面積可知，等效吸音面積之量測不確定度範圍為 $0.06\sim 0.24\text{m}^2$ 之間。而由 B 類標準不確定度分析結果之等效吸音面積不確定度範圍為 $0.14\sim 0.7\text{m}^2$ 之間。
3. 吸音係數 U_{95} 之擴充不確定度範圍在 $0.03\sim 0.13$ 之間，其量測不確定度最大變化範圍在 10% 左右。由分析可知，B 類標準不確定度為試驗過程中主要的不確定度來源。
4. B 類不確定度因子考量麥克風、空間音場環境、數值解析度、操作人員經驗以及試驗環境等五項不確定因子之影響程度，其中以空間音場的不確定度對整體的影響最大，空間音場的不確定度佔 B 類不確定度 99% 以上。
5. 因實驗室採用自動化設備，人員操作或數值計算上的錯誤可以假設不計，而麥克風、數值解析度及環境因素等因子對 B 類不確定度之影響程度甚微，因此可以直接忽略不計。

附錄一 95 年度自行研究計畫期中審查會議紀錄

內政部建築研究所自行研究計畫期中簡報會議記錄

一、時間：95 年 7 月 24 日（星期一）下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室（台北縣新店市北新路 3 段 200 號 13 樓）

三、主持人：葉副所長世文

四、出席人員：陳組長瑞鈴、莊主任秘書素琴、陳工程師金文

五、主席致詞：（略）

六、業務單位報告：（略）

七、自行研究案主持人簡報：（略）

八、綜合討論與建議：

莊主任秘書素琴

1. 人類生活在追求實用性、安全性後，精緻化生活品質的追求是不可避免及普遍化的趨勢，本研究從此觀點來展開論述，有其前瞻性及其重要性。
2. 本試驗共規劃 8 種吸音筒安裝方式進行比較，惟：
 - (1) 後 2 種排列方式（置地平躺規則、置地平躺隨機散亂）未附試驗圖片，是否尚未施作？但為何有試驗結果？
 - (2) 各種安裝方式除附圖片外，亦應繪製平面位置圖，並標示數據。
 - (3) 本研究數據未依各次試驗詳實記錄、展現，僅作一平均值之數據表格，未來希望能作較多之交叉分析比較。
3. 第 12 頁 4.1 節第 1 行「因此吸音筒吸音效果與吸音筒裸露的面積成正比」，即吸音筒裸露面積越大、吸音效果越好；但第 4 行「由本研究進行之試驗結果，吸音筒的擺設方式以平躺於地面的方式可獲得最大的吸音係數量測值」。此 2 論述似乎矛盾，因吸音筒裸露面積，懸吊式應較平躺擺設於地面之方式（有部分面積接觸地面）所裸露之面積更多，即裸露面積最大者應為懸吊式，但為何可獲得最大吸音係數量測值的卻為平躺式，原因何在？可否做說明。

陳工程師金文

1. 不同擺設位置之吸音係數對實務現場應用極為重要，本文極具實用參考價值。
2. 由試驗結果來看，吸音筒無論懸吊規則排列、懸吊隨機排列、置地規則或隨機排列，所獲得之吸音係數皆相同，由此可見 貴所吸音係數實驗室試驗結果之重複性良好，實驗室內產生的音場均勻。
3. 以本案例同時完成不確定度定量化分析，對實驗室之品質及 CNLA 之認證極有助益。
4. 由 8 組試驗之結果得知，將吸音筒平躺於地面可獲得最大的吸音效果，此現在乃吸音筒近反射面使音場產生繞射現象。
5. 建議事項：
 - (1) 第 6、7 項中“隔音測試”、“隔音指標”係筆誤，應修正為吸音係數。
 - (2) 建議發表於今年度之音響學會研討會分享研究成果。

陳組長瑞鈴

1. 吸音係數之試驗方法共有兩種，應查明各試驗法提出的先後順序再依序介紹。
2. 不同的吸音筒擺設方式卻得到相同的試驗結果，請確認試驗結果是否有誤。並應參考類似文獻資料，印證試驗結果之真實性。

葉副所長世文

由試驗結果得知，吸音筒以平躺方式擺設可獲得最好的吸音效果，建議說明其原因。

附錄二 95 年度自行研究計畫期末審查會議紀錄

內政部建築研究所自行研究計畫期末簡報會議記錄

- 一、時間：95 年 12 月 27 日（星期三）下午 2 時 30 分
- 二、地點：本所簡報室（台北縣新店市北新路 3 段 200 號 13 樓）
- 三、主持人：陳組長瑞鈴
- 四、出席人員：江教授哲銘、江教授維華、莊主任秘書素琴、陳工程師金文
- 五、主席致詞：（略）
- 六、業務單位報告：（略）
- 七、自行研究案主持人簡報：（略）
- 八、綜合討論與建議：

莊主任秘書素琴

1. 從多次審查貴所之研究案來看，貴所對報告之格式或作法應有標準化之規定，也許本次時間太匆忙，故建議在列印結案報告時能注意：
 - (1).封面一字體大小、格式、紙質。
 - (2).摘要—有的有英文版、有的無。
 - (3).本文內之字體大小。
 - (4).表、圖，請置於文內提及該表或圖之段落後，以便於查閱。
2. 本試驗共規劃八種不同的吸音筒配置方式進行分析比較，應可得知在各種狀況下之客觀比較結果，但未將試驗室的基本平面圖、各種吸音筒配置的平面位置圖畫出，讓委員只能從相片上（圖 3~10）些略了解，無法做更進一步的比對、求證，是較可惜的地方。另圖 3~10 在本文內未敘及（第 8 頁 3.3 節第 3 行敘及「圖 2」、第 9 頁 3.4 節第 8 行跳至「圖 11、圖 12」，中間之圖 3~10 消失未提）。
3. 第 3.5 節吸音筒配置設計實作，有將本研究案之設計原理應用到貴所國際會議廳之音場改善工程上，且有達到預期之效果，相當可貴。故在當初之規劃設計上，應有更多之詳細資料可供參考、佐證，當然也許此工程有辦

理另一項規劃、發包，但如能將該工程更多之細部設計資料放入本研究案內，將更有助於更詳細之探討，因為這實在是一難得的案例，各種資料如能翔實記載，皆有助於日後之應用

江教授哲銘

1. 本研究的測試方式應可肯定，測試範例之吸音特性正確。
2. 吸音筒不同的排列方式雖吸音效果差異不大，但檢測程序(SOP)擬議時，應標示吸音筒(材料)之設置方式。
3. 本研究值得肯定，請繼續研發創立標準測試法。

江教授維華

1. 建議參考成大賴榮平教授數年前指導的一篇關於吸音筒擺設方式之碩士論文，可列為本研究的參考文獻。
2. 使用的量測方式對試驗結果的影響，是否已含在 A 類不確定性之內？
3. 有關吸音筒採用各種擺設方式是否都在 ISO 規範的容許條件下進行？
4. 本研究分析得之量測不確定度是否僅適用於該試驗所使用的試件？

陳工程師金文

1. 各種吸音筒排列方式之吸音係數對實際安裝之效果有極重要之實務效益。
2. 建議將本研究之不確定度分析及獲得實驗室之 TAF 認證之成果，納入結論。
3. 建議 29 頁 RT 圖示之範圍標示作修正(量測起點應再降 5dB)。

陳組長瑞鈴

1. 研究結論建議說明吸音筒規劃設計時，比較擺設方式之優劣，指出何種擺設方式應避免。
2. 應清楚指出何種場所建議如何設計吸音筒的配置方式，供各界參考。

參考書目

1. ISO 354, 2003, Acoustics- Measurement of sound absorption in a reverberation room.
2. ASTM-C423, Standard Test Method for Sound Absorption and sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method.
3. JIS-A1409, Method for measurement of sound absorption coefficients in a reverberation room.
4. JIS-A6301, Sound absorbing materials
5. CNS 9056(A3165) , 1986 , 餘響室法吸音率測定法
6. J.Y. Chung and D.A. Blaser, Sept. 1980, Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties I Theory, J. Acoust. Soc. Am. 68(3), 907-913.
7. J.Y. Chung and D.A. Blaser, Sept. 1980, Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties II Experiment, J. Acoust. Soc. Am. 68(3), 914-921.
8. Han Boden and Mats Abom, Feb. 1986, Influence of errors on the two microphones method for measuring acoustic properties in ducts, J. Acoust. Soc. Am. 79(2), 541-549.
9. ISO 10534-1, 1996, Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 1: Method using standing wave ratio.
10. ISO 10534-2, 1998, Acoustics -- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes -- Part 2: Transfer-function method.
11. CNS 13208 , 1993 , 管內法建築材垂直射入吸音率測定法。
12. Kintsl, Z., 1975, Investigation of the sound absorption of wall sections by pulse technique, Soviet Phys. Acoust., 21, 30-32.
13. Cramond, A. J. and Don, C. G., 1984, Reflection of impulses as a method of determining acoustic impedance, J. Acoust. Soc. Amer., 75(2),

382-389.

14. Y. Takahashi, T. Otsuru and R. Tomiku, 2005, In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise, *Applied Acoustics* , 66, 845-865.
15. ISO GUM, 1995, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland.
16. 中華民國實驗室認證體系，中華民國89年11月，「測試結果量測不確定度評估指引」。
17. 房性中，2001年7月，「量測作業之不確定度分析與探討」，中華技術雜誌，第51期。
18. 方冠權、郭晃銘、蔡森南，2005，「材料抗拉強度量測不確定度與誤差分析問題之探討」，經濟部標準檢驗局自行研究計畫。
19. ISO/IEC 17025, 2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, Geneva, Switzerland.
20. 經濟部標準檢驗局，中華民國90年3月，「CNS 17025測試與校正實驗室能力一般要求」。
21. ISO 11654, 1997, Acoustics- Sound absorbers for use in buildings- Rating of sound absorption.
22. Barry N. Taylor, Chris E. Kuyatt, 1994, NIST Technical Note 1297, Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST, U.S.A.
23. 孫宏川等，1995，「振動噪音實驗室建立量測不確定評估方法之經驗與實務」，第三屆中華民國振動與噪音工程學會學術研討會，第43-50頁。
24. 郭淑芬、盧奕銘、陳興，1998，「麥克風比較校正量測不確定評估」，第六屆中華民國振動與噪音工程學會學術研討會，第23-28頁。
25. ISO 3741, 1999, Acoustics- Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure- Precision methods for reverberation rooms, Geneva, Switzerland.

26. ISO 140-1, 1997, Acoustics- Measurement of sound insulation in buildings and of building element- Part 1: Requirements of laboratory test facilities with suppressed flanking transmission, Geneva, Switzerland.
27. ISO 140-2, 1991, Acoustics- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements- determination, verification and application of precision data, Geneva, Switzerland.
28. 賴聖智、賴榮平，2004，「圓筒形空間吸音體設置方式對吸音力之影響研究」，國立成功大學建築學系碩士論文。
29. 賴榮平、賴聖智、陳彥伯、江仲傑、劉凱華，2003，「空間吸音體設置方式對吸音力之影響研究」，中華民國建築學會第十六屆建築研究成果，第157-162頁。