

國立成功大學
醫學工程研究所

碩士論文

微壓電感測器系統於咬合力量測之探討

**Investigation of Piezoelectric Sensor System in
Occlusive Force Measurement**

研究生：林江諭

指導教授：張志涵

林哲信

中華民國九十六年一月

博碩士論文電子檔案上網授權書

(本份請授權人裝釘於紙本論文書名頁之次頁)

本授權書所授權之論文為授權人在 國立成功 大學 醫學工程 所
甲 組 九十五 學年度第 一 學期取得 碩 士學位之論文。

論文題目：微壓電感測器系統於咬合力量測之探討

指導教授：張志涵

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館及授權人畢業學校之圖書館陳列，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽，或並下載、列印。

※讀者基於非營利性質之線上檢索、閱覽或下載、列印上開論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人 林江諭

親筆簽名：

中 華 民 國 九 十 六 年 一 月 二 十 九 日

授權書

(博碩士論文)

本授權書所授權之論文為本人在 國立成功大學醫學工程研究所 甲組九十五年 度第 一 學期取得 碩 士學位之論文。

論文名稱：微壓電感測器系統於咬合力量測之探討

同意 不同意 (政府機關重製上網)

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予行政院國家科學委員會科學技術資料中心 (或其改制後之機構)、國家圖書館及本人畢業學校圖書館，得不限地域、時間與次數以微縮、光碟或數位化等各種方式重製後散布發行或上載網路。

同意 不同意 (圖書館影印)

本人具有著作財產權之論文全文資料，授予教育部指定送繳之圖書館及本人畢業學校圖書館，為學術研究之目的以各種方法重製，或為上述目的再授權他人以各種方法重製，不限地域與時間，惟每人以一份為限。

上述授權內容均無須訂立讓與及授權契約書。依本授權之發行權為非專屬性發行權利。依本授權所為之收錄、重製、發行及學術研發利用均為無償。上述同意與不同意之欄位若未勾選，本人同意視同授權。

指導教授姓名：

研究生簽名：

(親筆正楷)

學號：

(務必填寫)

日期：民國 96 年 01 月 29 日

1. 本授權書 (得自 <http://sticnet.stpi.org.tw/sticweb/html/theses/authorize.html>) 請以黑筆撰寫並影印裝訂於書名頁之次頁。
2. 授權第一項者，請確認學校是否代收，若無者，請個別再寄論文一本至台北市(106) 和平東路二段 106 號 1702 室 國科會科學技術資料中心。(電話:02-27377606 傳真：02-27377689)

國立成功大學

碩士論文

微壓電感測器系統於咬合力量測之探討

研究生：林江諭

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員

鍾高基 林江諭 許毓賢
林鼎勝 張志涵

指導教授：張志涵

所 長：張志涵

中華民國九十六年一月二十九日

Investigation of piezoelectric sensor in occlusive force
measurement

By

Chiang-Yu Lin

A Thesis Submitted to

Institute of Biomedical Engineering

National Cheng Kung University


Tainan 70101, Taiwan, R.O.C.

January 29, 2007

In Partial Fulfillment of the Requirement

For the Degree of Master of Science

Approved by



Tong-Sheng Lin

Che-Hsin Lin

Yu-Hsien Chiu

Idao-Chi Chung

中文摘要

牙齒主要功能之一為提供力量以咀嚼食物，故有效順暢地將力量由牙齒傳遞到食物上，是力量於齒冠分佈的重要目標。但現階段牙科生物力學之研究中，所量測到之牙齒力量大小皆僅量測咬合力之合力，尚無量測方法來量測咬合力或咀嚼時力量在牙冠面上之分布情形。

故本研究目的為利用壓電陶瓷試片來發展一套微型力量感測器，用以量測咬合力在牙冠面上之分布情形。研究中利用微機電製程技術，在厚度為150微米之銅箔上，製作對應壓電陶瓷片規格之電極及訊號傳輸線路，來克服壓電感測器之材料脆性，並提高壓電訊號之傳遞，另外利用電荷放大器來擷取壓電陶瓷試片受負荷時產生的電荷訊號，並將組裝完成之壓電陶瓷試片、訊號傳遞線與電荷放大器連接之系統在材料試驗機上進行動態校正測試，來探討所採用之壓電材料的感測靈敏度特性，並利用有限元素法與實際實驗所觀察到的材料特性，進行系統之基本定性探討。

由實驗與模擬之初步結果得知，壓電訊號僅與受壓力量大小有關，不會因受壓面積之大小差異而造成訊號有明顯之差異。故增加試片數量及縮小試片尺寸，為系統偵測分佈力之必要條件。實驗過程並發現利用預壓之方式，可有效改善訊號偏移之現象，若同時再採取動態修正之運算方式，以進行數據之運算處理，現階段系統可承受之感測力量大小為400N左右，其感測靈敏度之組內差異在1%~3%，且用校正曲線進行初步測試，其誤差約為2%。

關鍵字：壓電陶瓷、咬合力、電荷放大器、微機電製程、有限元素法

Abstract

One of the important functions of tooth is to provide force for food chewing. Therefore how to distribute the force on the crown in order to smoothly and effectively transmit the bite force from the tooth to the food would be an important issue. Currently, in the research of dental biomechanics, only the resultant occlusive force was measured quantitatively. The distribution of bite force on the tooth crown during biting or chewing is still unclear. The purpose of this study was to create a micro-piezoelectric force sensor system for the measuring of the distributed bite force on the tooth crown. The electrode and micro-cable system made from 150 μ m-thick copper foil with micro-electro-mechanical system were used to connect and transmission of piezoelectric signal from the sensor and overcome the possible brittle fracture of the piezoelectric ceramic material (PZT-5A) during loading. The piezoelectric charge generated from PZT-5A was measured with a charge amplifier (type 5015A, KISTLER) and calibrated using a material testing system (MTS type AG-I series, SHIMADZU). The finite element method was also used to analysis the piezoelectric effect of PZT-5A. The results showed that, both in experiment and simulation, the charge generated from the piezoelectric material was only related to the magnitude of applied force and would not be affected by the loading area on the piezoelectric material. What this indicated is that a sensor array with small sensor size might be needed for accurate measuring the distributed force. Fracture of piezoelectric material was observed at 400N loading from MTS which would decrease the sensitivity of piezoelectric sensor. During experiment, it was observed that providing an addition pre-load on the

PZT-5A and electrode would minimize the problem of drift phenomenon. Moreover, by applying the dynamical calibration on the drift effect would also improved the measured charge signals. To conclude, a basic system for single piezoelectric ceramic force sensor measurement was established. The inter-group sensitivity variation was 1% to 3 % and with the calibrated curve the primary test demonstrated a 2% error.

Key words: Piezoelectric ceramics (PZT), Bite force, Charge amplifier, Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), Finite Element Method (FEM)

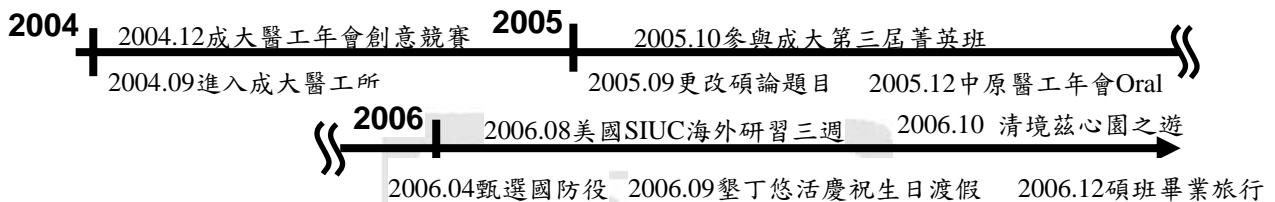


致 謝

「希望大家以後再回想，這段在研究所時間時，腦海中浮出的印象是很努力地、是很充實地、是感到相當盡力地；而不是帶有失落感地懊悔說：為何當初不用功點？」這段話是有次在實驗室Meeting時，老師分享給大家的一個人生感觸。對江諭而言，是相當具有衝擊性的一段話，亦是激勵著江諭在這最後幾個月的研究日子裡，讓研究所的學習是沒有遺憾的最大能量來源，謝謝您！我的恩師，張志涵老師。

「問題是否可以重現？將解決方式拿掉，是否依然會出現一樣的問題」；「避免研究失敗的發生並提高研究價值的方法—就是要有足夠的資料瀏覽及收集」兩年半的時間，江諭在要離校的時候，終於領悟了老師要江諭培養出來之嚴謹的研究態度。

另外，感謝口試期間，鍾高基老師、林哲信老師、林鼎勝老師及邱毓賢博士提供許多寶貴之意見及見解，使本論文得以呈現更完整，江諭在此深致謝意。



碩士班學習過程：2004年碩一便幸運地跟隨著瑞廷學長參加2004年12月底醫工年會中的第一屆創意競賽的系統製作；更在2005年碩二開學不久，改變碩論的題目的同時，參與了成大工學院2006第三屆菁英培訓班的課程；2005年12月參加在中原大學醫工年會的Oral Presentation。更在2006年06月底，在面臨畢業的壓力時，獲得到美國SIUC海外研習三星期的出國機會。

在此同時感謝親愛的瑞廷、恆立、柱龍、文杰、薇清、莊淑芬醫師、劉澄醫師、世永、世偉、妙俶及暉勳等學長姊們研究的精神典範及為人處事的圓融，一直是江諭努力的目標；亦感謝國誌、崇德、揚凱、伊芳、得均、惠萍、展鵬、慶澤、舒品、千芝、豆子及鍾鳴等同期同學們的關心鼓勵及生日聚會的參與；更感謝奕苓、耀德、文傑、雙蘊、嘉穗、耕任及俶萍在準備畢業口試時的幫忙；在此感謝成大工學院讓iVan多獲得了一群超棒的第三屆菁英班朋友們：Benson, Kevin, TACO, Jay, Eric, Jason, Jimmy, Macro, Homz, Payee, Patrick, Javis, Cindy, Renee, Candy, Connie, Amanda, Mickey, Yvonne. 江諭在碩士班學習過程期間，因為有你們的陪伴使得學習的路上更加精采、更加有意義。更要感謝的當然就是一直默默在旁鼓勵江諭的家人們：多才多藝的老爸、優良身教的老媽、領導榜樣的老哥、無敵可愛的小依萱及包容體貼的小拍，在完成人生中第一本著作的過程中，江諭因為有你們的陪伴及體諒，而感到相當地幸福與滿足。

「碰到瓶頸時，人們習慣以放棄代替努力」

「放棄任何事物前，要確定自己是否已盡了一切努力，否則一再的放棄將使我們失去所有。」

林江諭 僅誌於 台南租處曼哈頓社區

中華民國九十六年一月

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iv
目 錄	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
符號說明	xii
第一章 緒 論	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 咬合力	1
1.1.2 壓電效應	2
1.2 文獻回顧.....	3
1.2.1 咬合力	3
1.2.2 壓電效應	6
1.3 研究動機與目的	9
第二章 材料與方法	10
2.1 儀器及設備	11
2.1.1 壓電陶瓷試片 PZT-5A.....	11
2.1.2 電荷放大器 KISTLER 5015A.....	12
2.1.3 快速原型機(RP) Z-Printer 310.....	14
2.1.4 資料擷取器 instruNet.....	17

2.1.5 材料試驗機 SHIMADZU AG-I系列(桌上型).....	18
2.2 研究方法與步驟.....	19
2.2.1 壓電感測試片之材料參數量測 Nano-Indentor	19
2.2.2 微機電製程 MEMS	20
2.2.3 同步量測力量訊號	25
2.2.4 微壓電式力量感測器系統之校正.....	26
2.2.5 有線元素法分析.....	27
第三章 結果與討論.....	29
3.1 微壓電式力量感測器系統實驗結果	29
3.1.1 負荷大小與壓電感測訊號之線性探討	29
3.1.2 不同承受面積之相同負荷對壓電感測訊號之影響	38
3.1.3 微壓電式力量感測器系統之動態量測	41
3.2 有限元素法分析模擬結果.....	43
3.2.1 不同承受面積之相同負荷對壓電感測訊號之影響	43
3.2.2 不同幾何外型之壓電陶瓷感測試片之模擬探討	53
3.2.3 壓電陶瓷試片之不同埋入深度對訊號之模擬探討	55
3.2.4 四顆壓電感測元件對力量分佈之模擬探討	57
3.3 微壓電式力量感測器系統實驗結果之討論	58
3.4 有限元素法模擬分析結果之討論.....	67
第四章 結論與未來展望.....	68
4.1 結論.....	68
4.2 未來展望.....	70

第五章 建議.....	71
參考文獻.....	73
附錄 A、PZT-5A #1 探討材料特性之實驗數據.....	75
附錄 B、供應研究上所需材料之相關廠商.....	93



表 目 錄

表2-1	奈米壓痕材料試驗結果	20
表2-2	PZT-5A之相關材料參數	28
表3-1	資料記錄器InstruNet之力量紀錄	30
表3-2	PZT-5A #1 實驗特性整理	33
表3-3	PZT-5A #2 實驗特性整理	34
表3-4	利用校正曲線反算力量大小之誤差值.....	37
表3-5	不同承受面積大小與電荷輸出之特性.....	40
表3-6	不同力量大小與電荷輸出之特性.....	40
表3-7	不同施力點位置之相對訊號反應.....	42
表3-8	100N下不同幾何模型之訊號差異	50
表3-9	100N下不同承受面積之訊號差異	51
表3-10	非線性漂移量造成之結果	63
表3-11	壓電試片之平均偏移量.....	64

圖目錄

圖1-1	壓電效應示意圖	2
圖1-2	微小型壓電感測器 1996, Mericske-Stern R.....	4
圖1-3	壓電薄膜(PVDF)感測器 2004, Kurt Rottner.....	5
圖1-4	壓阻式感測器 2006, V.A. Bousdras.....	6
圖1-5	PVDF貼附於剛體表面之壓電訊號	7
圖1-6	PVDF貼附於彈性表面之壓電訊號	7
圖1-7	臨床3D齒雕之陶瓷牙冠成品	8
圖2-1	本研究之主要流程步驟	10
圖2-2	壓電陶瓷試片PZT-5A	11
圖2-3	電荷放大器 KISTLER Charge meter 5015A.....	12
圖2-4	剪修版之原廠訊號線	14
圖2-5	初步系統使用之原廠訊號線	14
圖2-6	快速原型機 Z-Printer 310	15
圖2-7	快速原型之模子成品	15
圖2-8	不同面積與型態之壓印頭	16
圖2-9	資料記錄器 instruNet硬體與連接示意圖	17
圖2-10	資料記錄器 instruNet軟體介面	17
圖2-11	材料試驗機SHIMADZU AG-I系列(桌上型)整體外觀圖	18
圖2-12	力量感測器(1kN).....	18
圖2-13	自製壓印頭透過保麗龍傳遞力量.....	18
圖2-14	奈米壓痕試驗機.....	19
圖2-15	電極訊號傳輸線之示意圖	20
圖2-16	經切割之光罩輸出完成品	21

圖2-17 100 μ m線寬之MEMS訊號線完成品	24
圖2-18 利用PI膠帶避免訊號線因碰觸而短路.....	24
圖2-19 SHIMADZU AG-I 桌上型材料試驗機之類比輸出端	25
圖2-20 類比信號輸出連接圖	25
圖2-21 類比信號輸入紀錄器示意圖.....	25
圖2-22 資料記錄器同步擷取之訊號.....	26
圖2-23 車床加工之自製壓印頭.....	26
圖2-24 經保麗龍層傳遞力量	26
圖2-25 材料之機械強度，彈性係數 Compliance form ([s] matrix).....	27
圖2-26 材料之機械強度，彈性係數 Stiffness form ([c] matrix).....	28
圖3-1 初步系統之完整架構圖	29
圖3-2 資料記錄器instruNet同步擷取之力量紀錄	30
圖3-3 MTS 內部軟體力量紀錄表	30
圖3-4 單顆PZT-5A之力量-電荷特性	32
圖3-5 不同顆PZT-5A之力量-電荷特性.....	35
圖3-6 PZT-5A #3之校正曲線.....	36
圖3-7 利用MTS給與一不同設定之未知力數據圖	37
圖3-8 利用實驗室自製式小型MTS初步探討其特性	38
圖3-9 初部量測特性之系統架構	39
圖3-10 不同承受面積大小與電荷輸出之特性	39
圖3-11 不同力量大小與電荷輸出之特性.....	40
圖3-12 快速原型機製作實驗用模子之初步構圖	41
圖3-13 受力點位置與壓電訊號之關係圖.....	41
圖3-14 100N 100% Area of Surface, 14.018V	43
圖3-15 100N 50% Area of Surface, 14.018V	44

圖3-16 100N 100% Area of Surface, 10.588V	45
圖3-17 100N 50% Area of Surface, 10.588V	46
圖3-18 100N 100% Area of Surface, 8.162V	47
圖3-19 100N 50% Area of Surface, 8.162V	48
圖3-20 100N 100% Area of Surface, 7.432V	49
圖3-21 100N 50% Area of Surface, 7.432V	49
圖3-22 正方形外型之壓電試片－有限元素探討	53
圖3-23 圓形外型之壓電試片－有限元素探討	54
圖3-24 壓電試片埋入深度差異之示意圖－有限元素探討	55
圖3-25 壓電感測試片埋入深度為10mm時之模擬訊號結果.....	56
圖3-26 壓電感測試片埋入深度為15mm時之模擬訊號結果.....	56
圖3-27 施力點離兩相鄰的壓電感測試片距離相同	57
圖3-28 PZT-5A之力量-電荷量特性討論圖	58
圖3-29 不同PZT-5A之力量-電荷量特性討論圖	59
圖3-30 利用壓印頭進行對位示意圖	59
圖3-31 利用一結構體給予預壓力之示意圖	60
圖3-32 不同承受面積之壓印頭－快速原型製作	60
圖3-33 特性實驗探討之模子－快速原型製作	61
圖3-34 微機電製程之電極訊號傳輸線路圖	61
圖3-35 承受500N後，經手碰即破壞的試片圖	62
圖3-36 PZT-5A #1 平均靈敏度之特性圖	62
圖3-37 壓電試片之平均偏移量	64
圖3-38 MTS力量衰減但壓電訊號不變之紀錄圖	65
圖3-39 MTS內部力量(力量衰減)紀錄圖	65
圖3-40 PZT-5A#3校正曲線之誤差問題	70

符號說明

Q：電荷量

V：電壓值

C：電容值

D_{ij} ：壓電係數

ϵ_r ：相對介電常數



第一章

緒論

過大的咬合力容易造成補綴過牙齒的損壞，但足夠大的咬合力才容易使食物破碎，提高養份吸收。Hatch JP學者更在2000年提出咬合力，是一個較適合用來評估咀嚼功能的定義名詞。牙齒補綴術是牙科醫學臨床上常見的手術，常見補綴的材料有陶瓷、金屬等，依補綴的材料及形狀等因素，是否影響到咬合力的大小，皆是學者們分別感興趣的研究課題。

臨床部份，目前國內外研究在牙科生物力學上之發展，已相當成熟，但皆僅止於量測到牙冠上咬合時的最大合力，相較於實際咬食物時的真實咀嚼行為有些許的差異。雖考慮到咀嚼東西時的效率，但基於避免牙冠面上發生斷裂的可能性，量測牙冠面上受力的分佈情形將可成為避免牙冠面發生斷裂的方式之一。也就是在牙冠將發生斷裂時，告知該受測者停止咀嚼行為，以避免牙冠上承受高於牙冠強度之力而導致牙冠斷裂。

1.1 研究背景

1.1.1 咬合力

因此，學者們為了探討咬合力的大小，紛紛利用了不同的量測方法，如：利用EMG量測咀嚼肌的力量大小、利用牙叉(Fork)量測咬合力與深度的關係、利用Fuji Film的墨汁多寡與力量關係以及利用應變規量測咬合力大小等不同量測的方法。

但目前為止，進行咬合力探討的相關學者們，所得到的咬合力皆是咬合力的合力大小與方向。對於補綴後的牙冠而言，結構中材料的改變將使力

量分佈也跟著改變。所以，對於補綴後的牙冠，知道咬合力的合力大小而不知道咬合力實際分佈情況與大小的話，相同的合力大小施在經補綴的牙冠面上時，將容易造成牙冠的再次損壞，甚至造成更嚴重的斷裂。

咬合力(Bite force or Occlusal force)的量測與探討為牙科臨床上常見也是最為複雜的研究之一，隨著咬合面的型態不同、食物型態的不同、咬合面面積的大小差異及各自不同角色扮演的咬合牙(切斷、磨碎)等因素，改變其中之一因素都將使咬合力產生大的改變。另外，對於目前市面上熱門的人工植牙，為了使人工植牙的使用壽命愈長愈好，咬合力的大小對於植牙後齒槽骨的刺激生長與植體與齒槽骨介面上破壞之平衡點更是各學者進行探討咬合力的動機。

1.1.2 壓電效應

何謂壓電效應(Piezoelectric effect)? “壓電”顧名思義當對壓電感測元件施加一個力時，感測器將會產生同施加力成比例的電荷。

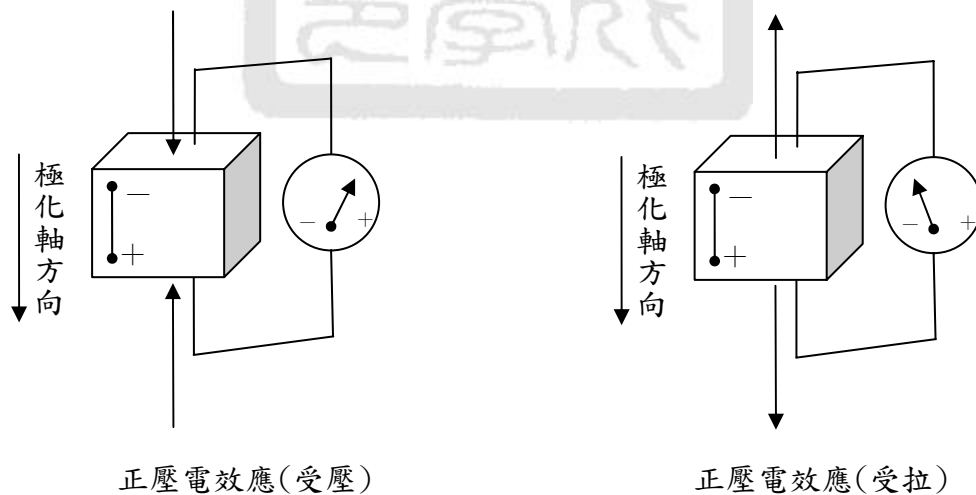


圖1-1 壓電效應示意圖

天然石英晶體是非常理想的壓電材料，但現在石英晶體可以在高溫高壓下進行人工合成。其他壓電材料也有不同的特殊應用。石英晶體在感測器內不同的排列將會產生不同的效果。這個效果可以通過石英晶體的不同切型來獲得。

為何要選用“壓電陶瓷”來當本研究的感測器材料？壓電陶瓷的優點在於：材料本身屬於主動式材料，即不需如同被動式材料(Strain Gage)一般，需給予一個外加電源來量測其訊號。

應用壓電效應原理，所製造的量測系統具有一獨特的量測特色，即系統可隨時自由地決定量測的零點(初始值)，也就是說進行每次量測時，都具有不同的初始參考值。施給感測器一新的負載時，即會有一相對於該量測時之新零點的對應訊號輸出。

本研究選用壓電陶瓷試片當感測器的本體的原因之一則在於此，利用壓電材料的主動式訊號輸出:給予一機械力負荷後，輸出一成正比例的電荷訊號輸出，來直接量測施力與輸出訊號之間的關係。

又為了探討實際埋入人工陶瓷牙冠後，實際進行力量量測的目的。故本研究進行中，取壓電陶瓷為感測器的另一動機則為該壓電陶瓷的機械特性與牙科臨床上補綴所採用的人工陶瓷牙冠之材料特性是相近的，本研究希望藉由材料上的相容性，提高力量量測上的可信度與可靠度。

1.2 文獻回顧

1.2.1 咬合力

在牙科生物力學領域中，咬合力的量測與定義一直是相關學者研究上探討的重要主題之一。特別在人工植牙受咬合力的情況下，力量如何傳遞，受咬合力所施之大小、方向與位置差異而造成的高應力產生，導致齒槽骨

的收縮與植體的破壞等情況，是現階段牙科生物力學臨床上學者感興趣之課題。由文獻回顧中可看到學者們利用了許多不同的量測方法與設備來進行咬合力的量測；Mericske-Stern R.在1996年利用一微小型壓電感測器直接置入ITI-Implant來進行體內與體外咬合力量測，並達到可同時量測到三方向的咬合力大小，Mericske利用了配合ITI-Implant來結合壓電感測器，來達到減少在垂直方向上的高度增加，更克服了在更早前對於咬合力的研究，如利用臨床上使用的咬合叉、咬合板及其他咬合設備來進行咬合力的量測，僅可量測到單一垂直方向上的咬合力大小的限制。

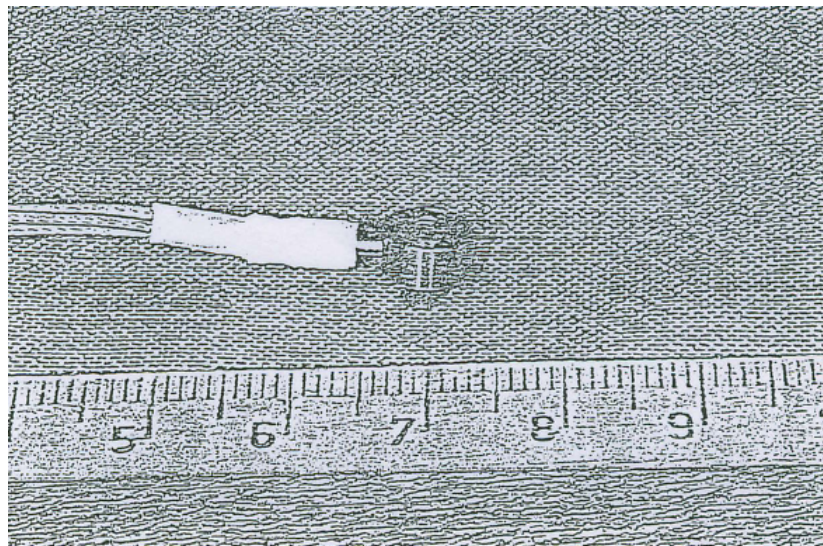


圖1-2 微小型壓電感測器 1996, Mericske-Stern R [14]

牙冠面的形態設計對於咬合力的影響與實際咬合不同食物時牙齒所產生的彎矩大小確實有差異。在2003年Morneburg的研究中，咬合面的縮小對於咬合食物時所產生的彎矩的確有降低的效果，另外方面亦同樣指出，在咬合面的形態設計上，平坦的設計與較陡峭的設計並無影響彎矩大小的結果，僅有在咬合不同食物的情況下，較軟的食物產生的彎矩較小。Morneburg的研究結果中，在不同型態的牙冠下，利用Strain gage量測到

的彎矩是沒有差異的結果，這與力學觀念上所推斷的結果是有所差異的。
另外，相關研究所使用之量測系統如下：

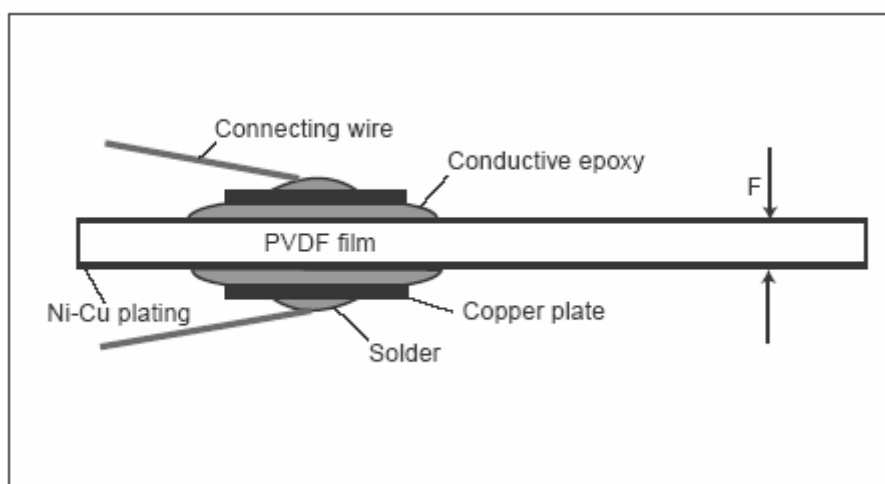
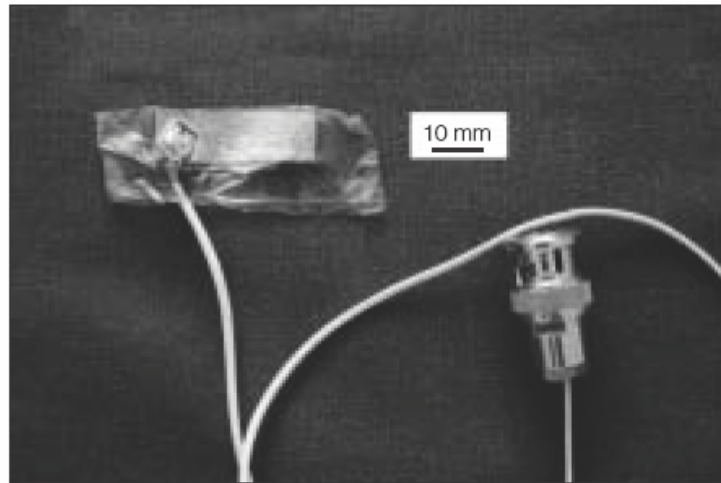


圖1-3 壓電薄膜(PVDF)感測器 2004, Kurt Rottner [15]

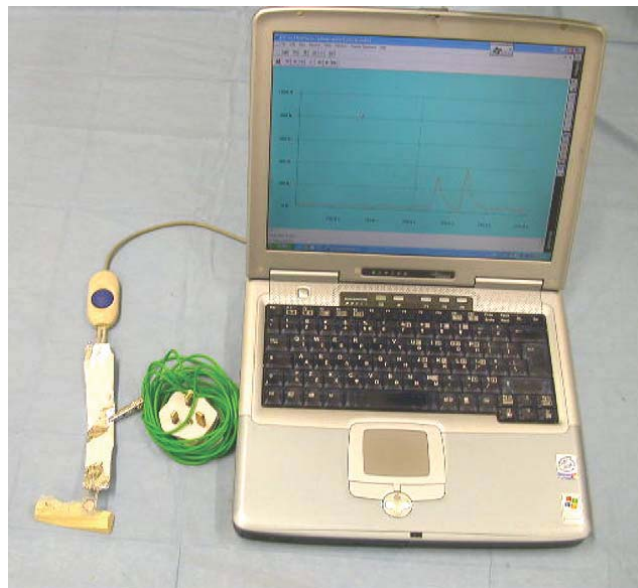


圖1-4 壓阻式感測器 2006, V.A. Bousdras [8]

1.2.2 壓電效應

常見壓電材料應用於感測技術上的是PVDF(壓電薄膜)與PZT(壓電陶瓷), 而本研究所使用的壓電材料是屬於壓電陶瓷材料中的一種, PZT-5A。

就本研究而言，為何採用PZT材料的原因之一如下：

國內研究指出，PDVF與PZT材料應用層面的優缺點，壓電薄膜與壓電陶瓷相比，在機電（Electromechanical）的傳遞上相對較弱，故在此研究目的下選用PZT為此研究方法的材料。

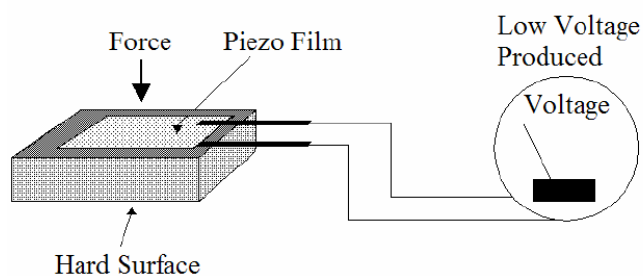


圖1-5 PVDF貼附於剛體表面之壓電訊號

(PVDF置在剛體表面並施加一外力，由於其機電性較差，故輸出電壓小。)

(資料來源：[3])

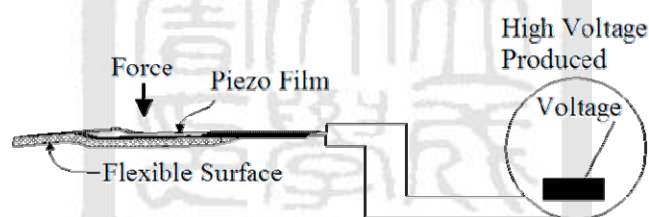


圖1-6 PVDF貼附於彈性表面之壓電訊號

(PVDF置在彈性體上並施加一外力，其輸出電壓較為大。)

(資料來源：[3])

壓電感測器已經證明在快速的和週期性的過程測試是非常成功的。同其他感測器比壓電感測器的優點有：壽命長、高靈敏度、寬測試範圍、測試頻率高與溫度適用範圍寬等優點。

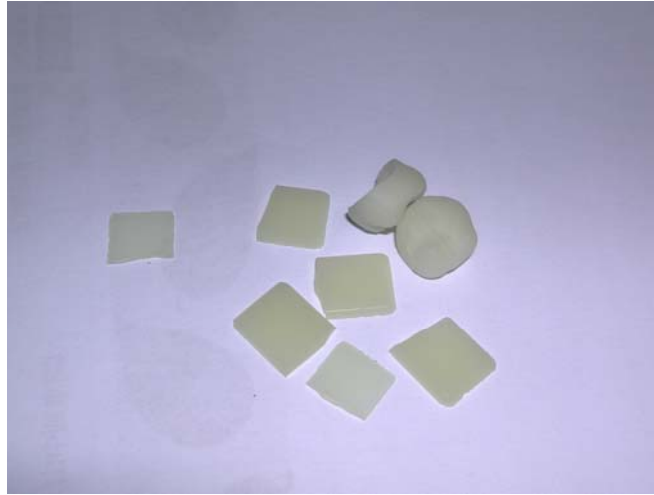


圖1-7 臨床3D齒雕之陶瓷牙冠成品

另一目的則為考慮到整體結構之相容性，故選擇同屬為陶瓷類結構之壓電陶瓷為本研究所用之感測元件。



1.3 研究動機與目的

由牙科生物力學之相關研究與實驗可得知，所探討與獲得之數據皆屬咬合力之合力大小，尚無研究進行量測牙冠面上力量之分佈情況。量測的方法，一直停留在量測咬合力的合力大小與方向，又咬合力將隨著咬合面型態差異、食物型態及咬合面面積大小等產生差異，但目前量測到的差異都僅止於咬合力之合力上之差異，其咬合力之分佈情況是否也同樣產生差異呢？

故本研究的研究動機就在於，建立一自製式微壓電感測器用於量測牙科生物力學之咬合力，量測在牙冠面上咬合力的分佈情形而非僅量測到咬合力的合力。

本研究採用壓電陶瓷試片搭配微機電製程來製造一壓電式力量感測器並由壓電效應所產生的電荷訊號來反推咬合力的大小，並透過有限元素法進行不同受力條件參數設計對咬合力分佈之探討，以期對臨床上牙齒修復時進行人工牙冠製作之設計型態有所助益及量測咬合時，牙冠上分佈的特徵點，定義主要咬合時咬合點之力量與方向，以利提供利用有限元素分析時，給予合理之施力。

第二章 材料與方法

本研究中主要分為兩大方向來進行系統建立之探討：壓電特性實驗探討與有限元素法模擬分析之輔助探討。以下就這兩方向，分別介紹所使用之材料儀器與方法並將研究之流程圖表示如下：

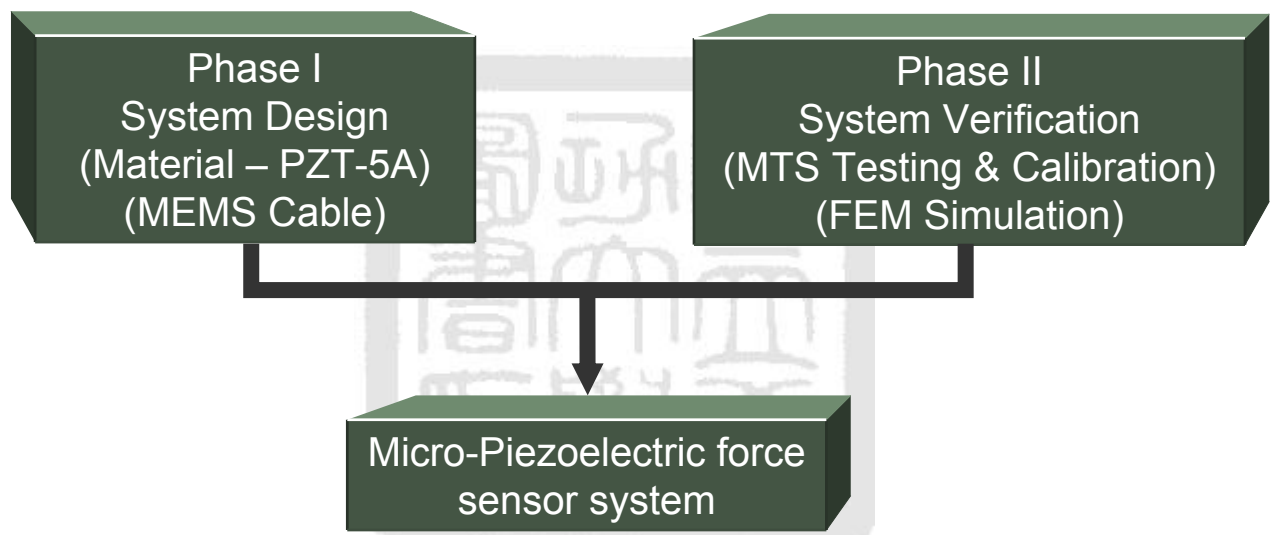


圖2-1 本研究之主要流程步驟

2.1 儀器及設備

2.1.1 壓電陶瓷試片 PZT-5A

本研究所採用的感測元件是由先寧電子公司配合研究所需之尺寸與特性，所特別製造加工完成的試片(如圖)。

靜態電容值(C_p):

$$C_p = 115\text{nF} \pm 10\% \quad (\text{Measured by LCR meter at 1KHz, 10Vrms})$$

相對介電常數(ϵ_r):

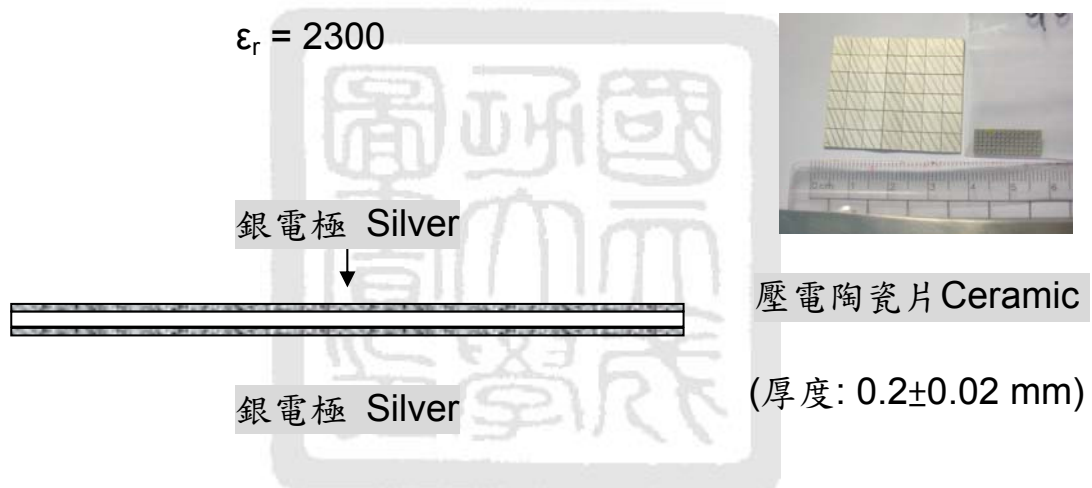


圖2-2 壓電陶瓷試片PZT-5A

2.1.2 電荷放大器 KISTLER 5015A



圖2-3 電荷放大器 KISTLER Charge meter 5015A

屬於本研究中實驗上使用的主要儀器，電荷放大器(KISTLER 5015A)。有高量測範圍的優點($\pm 2 \sim \pm 2,200,000$ pC)之外，另一優點則為訊號衰減(drift)的情況可降低到小於 0.03 pC/s，更搭配了簡單易懂的使用介面，使得研究實驗上擷取壓電訊號更為順利。

電荷放大器的原理，在1950年被W.P. Kistler第一個提出。“電荷放大器”一詞的名稱，往往讓人誤以為是用來放大電荷訊號的一種放大器設備。其實並不是放大電荷訊號，而是將電荷訊號轉換為成比例的電壓訊號。與同樣是應用於量測電荷訊號的靜電計而言，電荷放大器消除了靜電計的缺點。

因電荷放大器是將電荷轉換成電壓。在原理上，電荷放大器包括MOS或J-FET電晶體的高增益電壓放大器，它能在輸入獲得高絕緣阻抗。放大器通過高絕緣電容連接到負反饋上。因此，放大器可以作積分器用於輸入電荷。對於感測器，外加機械負載容易產生電荷變化。在輸出端顯示壓電感測器電荷改變的積分和正比於整個電荷的改變（包括機械負載產生的電荷）的電壓信號。

由於放大器有很大的增益電壓（ V 趨近於無窮），感測器和電纜的電容值可以忽略不記，所以輸出電壓值正比於電荷量。放大器在輸入端（ R_i 大小 $10^{14}\Omega$ ）必須是高絕緣的，對於感測器和電纜也必須是高絕緣，否則輸出端信號將產生偏差。

Charge Amplifier (KISTLER 5015A)

$$U_0 = \frac{Q}{C_s + C_c + C_r} \longrightarrow U_0 = \frac{Q}{C_r}$$

C_s : Sensor Capacitance

C_c : Cable Capacitance

C_r : Switched - in rang Capacitance

所有KISTLER的電荷放大器和標準感測器和電纜都符合電磁相容標準 EN 50081-1/2 和 EN 50082-1/2 同樣符合安全標準EN 61010-1。

由於壓電訊號敏感度很高(電荷訊號)，所以當使用一般市面上或其他品牌的訊號線，連接KISTLER之電荷放大器時，在未受力狀態時，就會有電荷訊號的產生。

故本研究中，使用的訊號傳輸線為KISTLER原廠感測器使用之Cable線，但因本研究之目的在於自行製作微壓電感測器，故沒有現成的KISTLER原廠Cable線供本研究擷取訊號使用。故本研究使用的訊號傳輸線，即為自行接原廠訊號線之正負端來接壓電訊號輸入(如圖2-5)。



圖2-4 修剪版之原廠訊號線

(本研究利用RP快速成型機製作一小空心圓柱體將正極與負極間隔著)

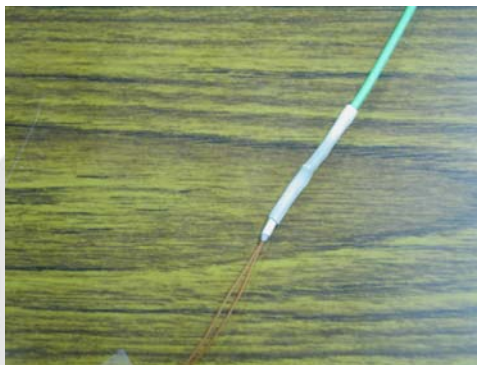


圖2-5 初步系統使用之原廠訊號線

(考慮到RP製作的物件因含有澱粉成份，可能帶有些許的導電性。

故更改採取用熱縮套管將正負端分離並利用OK線接出訊號線)

2.1.3 快速原型機(RP) Z-Printer 310

利用推疊的原理，將CAD完成的模型，分為多層結構以一層一層進行的方式，堆疊建構出CAD繪製好的模型。而本研究中採用的RP快速成型機(Z-printer 310)，其原理為:利用搭配有一定比例成份的Binder黏著劑(zb[®]58 clear binder solution)與搭配好的Powder粉末(zb[®]130 powder)進行噴塗及成型的模型建構。

本研究目的在於建立一力量感測系統，須先在體外進行系統測試

評估，故研究過程中，採取了利用RP快速成型機(Z-printer 310)來進行實驗用模型之製作。

在進行更複雜的實驗探討與模擬分析前，為了確認有限元素法提供的Forward資訊是正確的、是有可信度的。本研究則利用了RP快速成型的技術將有限元素中基本探討的模型，利用Z Printer 310快速成型機以1:1的尺寸比例製作成形(如圖2-8)，並實際進行壓電特性實驗的驗證。



圖2-6 快速原型機 Z-Printer 310

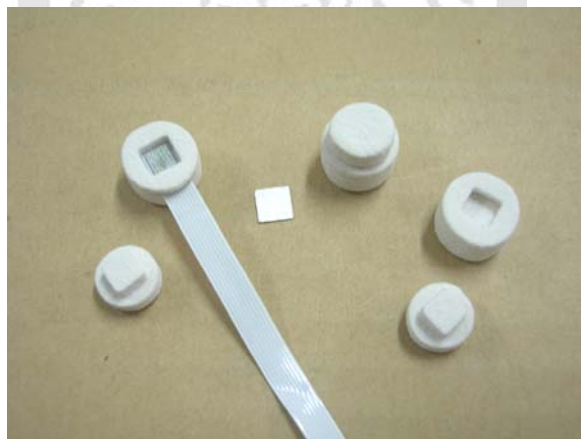


圖2-7 快速原型之模子成品

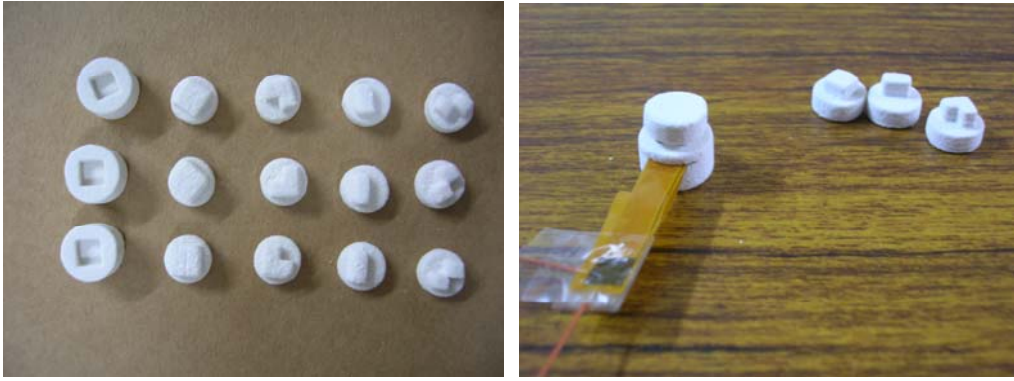





圖2-8 不同面積與型態之壓印頭
(分別為100% , 75%  以及50% )



2.1.4 資料擷取器 instruNet

在壓電特性實驗探討過程中，本研究所使用的資料擷取器為instruNet所生產的儀器設備，其硬體利用PC-MCIA卡與筆記型電腦連接以利傳輸並紀錄實驗之數據，並搭配其原廠所撰寫的軟體來操作，故在資料擷取部分方便許多。

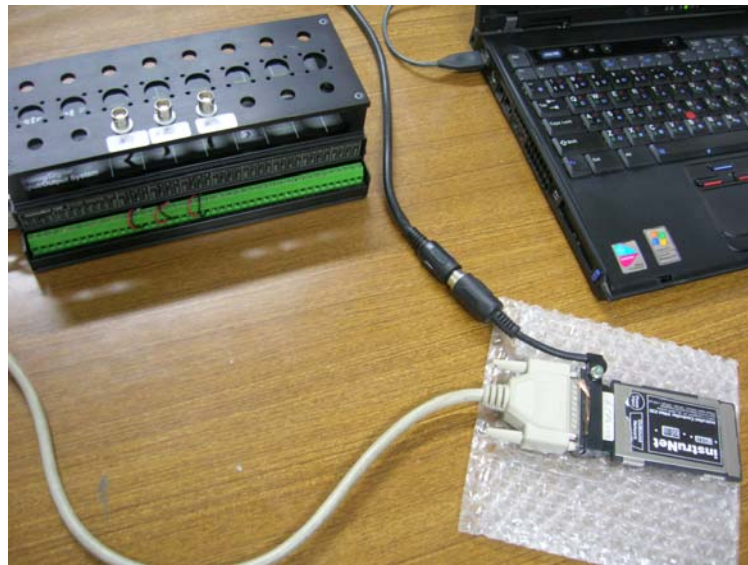


圖2-9 資料記錄器instruNet硬體與連接示意圖

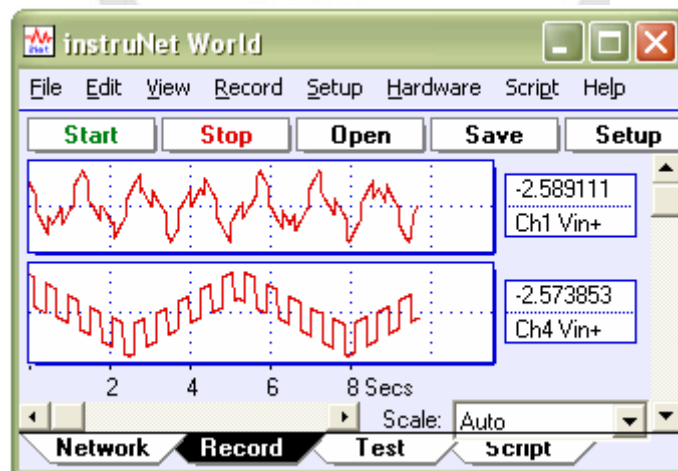


圖2-10 資料記錄器 instruNet軟體介面

2.1.5 材料試驗機 SHIMADZU AG-I 系列(桌上型)

本研究利用材料試驗機來給予壓電試片一已知的負載力，來進行探討本研究所使用的壓電材料之特性，並使用了1kN的Load cell進行力量的感測實驗。

其整體結構外型如下：

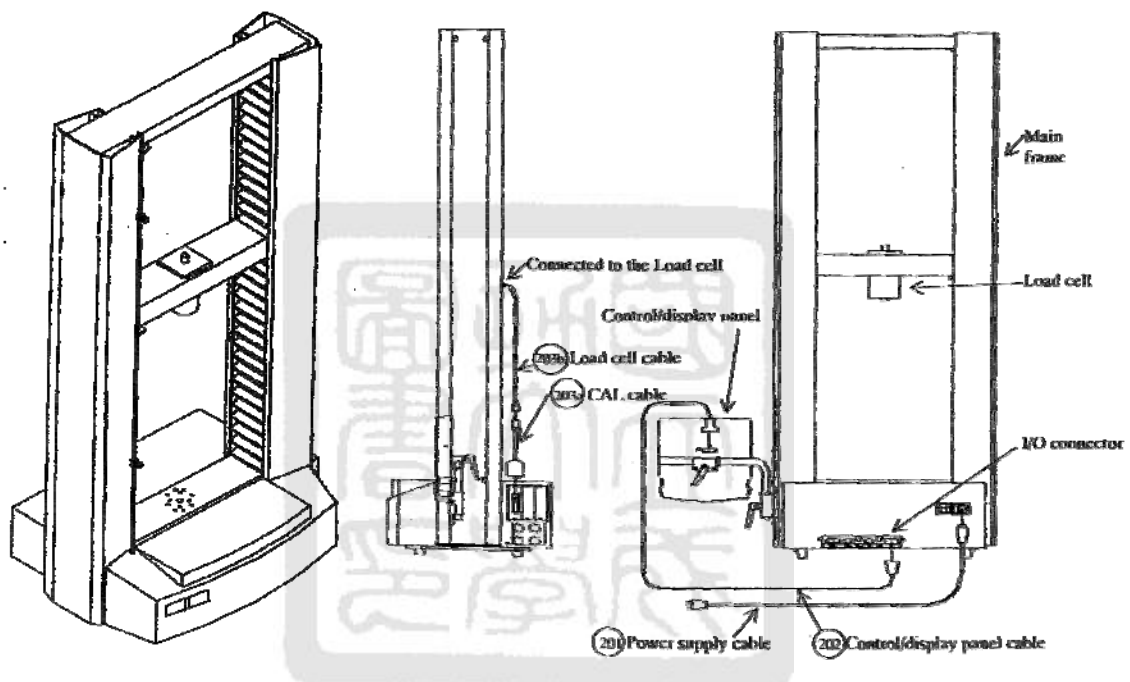


圖2-11 材料試驗機SHIMADZU AG-I系列(桌上型)整體外觀圖



圖2-12 力量感測器(1kN)



圖2-13 自製壓印頭透過保麗龍傳遞力量

2.2 研究方法與步驟

2.2.1 壓電感測試片之材料參數量測 Nano-Indentor

對於PZT-5A的Poisson's ratio值則因試驗的困難度，故在有限元素法模擬分析輔助探討時，便直接採取參考文獻上所提供之數值0.31。





而對於其彈性係數的量測，本研究利用奈米壓痕試驗機(Nano-indentor)來量測所使用的壓電陶瓷試片之彈性係數。量測結果中，沒有塗銀電極之壓電材料之彈性係數與文獻上之大小差異不大，故本研究在有限元素分析部份亦直接採用文獻上所提供之數據來進行模擬探討。



圖2-14 奈米壓痕試驗機

(資料來源：國立成功大學微奈米科技研究中心)

表2-1 奈米壓痕材料試驗結果

試片種類	Young's Modulus	備註
5×5mm ² 壓電試片 (有電極塗料)	21.661GPa	
5×5mm ² 壓電試片 (有電極塗料)	43.948GPa	
3×3mm ² 壓電試片 (無電極塗料)	82.628 ^{+3.22} _{-26.11} GPa	
圓型壓電試片	53.836 ^{+6.41} _{-12.62} GPa	

2.2.2 微機電製程 MEMS

本研究在進行實際量測壓電效應的過程中，曾利用單芯線當連接壓電陶瓷的訊號輸出傳輸線，而導致壓電陶瓷以單芯線為軸心而造成彎矩效應而造成壓電試片的脆性破壞。在研究的改善下，改採自行製作電極與訊號傳輸線路及縮小壓電試片的尺寸來降低試片脆性損壞的發生機率。



圖2-15 電極訊號傳輸線之示意圖

故為了降低因材料脆性而導致壓電感測試片發生破壞的情況，本研究利用了基本的微機電製程來製作薄平板式的訊號傳輸線路來傳遞壓電訊號。一方面為了減少材料的破壞之外，另一方面也為了盡可能將整體感測元件的尺寸縮減到最薄的尺寸。

本研究在進行MEMS製程前，利用專業電腦繪圖軟體將光罩的外型繪製出來，並經由專業輸出(台南市 聯鑫科技)製作出不透光之光罩，以供製程中曝光步驟使用。

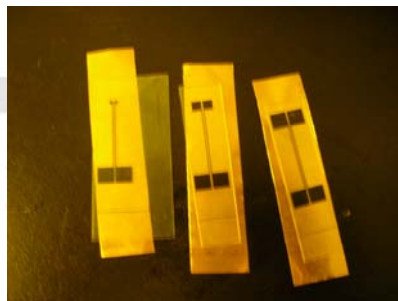
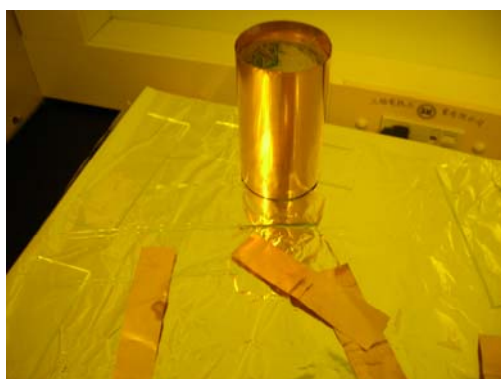


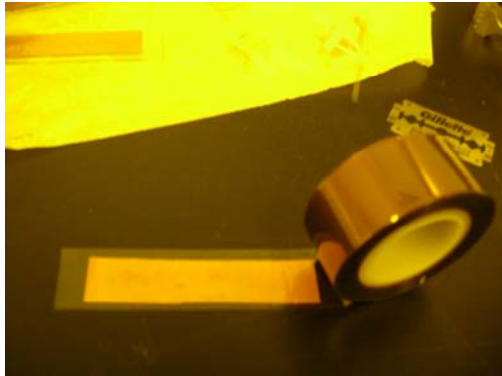
圖2-16 經切割之光罩輸出完成品

製程流程與步驟(銅箔材料及PI膠帶 天實企業提供):

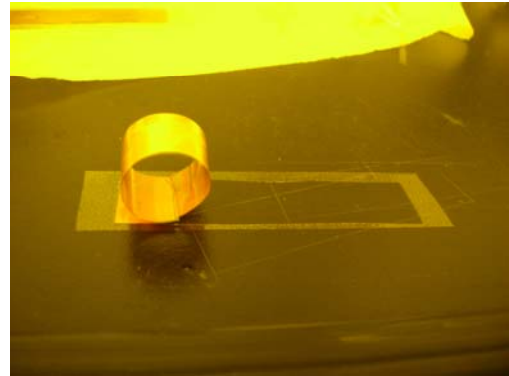
一、酒精擦拭玻璃試片並100°C烘烤 二、利用強酸溶解銅箔上之氧化物



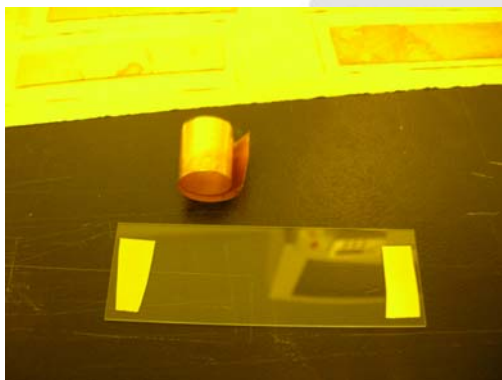
三、貼上PI膠帶



四、完成自製式軟性電極基材



五、用雙面膠將基材固定在玻璃試片 六、電極製作之基材準備完成



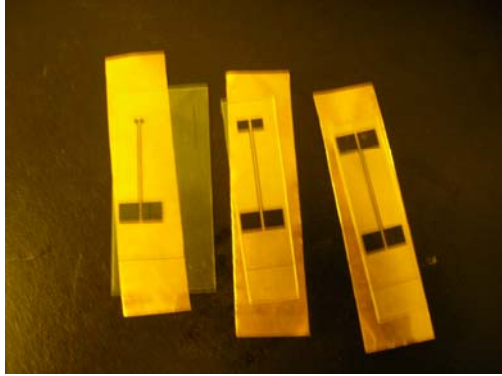
七、加上光阻AZ試劑並進行旋塗



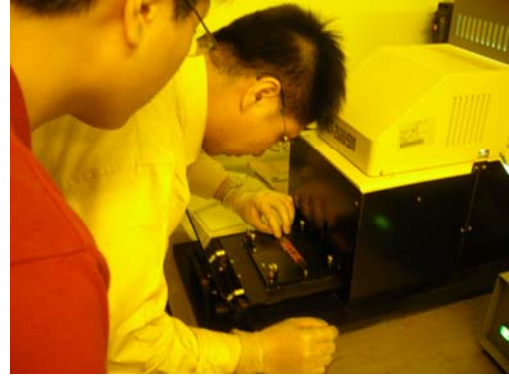
八、旋塗後進行100°C軟烤3min.



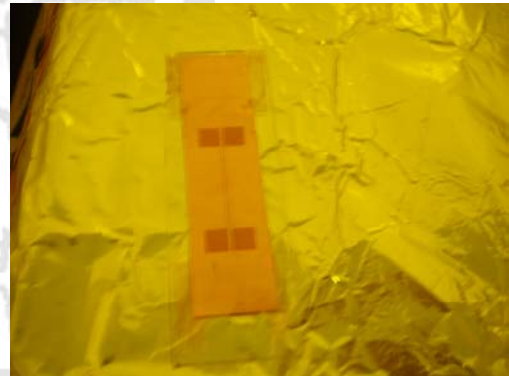
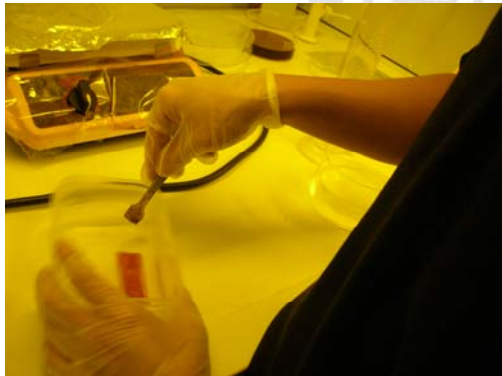
九、加上光罩並準備進行曝光



十、進行曝光



十一、用AZ400K:DI=1:3溶劑顯影 十二、顯影完成並150°C硬烤10mins



十三、冷卻至室溫後以氯化鐵溶劑進行蝕刻 十四、用丙酮擦拭後完成品



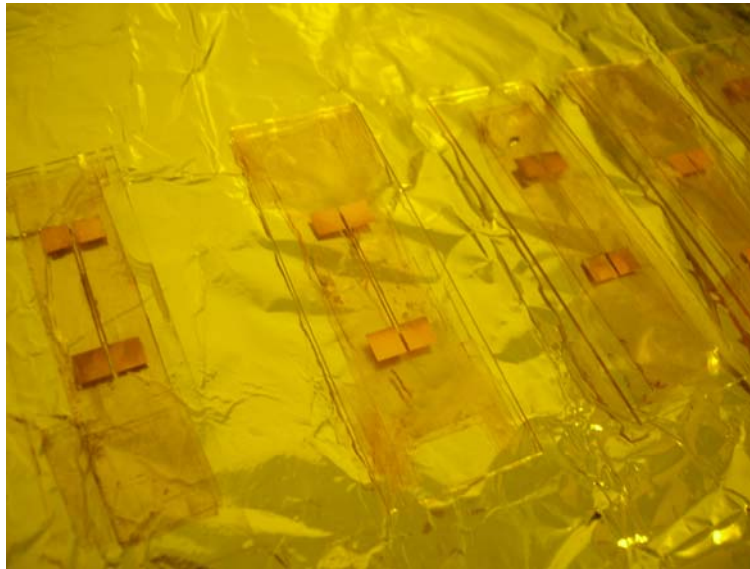


圖2-17 100 μm 線寬之MEMS訊號線完成品



圖2-18 利用PI膠帶避免訊號線因碰觸而短路

在對折訊號線前，利用多貼一層PI膠帶在銅箔訊號線側，進行絕緣措施來避免短路情形發生。

2.2.3 同步量測力量訊號

連接SHIMADZU AG-I桌上型材料試驗機之類比輸出訊號（輸出荷重及位移等類比訊號，滿載輸出為+5V。）進行訊號同步擷取之目的。



圖2-19 SHIMADZU AG-I 桌上型材料試驗機之類比輸出端



圖2-20 類比信號輸出連接圖



圖2-21 類比信號輸入紀錄器示意圖

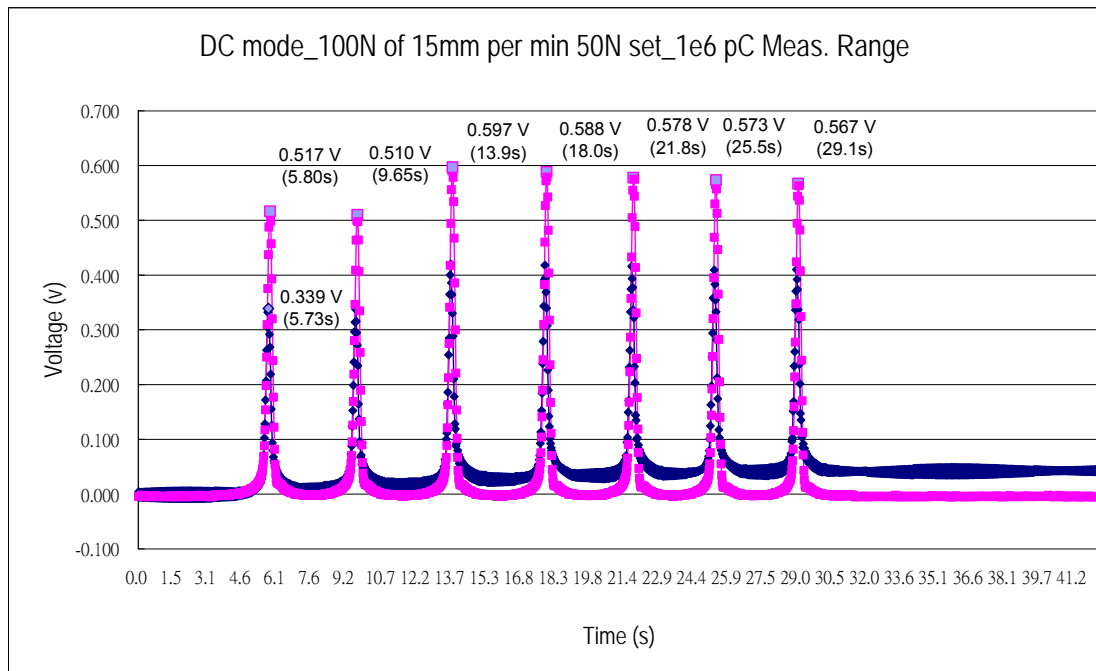


圖2-22 資料記錄器同步擷取之訊號

2.2.4 微壓電式力量感測器系統之校正

本研究利用了基本車床機械加工技術，製作了一配合本研究所使用的壓電試片尺寸之圓型壓印頭來應用於探討壓電特性之實驗，並在自製的壓印頭底部，利用隔著一保麗龍片來均勻且直接給予負荷在壓電試片上，確保給予之力量皆完全傳遞到壓電試片上，以進行探討其壓電特性。

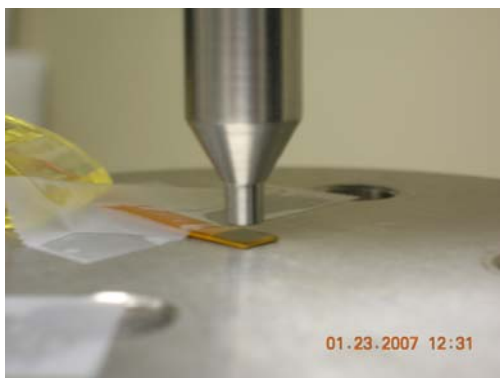


圖2-23 車床加工之自製壓印頭

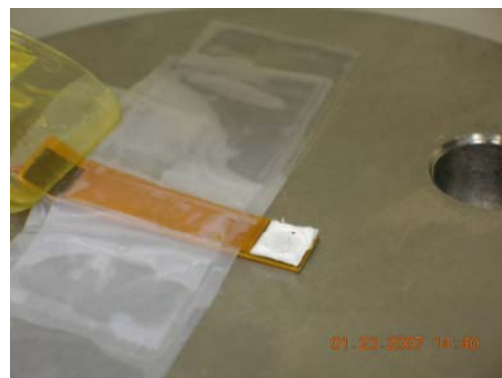


圖2-24 經保麗龍層傳遞力量

2.2.5 有限元素法分析

有限元素法—*Finite elements method*

利用有限元素法在實際進行製作感測器陣列前，進行各參數及變因的評估分析，以降低製作時的不合理性及減低製作失敗的感測器陣列而造成試誤成本上的浪費，運用電腦模擬分析評估是進行實際製作前最有效降低成本浪費之方法，並事先將可預期到的問題點先克服解決，再進行設計，是風險評估下不用花費實際成本卻可獲得結果趨勢的有效方式之一。

本研究使用的工具軟體為ANSYS工程分析軟體。在此軟體應用中，此研究所應用的是其Coupling field analysis的部份，結合力學與電學之理論來進行分析，此類型研究分析時，除了基本的模型建構外，在輸入材料特性的部份，則需輸入三個重要的參數，分別為壓電材料之：(a)壓電係數、(b)介電常數及(c)機械強度，彈性係數。在輸入數值及運算部分，皆為矩陣方式的數值形式。

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix}$$

$$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})}$$

圖2-25 材料之機械強度，彈性係數 Compliance form ([s] matrix)

資料來源：[1]

$$[c] = \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy & yz & xz \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \\ yz \\ xz \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ c_{21} & c_{22} & & & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & & & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & & \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} & \begin{matrix} x & y & z & xy \end{matrix} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \\ xy \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & & & \\ c_{21} & c_{22} & & \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(3-D) (2-D)

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} = \frac{\nu E}{[(1+\nu)(1-\nu)]} + 2G$$

$$C_{21} = C_{31} = C_{32} = \frac{\nu E}{[(1+\nu)(1-\nu)]}$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = G$$

圖2-26 材料之機械強度，彈性係數 Stiffness form ([c] matrix)

資料來源：[1][5]

有限元素在壓電材料模擬分析之原理為：利用輸入之壓電材料的介電常數，將壓電係數所算出的電荷量，利用公式轉換成電壓訊號：

$$U = Q/C$$

U: The voltage

Q: The electric charge yielded by the sensor under the mechanical loading

C: The capacitance of the sensor

表2-2 PZT-5A之相關材料參數

Type	Dielectric constant (Relative permittivity)	Piezoelectric strain coefficients (10^{-12} C/N)	Young's modulus (N/m ²)	Poisson's ratio
PZT-5A ^{[1][3][5]}	2300	d ₃₁ = -171 d ₃₂ = -171 d ₃₃ = 374 d ₁₅ = 584	58×10 ⁹	0.35

第三章 結果與討論

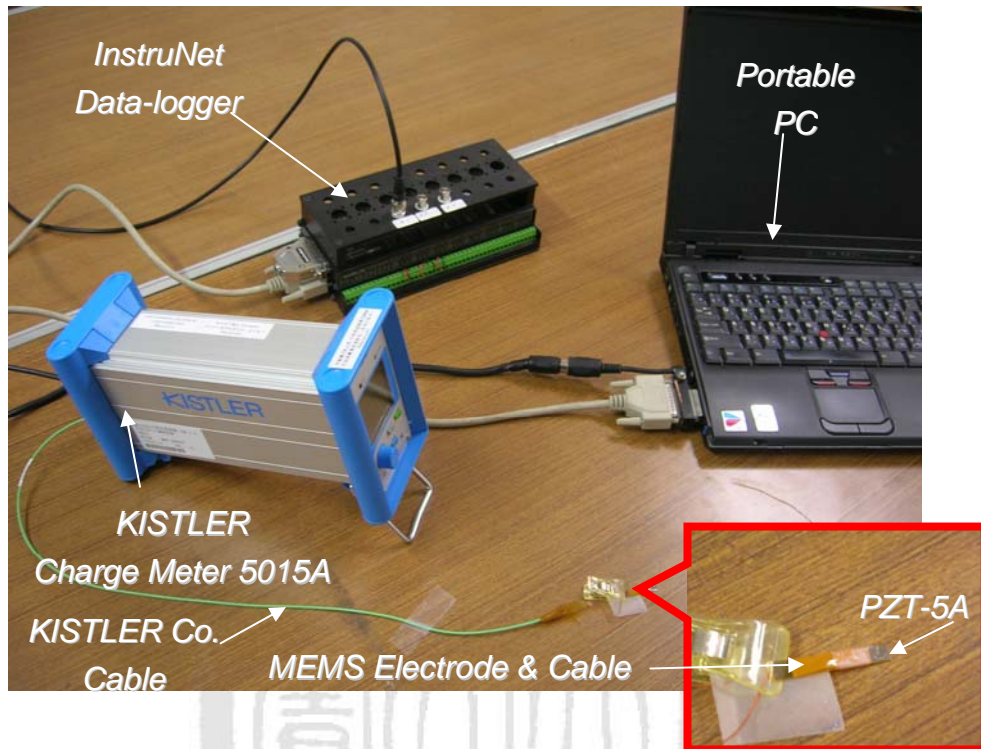


圖3-1 初步系統之完整架構圖

3.1 微壓電式力量感測器系統實驗結果

3.1.1 負荷大小與壓電感測訊號之線性探討

在instruNet同步擷取之力量資料中，與MTS內部所建立的力量紀錄表差異為1%左右，因差異不大，故針對力量之數據便直接取MTS紀錄上所記錄的數據。

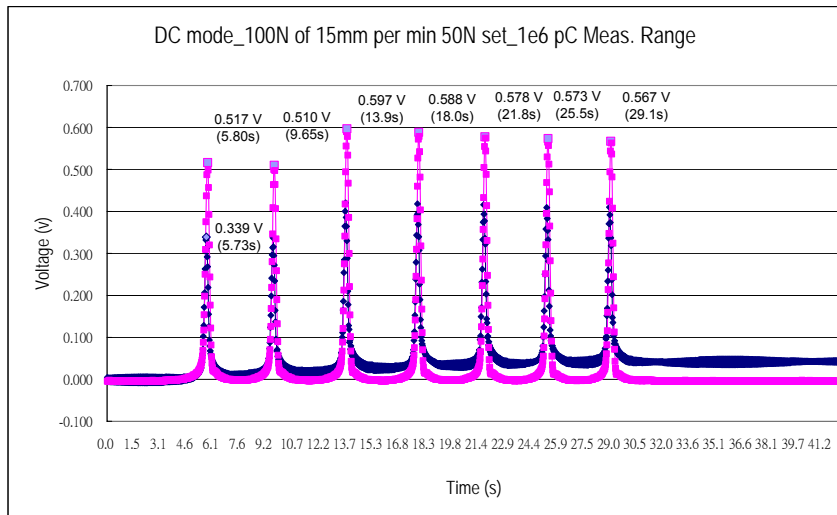


圖3-2 資料記錄器instruNet同步擷取之力量紀錄

圖3-3 MTS 內部軟體力量紀錄表

Name	Max_Load	Max_Disp
Units	N	mm
Cycle #1	104.469	0.68500
Cycle #2	102.219	0.68700
Cycle #3	120.250	0.69500
Cycle #4	117.563	0.69700
Cycle #5	116.625	0.69400
Cycle #6	113.563	0.69900
Cycle #7	114.688	0.69500
Mean	112.768	0.69314
Standard Deviation	6.81080	0.00518
Maximum	120.250	0.69900
Minimum	102.219	0.68500
Range	18.0310	0.01400
Median	114.688	0.69500

表3-1 資料記錄器InstruNet之力量紀錄

Cycle No.	Voltage (V)	Relative Force (N)
#1	0.517	103.4
#2	0.510	102.0
#3	0.597	119.4
#4	0.588	117.6
#5	0.578	115.6
#6	0.573	114.6
#7	0.567	113.4

在決定好力量數據後，便可計算電荷量與力量之相關性探討，由於實驗中有使用一片薄保麗龍來使力量均勻分布在壓電試片上，故在數據計算上便將因這一層保麗龍所影響之誤差的第一個力量值省略不列入計算，僅取後六次之數據來探討其電荷與力量之相關性。

在線性探討之實驗中，本研究針對每個力量區間(100N, 200N, 300N, 400N及500N)都進行了三次量測並每次進行七個Cycle，來進行其特性探討。

由結果得到本研究所採用的壓電試片靈敏度之組內差異(變異係數)在1~3%範圍以內，並在整體結果上，其電荷產生量與力量也有一定程度上的線性相關性($R^2=0.994$)，並在其平均靈敏度之組間差異(變異係數)約5%。



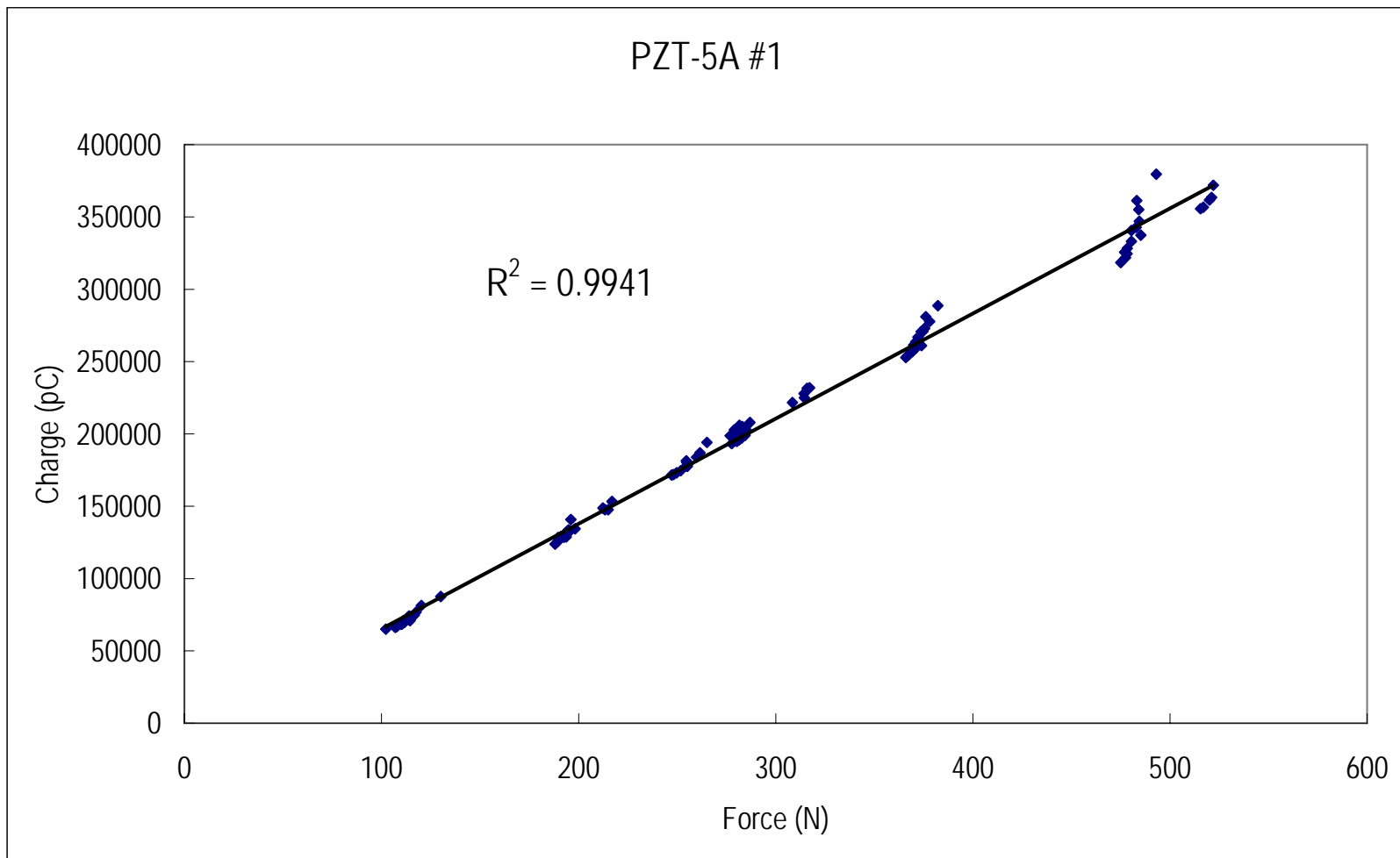


圖3-4 單顆PZT-5A之力量-電荷特性

表3-2 PZT-5A #1 實驗特性整理

PZT-5A #1	1e6 pC Meas. Range							
	Mean Sensitivity (pC/N)	S.D.	C.V.	Max.	Min.	+	-	每秒偏移量 V/s
100N of 15mm/min 50N set #01	647.05	±15.73	2.43%	677	627.5	29.95	19.55	0.00197
#02	632.34	±9.77	1.55%	649.63	619.56	17.29	12.78	0.00044
#03	629.97	±19.58	3.11%	673.52	618.87	43.55	11.1	0
200N of 15mm/min 110N set #01	685.73	±14.8	2.16%	717.98	675.35	32.25	10.38	0.00554
#02	670.9	±8.02	1.20%	681.57	658.21	10.67	12.69	0.0025
#03	687.05	±15.12	2.20%	707.04	663.26	19.99	23.79	0.0027
255N of 15mm/min 161N set #01	710.28	±12.04	1.70%	732.39	696.15	22.11	14.13	0.0127
#02	701.6	±13.75	1.96%	729.93	691.18	28.33	10.42	0.0047
#03	714.84	±11.79	1.65%	726.77	693.91	11.93	20.93	0.0083
285N of 15mm/min 180N set #01	710.38	±6.94	0.98%	724.72	704.08	14.34	6.3	0.0045
#02	704.41	±13.07	1.86%	732.62	695.29	28.21	9.12	0.003
#03	714.09	±12.96	1.81%	731.23	696.12	17.14	17.97	0.0071
377N of 15mm/min 250N set #01	734.2	±13.24	1.80%	755.15	717.17	20.95	17.03	0.019
#02	708.48	±7.87	1.11%	723.05	698.03	14.57	10.45	0.0078
#03	696.37	±5.24	0.75%	706.82	690.87	10.45	5.5	0.0045
486N of 15mm/min 350N set #01	730.99	±22.07	3.02%	769.68	708.94	38.69	22.05	0.03
#02	683.72	±9.17	1.34%	695.32	670.4	11.6	13.32	0.013
#03	694.06	±10.23	1.47%	712.55	678.56	18.49	15.5	0.019

表3-3 PZT-5A #2 實驗特性整理

PZT-5A #2		1e6 pC Meas. Range							
		Mean Sensitivity (pC/N)	S.D.	C.V.	Max.	Min.	+	-	每秒偏移量 V/s
125N of 15mm/min 50N set	#01	676.79	±18.69	2.76%	699.58	649.26	22.79	27.53	0.00667
	#02	670.95	±19.28	2.87%	710.1	653.7	39.15	17.25	0.00477
	#03	663.92	±12.77	1.92%	683.33	644.17	19.41	19.75	0.00186
206N of 15mm/min 110N set	#01	668.36	±12.52	1.87%	688.02	651.94	19.66	16.42	0.0107
	#02	654.81	±8.5	1.30%	663.79	640.54	8.98	14.27	0.0041
	#03	640.91	±4.16	0.65%	644.72	632.69	3.81	8.22	0.0026
308N of 15mm/min 180N set	#01	683.6	±20.86	3.05%	721.68	660.62	38.08	22.98	0.0228
	#02	658.78	±11.44	1.74%	681	648.99	22.22	9.79	0.0079
	#03	643.33	±8.56	1.33%	653.47	631.49	10.14	11.84	0.005
379N of 15mm/min 250N set	#01	653.9	±12.65	1.93%	678.78	640.69	24.88	13.21	0.014
	#02	634.65	±5.22	0.82%	639.74	625.42	5.09	9.23	0.00687
	#03	642.93	±11.65	1.81%	663.6	629.3	20.67	13.63	0.00931
497N of 15mm/min 350N set	#01	659.61	±16.47	2.50%	689.36	637.85	29.75	21.76	0.0233
	#02	632.96	±6.86	1.08%	645.99	625.56	13.03	7.4	0.0125
	#03	622.76	±6.8	1.09%	634.52	613.96	11.76	8.8	0.00762

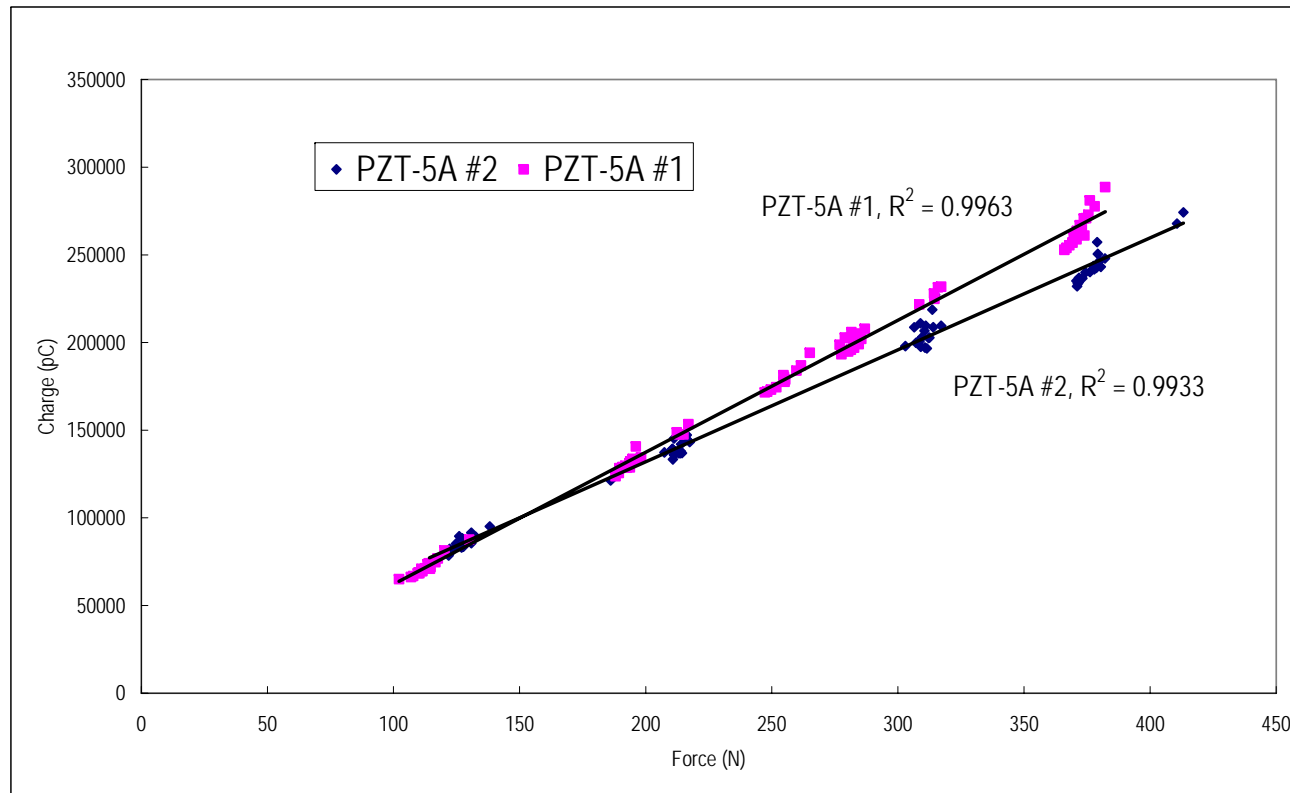


圖3-5 不同顆PZT-5A之力量-電荷特性

如果不包括500N之數據，PZT-5A#1與PZT-5A#2之平均靈敏度差異約為5%。(689.95 pC/N, 657.75 pC/N)

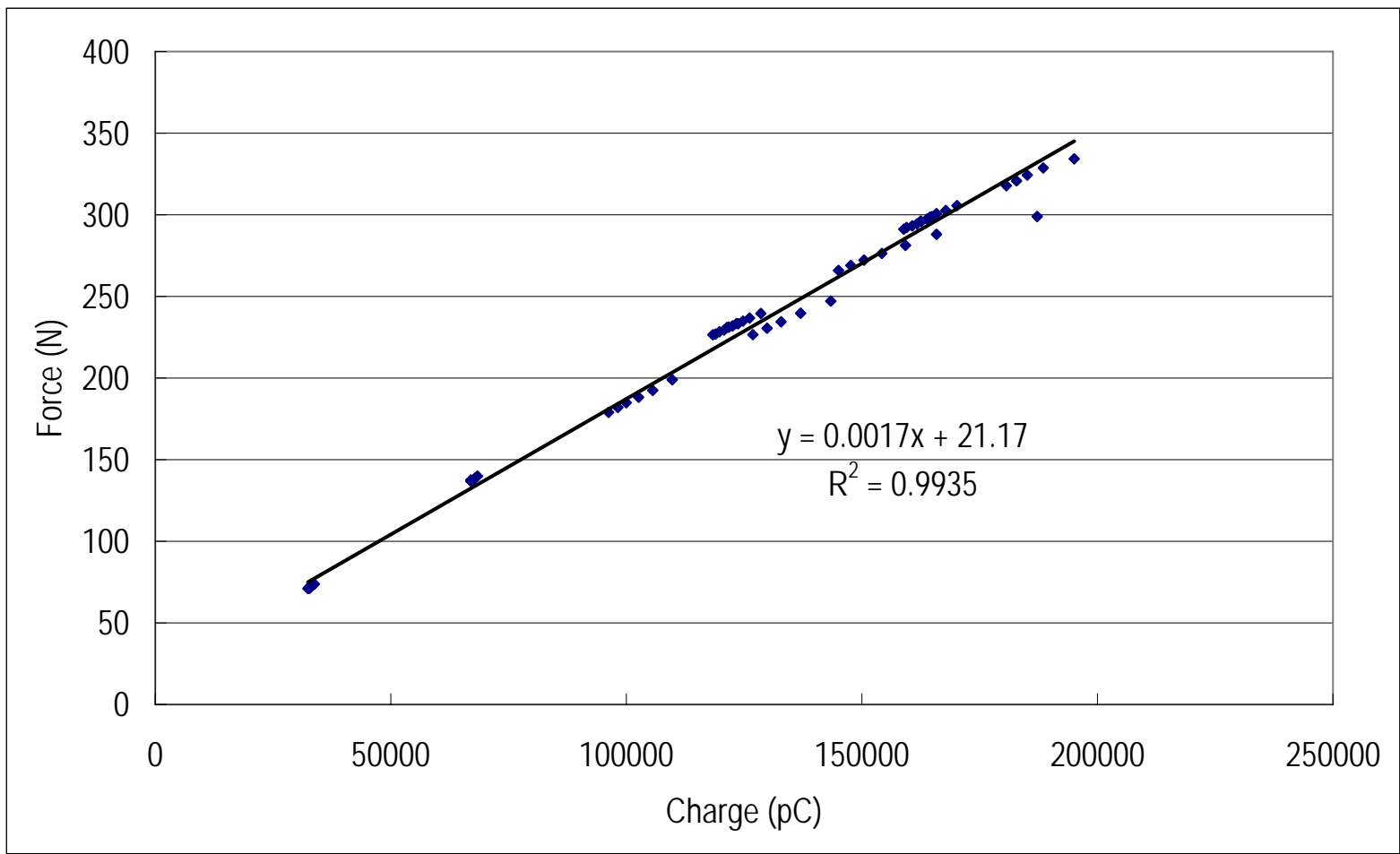


圖3-6 PZT-5A #3之校正曲線

避免因材料破壞造成靈敏度下降，故PZT-5A #3之實驗僅進行三個力量區間(100N, 200N及300N)，以求得此試片之校正曲線。並利用材料試驗機給予一不同頻率之循環力來探討用校正曲線求得之力量與材料試驗機所紀錄之力量之間所差異之誤差大小。

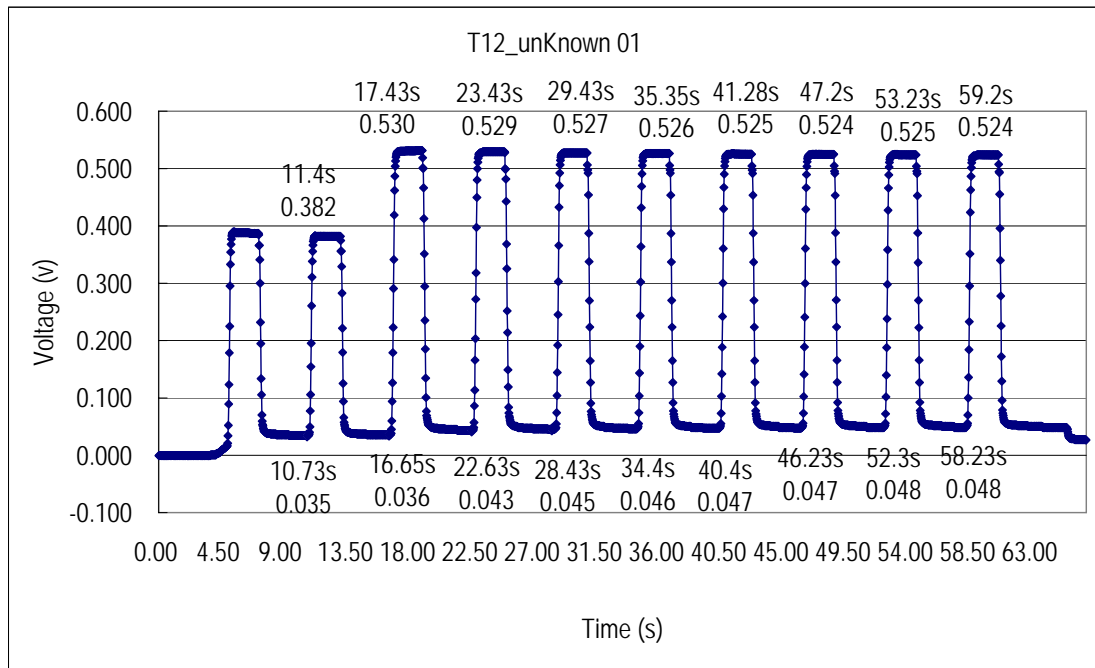


圖3-7 利用MTS給與一不同設定之未知力數據圖

$$(0.048-0.035)/(58.23-10.73) = 0.00027V/s \text{ (平均每秒偏移量)}$$

表3-4 利用校正曲線反算力量大小之誤差值

Cycle No.	Force (N) 由曲線計算	Force (N) MTS紀錄	Relative Charge (pC)	Relative Error (%)
#2	139.089	142.594	69364	-2.46%
#3	189.059	192.156	98758	-1.61%
#4	186.337	190.313	97157	-2.09%
#5	184.958	189.219	96346	-2.25%
#6	184.283	188.406	95949	-2.19%
#7	183.608	187.781	95552	-2.22%
				-2.14%±0.26%

3.1.2 不同承受面積之相同負荷對壓電感測訊號之影響

壓電效應實驗(靜態)：

由有限元素法中，得知力量施加的型式不同(壓或拉)，僅影響輸出訊號的正負號，不影響輸出訊號的大小(如圖)。所以在靜態實驗部份，本研究採用壓電陶瓷試片承受一拉力的方式，來進行靜態受力之力量與輸出訊號的探討。

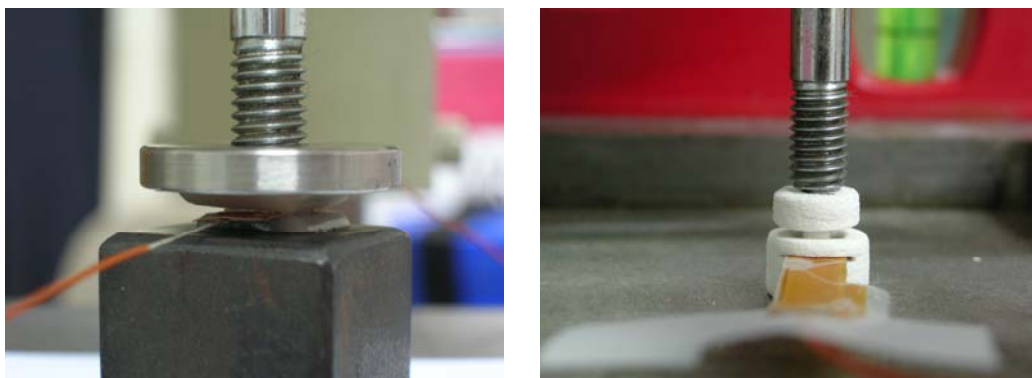
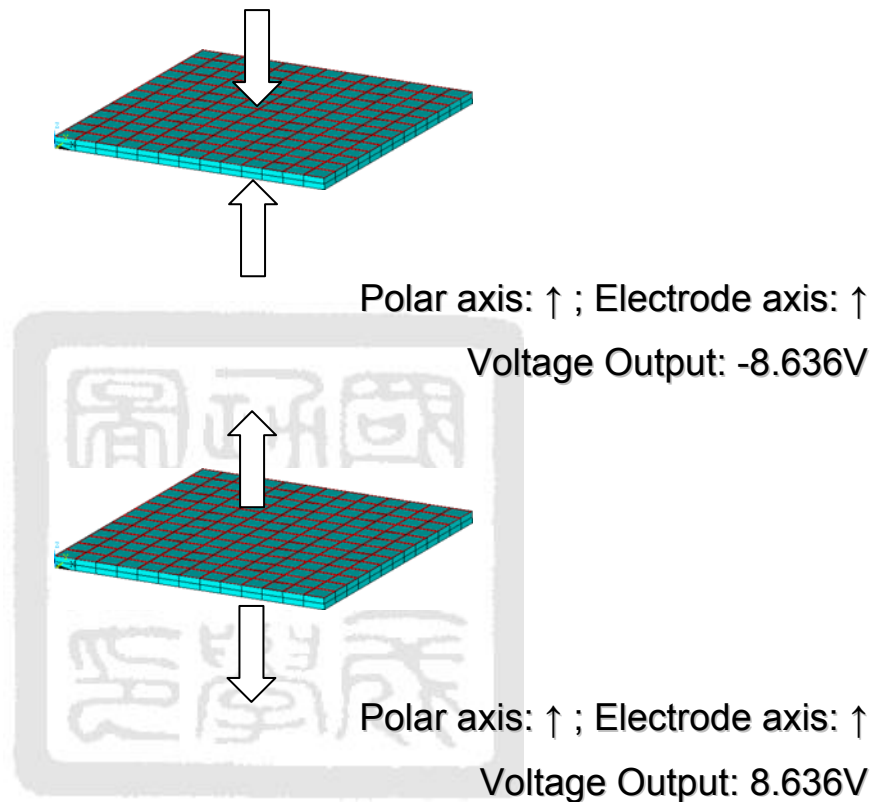


圖3-8 利用實驗室自製式小型MTS初步探討其特性

另外，欲利用壓電材料進行靜態量測的實驗，在沒有電荷放大器的情況下，是完全無法對壓電材料進行該訊號之量測。本研究利用電荷放大器，及設定為量測準靜態的量測條件“—DC(Long)—”，並搭配數位攝影機、資料擷取器及筆記型電腦，來進行量測壓電陶瓷試片承受靜態負荷情形下之材料特性。

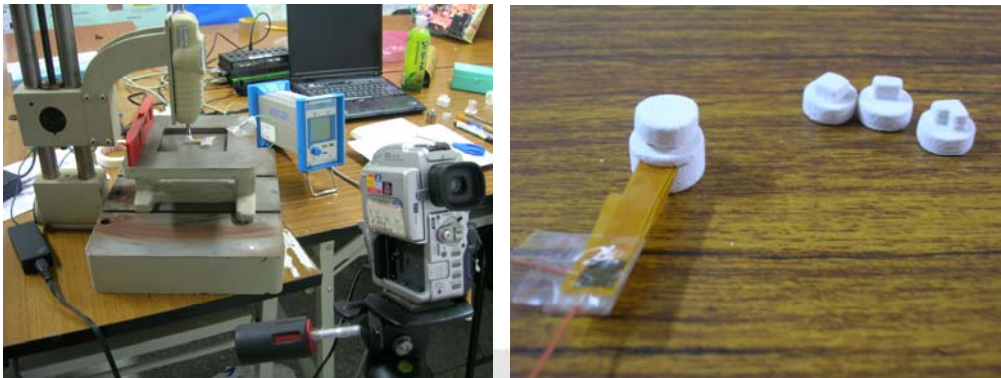


圖3-9 初部量測特性之系統架構

在靜態量測實驗中，發現電荷輸出訊號僅隨著給予的負荷大小而改變，相較與壓印所承受的面積大小，沒有明顯的差異。

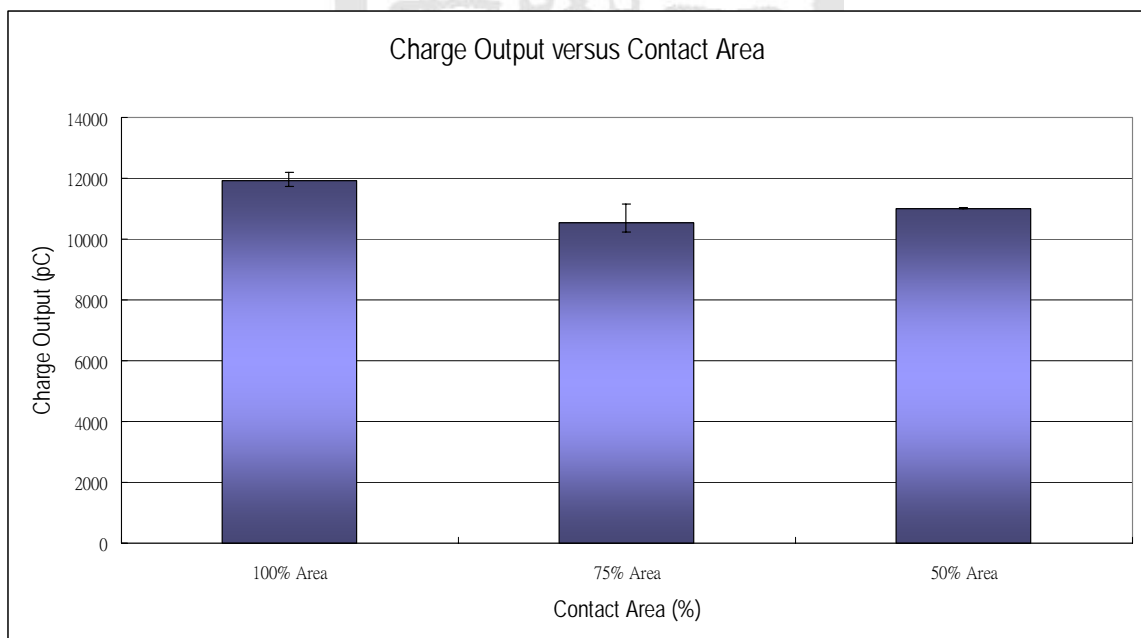


圖3-10 不同承受面積大小與電荷輸出之特性

表3-5 不同承受面積大小與電荷輸出之特性

No.	100% Area	75% Area	50% Area
#1	12190 pC	11170 pC	11030 pC
#2	11720 pC	10230 pC	11000 pC
#3	11820 pC	10260 pC	11010 pC
Mean	11910⁺²⁸⁰₋₂₂₀ pC	10553⁺⁶¹⁷₋₈₄₀ pC	11013⁺¹⁷₋₁₃ pC

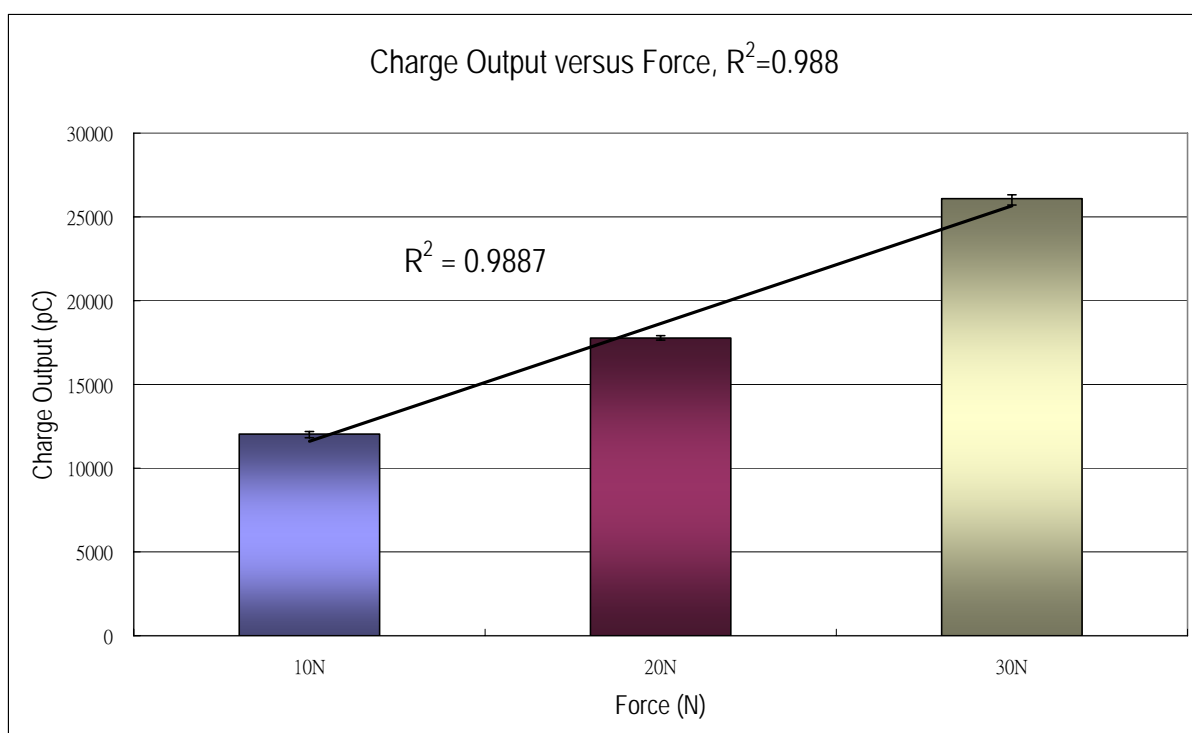


圖3-11 不同力量大小與電荷輸出之特性

表3-6 不同力量大小與電荷輸出之特性

No.	10N	20N	30N
#1	12190 pC	17640 pC	25710 pC
#2	11820 pC	17740 pC	26320 pC
#3	12100 pC	17910 pC	26250 pC
Mean	12036⁺¹⁵³₋₂₁₇ pC	17763⁺¹⁴⁷₋₁₂₃ pC	26093⁺²²⁷₋₃₈₃ pC

3.1.3 微壓電式力量感測器系統之動態量測

探討其受力點位置與壓電訊號之探討：

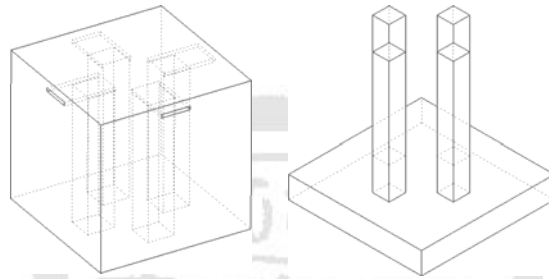
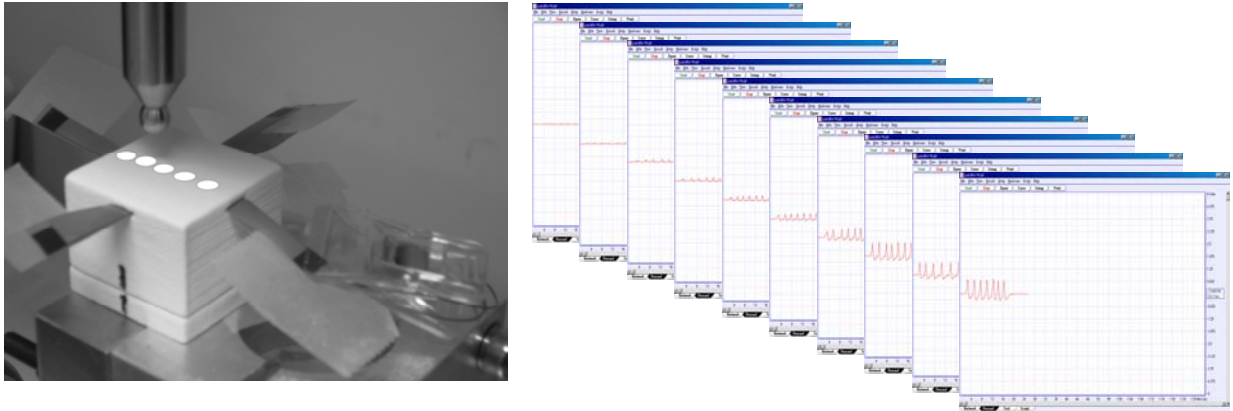


圖3-12 快速原型機製作實驗用模子之初步構圖

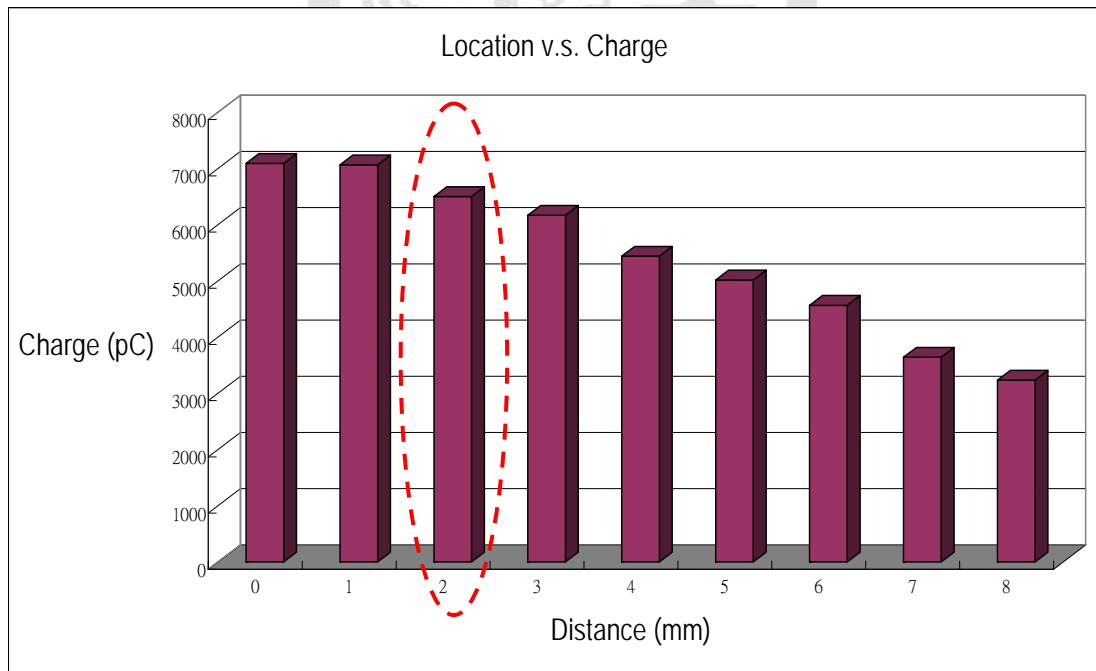


圖3-13 受力點位置與壓電訊號之關係圖

在距離2mm的靈敏度下降的現象與有限元素法分析的結果相同，即開始有部分的能量由模子吸收掉，即隨著遠離試片其感測反應能力亦下降。

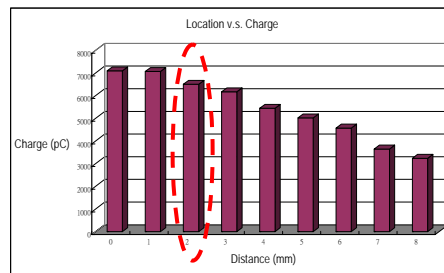


表3-7 不同施力點位置之相對訊號反應

Distance of loading location (mm)	Mean max. value (Voltage)	Mean relative charge output (pC)
8	$0.323 \begin{matrix} +0.017 \\ -0.012 \end{matrix} \text{ V}$	$-3234 \begin{matrix} +124 \\ -166 \end{matrix} \text{ pC}$
7	$0.364 \begin{matrix} +0.052 \\ -0.040 \end{matrix} \text{ V}$	$-3642 \begin{matrix} +402 \\ -518 \end{matrix} \text{ pC}$
6	$0.457 \begin{matrix} +0.028 \\ -0.021 \end{matrix} \text{ V}$	$-4566 \begin{matrix} +206 \\ -284 \end{matrix} \text{ pC}$
5	$0.502 \begin{matrix} +0.033 \\ -0.039 \end{matrix} \text{ V}$	$-5016 \begin{matrix} +386 \\ -334 \end{matrix} \text{ pC}$
4	$0.544 \begin{matrix} +0.030 \\ -0.044 \end{matrix} \text{ V}$	$-5440 \begin{matrix} +440 \\ -300 \end{matrix} \text{ pC}$
3	$0.617 \begin{matrix} +0.048 \\ -0.042 \end{matrix} \text{ V}$	$-6168 \begin{matrix} +420 \\ -480 \end{matrix} \text{ pC}$
2	$0.650 \begin{matrix} +0.037 \\ -0.059 \end{matrix} \text{ V}$	$-6500 \begin{matrix} +590 \\ -370 \end{matrix} \text{ pC}$
1	$0.706 \begin{matrix} +0.039 \\ -0.043 \end{matrix} \text{ V}$	$-7064 \begin{matrix} +434 \\ -386 \end{matrix} \text{ pC}$
0	$0.709 \begin{matrix} +0.044 \\ -0.057 \end{matrix} \text{ V}$	$-7091 \begin{matrix} +571 \\ -439 \end{matrix} \text{ pC}$
1	$0.700 \begin{matrix} +0.054 \\ -0.035 \end{matrix} \text{ V}$	$-7000 \begin{matrix} +350 \\ -540 \end{matrix} \text{ pC}$

3.2 有限元素法分析模擬結果

3.2.1 不同承受面積之相同負荷對壓電感測訊號之影響

由模擬結果得知，不同大小之承受面積並不影響其電荷輸出訊號，僅影響其變形分佈與應力分佈。

壓電陶瓷片上承受負載之面積大小對輸出訊號之差異(由結構外施力):

探討之受力情況為100%面積受負載及50%面積受負載等兩種不同情況。

(簡化模型一)

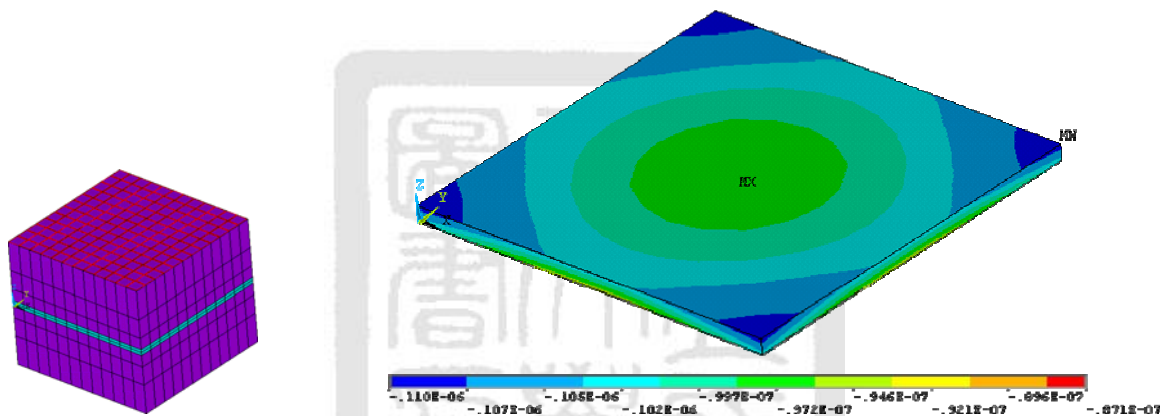
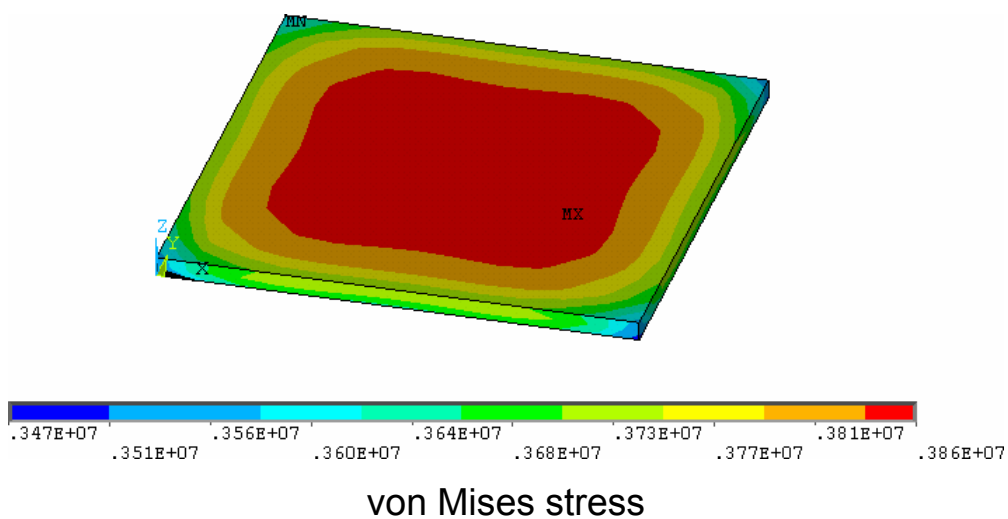


圖3-14 100N 100% Area of Surface, 14.018V Z方向之位移量, 0.110 μ m



von Mises stress

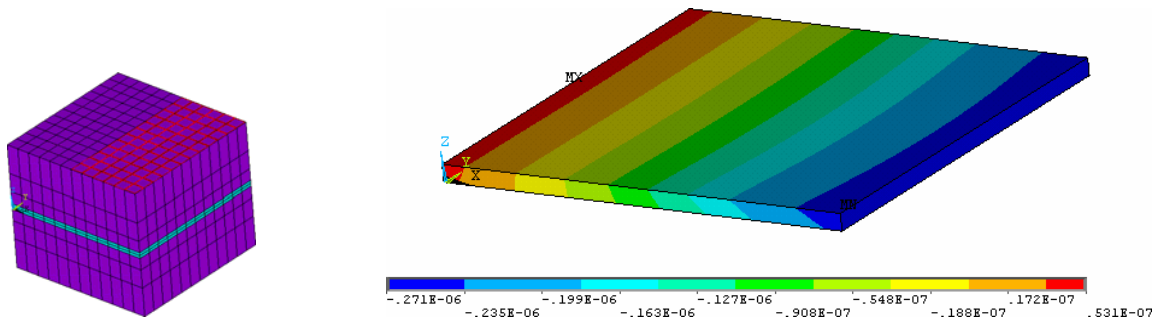
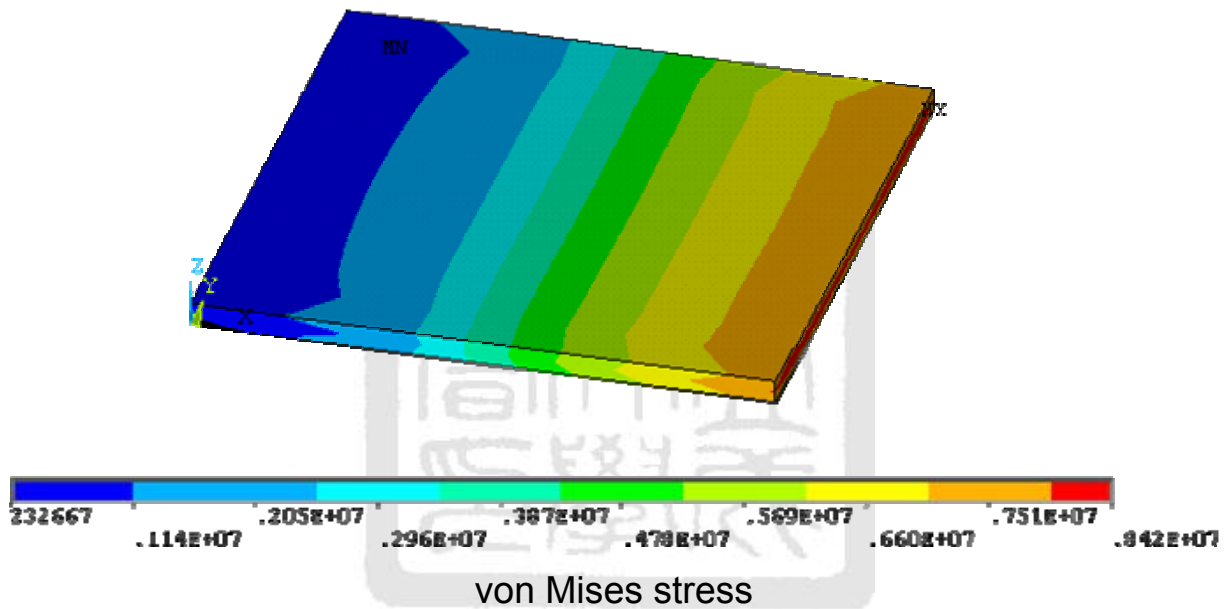


圖3-15 100N 50% Area of Surface, 14.018V Z方向之位移量, $0.271 \mu\text{m}$



壓電陶瓷片上承受負載之面積大小對輸出訊號之差異(由結構外施力):
 探討之受力情況為100%面積受負載及50%面積受負載等兩種不同情況。
 (簡化模型二)

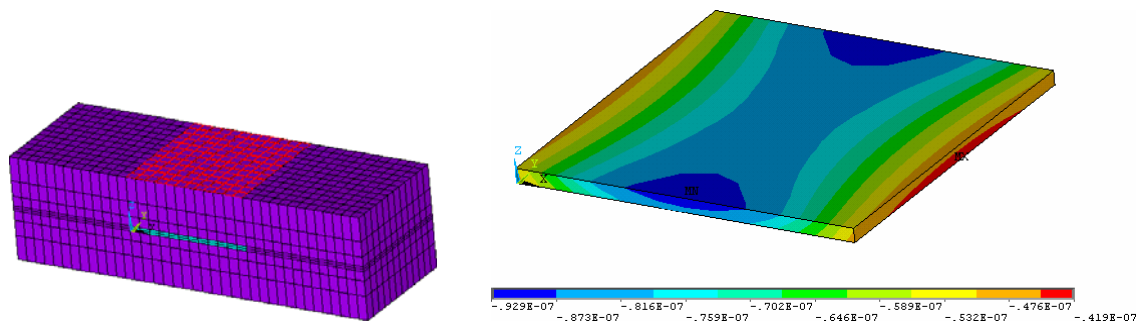
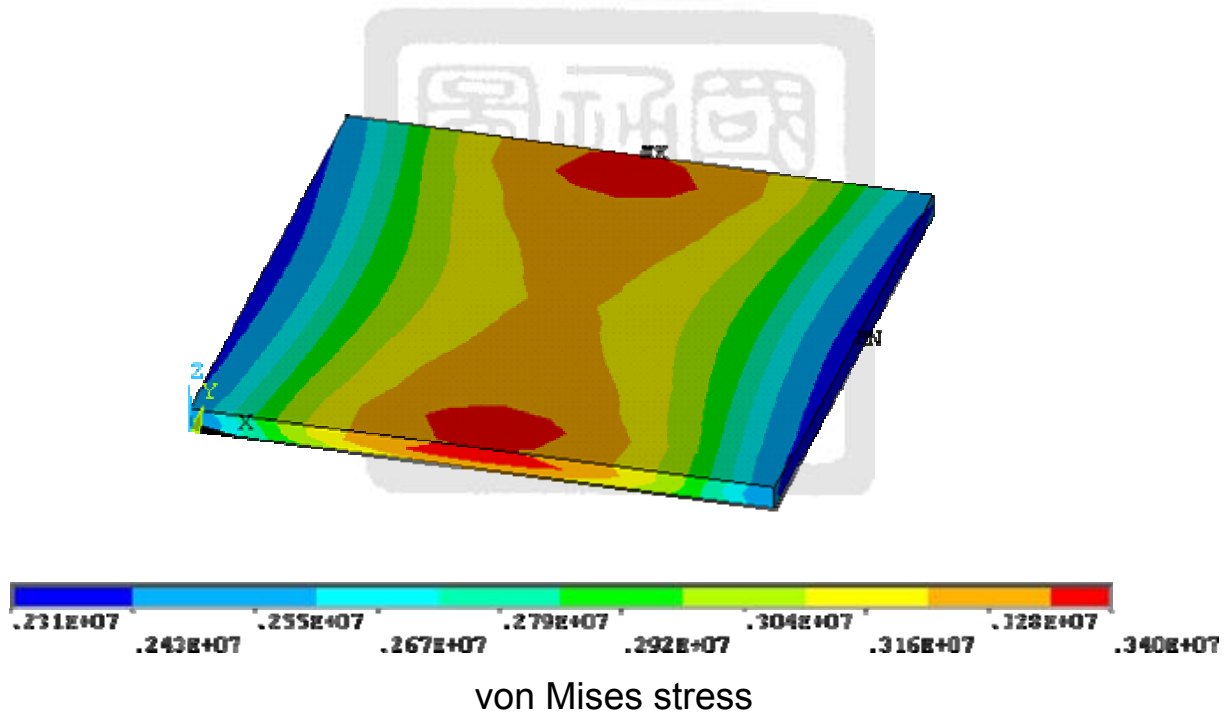


圖3-16 100N 100% Area of Surface, 10.588V Z方向之位移量, 0.093 μ m



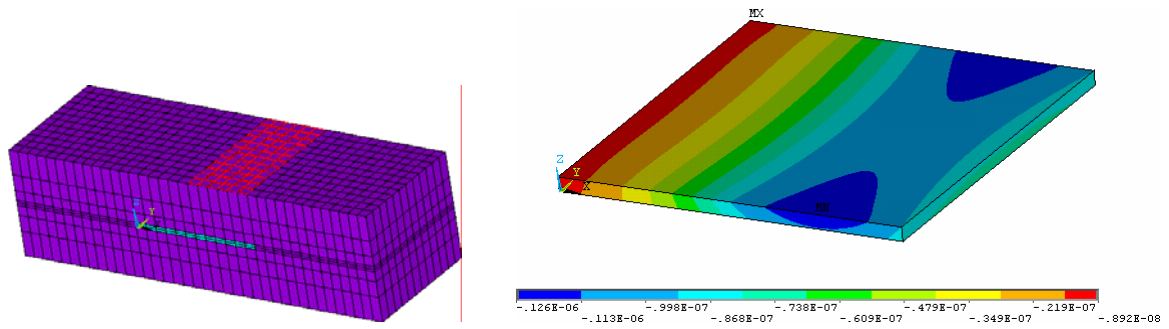
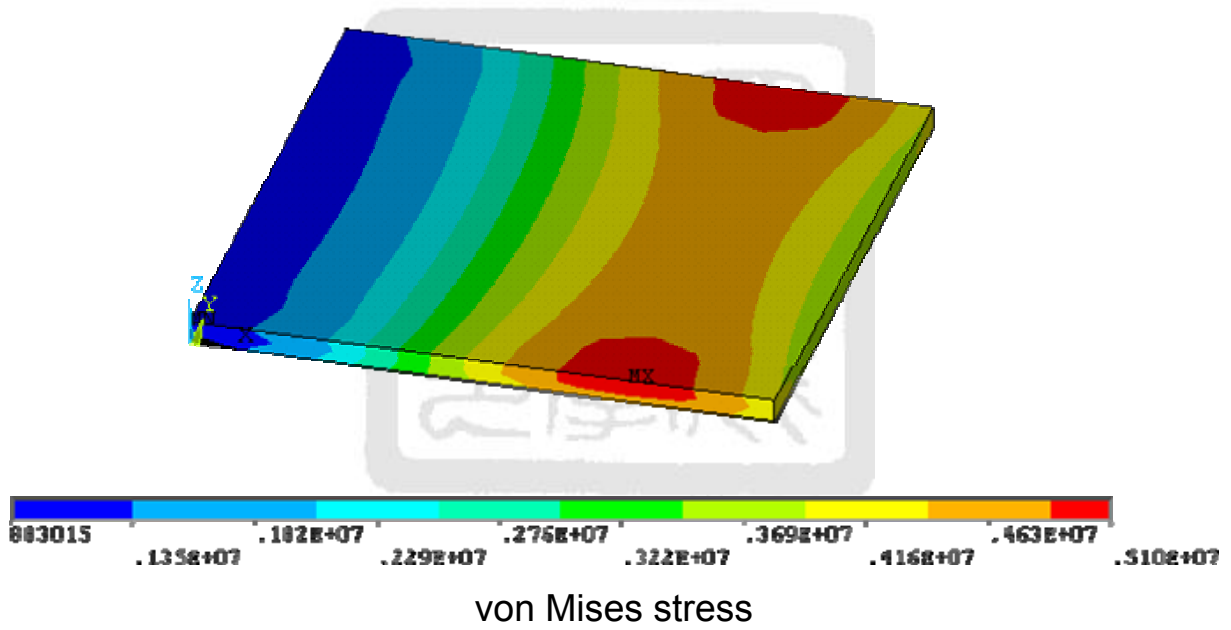


圖3-17 100N 50% Area of Surface, 10.588V Z方向之位移量, $0.126 \mu\text{m}$



壓電陶瓷片上承受負載之面積大小對輸出訊號之差異(由結構外施力):
 探討之受力情況為100%面積受負載及50%面積受負載等兩種不同情況。
 (簡化模型三)

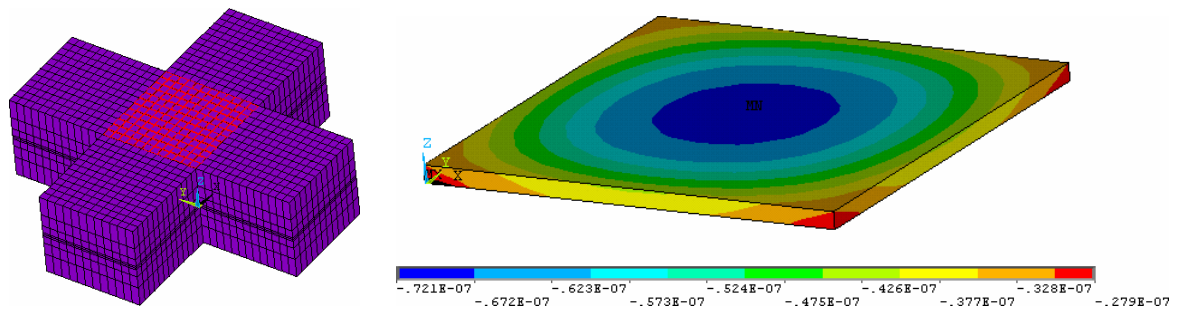
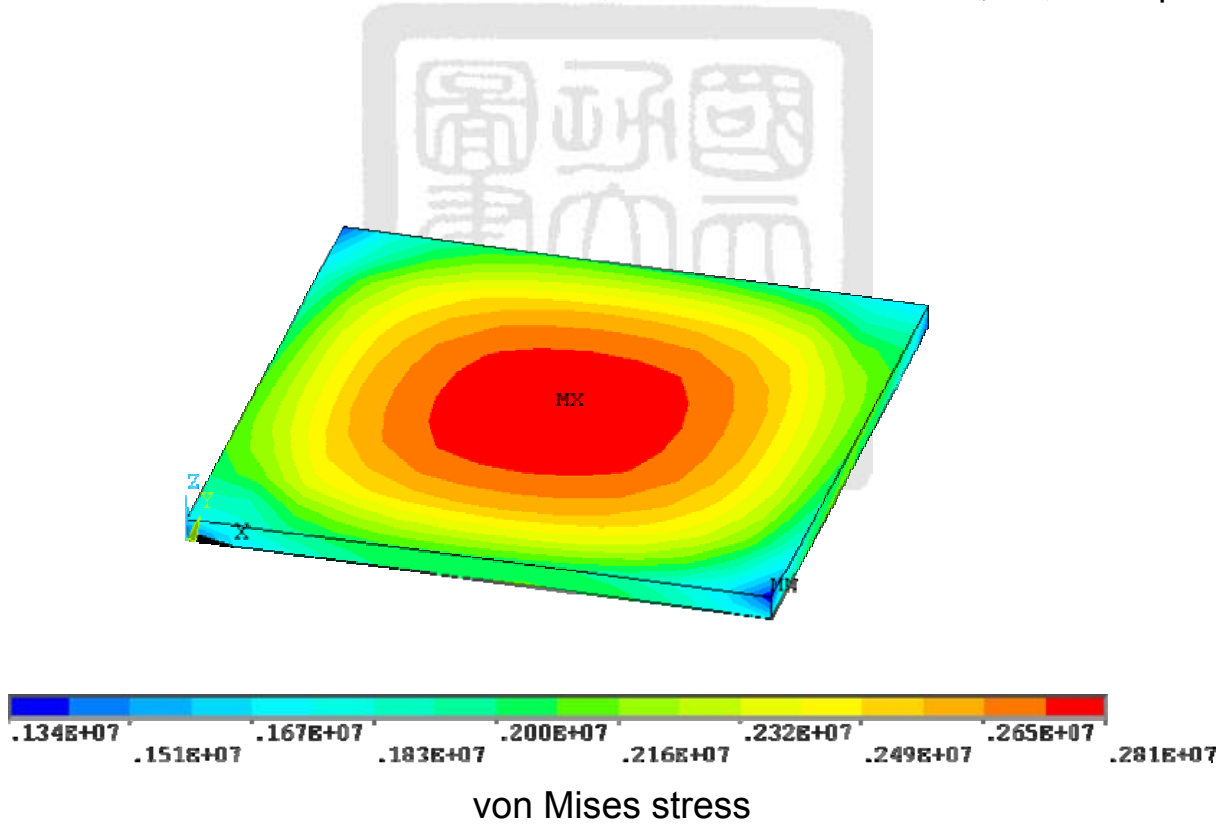


圖3-18 100N 100% Area of Surface, 8.162V Z方向之位移量, 0.072 μ m



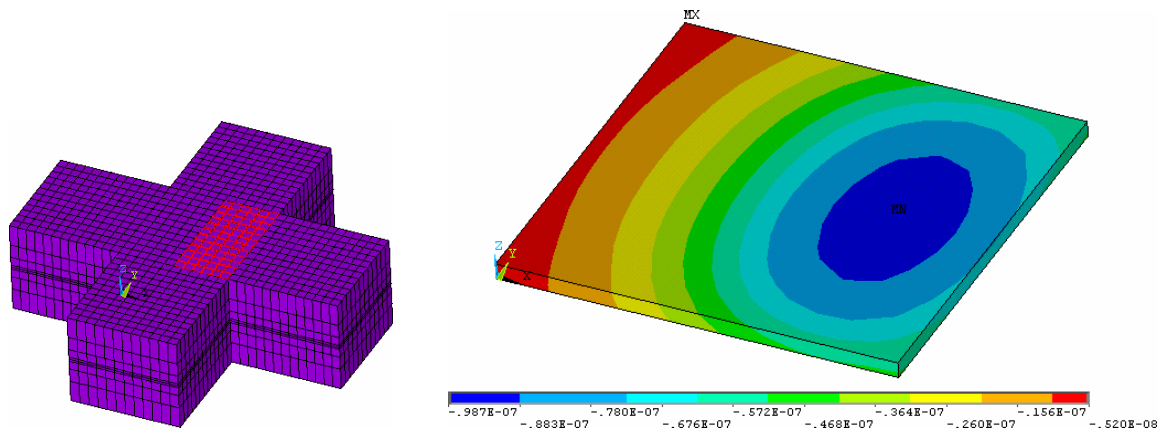
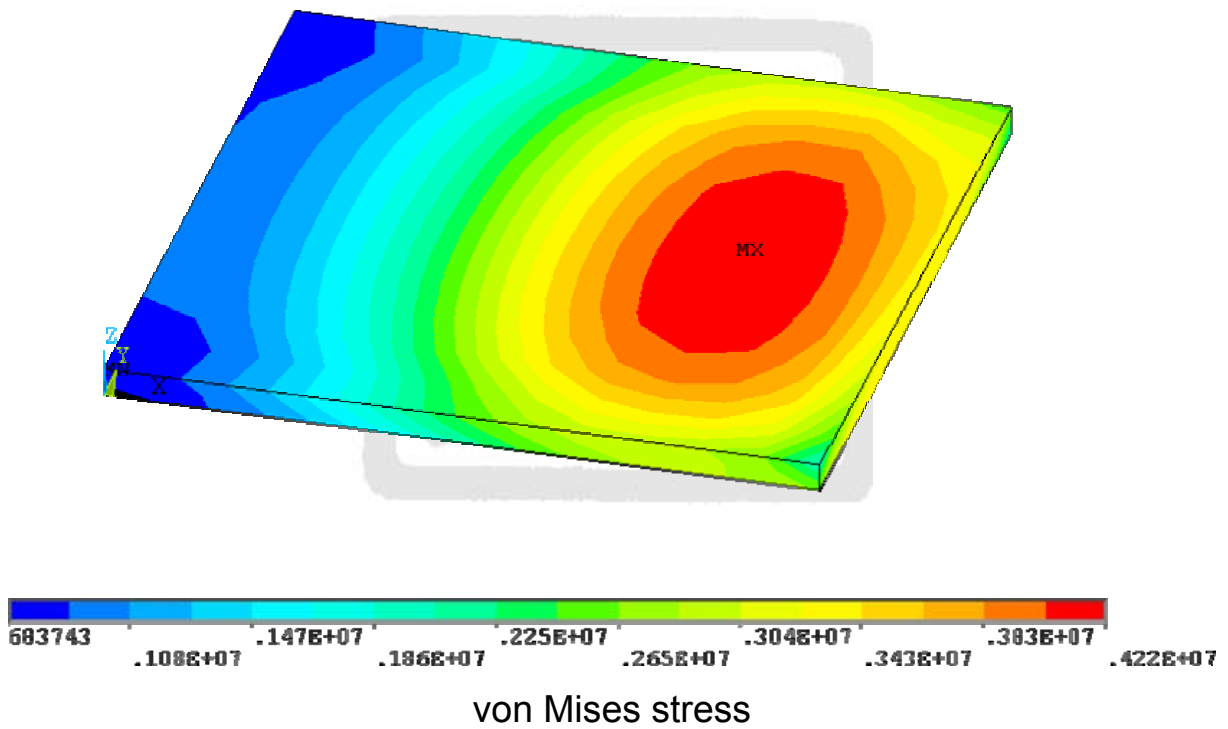


圖3-19 100N 50% Area of Surface, 8.162V Z方向之位移量, 0.099 μ m



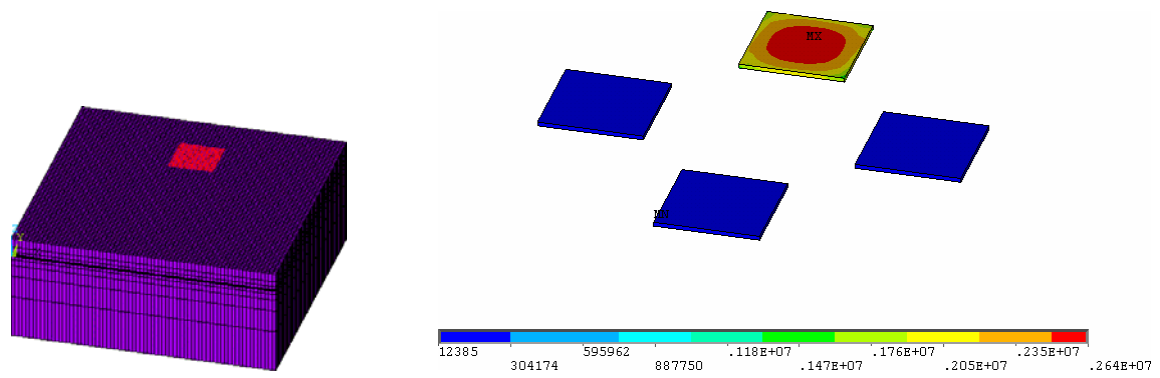


圖 3-20 100N 100% Area of Surface, 7.432V von Mises stress

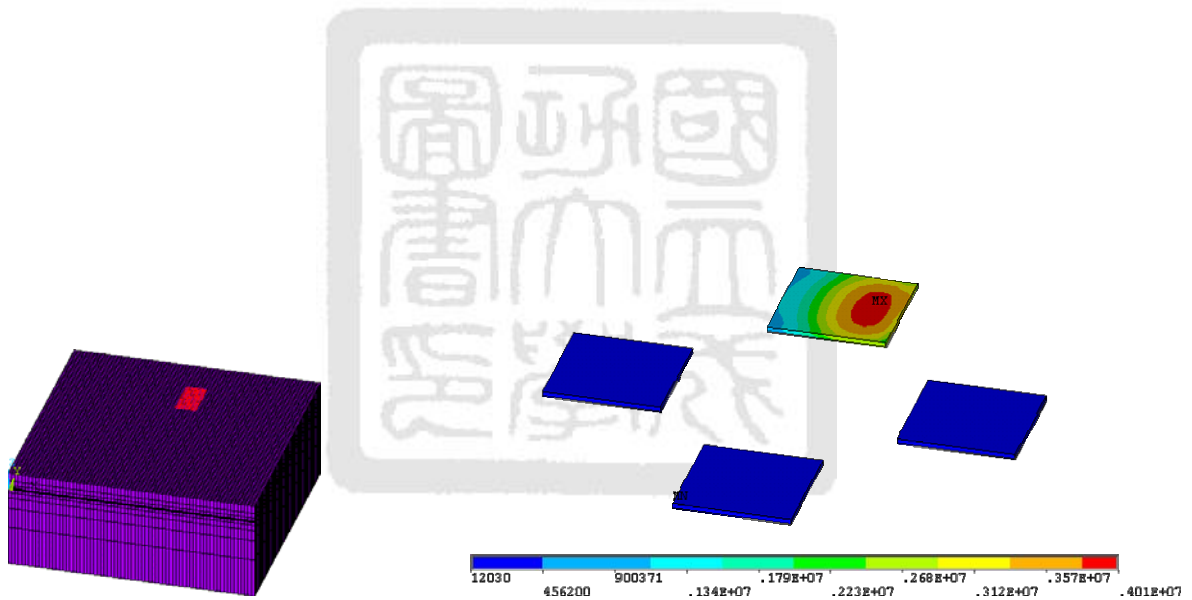


圖 3-21 100N 50% Area of Surface, 7.432V von Mises stress

表3-8 100N下不同幾何模型之訊號差異

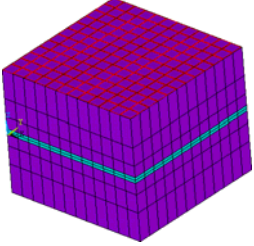
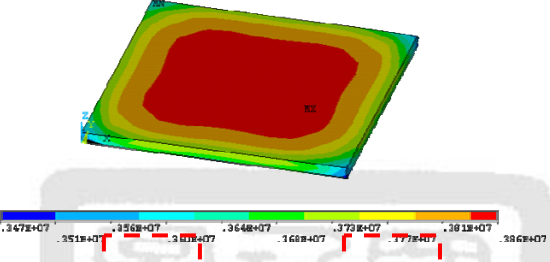
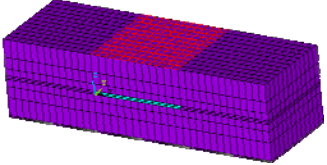
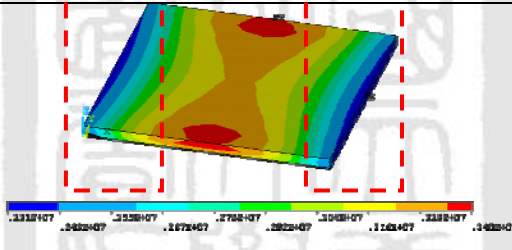
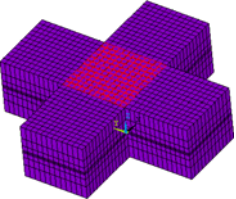
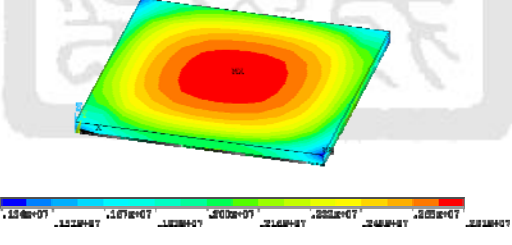
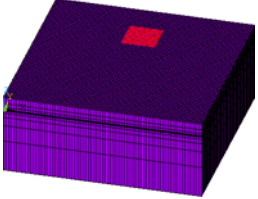
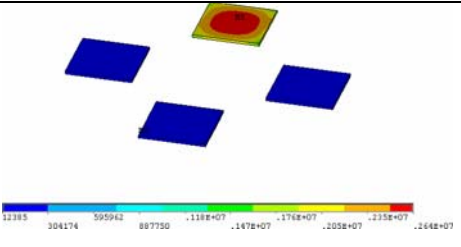
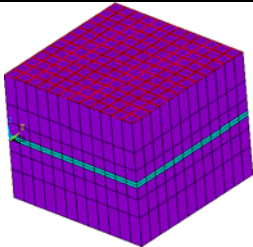
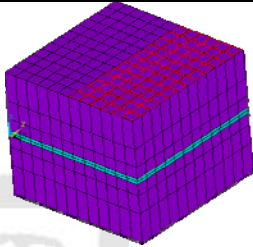
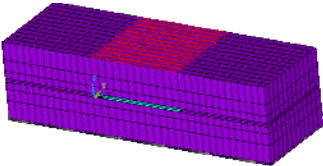
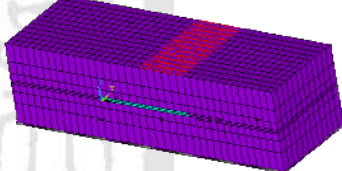
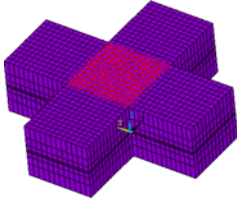
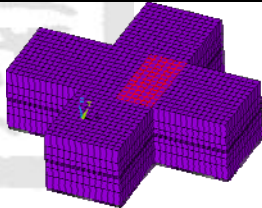
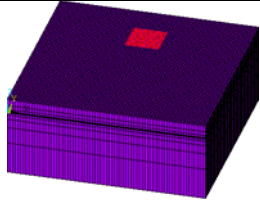
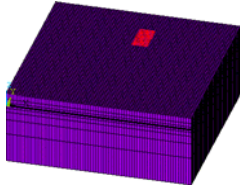
Model Type	Voltage
 	14.018V
 	10.588V
 	8.162V
 	7.423V

表3-9 100N下不同承受面積之訊號差異

100% area of PZT-5A	Voltage	50% area of PZT-5A	Voltage
	14.018V		14.018V
	10.588V		10.588V
	8.162V		8.162V
	7.423V		7.423V

由表3-8可得知，訊號隨著模子的能量消耗效應而衰減，應力亦隨著能量被周圍吸收而減小(紅色圈選處)。並在表3-9得知，壓電效應下之訊號不隨著承受面積差異而造成差異。



3.2.2 不同幾何外型之壓電陶瓷感測試片之模擬探討

由結果可知，不同幾何外型之壓電試片在電壓訊號輸出差異不大為1%左右，僅是在正方形外型之試片容易在四個邊角有較高的位移量而造成應力集中，進而容易導致其破壞。

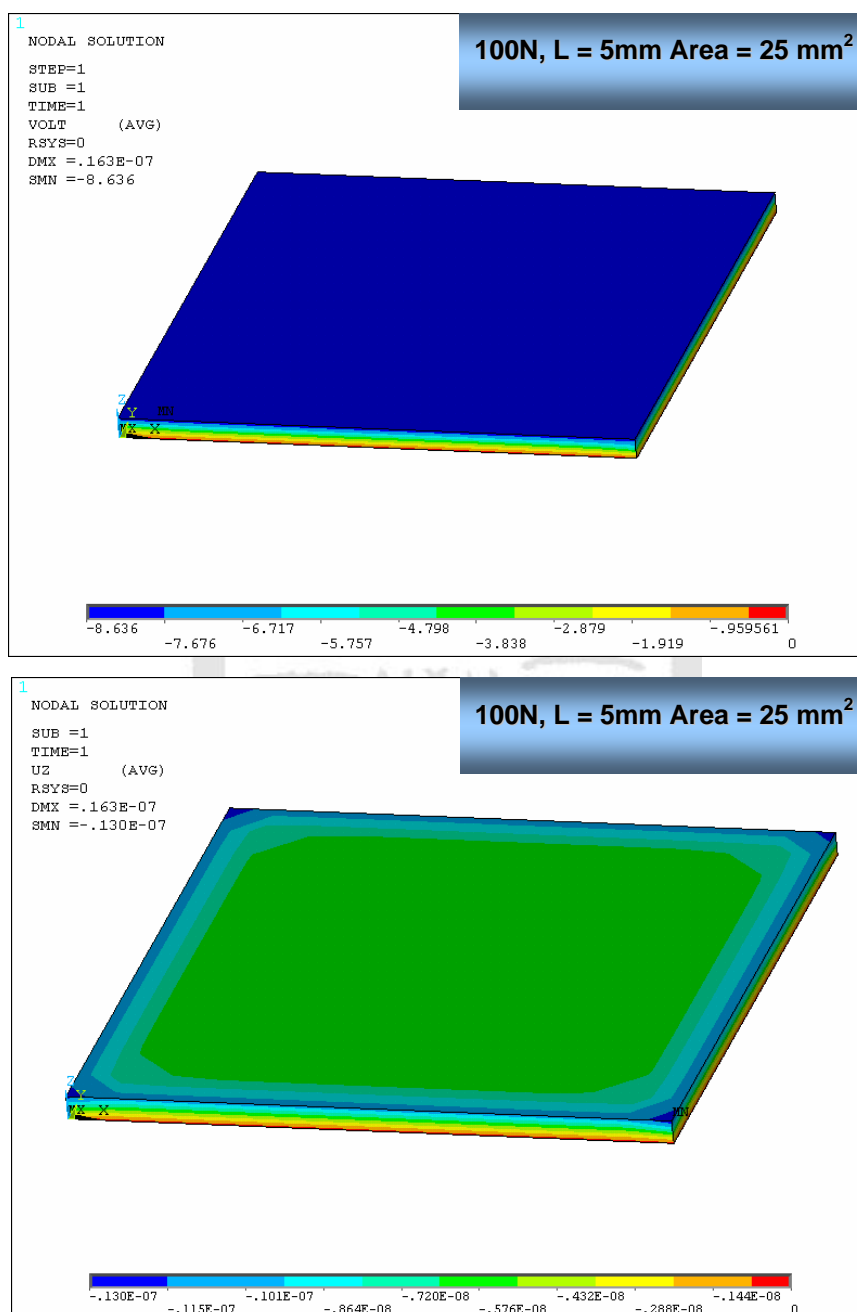


圖3-22 正方形外型之壓電試片—有限元素探討

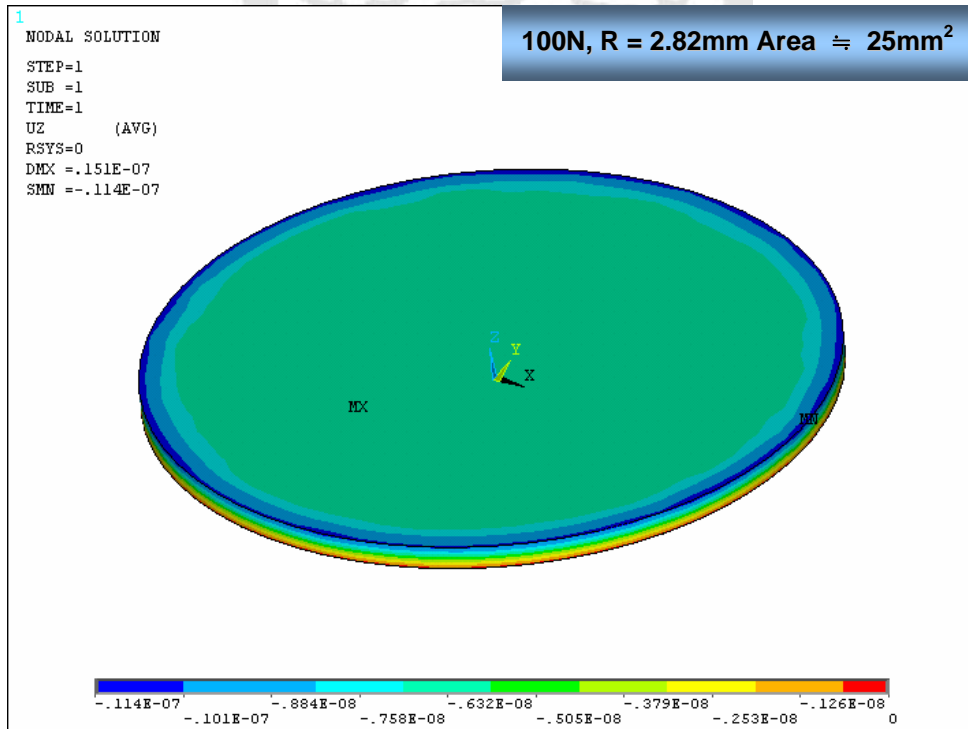
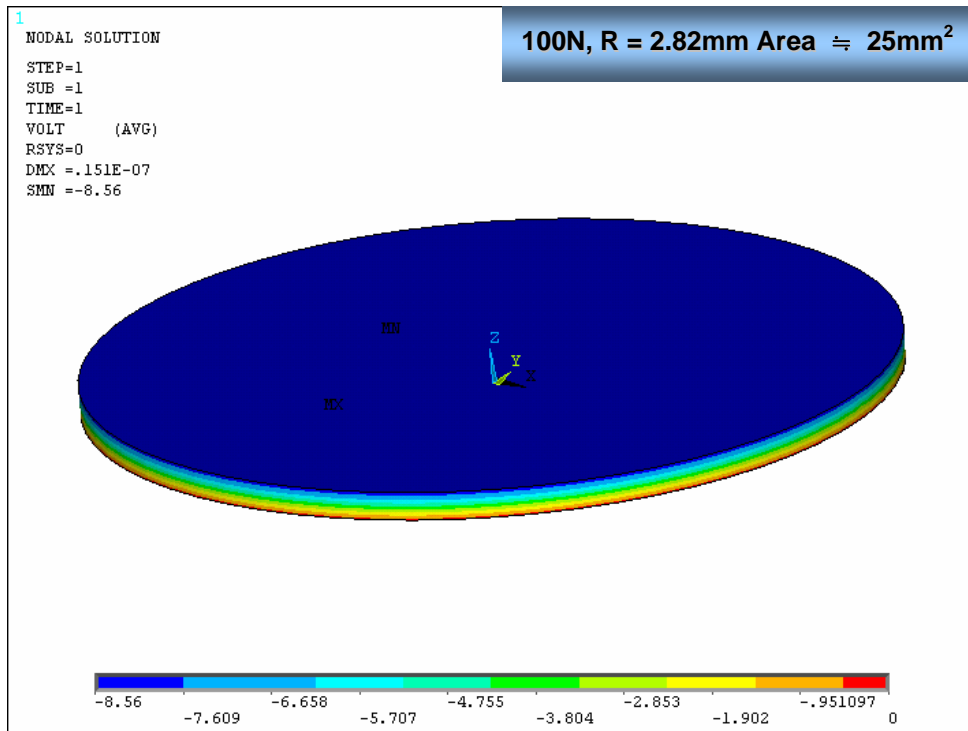


圖3-23 圓形外型之壓電試片－有限元素探討

3.2.3 壓電陶瓷試片之不同埋入深度對訊號之模擬探討

由評估PZT輸出訊號是否會因埋入深度的不同而有差異中，發現隨著壓電試片之埋入深度愈深，力量傳遞能量到壓電試片前，因部分能量已由周遭結構吸收掉，故承受相同力量時隨著埋入深度愈深壓電試片所感應到的力量愈微小，所以其輸出的電荷訊號也就愈小。

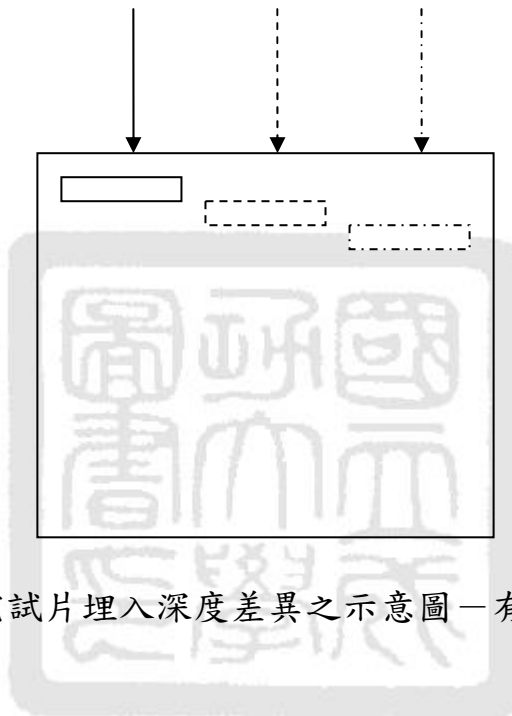


圖3-24 壓電試片埋入深度差異之示意圖—有限元素探討

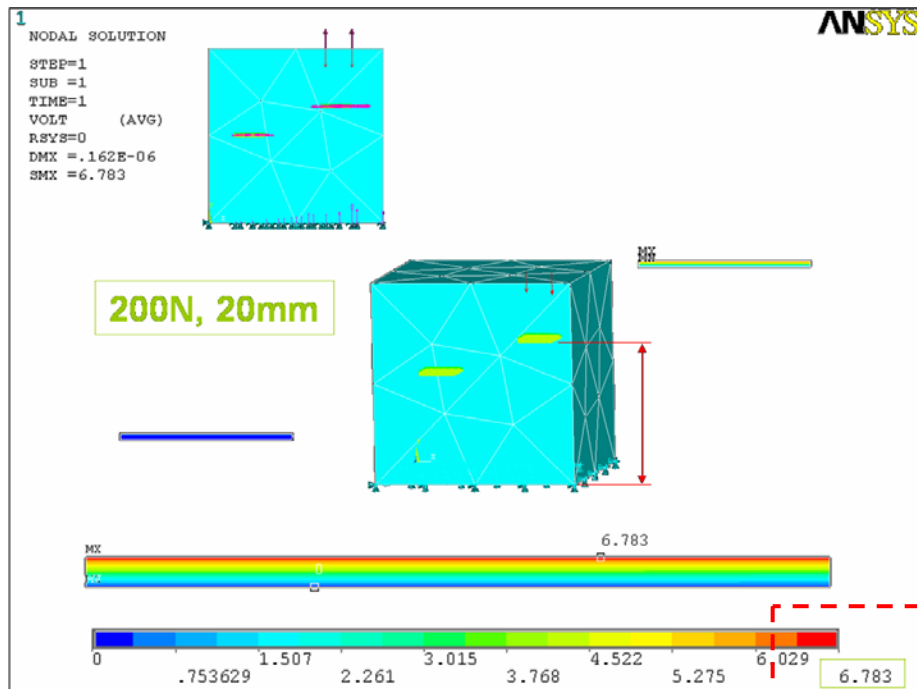


圖3-25 壓電感測試片埋入深度為10mm時之模擬訊號結果

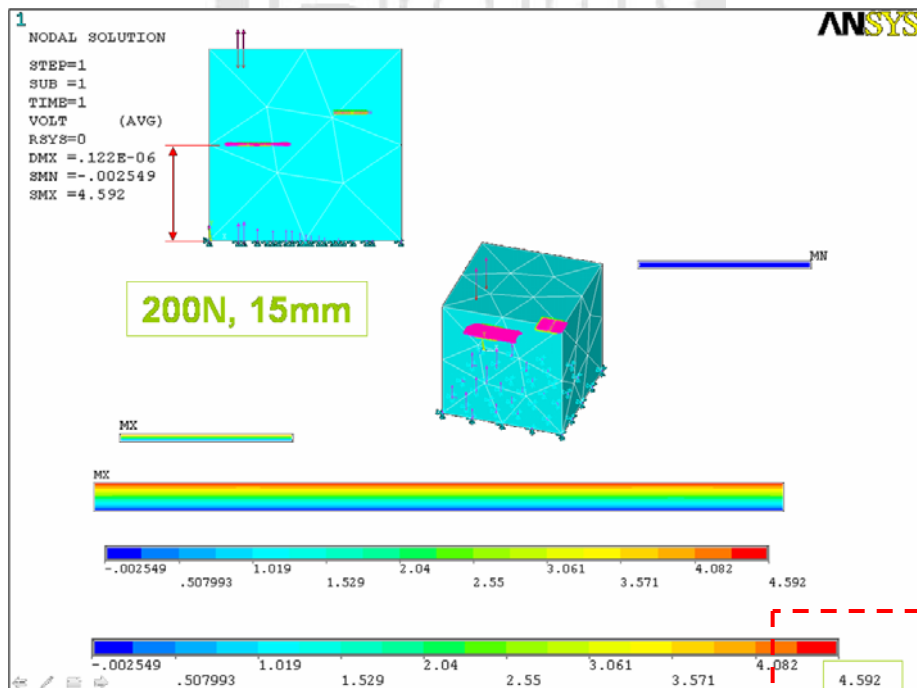


圖3-26 壓電感測試片埋入深度為15mm時之模擬訊號結果

3.2.4 四顆壓電感測元件對力量分布之模擬探討

結果與簡化模型相同，在壓電試片之相對投影面積上，壓電訊號不會因為承受面積大小不同而造成明顯差異外，施力點離兩相鄰的壓電感測試片距離相同時，則訊號大小相同。

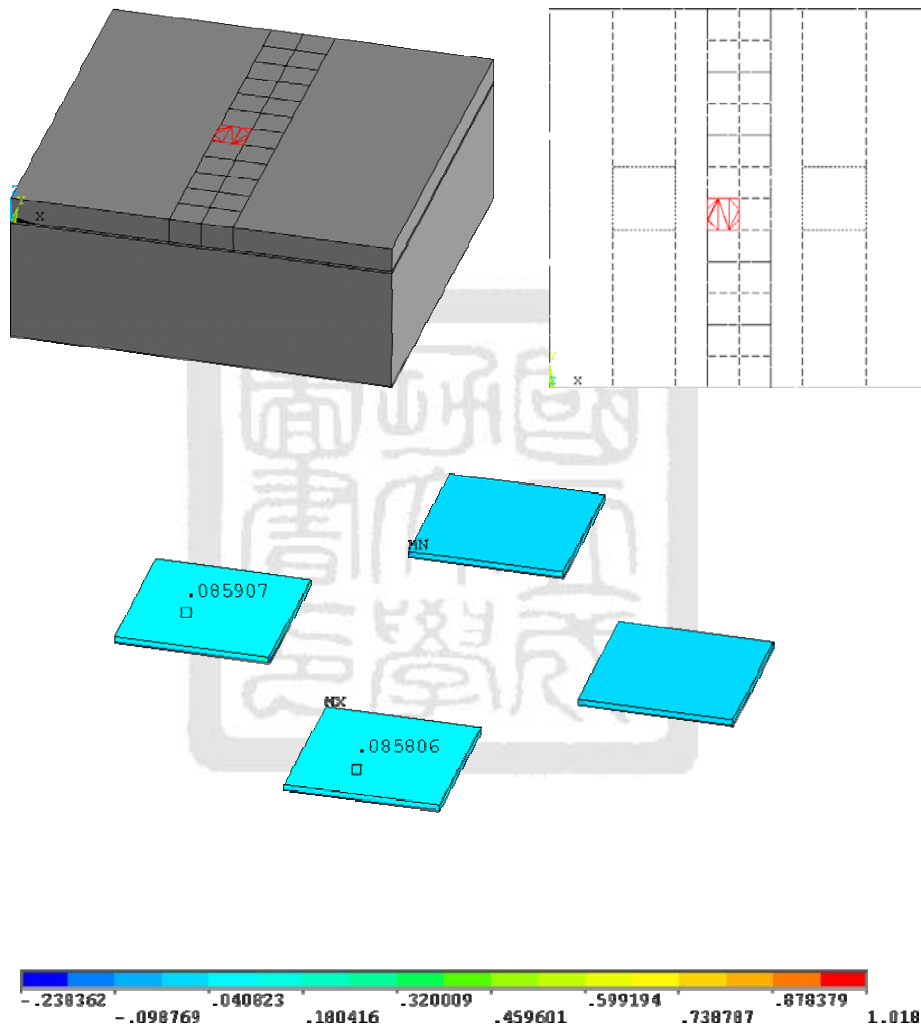


圖3-27 施力點離兩相鄰的壓電感測試片距離相同

3.3 微壓電式力量感測器系統實驗結果之討論

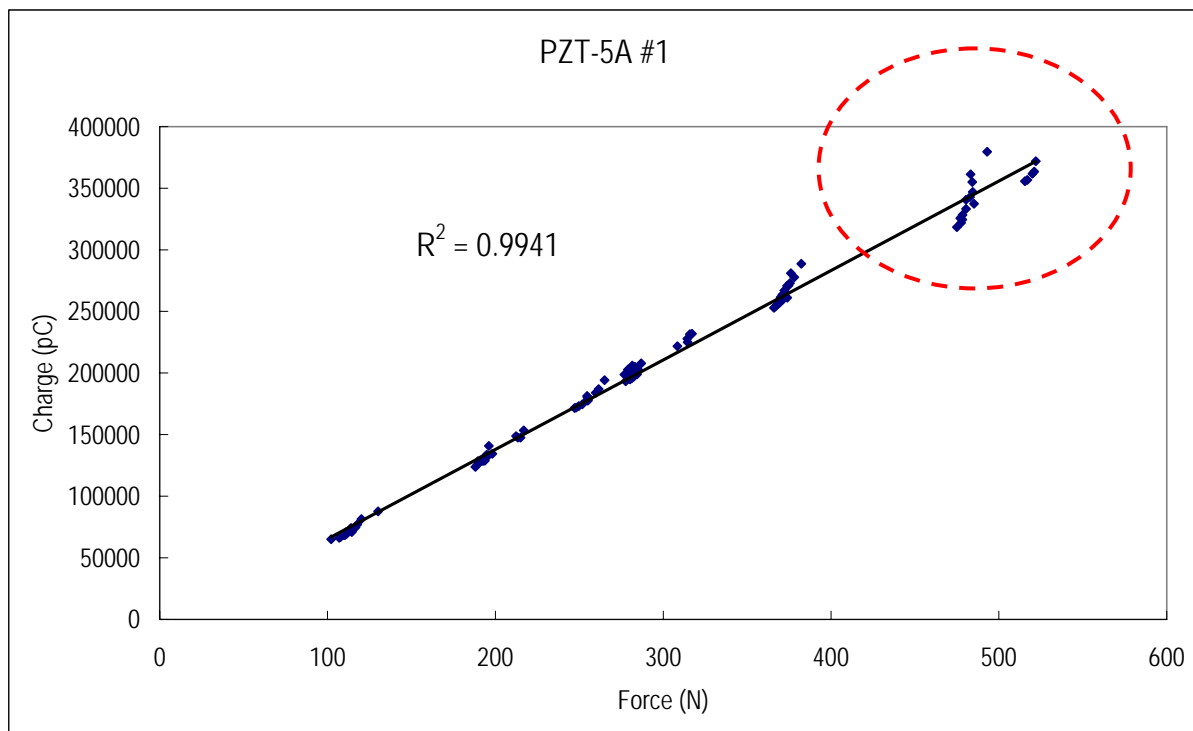


圖3-28 PZT-5A之力量-電荷量特性討論圖

在單顆壓電試片之特性評估中，雖整體之力量與電荷量線性相關性有一定的相關性，但在受力500N左右之結果及該區間之線性相關性，因在壓電試片內部已造成了微破壞而導致特性不穩定，故相較於100N—400有很明顯之差異。

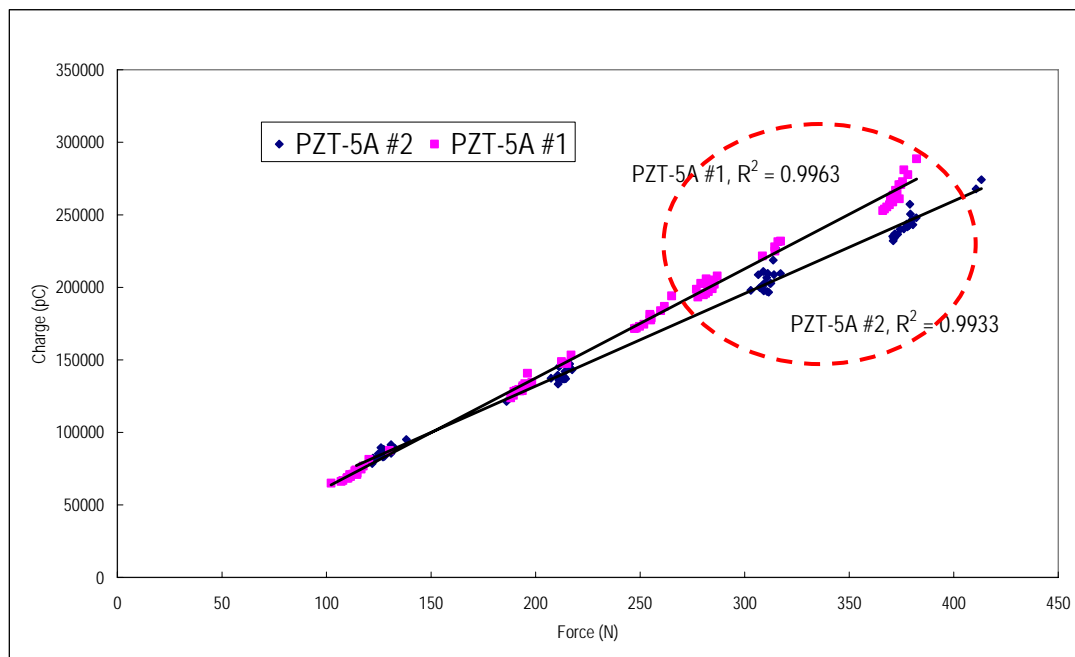


圖3-29 不同PZT-5A之力量-電荷量特性討論圖

由結果發現，不同的PZT-5A試片在小負荷範圍內(<200N)，其特性差異不大。而隨著力量的增加，雖其獨立之線性特性不錯但相對差異值卻有愈來愈大的趨勢。



圖3-30 利用壓印頭進行對位示意圖(確保力量傳遞)

本研究在進行靜態特性實驗探討時，利用儀器之壓印頭來定位RP模子的位置，確保負載是垂直向下給在RP壓印頭上，來間接給予壓電陶瓷試片一負載力。

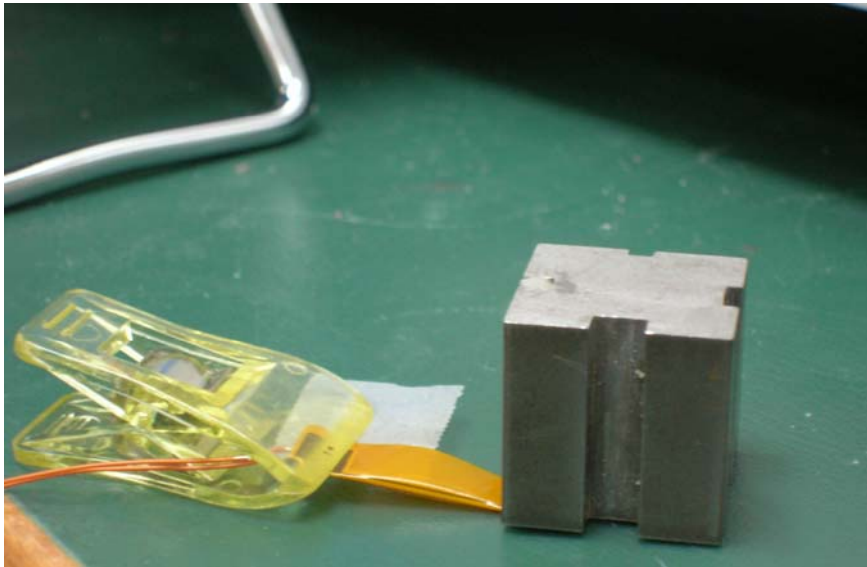


圖3-31 利用一結構體給予預壓力之示意圖

本研究在進行實驗進行中發現，若壓電試片與微製程所完成的訊號線沒有非常好的黏著情況下，容易造成電荷無法釋放而引起電荷量的累積，經試驗發現透過利用一結構體給予壓電試片預壓力確保其交界面之接觸，可有效改善電荷量無法回到低電荷之情況。



圖3-32 不同承受面積之壓印頭—快速原型製作

對於固定受力，直接給予在不同承受面積(100%、75%、50%)的壓電陶瓷試片上之探討實驗中，實驗結果和有限元素分析的結果一致，輸出訊號並不受影響而造成明顯差異。



圖3-33 特性實驗探討之模子—快速原型製作

本研究利用RP所製作的工件與模子，在前置規劃期間(電腦構圖)與實際成型後的尺寸，皆因該技術所使用的黏著劑之擴散現象而造成尺寸的外形膨脹與孔洞縮小之結果，約有0.2 ~ 0.3mm(單邊)的差異量。

本研究初步結果，製程上獲得中山大學林哲信老師的指導，初步已將系統所需的電極訊號線利用微機電製程製造完成，確認了製程上可達預期微陣列需求之尺寸(100 μ m線寬)。

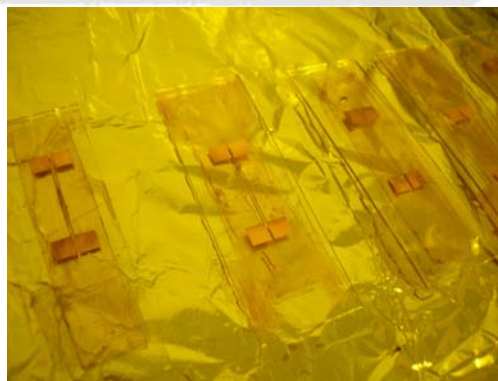


圖3-34 微機電製程之電極訊號傳輸線路圖

進行到398N的負荷時，將試片拿出時並沒破裂，但一用手碰觸邊角時，即因內部已造成微裂縫而造成破裂。



圖3-35 承受500N後，經手碰即破壞的試片圖

本研究所使用的壓電材料，雖在電荷量與力量有很高的線性相關性，但就現階段所取得的結果來探討其靈敏度的話，發現隨著力量的增加有下降的趨勢，又因在實驗過程中已知在承受約400N大小左右之力量時，在材料內部已造成了微裂縫的破壞，故相對於靈敏度而言，在400N-500N的受力情況時，應是材料內部以產生微裂縫的因素，導致其平均靈敏度下降的現象。

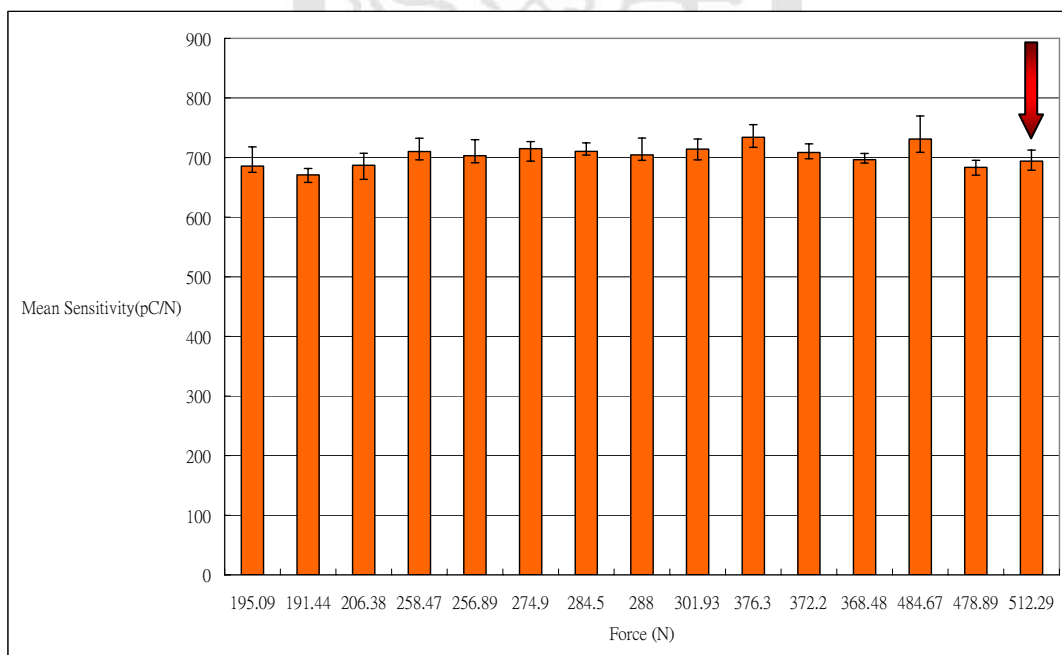


圖3-36 PZT-5A #1 平均靈敏度之特性圖

另外，在實驗中發現電荷訊號的漂移量並非屬於線性行為，故在結果中才會存在某些力量較大的情況下，卻是電荷量較少的例子，其原因就在於本研究假設電荷訊號的漂移量是屬於線性行為，依時間長短扣除掉電荷量所造成的差異結果。

表3-10 非線性漂移量造成之結果

Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	493.063	379500	769.68
#3	483.156	361280	747.75
#4	484.156	355000	733.23
#5	484.406	347000	716.34
#6	482.813	342800	710.01
#7	480.438	340600	708.94
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為3.02%			730.99±22.07

另外，由結果可觀察到壓電訊號之每秒平均偏移量隨著力量的增加有上升的趨勢，即受力愈大偏移量愈大。

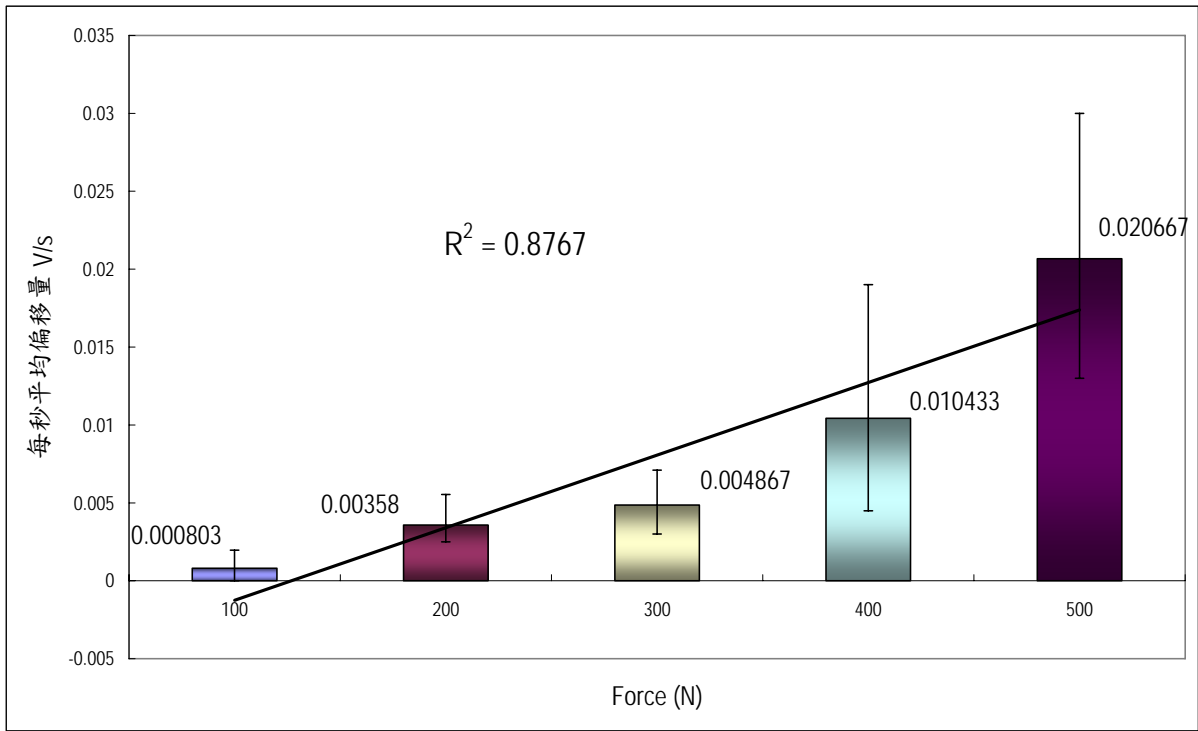


圖3-37 壓電試片之平均偏移量

表3-11 壓電試片之平均偏移量

Force (N)	平均每秒偏移量 (V/s)
100N	0.000803 ^{+0.001167} -0.000803
200N	0.00358 ^{+0.00196} -0.00108
300N	0.004867 ^{+0.002233} -0.001867
400N	0.010433 ^{+0.008567} -0.005933
500N	0.020667 ^{+0.009333} -0.007667

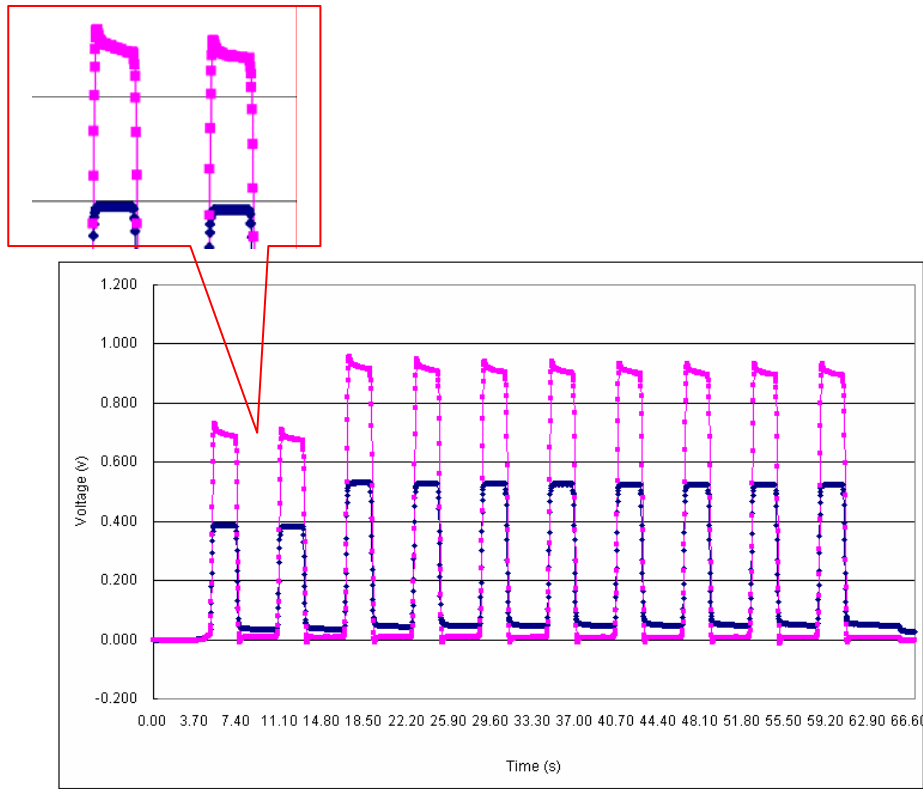


圖3-38 MTS力量衰減但壓電訊號不變之紀錄圖

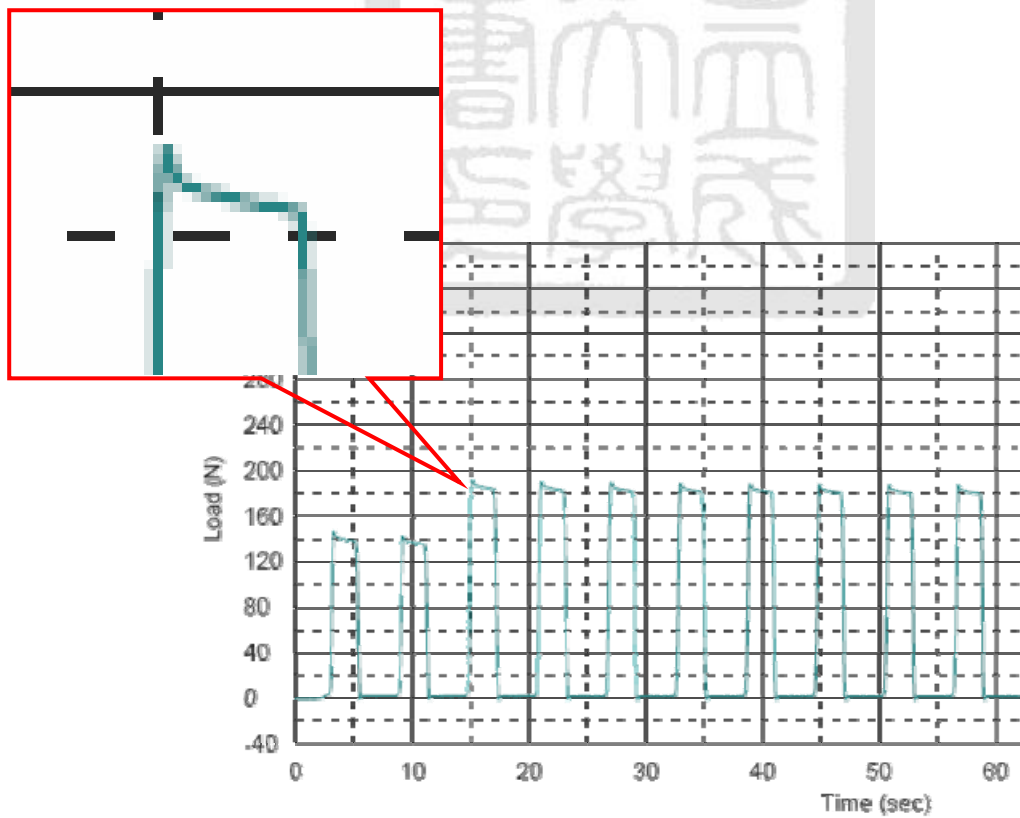


圖3-39 MTS內部力量(力量衰減)紀錄圖

由實驗紀錄中，發現圖3-38與圖3-39中，MTS力量衰減約10N但壓電訊號維持不變之現象。造成此現象之因素可能來自實驗過程中，力量是經由一黏彈性材料－保麗龍來傳遞力量所造成之結果。



3.4 有限元素法模擬分析結果之討論

在本研究的分析結果中，可發現到不同的施力點卻會有相同的輸出訊號，故由分析結果中得知，欲達到準確量測咬合力之分佈情況的必要條件就是增加感測單位的數目來達到成功與準確的量測。

本研究所採用的壓電陶瓷感測試片，為正方形的試片。由有限元素分析的結果得之，此類外型的試片容易在四個角有較大的變形量，容易造成應力集中現象，導致壓電試片的破壞。

利用有限元素法對於壓電陶瓷片上承受負載之面積大小對輸出訊號之差異探討中，可得知當同樣受力大小100N施在不同面積大小上之差異，僅影響各壓電感測元件之變形分佈差異，其對於輸出訊號大小則影響不大。

在壓電陶瓷試片承受面積大小的探討中，間接受力情形下(例：間隔了一陶瓷牙冠結構)輸出訊號不會隨著壓電陶瓷試片承受的面積大小而有所差異；僅在遠離壓電試片之投影面積的情況下，訊號會因部分力量由模子吸收掉而造成訊號的微小衰減。

同理，埋入深度之探討結果也因埋入深度愈深訊號衰減愈多，力量大部分皆由模子吸收掉。

第四章

結論與未來展望

4.1 結論

本研究主要目的在建立一套微壓電式力量感測系統，用來量測咬合力在牙冠面上之分布情形。而初步系統靈敏度之組內差異約在1%~3%，且利用校正曲線反推力量之基本試驗中，誤差為2%。

— 微壓電感測系統實驗部份

本研究所使用之壓電陶瓷感測試片(PZT-5A)，經電荷放大器及材料試驗機等儀器之校正實驗，得知其材料特性在力量與相對電荷量具有相當高之線性相關性(RSQ Value = 0.994)。

本研究已初步整合了微製程技術、快速原型技術、壓電效應與有限元素法分析，來進行探討咬合力分佈情況之研究，研究中如可兼具所欠缺的感測器製作資訊與知識的話，相信本量測系統將會更有效的提供相關資料給相關研究人員，甚至臨床人員更多的輔助。

本研究目前所使用之壓電陶瓷材料PZT-5A，目前僅可達到約350N之力量量測，其強度無法承受到臨床研究文獻上所量測到的最大咬合力500N，故材料之機械強度得與廠商再進一步討論與合作，製作出可承受更大負荷之壓電試片供本研究之應用可達到臨床上所需之強度。

在實驗過程與結果中，感受到結合壓電試片與電極訊號線之方式與技術之差異，將影響其感測靈敏度無法一致(即使是同一顆壓電試片)。故如可提供一適當預壓力之結構或穩固之黏著技術，將可使本系統提供更穩定之感測靈敏度。

將校正過的陣列感測器應用於量測咬合力，對鄰近力量之分佈及變化情形之實驗，可得知輸出訊號大小，僅跟承受的力量大小有關，壓電訊號不會因受力面積大小差異而有明顯差異。

現階段本研究所建構的量測系統相較於目前商用的壓電式力量感測器而言，即使已搭配了電荷放大器來進行準靜態量測的實驗，仍是無法達到一定的穩定性。若欲達到靜態量測功能，可如同商用感測器般地穩定的話，就得請教相關人員或廠商來一同解決此量測需求。

本系統目前電荷放大器所使用的訊號傳輸線路仍有很大的改進空間，如可改進訊號線的長度等變數，將可使整個系統的量測精準度提高許多。

一 有限元素法分析模擬部份

隨著壓電試片之埋入深度愈深，力量傳遞能量到壓電試片前，已由周遭結構吸收掉部份，故承受相同力量時隨著埋入深度愈深壓電試片所感應到的愈微小。

4.2 未來展望

後續，期望透過更嚴謹之實驗，來了解造成誤差之因素，進而降低誤差的產生，來增加系統之可信度。

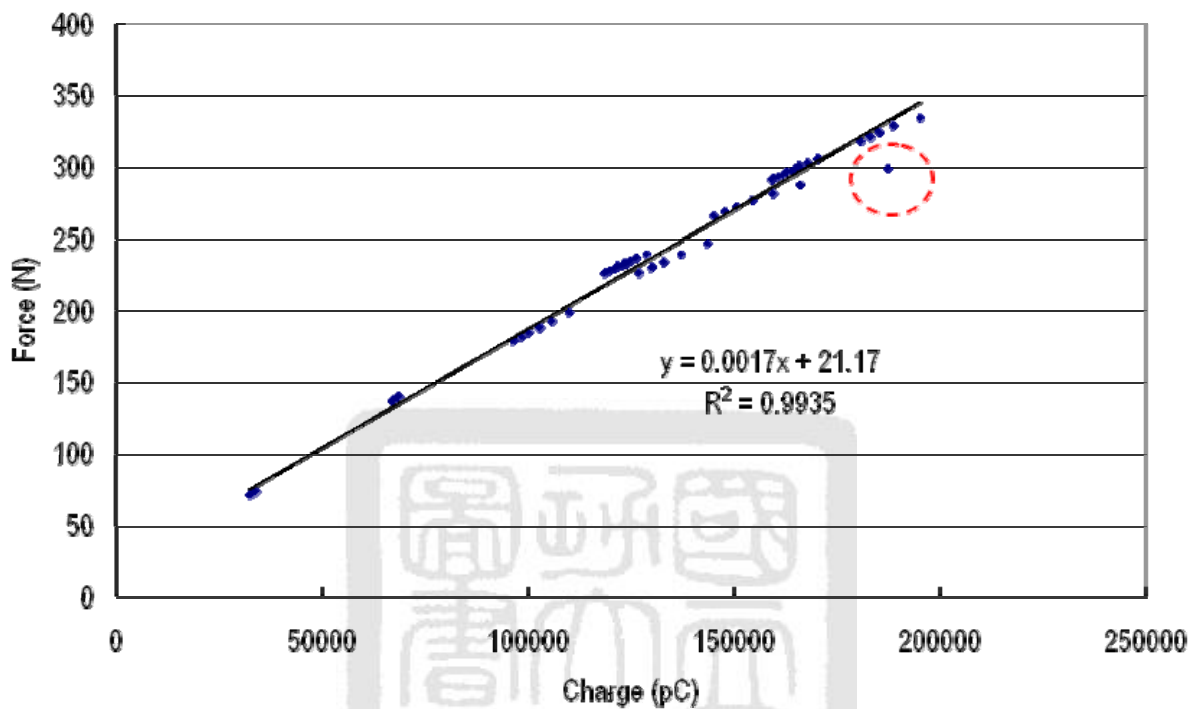


圖3-40 PZT-5A#3校正曲線之誤差問題

第五章

建議

校正實驗上

- 由於本研究在進行實驗時，曾遇到完全沒有壓電效應的情形發生。故針對所購買的感測試片，皆進行了基本的壓電效應測試。發現沒有壓電效應的其中一個原因就是拿到的壓電陶瓷試片原本就失去其特性，才造成沒有相對應的電荷量產生，故建議未來進行類似實驗的同學，在拿到試片的同時，先進行基本的特性試驗，來確保要使用的壓電試片是有其特性的，不然當使用完銀膠或其他黏著劑後，才發現沒有特性，就白費上銀膠的時間與精神了。另外，實驗中常發生沒訊號的現象，其原因在實驗後將製程所完成訊號線卸除下來，進行偵測時，發現沒訊號的問題即是該訊號線已斷，故按壓感測元件時，當然不會有訊號的產生。
- 由於本研究在進行實驗時，容易產生外來的雜訊來影響正常的電荷訊號及儀器訊號連接不上(instruNet)，經將其電源連接頭重新組裝後，發現不但訊號連接上了連原先伴隨著收到的外來雜訊也消除了，建議在實驗進行中，注意所用儀器之連接頭是否有鬆脫或損壞。
- 為了不影響電荷訊號的輸入，除了先暖機半小時外，建議在將Cable訊號線接上電荷放大器儀器前，利用短路的方式將Cable訊號線內殘餘的靜電荷排除掉 [11]。

材料製程上

- 建議可與台南安平工業區 皇尚公司合作，採用同一材料上分別對於不同量測點各別的極化製程，以更有效率的方式進行量測均佈力的大小。

有限元素模擬上

- 材料特性部份，簡化許多，故模擬的結果與實驗必定造成程度上的差異，故可找專業研究中心協助量測完整的材料特性，使模擬更具有意義。
- 模型建構部份，僅利用 Coupling 節點來代表電極之方式，並無具體建構出電極層之外型與材料特性，勢必也將造成結果之差異，建議可具體將電極層建構出來，將使模擬分析之結果更有參考之價值。



參考文獻

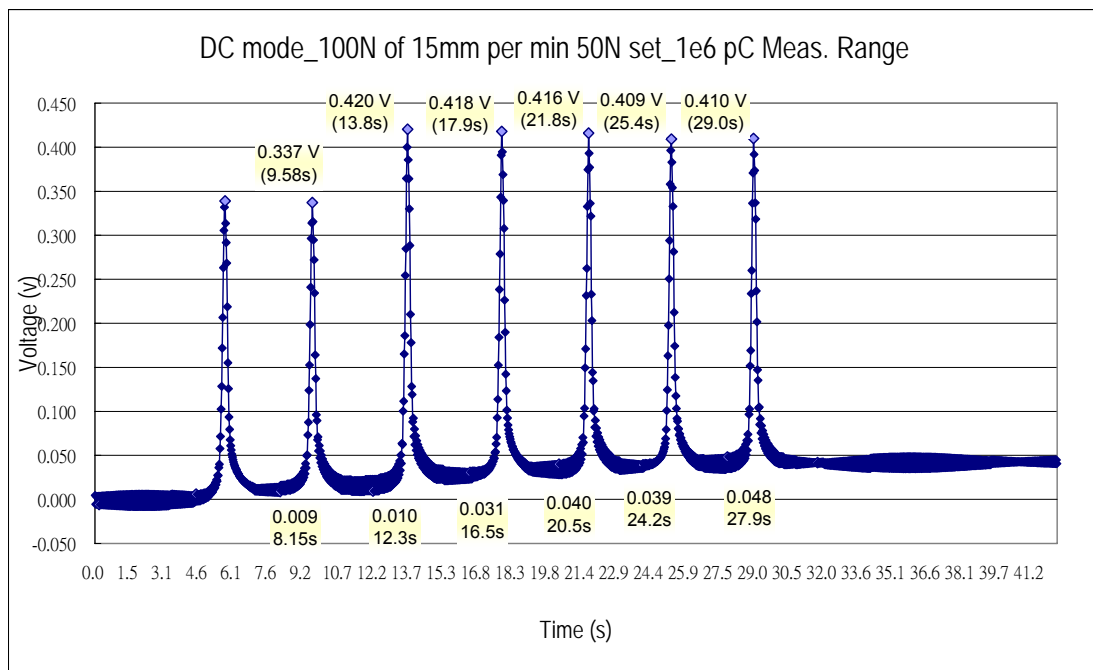
- [1] 周卓明(2003)，壓電力學，臺北：全華。
- [2] 黃士文(2005)，「剪力式壓電晶體噴墨頭陣列設計研究」，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文。
- [3] 黃清弘(2005)，「PVDF 壓電陣列感測器之製作、校正及應用」，國立成功大學機械工程學系碩士論文。
- [4] 饒珮瑩(2003)，「利用微機電技術設計及製作壓電式微型加速計」，國立成功大學航空太空工程學系碩士論文。
- [5] 德技股份有限公司網站資料
- [6] 萬能材料試驗機 AG-I 系列操作說明書
- [7] ANSYS Release 9.0 Documentation
- [8] Bousdras VA. (2006), "A novel approach to bite force measurements in a porcine model in vivo.", International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery 2006; 35: 663-667.
- [9] Gautschi, G. (2001), Piezoelectric Sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers, New York: Springer.
- [10] Kaarel A. (2003), "Influence of Core Thickness on a Restored Crown of a First Premolar Using Finite Element Analysis.", International Journal of Prosthodontics 2003; 16:474-480.
- [11] KISTER Charge Meter Type 5015A Instruction Manual
- [12] Morneburg TR. (2003), "In Vivo Forces on Implants Influenced by Occlusal Scheme and Food Consistency.", International Journal of Prosthodontics 2003; 16: 481-486
- [13] Major, M. A. (1984), Wheeler's Dental anatomy, physiology, and

occlusion, Philadelphia: Saunders.

- [14] Mericske-Stern R. (1996), "Simultaneous force measurement in 3 dimensions on oral endosseous implants in vitro and in vivo.", *Clinical Oral Implants Research* 1996; 7: 378-386.
- [15] Rottner, K. (2004), "Effect of Occlusal Morphology on the Accuracy of Bite Force Measurement Using Thin Film Transducers.", *International Journal of Prosthodontics* 2004; 17:518-523.



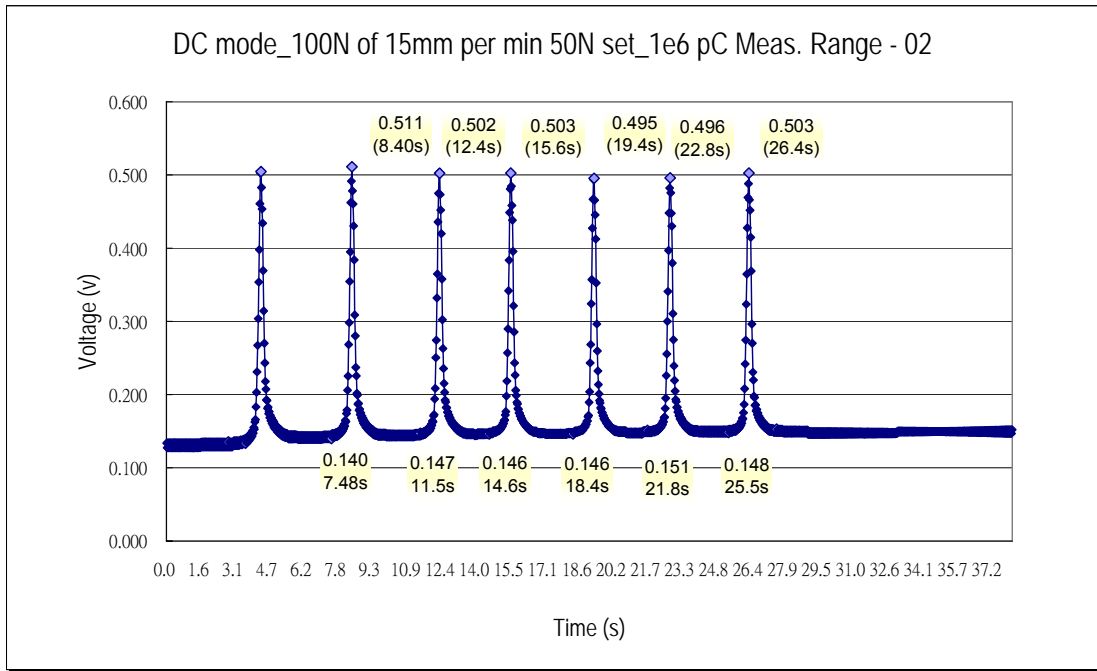
附錄A、PZT-5A #1 探討材料特性之實驗數據



$(0.048-0.009)/(27.9-8.15)=0.00197 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp
Units	N	mm
Cycle #1	104.469	0.68500
Cycle #2	102.219	0.68700
Cycle #3	120.250	0.69500
Cycle #4	117.563	0.69700
Cycle #5	116.625	0.69400
Cycle #6	113.563	0.69900
Cycle #7	114.688	0.69500
Mean	112.768	0.69314
Standard Deviation	6.81080	0.00518
Maximum	120.250	0.69900
Minimum	102.219	0.68500
Range	18.0310	0.01400
Median	114.688	0.69500

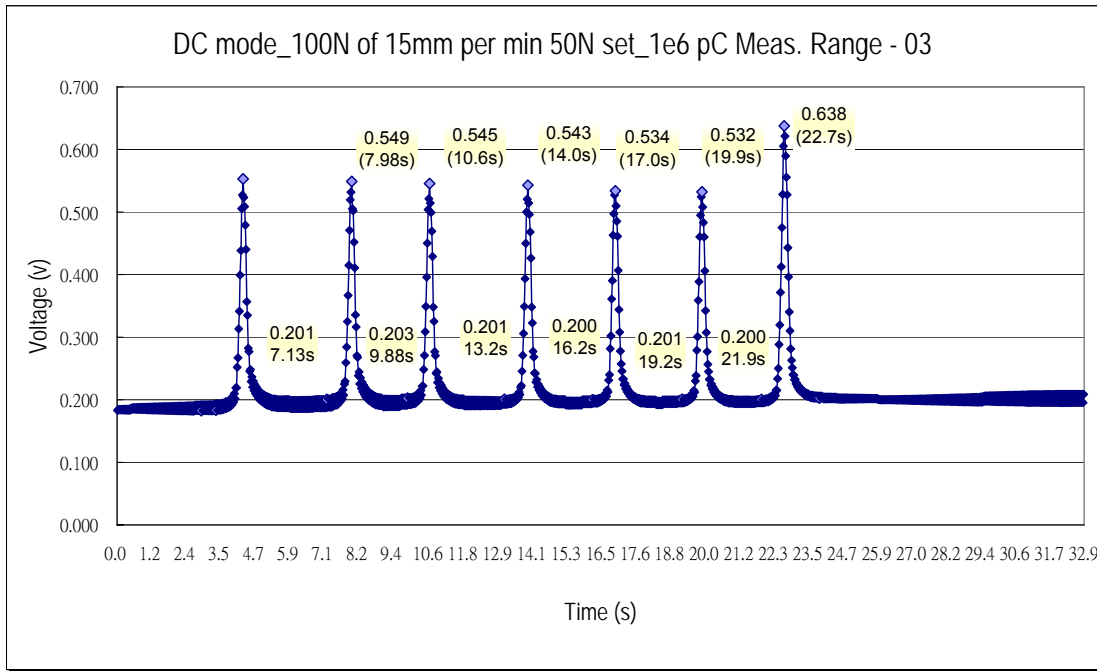
Cycle No.	Force	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	102.219	65037	636.25
#3	120.250	81409	677.00
#4	117.563	76848	653.68
#5	116.625	74688	640.41
#6	113.563	73527	647.46
#7	114.688	71967	627.50
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為2.43%			647.05±15.73



$(0.148-0.14)/(25.5-7.48)=0.00044 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp
Units	N	mm
Cycle #1	112.375	0.68800
Cycle #2	114.094	0.69500
Cycle #3	114.469	0.69700
Cycle #4	112.531	0.69500
Cycle #5	111.250	0.69700
Cycle #6	110.063	0.69700
Cycle #7	111.094	0.70000
Mean	112.268	0.69557
Standard Deviation	1.60914	0.00374
Maximum	114.469	0.70000
Minimum	110.063	0.68800
Range	4.40600	0.01200
Median	112.375	0.69700

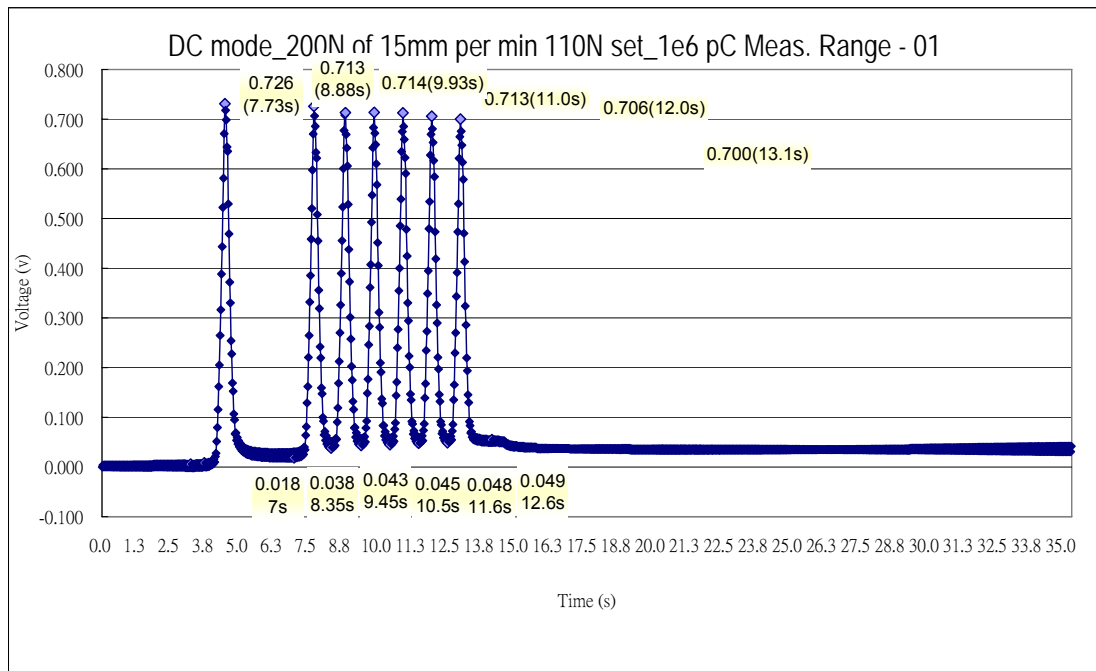
Cycle No.	Force	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	114.094	74119	649.63
#3	114.469	70921	619.56
#4	112.531	71312	633.71
#5	111.250	69712	626.62
#6	110.063	68912	626.11
#7	111.094	70921	638.39
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.55%			632.34±9.77



$(0.2-0.2)/(21.9-7.13)=0 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Displ
Units	N	mm
Cycle #1	112.219	0.69700
Cycle #2	111.500	0.69600
Cycle #3	110.313	0.69700
Cycle #4	109.688	0.69700
Cycle #5	107.813	0.70000
Cycle #6	106.969	0.70000
Cycle #7	130.063	0.70100
Mean	112.652	0.69829
Standard Deviation	7.90175	0.00198
Maximum	130.063	0.70100
Minimum	106.969	0.69600
Range	23.0940	0.00500
Median	110.313	0.69700

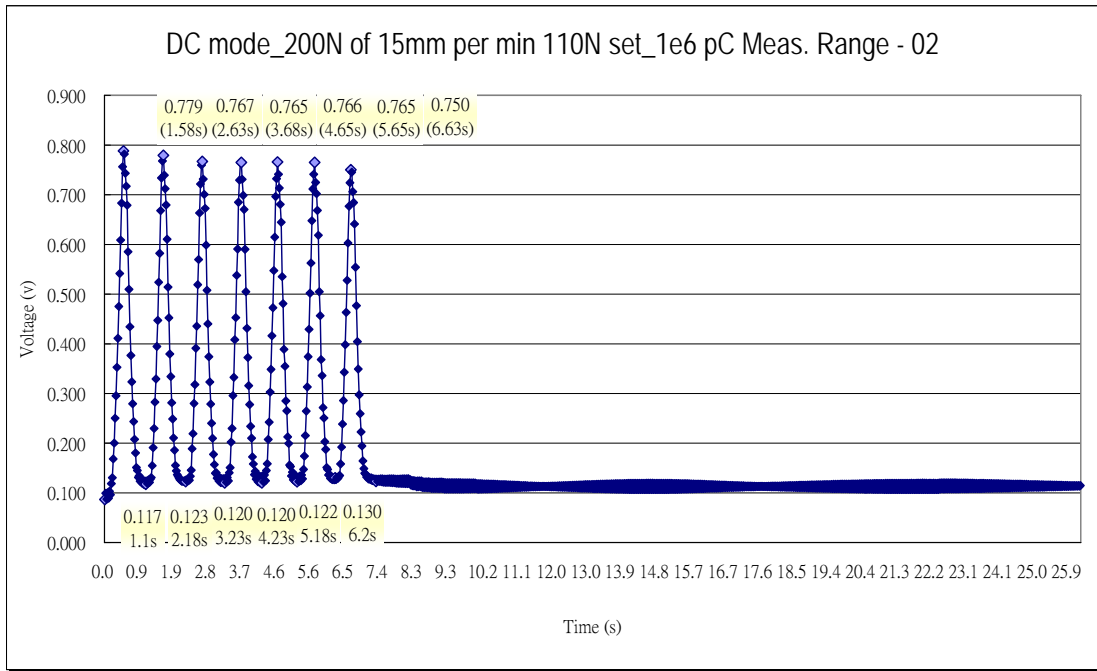
Cycle No.	Force	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	111.500	69600	624.22
#3	110.313	68400	620.05
#4	109.688	68400	623.59
#5	107.813	66800	619.59
#6	106.969	66200	618.87
#7	130.063	87600	673.52
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為3.11%			629.97±19.58



$(0.049-0.018)/(12.6-7)=0.00554 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	198.531	0.73800	0.00000	0.37600
Cycle #2	196.094	0.73800	0.25000	0.65100
Cycle #3	198.188	0.74500	-0.2188	0.64500
Cycle #4	194.844	0.74500	-0.4688	0.64600
Cycle #5	195.781	0.74700	-0.6563	0.64800
Cycle #6	193.656	0.74700	-0.7813	0.64800
Cycle #7	191.969	0.74700	0.40625	0.66100
Mean	195.580	0.74386	-0.2098	0.61071
Standard Deviation	2.34867	0.00410	0.45242	0.10364
Maximum	198.531	0.74700	0.40625	0.66100
Minimum	191.969	0.73800	-0.7813	0.37600
Range	6.56201	0.00900	1.18755	0.28500
Median	195.781	0.74500	-0.2188	0.64800

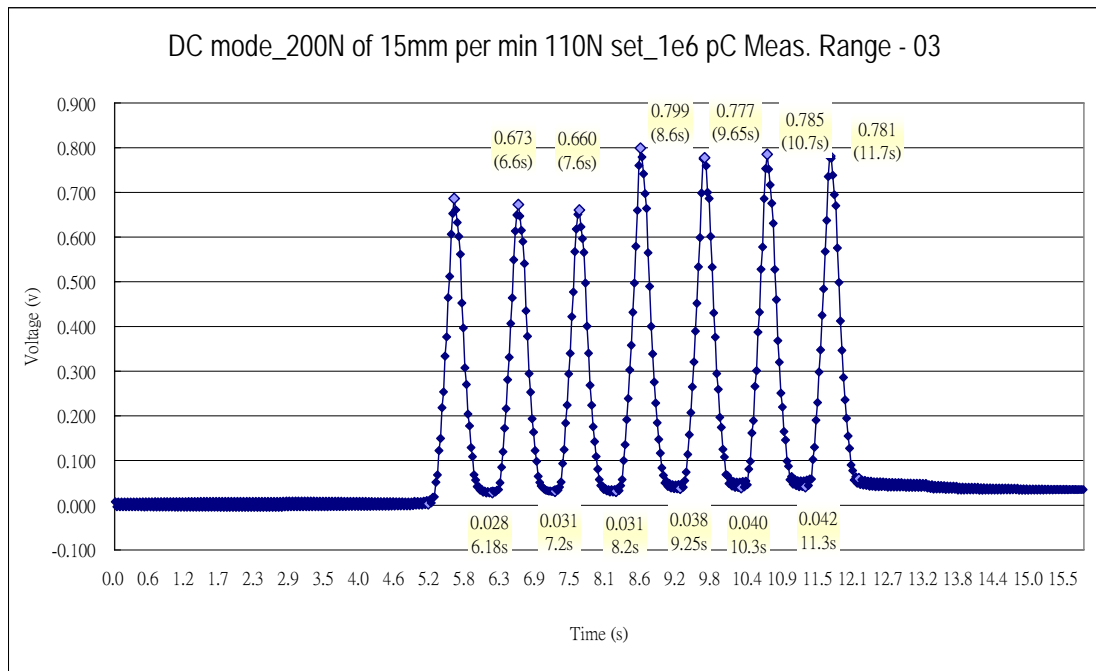
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	196.094	140791	717.98
#3	198.188	134413	678.21
#4	194.844	133668	686.03
#5	195.781	133046	679.57
#6	193.656	131157	677.27
#7	191.969	129646	675.35
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為2.16%			685.74±14.8



$$(0.13-0.117)/(6.2-1.1)=0.0025 \text{ V/s (平均每秒偏移量)}$$

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	195.063	0.74900	-0.3125	0.65100
Cycle #2	193.906	0.75000	-0.8438	0.64800
Cycle #3	192.531	0.74700	-0.9063	0.64800
Cycle #4	193.719	0.74700	-1.0625	0.65400
Cycle #5	190.813	0.74500	-0.9688	0.65300
Cycle #6	189.594	0.74400	-1.2500	0.65600
Cycle #7	188.063	0.75000	-0.0625	0.66400
Mean	191.956	0.74743	-0.7723	0.65343
Standard Deviation	2.54741	0.00237	0.42609	0.00553
Maximum	195.063	0.75000	-0.0625	0.66400
Minimum	188.063	0.74400	-1.2500	0.64800
Range	7.00000	0.00600	1.18750	0.01600
Median	192.531	0.74700	-0.9063	0.65300

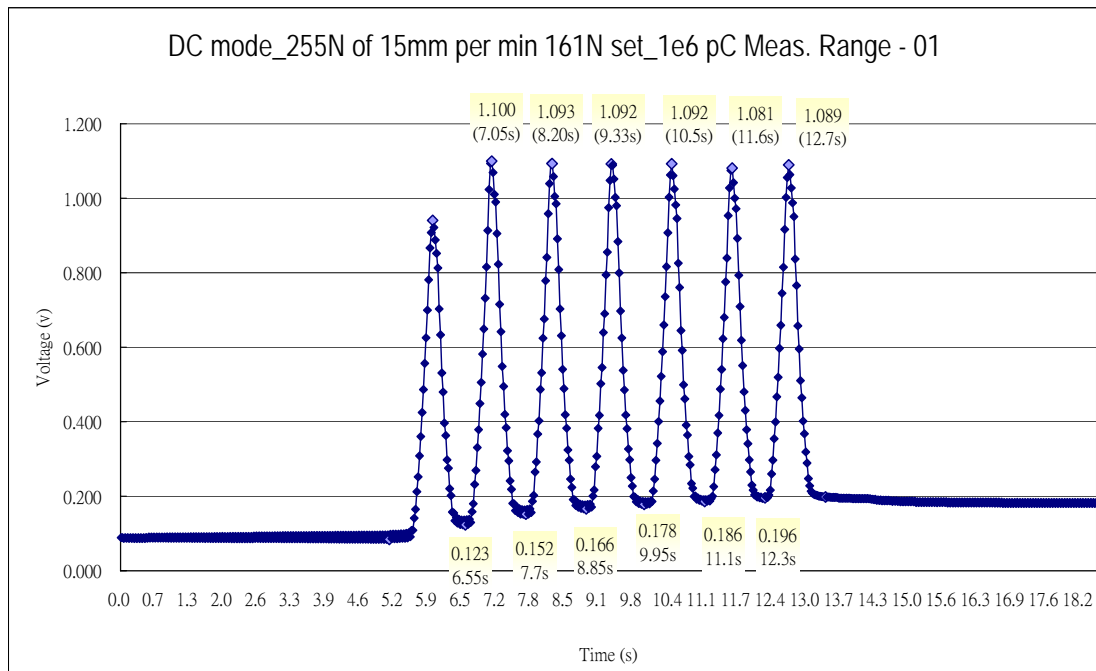
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	193.906	132160	681.57
#3	192.531	128575	667.81
#4	193.719	128775	664.75
#5	190.813	128990	676.00
#6	189.594	128365	677.05
#7	188.063	123785	658.21
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.2%			670.9±8.02



$(0.042-0.028)/(11.3-6.18)=0.0027 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Displacement	Min_Load	Min_Displacement
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	191.625	0.74900	-0.9688	0.65100
Cycle #2	191.344	0.75000	-1.2188	0.65400
Cycle #3	189.344	0.74700	-1.2500	0.65400
Cycle #4	216.938	0.75900	-1.1563	0.65400
Cycle #5	215.000	0.75700	-1.2813	0.65900
Cycle #6	212.344	0.75100	-1.2813	0.65400
Cycle #7	213.313	0.75900	2.56250	0.67300
Mean	204.273	0.75314	-0.6563	0.65700
Standard Deviation	12.7301	0.00505	1.42352	0.00744
Maximum	216.938	0.75900	2.56250	0.67300
Minimum	189.344	0.74700	-1.2813	0.65100
Range	27.5940	0.01200	3.84380	0.02200
Median	212.344	0.75100	-1.2188	0.65400

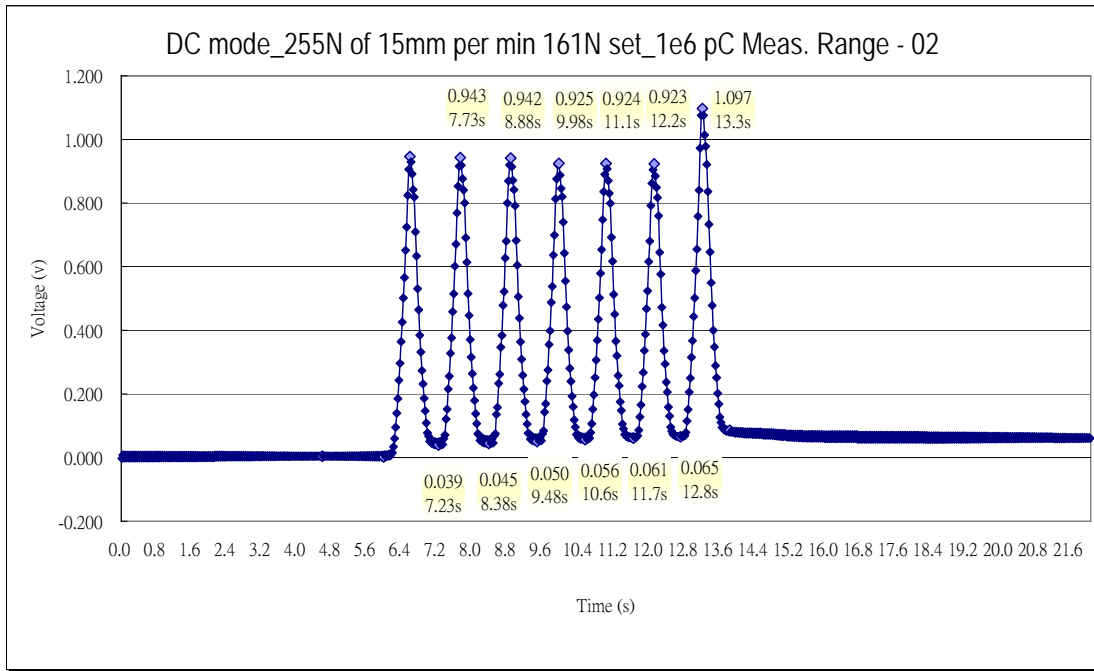
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	191.344	128773	672.99
#3	189.344	125584	663.26
#4	216.938	153384	707.04
#5	215.000	147584	686.44
#6	212.344	148784	700.67
#7	213.313	147584	691.87
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為2.2%			687.05±15.12



$(0.196-0.123)/(12.3-6.55)=0.0127 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Displ	Min_Load	Min_Displ
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	234.813	0.75800	-0.9375	0.65700
Cycle #2	265.063	0.76900	-1.0313	0.65700
Cycle #3	261.563	0.76900	-1.0000	0.65700
Cycle #4	259.813	0.76900	-1.1250	0.65700
Cycle #5	254.625	0.77400	-1.2500	0.66400
Cycle #6	254.656	0.77200	-1.3438	0.66600
Cycle #7	255.094	0.77000	4.59375	0.68400
Mean	255.090	0.76871	-0.2991	0.66314
Standard Deviation	9.79139	0.00509	2.16228	0.00996
Maximum	265.063	0.77400	4.59375	0.68400
Minimum	234.813	0.75800	-1.3438	0.65700
Range	30.2500	0.01600	5.93755	0.02700
Median	255.094	0.76900	-1.0313	0.65700

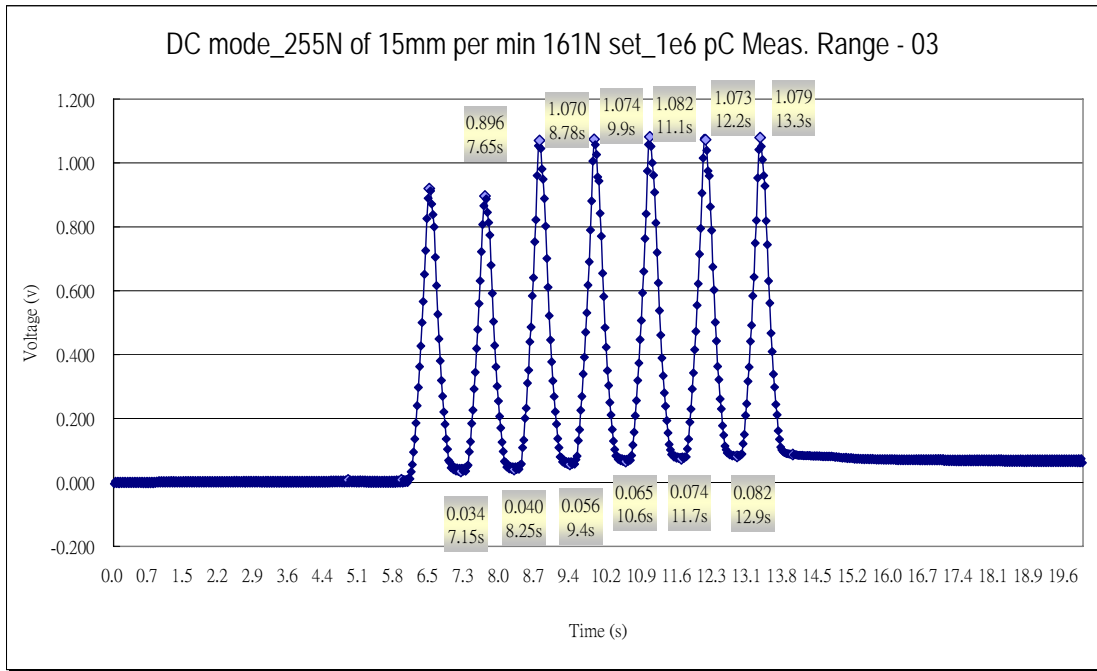
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	265.063	194130	732.39
#3	261.563	186930	714.67
#4	259.813	183981	708.13
#5	254.625	181403	712.43
#6	254.656	177730	697.92
#7	255.094	177584	696.15
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.7%			710.28±12.04



$(0.065-0.039)/(12.8-7.23)=0.0047 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	251.125	0.77400	-1.0313	0.66100
Cycle #2	254.844	0.77200	-1.2188	0.66100
Cycle #3	255.313	0.77200	-1.3438	0.66600
Cycle #4	251.781	0.77000	-1.1875	0.66500
Cycle #5	249.688	0.76900	-1.4688	0.66800
Cycle #6	248.156	0.77500	-1.5938	0.66700
Cycle #7	281.563	0.78400	3.78125	0.68600
Mean	256.067	0.77371	-0.5804	0.66771
Standard Deviation	11.5339	0.00499	1.93229	0.00852
Maximum	281.563	0.78400	3.78125	0.68600
Minimum	248.156	0.76900	-1.5938	0.66100
Range	33.4070	0.01500	5.37505	0.02500
Median	251.781	0.77200	-1.2188	0.66600

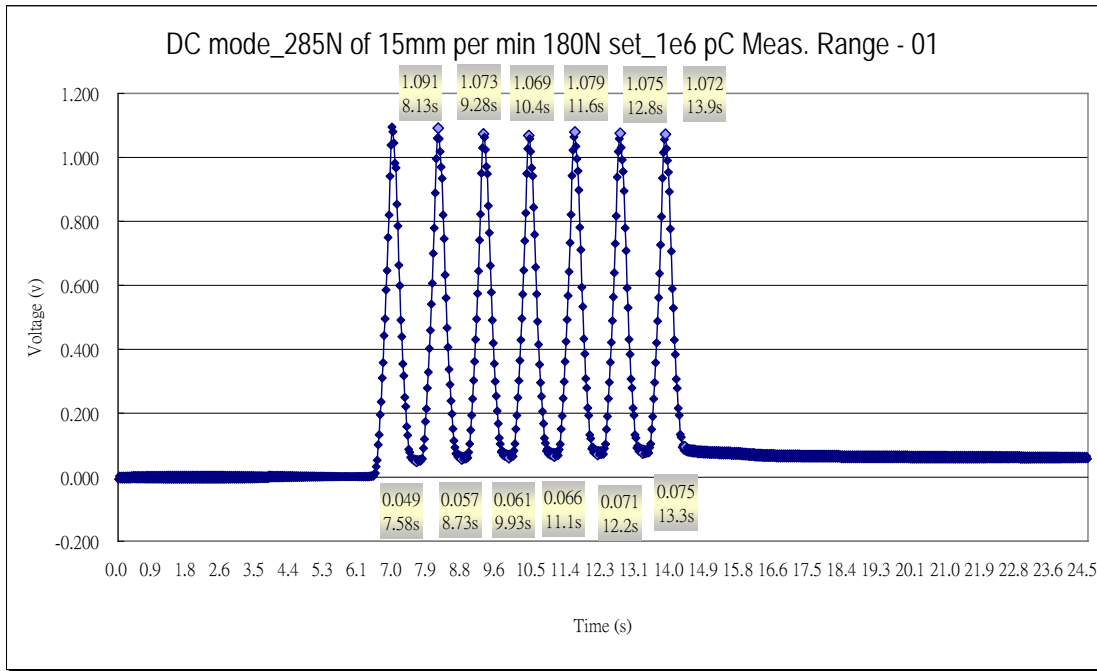
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	254.844	180330	706.00
#3	255.313	178930	699.22
#4	251.781	174530	691.55
#5	249.688	173130	691.74
#6	248.156	171930	691.18
#7	281.563	205930	729.93
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.96%			701.6±13.75



$(0.082-0.034)/(12.9-7.15)=0.0083 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	252.000	0.77000	-1.1563	0.65900
Cycle #2	247.250	0.77000	-1.1875	0.66500
Cycle #3	283.031	0.78200	-1.2813	0.67000
Cycle #4	279.000	0.77500	-1.3438	0.66700
Cycle #5	280.844	0.78400	-1.6250	0.67100
Cycle #6	282.406	0.78100	-1.4688	0.67000
Cycle #7	276.875	0.77600	3.43750	0.68900
Mean	271.629	0.77686	-0.6607	0.67014
Standard Deviation	15.2346	0.00567	1.81444	0.00928
Maximum	283.031	0.78400	3.43750	0.68900
Minimum	247.250	0.77000	-1.6250	0.65900
Range	35.7810	0.01400	5.06250	0.03000
Median	279.000	0.77600	-1.2813	0.67000

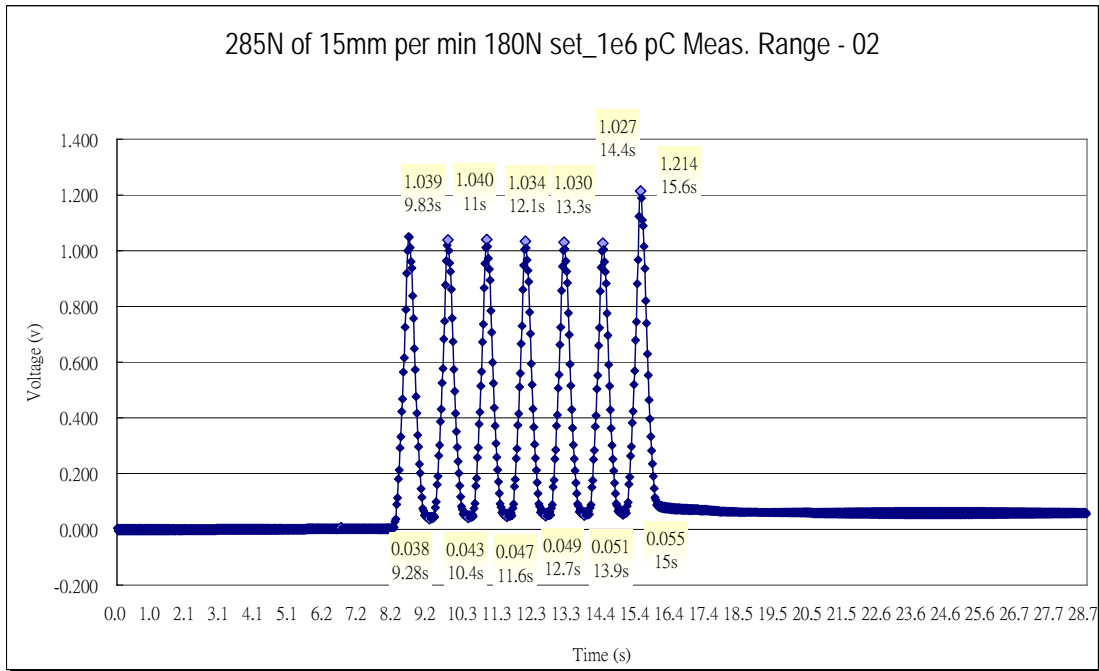
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	247.250	171570	693.91
#3	283.031	205120	724.73
#4	279.000	202770	726.77
#5	280.844	202570	721.29
#6	282.406	198970	704.55
#7	276.875	198736	717.78
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.65%			714.84±11.79



$(0.075-0.049)/(13.3-7.58)=0.0045 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	288.688	0.78400	-1.0938	0.66600
Cycle #2	286.875	0.78700	-1.2500	0.66700
Cycle #3	283.906	0.78700	-1.3750	0.67300
Cycle #4	284.375	0.78500	-1.5625	0.67300
Cycle #5	285.500	0.78700	-1.5625	0.67600
Cycle #6	283.906	0.78700	-1.5000	0.67600
Cycle #7	282.438	0.78700	1.81250	0.68900
Mean	285.098	0.78629	-0.9330	0.67429
Standard Deviation	2.10742	0.00125	1.22294	0.00761
Maximum	288.688	0.78700	1.81250	0.68900
Minimum	282.438	0.78400	-1.5625	0.66600
Range	6.25000	0.00300	3.37500	0.02300
Median	284.375	0.78700	-1.3750	0.67300
JIS Mean	287.394	0.78700	0.31561	0.68220
Variation	0.00739	0.00159	1.31070	0.01129
3 Sigma	6.32228	0.00376	3.66882	0.02283

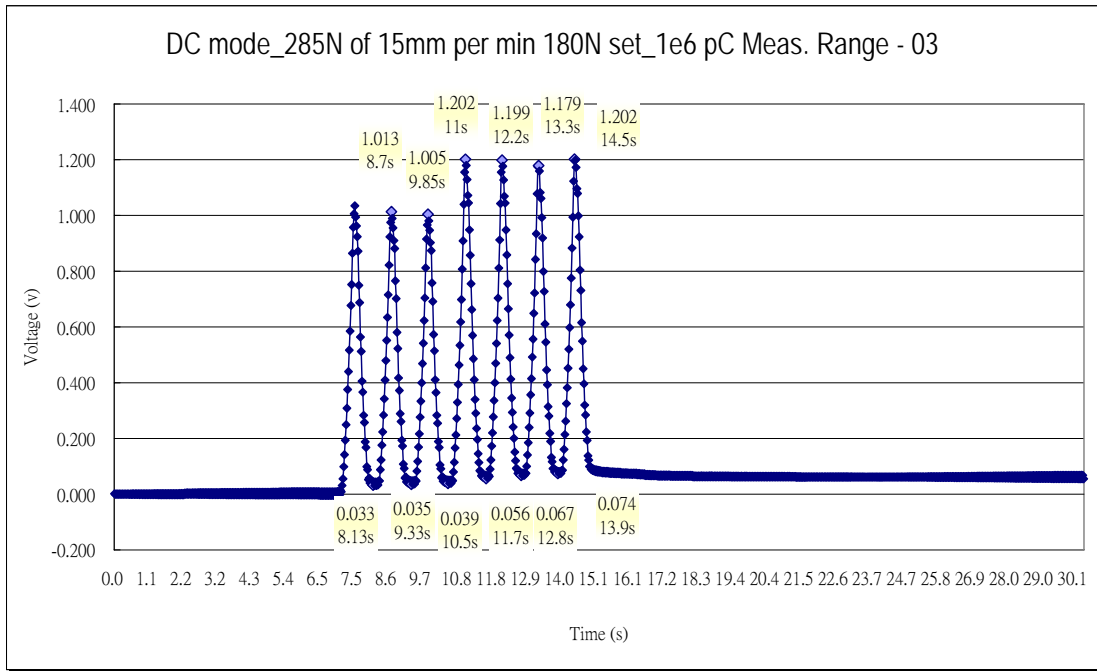
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	286.875	207905	724.72
#3	283.906	202305	712.58
#4	284.375	201177	707.44
#5	285.500	202150	708.06
#6	283.906	200260	705.37
#7	282.438	198860	704.08
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為0.98%			710.38±6.94



$(0.055-0.038)/(15-9.28)=0.003 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	287.000	0.78100	-1.3750	0.67000
Cycle #2	283.250	0.78300	-1.5000	0.67100
Cycle #3	284.500	0.78500	-1.6875	0.67300
Cycle #4	282.656	0.78500	-1.7813	0.67300
Cycle #5	281.375	0.78500	-1.9063	0.67300
Cycle #6	280.313	0.78500	-2.0000	0.67900
Cycle #7	315.906	0.79600	-0.4375	0.68600
Mean	287.857	0.78571	-1.5268	0.67500
Standard Deviation	12.5562	0.00479	0.52739	0.00563
Maximum	315.906	0.79600	-0.4375	0.68600
Minimum	280.313	0.78100	-2.0000	0.67000
Range	35.5930	0.01500	1.56250	0.01600
Median	283.250	0.78500	-1.6875	0.67300
JIS Mean	300.828	0.79050	-0.9500	0.68130
Variation	0.04362	0.00609	0.34542	0.00834
3 Sigma	37.6687	0.01436	1.58218	0.01688

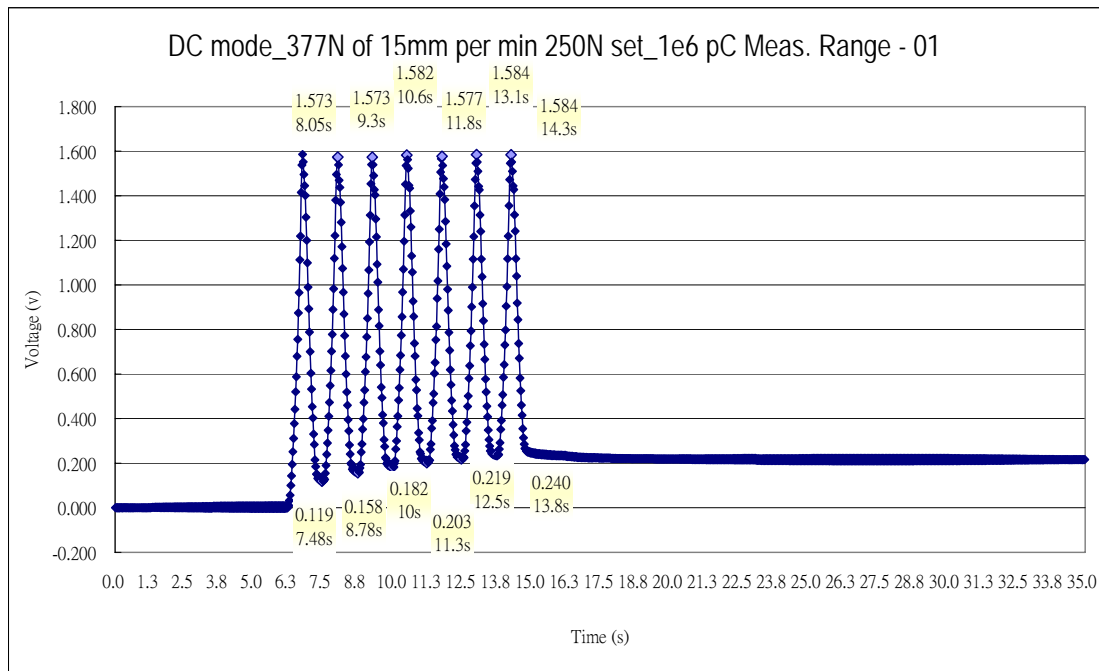
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	283.250	199870	705.63
#3	284.500	199040	699.61
#4	282.656	197100	697.31
#5	281.375	195840	696.01
#6	280.313	194900	695.29
#7	315.906	231440	732.62
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.86%			704.41±13.07



$(0.074-0.033)/(13.9-8.13)=0.0071 \text{ V/s}$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	282.688	0.78300	-1.5938	0.67100
Cycle #2	279.531	0.78500	-1.6875	0.67300
Cycle #3	277.625	0.78500	-1.8438	0.67300
Cycle #4	317.125	0.78800	-1.7500	0.67900
Cycle #5	314.344	0.78800	-1.8438	0.67900
Cycle #6	308.469	0.78500	-1.8750	0.67900
Cycle #7	314.500	0.79700	5.84375	0.69800
Mean	299.183	0.78729	-0.6786	0.67886
Standard Deviation	18.2375	0.00464	2.87782	0.00910
Maximum	317.125	0.79700	5.84375	0.69800
Minimum	277.625	0.78300	-1.8750	0.67100
Range	39.5000	0.01400	7.71875	0.02700
Median	308.469	0.78500	-1.7500	0.67900
JIS Mean	315.194	0.79220	2.09999	0.68850
Variation	0.06096	0.00590	4.24087	0.01340
3 Sigma	54.7126	0.01393	8.63347	0.02730

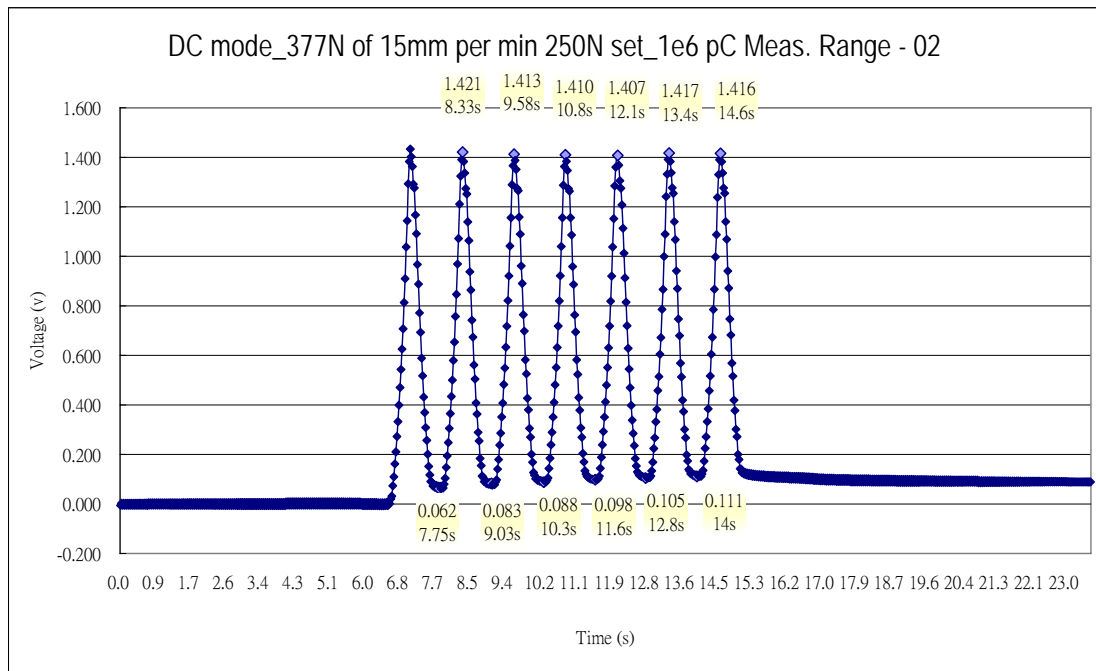
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	279.531	195191	698.28
#3	277.625	193262	696.12
#4	317.125	231890	731.23
#5	314.344	227890	724.97
#6	308.469	221690	718.68
#7	314.500	224948	715.26
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.81%			714.09±12.96



$(0.240-0.119)/(13.8-7.48)=0.019V/s$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	380.563	0.80100	-1.4063	0.67900
Cycle #2	382.219	0.80600	-1.4375	0.68200
Cycle #3	376.906	0.80800	-1.5625	0.68400
Cycle #4	378.031	0.81000	-1.7813	0.68400
Cycle #5	375.500	0.81000	-1.8750	0.68400
Cycle #6	373.781	0.80900	-1.6875	0.68600
Cycle #7	372.156	0.81000	1.90625	0.69800
Mean	377.022	0.80771	-1.1206	0.68529
Standard Deviation	3.58416	0.00330	1.34574	0.00602
Maximum	382.219	0.81000	1.90625	0.69800
Minimum	372.156	0.80100	-1.8750	0.67900
Range	10.0630	0.00900	3.78125	0.01900
Median	376.906	0.80900	-1.5625	0.68400
JIS Mean	380.772	0.80990	0.23124	0.69160
Variation	0.00951	0.00409	1.20097	0.00878
3 Sigma	10.7525	0.00991	4.03723	0.01806

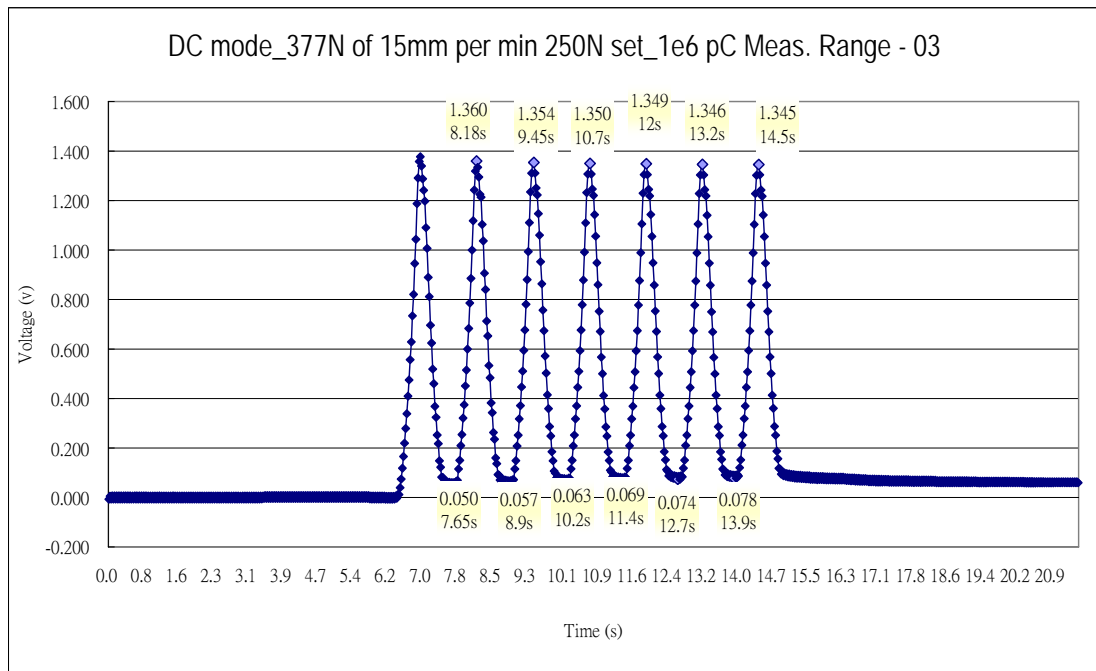
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	382.219	288634	755.15
#3	376.096	281024	747.21
#4	378.031	277720	734.65
#5	375.500	272900	726.76
#6	373.781	270720	724.27
#7	372.156	266900	717.17
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.8%			734.2±13.24



$(0.111-0.062)/(14-7.75)=0.0078V/s$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	373.719	0.81200	-1.5000	0.67900
Cycle #2	374.656	0.80600	-1.8125	0.68200
Cycle #3	372.906	0.80800	-1.9375	0.68400
Cycle #4	371.000	0.80800	-2.0938	0.68400
Cycle #5	373.938	0.81000	-1.9063	0.68600
Cycle #6	370.969	0.81200	-1.8125	0.68900
Cycle #7	369.719	0.81200	2.37500	0.70100
Mean	372.415	0.80971	-1.2411	0.68643
Standard Deviation	1.85493	0.00243	1.60472	0.00714
Maximum	374.656	0.81200	2.37500	0.70100
Minimum	369.719	0.80600	-2.0938	0.67900
Range	4.93701	0.00600	4.46880	0.02200
Median	372.906	0.81000	-1.8125	0.68400
JIS Mean	374.172	0.81180	0.37500	0.69420
Variation	0.00498	0.00300	1.29300	0.01040
3 Sigma	5.56480	0.00729	4.81416	0.02141

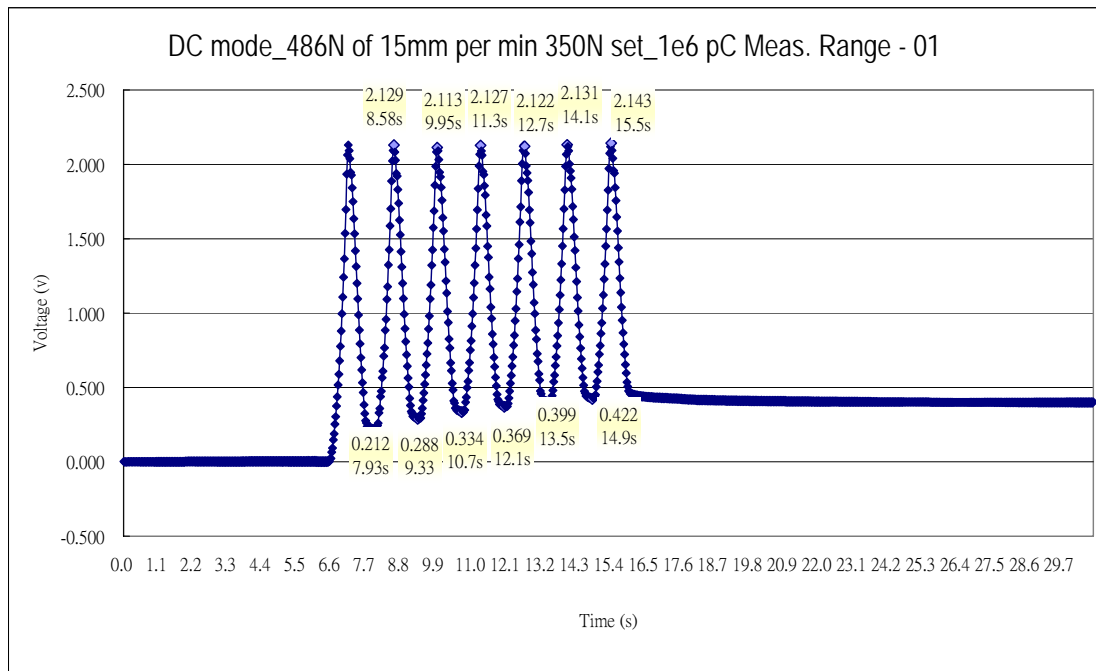
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	374.656	270895	723.05
#3	372.906	265142	711.02
#4	371.000	263620	710.57
#5	373.938	261020	698.03
#6	370.969	261464	704.81
#7	369.719	260064	703.41
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.11%			708.48±7.87



$$(0.078-0.050)/(13.9-7.65)=0.0045V/s \text{ (平均每秒偏移量)}$$

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	375.250	0.81000	-1.7500	0.68400
Cycle #2	370.000	0.81000	-2.0938	0.68600
Cycle #3	370.813	0.81200	-1.7500	0.68900
Cycle #4	369.250	0.81200	-2.0625	0.68900
Cycle #5	367.969	0.81200	-2.0000	0.68900
Cycle #6	366.875	0.81200	-2.2813	0.68900
Cycle #7	366.000	0.81200	1.62500	0.70100
Mean	369.451	0.81143	-1.4732	0.68957
Standard Deviation	3.07047	0.00098	1.37931	0.00541
Maximum	375.250	0.81200	1.62500	0.70100
Minimum	366.000	0.81000	-2.2813	0.68400
Range	9.25000	0.00200	3.90630	0.01700
Median	369.250	0.81200	-2.0000	0.68900
JIS Mean	372.794	0.81200	-0.0875	0.69500
Variation	0.00831	0.00120	0.93625	0.00785
3 Sigma	9.21141	0.00293	4.13794	0.01623

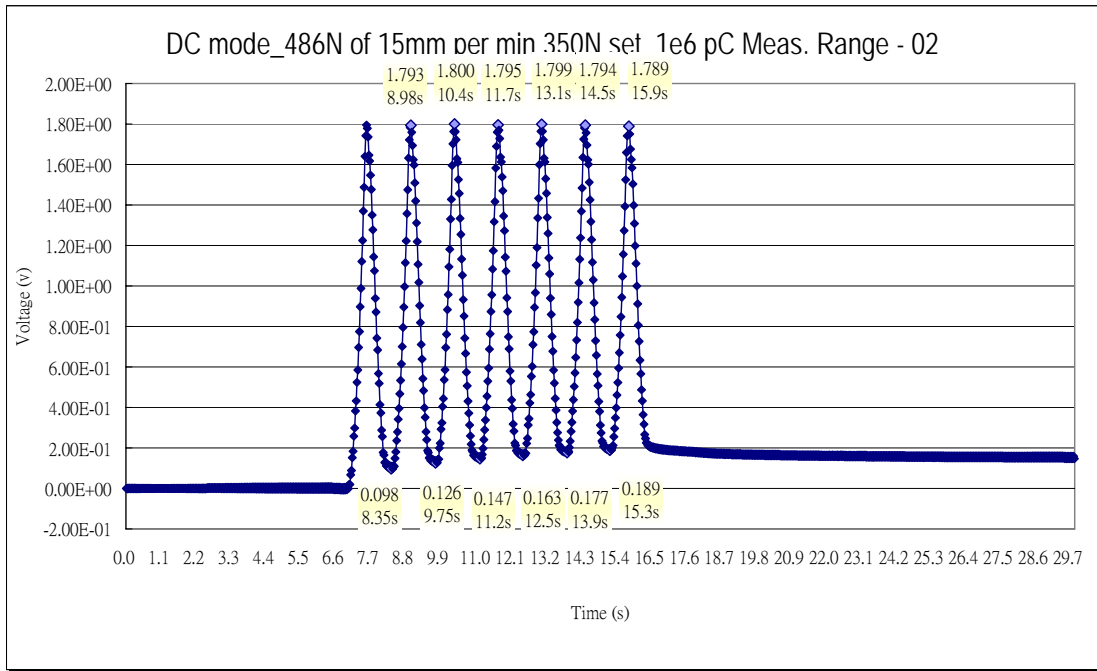
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	370.000	261523	706.82
#3	370.813	258905	698.21
#4	369.250	256950	695.87
#5	367.969	255460	694.24
#6	366.875	253950	692.20
#7	366.000	252860	690.87
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為0.75%			696.38±5.24



$(0.422-0.212)/(14.9-7.93)=0.03V/s$ (平均每秒偏移量)

Name Units	Max_Load N	Max_Disp mm	Min_Load N	Min_Disp mm
Cycle #1	496.906	0.83300	-1.8125	0.68400
Cycle #2	493.063	0.83300	-1.9063	0.69000
Cycle #3	483.156	0.83700	-2.0313	0.69200
Cycle #4	484.156	0.83300	-1.7500	0.69500
Cycle #5	484.406	0.83700	-2.2188	0.69200
Cycle #6	482.813	0.83300	-2.1250	0.69500
Cycle #7	480.438	0.83700	-0.8438	0.70100
Mean	486.420	0.83471	-1.8125	0.69271
Standard Deviation	6.09257	0.00214	0.45857	0.00522
Maximum	496.906	0.83700	-0.8438	0.70100
Minimum	480.438	0.83300	-2.2188	0.68400
Range	16.4680	0.00400	1.37500	0.01700
Median	484.156	0.83300	-1.9063	0.69200
JIS Mean	493.228	0.83660	-1.3188	0.69770
Variation	0.01253	0.00256	0.25300	0.00753
3 Sigma	18.2777	0.00641	1.37570	0.01566

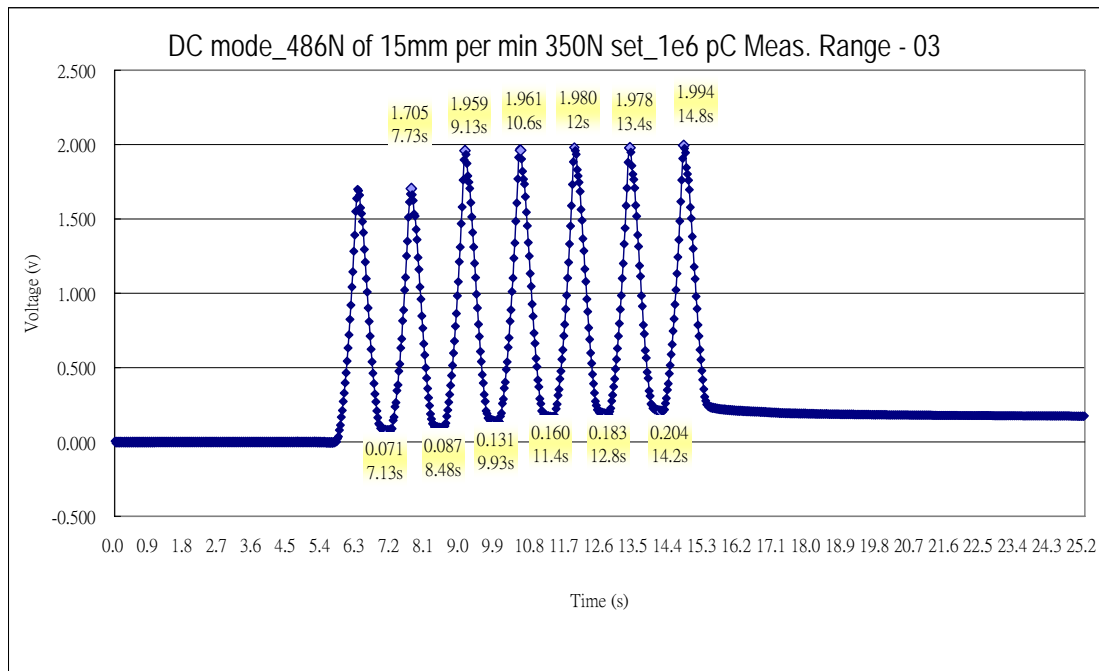
Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	493.063	379500	769.68
#3	483.156	361280	747.75
#4	484.156	355000	733.23
#5	484.406	347000	716.34
#6	482.813	342800	710.01
#7	480.438	340600	708.94
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為3.02%			730.99±22.07



$(0.189-0.098)/(15.3-8.35)=0.013V/s$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	480.500	0.83700	-1.8125	0.69200
Cycle #2	485.188	0.83500	-2.0313	0.69100
Cycle #3	480.438	0.83100	-2.0000	0.69500
Cycle #4	478.313	0.83700	-2.2188	0.69200
Cycle #5	476.969	0.83200	-2.3750	0.69500
Cycle #6	477.406	0.83500	-2.1563	0.69600
Cycle #7	475.000	0.83700	6.12500	0.71400
Mean	479.116	0.83486	-0.9241	0.69643
Standard Deviation	3.30787	0.00248	3.11347	0.00798
Maximum	485.188	0.83700	6.12500	0.71400
Minimum	475.000	0.83100	-2.3750	0.69100
Range	10.1880	0.00600	8.50000	0.02300
Median	478.313	0.83500	-2.0313	0.69500
JIS Mean	482.619	0.83680	2.11562	0.70480
Variation	0.00690	0.00297	3.36909	0.01145
3 Sigma	9.92362	0.00744	9.34041	0.02393

Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	485.188	337362	695.32
#3	480.438	333110	693.35
#4	478.313	328300	686.37
#5	476.969	325640	682.73
#6	477.406	321840	674.14
#7	475.000	318440	670.40
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.34%			683.72±9.17



$(0.204-0.071)/(14.2-7.13)=0.019V/s$ (平均每秒偏移量)

Name	Max_Load	Max_Disp	Min_Load	Min_Disp
Units	N	mm	N	mm
Cycle #1	480.969	0.83100	-2.0000	0.69300
Cycle #2	478.250	0.83700	-2.1250	0.69200
Cycle #3	521.969	0.84700	-1.9375	0.69600
Cycle #4	521.094	0.83800	-2.0625	0.69200
Cycle #5	520.031	0.84500	-2.0313	0.69600
Cycle #6	516.906	0.83800	-2.0625	0.69800
Cycle #7	515.469	0.83800	4.40625	0.71400
Mean	507.813	0.83914	-1.1161	0.69729
Standard Deviation	19.4162	0.00534	2.43581	0.00772
Maximum	521.969	0.84700	4.40625	0.71400
Minimum	478.250	0.83100	-2.1250	0.69200
Range	43.7190	0.01600	6.53125	0.02200
Median	516.906	0.83800	-2.0313	0.69600
JIS Mean	521.006	0.84460	1.21874	0.70560
Variation	0.03823	0.00636	2.18248	0.01107
3 Sigma	58.2485	0.01601	7.30744	0.02315

Cycle No.	Force (N)	Relative Charge (pC)	pC/N
#2	478.250	324520	678.56
#3	521.969	371930	712.55
#4	521.094	363454	697.48
#5	520.031	361720	695.57
#6	516.906	356720	690.11
#7	515.469	355720	690.09
6 Cycle的變異係數(coefficient of variation, CV)為1.47%			694.06±10.23

附錄B、供應研究上所需材料之相關廠商

贊助本研究之優質廠商

天實企業 (銅箔膠帶、銅箔150 μ m厚及PI膠帶)

皇尚 (PZT4 壓電試片，厚度為0.5mm)

- | | |
|----------------------------|--------|
| • 自製訊號線製程 | 中山大學 |
| • FPC 軟性電路板 | 瑞鵬科技 |
| • 銅箔膠帶、銅箔及PI膠帶 | 天實企業 |
| • Charge Amplifier 及 Cable | KISTER |
| • 壓電陶瓷試片 | 皇尚企業 |
| • RP 工具機 | 實威科技 |
| • 光罩輸出 | 聯鑫科技 |
| • 壓電陶瓷試片 | 先寧電子 |

本研究最主要使用之壓電試片為：

由先寧公司購得之PZT-5A壓電陶瓷試片，厚度為0.2mm。

著作權聲明

本論文同意部分影印

本論文同意全部影印

本論文不得影印

著作人簽章：



中華民國九十六年一月二十九日