

麥克風音壓靈敏度國際比對結果之探討

Discuss on the international comparison for the pressure sensitivity of the microphone

陳朝榮¹、盧奕銘¹、郭淑芬¹

摘要

麥克風音壓靈敏度是聲量標準追溯體系中的最高標準，我國國家度量衡標準實驗室聲量研究室經過多年的研究改良，完成麥克風音壓靈敏度互換校正系統之耦合空腔法。為確保實驗室的量測能力，這幾年來，積極參與由 APMP 所舉辦的區域性關鍵比對。本文旨在說明國際比對的過程及結果，並藉由比對結果，探討我國國家度量衡標準實驗室對於麥克風音壓靈敏度的量測能力。

關鍵字：實驗室標準麥克風、音壓靈敏度、互換校正

Abstract

The primary standard is the pressure sensitivity of a microphone in the field of acoustics, the national measurement laboratory(NML, Taiwan) completed the microphone reciprocity calibration system in coupler after years of research. In order to ensure measurement capability, the past few years, we participated in the APMP regional key comparison actively. This article aimed to describe the process and results in the international comparison. Through the international comparison results, the measurement capabilities of the national measurement laboratory for the pressure sensitivity of the microphones are discussed.

Keywords: Laboratory standard microphone, pressure sensitivity, reciprocity calibration

¹工業技術研究院 量測技術發展中心

壹、前言

在聲量標準追溯體系中，國際上公認以電容式麥克風的音壓靈敏度(Pressure sensitivity)為其最高標準，世界各國之國家標準實驗室，大部份以互換(reciprocity)方法來校正麥克風的音壓靈敏度，我國國家度量衡標準實驗室所建立的麥克風音壓靈敏度互換校正系統，可以校正一英吋實驗室標準麥克風(LS1P)，頻率範圍為 20 Hz 到 10 kHz；二分之一英吋實驗室標準麥克風(LS2P)的校正頻率範圍為 20 Hz 到 25 kHz。

為確保實驗室的量測能力與國際地位，於是積極的參與國際比對活動。先後參加由 APMP 所舉辦的 APMP.AUV.A-K1 及 APMP.AUV.A-K3 的關鍵性比對，針對一英吋實驗室標準麥克風及二分之一英吋實驗室標準麥克風之音壓靈敏度進行區域性的比對。本文旨在說明國際比對的過程及結果，並藉由比對結果，探討我國國家度量衡標準實驗室在麥克風音壓靈敏度的量測能力。

貳、參與比對實驗室

比對的進行是由亞太計量組織(Asia-Pacific Metrology Programme)APMP TCAUV 會議中決議，徵詢擔任主導實驗室與參與比對實驗室的意願，最後由主導實驗室負責整個比對的活動，包括比對草案的擬定，比對的進行與比對結果的發佈。我國參與的 APMP.AUV.A-K1 及 APMP.AUV.A-K3 亞太地區的比對分別由日本 NMIJ 和韓國 KRISS 主導整個比對活動。

APMP.AUV.A-K1 是進行一英吋實驗室標準麥克風的比對活動，共有亞太地區 9 個國家標準實驗室參與此項活動；APMP.AUV.A-K3 是進行的二分之一英吋實驗室標準壓力場麥克風的音壓靈敏度國際比對活動，增加了新加坡的參與，共有 10 個國家標準實驗室參與此項活動(如表 1)。此兩次的比對包含國際度量衡組織聲學、超音波及振動諮詢委員會 (CCAUV) 會員的實驗室，因此在比對中扮演亞太地區的比對結果連結到國際度量衡的重要角色。

表 1、參與 APMP.AUV.A 關鍵性比對的實驗室

實驗室	簡稱	地區
Center for Measurement Standards Industrial Technology Research Institute	CMS/ITRI	台灣
Korea Research Institute of Science and Standards	KRISS	韓國
National Institute of Metrology	NIM	中國
National Institute of Metrology (Thailand)	NIMT	泰國
National Measurement Institute*	NMIA	澳洲
National Metrology Laboratory SIRIM Berhad	NML/SIRIM	馬來西亞
National Physical laboratory	NPLI	印度
Standards and Calibration Laboratory	SCL	香港
National Metrology Institute of Japan	NMIJ	日本
National Metrology Centre Agency for Science, Technology and Research, Singapore	NMC	新加坡

參、比對標準件

比對標準件是由主導實驗室提供符合 IEC61094-2 中之實驗室標準壓力場麥克風，其構造與尺寸如麥克風的外徑、膜面的直徑、膜面的深度、輸出端的直徑、輸出端的深度以及連接前置放大器的螺紋都有詳細規範，如圖 1、2 所示。而 LS1P 及 LS2P 麥克風特性，包括靈敏度、頻率響應、等效體積、溫溼度係數等，在規範中亦有其規格要求如表 2、3，表中並列出此兩次比對採用的標準件，Brüel & Kjær type 4160 及 type 4180 麥克風的規格，說明使用的標準件均符合 IEC61094-2 的規範要求。

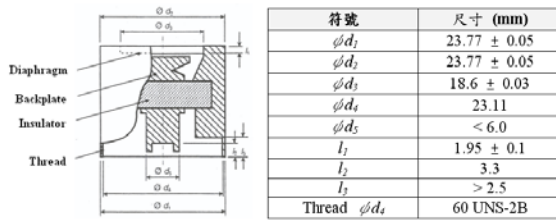


圖 1、LS1P 麥克風尺寸

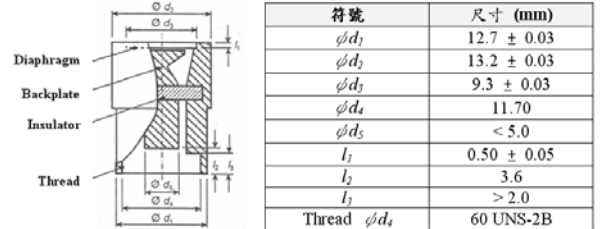


圖 2、LS2P 麥克風尺寸

表 2、一英吋實驗室標準壓力場麥克風之特性規格

特性項目	單位	IEC 61094-2 LS1P	Brüel & Kjær type 4160
靈敏度	dB re 1 V/Pa	-26 ± 2	-26.6
頻率響應(變異 2 dB 內)	Hz	10 to 8 000	2.6 to 8 000
等效體積	mm ³	150 ± 30	140
共振頻率	kHz	> 8	8.2
動態範圍上限	dB re 20 μ Pa	> 130	10 to 146
壓力修正係數	dB/kPa	-0.02 to +0.02	0.003
溫度修正係數	dB/K	-0.02 to +0.02	-0.0016
相對濕度修正係數	dB/%	$< 0.000 4$	0.000025

表 3、二分之一英吋實驗室標準壓力場麥克風之特性規格

特性項目	單位	IEC 61094-2 LS2P	Brüel & Kjær type 4180
靈敏度	dB re 1 V/Pa	-37 ± 3	-38.1
頻率響應(變異 2 dB 內)	Hz	10 to 20 000	4 to 20 000
等效體積	mm ³	10 ± 5	9.5
共振頻率	kHz	> 20	22
動態範圍上限	dB re 20 μ Pa	> 145	21 to 160
壓力修正係數	dB/kPa	-0.025 to +0.025	-0.002
溫度修正係數	dB/K	-0.02 to +0.02	-0.007
相對濕度修正係數	dB/%	$< 0.000 4$	0.000008

為確保比對過程的順利進行，基本上標準件每傳遞兩個實驗室後，必須回到主導實驗室進行確認，再繼續傳遞至下一個實驗室，如圖 3、4 所示。

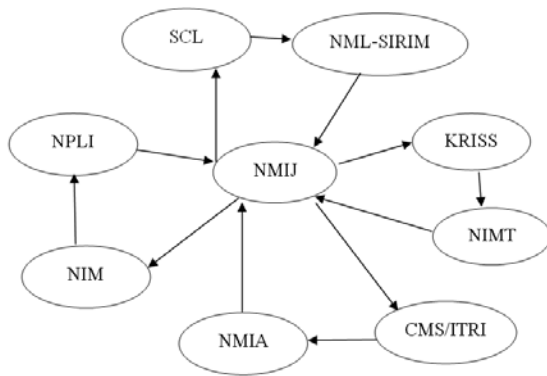


圖 3、APMP.AUV.A-K1 標準件傳遞路徑

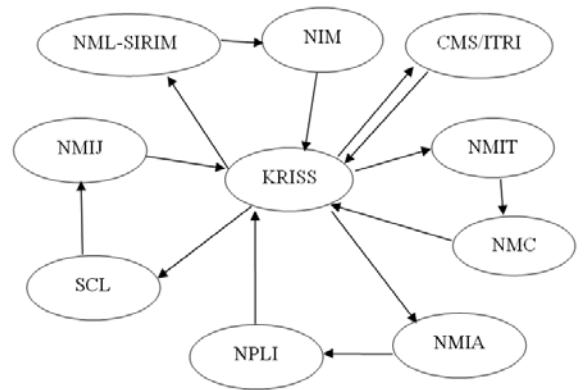
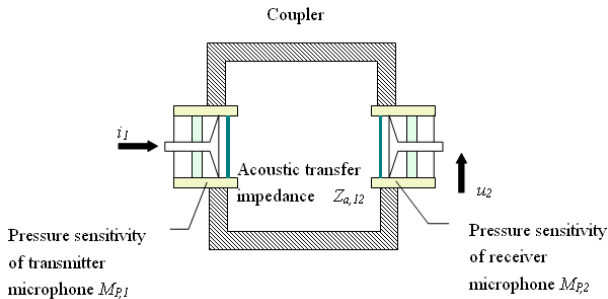


圖 4、APMP.AUV.A-K3 標準件傳遞路徑

肆、量測方法

在聲量量測中，麥克風是將聲波造成之壓力變化轉換為電壓變化之重要感測器，而描述此項轉換關係之參數，即為麥克風開路靈敏度，其定義為麥克風之開路輸出電壓與作用於麥克風薄膜之音壓的比值，單位為 mV/Pa 或 dB re 1V/Pa。

其量測原理是使用三個相同型式之電容式麥克風，其中兩個麥克風具有互換性。利用每兩個麥克風為一組進行校正，一個為音源，一個為接收器，置入校正系統之空腔耦合器(coupler)中，藉由量測輸入電流、輸出電壓及聲傳播阻抗(acoustic transfer impedance)，如圖 5 所示，得兩麥克風音壓靈敏度之乘積 $M_{P,1}$ ， $M_{P,2}$ 如下式



$$M_{P,1} \cdot M_{P,2} = \frac{1}{Z_{a,12}} \cdot \frac{u_2}{i_1}$$

式中

$M_{P,1}$ ：音源麥克風 1 之音壓靈敏度

$M_{P,2}$ ：受音麥克風 2 之音壓靈敏度

$Z_{a,12}$ ：聲傳播阻抗

i_1 ：音源端之輸入電流

u_2 ：受音端之輸出電壓

圖 5、麥克風音壓靈敏度互換法校正原理

其中發音端之電流量測為利用其電容及量測跨接於電容兩端之電壓而得，

$$i_1 = u_1 \cdot j \cdot \omega \cdot C$$

u_1 ：跨接於發音麥克風電容兩端之電壓

$$j : \sqrt{-1}$$

ω ：角速度

C : 電容值

而聲傳播阻抗則是藉由量測空腔體積及大氣壓力而得如下式

$$Z_{a,12} = \frac{\kappa_{12} \cdot P_{s,12}}{j \cdot \omega \cdot V_{a,12}}$$

κ_{12} : 比熱比

$P_{s,12}$: 大氣壓力量測值

$V_{a,12}$: 聲傳播體積

因此得麥克風音壓靈敏度之乘積如下式

$$M_{P,1} \cdot M_{P,2} = \frac{j \cdot \omega \cdot V_{a,12}}{\kappa_{12} \cdot P_{s,12}} \cdot \frac{u_2}{u_1 \cdot j \cdot \omega \cdot C} = \frac{V_{a,12} \cdot R_{12}}{\kappa_{12} \cdot P_{s,12} \cdot C}$$

$$R_{12} = u_2 / u_1$$

最後藉由三次量測得三組麥克風音壓靈敏度之乘積，再分別計算各個麥克風之音壓靈敏度如下

$$M_{P,1} = \left(\frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}} \cdot \frac{V_{a,12} \cdot V_{a,13}}{V_{a,23}} \cdot \frac{P_{s,23}}{P_{s,12} \cdot P_{s,13}} \cdot \frac{\kappa_{23}}{\kappa_{12} \cdot \kappa_{13}} \cdot C^{-1} \right)^{1/2}$$

$$M_{P,2} = \left(\frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{13}} \cdot \frac{V_{a,12} \cdot V_{a,23}}{V_{a,13}} \cdot \frac{P_{s,13}}{P_{s,12} \cdot P_{s,23}} \cdot \frac{\kappa_{13}}{\kappa_{12} \cdot \kappa_{23}} \cdot C^{-1} \right)^{1/2}$$

$$M_{P,3} = \left(\frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12}} \cdot \frac{V_{a,13} \cdot V_{a,23}}{V_{a,12}} \cdot \frac{P_{s,12}}{P_{s,13} \cdot P_{s,23}} \cdot \frac{\kappa_{12}}{\kappa_{13} \cdot \kappa_{23}} \cdot C^{-1} \right)^{1/2}$$

伍、比對結果

比對的進行是由每個參與實驗室針對兩只麥克風量測其音壓靈敏度，並賦予量測不確定度，計算兩只麥克風量測值合併的音壓靈敏度與所參與實驗室音壓靈敏度量測結果之平均值的差異。LS1P 量測的頻率範圍為 31.5 Hz 至 8 kHz，各實驗室最大的量測變異 <0.05 dB; LS2P 量測的頻率範圍為 31.5 Hz 至 25 kHz，各實驗室最大的量測變異 <0.07 dB 圖 6、7 分別為各實驗室對 LS1P、LS2P 的量測結果。

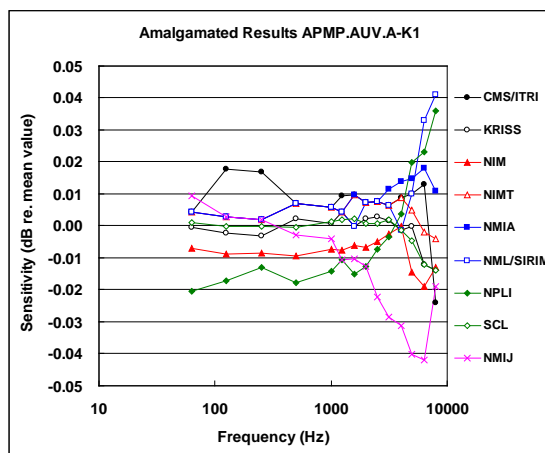


圖 6、APMP.AUV.A-K1(LS1P)
各實驗室量測結果

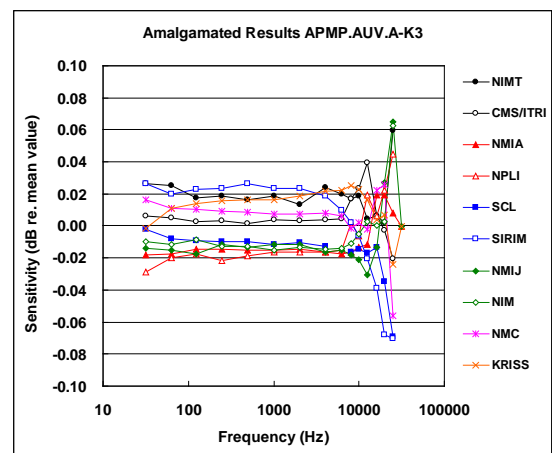


圖 7、APMP.AUV.A-K3(LS2P)
各實驗室量測結果

本文以 ISO Guide 43-1 中之 E_n 值評估各實驗室間的比對結果，其估算方法是以所有參與實驗室所量測的麥克風音壓靈敏度平均值作為參考音壓靈敏度；實驗室所宣稱的擴充不確定度之均方根值作為參考擴充不確定度，依據下式計算各參與實驗室的 E_n 值如表 4、5 所示。

$$E_n = \frac{Lab - Ref}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}}$$

Lab ：各實驗室的麥克風音壓靈敏度量測值

Ref ：麥克風的參考音壓靈敏度

U_{Lab} ：各實驗室的擴充不確定度

U_{Ref} ：參考擴充不確定度

表 4、APMP.AUV.A-K1(LS1P)各國家實驗室之 E_n 值

Freq.(Hz)	CMS/ ITRI	KRISS	NIM	NIMT	NMIA	NML/ SIRIM	NPLI	SCL	NMIJ
63	0.10	-0.02	-0.13	0.10	0.10	0.10	-0.29	0.02	0.18
125	0.42	-0.07	-0.17	0.06	0.06	0.08	-0.24	-0.01	0.06
250	0.40	-0.09	-0.16	0.05	0.05	0.06	-0.18	0.00	0.05
500	0.17	0.06	-0.18	0.17	0.17	0.21	-0.25	-0.01	-0.07
1000	0.14	0.02	-0.14	0.14	0.14	0.17	-0.20	0.03	-0.10
1250	0.22	0.13	-0.15	0.10	0.10	0.13	-0.15	0.04	-0.25
1600	0.23	0.00	-0.12	0.23	0.23	0.00	-0.21	0.05	-0.24
2000	0.17	0.07	-0.13	0.17	0.17	0.22	-0.18	0.02	-0.30
2500	0.18	0.08	-0.09	0.18	0.18	0.23	-0.10	0.02	-0.52
3150	0.15	0.04	-0.05	0.15	0.27	0.19	-0.05	0.05	-0.67
4000	0.21	-0.03	0.00	0.21	0.32	-0.03	0.05	-0.03	-0.73
5000	0.16	0.00	-0.23	0.11	0.34	0.19	0.28	-0.09	-0.76
6300	0.21	-0.27	-0.30	-0.05	0.29	0.52	0.32	-0.19	-0.67
8000	-0.38	-0.31	-0.21	-0.06	0.17	0.56	0.49	-0.22	-0.30

表 5、APMP.AUV.A-K3(LS2P)各國家實驗室之 E_n 值

Freq. (Hz)	NIMT	CMS/ ITRI	NMIA	NPLI	SCL	SIRIM	NMIJ	NIM	NMC	KRISS
31.5	0.41	0.13	-0.22	-0.24	-0.03	0.57	-0.22	-0.12	0.25	-0.02
63	0.57	0.11	-0.28	-0.18	-0.18	0.46	-0.24	-0.22	0.25	0.21
125	0.41	0.06	-0.28	-0.21	-0.22	0.53	-0.28	-0.17	0.24	0.27
250	0.44	0.08	-0.28	-0.41	-0.24	0.56	-0.22	-0.25	0.21	0.37
500	0.39	0.04	-0.36	-0.36	-0.24	0.63	-0.26	-0.25	0.20	0.39
1000	0.44	0.09	-0.36	-0.32	-0.28	0.56	-0.22	-0.29	0.18	0.38
2000	0.31	0.08	-0.34	-0.20	-0.24	0.55	-0.22	-0.25	0.17	0.43
4000	0.56	0.09	-0.38	-0.20	-0.30	0.44	-0.31	-0.28	0.18	0.51
6300	0.46	0.11	-0.41	-0.15	0.00	0.22	-0.29	-0.27	0.14	0.52
8000	0.40	0.40	-0.38	0.02	-0.38	0.05	-0.34	-0.21	-0.03	0.59
10000	0.43	0.38	-0.25	-0.06	-0.34	-0.12	-0.40	-0.10	0.05	0.43
12500	0.09	0.47	-0.18	0.17	-0.37	-0.32	-0.48	0.03	-0.04	0.26
16000	0.12	0.08	0.23	0.05	-0.24	-0.52	-0.18	0.00	0.35	0.05
20000	0.02	-0.03	0.18	0.17	-0.41	-0.65	0.20	0.02	0.27	0.06
25000	0.40	-0.16	0.05	0.25	-0.47	-0.40	0.35	0.49	-0.36	-0.12

一般而言 E_n 值介於 -1 至 1 之間，即表示是一個令人滿意的比對活動，表 4、5 中

顯示對於 LS1P 及 LS2P 麥克風比對結果，各參與實驗室的 En 值分別在 $-0.76 \leq En \leq 0.56$ 及 $-0.65 \leq En \leq 0.63$ ，顯示此兩次國際比對是相當令人滿意的比對。

由於希望 APMP 比對結果能連結到 CCAUV，但因為所使用的標準件並不相同，因此必須估算兩者之間的修正因子，以達到連結的結果。

其評估方式為先計算 CCAUV.A 各實驗室量測結果的平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i$$

x_i ：CCAUV.A 各實驗室的麥克風音壓靈敏度量測值

\bar{x} ：CCAUV.A 各實驗室的麥克風音壓靈敏度平均值

M ：參與實驗室個數

再分別計算 CCAUV.A 及 APMP.AUV.A 中連結實驗室量測結果的平均值，

$$\bar{x}_l = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_i \quad , \quad \bar{y}_l = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L y_j$$

x_i ：CCAUV.A 連結實驗室的麥克風音壓靈敏度量測值

\bar{x}_l ：CCAUV.A 連結實驗室的麥克風音壓靈敏度平均值

y_j ：APMP.AUV.A 連結實驗室的麥克風音壓靈敏度量測值

\bar{y}_l ：APMP.AUV.A 連結實驗室的麥克風音壓靈敏度平均值

L ：連結實驗室各個數

最後計算其修正因子

$$r = \bar{x}_l - \bar{y}_l$$

對於 CCAUV.A 的實驗室中的量測值與關鍵性比對的參考值(KCRV)之差值 d_i ，如下式

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

而 APMP.AUV.A 實驗室中各量測值的等效差值 d_j 須加上連結的修正因子，如下式

$$d_j = y_j + r - \bar{x}$$

在不考慮量測不確定度的相關性時，在 LS1P 的比對中，以 NMIJ 及 KRIS 為連結實驗室，其在頻率為 250 Hz 及 1000 Hz 時的等效差值與相對應的量測不確定度，如圖 8、9 顯示。而在 LS2P 的比對中由於參與的實驗室相當多，因此分別以 CENAM、DPLA 及 NMIJ、KRIS 為連結實驗室，其在頻率為 250 Hz 及 1000 Hz 時的等效差值與相對應的量測不確定度，如圖 10、11 顯示。

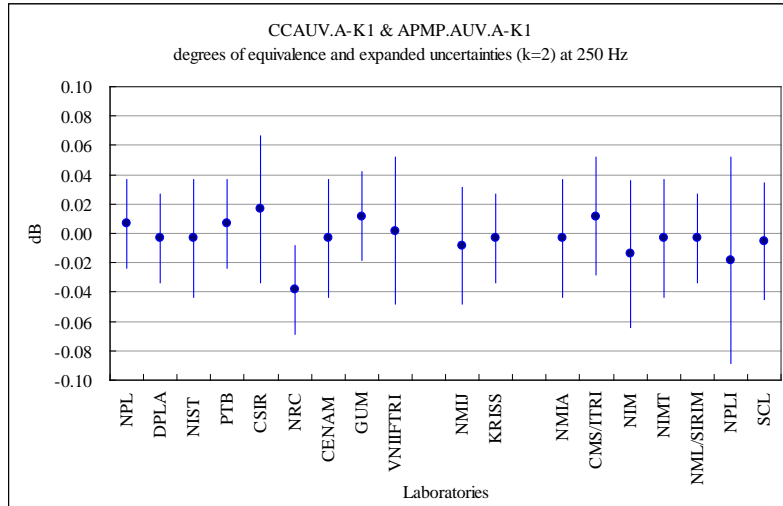


圖 8、CCAUV.A-K1 與 APMP.AUV.A-K1 連結結果 (250 Hz)

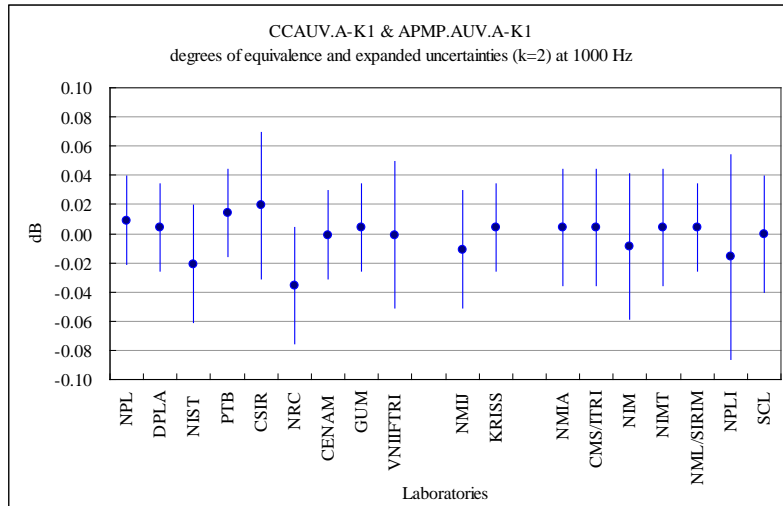


圖 9、CCAUV.A-K1 與 APMP.AUV.A-K1 連結結果 (1000 Hz)

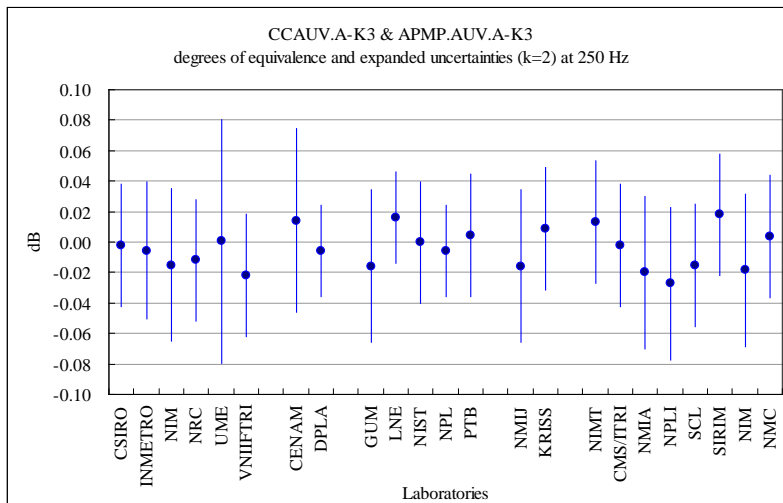


圖 10、CCAUV.A-K3 與 APMP.AUV.A-K3 連結結果 (250 Hz)

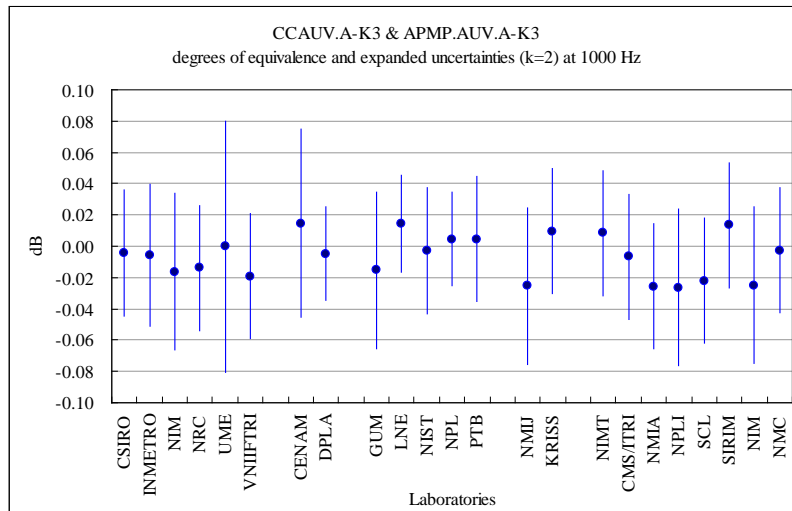


圖 11、CCAUV.A-K3 與 APMP.AUV.A-K3 連結結果 (1000 Hz)

陸、結論

由上述的結果顯示，這兩次 APMP.AUV.A 關鍵性比對的結果相當不錯，我國國家度量衡標準實驗室聲學研究室的麥克風音壓靈敏度量測能力，更在 APMP.AUV.A-K3 中脫穎而出，量測結果接近各實驗室的平均值，受到國際的肯定，其結果將連結到 CIPM CCAUV.A 中，並登錄於 CIPM CMC 中，為國內聲量量測能力建立標準追溯管道，提升產業競爭能力。

柒、參考資料

1. IEC 61094-1 Measurement Microphones - Part 1: Specifications for laboratory standard microphones, 2000.
2. IEC 61094-2 Measurement Microphones- Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique, 1993.
3. National Physical Laboratory, Report on key comparison CCAUV.A-K1, 2003.
4. Danish Primary Laboratory for Acoustics, Final Report on key comparison CCAUV.A-K3, 2006.
5. National Metrology Institute of Japan, Report on key comparison APMP.AUV.A-K1, 2006.
6. Korea Research Institute of Standards and Scienc, Report on key comparison APMP.AUV.A-K3, 2008.
7. Brüel & Kjær Product Data Sheet: Reciprocity Calibration System-Type 9699 and Type 5998.
8. Brüel & Kjær Product Data Sheet: Condenser Microphone Cartridges-Types 4160 and 4180.
9. ISO GEUM, Guide to the expression of uncertainty in measurement.
10. ISO Guide 43-1, PROFICIENCY TESTING BY Proficiency Testing by Iterlaboratory Comparison-Part 1 : Development and Operation of Proficiency Testing Schemes, 1997.
11. 麥克風音壓靈敏度校正系統評估報告—互換法 07-3-83-0068，工研院量測技術發展中心，民國 97 年。