

中華民國第 59 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

050203

可撓式指叉電極的製備與應用

學校名稱：新北市立中和高級中學

| | |
|-------------------------|--------------|
| 作者： 高二 吳姿芸 高二 魏辰亦 | 指導老師： 趙孟軒 |
|-------------------------|--------------|

關鍵詞：指叉電極、生物檢測

摘要

本實驗先以銀墨水筆在相紙上繪出能感測鹽水濃度的指叉電極，當指叉數目愈多時，偵測靈敏度也隨之提高。接著，以點膠機將銀膠塗佈於可撓的投影膠片上，並用交流電測量不同水溶液之電容變化(葡萄糖、蔗糖、氯化鈉和 L-麩胺酸鈉)。對不解離的非電解質而言，濃度並不影響測量結果，但電解質溶液中，濃度與電容在對數關係下呈線性正相關($R^2 > 0.95$)。偵測極限受指叉排列緊密度所囿，最低可至 0.1mM，但若偵測物質為質量較大的 L-麩胺酸鈉時，會不及感應高頻交流電，使偵測極限變成約 1mM。若要擴大偵測範圍，建議以低交流電頻來偵測。此外，物質所具有之靈敏度不一，可當作其特有的偵測「指紋」，使指叉電極達到辨識不同生物物質的可能，成為有效的生物檢測工具。

壹、研究動機

現代社會中，隨著健康意識的上升，生活周遭能見各樣檢測商品日益增多，如血糖機、葡萄糖計等等，簡便使用、又靈敏的感測儀器一直是人們的最愛，也因此成為科學家看重的領域。在尋找資料時，發現指叉電極在感測器領域已大大推廣，我們深受其小巧輕便性吸引，又課堂上我們學到電解質溶液可以導電，不同濃度的電解質溶液有不同導電率，因此我們想將二者結合，來自己做做看指叉電極，看能不能對不同物質做感測。我們也想從這基礎出發，希望能研發出操作簡易、可偵測其他生物分子的檢測晶片，在生物科技層面有所助益。

貳、研究目的

- 一、以可撓式材質為基板(PET、相片紙等)，做出可撓式的指叉電極。
- 二、藉指叉電極觀察其電容值與不同溶液之濃度關係，得到不同物種特有之靈敏度，進而達到辨識物質之效果。





參、研究設備及器材

一、器材

試管振盪器、攪拌加熱機、燒杯、玻棒、滴管、藥勺、投影膠片、LCRmeter(HM8018)、點膠機、樣品瓶。

二、藥品

銀膠、葡萄糖、蔗糖、L-麩胺酸鈉、NaCl。

| | |
|---|--|
|  |  |
| LCRmeter(HM8018) | 點膠機 |
|  |  |
| 銀膠 | 攪拌加熱機 |

肆、研究過程與方法

一、指叉電極製備

(一) 點膠機原理

1. 點膠機執行

點膠機的執行機構主要負責執行點膠工作，驅動機構能夠幫助執行機構更精確，更高質的實現點膠。執行機構由機械手和軀幹兩部分構成，機械手在工作過程中都是呈直線運作，為了配合機械手的運作，一般選用直線液壓缸、擺動液壓缸、電液脈衝馬達、伺服液壓馬達、交流伺服電動機、直流伺服電動機以及步進電動機等執行機構。點膠機的主體部分是軀幹，包括安裝手臂、動力源、各種執行機構的支架等都屬於點膠機的軀幹範疇。而第二大組成部分是驅動裝置。驅動機構主要有四種：液壓驅動、氣壓驅動、電力驅動以及機械驅動。其中僅電力、氣動驅動憑藉著用膠量相對較少，氣源方便，保養簡單方便，且費用相對較低的優勢占了總應用的百分之九十。

為了保證點膠操作簡單，高速精準，點膠機的控制系統配備了運動控制卡、離線轉換板、掌上型示教盒、串口線、介面線、軟體狗、離線液晶、離線鍵盤、薄碼開關等點膠程式，這樣的裝配的優點在於檔案易於下載，方便資料管理便捷。

2. 工作原理

點膠機通過將壓縮空氣送入注射器或者是膠瓶中，將膠壓進與活塞室相連的進給管中，利用壓力進行點膠工作。當壓力增大，活塞室中填滿膠，活塞向下推進滴膠針頭時，膠受到壓力便會從針嘴壓出。滴出的膠量由活塞下沖的距離決定，可手工調節，也可通過程式設計進行控制。出膠的方式較為穩定，可適用黏性膠高溶劑。運作特點是對膠劑黏著度有低靈敏度，可針對不同特性塗料，控制其氣壓和針頭大小，在特定區域內點膠塗佈出特定圖形(圓形、矩形和線段)，還有事先模擬之功能，預覽繪製出的圖形樣貌。點膠機是從人工到自動化的一

個重大轉變。它包含了機械、電力、PLC 程式的編寫等。很好地詮釋機電一體化科技的非凡應用。是機電一體化朝著智能化、模組化、綠色化的最佳體現。

3. 常見問題

(1) 結束點的設定

膠體易在線段結束點仍再出膠，不會馬上停止，此時可將出膠開關關閉，或是設定在線段中間點和線段結束點間，把線段結束點的高度減少一些，把膠拉上來。

(2) 圖形的不平整（有氣泡）

有時因活塞室中的膠體含有氣泡，導致出膠無法順利，線段不連續，可先擠出一些膠，讓其穩定，亦或放置離心機中，除泡以及將其膠體沉澱至較底部，使其出膠集中順暢。

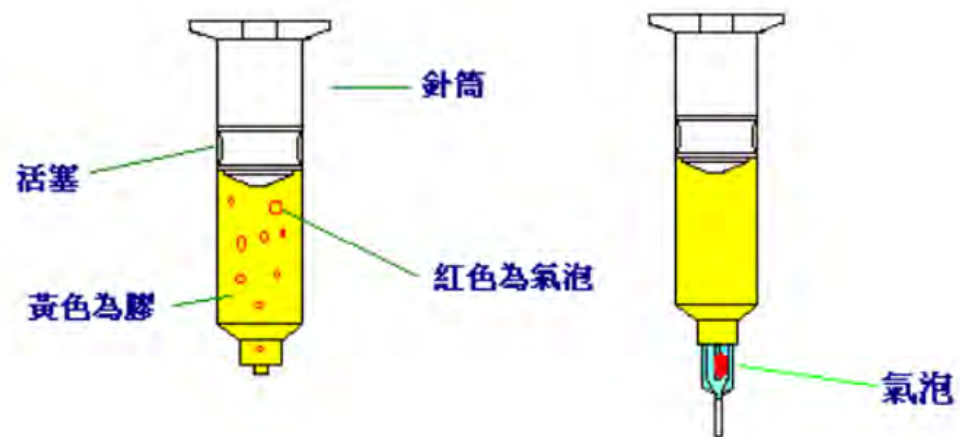


圖 1：瓶內含有氣泡示意圖

(3) 壓力過大或過小

過大易導致線段過粗，亦或膠體流出；太小則可能造成線段不連續，或無法出膠。

4. 點膠機之針頭安裝需以如下步驟完成

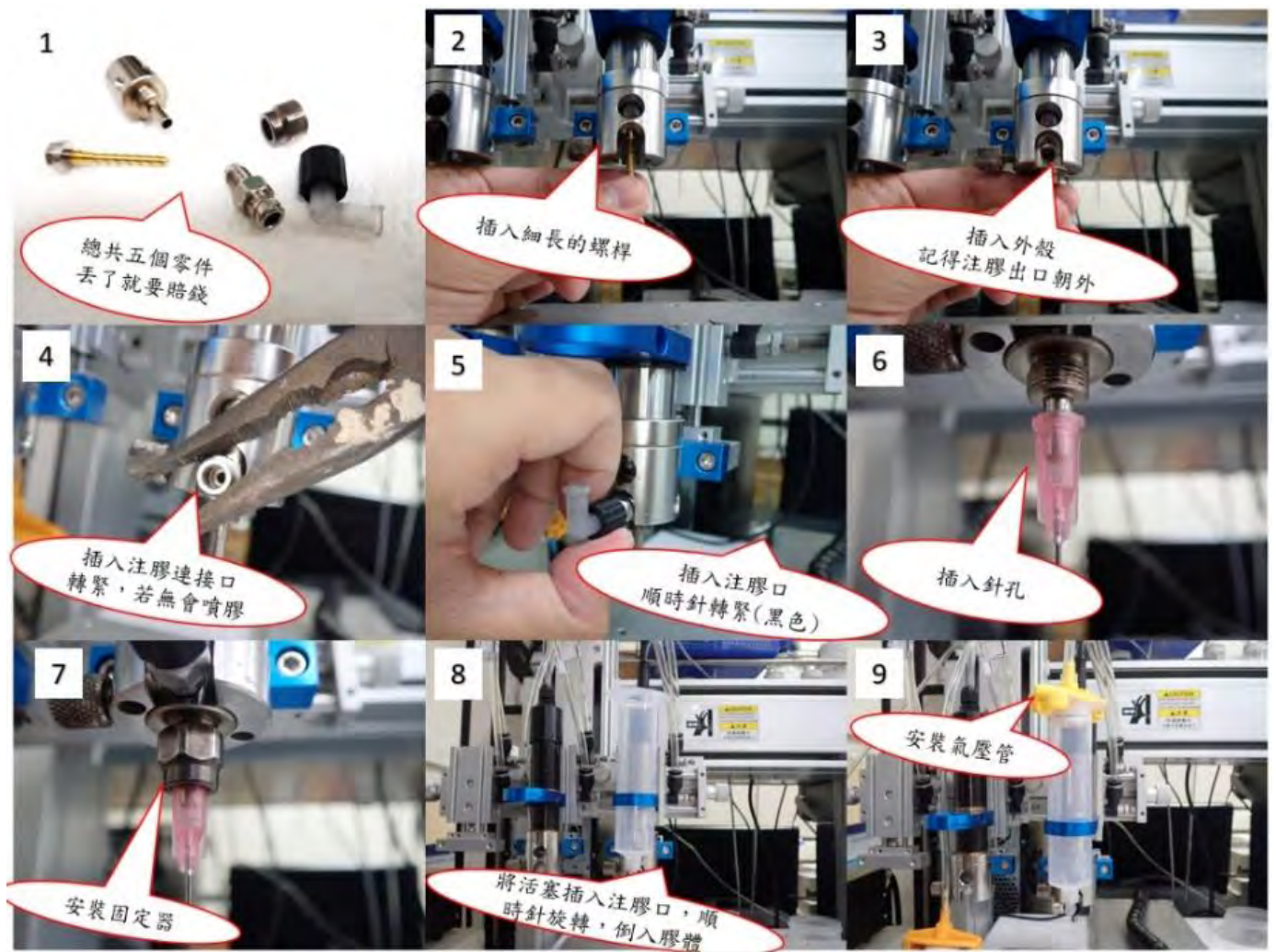


圖 2：點膠針頭安裝流程圖

(二) 以點膠機繪製指叉電極

1. 將銀膠放入離心機運轉約 2 分鐘，使其內部銀粒子沉澱至底層。
2. 填入點膠機，以圖 3-a 方法調整儀器，設定指叉間距為 0.5mm，長度為 11mm 之指叉電極(如圖 3-b)，並調整其下針高度。

(a)



(b)

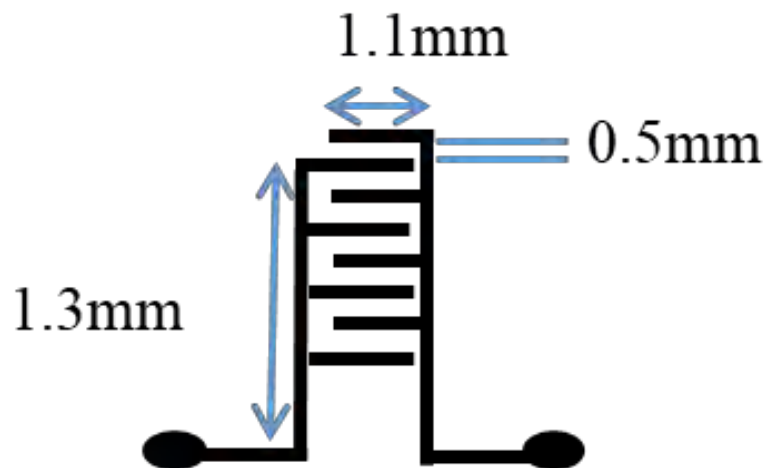
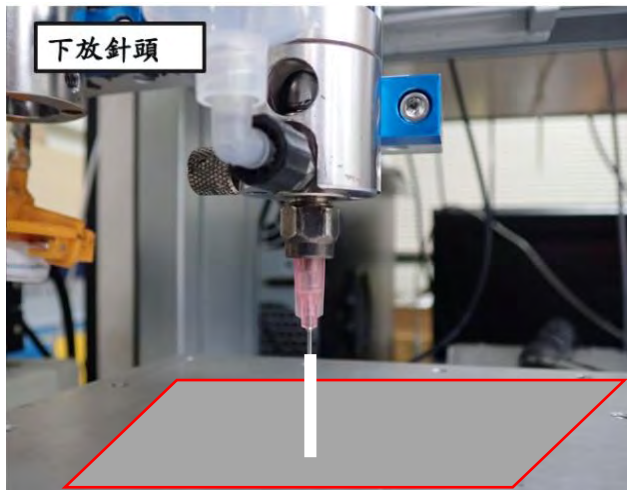


圖 3：(a)氣壓機之調整步驟；(b)本實驗以點膠機製作之指叉電極簡圖。

3. 開始繪製

將銀膠塗於投影膠片上，過程需注意是否有卡膠情況，並同時維持面板 41°C 恆定。繪製完成後，將其放置於加熱板上加熱約 3 小時(120°C)，使其凝固。完成圖如圖 4-b。

(a)



(b)



圖 4：(a) 噴膠示意圖；(b) 指叉電極完成圖。

(三) 電容值之測量

1. 如(圖 5)，利用 LCRmeter 測量其電容值，將鱷魚夾夾至指叉電極兩端點，架置燒杯上，架設圖如圖 5。



圖 5：指叉電極架設圖

2. 調配不同濃度水溶液，溶質有葡萄糖、蔗糖、鹽、L-麩胺酸鈉(味精)。鹽水濃度範圍為 0.01mM~1000mM，其他藥品濃度範圍為 0.001mM~100mM。
3. 將水溶液放入燒杯內，使其液面恰好淹沒所有指叉，但不觸碰鱷魚夾。
4. 測量不同頻率下之溶液電容值。

(四) 指叉電極偵測原理

欲了解指叉電極作用原理，可先從平行電板開始認識。平行電板由二片具導電性的板子組成，其電板面積為 A ，彼此間距為 d ，電極板之間材料的介電常數為 ϵ 。透過在電極板二端施加電壓，電荷開始在電極板上累積，若電極板間的材料為絕緣物質時，將電源移開，即可達到儲電的效果。此時電極板成為一個電容(C)，定義為 Q/V ， Q 為平行電極板所存電量， V 為施加於電極板二端電壓的大小。示意圖如圖 6。



圖 6：平行電極板示意圖。

平行電極板之電容亦可以用式 1 表示：

$$C_{\text{平行電極板}} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (\text{式 1})$$

其中 ϵ_r 為電極間填充材料之相對介電常數、 ϵ_0 為與真空之介電常數、 ϵ 為填充材料之介電常數。由此式可知，電極板之間的物質、電極板面積和電極板間距皆會影響電容大小。此外，當正負電極板以交錯排列設計，形成如指叉一般的形狀時，裝置內所擁有的電容數即可上升，讓儀器可更有效利用。以此型態設計之電極即稱為指叉電極。

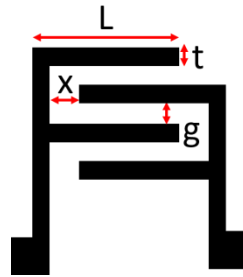


圖 7:指叉電極示意圖。

簡易指叉電極示意圖如圖 7，每個指叉就好像平行電極板一樣，以正負極彼此交錯，裝置內如同好幾個小電容排在一起，每個小電容的大小受指叉間距(g)、長度(L)、寬度(t)影響，如式 2：

$$C_{single} = \frac{\epsilon A}{g} \quad (\text{式 2})$$

其中電極面積 A_{single} 為 $t(L-x)$ 。而指叉電極整體電容的大小與指叉數量(n)成正比，可寫成式 3：

$$C_{totle} = 2n \frac{\epsilon t(L-x)}{g} \quad (\text{式 3})$$

由式 3 可知，當指叉排列愈緊密，裝置的電容大小就可以有效增加。

若將指叉電極間的填充材料換成溶液時，在通電的情況下，待測液體的陰、陽離子分別移動至正、負兩極，產生電荷(Q)分布不均勻的現象，可形成感應性的電容。當所用的溶質為非電解質(如葡萄糖)時，溶液中陰、陽離子主要來自於水本身解離產生的離子，指叉電極的電容大致上並不會隨著溶質濃度而變。若選用的溶質為電解質(如氯化鈉)時，陰陽離子的數量主要由加入的電解質而定，電荷分布

不均的現象隨著溶質增加而愈趨明顯，介電常數也與溶質濃度呈正相關。其原理可進一步以式 4 探討，

$$\epsilon^* = \epsilon_{實} - j\epsilon_{虛} = \epsilon_{實} - j\frac{\sigma}{2\pi f} \quad (\text{式 4})$$

在交流電的供應下，電容的介電常數 ϵ^* 必須以複數表示，其虛部的部分正比於導電度 σ ，反比於交流電之頻率 f 。當電解質濃度增加時，導電度上升，使得介電常數增加，因此所測得之指叉電極電容隨著電解質的加入而變大。而交流電之頻率亦會影響電容，當所施加於電極之交流電源頻率愈高時，電荷愈不容易在電極板上累積，使得介電常數變小，所量測之電容值亦隨著高頻交流電使用而變小。此種電容隨著不同溶液變化之特性，讓指叉電極可偵測環境中的蛋白質、菌種、血糖等等，在生醫感測器的發展上佔一要角。

在測量指叉電極之電容時，可以選用電感-電容-電阻分析儀(LCR meter)做量測。此儀器提供二種模式，藉由選擇「電阻-電容交流串聯電路」(RC 串聯)或者「電阻-電容交流並聯電路」(RC 並聯)來測量指叉電極之電容。在實際測試後，RC 並聯電路可使指叉電極對濃度變化有更好的感應，因此本實驗呈現之數據皆為 RC 並聯電路之結果，其等效電路如圖 8 所示。當 LCR meter 與指叉電極連結後，電阻來源有儀器內部的電阻配置，和固定電極之夾具電阻，整體有效電阻定為 R ，電容之電抗 $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ，整體電阻抗為 $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\frac{1}{X_C}$ 。

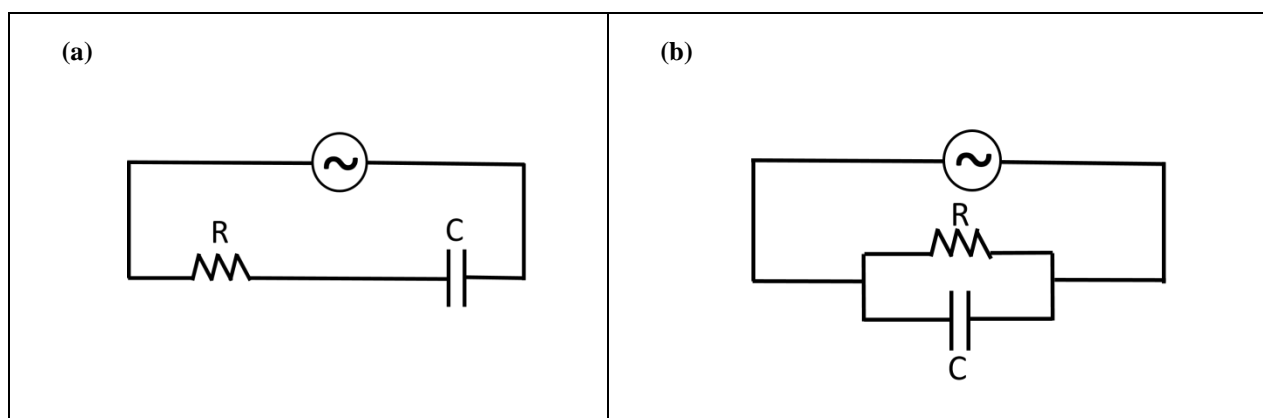


圖 8: RC 串聯(a)與 RC 並聯(b)有效電路示意圖。

伍、研究結果與討論

一、指叉電極一代：手繪銀墨水電極/直流電源

在發展初期，我們利用銀墨水筆在相片紙上繪製可撓式指叉電極，電源為直流，以三用電表量測電極二端的電阻。銀墨水筆為硝酸銀經還原成銀粒子後與溶劑混合，填充在空的原子筆裡所製成。當銀墨水寫在相片紙上，數十秒後即完全風乾，此時銀線成為一條條的電線，形成手繪的電路(圖 9)。本實驗之銀墨水指叉電極都以此法繪製而成，銀線寬 0.5mm，每個叉極間距約 1~2mm，叉極長度約 4mm，銀線自身電阻小於 10Ω。另外，依據指叉的數目，我們共繪製了四種不同的指叉電極：「1 指叉」代表著兩端電極各有一個指叉交錯，彼此不相連；「2 指叉」則是電極二端各有二個指叉，「3 指叉」與「4 指叉」分別是各有 3 個與 4 個指叉。當叉極上覆蓋著不同鹽水濃度的濾紙時，其二端會測到不同的電阻，各濃度測得的電阻值在 1~5kΩ 間，誤差小於 10%。所測得的鹽水電阻與純水相比後得到比電阻、再與鹽水溶液濃度作圖(圖 10)，可知比電阻會與鹽水濃度成正相關，在「4 指叉」的實驗中，其校正線之 R^2 值可達 0.98，顯現自製的指叉電極可穩定的反應外在環境的變化。當指叉數目上升時，校正線之斜率也跟著上升，感測靈敏度隨著叉極的數目而提高，從「1 指叉」換到「4 指叉」時，校正線斜率從 0.2 提高至 3.8，靈敏度提高 19 倍之多。

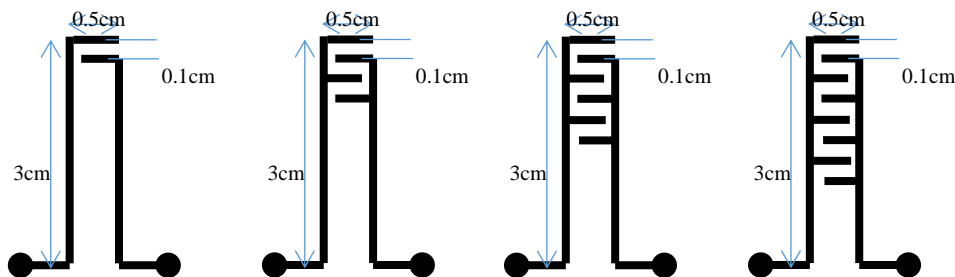


圖 9：手繪銀墨水指叉電極示意圖。

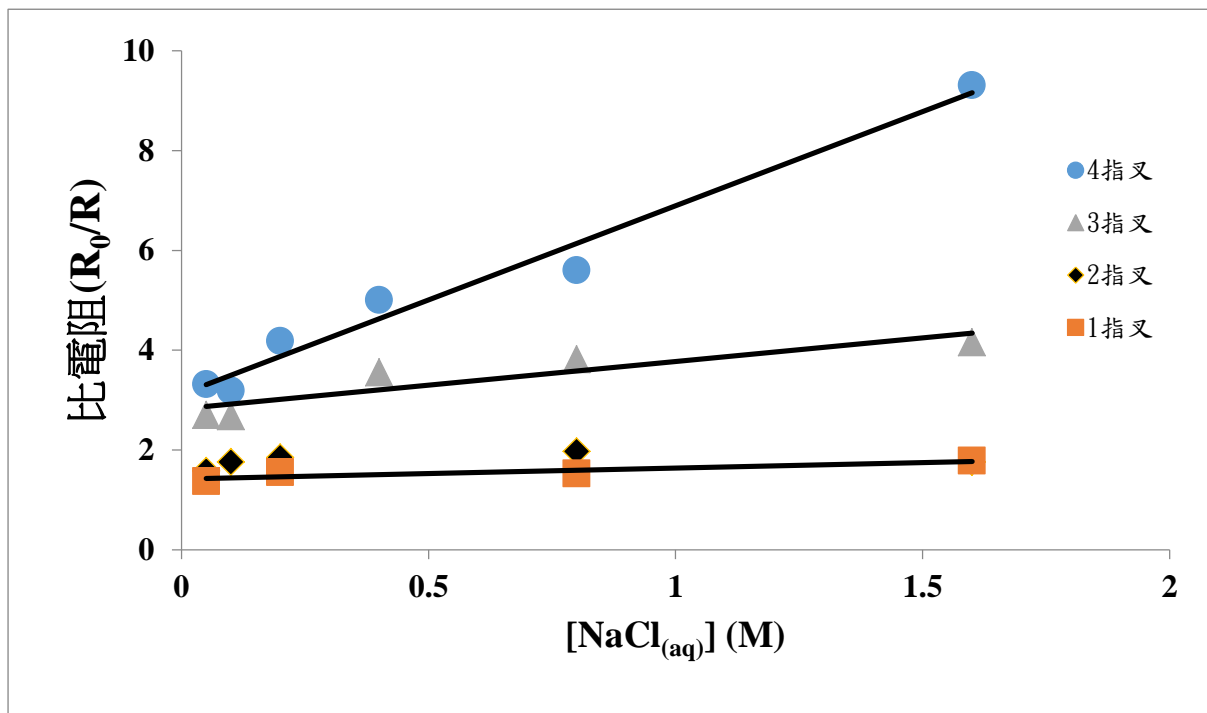


圖 10：銀墨水指叉電極比導電率與鹽水濃度關係圖。除了「2 指叉」因 R^2 值小於 0.1 未列出校正線外，其餘指叉電極校正線之 R^2 值皆大於 0.82。指叉愈多，線性相關愈明顯，靈敏度也愈高。

二、指叉電極二代：點膠機指叉電極/交流電源

此實驗指叉電極材料銀膠為基體樹脂與導電銀粒子的混合，將銀膠使用點膠機繪製在投影膠片(PET)上，本實驗之指叉電極皆以此種方式製成。銀線寬 0.1mm，每個叉極間距約 0.5mm，叉極長度約 1.3mm。另外，我們依不同濃度配置四種水溶液，溶質為葡萄糖、蔗糖、氯化鈉、L-麩胺酸鈉(味精)，濃度為 0.001mM~1M 不等。所製備好的指叉電極架置於燒杯底部，不再移動，避免其彎曲程度不一致，再把水溶液倒至淹沒指叉，不觸碰鱷魚夾。以下為不同物質水溶液之實驗結果與討論。

(一) 葡萄糖水溶液

圖 11 為各頻率在不同濃度葡萄糖($C_6H_{12}O_6$)水溶液下所測得的電容值，由結果可知指叉電極所測的溶液電容並不會隨著糖濃度而變。 $C_6H_{12}O_6$ 為非電解質，增加 $C_6H_{12}O_6$ 濃度並不會增加離子數，溶液中僅含水本身微量解離的離子，因此指叉電極只能感應到水本身的電荷變化，使得電容與濃度的關係為一水平線。

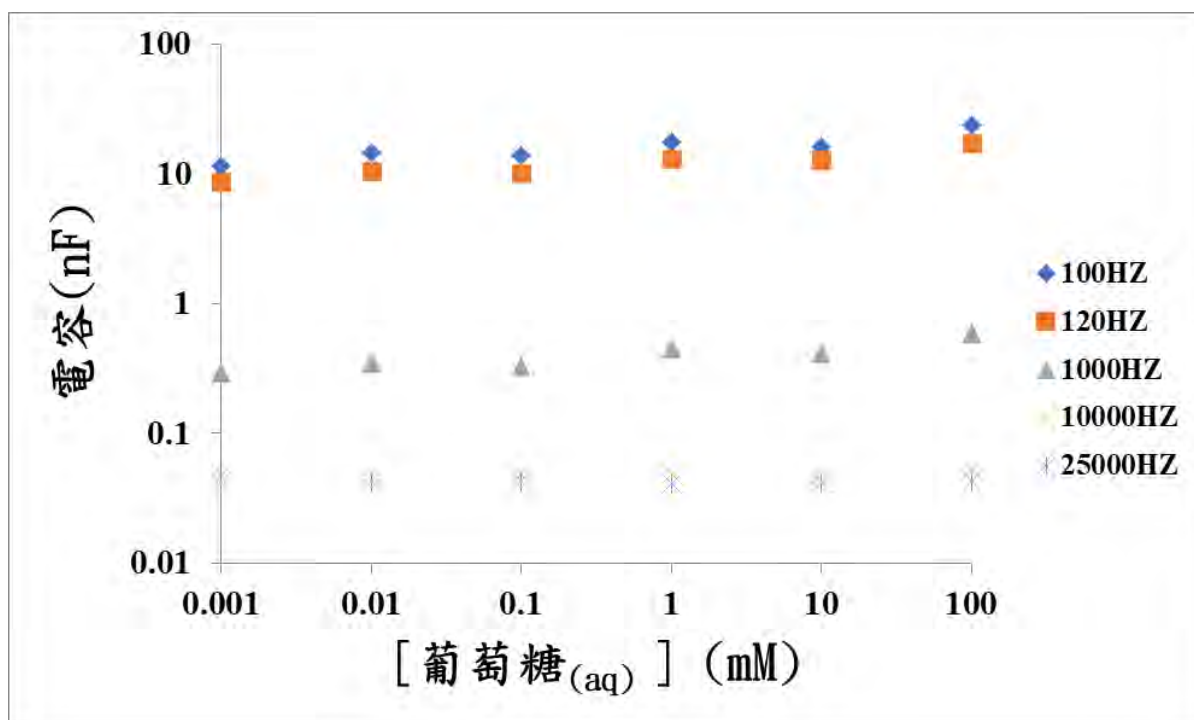


圖 11：不同頻率下銀膠指叉電極電容與葡萄糖($C_6H_{12}O_6$) 濃度關係圖。

(二) 蔗糖水溶液

圖 12 為各頻率在不同濃度蔗糖水溶液下所測得的電容值。所繪製的圖表仍顯示非電解質濃度與電容值無直接相關性，所測得之電容值不受濃度影響。蔗糖與葡萄糖同為非電解質，因此當增其濃度，也不會增加水中的電荷數，因此指叉電極只能感應到水本身的電荷變化，使得電容與蔗糖濃度的關係近似水平。

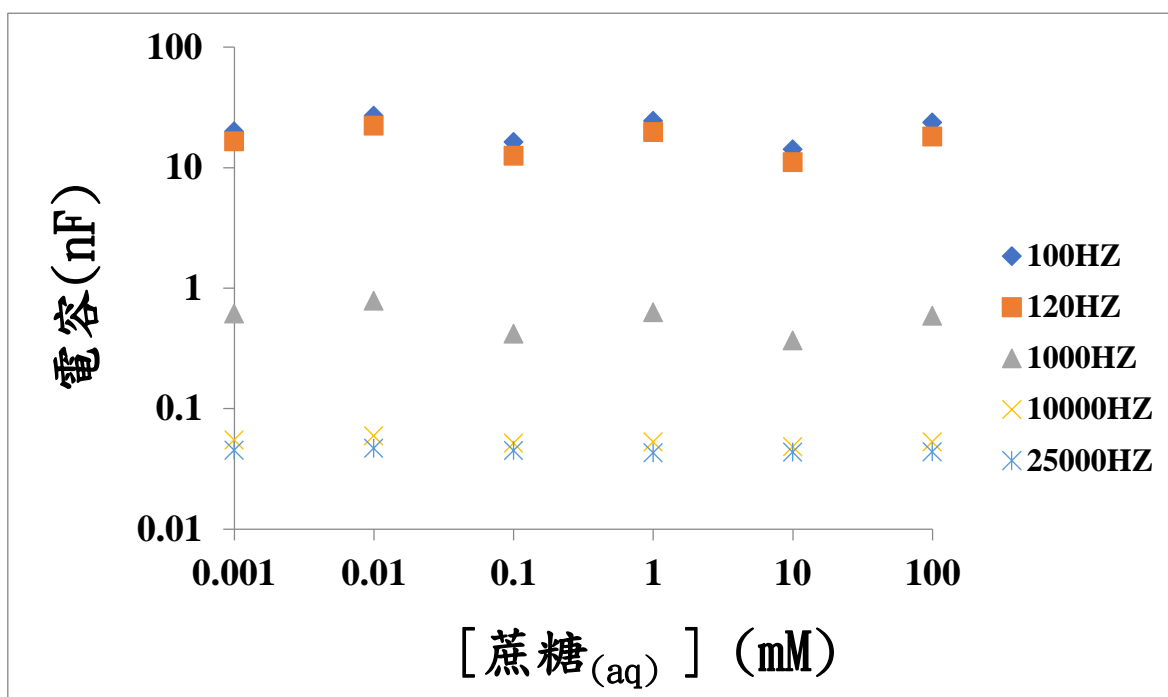


圖 12：不同頻率下銀膠指叉電極電容與蔗糖濃度關係圖。

(三) NaCl 水溶液

圖 13 為各頻率在不同濃度 NaCl 水溶液下所測得的電容值。當 NaCl 濃度增大，水溶液所擁有的離子電荷數也隨之增大，使得電荷不均勻分布在電極附近的現象愈趨明顯，所測的電容因此與其濃度成線性正相關。當濃度過低時，指叉電極無法感應到濃度的變化，偵測極限約為 0.1mM。若是指叉電極能設計的更緊密，縮小指叉間距，增加單位面積內的指叉數目，相信偵測極限可以再更低。此外，當 NaCl 濃度提高至 1M 時，高頻率交流電(>1000HZ)的實驗結果出現「鈍化」的現象，良好線性相關性只在 0.1mM 至 100mM 出現。反之，因為低頻的使用，電極上的電壓變化較緩，讓大部分的電荷受到靜電感應後都來得及移動到電極附近，即使 NaCl 濃度高，指叉電極仍能有效偵測溶液的電容，讓偵測範圍擴大至 0.1mM 至 1000mM。

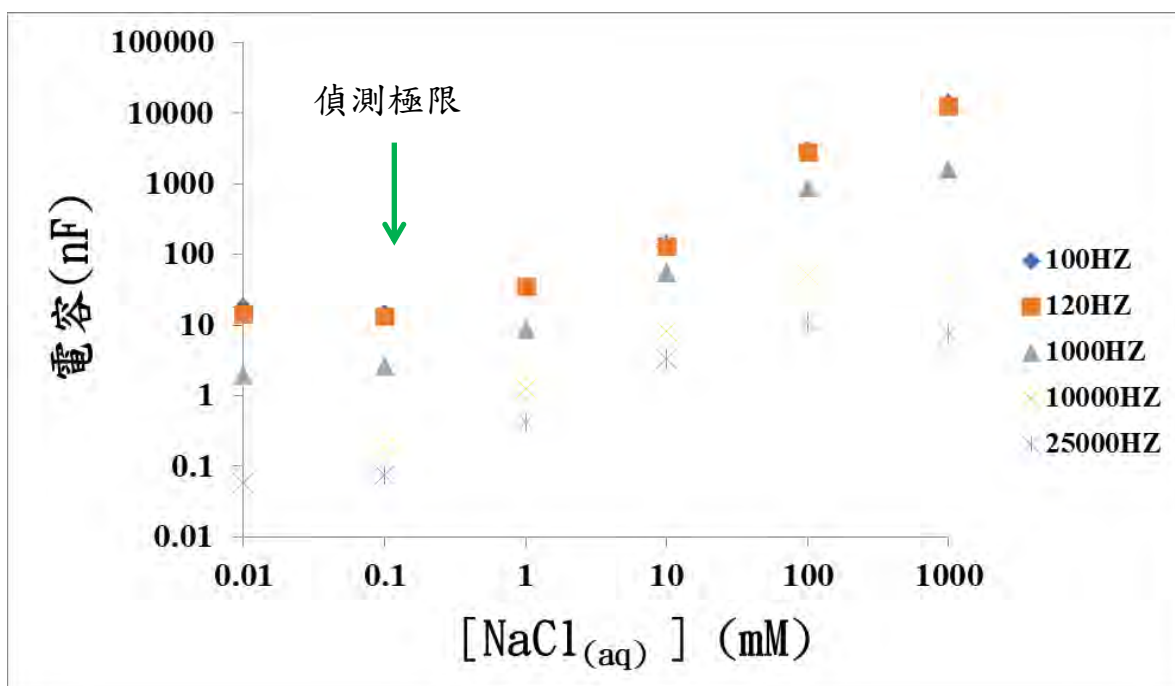


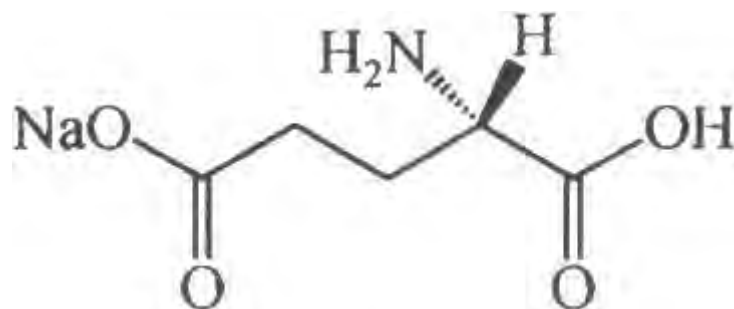
圖 13:不同頻率下銀膠指叉電極電容與 NaCl 濃度關係圖。在 0.1mM~100mM 此偵測範圍內，在對數關係下，交流電頻率為 100Hz 時所得的斜率與 R^2 值為(0.791, 0.958)、120Hz 為(0.754, 0.926)、1000Hz 為(0.833, 0.966)、10000Hz 為(0.808, 0.999)、25000Hz 為(0.741, 0.990)。

(四) L-麩胺酸鈉 (味精)

L-麩胺酸鈉的俗名為味精，是一種極常見的胺基酸，可用作食品調味，提升食物的鮮度。其結構帶有-NH₂ 和-COOH 兩個官能基，可以和水形成氫鍵。當其溶於水，可完全解離出 Na⁺與麩胺酸根離子，為易溶於水的強電解質。當味精濃度增加時，水溶液中的電荷數上升，指叉電極內之電荷不均勻的現象愈趨明顯，測得之電容也增大，使得電容與 L-麩胺酸鈉濃度有正相關性，如圖 14-b 所示。此外，由實驗結果可知，頻率的選用亦會影響到偵測的靈敏度和偵測極限：當頻率增加時，溶液電容隨著濃度的變化明顯增加，斜率由 0.64 (100Hz)提高至 1.26 (25000Hz)，上升 2 倍之多；但是高頻率的情況下，卻讓偵測極限由約 0.1mM 變成 1mM 左右，讓指叉電極能測到的濃度範圍變小。推究其原因，當外來電壓施加於指叉電極上準備驅使溶液中離子移動時，因交流電頻率高，電壓迅速變

號，原本已移動的離子就只好中途變向，以致來不及到電極附近形成暫時性電容，使得指叉電極在溶液離子必須於濃度較高時，才感應得到濃度的變化。

(a)



(b)

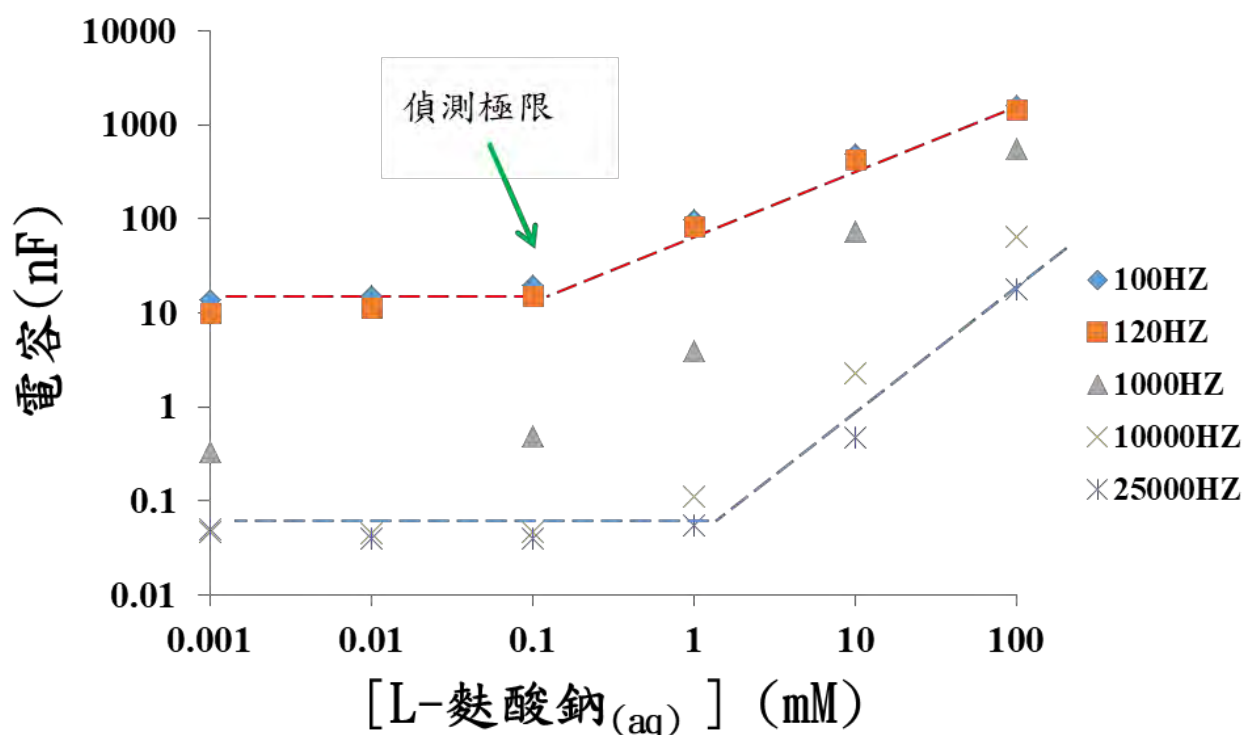


圖 14：(a) L-麩胺酸鈉之結構；(b) 不同頻率下銀膠指叉電極電容與味精濃度對數關係圖。交流電頻率為 100Hz、120Hz、1000Hz 時，其偵測範圍在 0.1mM~100mM 內，所得的斜率與 R^2 值分別為：100Hz (0.640, 0.995)、120Hz (0.665, 0.995)、1000Hz (1.044, 0.995)。交流電頻率

調高時，偵測範圍在 1mM~100mM 內，所得的斜率與 R^2 值分別為：10000Hz (1.386, 0.999)、
25000Hz (1.255, 0.980)。

(五) 同交流電頻率下，指叉電極所具有的個別特定靈敏度---「生物指紋」

由圖 15 可知，使用同一指叉電極與特定交流電頻率(1000Hz)時，每一物質電容與濃度在對數關係下成線性相關，其中蔗糖的斜率接近 0，葡萄糖的斜率約為 0.075 ($R^2=0.815$)，NaCl 斜率為 0.833 ($R^2=0.966$)，L-麩胺酸鈉斜率為 1.046 ($R^2=0.995$)，因不同物質質量與形狀不同，其離子會以不同的速率飄移至電極，導致溶液中電荷受感的分布程度隨著物質不同而異，達到其物質的特殊性，就好像此物質特有的「指紋」一樣。因此，只需利用指叉電極知道不同濃度下該物質的靈敏度，我們就可以藉著此「生物指紋」，判斷溶液中所含生物物質為何。

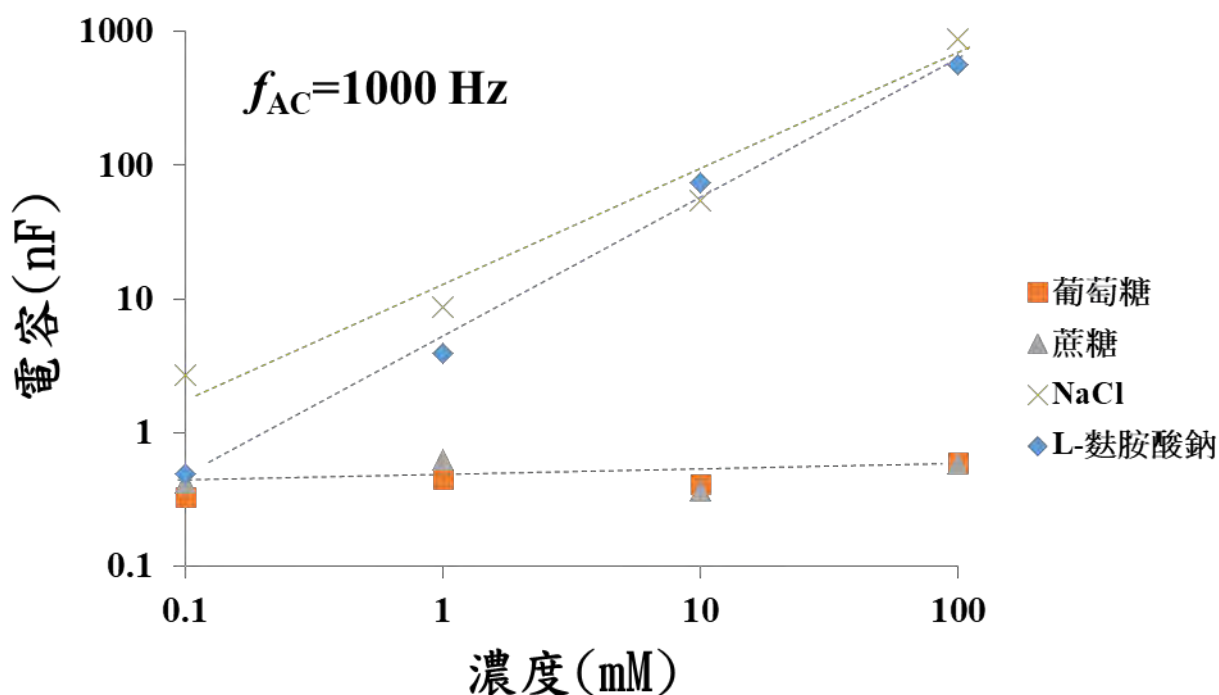


圖 15：同頻率下，不同溶液之電容與濃度關係圖。

每物質都有其特定靈敏度，可作為物質辨識之用

陸、結論與展望

一、結論

(一) 成功開發出可撓式指叉電極偵測裝置：

本實驗成功利用點膠機在 PET 上製作出可撓式指叉電極，使用銀膠作為材料，規格化其長度與面積，並利用 LCR meter 連結指叉電極二端，成功測得不同物質之水溶液之電容值與濃度變化關係。

(二) 偵測靈敏度隨著指叉電極數目上升：

藉由手繪銀墨水指叉電極所測比電阻與鹽水濃度關係可知，當電極的指叉數目愈多，靈敏度愈高， R^2 也愈接近 1，儀器表現也愈趨穩定。

(三) 交流電源供應下，指叉電極所測電容與水溶液中電解質濃度成正相關：

測量非電解質溶液時，因溶質不會解離，儀器讀值無法隨著溶液濃度變化而改變。溶質為強電解質時，所測得之電容隨著離子濃度提高而上升，在相同頻率下可得水溶液濃度與其電容成正相關。電容與電解質濃度彼此以對數關係作圖時可發現，在偵測範圍內成良好線性相關， R^2 值幾乎都可到 0.95 以上。

(四) 對於較重的生物分子，需要在低頻的條件下，才能有較好的偵測極限：

實驗中透過 NaCl 和 L-麩胺酸鈉的比較可知，NaCl 的偵測極限主要受限於指叉的數目、指叉間距等儀器因素，其偵測極限沒有因頻率提高而改變；然而，當溶質換成麩胺酸鈉時，麩胺酸根陰離子的質量是氯陰離子的 4 倍多，其受到靜電感應後移往電極的移動速度小於氯離子，因此需降低交流電頻率，讓離子有機會感應電極二端的電壓變化，如此才能使指叉電極對生物分子的偵測極限有效降低。

(五) 每個生物分子或電解質對指叉電極而言都有不同的「生物指紋」：

固定指叉電極下，於特定頻率時，實驗中的糖、NaCl、L-麩胺酸鈉都各自有其電容與濃度間的變化關係。因各物質所帶電荷和物質質量都不盡相同，指叉電極所測之電容隨濃度之變化必定也不一樣，讓不同物質有其特定的靈敏度，成為其「生物指紋」，進而使指叉電極具有辨識物質的功能。

二、未來展望

(一) 增加專一性辨識功能

可撓式指叉電極已由本實驗證實具有分子辨識的功能，從其反應靈敏度回推而得到各純物質為何。未來我們更希望指叉電極能從混和物中測得某種分子的存在，透過電極表面修飾，使指叉電極具有偵測的專一性。

(二) 可撓式感測裝置的應用

可撓式指叉電極預期可以伏貼在具曲度的表面，如人體肌膚、機械軸承等處，感應周圍環境的變化，大增其推廣性和應用性。如監控人體體液中內某些物質的流失或增生以判斷健康程度，或者追蹤體內組織免疫細胞或癌細胞的數量多寡。在未來，或許能夠不用那些複雜或是體積龐大的儀器，即能讓人們能進一步得知自己的健康狀態，達到早期發現、早期治療的效果。

柒、參考資料及其他

- [1] 劉希彥(2008年7月13日)。生物晶片種類與應用。高雄縣中山工商綜合高中三年6班取自 <http://shs.edu.tw/works/essay/2008/10/2008103120145082.pdf>
- [2] 指叉電極設計原理。取自國家圖書館典藏電子
http://chur.chu.edu.tw/bitstream/987654321/5537/6/NC092CHPI0598002_5.pdf
- [3] 郭建儂(2014年6月)。以微電極陣列作為生物感測器之應用。國立中興大學
- [4] 李佳怡(2010年6月)。利用指叉式電極生物感測器結合阻抗式量測法檢測 LL- 37。大同大學。
- [5] 龔毅、陳欣儒、陳力騏、鄭宗記(2015年8月)。電容式生物感測器之解析。國立台灣大學。
- [6] 圓的方塊、所屬專欄：電化學工作室、編輯：盧幫安(2017年6月)。雙電層理論的三個模型。取自 <https://kknews.cc/zh-tw/science/p5zaboe.html>
- [7] 張哲旭(2017年6月)。電化學分析各種檢定方法。取自 <http://www.sztspi.com/archives/28959.html>

【評語】 050203

實驗設計簡單，適合高中學生動手做。分析參數必須定義清楚，再現性是重要評估參數，不可或缺，否則靈敏度與偵測極限就不客觀。實驗記錄簿必須完整並標示日期。未來或可透過電極設計改善，以能展現在特定應用的成果。可往特定應用，如針對毛髮汗液等配戴式感測發展。

一、摘要

本實驗以銀墨水筆及銀膠在相片紙、投影膠片上繪出能感測鹽水濃度的指叉電極，當指叉數目愈多時，偵測靈敏度也隨之提高。並用交流電測量不同水溶液之電容變化。對不解離的非電解質而言，濃度並不影響測量結果，但電解質溶液中，濃度與電容在對數關係下呈線性正相關。若偵測物質質量較大，會不及感應高頻交流電，使偵測極限變大，欲擴大偵測範圍，建議以低交流電頻來偵測。此外，物質所具有之靈敏度不一，可當作其特有的偵測「指紋」，使指叉電極達到辨識不同生物物質的可能，成為有效的生物檢測工具。

二、研究動機

現代社會中，隨健康意識上升，生活周遭各樣檢測商品日益增多，在尋找資料時，發現指叉電極在感測器領域已大大推廣，受其小巧輕便性吸引，以及利用我們學過的電解質溶液可導電以及不同濃度電解質溶液有不同導電率，想將二者結合，自己做做看指叉電極，能否對不同物質做感測。

三、研究目的

- 1.以可撓式材質為基板(PET、相片紙等)，做出可撓式的指叉電極。
- 2.藉指叉電極觀察電容值與不同溶液之濃度關係，得到不同物種特有之靈敏度，進而達到辨識物質之效果。

四、研究方法 & 過程

五、指叉電極偵測原理

平行電板由二片具導電性的板子組成，其電板面積為 A，彼此間距為 d，電極板之間材料的介電常數為 ϵ_0 透過在電極板二端施加電壓，電荷開始在電極板上累積，若電極板間的材料為絕緣物質時，將電源移開，即可達儲電的效果。

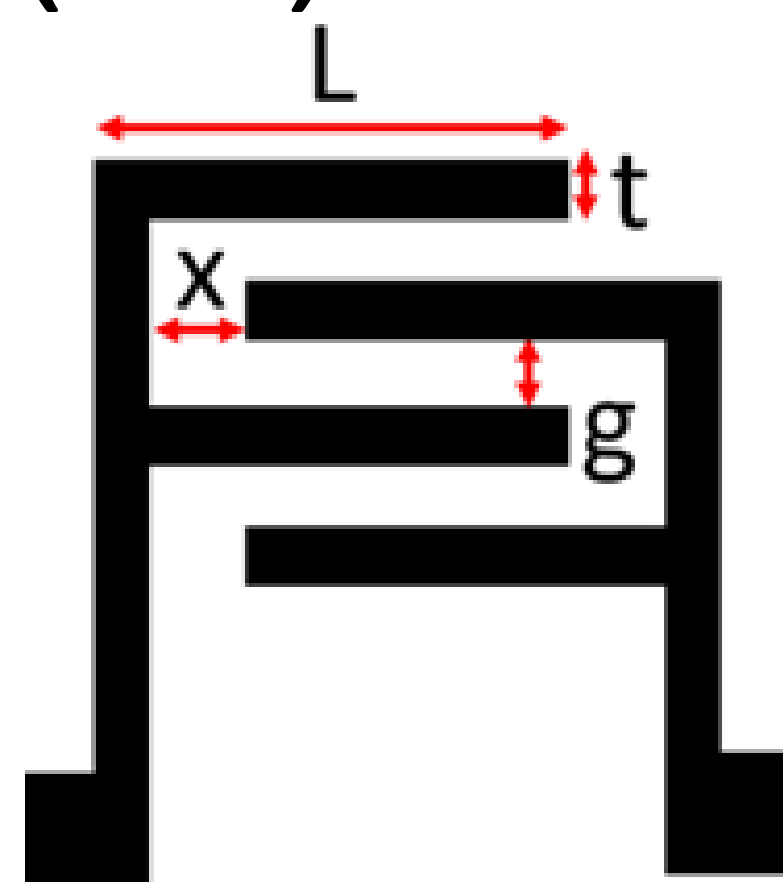
平行電極板之電容可用(式 1)表示，其中 ϵ_r 為電極間填充材料之相對介電常數、 ϵ_0 為與真空之介電常數、 ϵ 為填充材料之介電常數。

$$C_{\text{平行電極板}} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (\text{式 1})$$

簡易指叉電極示意圖如(圖 1)，以正負極彼此交錯，裝置內如同好幾個小電容排在一起，裝置內所擁有的電容數即可上升。每個小電容的大小受指叉間距 (g)、長度(L)、寬度(t)影響，如(式 2)，其中電極面積 A_{single} 為 $t(L-x)$ 。而指叉電極整體電容的大小與指叉數量(n)成正比，可寫成(式 3)：

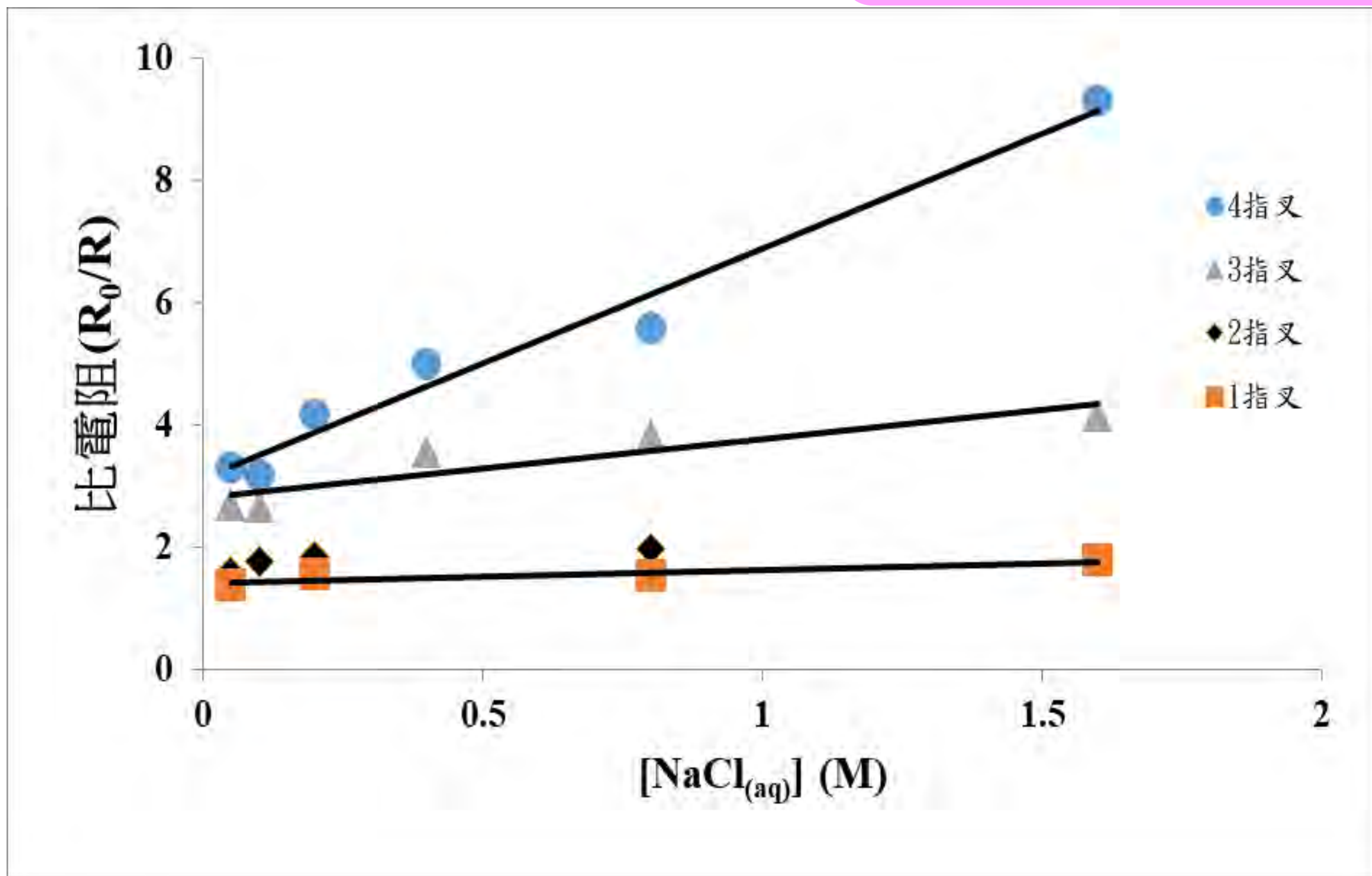
$$C_{\text{single}} = \frac{\epsilon A}{g} \quad (\text{式 2})$$

$$C_{\text{totle}} = 2n \frac{\epsilon t(L-x)}{g} \quad (\text{式 3})$$

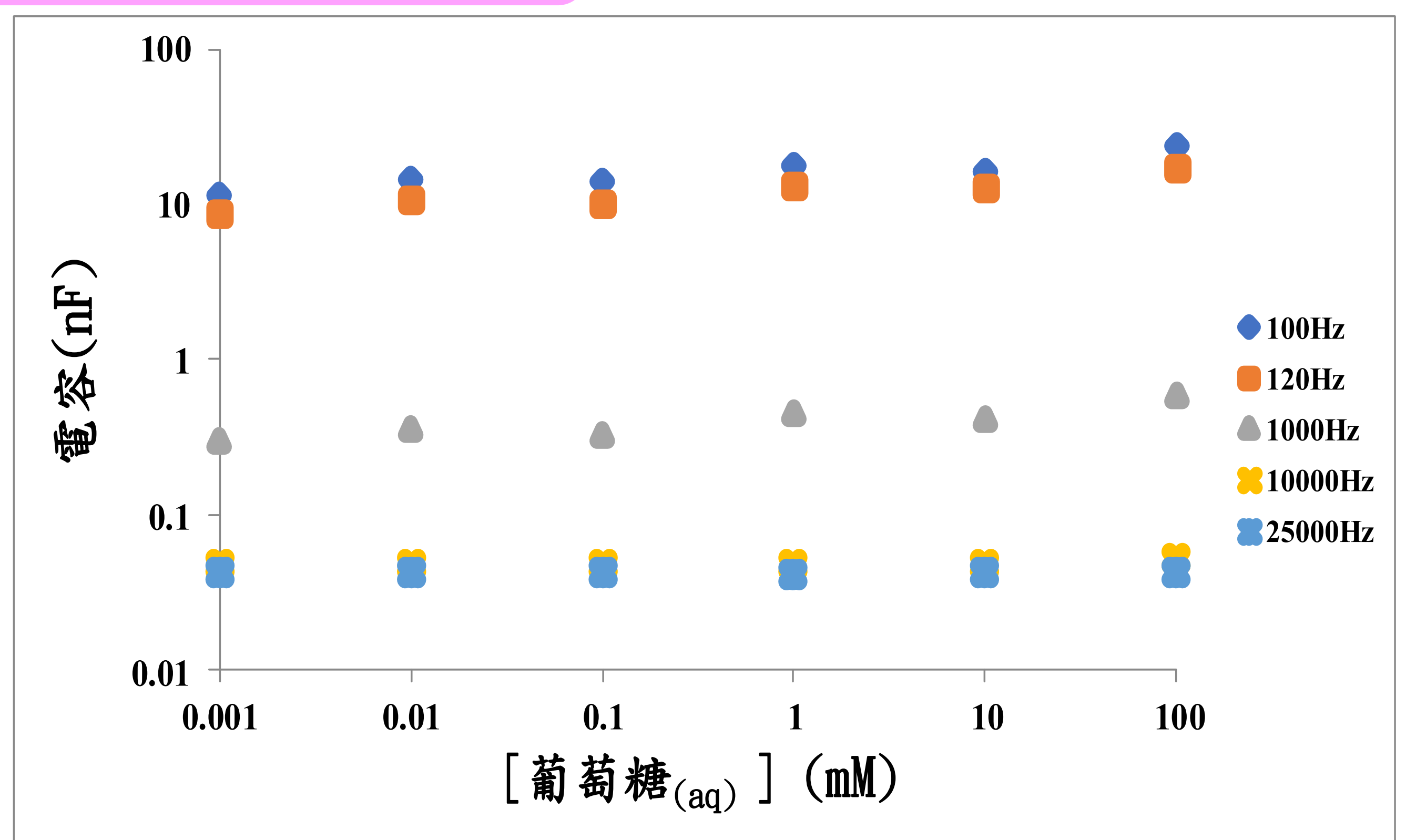


(圖 1) 指叉電極示意圖。

六、研究結果及結論



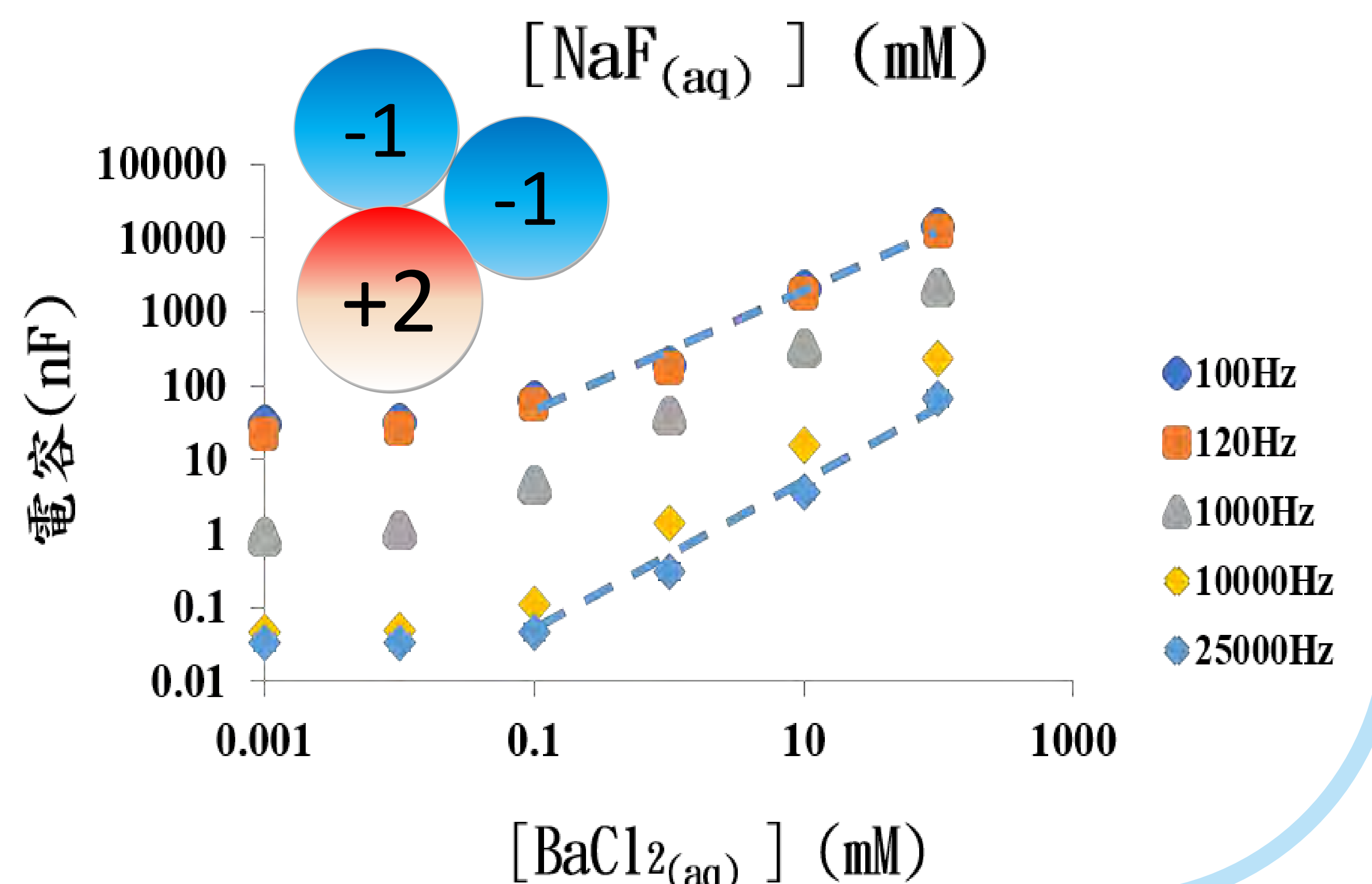
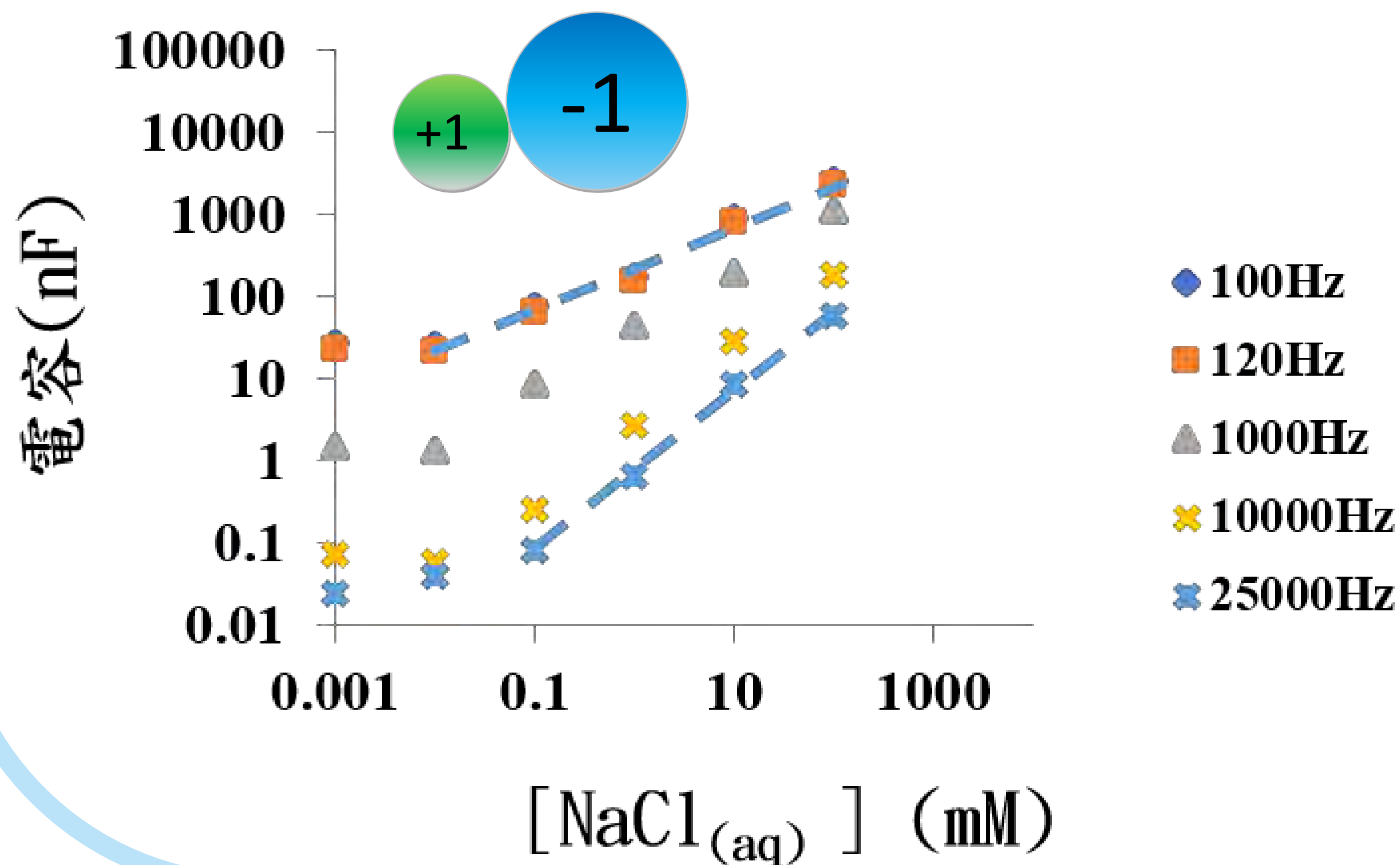
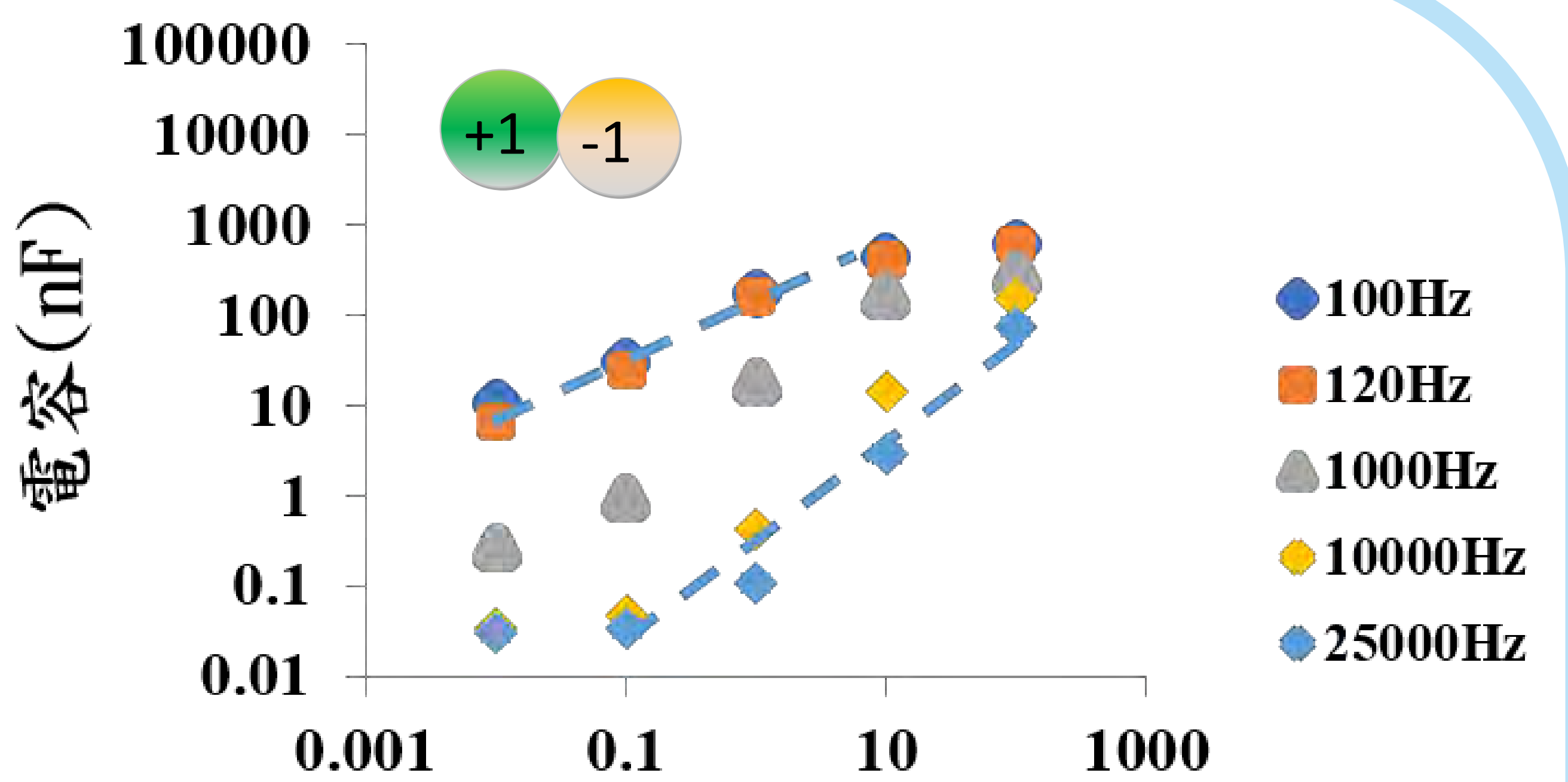
(圖 2) 銀墨水指叉電極比導電率與鹽水濃度關係圖。



(圖 3) 不同頻率下銀膠指叉電極電容與葡萄糖濃度關係圖。

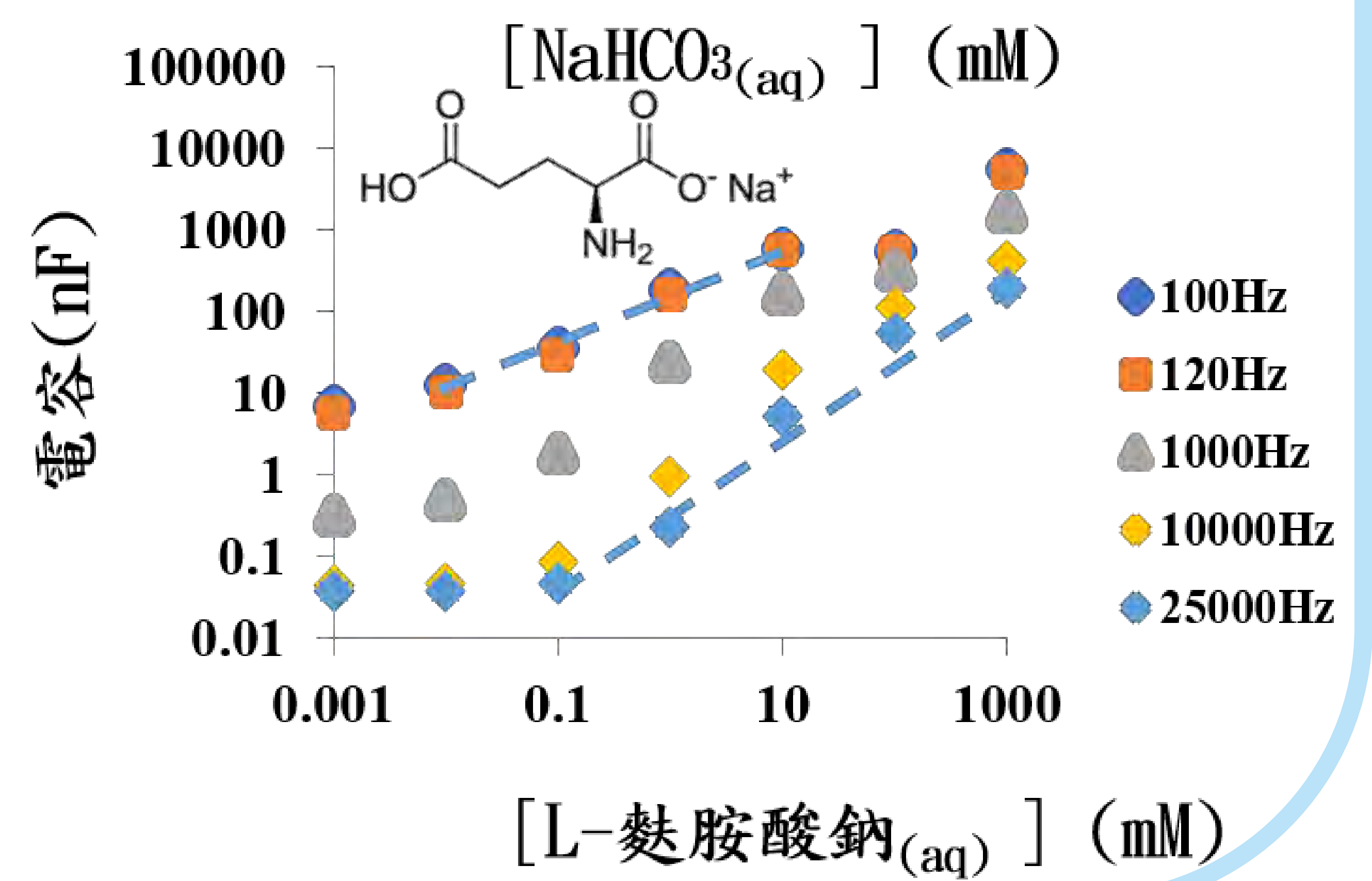
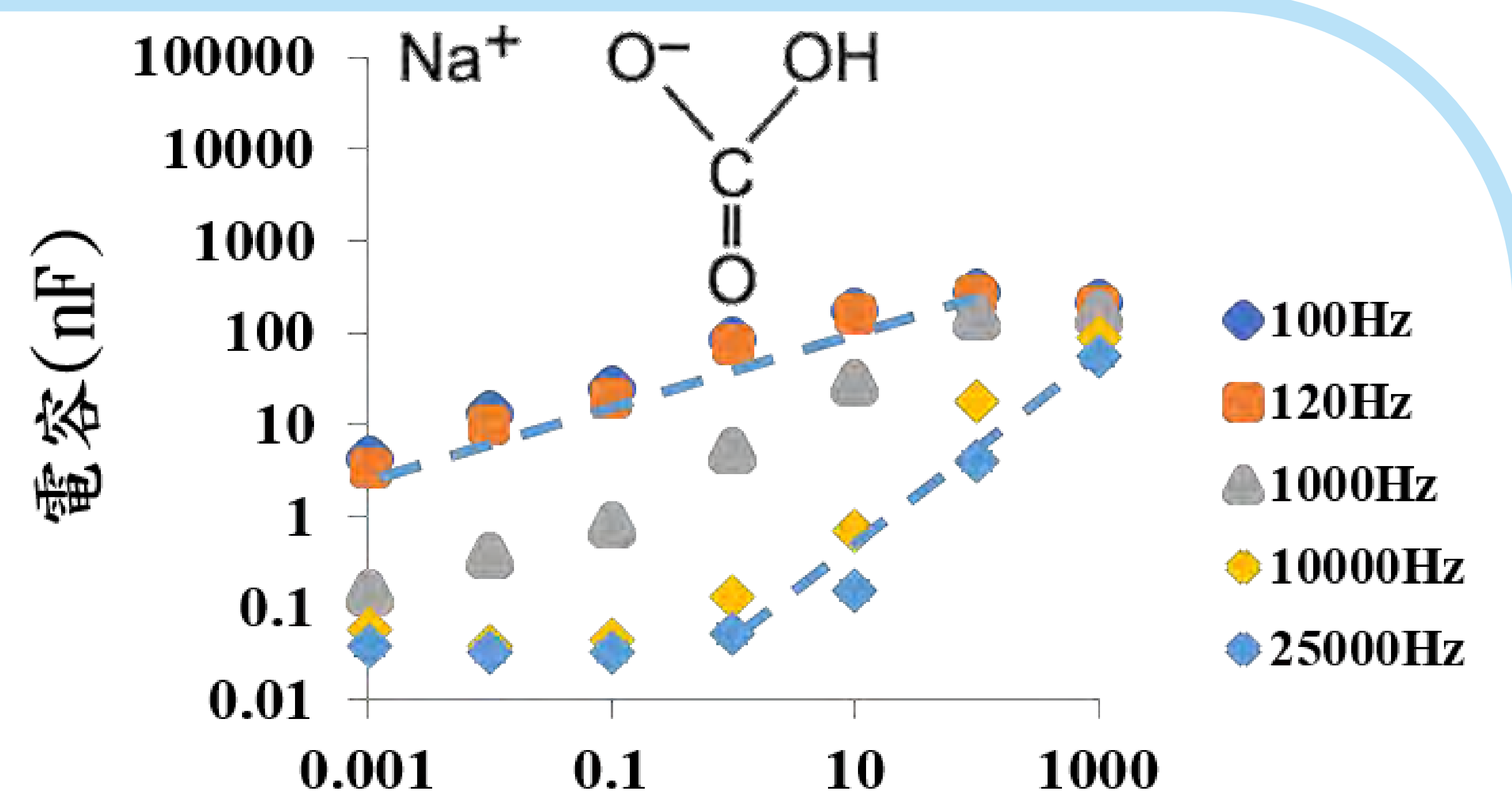
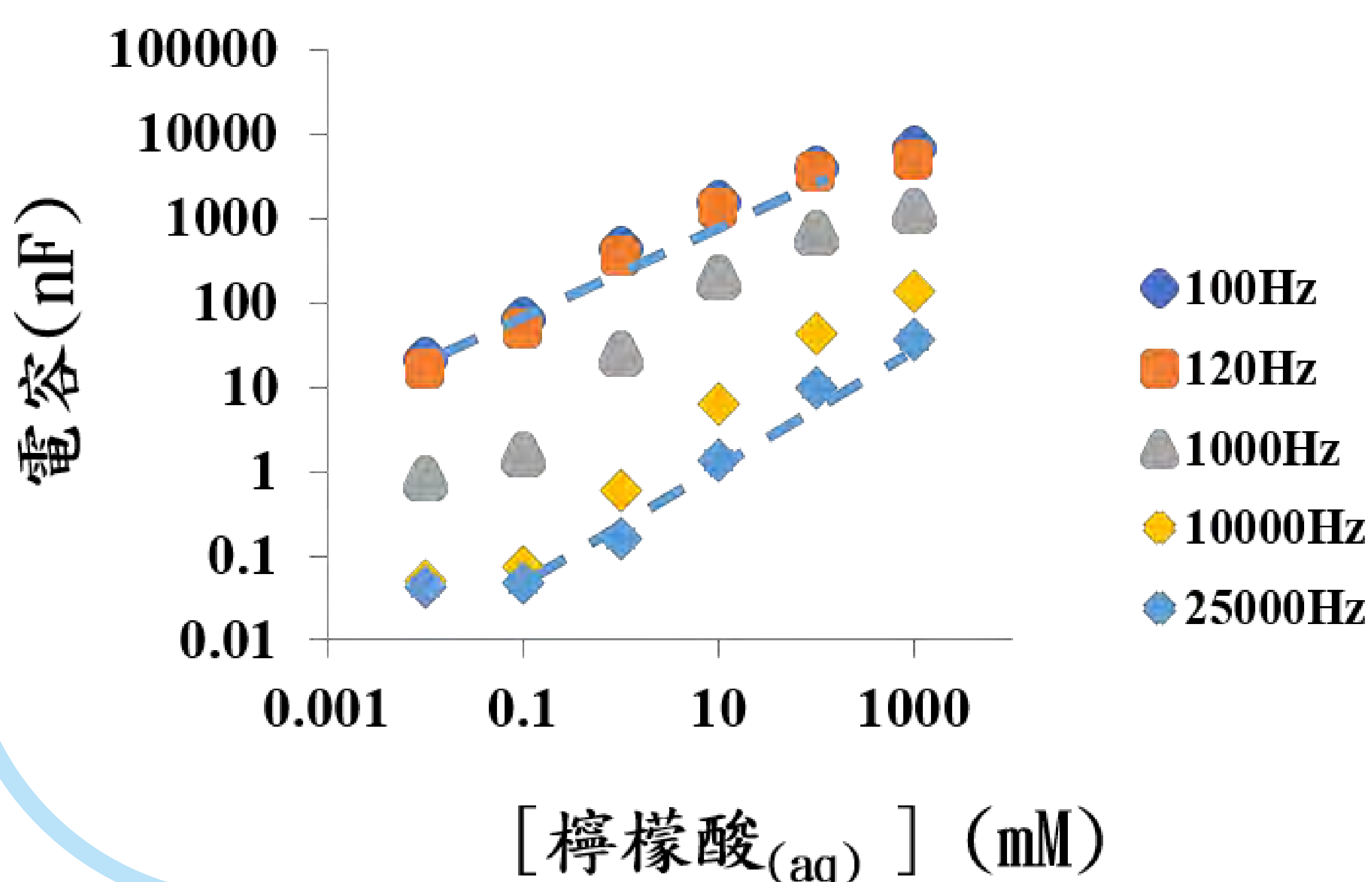
球型離子

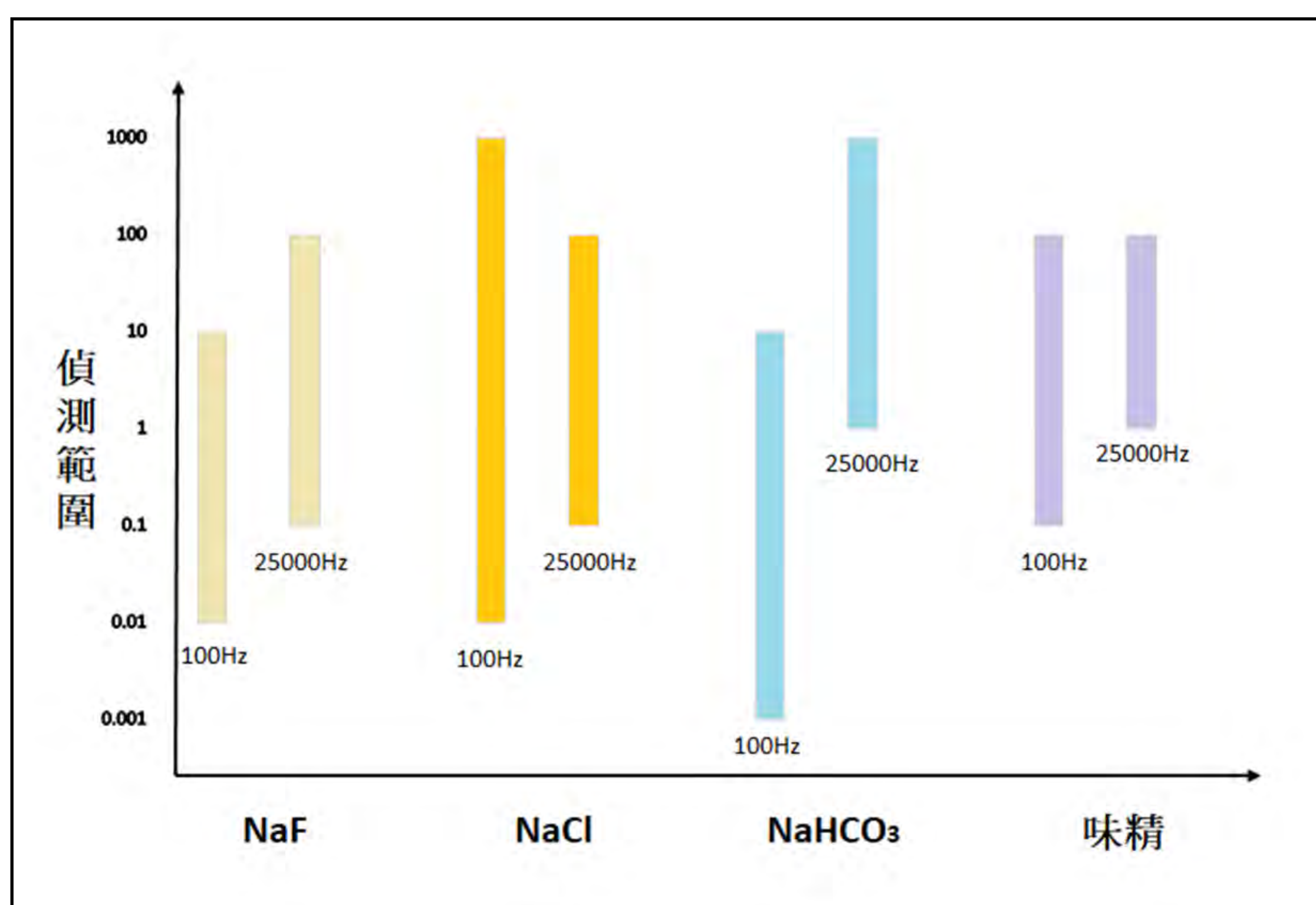
1. 可撓式電極可成功用於離子檢測。
2. 施加低交流頻率時，離子半徑愈小，偵測極限愈小。
3. 偵測靈敏度隨交流頻率上升而提高。



非球型離子與大型離子團

1. 離子團較單一離子更容易偵測到
2. 高頻下，電容值較大，偵測極限較小



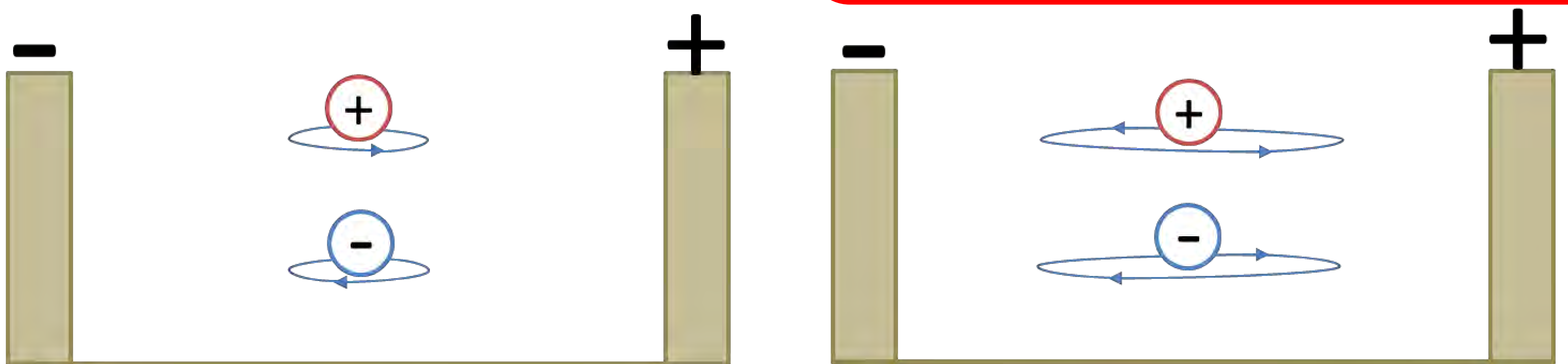


圖(4)各溶液偵測範圍比較

| 溶液 | 100Hz | 25000Hz | 比值 |
|---------------------------------|--------|---------|-------|
| NaF | 0.6088 | 1.1466 | 1.883 |
| NaCl | 0.5076 | 0.8386 | 1.652 |
| BaCl ₂ | 0.8065 | 1.0535 | 1.306 |
| Na ₂ CO ₃ | 0.3537 | 1.1184 | 3.162 |
| NaHCO ₃ | 0.4055 | 0.8322 | 2.052 |
| 味精 | 0.5751 | 0.9624 | 1.673 |

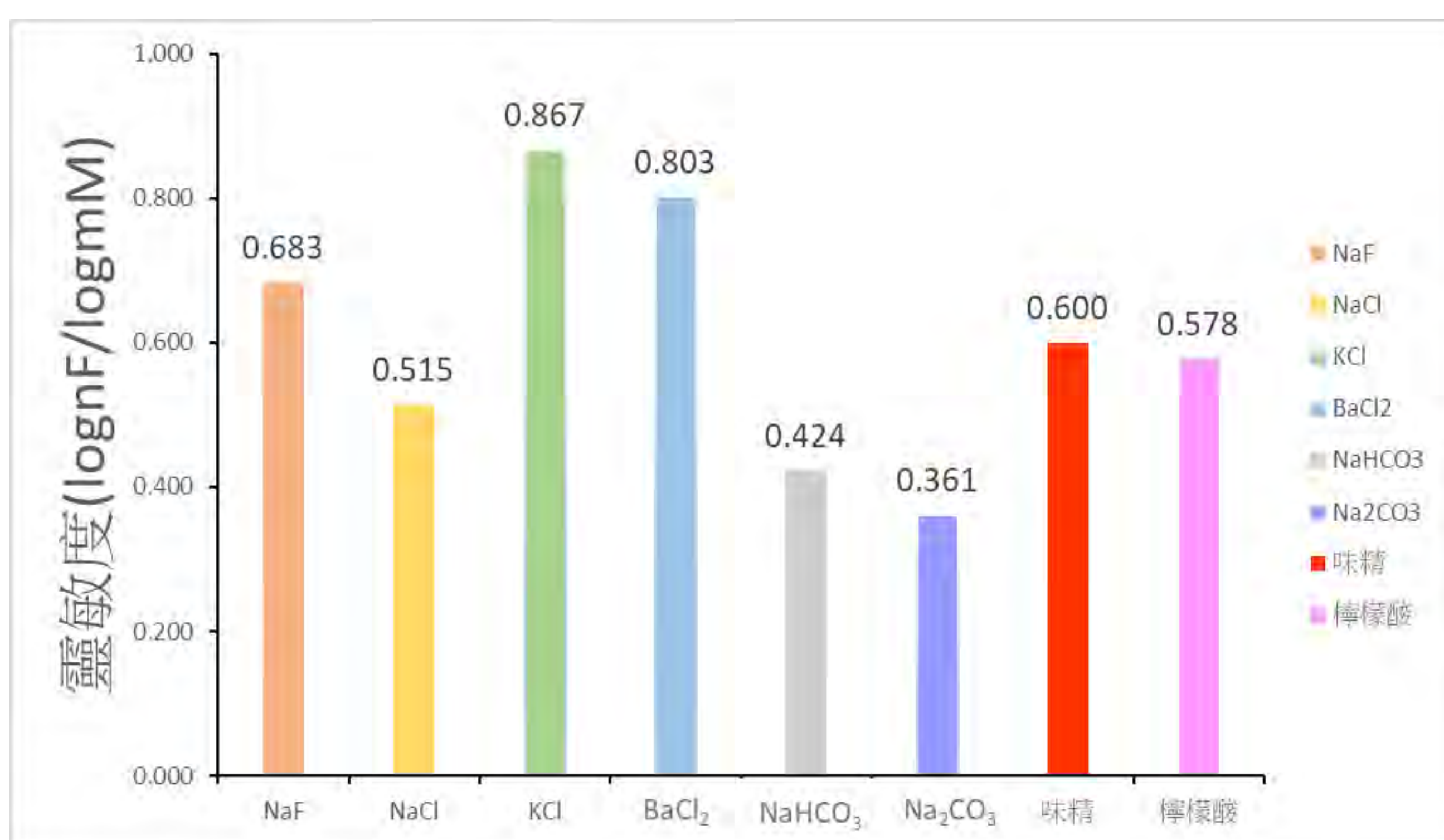
表(1)各溶液靈敏度之關係表。

1. 頻率越低時，則相較於高頻率的偵測範圍變大；
2. 在較低頻時，偵測的靈敏度相較於高頻低；
3. 分子量較大時，其靈敏度比值較低。

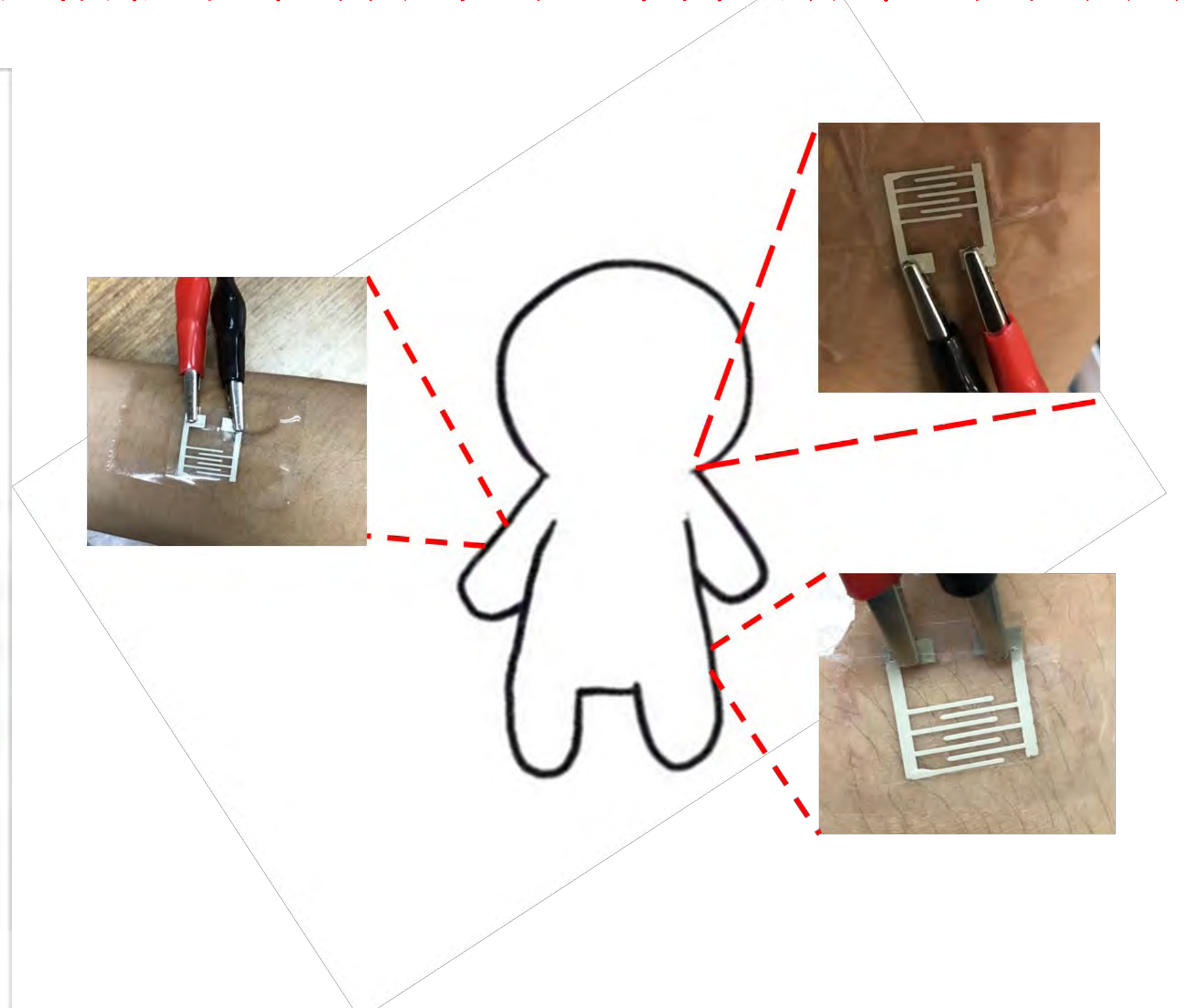


圖(5)電荷於高或低頻下電荷移動示意圖。

當頻率變高時，電荷移動到正負極的時間不夠，導致相較於低頻時的電荷移動來的不明顯。



圖(6)各溶液偵測靈敏度比較



圖(7)指叉電極偵測各部位示意圖

七、結論

- 一、成功開發出可撓式指叉電極偵測裝置。
- 二、能夠偵測到大型分子。
- 三、高頻率下，偵測靈敏度變大，偵測範圍縮小。
- 四、對於離子團有良好的感應效果。
- 五、每個生物分子或電解質對指叉電極而言都有不同的「生物指紋」。

八、展望

可撓式指叉電極預期可伏貼在具曲度的表面，如人體肌膚、機械軸承等處，感應周圍環境的變化，大增其推廣性和應用性。如監控人體體液中內某些物質的流失或增生以判斷健康程度。在未來，或許能夠不用那些複雜或是體積龐大的儀器，即能讓人們能進一步得知自己的健康狀態，達到早期發現、早期治療的效果。

九、文獻

- [1] 劉希彥(2008年7月13日)。生物晶片種類與應用。高雄縣中山工商綜合高中三年6班取自 <http://shs.edu.tw/works/essay/2008/10/2008103120145082.pdf>
- [2] 指叉電極設計原理。取自國家圖書館典藏電子 http://chur.chu.edu.tw/bitstream/987654321/5537/6/NC092CHPI0598002_5.pdf
- [3] 郭建儂(2014年6月)。以微電極陣列作為生物感測器之應用。國立中興大學
- [4] 李佳怡(2010年6月)。利用指叉式電極生物感測器結合阻抗式量測法檢測 LL-37。大同大學。
- [5] 龔毅、陳欣儒、陳力騏、鄭宗記(2015年8月)。電容式生物感測器之解析。國立台灣大學。
- [6] 圓的方塊、所屬專欄：電化學工作室、編輯：盧幫安(2017年6月)。雙電層理論的三個模型。取自 <https://kknews.cc/zh-tw/science/p5zaboe.html>
- [7] 張哲旭(2017年6月)。電化學分析各種檢定方法。取自 <http://www.sztspi.com/archives/28959.html>