

二氧化碳感測器之校正研究

陳加忠¹⁾ 陸慈宏²⁾

(接受刊載日期：中華民國 89 年 12 月 12 日)

摘要：二氧化碳濃度量測為植物生理量測之重要工作。為了確認其準確性，在此研究以氣體切割器配合全幅濃度氣體與零極氣體維持標準氣體環境以進行性能評估。結果顯示感測器之性能因量測範圍與使用時間而不同。兩型感測器之性能關係函數各為多項數函數與線性公式。

關鍵詞：二氧化碳感測器，氣體切割器，校正。

前 言

在氣體濃度感測中，二氧化碳濃度的量測十分重要。在工業上用以為人員工作環境與燃燒作業等安全指標，在動物生理中，做為呼吸率量測之因子。而在植物生理研究中可依據二氧化碳濃度之量測變化值以計算光合作用速率與呼吸作用速率(陳等，1998)。

商業化的二氧化碳感測器由於其作用原理，可分為如下三類：

一、電化學式：

在兩電極間維持一定的電壓差，電極間存有電解液。在二氧化碳溶入電解液內產生氧化還原反應，由此反應產生之電流量測氣體濃度。

二、固態電解質式：

利用陰、陽電極材料與固態離子導體做為電解質。待測氣體通過另一電極，由於兩極氣體濃度之不同而產生電位差，因此求得氣體濃度。

三、紅外光分析式：

利用二氧化碳對紅外光光譜中特殊波長能量之吸收能力，以換算氣體濃度。

由於紅外線分析式二氧化碳感測器具有反應快速，不參預環境之化子反應等特點，可以應用於植物生理量測在感測器的性能研究上。量測準確度為使用者關心的主題。準確度代表感測器讀出值與感測環境真空值之符合性。因此為了確認二氧化碳感測器的準確性，必須在各種標準氣體濃度環境下加以校正。

在自然環境中，二氧化碳濃度接近 350ppm。為

1) 國立中興大學農業機械工程學系教授。

2) 國立中興大學農業機械工程學系大學部四年級學生。

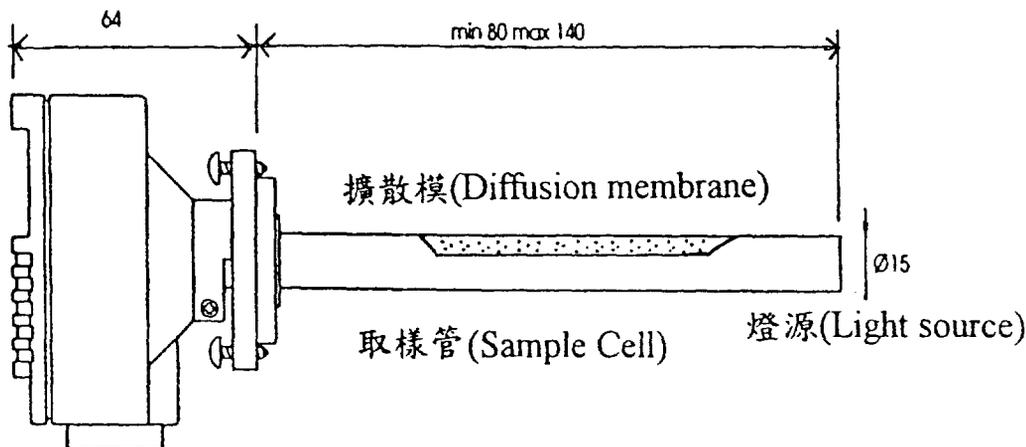
了便於在各濃度下進行校正作業。工業界採用氣體切割器 (Gas divider) 以調整不同濃度的標準氣體，國內量測中心曾進行一氧化碳感測器之校正研究 (吳等，1995；吳，1996)。

感測器製作公司在其製作過程中已進行校正作業，但是其規格說明所列舉之準確性往往未說明追溯制度，因此無法確認其性能。在此研究中，採用二氧化碳與氮氣等兩種標準氣體，用以進行二氧化碳感測器之性能評估，以確保感測器應用於植物生理量測之性能需求。

材料與方法

一、二氧化碳感測器

此研究之採用之二氧化碳感測器為芬蘭製 VaisalaGMD20 型感測器，其組成元件包括近紅外光產生光源，光源過濾鏡片，擴散膜，取樣管 (Sample cell) 與光能探測器 (detector)，其外型與尺寸如圖 1 所示。



信號處理器(Signal Transmitter)

圖 1. 二氧化碳感測器結構圖

Figure 1. Schematic of CO₂ sensor

此感測器作用原理係利用氣體的擴散作用使外界空氣之二氧化碳因擴散進入取樣管內。紅外光之光源經過過濾鏡片特定之波長 (3.5um) 通過取樣管再由光源能探測器加以量測。由於紅外光光源的吸收能量與空氣中二氧化碳濃度有一定之關係公式，利用內建於訊號傳遞器 (transmitter) 之關係函數，計算二氧化碳濃度，再以類比訊號輸出量測濃度。

此研究中以兩型感測器為性能評估對象。A 型感測器為第一代產品，量測範圍 0-2000ppm，已使用 1 年。B 型感測器有 2 只，為第二代產品，量測範圍 0-10000ppm。訊號輸出為 0-10V，需求電源為 9-26VDC。廠商於型錄上之準確性為 ±1.5%。

二、氣體切割器

為了製造不同的氣體濃度環境，檢定實驗室通

常採用質量流量控制器 (Mass flow controller) 或是氣體切割器 (Gas divider) 製作與調整氣體環境。質量流量控制器係利用不同的流速以調節兩種氣體流量，由於混合作用，可自由調整所需濃度，此方法可以彈性調節所需濃度，但是儀器結構複雜，需要定期校正，且成本昂貴。

氣體切割器將零極氣體 (zero gas) 例如純氮，與全幅氣體 (span gas, 例如 20,000ppm 二氧化碳)，依固定比例加以混合成為 10% , 20% , ...100% 等十種不同濃度。此方法便利且迅速。在此研究中採用 SGD-710C 氣體切割器，其規格如下：

1. 作業壓力：0.2-0.7 kg/cm²
2. 作業速率：2~5.0 l/min
3. 反應速率：10 sec
4. 準確性：±0.5%
5. 供應之氣體壓力：0.2-1.5 kg/cm²

氣體切割器之作用原理介紹如下：(吳等，1995；STEC，1999)。零極氣體 (純氮) 與全幅氣體 (二氧化碳) 分別進入氣體切割器內部的壓力調節室。壓力調節室的特殊設計使得裡面十根大小相同的毛細管具有相同壓力。各毛細管在壓力與管徑、長度、材質等因子完全相同情況下，內部流速也相同，因此由全幅氣體流徑毛細管數目可控制混合後的氣體濃度。

三、標準氣體

此研究所使用之氣體有二種：

1. 氮氣：純度為 99.999% ，由三福化工公司製造後，由工研院量測中心檢定。
2. 二氧化碳：濃度各為 600ppm 與 10,000ppm 。純度為 99.999% 。氣體之製作與檢定與氮氣相同。

四、校正系統

此校正系統之示意圖如圖 2。擔任全幅氣體之二氧化碳鋼瓶與擔任零極氣體之氮氣鋼瓶經由流量計與氣體切割器之入口連接。氣體切割器之出口與校正箱連結。校正箱除了出入口之外，備有感測器放置穴 (cell)，用以容納二氧化碳感測器。

五、校正程序

二氧化碳感測器之校正作業程序如下：

2. 連接完成校正系統，檢查有否氣體外洩。
3. 將氣體切割器之選擇扭至 "0" 位置，檢查流出氣體是否完全為零極氣體。
4. 調整選擇鈕至 "1" 位置，觀察二氧化碳感測器之輸出電壓值是否到達平衡，再平衡後輸出電壓。
5. 調整選擇鈕至其他位置，逐次紀錄輸出電壓，直到完成 10 個濃度環境之校正。

六、數據分析

(一) 量測關係公式

以量測所得之電壓，依感測器之輸出比例值 (例如 10000ppm = 10V)，換算為二氧化碳量測值。切割器產生之氣體濃度為標準值 (X)。以迴歸分析進行建立 $Y = f(x)$ 之關係方程式。 $f(x)$ 之適切函數 (Adequate function) 由定量值標準。估計值， s (Standard deviation of estimated values)，定性分析為殘差圖 (Residual plots)。在此研究中分別建立關係公式。各感測器之自變數 (X) 為標準值，他變數 (Y) 為讀出值，此種公式稱為直接 (Direct equation) 公式，用以比較感測器之準確性。以此種關係方程式以判別感測器準確性之比較標準為迴歸方程式之 s 值，由 s 之計算公式得知：

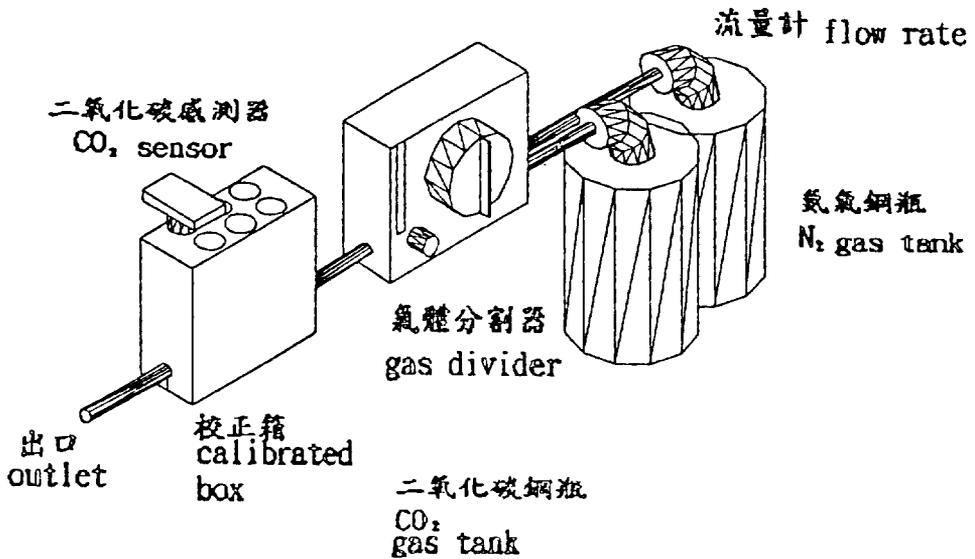


圖 2 二氧化碳校正系統示意圖

Figure 2 Schematic of calibration system for CO₂ meter

$$s = \frac{(y - \hat{y})^2}{n - p} \dots\dots\dots (1)$$

y : 感測器量測值

\hat{y} : 校正公式之預測值, $\hat{y} = f(x)$

p : 校正公式之參數數目。

X : 標準氣體濃度。

結果與討論

一、感測器之性能評估

(一)A 型感測器

1.範圍 0~2000ppm

A 型感測器之量測結果如圖 3, 以所有量測數據進行迴歸分析, 其不同之方程式結果如下: y 為感測器量測值, x 為標準值。

$$\textcircled{1} y = -35.93 + 1.091x, R^2 = 0.9827, s = 79.7 \dots\dots\dots (2)$$

(二)校正公式

以儀器讀出值 (R) 為自變數 (independent variables), 標準值 (s) 為他變數 (dependent variables), 此種方程式又稱為反置方程式 (Inverse equation), 用以改善量測性能 (Bentley, 1998), 因此也被稱為校正方程式。此方法已被應用於一氧化碳氣體感測器 (吳, 1996)。

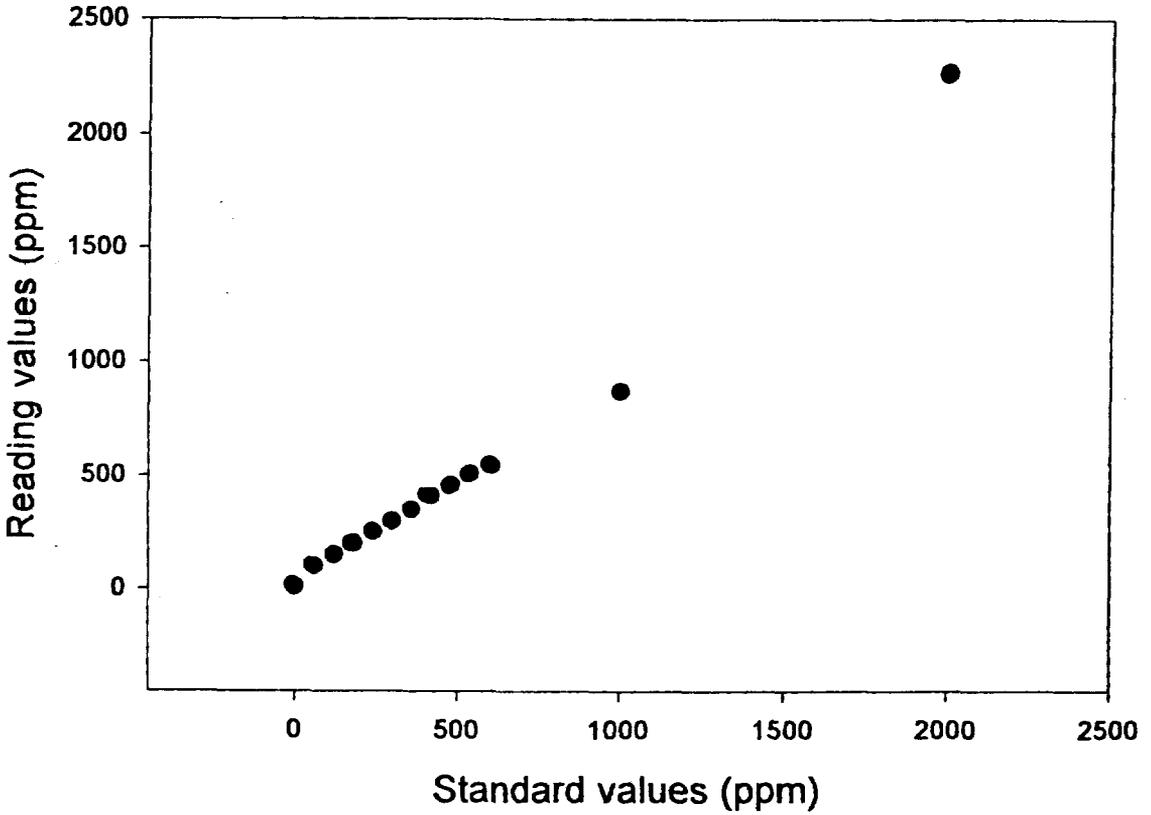


圖 3. A 型二氧化碳感測器量測值與標準值之關係 (0-2,000ppm)

Figure 3. The relationship between reading values and standard values for A-type meter (Range 0-2000 ppm)

$$\textcircled{2} y = 62.7 + 0.671x + 2.13 \times 10^{-4} x^2, \\ R^2 = 0.9992, s = 33.9 \dots\dots\dots (3)$$

$$\textcircled{3} y = 19.43 + 1.07x - 4.64 \times 10^{-4} x^2 \\ + 2.46 \times 10^{-7} x^3, \\ R^2 = 0.9998, s = 8.53 \dots\dots\dots (4)$$

在感測系統的輸出(y)與輸入(x)關係研究中主要以線性關係為主，其關係函數如下 (Bentley, 1988) :

$$y = a + Kx + N(x) \dots\dots\dots (5)$$

傳統之 $N(x)$ 為儀器檢測直線公式以外之非線性函數部份，對 $N(x)$ 均視為誤差一部份，而未加以探討。以公式(2)、(3)、(4)之比較為例。公式(2)代表對非線性部份視為誤差來源，雖然 R^2 值為 0.9827，以 F 檢定也証實有線性關係，但是其標準誤差值(s)高達 79.7ppm，為最大範圍 2000ppm 的 3.99%，已超過廠商標稱之 1.5%。而公式(4)代表最適用的關係公式其中非線性部份 $N(x)$ 以 $-4.64 \times 10^{-4} x^2 + 2.46 \times 10^{-7} x^3$ 代表，其標準誤差為 8.53ppm，代表量測範圍

之 0.43%。在公式(3)中，比公式(2)增加一個二次式 x^2 ，但其誤差仍高達 33.9ppm，為量測範圍之 1.7%。

2.A-type，範圍 0-1000ppm

量測數據之分佈如圖 4。迴歸分析的結構結果如下：

① $y = 41.41 + 0.8456x$,
 $R^2 = 0.9963, s = 13.61$ (6)

② $y = 27.4 + 0.9405x - 1.004 \times 10^{-4}x^2$,
 $R^2 = 0.9991, s = 8.62$ (7)

由此可知以關係公式檢定量測準確性，在 1000ppm 之量測範圍，其誤差值為 13.61ppm，為全部範圍的關係式，由公式(7)可知誤差可改善 8.62ppm，為量測範圍的 0.86%。

3.A-type，範圍 0-600ppm

以 0-600ppm 之量測數據進行迴歸分析，結果如下：

① $y = 33.91 + 0.8758x$,
 $R^2 = 0.9967, s = 10.35$ (8)

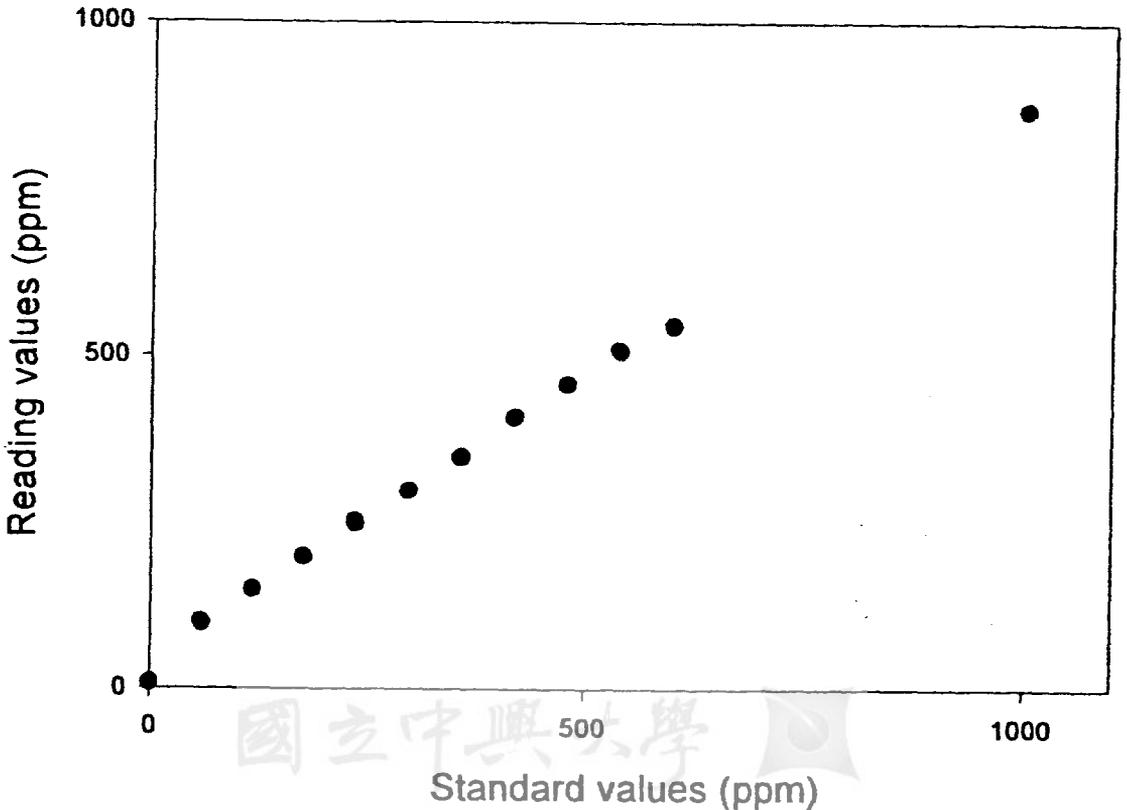


圖 4. A 型二氧化碳感測器量測值與標準值之關係 (0-1,000ppm)

Figure 4. The relationship between reading values and standard values for A-type meter (Range 0-1000ppm)

$$\textcircled{2} y = 22.97 + 0.9973x - 2.025 \times 10^{-4} x^2,$$

$$R^2 = 0.9981, s = 9.4 \dots\dots\dots (9)$$

公式(8)顯示在此範圍線性關係存在，誤差值 10.35ppm，為量測範圍的 1.72%。以二項式關係式(公式(9))有較小的誤差值($s = 9.4$)，但是改善的範圍並不大。

(二)B 型感測器

兩只感測器之性能關係如圖 5。與圖 3 比較，線性關係較顯著。

量測值與標準值之關係公式如下：

1.No. 1 感測器

$$y = 169.219 + 1.00298x_1,$$

$$R^2 = 0.9997, s = 55.8 \dots\dots\dots (10)$$

2.No.2 感測器

$$y = 100.645 + 1.00479x_2,$$

$$R^2 = 0.9999, s = 33.25 \dots\dots\dots (11)$$

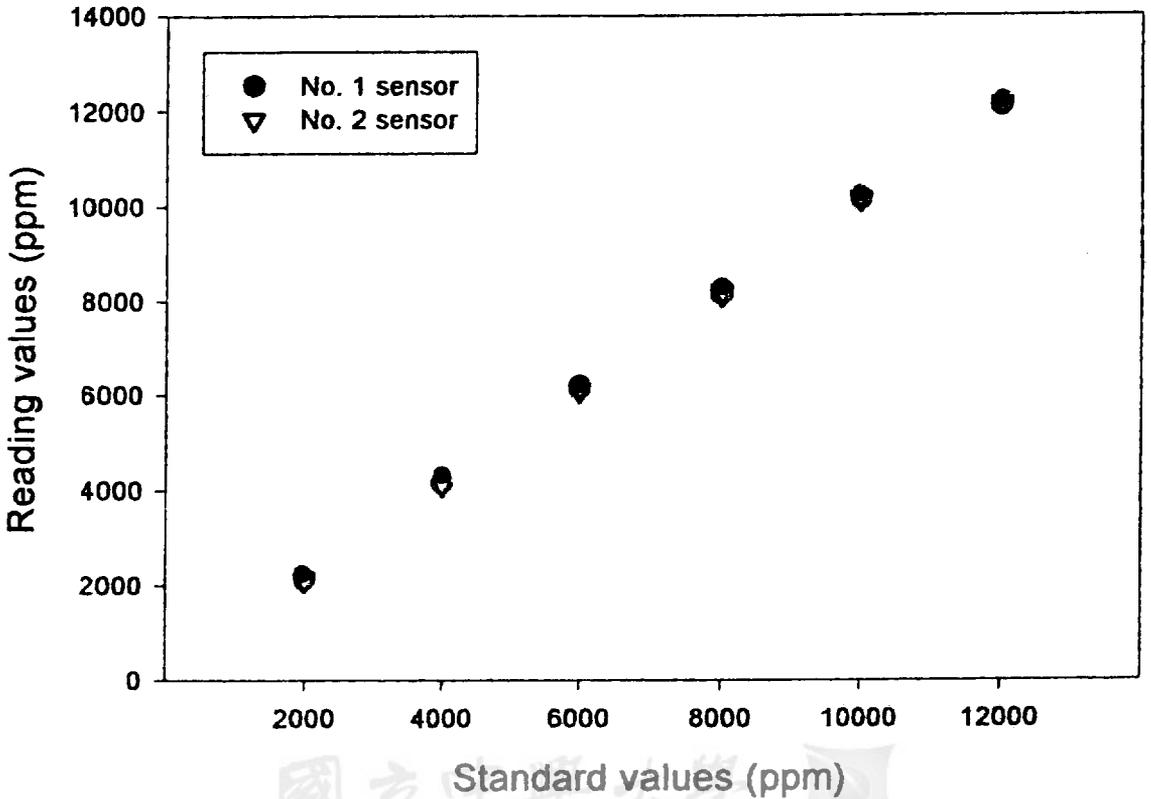


圖 5. B 型二氧化碳感測器量測值與標準值之關係(0-12,000ppm)

Figure 5. The relationship between reading values and standard values for two B-type meters (Range 0-12000ppm)

由公式(10)與(11)得知，兩只 B 型感測器有良好的線性關係，讀出值(Y)與標準值(X)之斜率均與 1.0 無顯著差異，僅在截距有顯著不同，兩只感測器的誤差值各為 55.8ppm 與 33.3ppm，在 10000ppm 的量測範圍代表 0.56% 與 0.33%誤差。由此知，B 型之感測器其性能優於 A 型。

二、感測器之校正公式

在校正公式中， x_i 為讀出值，以 R_i 代表。標準值以 S_i 代表，適切的校正公式如下：

(一)A 型感測器

1.0~2000ppm

$$S_i = -19.7 + 0.9334R + 4.603 \times 10^{-4} R^2 - 2.112 \times 10^{-7} R^3 \dots\dots\dots (12)$$

2.0~1000ppm

$$S_i = -26.04 + 1.0288R + 1.777 \times 10^{-4} R^2 \dots\dots (13)$$

3.0~600ppm

$$S_i = -37.43 + 1.1374R \dots\dots\dots (14)$$

(二)B 型感測器

1.No.1 感測器

$$S = -166.9 + 0.99674R \dots\dots\dots (15)$$

2.No.2 感測器

$$S = -99.58 + 0.9952R \dots\dots\dots (16)$$

在實際應用時，將感測器讀出值直接代入校正公式即可求得改善之量測值。

三、未來之持續研究

由上述之感測性能檢定結果，兩型感測器固使用在未來之持續研究中，應該配置更多不同濃度範圍的全幅氣體(例如 5000ppm, 15000ppm)，使標準氣體之濃度間隔更多，校正數據更多，用以執行更完善之迴歸分析。兩種感測器之性能顯著不同，未來應持續進行老化(Aging)性能檢定，建立此種紅外線式二氧化碳感測器之校正週期。

結 論

在此研究以氣體切割器配合全幅濃度氣體與零極氣體維持二氧化碳標準氣體環境以進行兩型近紅外線式二氧化碳感測器之性能評估。結果顯示感測器之性能因量測範圍與使用時間而不同。兩型感測器之性能關係函數各為多項數函數與線性公式。利用校正公式可改善量測性能。

參考文獻

1. 吳仁彰、黃金德、高明哲。1995。氣體切割器之系統評估報告。量測中心技術資料編號 07-3-85-0024。新竹：量測中心。
2. 吳仁彰。1996。氣體分析儀器及感測器的校正及不確定評估。科儀新知 18(3):15-20。
3. 陳加忠、林瑞松、陳駿季。1998。植物組織培養瓶內微氣候之量測。農林學報 47(4):77-91。
4. Bently, J.P. 1988. Principles of Measurement Systems. London: Longman Group:UK.
5. STEC Inc. 1999. Instruction Manual for SGD-710c Gas Divider. Kyoto : STEC, Inc.

Study on the Calibration of CO₂ Sensors

Chia-chung Chen¹⁾ Tze-hung Lu²⁾

(Accepted for publication: December.12. 2000)

Abstract

Carbon dioxide concentration (CO₂) measurement is an important work for the study of plant physiology. To ensure the accuracy of CO₂ sensors, the standard gas environment was set up by the gas divider, span gas and zero gas. The results indicated the performance of CO₂ sensors was affected by the measured range and operating age. The relationship of reading values and standard values for two types of sensors are the polynomial function and the linear equation.

Key Words: CO₂ sensor, Gas divider, Calibration.

1) Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, National ChungHsing University, Taichung, Taiwan.

2) Senior student, Department of Agricultural Machinery Engineering, National ChungHsing University, Taichung, Taiwan.