

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 化學科

佳作

050209

攜帶型直笛檢測器研發與呼出氣體分析

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 王郁婷	指導老師： 周芳妃
---------------	--------------

關鍵詞：直笛、聲波頻率、氣體檢測

摘要

以往呼氣分析皆是在醫院及研究單位進行，且呼氣檢測可提供診斷疾病的資訊。文獻中指出，血糖值上升則呼氣中 CO_2 濃度上升；血糖值下降則呼氣中 CO_2 濃度下降。本研究發展攜帶型直笛檢測器(簡稱 FRD)分析呼氣，採用市售直笛組合自製流速計，搭配 APP-Spectroid 測量吹入氣體聲波頻率，比對聲波頻率與分子量相關性，並加入氣體絕熱指數的校正。本研究 FRD 完成 N_2 與 CO_2 校正，得到高再現性結果，以 N_2 和 CO_2 不同比例混合氣體作為標準品，完成檢量線。人體呼氣測試以多步驟集氣袋模式排除水氣，並將測出呼氣平均分子量換算與校正得呼氣中 CO_2 濃度。本研究有效開發 FRD 並發展微小化輕便檢測器，降低檢測器成本易推廣於大眾，更能夠收集大數據促進國人醫學與健康的研究。

壹、研究動機

人體呼氣中的二氧化碳是葡萄糖代謝產生的代謝產物。文獻中指出，從呼氣中的 CO_2 濃度可得知血中葡萄糖消耗，進而得知呼氣中 CO_2 與血糖值的關係。因此本研究改良實驗室昂貴的檢測器，藉由氣體通過直笛所產生的聲音之聲波頻率找出其對應的分子量，非侵入式的檢測找出人體呼氣中 CO_2 和 O_2 所占比例，藉此找出擁有糖尿病潛在病因的人，預防疾病。

而文獻中使用哨子做為檢測器，雖然相較於直笛便宜許多，但其耐用程度相較於直笛較為脆弱，且哨子音頻較高，較為刺耳。且哨子若需發出聲音要較大的吹力，但若是老人家可能無法負荷，因此本檢測器最終採用直笛作為發聲部。

貳、研究目的

- 一、尋找合適 APP 分析吹入氣體的聲波頻率
- 二、把市售直笛組合流速計與搭配管線套件，製成直笛氣體檢測器。
 - (一) 確認檢測器精準性。
 - (二) 比對聲波頻率與氣體分子量相關性。
 - (三) 使用直笛氣體檢測器進行人體呼氣測量。
- 三、調整檢測器尺寸，發展精小不占空間的規格，以利隨身攜帶。

參、研究設備及器材

一、儀器

3D 列印機	鑽孔機
--------	-----

二、器材

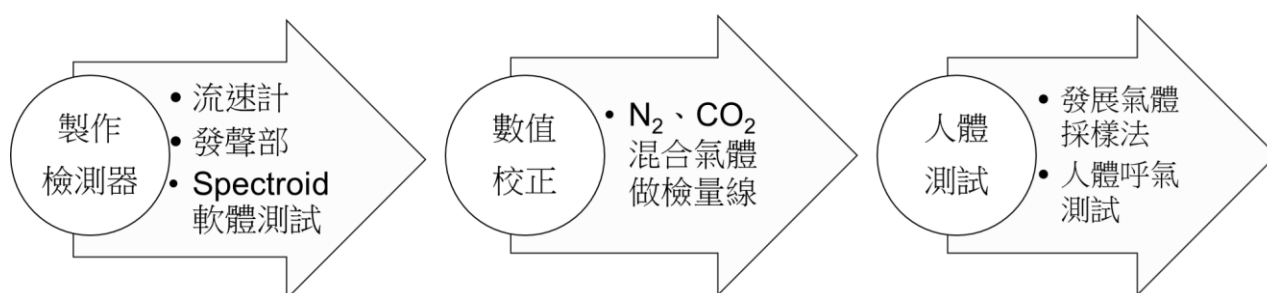
氣體鋼瓶(N ₂ 、CO ₂)	PVC 塑膠管	矽膠管
高音直笛	氣體採樣袋	針筒
保麗龍球	快乾膠	AB 膠
parafilm	貼土	PVC 絕緣膠帶

三、軟體

Spectroid 軟體

肆、研究過程或方法

一、流程圖



二、文獻探討

(一) 糖尿病與呼氣

糖尿病主要分為三種類型為，第一型糖尿病：致病原因為免疫系統攻擊破壞生產胰島素的 beta 細胞，造成 beta 細胞胰島素生產少；第二型糖尿病：致病原因為胰島素抗性，常為肥胖、年老等原因導致；妊娠性糖尿病，致病原因為懷孕激素或胰島素短缺造成，產後恢復，極大機率導致第二型糖尿病。這幾型糖尿病皆與血糖有關，人體行呼吸作用葡萄糖代謝產生二氧化碳隨著呼氣排出，當血糖值上升時，呼氣中的二氧化碳濃度也會跟著上升；而當血糖值下降時，呼氣中的二氧化碳濃度也會跟著下降。因此從呼氣中測量出二氧化碳消耗，可得知血中葡萄糖的消耗，進而得知呼氣中二氧化碳與血糖值關係。

(二) 聲波頻率與分子量關係

直笛同於哨型感測器，藉由邊稜構造產生邊稜音，而哨聲聲波頻率則是藉由空氣柱

共振所決定。其中邊稜音聲波頻率公式為：

$$F = A \cdot \frac{V}{L} \quad (\text{式一})$$

F = 邊稜音聲波頻率 A = 渦流流速與吹入氣體流速之比例常數

V = 吹入氣體流速 L = 狹縫寬度

氣體流經邊稜結構，部分因邊稜形成的渦流在閉管中形成駐波產生聲響。

其中閉管空氣柱聲波頻率公式為：

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (\text{式二})$$

f = 閉管空氣柱聲波頻率 v = 聲波速度 λ = 駐波波長

閉管空氣柱形成駐波時，管長為四分之一個波長的奇數倍，當倍數為 1 即為基頻。

其中閉管空氣柱長度與管內駐波波長關係式為：

$$L = n \left(\frac{\lambda}{4} \right) \quad (\text{式三})$$

L = 閉管空氣柱長度 n = 基頻倍數 λ = 駐波波長

聲波速度與空氣介質的關係式為：

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (\text{式四})$$

v = 聲波速度 γ = 絕熱指數 R = 理想氣體常數

T = 絕對溫度 M = 氣體分子量

綜合式二、三、四得出閉管空氣柱聲波頻率關係式為：

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}}{4L} \quad (\text{式五})$$

從式五得出，當吹入檢測器的氣體分子量愈大聲波頻率愈小；反之，分子量愈小聲波頻率愈大。從式一得出當檢測器以固定流速(V)檢測氣體，便可固定邊稜音聲波頻率(F)。因此當我們以固定流速檢測氣體，便可得出分子量(M)、氣體絕熱指數(γ)與聲波頻率(f)的對應關係。

三、研究過程

(一) 檢測器製作

1. 檢測器規格整理

FRD 直笛檢測器名稱表示法：

FRD 發聲部版本_流速計長度流速計浮球版本。例如：FRD1.0_40Ds。

表 1：FRD 直笛檢測器規格

檢測器名稱	發聲部	流速計
FRD1.0_40Ds	整段的直笛	40cm 流速計 + 3D 列印實心浮球
FRD2.0_40Ds	第一節直笛	40cm 流速計 + 3D 列印實心浮球
FRD3.0_40Ds	自製吹頭的直笛	40cm 流速計 + 3D 列印實心浮球
FRD3.0_30Ds	自製吹頭的直笛	30cm 流速計 + 3D 列印實心浮球
FRD3.0_20Ds	自製吹頭的直笛	20cm 流速計 + 3D 列印實心浮球
FRD3.0_30Dh	自製吹頭的直笛	30cm 流速計 + 3D 列印空心浮球
FRD3.0_20Dh	自製吹頭的直笛	20cm 流速計 + 3D 列印空心浮球
FRD3.0_30E	自製吹頭的直笛	30cm 流速計 + 保麗龍浮球
FRD3.0_20E	自製吹頭的直笛	20cm 流速計 + 保麗龍浮球

(1) FRD = Flute-Recorder Detector

(2) 1.0、2.0、3.0 = 發聲部的三種版本

(3) 20、30、40 = 流速計長度(單位：公分)

(4) Ds = 流速計中採 3D 列印實心(solid) 浮球

(5) Dh = 流速計中採 3D 列印空心(hollow) 浮球

(6) E = 流速計中採保麗龍(EPS)浮球

2. 製作流速計(40Ds)：

(1) 以長度 40cm、管徑為 2 cm 的塑膠管作為流速計的主體，利用保麗龍球當中的浮球，發現重量不足。

(2) 打算保麗龍球中間加上釘子以補足重量，但發現會導致重量分布不均，球會不斷旋轉，造成其餘變因。

(3) 利用 3D 列印機製作直徑為 1.8 cm 的小球，但因 3D 列印為支撐小球會製作一個基底支架，這會導致小球平面無法完全平整。

(4) 將球分為兩半列印(圖 1(A))，避免使用到支架，之後使用快乾膠將其黏緊，

便完成一顆直徑為 1.8 cm 的小球。

- (5) 打兩個直徑為 0.8 cm 的小孔於塑膠管兩端，作為氣體流入與流出的孔洞(圖 1(B))。將球放至於管中，以 3D 列印印製直徑 2cm 高 0.5cm 的圓柱用膠黏合並用 parafilm 貼住確保氣密性。
- (6) 封住管子兩側便是最終的流速計，氣體通過時小球上浮未碰到頂部，球也大約停留在一小範圍之內便是固定了流速。

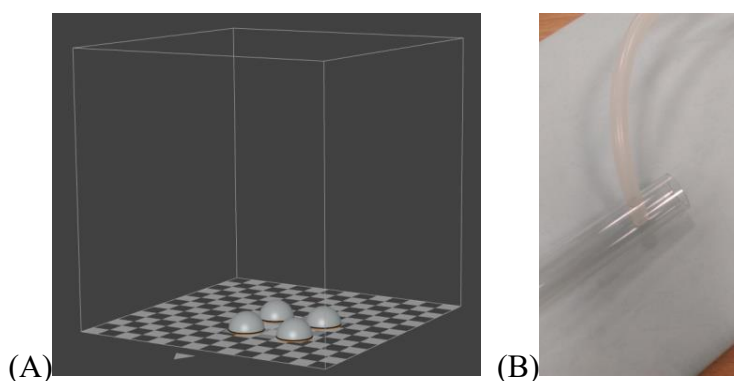


圖 1：製作流速計 (A) 3D 列印球 (B) 氣體流入與流出的孔洞

3. 製作流速計(30Ds、20Ds)：

- (1) 分別以長度 30cm 和 20cm，管徑為 1.9 cm 的塑膠管作為流速計的主體，以 3D 列印機製作直徑為 1.78cm 的小球作為中間的浮球。
- (2) 將球分為兩半列印避免使用到支架，之後使用快乾膠將其黏緊。
- (3) 打兩個直徑為 0.8 cm 的小孔於塑膠管兩端，作為氣體流入與流出的孔洞。將球放至於管中，以矽膠塞塞住塑膠管，製作出兩管流速計。

4. 製作流速計(30Dh、20Dh)：

- (1) 分別以長度 30cm 和 20cm，管徑為 1.9 cm 的塑膠管作為流速計的主體，以 3D 列印機製作直徑為 1.78cm 球壁為 0.3cm 的空心小球作為中間的浮球。
- (2) 將球分為兩半列印避免使用到支架，之後使用快乾膠將其黏緊。
- (3) 打兩個直徑為 0.8 cm 的小孔於塑膠管兩端，作為氣體流入與流出的孔洞。將球放至於管中，以矽膠塞塞住塑膠管，製作出兩管流速計。

5. 製作流速計(30E、20E)：

- (1) 分別以長度 30cm 和 20cm，管徑為 1.9 cm 的塑膠管作為流速計的主體，並以直徑為 1.8cm 的保麗龍球作為中間的浮球。
- (2) 打兩個直徑為 0.8 cm 的小孔於塑膠管兩端，作為氣體流入與流出的孔洞。將球放至於管中，以矽膠塞塞住塑膠管，製作出兩管流速計。

6. 製作發聲部 FRD1.0 版(第一代)：

- (1) 使用整段的直笛(圖 2)。
- (2) 測試搭配流速計 40Ds 和鋼瓶。
- (3) 每次實驗分別固定流速(看流速計中小球是否停留在一點)



圖 2：FRD1.0 使用整段的直笛

測試初期以不同管徑的矽膠管套接，連接上流速計上一端小孔，直笛和矽膠管連接端利用 PVC 絕緣膠帶，防止漏氣，以達成管線最佳氣密條件。

7. 製作發聲部 FRD2.0 版(第二代)：

- (1) 節省空間，直笛僅僅留下第一節
- (2) 測試搭配流速計 40Ds 和鋼瓶。
- (3) 每一次實驗皆儘量固定在同一流速(在流速計上畫線標註)(圖 3)。



圖 3：40Ds 流速計標記以固定流速

8. 製作發聲部 FRD3.0 版(第三代)：

- (1) 改變第一段直笛，切除直笛吹頭部份，用 3D 繪圖軟體繪製仿直笛吹頭，並以 3D 列印印製(圖 4)。並用貼土黏貼搭配 parafilm 確保氣密性。
- (2) 3D 列印印製直徑 2.2cm 高 0.5cm 的圓柱黏於直笛尾部。

- (3) 測試搭配流速計 40Ds 和鋼瓶。
- (4) 搭配流速計 30Ds、20Ds、30Dh、20Dh、30E、20E，氣體吹入檢測器前先蒐集於氣體採樣袋，將氣體擠出採樣袋吹入檢測器中(圖 5)。
- (5) 每一次實驗皆儘量固定在同一流速(在流速計上畫線標註)



圖 4：FRD3.0 版直笛 圖 5：FRD3.0_20Dh 測量方法

(二) 實際測試

1. 使用流速計 40Ds 時，利用手機 APP Spectroid，測量氣體通過時所發出之聲波頻率，觀察一持續明顯的線(發出聲音同分貝會隨著時間和強度在 APP 底下畫有一道格外突出的線)，其聲波頻率便是本實驗要找到的目標，記錄資料格式：氣體化學式(分子量) #編號：測量到的聲波頻率。例如：N₂(28) #03：1242Hz (圖 6)。

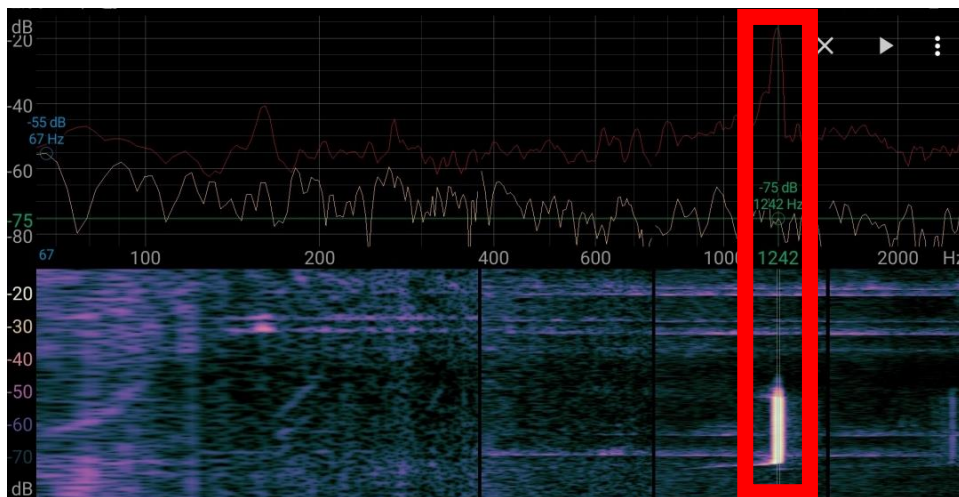


圖 6：APP Spectroid，使用流速計 40Ds 時測量氣體通過時所發出聲波頻率。

2. 使用其餘流速計(除 40Ds)搭配氣體採樣袋，利用手機 APP Spectroid，測量氣體通過時所發出之聲波頻率，以氣體採樣袋收集鋼瓶氣體，以手動擠入檢測器，開始時須利用較大流速解決小球與管壁摩擦力，因此發出聲波頻率較大，後半段氣袋中氣體少力氣減弱，聲波頻率降低，因此讀取數值需取中間段穩定的值。另外，

除了以 N₂ 和 CO₂ 測量外，也使用針筒和氣袋製造不同比例 N₂ 和 CO₂ 混合氣體，以不同分子量進行檢測器測試。如圖 7，讀取數值便是 586HZ。

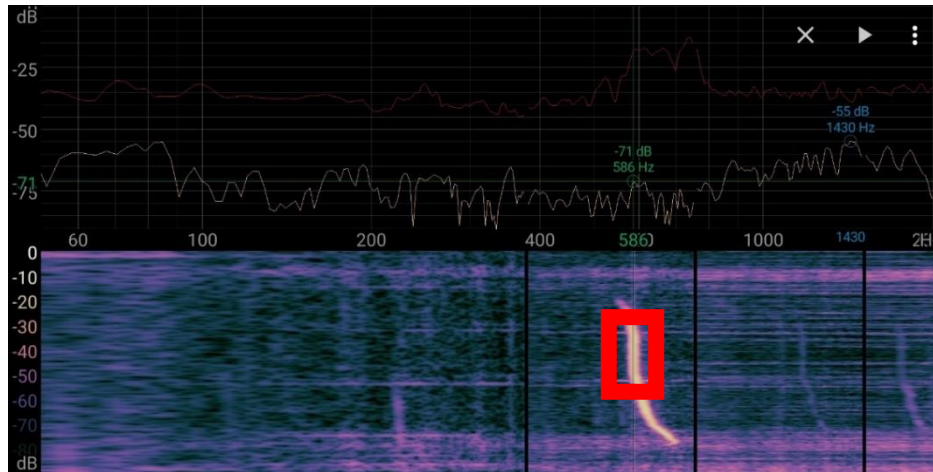


圖 7：APP Spectroid，使用其餘流速計(30Ds、20Ds、30Dh、20Dh、30E、20E)測量氣體通過時所發出之聲波頻率。

(三) 檢量線與人體呼氣測量

1. 檢量線製作：

調整氮氣和二氧化碳莫耳分率製成標準氣體，以集氣袋採集標準氣體，並用集氣袋將袋內氣體直接送入 FRD 測量。

2. 多步驟集氣袋模式：

- (1) 將氣體吹入氣袋。
- (2) 將氣袋置於冰水中，使氣袋中水氣凝結成水滴(圖 8(A))。
- (3) 連接兩個氣袋(圖 8(B))。
- (4) 將氣體以推力移置另一氣袋(圖 8(C))，水滴(水氣)會留在原氣袋，另一氣袋即內裝乾燥氣體。
- (5) 便可利用乾燥氣體氣袋(圖 8(D))配合檢測器進行實驗。





圖 8：多步驟集氣袋模式

(A)以冰水使水氣凝結於氣袋 (B)兩集氣袋以矽膠管連接

(C)以推力使氣體移至另一氣袋 (D)乾燥氣體氣袋

伍、研究結果

一、 Spectroid 軟體測量氮氣聲波頻率(FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds)

記錄資料格式：氣體化學式(分子量) #編號：測量到的聲波頻率。

表 2：FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 測量氮氣聲波頻率

氣體	FRD1.0_40Ds	FRD2.0_40Ds	FRD3.0_40Ds
N ₂ (28)	聲波頻率(Hz)	聲波頻率(Hz)	聲波頻率(Hz)
#01	1219	1570	744
#02	1230	1570	744
#03	1242	1570	744
平均值	1230	1570	744

二、 Spectroid 軟體測量二氧化碳聲波頻率(FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds)

記錄資料格式：氣體化學式(分子量) #編號：測量到的聲波頻率。

表 3：FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 測量二氧化碳聲波頻率

氣體	FRD1.0_40Ds	FRD2.0_40Ds	FRD3.0_40Ds
CO ₂ (44)	聲波頻率(Hz)	聲波頻率(Hz)	聲波頻率(Hz)
#01	1043	1312	604
#02	1078	1312	604
#03	1008	1312	604
平均值	1043	1312	604

三、 Spectroid 軟體測量健康受試者 A 呼氣聲波頻率(FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds)

測試時間：午餐後 2 小時(14:30)

健康受試者 A：17 歲女性，BMI 值 24.0

記錄資料格式：氣體#編號：測量到的聲波頻率。

表 4：FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 測量健康受試者 A 呼氣聲波頻率

氣體 人體呼氣	FRD1.0_40Ds 聲波頻率(Hz)	FRD2.0_40Ds 聲波頻率(Hz)	FRD3.0_40Ds 聲波頻率(Hz)
#01	1230	1617	721
#02	1219	1617	721
#03	1207	1617	721
平均值	1217	1617	721

四、 Spectroid 軟體測量氮氣聲波頻率(FRD3.0_30Ds、20Ds、30Dh、20Dh、30E、20E)

記錄資料格式：氣體化學式(分子量)#編號：測量到的聲波頻率。

表 5：FRD3.0_30Ds、20Ds、30Dh、20Dh、30E、20E 測量氮氣聲波頻率

氣體 N ₂ (28)	FRD3.0_ 30Ds 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 20Ds 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 30Dh 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 20Dh 聲波頻 率(Hz)	FRD3.0_ 30E 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 20E 聲波頻率 (Hz)
#01	X	X	715	609	721	691
#02	X	X	727	609	721	686
#03	X	X	721	609	721	686
平均值	X	X	721	609	721	688

五、 Spectroid 軟體測二氧化碳聲波頻率(FRD3.0_30Ds、20Ds、30Dh、20Dh、30E、20E)

記錄資料格式：氣體化學式(分子量)#編號：測量到的聲波頻率。

表 6：FRD3.0_30Ds、20Ds、30Dh、20Dh、30E、20E 測量二氧化碳聲波頻率

氣體 CO ₂ (44)	FRD3.0_ 30Ds 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 20Ds 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 30Dh 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 20Dh 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 30E 聲波頻率 (Hz)	FRD3.0_ 20E 聲波頻率 (Hz)
#01	X	X	598	715	580	568
#02	X	X	592	727	580	562
#03	X	X	598	727	580	562
平均值	X	X	596	723	580	564

30Ds、20Ds 球體無法以氣袋收集氣體推力推起，因此無法定流速蒐集氣體聲波頻率。30Dh、20Dh 球體需先以倒立流速計解決球體和管壁摩擦力，因此在每次數據上會有些許不同。20E 則因保麗龍過輕，流速計長度不足，球體會頂至管的頭部，無法定流速。因此最終以 30E 繼續量測。

六、 Spectroid 軟體測量氣體通過 FRD3.0_30E 的聲波頻率

記錄資料格式：氣體化學式(分子量)#編號：測量到的聲波頻率。

表 7：FRD3.0_30E 測量氮氣與二氧化碳的聲波頻率

氣體比例(分子量)	測試編號	聲波頻率(Hz)
75%N ₂ +25%CO ₂ (32)	#01	650
	#02	656
	#03	656
50%N ₂ +50%CO ₂ (36)	#01	621
	#02	627
	#03	621
25%N ₂ +75%CO ₂ (40)	#01	592
	#02	586
	#03	586

七、 FRD3.0_30E 測量人體呼氣的聲波頻率

記錄資料格式：氣體 #編號：測量到的聲波頻率。

測試時間：午餐後 2 小時(14:30)

健康受試者 A：17 歲女性，BMI 值 24.0

表 8：FRD3.0_30E 測量健康受試者 A 呼氣的聲波頻率

受試者 A 呼氣	FRD3.0_30E 頻率(Hz)
#01	691
#02	686
#03	686
平均	688

陸、討論

一、 APP Spectroid 使用方法與實驗數據讀取

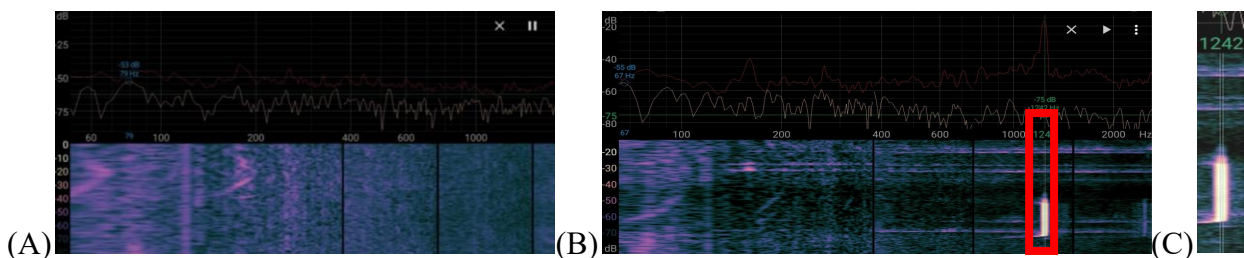


圖 9： APP Spectroid

(A)實驗場地的環境音 (B) 氣體通過測出的聲波頻率 (C)圖 9(B)紅框內放大

此研究使用 Spectroid 作為測試工具之一，在圖 9 中記錄了在實驗場所沒有在進行測試時所量測到的環境聲波頻率，並未發現有特殊的聲音或雜音，因此不影響之後實驗。在圖的下半顏色顯現出當下所有聲音的強度、位置則代表聲波頻率，上半則是記錄波形，橫軸為聲波頻率、縱軸為分貝。

圖 9(A)與(B)對比後，(B)下半多出一道較亮的直線如(C)，且直笛吹出的聲音應為一道同聲波頻率且持續一段時間的聲音，為直笛所發出聲波頻率留下的紀錄。之後點一下手機螢幕，會出現一道輔助的綠線，將此線移至那道較亮的直線中間，讀取聲波頻率並記錄，便是此氣體通過直笛時所發出的聲波頻率。以(B)為例，此圖讀取數值是 1242Hz。

二、 實驗結果討論

(一) 檢測器發聲部測量再現性探討：

根據表 2、表 3 比較氣體性質與發聲度頻率的關係如圖 10。

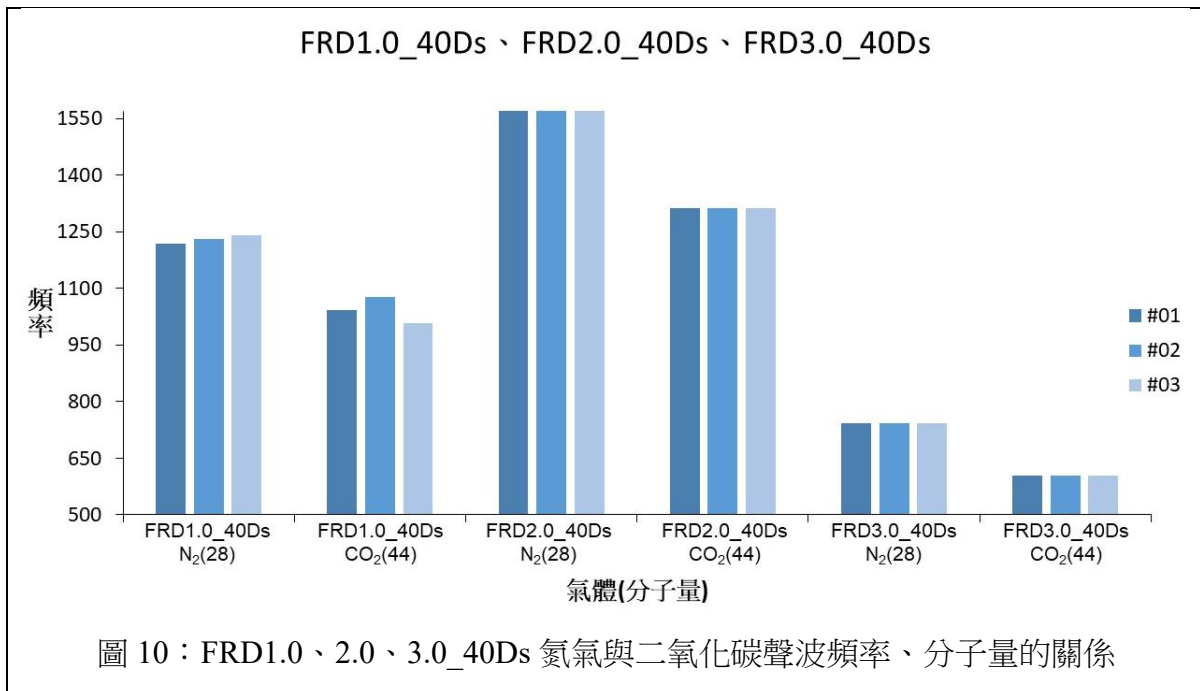


圖 10：FRD1.0、2.0、3.0_40Ds 氮氣與二氧化碳聲波頻率、分子量的關係

為了找出適當的檢測器發聲部，本研究開發出了三種發聲部搭配 40Ds 流速計，並利用 N₂、CO₂ 測量其聲波頻率，測試精準性。

從圖 10 可以看到，第一代實驗(FRD1.0_40Ds)實驗數據無法分別在氮氣與二氧化碳之中找出一個固定標準值，但可以看出其大致符合公式：聲波頻率與分子量呈負相關。而本研究推測導致數據誤差原因，應是為第一版本發聲部使用整段高音直笛，採用大管接小管作為連接方式，聲波傳遞較遠易造成誤差，導致每次量測數據不同，因而開發出 FRD2.0_40Ds。

第二代實驗(FRD2.0_40Ds)實驗數據中可以看出精準性，第二代發聲部僅採取高音直笛第一部分，雖然體積已不大，但由於一樣使用大管接小管的方法，為了美觀性以及更易於攜帶與組裝，最後決定製作第三代實驗 FRD3.0_40Ds。

圖 10 中第三代發聲部(FRD3.0_40Ds)的 N₂、CO₂ 測量結果，三次相同測試可以得到精確數字，利用 3D 列印製作自製吹頭連接高音直笛，有了精準性，同時也解決了美觀性的不足。因此在每次實驗都皆有相同流速下，同一分子量氣體通過檢測器所測得聲波頻率一致，因此在同分子量、流速一致的狀況下，所發出聲波頻率也會一致。文獻中提出一空氣柱聲波頻率的公式：

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}}{4L}$$

從 FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 測試結果也都證實此公式，且分子量愈大聲波頻率也隨之愈低。

(二) FRD3.0_40E 檢量線製作：

1. 混合氣體(Mixture)濃度與分子量：

- (1) Mixture 1 = 100% N₂ + 0% CO₂ ， M₁ = 28
- (2) Mixture 2 = 75% N₂ + 25% CO₂ ， M₂ = 32
- (3) Mixture 3 = 50% N₂ + 50% CO₂ ， M₃ = 36
- (4) Mixture 4 = 25% N₂ + 75% CO₂ ， M₄ = 40
- (5) Mixture 5 = 0% N₂ + 100% CO₂ ， M₅ = 44

2. FRD3.0_30E 檢量線

基頻：設定為 500Hz。計算聲波頻率變化分率的方式如下：

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (\text{式六})$$

$\Delta f / f_0$ = 聲波頻率變化分率 ， f = 測量到的聲波頻率 ， f_0 = 基頻

整合表 5、表 6、表 7 的 FRD3.0_30E 數據，依據氣體不同分子量(M)所測得的平均聲波頻率(f)再計算聲波頻率變化分率($\Delta f / f_0$)，將氣體絕熱指數(γ)依氣體莫耳分率計算求出。將(γ / M)值及其平方根整理成表 9，也做出檢量線如圖 11。

表 9：計算聲波頻率對應 $\sqrt{\gamma / M}$ 以製作檢量線

編號	M	f	$\Delta f / f_0$	X(CO ₂ 比例)	γ	γ / M	$\sqrt{\gamma / M}$
M ₁	28	721	0.442	0	1.4000	0.050000	0
M ₂	32	654	0.308	0.25	1.3725	0.042891	0.207101
M ₃	36	623	0.246	0.5	1.3450	0.037361	0.19329
M ₄	40	588	0.176	0.75	1.3175	0.032938	0.181487
M ₅	44	580	0.160	1	1.2900	0.029318	0.171226

γ 計算方法： $1.29 * X + 1.4 * (1 - X)$

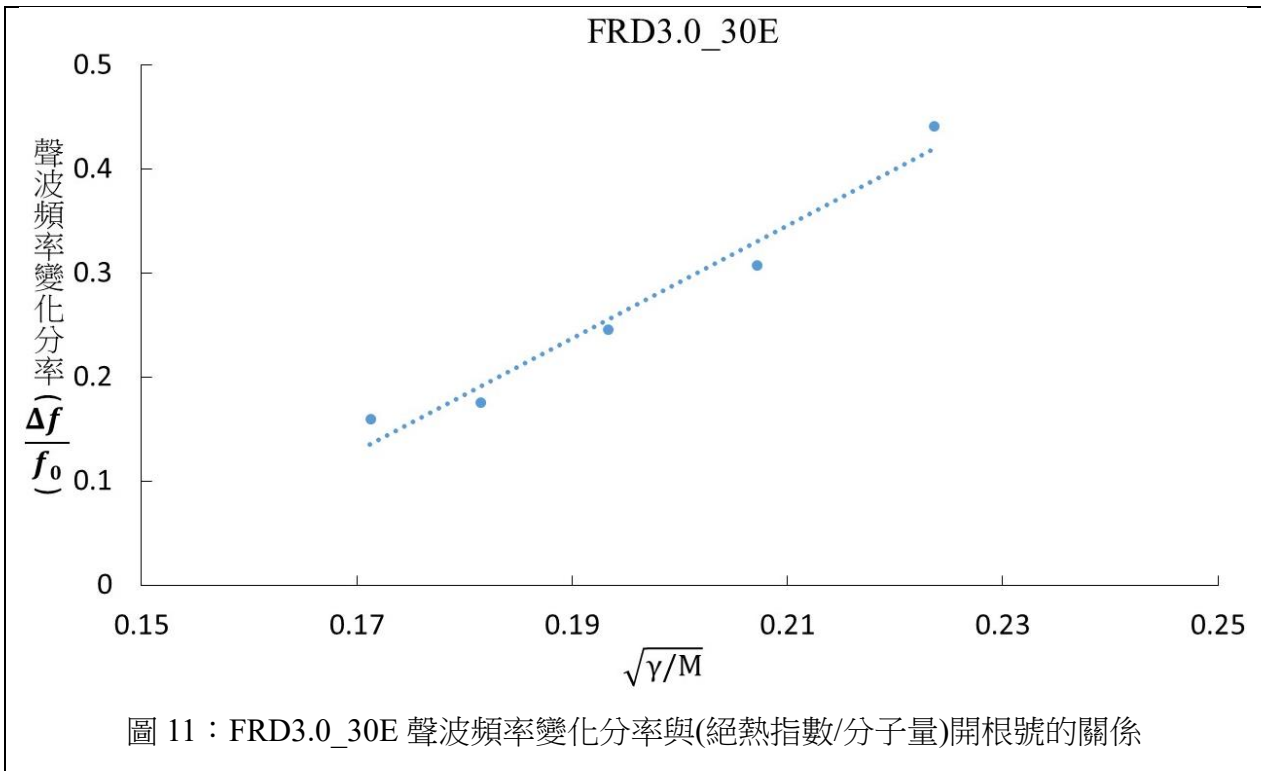


圖 11：FRD3.0_30E 聲波頻率變化分率與(絕熱指數/分子量)開根號的關係

在實驗 FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 中由氣體直接吹入檢測器進行測量，但發現測試次數增大且連續後，呼氣中水氣會累積於管內影響數據，因而想到利用氣體採樣袋蒐集氣體後再進行測試，能夠初步降低氣體中水氣含量，使水氣不會於流速計內凝結成水滴。但因採樣袋須以人工擠氣體入流速計，導致其流速不足以推動 40Ds 中的球而製作出 30E。但在混合氣體測試(分子量 32、36、40)時，發現數據有些偏移，應為配製混合氣體時，每次以針筒抽取氣體，目測刻度產生些許誤差，導致所配氣體不完全一致。在 FRD3.0_30E 實驗中，用不同濃度 CO₂、N₂ 配置氣體，測量分子量 28、32、36、40、44 的聲波頻率，所得數據取平均值經整理後如圖 11，呈現負相關，符合文獻中所提分子量愈大聲波頻率愈小。

(三) FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 人體呼吸聲波頻率與分子量探討

表 12：FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds 量測健康受試者 A 呼氣聲波頻率

健康受試者 A 呼氣	FRD1.0_40Ds 聲波頻率(Hz)	FRD2.0_40Ds 聲波頻率(Hz)	FRD3.0_40Ds 聲波頻率(Hz)
#01	1230	1617	721
#02	1219	1617	721
#03	1207	1617	721
平均值	1217	1617	721

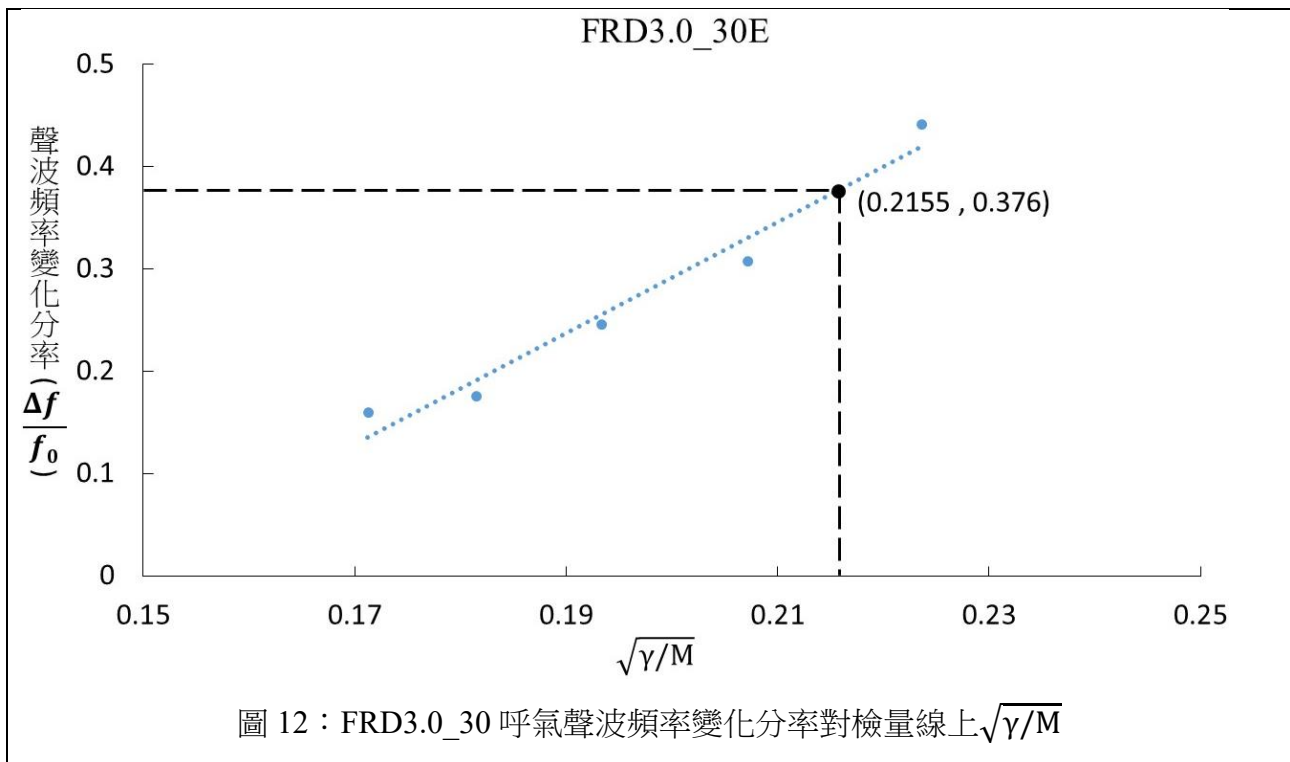
經由 FRD1.0_40Ds，在二氧化碳與氮氣測試當中無法得到準確數據，但其一樣分子量所測聲波頻率還是有在一個小範圍內，所以此實驗還是有參考性。人體呼氣大多為氮氣，因此呼氣數據會接近氮氣的數據，而 FRD1.0_40Ds 證實了這點。

健康人體呼氣中氮氣所占比例大約有 78%，二氧化碳濃度 4%、氧氣 13-16%，所以呼氣分子量經計算後應會大於氮氣之分子量，但 FRD2.0_40Ds 實驗測得聲波頻率卻是呼氣聲波頻率大於氮氣聲波頻率，不符前述所提到的氣體分子量愈大聲音聲波頻率也隨之愈低。推測原因為氣體測試器無法有效阻隔水氣，在前面經過多次測量後，水氣集中於流速計內，進而導致實驗中所測到氣體大多為水氣，且水氣分子量約為 18，小於氮氣 28，因此聲波頻率會大於氮氣的聲波頻率。因人體呼氣所產生之聲波頻率相對於氮氣與二氧化碳所產生之數值並不正確，於是開發出多步驟集氣袋，排出水氣減少誤差。

在 FRD3.0_40Ds 實驗中，證實人體呼氣數據會接近氮氣的數據，且界於二氧化碳與氮氣之間，符合文獻中所提：氣體通過直笛後發出聲音之聲波頻率與氣體之分子量相關，分子量愈大聲波頻率也隨之愈低。但人體的每次呼氣中，二氧化碳與氧氣比例應該會有些許不同，但在 FRD3.0_40Ds 實驗中並未顯現，推測原因為剛好在那段時間的人體呼氣中二氧化碳與氧氣比例十分接近，或剛好每次呼氣中的水氣也產生了變化，導致結果並無法完全精準。綜合這些產生誤差的現象，進一步研發採用多步驟集氣袋模式。

(四) FRD3.0_30E 人體呼氣聲波頻率與二氧化碳含量探討

由表 8 數據 FRD3.0_30E 測量健康受試者 A 呼氣的聲波頻率為 688Hz，再計算聲波頻率變化分率($\Delta f/f_0$)值為 0.376，對照圖 11 檢量線可找到絕熱指數對分子量比值的平方根($\sqrt{\gamma/M}$)值為 0.2155，如圖 12 所示。



為了探討呼氣中 CO₂ 濃度，下列表 13、表 14 為模擬各種呼氣成份所計算的平均分子量(M)、絕熱指數(γ)及兩者比值的平方根($\sqrt{\gamma/M}$)值。

表 13(A)、(B)：乾燥呼氣 $\sqrt{\frac{\gamma}{M}}$ 模擬計算(一)

(A)

編號	乾燥空氣莫耳分率			乾燥呼氣成分變化與莫耳分率			乾燥呼氣 平均分子量
	N ₂	Ar	O ₂	T%	O ₂	CO ₂	
1	0.78	0.01	0.21	0	0.21	0	28.960
2	0.78	0.01	0.21	10%	0.189	0.021	29.212
3	0.78	0.01	0.21	20%	0.168	0.042	29.464
4	0.78	0.01	0.21	30%	0.147	0.063	29.716
5	0.78	0.01	0.21	40%	0.126	0.084	29.968
6	0.78	0.01	0.21	50%	0.105	0.105	30.220
7	0.78	0.01	0.21	60%	0.084	0.126	30.472
8	0.78	0.01	0.21	70%	0.063	0.147	30.724

T%：吸入體內氧氣變成 CO₂ 的轉換率

(B)

編號	平均分子量	γ	$\frac{\gamma}{M}$	$\sqrt{\frac{\gamma}{M}}$
1	28.960	1.40270	0.048436	0.220081
2	29.212	1.40039	0.047939	0.218949
3	29.464	1.39808	0.047450	0.217831
4	29.716	1.39577	0.046970	0.216726
5	29.968	1.39346	0.046498	0.215635
6	30.220	1.39115	0.046034	0.214556
7	30.472	1.38884	0.045578	0.213489
8	30.724	1.38653	0.045129	0.212435

γ 計算方法： $1.4*0.78+1.67*0.01+1.4*0.21*(1-T\%)+1.29*0.21*T\%$

表 14(A)、(B)：乾燥呼氣 $\sqrt{\frac{\gamma}{M}}$ 模擬計算(二)

(A)

編號	乾燥空氣莫耳分率			乾燥呼氣成分變化與莫耳分率			乾燥呼氣
	N ₂	Ar	O ₂	T%	O ₂	CO ₂	平均分子量
1	0.78	0.01	0.21	35%	0.1365	0.0735	29.8420
2	0.78	0.01	0.21	36%	0.1344	0.0756	29.8672
3	0.78	0.01	0.21	37%	0.1323	0.0777	29.8924
4	0.78	0.01	0.21	38%	0.1302	0.0798	29.9176
5	0.78	0.01	0.21	39%	0.1281	0.0819	29.9428
6	0.78	0.01	0.21	40%	0.1260	0.0840	29.9680
7	0.78	0.01	0.21	41%	0.1239	0.0861	29.9932
8	0.78	0.01	0.21	42%	0.1218	0.0882	30.0184
9	0.78	0.01	0.21	43%	0.1197	0.0903	30.0436
10	0.78	0.01	0.21	44%	0.1176	0.0924	30.0688
11	0.78	0.01	0.21	45%	0.1155	0.0945	30.0940

T%：吸入體內氧氣變成 CO₂ 的轉換率

(B)

編號	平均分子量	γ	$\frac{\gamma}{M}$	$\sqrt{\frac{\gamma}{M}}$
1	29.8420	1.394615	0.046733	0.216179
2	29.8672	1.394384	0.046686	0.216070
3	29.8924	1.394153	0.046639	0.215961
4	29.9176	1.393922	0.046592	0.215852
5	29.9428	1.393691	0.046545	0.215743
6	29.9680	1.393460	0.046498	0.215635
7	29.9932	1.393229	0.046451	0.215526
8	30.0184	1.392998	0.046405	0.215418
9	30.0436	1.392767	0.046358	0.215310
10	30.0688	1.392536	0.046312	0.215201
11	30.0940	1.392305	0.046265	0.215093

γ 計算方法： $1.4*0.78+1.67*0.01+1.4*0.21*(1-T\%)+1.29*0.21*T\%$

聲波頻率轉得出呼氣二氧化碳濃度處理方式(以受試者 A 呼氣聲波頻率計算)：

1. 測量呼氣頻率，受試者 A 人體呼氣平均聲波頻率為 688Hz。
2. 呼氣聲波頻率換算成呼氣聲波頻率變化分率為 0.376。
3. 對上 FRD3.0_30E 減量線，得出 $\sqrt{\gamma/M}$ 為 0.2155。
4. 分析乾燥空氣，進行模擬計算。
5. $\sqrt{\gamma/M}=0.2155$ ，對上模擬計算表，分子量 M 約為 29.9932，二氧化碳體積百分濃度約為 8.6%，吸入體內氧氣變成二氧化碳的轉換率約為 41%。

柒、結論

一、結論

(一) 使用手機 APP Spectroid，進行頻率量測。環境音不影響實驗。

(二) 自製笛子檢測器(FRD)功能特性

1. 在同分子量且流速一致的狀況下，經過測量確認所發出聲音的頻率也會一致。
2. 分子量愈大頻率愈低；反之，分子量愈小頻率愈高。
3. 以氮氣和二氧化碳不同比例混合氣體完成對應頻率的檢量線。

(三) 人體呼氣與聲波頻率

1. 健康人體呼氣與氮氣發出之頻率相近或相等。
2. 以多步驟集氣袋模式收集氣體排除水氣所造成的凝結干擾。
3. 測試人體呼氣得出吸入體內氧氣轉換為二氧化碳轉換率。本研究測得受試者 A 呼氣之 CO₂ 體積百分比為 8.6%。

(四) 檢測器大小適合放置於家中，也可隨身攜帶，方便大眾於自行收集數據，頻率測量也只需使用幾乎人手一支的手機下載 Spectroid 軟體及可。

(五) 本研究發展攜帶型檢測器，方便病患在家進行長時間追蹤，精簡昂貴氣體檢測器，較易推廣於大眾，更能夠收集大數據促進國人醫學與健康的研究。

捌、參考資料及其他

一、應用

- (一) 適宜的大小，所需空間小。
- (二) 親民的成本，檢測器更能夠居家化、普及化。
- (三) 放置於家中可收集數據，讓糖尿病病患能夠進行長時間的追蹤。
- (四) 非侵入式的檢測，協助疾病預防。

二、未來展望

- (一) 正常人體飯前飯後或運動前後呼氣中 CO₂ 濃度變化。
- (二) 應用測試正常人與糖尿病病患呼出之氣體，做為預防醫學的工具。

三、參考資料

(一) 手機 APP Spectroid :

https://play.google.com/store/apps/details?id=org.intoorbit.spectrum&hl=zh_TW

(二) 中文參考資料 :

1. 林震煌, 笛之音響學, 初版, 林震煌出版, 100 頁, 2019
2. 吳羅賢碩士論文;林震煌教授指導, 2019,開發以 LabVIEW 程式控制的攜帶型氣體感測裝置之研究
3. 郭家瑀碩士論文;林震煌教授指導, 2019,以 Figaro 二氧化碳感測器監測新舊榕樹葉在不同溫度下之呼吸速率
4. 絕熱指數 :

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%BB%9D%E7%83%AD%E6%8C%87%E6%95%B0>

(三) 英文參考資料：

1. Galassetti, P. R.; Novak, B.; Nemet, D.; Rose-Gottron, C.; Cooper, D. M., 2005, Meinardi, S.; Newcomb, R.; Zaldivar, F.; Blake, D. R., Breath Ethanol and Acetone as Indicators of Serum Glucose Levels: An Initial Report. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 7 (1), 115-123.
2. Ming-Ju Wu, Guan-Fu Ye, Ching-Hao Wang, Hong-Ting Victor Lin, Chien-Chung Chen, Cheng-Huang Lin* *Analytical Sciences*, 2017, The use of a gas chromatography/milli-whistle technique for the on-line monitoring of ethanol production using microtube array membrane immobilized yeast cells, 33, 625.
3. Yi-San He, Guan-Fu Jhen, Chien-Hung Lin, Min-Tsung Lin, Chien-Chung Chen and Cheng-Huang Lin, *Anal. Chem*, 2013, Use of an Accelerometer and a Microphone as Gas Detectors in the Online Quantitative Detection of Hydrogen Released from Ammonia Borane by Gas Chromatography, 85, 3303–3308.

【評語】 050209

本研究發展攜帶型直笛檢測器分析呼氣中 CO₂ 濃度與血糖的關連。深具臨床實用價值，頗值得進一步探討。然需要有更多的例子來支持呼氣中 CO₂ 與血中糖濃度的正關連，另外可參考其他聲波頻率的檢測方法，例如光聲(Photoacoustic) 檢測紅外線吸收法，是否有機會進一步提升檢測的靈敏度與正確性。

簡介

血糖值上升則呼氣中CO₂濃度上升；血糖值下降則呼氣中CO₂濃度下降。本研究發展攜帶型直笛檢測器(簡稱FRD)分析呼氣，採用市售直笛組合自製流速計，搭配APP-Spectroid測量吹入氣體聲波頻率，比對聲波頻率與分子量相關性，並加入氣體絕熱指數的校正。本研究FRD完成N₂與CO₂校正，得到高再現性結果，以N₂和CO₂不同比例混合氣體作為標準品，完成檢量線。人體呼氣測試以多步驟集氣袋模式排除水氣，並將測出呼氣平均分子量換算與校正得呼氣中CO₂濃度。本研究有效開發FRD並發展微小化輕便檢測器，降低檢測器成本易推廣於大眾，更能夠收集大數據促進國人醫學與健康的研究。

目的

- 一. 尋找合適APP分析吹入氣體的聲波頻率。
- 二. 把市售直笛組合流速計與搭配管線套件，製成直笛氣體檢測器。
 1. 確認檢測器精準性。
 2. 比對聲波頻率與氣體分子量相關性。
 3. 使用直笛氣體檢測器進行人體呼氣測量。
- 三. 調整檢測器尺寸，發展精小不占空間的規格，以利隨身攜帶。

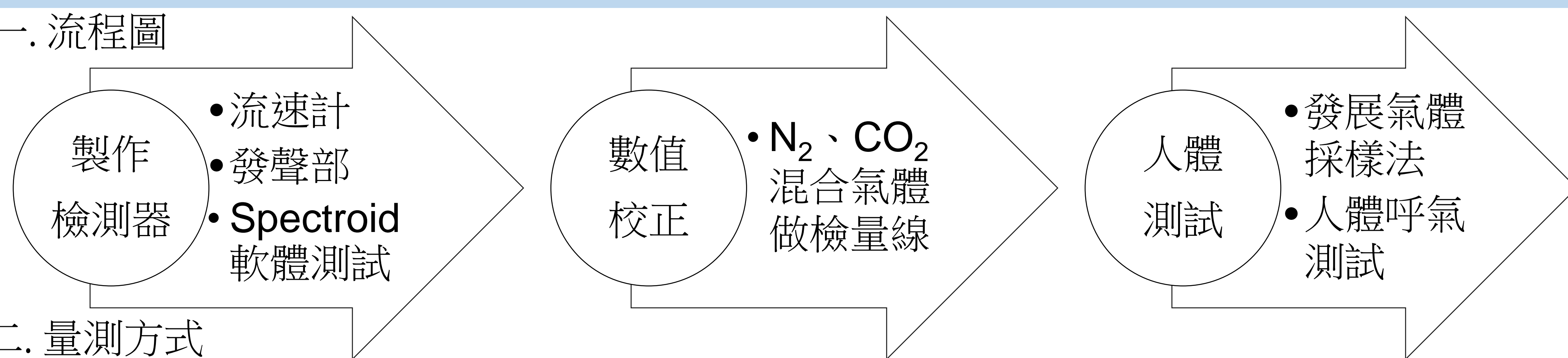
研究器材及方法

研究器材及設備

3D列印機	鑽孔機	N ₂ 、CO ₂ 氣體鋼瓶	氣體採樣袋	PVC塑膠管
Spectroid軟體	高音直笛	O ₂ 氣體鋼瓶	矽膠管	針筒
Parafilm	絕緣膠帶	快乾膠	貼土	保麗龍球

方法

一. 流程圖



二. 量測方式

1. 直笛發聲原理

直笛發聲頻率包含邊稜音頻率及閉管空氣柱聲波頻率(f)。當直笛固定流速檢測氣體可固定邊稜音頻率，因此利用閉管空氣柱聲波頻率得出分子量與頻率的對應關係。閉管空氣柱聲波頻率與分子量關係如下：

$$f = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{4L} = \frac{\sqrt{\gamma RT}}{4L} M$$

f = 閉管空氣柱聲波頻率 V = 聲波速度
 λ = 駐波波長 L = 閉管空氣柱長度 γ = 絕熱指數
 T = 絕對溫度 R = 理想氣體常數 M = 氣體分子量

2. 製作檢測器

FRD檢測器連接氣體鋼瓶(以口將呼氣吹入流速計中)，或連接氣體採樣袋。氣體通過發聲部，配合手機軟體 Spectroid，量測不同氣體通過發聲部之聲波頻率。



圖1 FRD3.0_40Ds

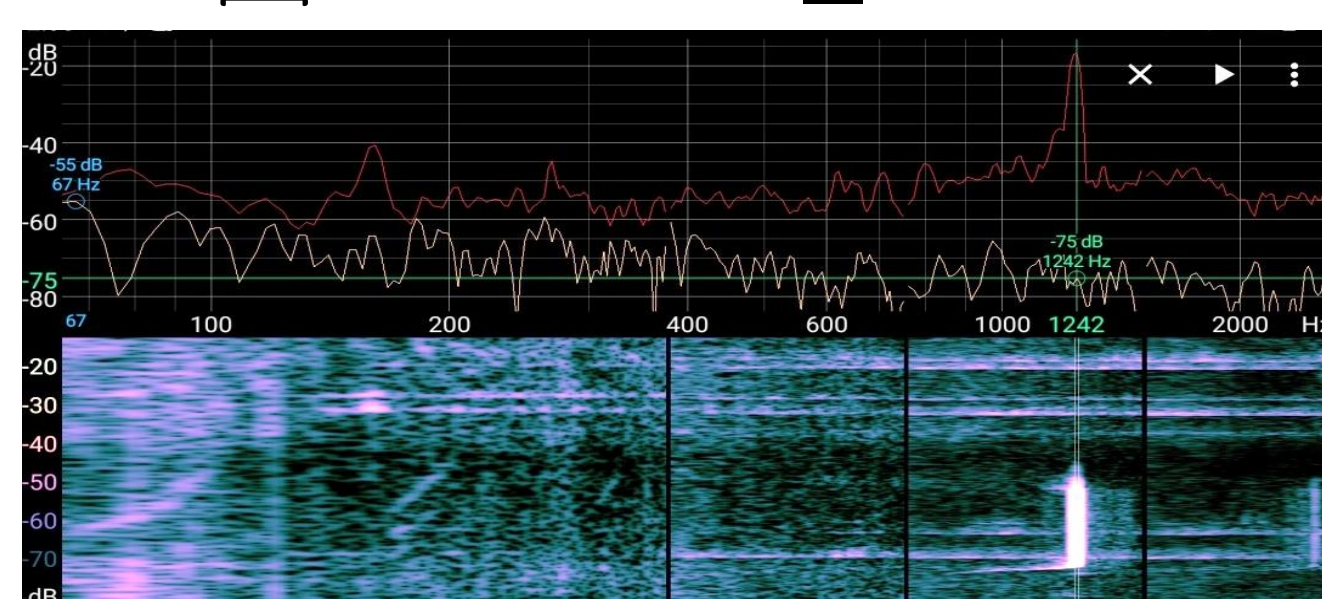


圖2 Spectroid測量N₂頻率

表 1 Flute-Recorder Detector 笛子檢測器(簡稱FRD)規格

檢測器名稱	發聲部	流速計
FRD1.0_40Ds	整段的直笛	40cm流速計 + 3D列印實心浮球
FRD2.0_40Ds	第一節直笛	40cm流速計 + 3D列印實心浮球
FRD3.0_40Ds	自製吹頭的直笛	40cm流速計 + 3D列印實心浮球
FRD3.0_30Ds	自製吹頭的直笛	30cm流速計 + 3D列印實心浮球
FRD3.0_20Ds	自製吹頭的直笛	20cm流速計 + 3D列印實心浮球
FRD3.0_30Dh	自製吹頭的直笛	30cm流速計 + 3D列印空心浮球
FRD3.0_20Dh	自製吹頭的直笛	20cm流速計 + 3D列印空心浮球
FRD3.0_30E	自製吹頭的直笛	30cm流速計 + 保麗龍浮球
FRD3.0_20E	自製吹頭的直笛	20cm流速計 + 保麗龍浮球

3. 數值校正與人體測試

以氣體採樣袋收集氣體後，經冷凝使水氣凝結，以管線將剩餘氣體移至另一氣袋，之後以手壓使氣體通過FRD檢測器流速計和發聲部，並以Spectroid測量頻率並記錄。

圖3 以N₂與CO₂混合氣體進行數值校正

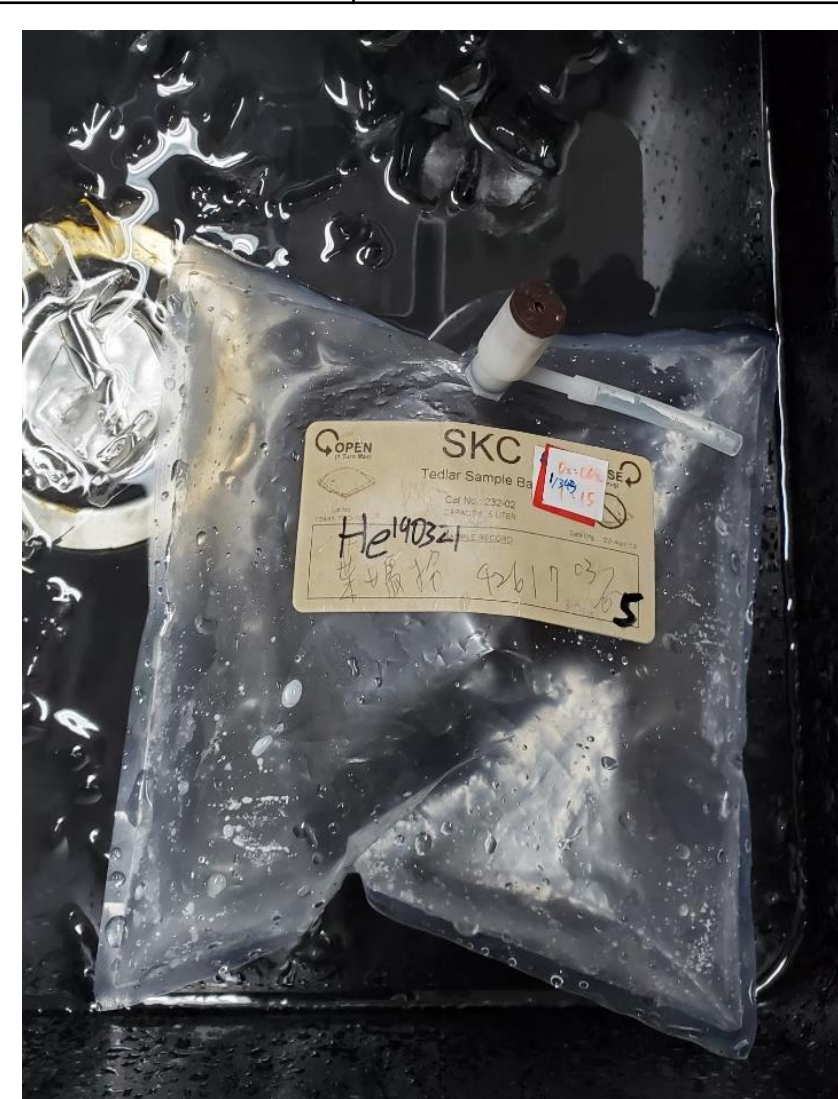


圖4 氣袋冷凝

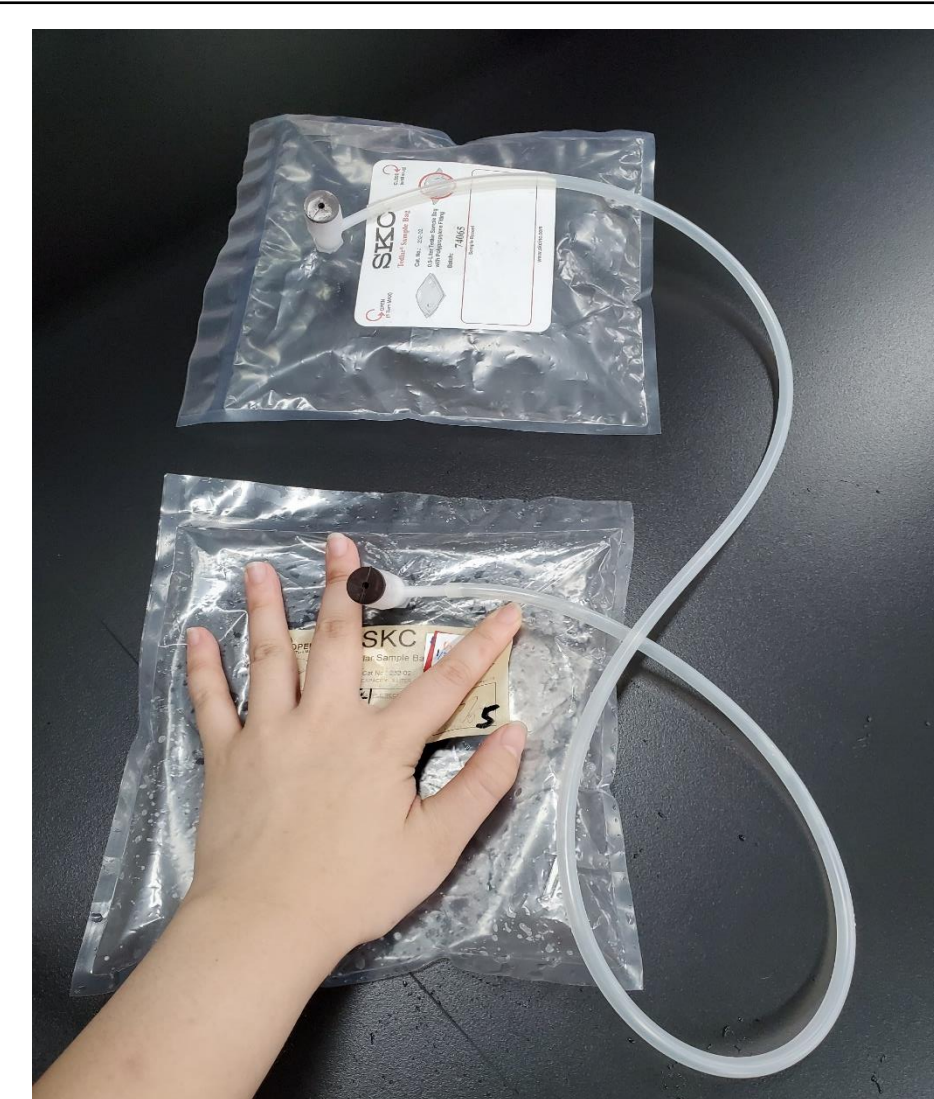


圖5 乾燥氣體轉移

結果與討論

FRD訊號再現性

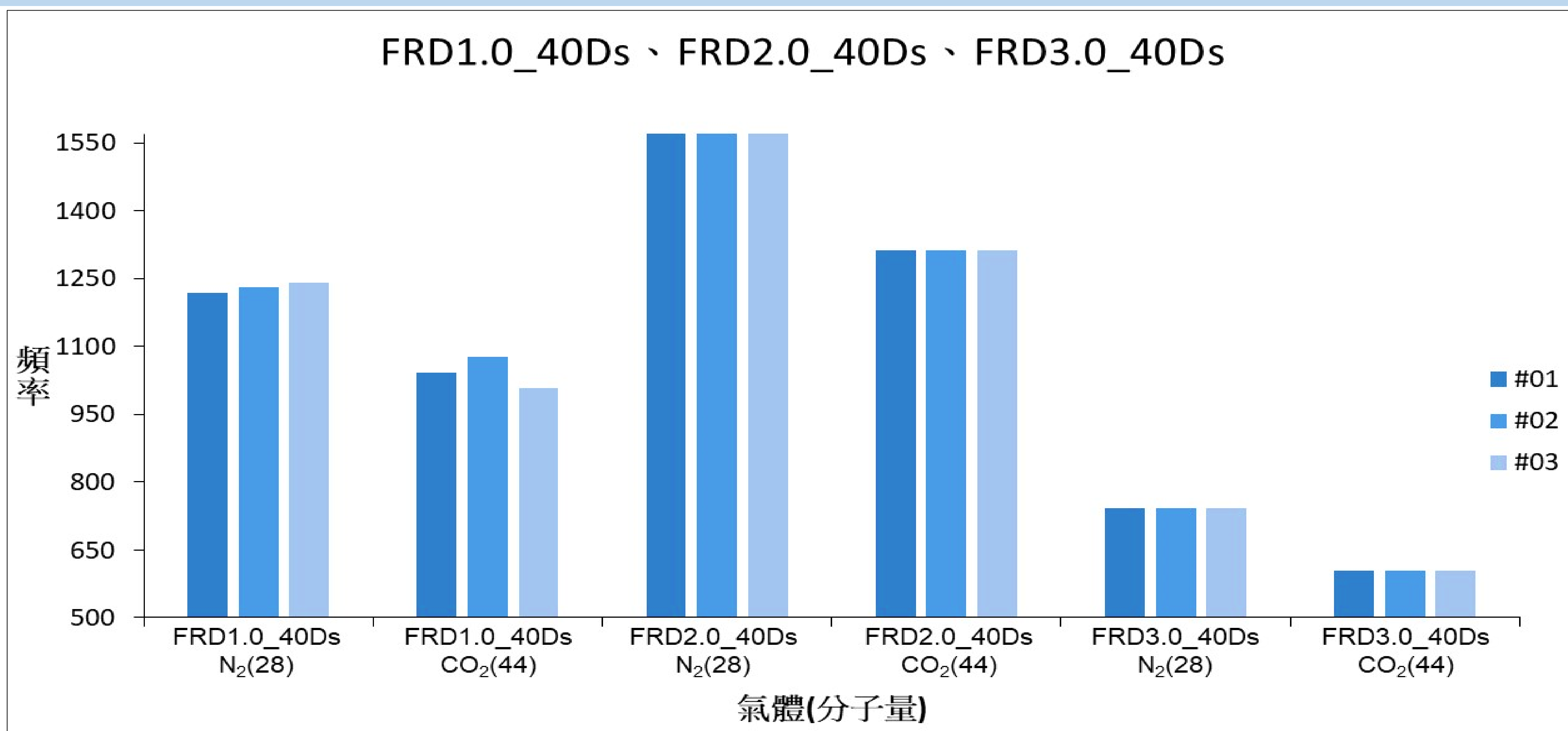


圖6 FRD1.0_40Ds、FRD2.0_40Ds、FRD3.0_40Ds N₂、CO₂頻率與分子量關係

FRD數值校正與檢量線

表 2 FRD3.0搭配不同流速計測量氮氣聲波頻率

氣體	FRD3.0 _30Ds 頻率 (Hz)	FRD3.0 _20Ds 頻率 (Hz)	FRD3.0 _30Dh 頻率 (Hz)	FRD3.0 _20Dh 頻率 (Hz)	FRD3.0 _30E 頻率 (Hz)	FRD3.0 _20E 頻率 (Hz)
N ₂ (28)						
#01	X	X	715	609	721	691
#02	X	X	727	609	721	686
#03	X	X	721	609	721	686
平均	X	X	721	609	721	688

表 3 FRD3.0搭配不同流速計測量二氧化碳聲波頻率

氣體	FRD3.0 _30Ds 頻率 (Hz)	FRD3.0 _20Ds 頻率 (Hz)	FRD3.0 _30Dh 頻率 (Hz)	FRD3.0 _20Dh 頻率 (Hz)	FRD3.0 _30E 頻率 (Hz)	FRD3.0 _20E 頻率 (Hz)
CO ₂ (44)						
#01	X	X	598	715	580	568
#02	X	X	592	727	580	562
#03	X	X	598	727	580	562
平均	X	X	596	723	580	564

表 4 FRD3.0_30E聲波頻率對應 $\sqrt{\gamma/M}$ 以製作檢量線

編號	M	f	T	$\sqrt{T_0/T}$	$f*\sqrt{T_0/T}$	$\Delta f/f_0$	X(CO ₂ 比例)
M ₁	28	721	300	1	721	0.442	0
M ₂	32	654	300	1	654	0.308	0.25
M ₃	36	623	300	1	623	0.246	0.5
M ₄	40	588	300	1	588	0.176	0.75
M ₅	44	580	300	1	580	0.160	1

編號	γ	γ/M	$\sqrt{\gamma/M}$
M ₁	1.4000	0.050000	0.223607
M ₂	1.3725	0.042891	0.207101
M ₃	1.3450	0.037361	0.193290
M ₄	1.3175	0.032938	0.181487
M ₅	1.2900	0.029318	0.171226

T₀: 300K(27°C)
 γ 計算方法:
 $1.29*X + 1.4*(1-X)$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f*\sqrt{T_0/T} - f_0}{f_0}$$

$\Delta f/f_0$ =聲波頻率變化分率 T=測試時溫度
 f=測量到的聲波頻率 T₀=300K f₀=基頻

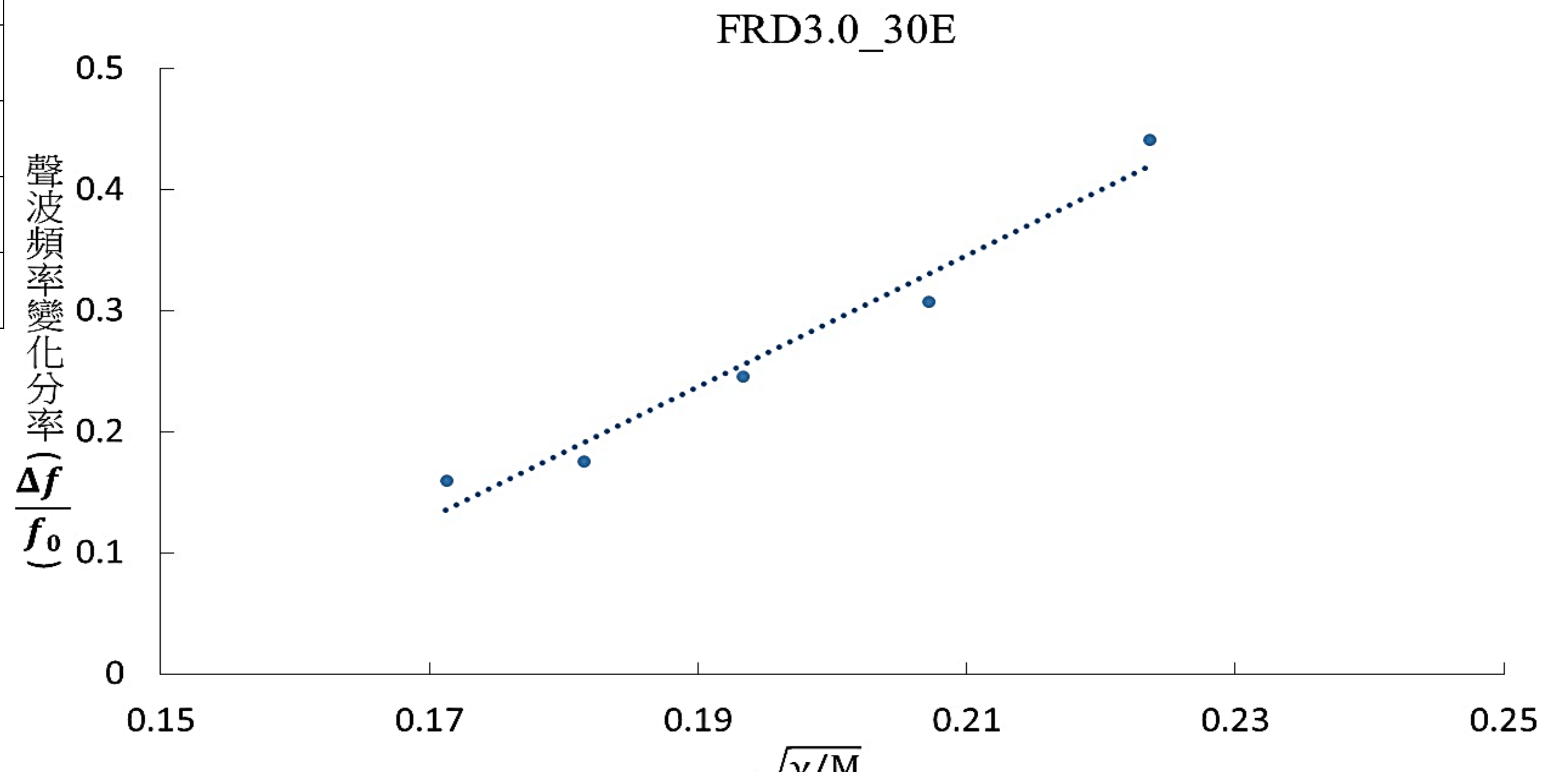


圖7 FRD3.0_30E聲波頻率變化分率與(絕熱指數/分子量)開根號的關係

人體呼氣分析

表 5 乾燥呼氣平均分子量的模擬計算

乾燥空氣莫耳分率			乾燥呼氣成分變化與莫耳分率			乾燥呼氣 平均分子量	γ	$\frac{\gamma}{M}$	$\sqrt{\frac{\gamma}{M}}$
N ₂	Ar	O ₂	T%	O ₂	CO ₂				
0.78	0.01	0.21	36%	0.1344	0.0756	29.8672	1.394384	0.046686	0.216070
0.78	0.01	0.21	37%	0.1323	0.0777	29.8924	1.394153	0.046639	0.215961
0.78	0.01	0.21	38%	0.1302	0.0798	29.9176	1.393922	0.046592	0.215852
0.78	0.01	0.21	39%	0.1281	0.0819	29.9428	1.393691	0.046545	0.215743
0.78	0.01	0.21	40%	0.1260	0.0840	29.9680	1.393460	0.046498	0.215635
0.78	0.01	0.21	41%	0.1239	0.0861	29.9932	1.393229	0.046451	0.215526
0.78	0.01	0.21	42%	0.1218	0.0882	30.0184	1.392998	0.046405	0.215418
0.78	0.01	0.21	43%	0.1197	0.0903	30.0436	1.392767	0.046358	0.215310
0.78	0.01	0.21	44%	0.1176	0.0924	30.0688	1.392536	0.046312	0.215201
0.78	0.01	0.21	45%	0.1155	0.0945	30.0940	1.392305	0.046265	0.215093

T%: 吸入體內氧氣變成CO₂的轉換率 γ 計算方法: $1.4*0.78+1.67*0.01+1.4*0.21*(1-T\%)+1.29*0.21*T\%$



圖8 水氣凝結於氣袋

表 6 FRD3.0_30E量測
人體呼氣聲波頻率

受試者A 呼氣	FRD3.0_30E 頻率(Hz)
測試時溫度(K)	300
#01	691
#02	686
#03	686
平均	688

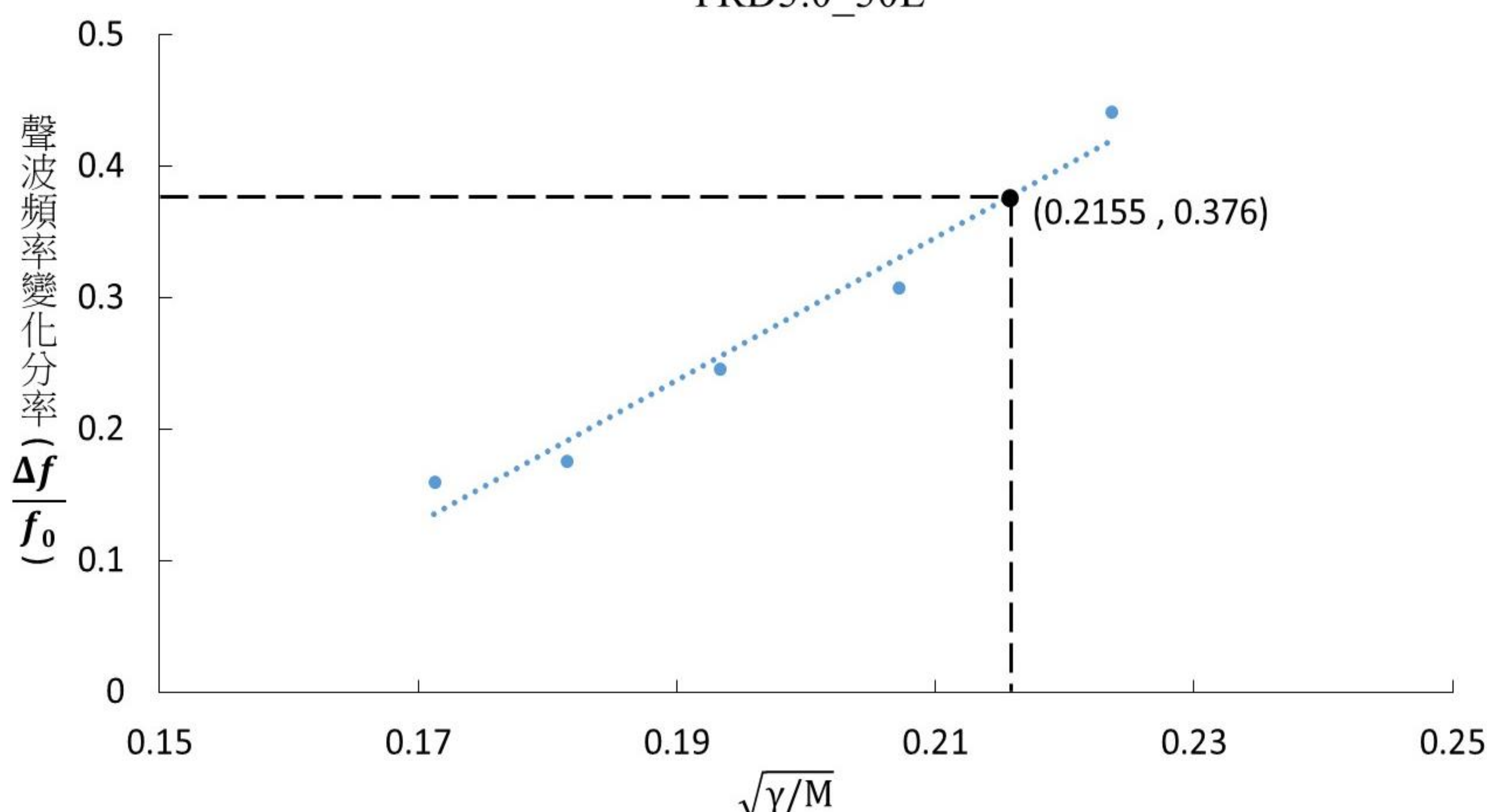


圖9 FRD3.0_30E檢量線呼氣預估分子量放大圖

表 7 FRD3.0_30E量測人體飯前飯後呼氣聲波頻率

受試者A 呼氣	Day1飯前 聲波頻率	Day1飯後 聲波頻率	Day2飯前 聲波頻率	Day2飯後 聲波頻率	Day3飯前 聲波頻率	Day3飯後 聲波頻率
測試時溫度(K)	301.1	301.1	299.5	299.5	299.0	299.0
#01	697	686	691	686	691	680
#02	691	691	686	686	691	686
#03	697	691	691	680	691	680
平均	695	689	689	684	691	682
$\Delta f / f_0$	0.387	0.375	0.379	0.369	0.384	0.366
$\sqrt{\gamma/M}$	0.2173	0.2152	0.2162	0.2143	0.2170	0.2134
CO ₂ 莫耳分率	0.0525	0.0924	0.0735	0.1092	0.0567	0.1281

應用

- 一. 適宜的大小，所需空間小。
- 二. 親民的成本，檢測器更能夠居家化、普及化。
- 三. 放置於家中可收集數據，讓糖尿病病患能夠進行長時間的追蹤。
- 四. 非侵入式的檢測，協助疾病預防。

結論

- 一. 使用手機APP Spectroid，進行頻率量測。環境音不影響實驗。
- 二. 自製直笛檢測器(FRD)功能特性
 1. 在同分子量且流速一致的狀況下，經過測量確認所發出聲波頻率也會一致。
 2. 分子量愈大頻率愈低；反之，分子量愈小頻率愈高。
 3. 以氮氣和二氧化碳不同比例混合氣體完成對應聲波頻率的檢量線。
- 三. 人體呼氣與聲波頻率
 1. 健康人體呼出之氣體與氮氣聲波頻率相近或相等。
 2. 以多步驟集氣袋模式收集氣體排除水氣所造成的凝結干擾。
 3. 測試人體呼氣得出吸入體內氧氣轉換為二氧化碳轉換率。
 4. 人體呼氣飯前二氧化碳含量較飯後少，血糖值高則人體呼吸作用速率高，則CO₂量高。
- 四. 檢測器大小適合放置於家中，也可隨身攜帶，方便大眾於自行收集數據，頻率測量也只需使用幾乎人手一支的手機下載Spectroid軟體及可。
- 五. 本研究發展攜帶型檢測器，方便病患在家進行長時間追蹤，精簡昂貴氣體檢測器，較易推廣於大眾，更能夠收集大數據促進國人醫學與健康的研究。

未來展望

- 一. 測試健康人體運動前後血糖變化與呼氣中CO₂濃度變化。
- 二. 應用測試正常人與糖尿病病患呼氣，做為預防醫學的工具。

參考資料

1. 手機APP Spectroid : https://play.google.com/store/apps/details?id=org.intoorbit.spectrum&hl=zh_TW
2. 林震煌, 2019, 笛之音響學, 初版, 100頁
3. 吳羅賢碩士論文;林震煌教授指導, 2019,開發以LabVIEW程式控制的攜帶型氣體感測裝置之研究
4. Galassetti, P. R. et al., 2005, *Diabetes Technology & Therapeutics*, 7 (1), 115-123.
5. Ming-Ju Wu, et al., 2017, *Analytical Sciences*, 33, 625.
6. Yi-San He, et al., 2013, *Anal. Chem.*, 85, 3303-3308.