

出國報告（出國類別：其他）

## 赴捷克參加 2013 IEEE 國際超音波研討 會出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：徐鴻發 研究員

派赴國家：捷克

出國期間：102 年 7 月 18 日~102 年 7 月 27 日

報告日期：102 年 9 月 6 日



# 摘要

IEEE 國際超音波研討會每年舉辦一次，今(2013)年的研討會於 7 月 21-25 日在捷克布拉格國際會議中心舉行。超音波為核能研究所非破壞檢測實驗室所使用的主要檢測方法之一，為瞭解其最新的技術發展，派員參加此研討會，一方面充實對壓力容器、管路等核能組件之檢測能力，另一方面因為本所即將改制為能源研究所，所以在研討會中也對新能源領域檢測相關之超音波技術加以瞭解，期能對太陽電池、燃料電池或風力發電機等研發，提供所需之材料或結構檢測。本報告除了敘述參加此研討會的過程外，重點放在心得中，敘述針對上述需求，在近期可參考利用之技術，做進一步的探討，包括導波檢測、量測超音波吸收以評估材料特性、原子力聲學顯微鏡、雷射超音波與表面聲波、結構健康監測、以及其它值得參考的項目。

# 目 次

## 摘 要

(頁碼)

一、目 的 . . . . .	1
二、過 程 . . . . .	1
三、心 得 . . . . .	4
四、建 議 事 項 . . . . .	11

# 一、目的

核能研究所核子燃料及材料組之非破壞測實驗室，為一專業的非破壞檢測(NDT)技術研發單位，超音波檢測為其主要的技術之一，其近年之研發工作，包括檢測人員能力驗證技術建立、相位陣列式超音波檢測、異材焊道與覆層焊道檢測、埋管導波檢測、以及非線性超音波檢測技術開發等，主要的應用為核能發電廠組件檢測。

為因應政府組織再造，核能研究所近年內將改制為能源研究所，所開發之技術除了應用於核能之外，還需要對新能源有所貢獻。此次參加 2013 IEEE 國際超音波研討會，一方面要瞭解可應用於核能組件瑕疵偵測及材料劣化評估之新技術，另一方面則要涉獵可用於新能源材料或結構的技術，如協助太陽電池、燃料電池、風力發電機之材料特性評估或製程品管之新技術。

基於上述目的，在此次研討會中，筆者即全面性地參加工業超音波相關之研討，期能獲得預期之成果，也特別專注於導波檢測、材料對超音波之吸收、原子力聲學顯微鏡、結構健康監測、雷射超音波與表面聲波等近期值得在本所開發建立的技術上。

# 二、過程

## (一) 參加短期講習：

此次超音波研討會前之週日(7月21日)有舉行一日講習，在上、下午各有6個主題，分別是上午的：

1A: Medical Ultrasound Transducers

1B: Hydrophone-based Measurement of Ultrasonic Fields for Biomedical, Non-Destructive Testing, and Regulatory (US FDA) Applications

1C: Signal Processing and System-on-chip Designs for Ultrasonic Imaging, Detection and Estimation Application

1D: Nondestructive Materials Characterization by Ultrasonic Techniques

1E: High Frequency Transducers and Their Applications

1F: Biomedical Photo Acoustics: from Bench to Bedside

以及下午的：

2A: Acoustic Tweezing: Modeling, Implementation and Applications

2B: Materials for Ultrasound Transducers

2C: Ultrasonic Characterization of Advanced Materials

2D: Quantitative Acoustic Microscope-Measurement, Analysis, Biological and Materials Science Application

2E: Plane Wave Imaging and Applications for Ultrafast Doppler, Elastography, and Contrast

2F: Ultrasound Contrast Agents: Theory and Experiment

## 1.上午課程：

筆者上、下午全程參加了 1D 與 2C 的課程。上午 1D 的課程 Nondestructive Materials Characterization by Ultrasonic Techniques，由德國 Saarland 大學的 Walter Arnold 教授主講，如圖 2.1.1，他係由德國著名的 IZFP 非破壞檢測研究所退休後，轉任 Saarland 大學教授的，理論與實務兼具。他在課程中先介紹一些 IZFP 及其它單位在非破壞檢測方面一些先進的研發成果，這些成果有些已應用到工業界，包括：以裝在軌道的電磁式超音波(EMAT)探頭，在經過的車輪上產生表面波，以執行車輪表面(Tread)裂紋等瑕疵之線上檢測；發電機轉子軸孔掃描器及檢測設備；管路內超音波爬管檢測儀(PIG)；導波檢測金屬電桿設備；螺栓扭力量測等檢測設備。

上午的課程中介紹各種 NDT 與材料特性評估的技術，包括：

- (1) 應力量測：主要用於火車剎車車輪
- (2) 螺栓扭力(Screw Tightening Force) 量測
- (3) 導波量測金屬路燈電桿根部腐蝕及管路腐蝕
- (4) 硬化深度量測：利用逆向散射法(Back-Scattering Method)量測汽車曲軸硬化深度
- (5) 電磁式超音波與微磁量測(3MA)整合量測材料性質
- (6) 鑄件(Die-Cast)材料特性評估：以 50MHz 聚焦式 PVDF 探頭檢測近表面瑕疵及探討晶粒散射效應
- (7) 結構健康監測(Structural Health Monitoring, SHM)
- (8) 以反振(Reverberation)技術量測材料對超音波之吸收：可量測材料性質、評估老化程度
- (9) 原子力聲學顯微鏡(AFAM)：利用接觸共振與聲學近場影像技術(Acoustic Near-Field Imaging)，可用於材料之彈性係數等機械性質量測

## 2.下午課程：

下午 2C 的課程 Ultrasonic Characterization of Advanced Materials，由捷克科學院熱力

學研究所超音波實驗室的 Michal Landa 教授及 Hanus Seiner、Petr Sedlak 兩位研究員主講，如圖 2.1.2。三人所講的主題摘錄如下：

- (1) Introduction to elasticity
- (2) Introduction to wave propagation in anisotropic elastic solids
- (3) Ultrasonic methods, measurement and instrumentations
- (4) Laser ultrasonic, implementation of laser optics to ultrasonic methods
- (5) Procedure for inversion of acoustic data, sensitivity analysis
- (6) Examples: recent material problems

所講的內容有完整的理論基礎，亦有實際的應用。上述主題中，將選擇與核研所目前工作較相關的，以及有潛力用於新能源材料之項目，於第三章「心得」中詳述。

## (二) 參加研討會開幕典禮：

IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)的國際超音波研討會(International Ultrasonic Symposium, IUS)每年舉辦一次，今(2013)年則將 IEEE 旗下 UFFC 協會(Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control Society)之 IUS、ISAF、IFCS 三個主題的研討會合併舉行，再加上歐洲頻率與時間論壇(European Frequency and Time Forum, EFTF)以及壓電力顯微鏡(Piezoelectric Force Microscopy, PFM)研討會，共有 5 項研討會合併，於 7 月 22-25 日在捷克共和國首都布拉格市的國際會議中心舉行，如圖 2.2.1。因此會議的全名為：2013 Joint UFFC, EFTF and PEM Symposium，如圖 2.2.2 所示，5 項研討會包括：

1. International Ultrasonic Symposium, IUS
2. International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, ISAF
3. Piezoelectric Force Microscopy Workshop, PFM
4. Joint International Frequency Control Symposium, IFCS
5. European Frequency and Time Forum, EFTF

開幕典禮由總主席美國新澤西州 Rutgers University 之 Ahmad Safari 教授主持，捷克當地主席(Local Chair)則為捷克物理研究所的 Jirka Hlinka 博士。布拉格會議中心相當現代化，各項設施完善，開幕典禮時之各項報告內容均投影至大螢幕上，使與會者均能清楚瞭解，如圖 2.2.3。開幕典禮頒發多種獎項，其中最重要也最值得一提的獎項是頒發成就獎(Achievement Award)給我國中央研究院蔡振水院士，表彰其在聲學領域的研究、教學成就，以及他對 IEEE UFFC 多年來所做出的貢獻，如圖 2.2.4。蔡院士領獎時，來自台灣的我們都與有榮焉，7 月 24 日大會晚宴時也有幸與其合影，如圖 2.2.5。

此次研討會共有 1870 人參加，其中約有三分之一為學生，這是 IEEE 研討會之特色，它以較低的學生註冊費，以及學生論文競賽等條件吸引年輕學子，使整個研討會充滿了

朝氣。各國與會人數以美國 328 人最多，其次依序為法國、日本、德國、英國、中國大陸、韓國、瑞士與我國。我國共有 50 人參加，也算是人數較多的國家之一。在我國參加的專家學者中，有筆者熟識的台灣大學應力研究所吳政忠教授(前公共工程委員會副主任委員)，交通大學機械系尹慶中教授、同步輻射中心李信義博士以及筆者兼課之台北科技大學博士生董博賢先生等人。

研討會共發表論文 1600 篇，口頭發表及海報發表各佔一半，另有大會演講(Plenary)6 位(約每天一位)以及各領域邀請(Invited) 的演講者 68 位。

儀器展示方面，有 48 個參展廠商，如圖 2.2.6，由於是 5 個研討會合併舉行，因此產品也比較多元化，有超音波儀器、軟體、探頭，頻率控制設備以及壓電力顯微鏡等。

### (三) 參加論文發表會：

論文發表分為三大領域，分別是 IUS、ISAF-PFM 以及 IFCS-EFTF。IUS 又分為 5 個分組(Group)，分別是：

Group 1: Medical Ultrasonics

Group 2: Sensors, NDE, and Industrial Application

Group 3: Physical Acoustics

Group 4: Microacoustics – SAW, FBAR, MEMS

Group 5: Transducer and Transducer Materials

其中以 Group 1 醫療超音波之論文數最多，Group 2 之工業應用則次之，筆者則全程參與代號為 IUS2 的 Group 2 論文發表。

除了口頭(Oral)發表外，也有一半的論文以海報(Poster)方式發表，大會也特別安排時間讓與會者到場參觀、討論，場面非常熱絡，這也是 IEEE 研討會的特色，如圖 2.3.1，有許多作者更是口頭和海報均有論文發表。

## 三、心得

在本章中，筆者將參加研習、研討會以及參觀儀器展示之心得綜合整理如下：

### (一) 導波(Guided Wave)檢測法：

以導波檢測管路腐蝕狀況之技術，近幾年有較顯著之進展，筆者於 2008 年在北京參加 IUS 時，聆聽了多場導波檢測相關之論文，覺得此方法具實用價值，因此向台電公司核三廠提出以導波檢測核電廠埋管之研發計畫，並獲得台電採納，於今年邀請核研所投標該研究案，為期約 16 個月。

此次布拉格研討會共有 2 篇與核研所上述導波檢測研發案較相關的論文發表，分別



是日本電信電話公司(NTT)，研究導波在圓棒(Cylindrical Bar)傳遞時，周邊土壤對其之衰減；以及大陸中國科學院聲學研究所與英國 Durham 大學合作的，在內有金屬鈉流體的管路中，研究流速對導波之影響。

在 NTT 的研究中，透過理論的計算來瞭解導波因能量洩漏至周圍介質所造成的衰減情況，並闡述周圍有土壤的圓棒， $F(n, m)$ 、 $L(0, m)$ 和  $T(0, m)$ 特性方程式，亦對土壤的各種材料性質，分析  $L(0, m)$ 與  $T(0, m)$ 模態之衰減頻散曲線(Dispersion Curves)。

其研究之結果顯示，以導波檢測周圍有土壤的被測物時，選擇適當的導波模態及頻率，並考慮其衰減及土壤性質是極重要的，如圖 3.1.1。

在大陸聲學研究所的研究中，是對 SFR(Sodium-cooled Fast Reactor)快滋生反應器核電廠的二次側熱交換器管路做探討的，如圖 3.1.2。此種管路因不易以傳統超音波等其它方法檢測，所以開發導波檢測技術，期望在內部流有高溫液態鈉的管路中，瞭解在具頻散性以及多模態的導波檢測時，其導波傳遞之特性。本論文目前是以數值模擬，求出不銹鋼管路在充有 600°C 液態鈉，流速為 10m/s 時之頻散曲線，包括縱波模態(Longitudinal Modes)  $L(0, m)$ 之相速度(Phase Velocity)頻散曲線與群速度(Group Velocity)頻散曲線。又找出 600°C 液態鈉圓柱體(Liquid Sodium Cylinder)流速為 10m/s 之相速度頻散曲線，以及中空鋼管之頻散曲線，再執行模態耦合(Mode Coupling)。在選擇適當的導波模態以及激振頻率範圍時，該研究建議選擇對溫度、流速較不敏感的、低頻散(Low Dispersion)、以及 Group Velocity 具有高度區別性的，以便更易與其它模態區別。

本研究的結論，如圖 3.1.3 包括：(1)管路內流有液態時溫度與流速的改變，會造成導波模態之相改變(Phase Shifts)；(2)在鋼管內流有液態鈉的導波模態中，可以看成是由兩個族群(Group)的導波模態耦合而成的。其中一種族群的模態對於流速和溫度較敏感，因為它們與縱波速度及液態鈉密度有關，密度會隨溫度升高而減少。另一種族群的模態則可應用於本研究的管路檢測，因為它們與管路材料性質有關，而比較不受流體之影響，這些模態也帶有低頻散以及高區別性的 Group Velocity 等兩種條件。本研發案數值模擬已告一段落，預計在 2013 年底前進行實物之導波檢測。

## (二) 量測材料對超音波之吸收以評估材料特性：

量測材料對音波之衰減(Attenuation)情況可以瞭解一些材料的特性或評估老化的程度。材料對超音波的衰減可分成兩大部份，亦即散射(Scattering)與吸收(Absorption)。散射是主要的衰減，它是由晶界對超音波的散射所造成，所以受晶粒大小的影響很大。而吸收則由內部磨擦造成，占整體衰減中較少的部份，因此較難量測。目前已開發的對材料評估的方法中，較多是量測其散射，而量測吸收的則較少，因此量測吸收可說是較新的領域。吸收會受到材料微結構的影響，當材料老化(Aging)時，其微結構性質會隨著改變，因此量測超音波的吸收，可以評估老化的嚴重性，以確保重要組件之安全性。

最近發展的吸收量測技術是利用評估散射而達成的，其英文名稱為「Measurement of Ultrasonic Absorption by Exploiting Scattering」。在圖 3.2.1 中，當探頭將超音波送入材料時，其波前(Wave-Front)遇到晶界會產生散射，當試件體積較小時，散射會充滿試件，波前打到試件背面時，會有很大的背面回波，而前述的散射波會在試件內產生迴響

(Reverberation)，比背面回波花較長的時間才回到探頭，因而在背面回波之後出現迴響信號。在小試件中，其不均勻之處會造成散射，並從試件各表面反射，使整個體積內分佈著彈性能量。圖中迴響信號的衰退(Decay)，只受吸收的影響，可利用來評估材料。因此要利用吸收來評估材料時，先決條件是材料要能造成足夠的散射，並且試件尺寸要小。

圖 3.2.2 是一個典型迴響的 A 掃描(A-Scan)信號，在 0 ms 背面回波之後，就出現迴響信號，其振幅是以指數函數的方式衰退至 1.5 ms 左右，這衰退完全是由吸收所造成的。

利用以上的量測材料對音波吸收的技術，已有一些評估材料特性的成功案例，例如評估塑性變形量、評估潛變損害程度、量測白鑄鐵從鐵磁性(Ferromagnetic)轉變成順磁性(Paramagnetic)時之轉變溫度、以及一般晶粒大小  $12\mu\text{m}$  的多晶(Polycrystalline)銅材與奈米結晶(Nano Crystalline)銅材對超音波吸收差異之比較等。

圖 3.2.3 為以吸收來評估塑性變形程度之案例，兩條曲線分別是以雷射超音波以及壓電探頭量測之結果，圖中可見變形量增大時，吸收也會增加。圖 3.2.4 為利用縱波量測吸收之方式，獲知白鑄體由鐵磁相轉變為順磁相之轉變溫度為  $473^\circ\text{K}$ 。圖 3.2.5 可知晶粒尺寸大於  $10\mu\text{m}$  時，吸收會隨頻率增大而線性地加大，並隨晶粒尺寸變小而減少。

### (三) 原子力聲學顯微鏡(AFAM)

原子力聲學顯微鏡(Atomic Force Acoustic Microscope, AFAM)之系統如圖 3.3.1 所示，它是結合原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope, AFM)與超音波的一種新方法，有極高之側向(Lateral)解析度，為奈米級之超音波量測技術。它可以量測物件表面的局部彈性性質(Local Elastic Properties)，可將局部的剛性(Stiffness)分佈情況以二維影像顯示。它主要是利用接觸共振技術(Contact-Resonance)以及聲學之近場(Near-Field)成像技術。它是觀察 AFM 探針尖端(Tip)與試件在不同的作用情況下，所反應的共振頻率。如圖 3.3.2 中量測剛性表面和軟性表面時，在剛性表面所得的共振曲線會向右偏移(具較高共振頻率)，且振幅較大，而軟性表面的會向左偏移，通常最低的彎曲(Flexural)和扭曲(Torsional)共振頻率之範圍為 KHz 到數 MHz。

前段提及 AFAM 所利用的兩個主要技術，其中一個是接觸共振技術。接觸共振法可用來量測材料聲速以及偵測多層結構材料之瑕疵。在航太工業中，常用來檢測多層結構(Sandwiched Structures)結合之完整性(Bond Integrity)，也就是評估其黏著(Adhesion)品質，較有名的儀器產品有荷蘭 Fokker 公司的 Bond-Tester。其發射探頭(Transmitter)發射  $0.5\text{KHz}\sim 5\text{KHz}$  的白噪音(White Noise)，並測知可傳送最大振幅時音波之頻率，此頻率與被測物品質相關。

上述 AFAM 系統圖中，是在 AFM 的懸臂(Cantilever)根部裝上超音波換能器(Transducer)，將超音波信號產生器所產生之信號傳送至此，換能器所產生的振盪透過懸臂傳至被測物，接觸共振的結果則由懸臂尖端上方以光學干涉儀的方式偵知。也有將換能器貼在被測物下方來產生振盪。有些學者則將換能器貼在被測物下方的方式稱為 AFAM；而將換能器置於懸臂根部的方式稱為 UAFM(Ultrasonic Atomic Force Microscopy)。兩者的效果差不多，而前者的缺點是換能器與被測物間的耦合劑會污染被測物。

AFAM 利用的另一個主要技術為聲學近場成像技術。在一般的超音波檢測時，因為探頭及儀器所產生的起始脈波(Initial Pulse)有相當的寬度，使得其近表面的檢測能力較差。

為了要改善此問題，可如圖 3.3.3 所示，以近場原理採用左圖的尖形探頭，或採用右圖小聲束(Aperture，類似相機的光圈)的方式，將原來較寬大的超音波聲束，縮小為較小的聲束。在 AFAM 系統中，AFM 探針的尖端即有上述之功能，因此可將欲量測之範圍集中在表面附近。類似這種用較小之 Aperture，以獲得較佳近場檢測效果的，有如圖 3.3.4 所示的掃描式近場聲波顯微鏡，它的探針尖端的半徑(R)為 20-50nm，可以量測材料近表面的特性。

探針與被測物表面接觸時，懸臂可能產生各種振動，包括彎曲、縱向以及扭曲，光學干涉儀可偵知 AFM 懸臂的各種振動。

圖 3.3.5 為應用 AFAM 量測高分子材料，材料中有兩個相，分別有不同之剛性。a 圖為表面形貌圖(Topography)；b 圖為超音波振幅圖，可清楚看到綠色及黃色的兩個相，這超音波影像是在頻率為 160KHz 時所獲得的；C 圖則為在 b 圖中 1、2 兩處所量得的接觸共振頻譜。

圖 3.3.6 為晶粒尺寸為 167nm 的電鍍奈米結晶鎳(Nano Crystalline Ni)之接觸共振量測結果，對於這種非等向性(Anisotropic)樣品，掃描所得的表面形貌影像示於(a)圖左邊，在影像中紅、綠、藍三處所量得的接觸共振頻譜示於(a)圖右邊；(b)圖之中央為 AFAM 的接觸共振影像；(c)圖則為接觸剛性(Contact-Stiffness)影像圖，可測知各點的剛性分佈。

在多晶材料中，往往希望能得知各相之彈性性質，因為它會影響機械性質，而差排移動、裂縫成核(Nucleation)以及裂縫成長等皆是相關的因素。若能建立彈性與塑性性質的相關性後，可用量測超音波聲速的方法來評估使用中組件的劣化程度。AFAM/UAFM 即可用在此方面，圖 3.3.7 顯示英高鎳 625 材料析出於晶界之  $M_{23}C_6$  碳化物，左圖為其表面形貌影像，右圖 a 為 1 階接觸共振影像，b 為 2 階接觸共振影像，c 則為經過正規化(Normalized)的接觸剛性影像。

圖 3.3.8 則為 PTC(Positive Temperature Coefficient)薄膜(Thin-Films)材料，在不同溫度時的 AFAM 影像與超音波壓電模式(Piezo-Mode)的影像比較。壓電模式工作原理類似於 AFAM，不同的是超音波信號直接透過探針送至被測物，被測物必需為壓電材料，它會因反壓電效應而產生振盪，而可省去原先在 AFAM 系統中置於被測物下方之換能器。

#### (四) 雷射超音波與表面聲波(SAW)：

雷射超音波與表面聲波(Surface Acoustic Wave, SAW)雖然都是已經發展有一段時間的技術，但是因為核能研究所以往均著重於核能組件之檢測，而這兩種技術均尚未能廣泛應用於核電廠現場檢測，所以並未自行建立此等檢測能力，只有利用合作研究的方式委託學術界，進行一些試片的雷射超音波對材料老、劣化的評估研究。表面聲波法則是可以利用雷射來產生超音波，在材料表面傳送，以評估材料性質的一種方法，可用於薄膜等元件的檢測。近年本所在新能源研究上，開發一些較精密的材料，如太陽電池用的薄膜等材料元件，可考慮採用雷射超音波非接觸的方式來評估其材料特性，因此在此次

研討會中，筆者就關注在此薄膜材料檢測的議題上。

雷射超音波產生係利用雷射光在工件表面產生熱能，進而產生熱彈性應變及應力，而在工件內產生超音波，所產生的超音波包括在工件內部傳送的體波(Bulk Wave)，以及在表面傳送的表面波(SAW)，如圖 3.4.1 所示。

前面 AFAM 曾經述及共振頻譜法是量測材料特性常用的方法，因此若能在雷射超音波系統中，加入共振的量測，即成為雷射共振音波頻譜儀。圖 3.4.2 為捷克科學院所開發的量測系統圖，可用非接觸的方式執行量測。係以 Nd:YAG 脈衝雷射激發超音波，並以 He-Ne 雷射所構成的干涉儀做接收。圖 3.4.3 則為較商業化之 Micro System Analyzer (MSA) 儀器，它以共振超音波頻譜儀(Resonant Ultrasound Spectroscopy, RUS)技術，量測非等向性彈性係數以及內部磨擦(Internal Friction)等材料性質。

SAW 可利用雷射打在工件表面產生，其頻率受雷射打到工件表面時聚焦光束形狀影響；接收 SAW 則可用下列方式：

1. Beam deflection method (knife-edge technique)
2. Interferometry (surface displacement detection)
3. Diffraction grating technique (light diffraction arising from the periodic pattern created on the sample surface by SAWs)

圖 3.4.4 為 SAW 雷射超音波的發射與接收之系統圖，採用的接收方式為 Beam Deflection Method。而圖 3.4.5 則為採用干涉法接收(Interferometry Detection)的系統圖。圖 3.4.6 則為以 SAW 量測 NCD (Nano Crystalline Diamond) 薄膜，以及 DLC (Diamond-Like Carbon) 薄膜之結果，可以利用 SAW 所得之頻散情況來分析薄膜。

## (五) 結構健康監測(SHM)：

在此次研討會中，對於結構健康監測(Structure Health Monitoring, SHM)的討論也頗受重視。SHM 系統係將感知器(Sensors)裝設在組件或結構上，以便連續地、自主地監測可能產生之瑕疵，以確保其結構完整性。SHM 感知器可偵測結構因疲勞、沖蝕、腐蝕、衝擊等因素所造成的損傷，在飛機、汽車、土木以及海洋結構上有許多運用，核研所發展中的風力發電機應該也有應用之潛力。利用 SHM 感知器，除了可以節省保養與維修的時間與人力外，亦可偵測到不易接近的部位的結構缺陷。圖 3.5.1 為飛機結構健康監測可整合負荷監測、損傷監測之數據，做綜合分析研判。

通常 SHM 感知器可分為下列數種：

1. 量測材料局部的應變分佈變化的方法
2. 利用應力波的技術
3. 振動分析法
4. 其它監測特定形式瑕疵的方法

為了使結構更輕、更有成本效益、更可靠，會考慮將感知器成為結構的一部份，預裝於結構上，更具有整體性。圖 3.5.2 為目前較新的監測技術，包括用光纖布拉格光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)感知器監測應變、壓力、溫度；用聲射(Acoustic Emission, AE)法監測

裂縫；用比較式真空監測(Comparative Vacuum Monitoring, CVM)法監測裂紋；用電磁貼片、智慧型聲波貼片監測裂紋；以及用相位陣列式超音波等。

在上述方法中，筆者覺得 CVM 在核研所大家可能比較陌生，而且可能可以用於風力發電機結構監測，因此再加以說明。它是由 Structural Monitoring Systems 公司開發的技術，主要用於飛機工業，與其它感知器比較起來，它具有簡單、有效、準確等優點。

CVM 的工作原理如圖 3.5.3 所示，其感知器貼片係貼在結構上，貼片包含有很多條很細的通道(Gallery)，部分通道為低真空狀態，在圖中標記為”V”，而其兩旁的通道則通有大氣，標示為”A”。有一真空源用來控制及供應低真空到 V 通道；另有一壓差式流量計用來量測通道間之壓力差。當裂縫在結構上發生時，空氣會流入真空通道，此時壓力流量計即可測知，然後將數據送至控制系統，經由軟體管理系統處理，最後可顯示裂縫位置及大小。CVM 可測知極小的裂縫，典型的通道間隔為 250 $\mu\text{m}$ ，亦可縮小至 100 $\mu\text{m}$ 。圖 3.5.4 為 CVM 系統，左圖為無裂縫時，右圖則為裂縫發生時測知之結果。圖 3.5.5 之 CVM，左邊為主機，右上角為 CVM 貼片貼在結構可能產生疲勞裂紋之圓孔附近之照片。

在此次研討會的 SHM Session 中，大會邀請加州大學聖地牙哥分校 M. Todd 教授演講時，他認為 SHM 的實務研究工作包括：Measurement、Feature Extraction、Features、Sum-of-Squares、Damage Index、Future Work，而其中 Feature Extraction 包括 Engineering Knowledge 與 Trial and Error Black Box，如圖 3.5.6。Todd 將目前的問題整合，顯示於圖中，包括：用 Trial and Error 方式去選取特徵 (Feature Extraction)時，可能會將有價值的資訊拋棄；特徵可能是易變、有雜訊而且不是一般性的；研究時所選取的特徵可能具學術價值，但卻不一定是工業界關心的。而在 Sum-of-Squares 階段，它也經常不是一個最佳偵測器，會遺漏一些功能的強化。在 Future Work 階段，則缺乏判定的主架構，使得 SHM 功能無法有效地評估。

為了解決上述問題，Todd 教授提出如圖 3.5.7，將 SHM 結合 DP(Damage Prognosis)之構想。此圖上方粉紅色框內為 SHM，屬於原設計階段所考量的，而下方框內為 DP，一方面將預期的未來負荷狀態建立模式，也建立失效模式，然後將這兩模式的輸出，以及圖中上方 SHM 的 Decision Costs 與 Decision/Action 資料一起執行 PRA(風險評估)，以產生預期性的規劃和行動。在風險評估時會考量瑕疵檢出的機率、錯發警報的機率，並執行風險告知(Risk Informed, RI)評估。若能在設計階段就將感知器位置考量完整，則為最佳之方案。

SHM 雖然可以幫結構執行健檢，但在處理的過程或下決定的過程中若有不當的程序，則可能會造成成本上的損失，甚至或造成不必要的恐慌，在 Todd 教授的報告中，給予我們更完整的觀念。核研所若欲在研發的風力發電機中執行 SHM 時，需先有較完整的規劃。

## (六) 其它值得參考的項目：

### 1.以 Tone Burst 波執行混凝土結構檢查：

傳統的混凝土結構檢查常採用敲擊的方法，但有些不易接近的位置，如橋樑的縱樑以及隧道頂部，則可採用非接觸式聲波影像法(Non Contact Acoustic Imaging, NCAI)。它

發射寬頻聲波至混凝土表面，在有瑕疵的部位產生共振，此時則以二維的掃描式雷射都卜勒測振儀量測混凝土表面振動的速度。在日本 Toin 大學進行的研究，採用高功率方向性聲源可量測約 10 米遠的物件。但是一般在混凝土面表產生較大聲壓時，其訊雜比太差，因此其研究改用單頻脈衝調制波(Tone Bursts)，這種 Tone Bursts 是由靜止時間以及單頻短脈波所組成，這樣振動量測儀被聲波振動時的時間即可分離，而可得到較佳之訊雜比。圖 3.6.1 為此量測系統圖，圖 3.6.2 則為使用啾聲波(Chirp)和 Tone Burst 所得之振動速度頻譜比較，當使用 Chip 波時雜訊太大，而用 Tone Burst 波時，雜訊顯然較低，訊雜比為 19dB，可偵測出瑕疵。這種方法可測知次表面之瑕疵，而一般使用雷射外廓儀量測隧道頂部形貌時只能測知表面瑕疵。(註：Chirp 與常用的 Gaussian 短脈波相比，有較長的脈波長度，其信號瞬時頻率隨時間而增加。)

## 2.以多波式投捕法檢測管路潛變：

在石化廠或火力電廠的管路，若承受較高的溫度和應力時，使用一段時間後會因為潛變(Creep)的機制而劣化，進而造成嚴重的損害。潛變損害初期會產生細小的空孔(Cavities)，然後空孔會串成微裂縫。目前的檢測方法是在管子上以斜束縱波探頭做發射，將音波延著弦向(Chord)傳送，並用相同的探頭在對面(周向)接收。但這種方法常因裂紋之形式與走向不同，而不易有可靠的檢測結果。

此次研討會中，印度 Madras 理工學院提出新的多波式投捕法技術，使用縱波及橫波兩種波式，亦即在管材的弦向傳送縱波及橫波，如圖 3.6.3 所示。研究發現橫波對周向裂紋之方向性較敏感，該研究並利用了 8 種不同的檢測配置(Configuration)。圖(1a)顯示以縱波檢測之配置，其中 A-B 代表探頭 A 發射 B 接收。而橫波亦有類似的 4 種檢測配置。以橫波以及縱波 A-B 方式所得之 A-scan，示於圖(1b)中。研究並發現橫波之波式轉換較少，並對瑕疵較敏感。圖(2a)、(2b)為有限元素法模擬之結果，(2a)是縱波、(2b)是橫波的結果，顯然橫波之信號較明顯。此研究之 FEM 模擬與實驗的結果，均顯示可改善檢測靈敏度以及此種投捕法之可靠性。

核研所燃材組亦在規劃超臨界火力電廠材料之研發案，其高溫高壓環境易產生潛變損害，因此有必要強化潛變之檢測能力。

## 3.小型超音波儀器：

在研討會的儀器展示場中，有一小型的超音波脈波產生及接收儀器，長度及寬度約 10 餘公分，厚度也只有約 4~5 公分，如圖 3.6.4 所示。它用 USB 介面配上筆電及軟體即可構成超音波儀器，售價約 4000 歐元，算是合理的價位，在預算有限時，值得採用。

## 4.超音波模擬軟體：

儀器展示場中，英國格拉斯哥大學展示一套所開發的超音波模擬軟體，算是價位合理，又具有彈性的軟體。其它廠家的類似軟體不但價格昂貴且每年的維護費用也頗高，因此這套軟體算是極有市場潛力的，值得留意。詳請可上其網站瞭解：[www.pzflex.com](http://www.pzflex.com)。

## 5.超音波水處理：

這次研討會有數篇論文是以超音波技術進行水處理的，顯示對環境以及水資源的重視，並看好飲水市場的遠景。對於廢水再生的處理，傳統上是使用凝結與過濾兩種方法，但前者需要促凝劑，後者需要過濾器，兩者都是消耗品。為了要更環保，日本日立公司正在研發聲波輻射力(Acoustic Radiation Force, ARF)的技術，做為水過濾的方法。如圖 3.6.5 將探頭置於容器兩端，使聲波傳送方向與水流的方向平行，水中懸浮粒子會聚集在音場駐波的節點(Nodes)中，而被補集。該報告使用 2.26MHz 聲波，所得結果示於圖 3.6.6，該圖比較初始濁度與處理後濁度，並顯示濁度降低之效率。以初始濁度為 16.8 度為例，處理後變為 2.1 度，濁度降低的效率均超過 80%。

## 四、建議事項

### (一)多派員參加國際科技活動：

IEEE 舉辦的超音波研討會，每年均吸引眾多的學者專家前來發表論文，論文的深度及廣度均佳。若經費許可，應鼓勵年輕同仁多前往發表論文，並利用此機會吸收最新的資訊。

捷克科學院超音波實驗室，對於非破壞性材料特性評估(Material Characterization)具有極佳之理論與實驗能力，其負責人 Michal Landa 教授在研討會中數次向筆者表示，希望能與我國建立合作研究計畫。若有機會，派年輕同仁去共同研究或實習應該會很有收穫。

### (二)建立雷射超音波及原子力聲波顯微鏡檢測技術：

對於較精緻之新能源材料，如太陽電池薄膜，用傳統接觸式壓電探頭檢測將極困難，應建立非接觸式之雷射超音波技術，以檢測此等材料。並建立解析度較高之原子力聲波顯微鏡，以利執行微、奈米級之材料性質評估。

### (三)健全非破壞檢測分組之人力：

一組健全的非破壞檢測團隊，其成員應包含下專長：材料科學、電子、探頭量測技術(物理)、機械力學、數值模擬、以及自動化，才能有較周延之研發水平。核研所改制成能源研究所，應針對新的任務，強化 NDT 團隊人力。



圖 2.1.1 德國 Saarland 大學 Walter Arnold 教授主講研習課程



圖 2.1.2 捷克科學院超音波實驗室 Michal Landa 教授主講研習課程





圖 2.2.1 布拉格國際會議中心



圖 2.2.2 筆者攝於布拉格國際會議中心入口處



圖 2.2.3 開幕典禮由總主席美國 Rutgers University 之 Ahmad Safari 教授主持



圖 2.2.4 中央研究院蔡振水院士(左二)獲頒成就獎



圖 2.2.5 晚宴時與蔡振水院士(右三)等人合影



圖 2.2.6 儀器展示場

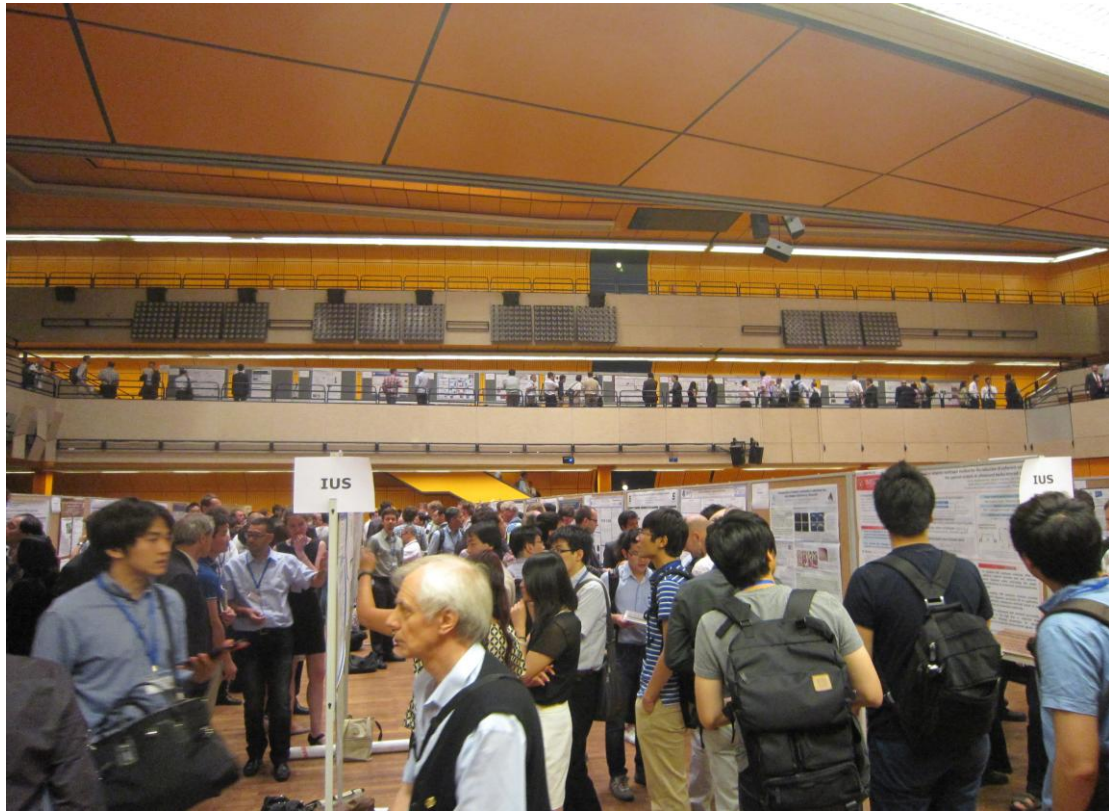


圖 2.3.1 海報論文發表現場盛況

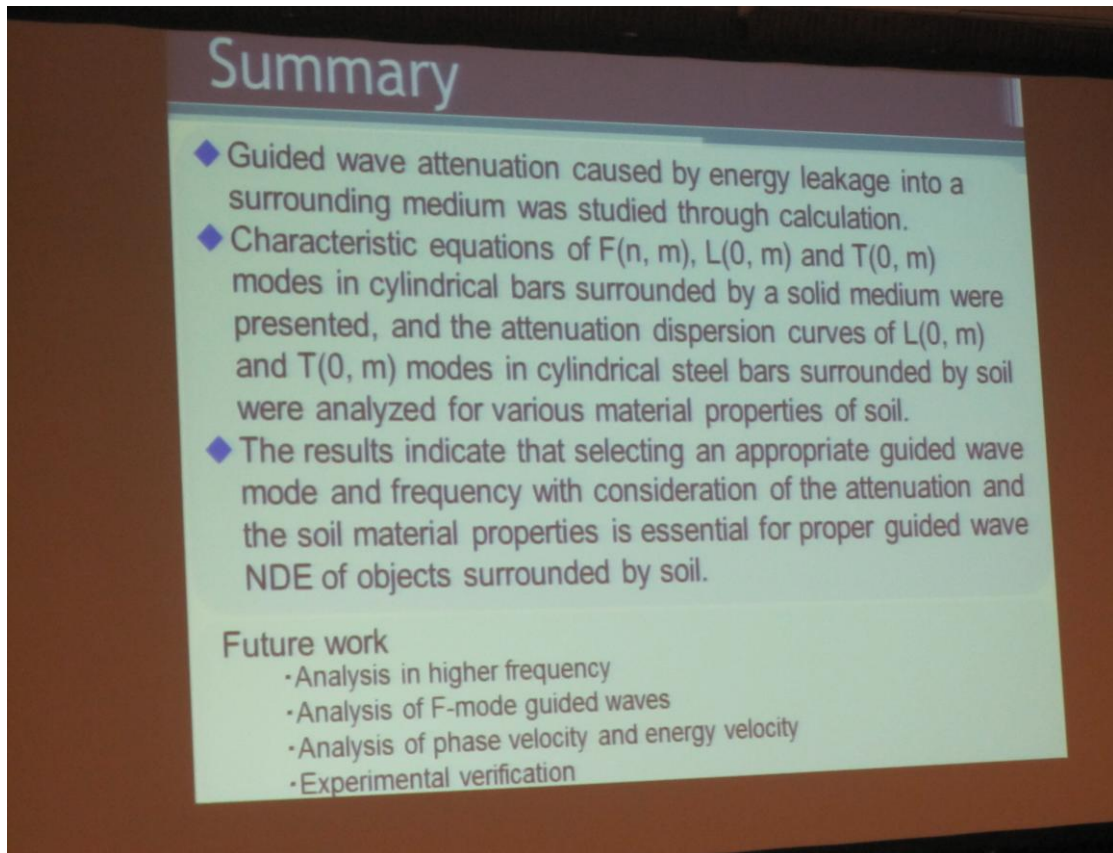


圖 3.1.1 日本 NTT 公司研究導波在圓柱傳遞之結論

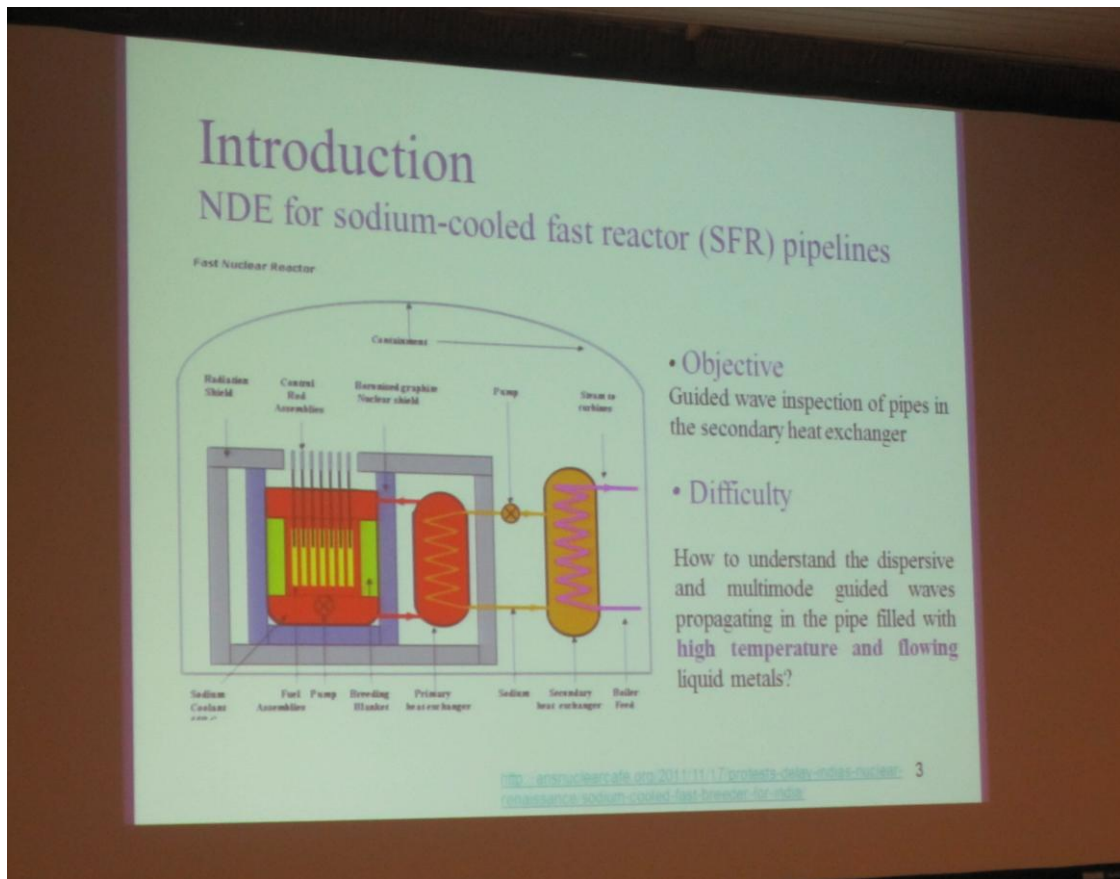


圖 3.1.2 SFR(Sodium-cooled Fast Reactor)反應器核電廠系統圖

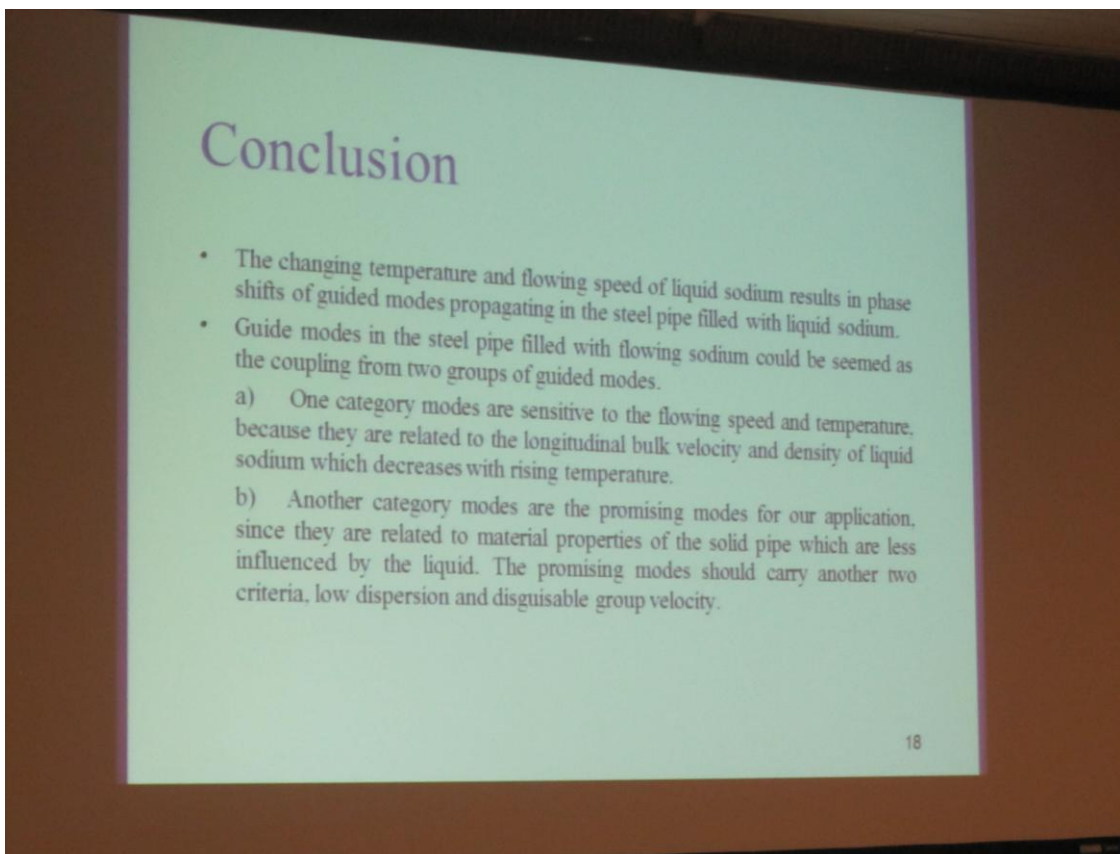


圖 3.1.3 大陸聲學研究所的金屬鈉流體管路導波研究結論

## Experimental Method: Reverberation

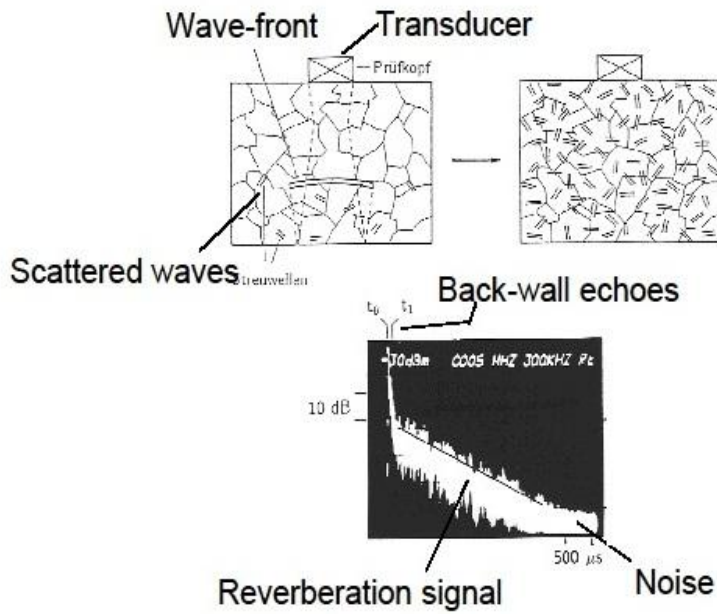


圖 3.2.1 探頭將超音波送入材料在試件內產生迴響(Reverberation)信號

## Experimental Method: Laser Ultrasound and Reverberation Signal

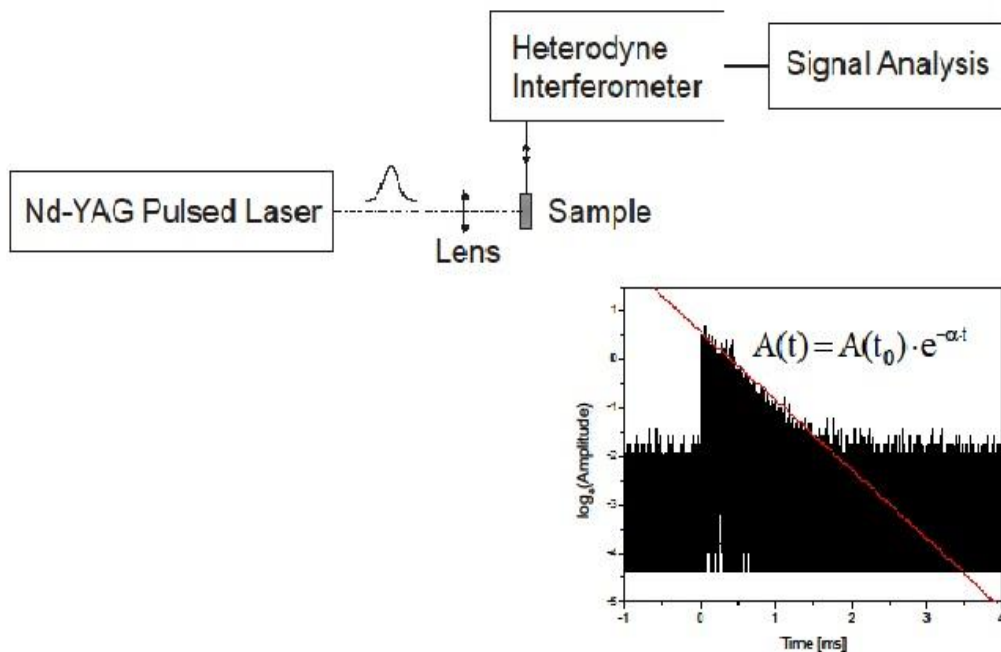


圖 3.2.2 典型迴響的 A 掃描(A-Scan)信號，振幅以指數函數方式衰退

## Ultrasonic Absorption measured by Laser US

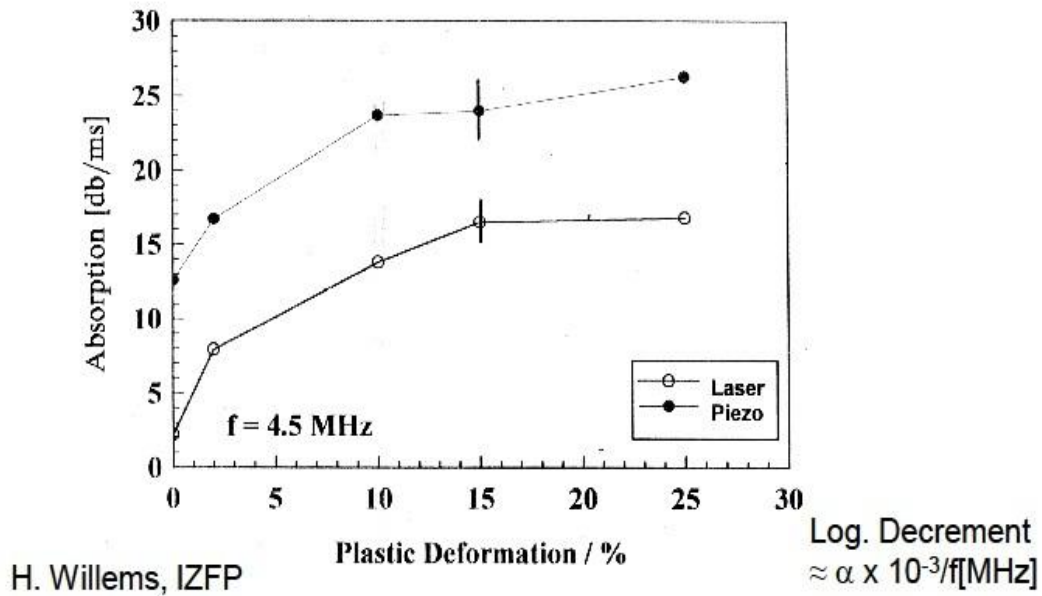


圖 3.2.3 以超音波的吸收評估塑性變形程度，變形量增大時吸收會增加。

## Absorption as a Function of Temperature: White-Cast Iron; 57.6 % Cementite

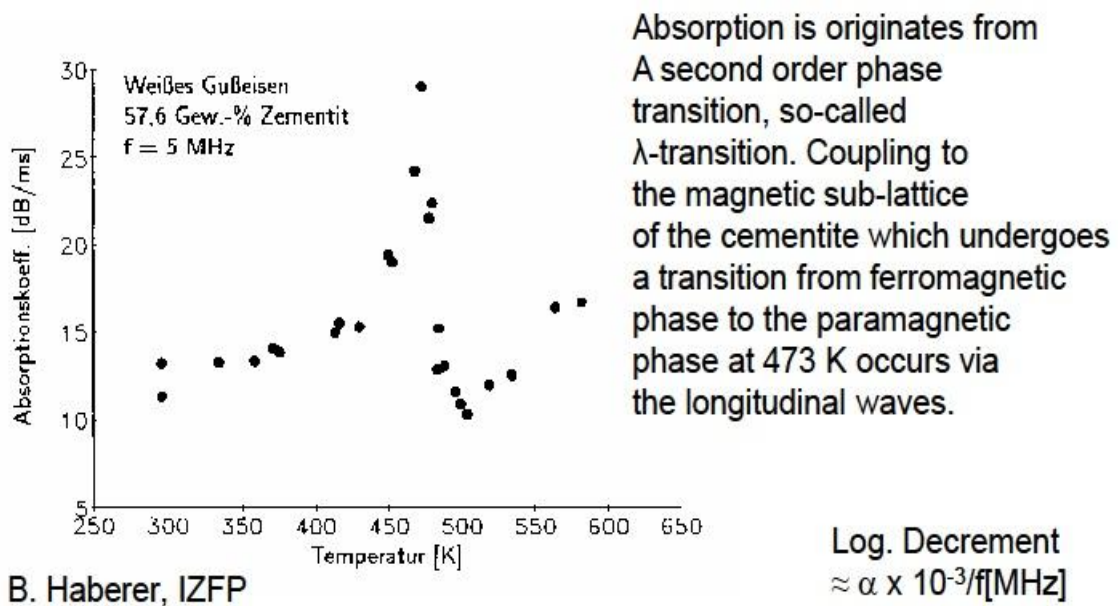
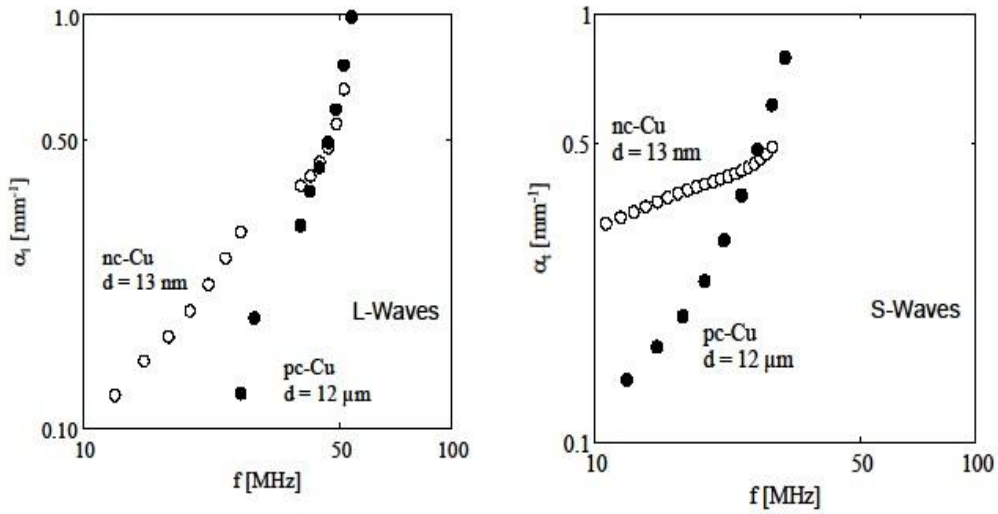


圖 3.2.4 縱波量測吸收，求知白鑄體由鐵磁相轉變為順磁相之轉變溫度為 473°K

## US-Absorption in Nanocrystalline and Polycrystalline Copper



Grain size polycrystalline material: 12  $\mu$ m; Grain size nanocrystalline material: 13 nm;  
Measurement at RT

圖 3.2.5 晶粒尺寸大於 10 $\mu$ m 時，吸收會隨頻率增大而線性地加大

## Atomic Force Acoustic Microscope AFAM Set-up

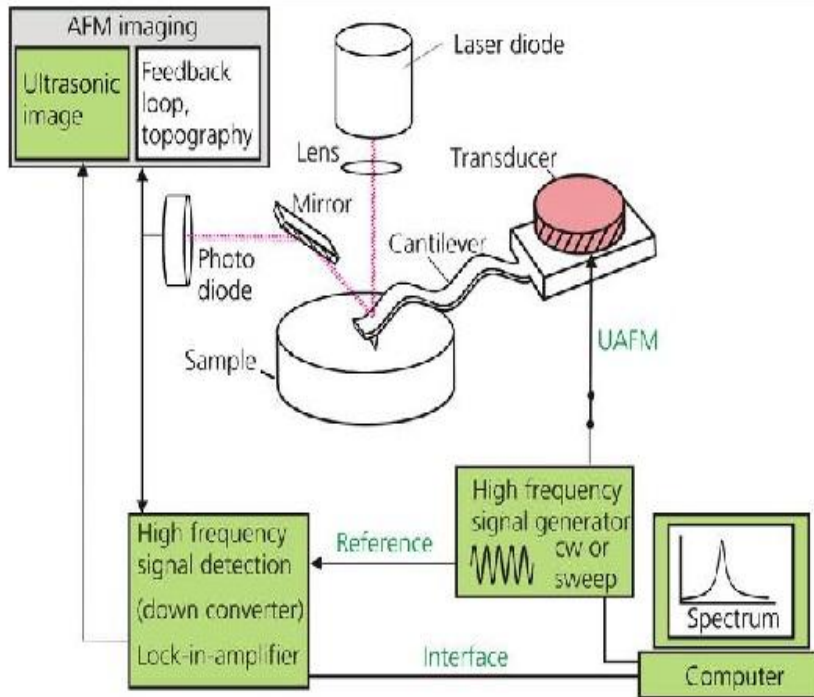


圖 3.3.1 原子力聲學顯微鏡系統圖



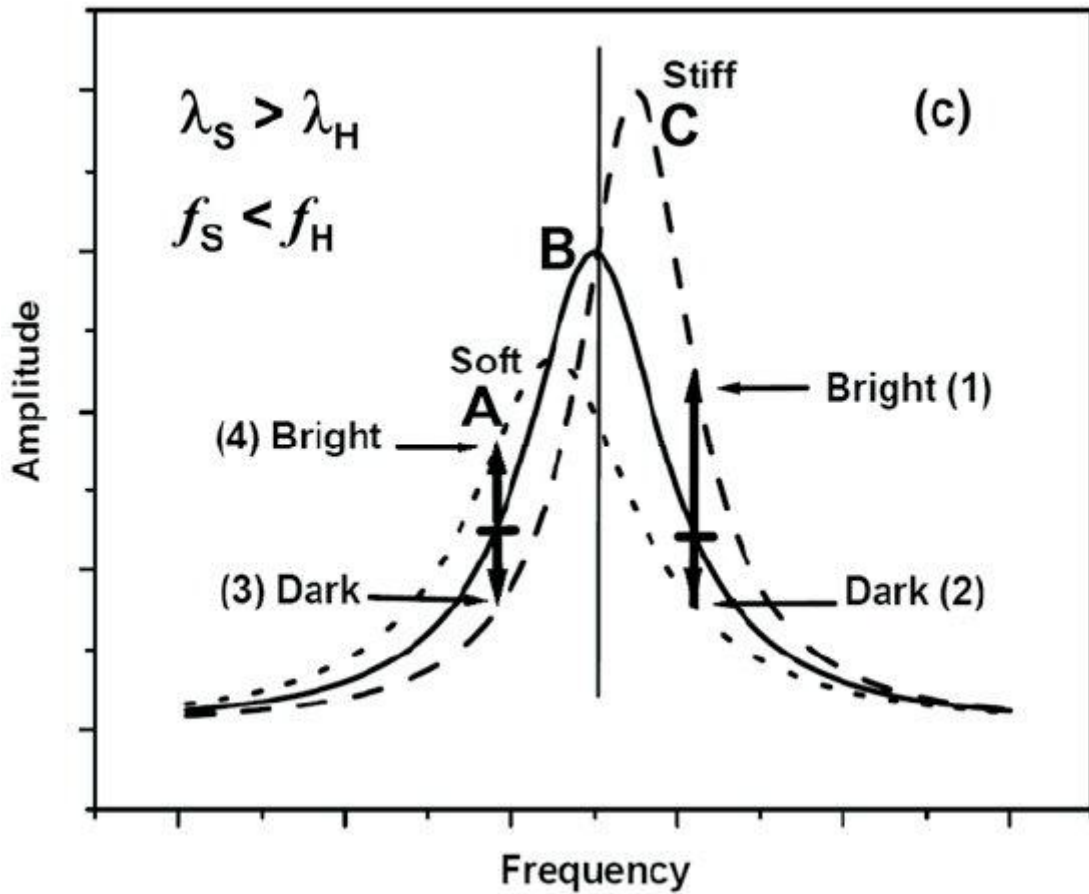
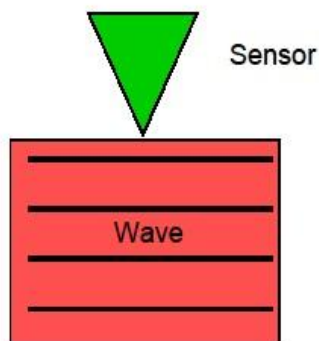


圖 3.3.2 共振曲線在剛性表面會向右偏移且振幅較大，軟性表面會向左偏移

### Beyond Abbe's Limit: The Near-Field Principle

A sharp tip or another object with dimensions in the nm-range is scanned over the sample

Near-field microscope using a sharp tip



Near-field microscope using an aperture

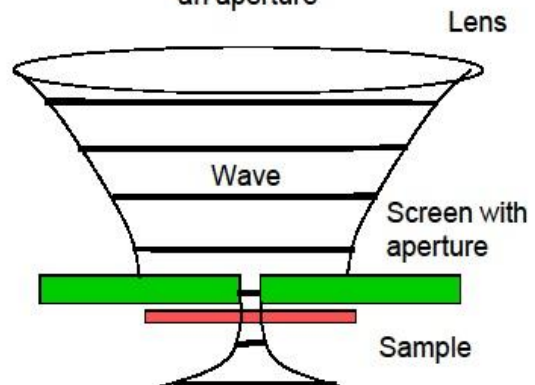
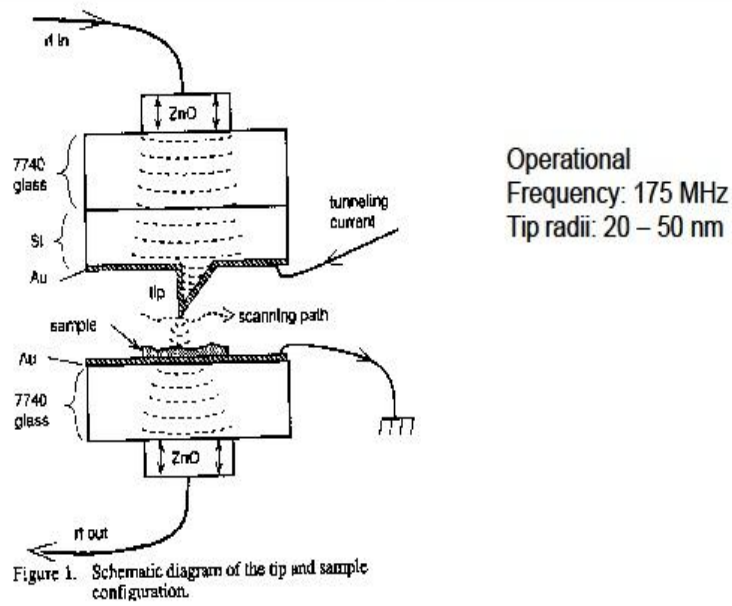


圖 3.3.3 近場成像原理

## Scanning Near-Field Acoustic Microscopy



S. Akamine, B. Hadimioglu, B.T. Khuri-Yakub, H. Yamada, and C.F. Quate, „Acoustic microscopy beyond the diffraction limit: An application of microfabrication, *Digest of Technical Papers in Solid-State Sensors and Actuators, Int. Conf. on Transducers 91*; pp.857-859.

圖 3.3.4 掃描式近場聲波顯微鏡

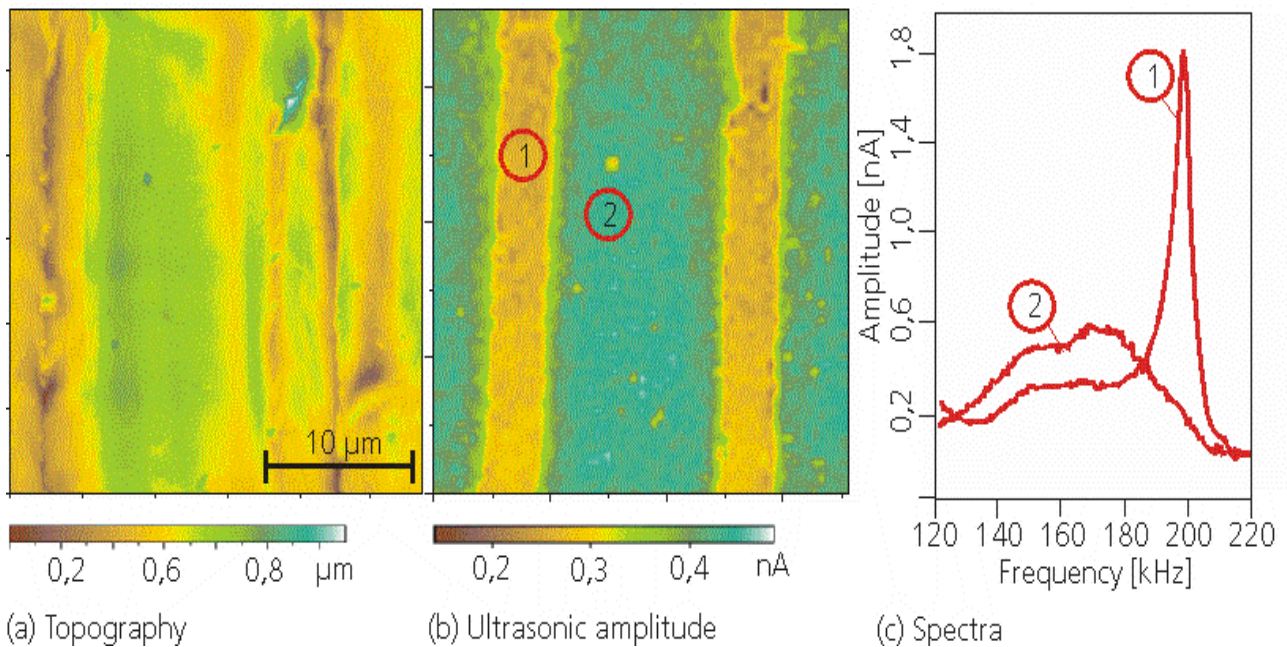
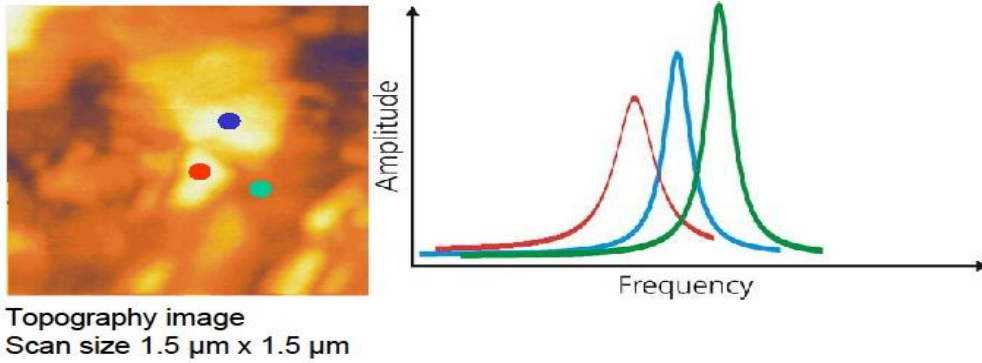


圖 3.3.5 應用 AFAM 量測高分子材料

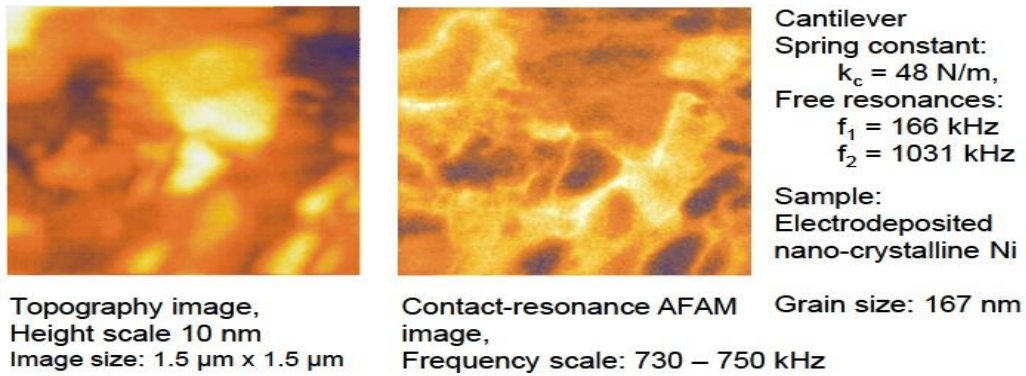
## Principle of Contact-Resonance Imaging on Nanocrystalline Ni

Anisotropic sample: Electrodeposited nano-crystalline nickel  
Grain size: 167 nm



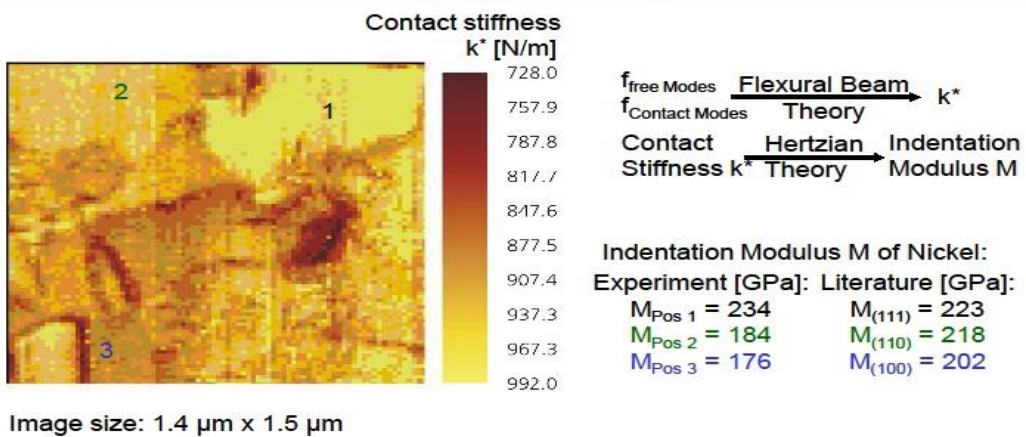
(a) 電鍍奈米結晶鎳之接觸共振量測結果

## Contact-Resonance AFAM Imaging of Nanocrystalline Ni



(b) 中央圖為 AFAM 的接觸共振影像

## Contact-Stiffness AFAM Imaging of Nanocrystalline Ni



(c) 接觸剛性影像圖

圖 3.3.6 電鍍奈米結晶鎳之接觸共振量測結果

## $M_{23}C_6$ type grain boundary carbides in Inconel 625

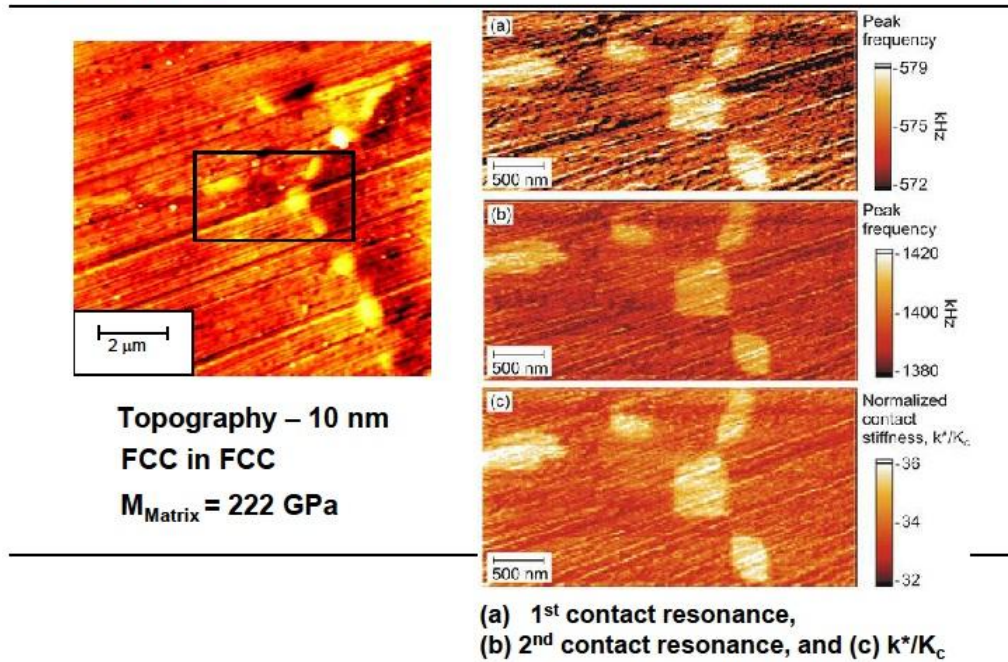


圖 3.3.7 英高鎳 625 材料析出於晶界之  $M_{23}C_6$  碳化物之 AFAM 結果

## AFAM and ultrasonic piezo-mode images of PTC thin-films annealed at different temperatures; Image size $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ .

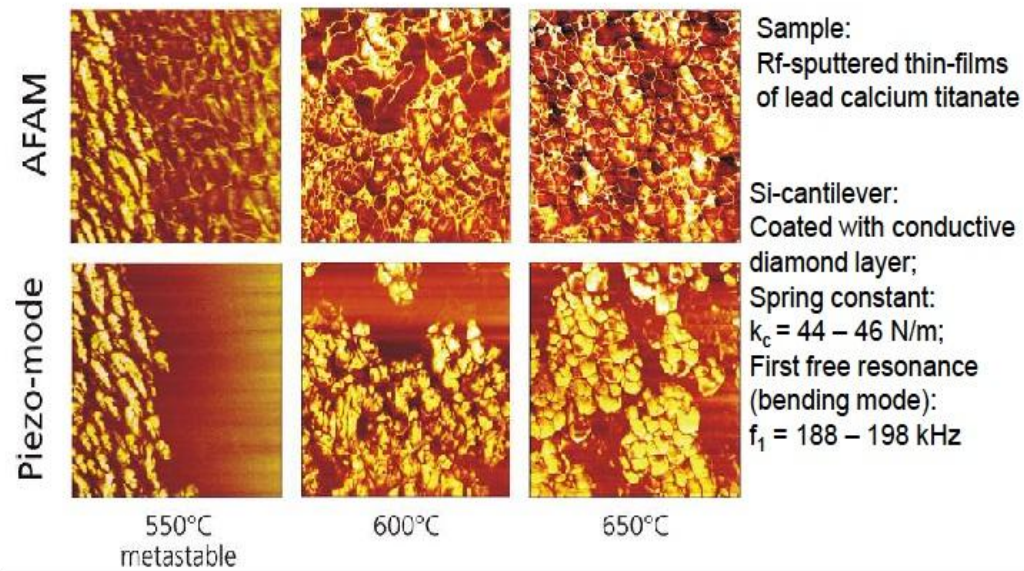


圖 3.3.8 PTC Thin-Films 在不同溫度時，AFAM 影像與 Piezo-Mode 影像比較

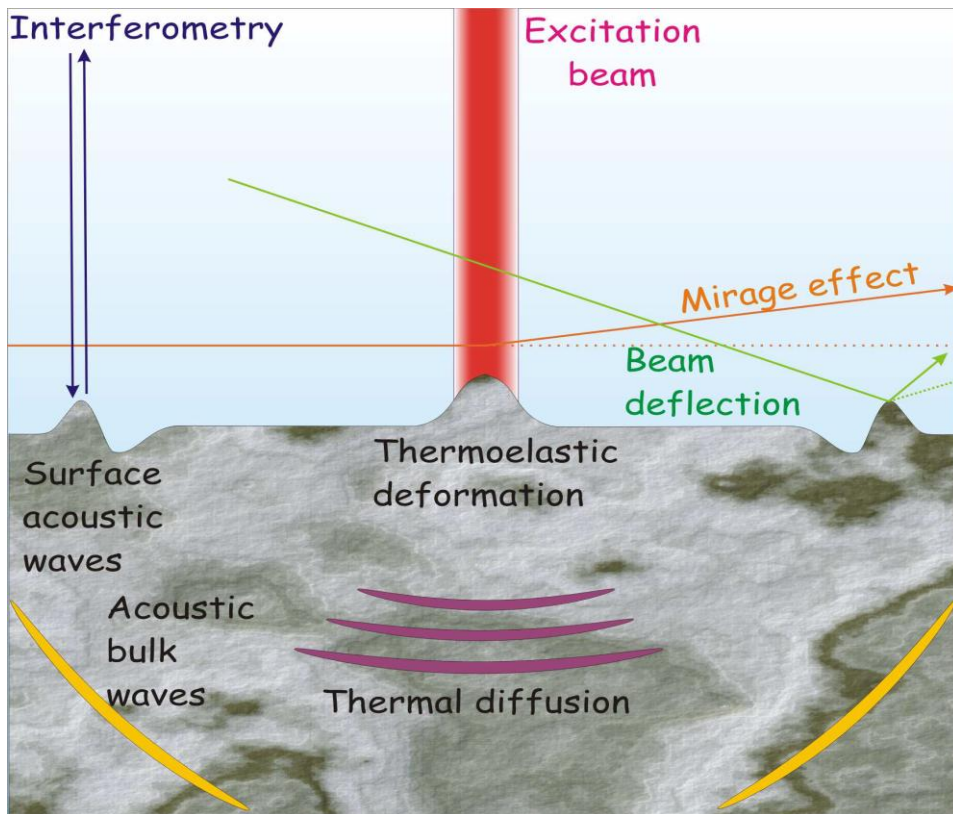


圖 3.4.1 雷射超音波產生的原理 (Bulk Wave & SAW)

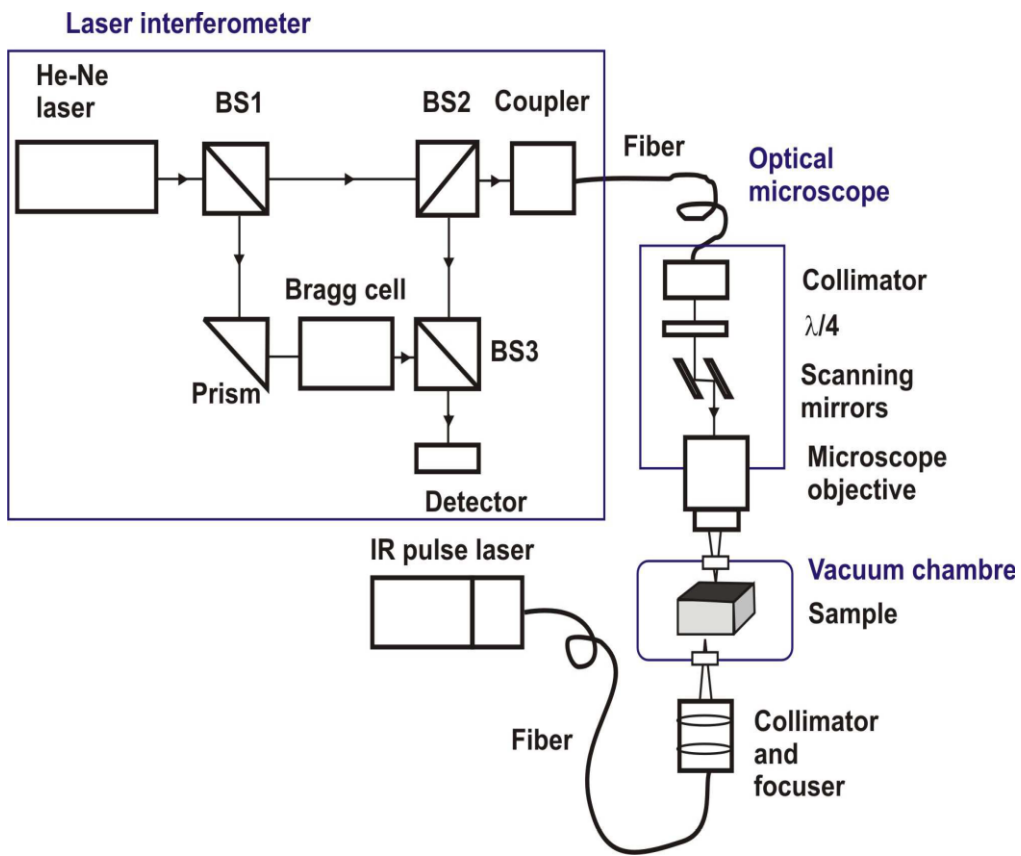
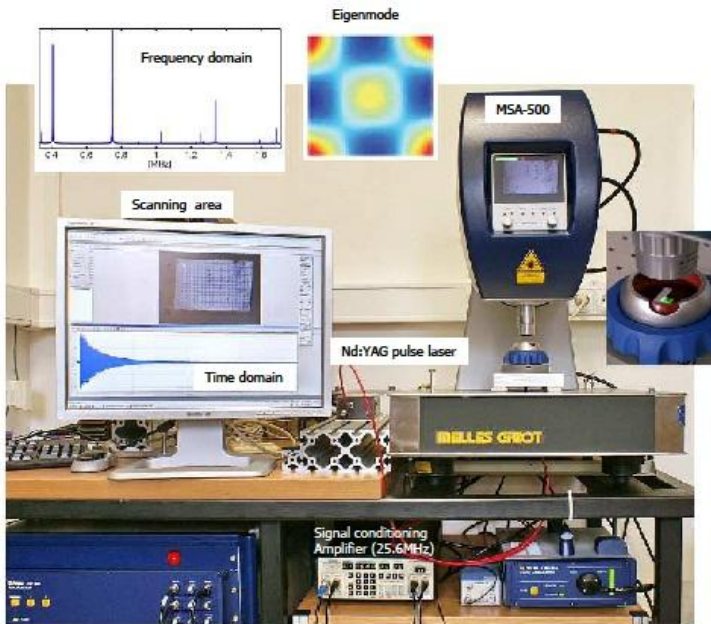


圖 3.4.2 雷射共振音波頻譜儀系統圖

### Non-contact Modal RUS method implemented into MSA-500



- Elastic vibrations are both generated and detected by lasers (fully non-contact measurements).
- Scanning laser-Doppler interferometer is used to determine the modal shapes of individual vibrational modes.
- Measurements are done in an evacuated chamber with controlled temperature.
- Typical size of specimens: 2x3x4mm, but can be even lower.
- Outcomes: anisotropic elastic constants, internal friction.

**TEMPERATURE AND VACUUM CHAMBRE, T range: 203K – 423K**



圖 3.4.3 MSA 以 RUS 技術量測非等向性彈性係數以及內部磨擦等材料性質

### Broadband excitation and detection - beam deflection method Experimental set-up

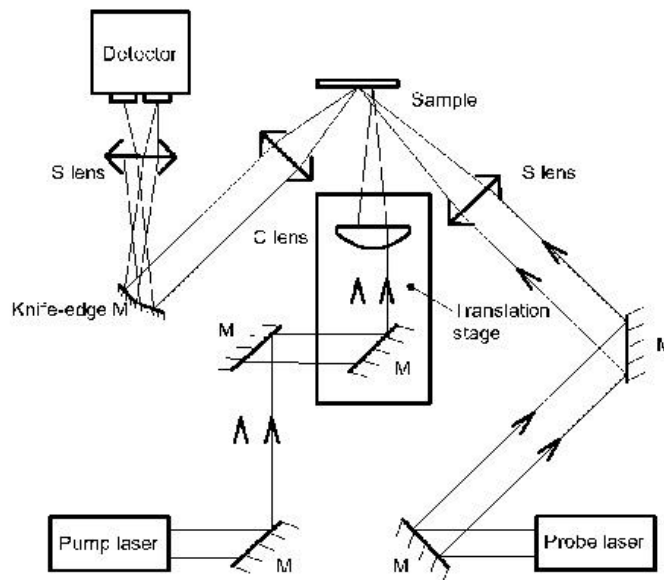


圖 3.4.4 SAW 雷射超音波系統圖，接收方式為 Beam Deflection Method

## INTERFEROMETRIC DETECTION

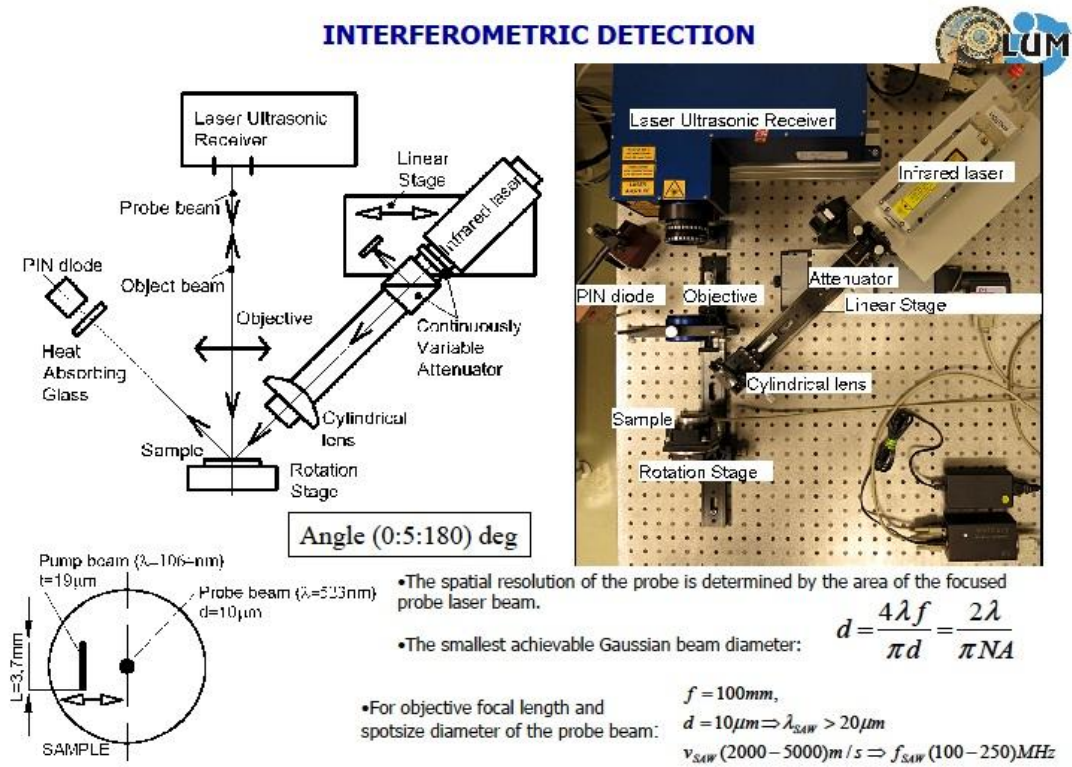
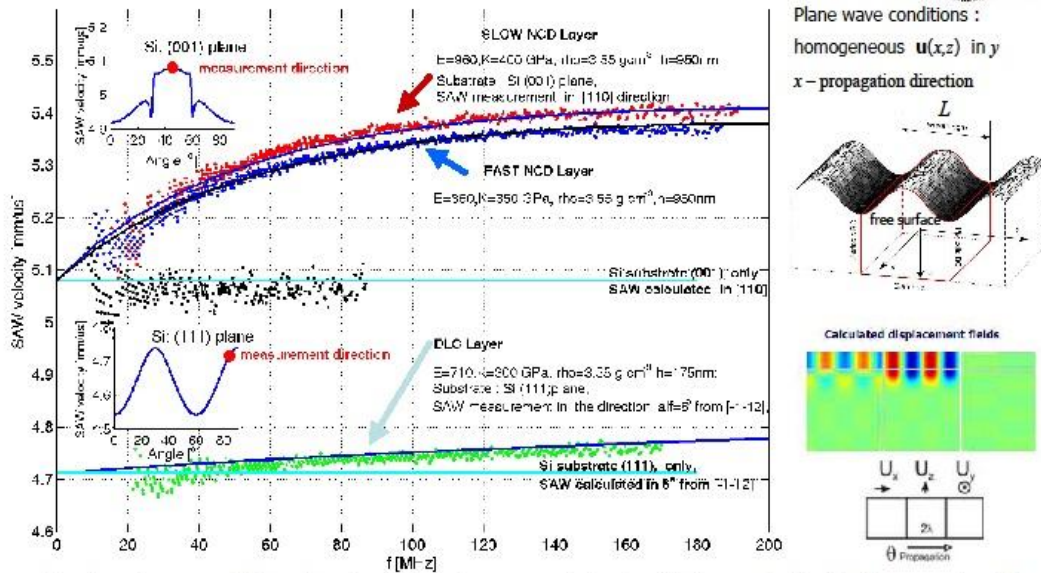


圖 3.4.5 採用干涉法接收(Interferometry Detection)的系統圖

## Application of SAW method - thin film analysis based on fitting of SAW dispersion



The dispersion curves of the system of an isotropic layer on an anisotropic substrate was calculated by the resonant model with the specific boundary conditions for series of values thickness-wavelength ratio.

The precise determination of SAW propagation direction with respect to the crystallographic orientation of the substrate is essential for optimal fitting of experimental data. The orientation was verified by X-ray diffraction (Laue method).

In spite of RUS method, the layer thickness and density could be taken into account of the inversion procedure.

圖 3.4.6 以 SAW 量測 NCD、DLC 薄膜之結果圖

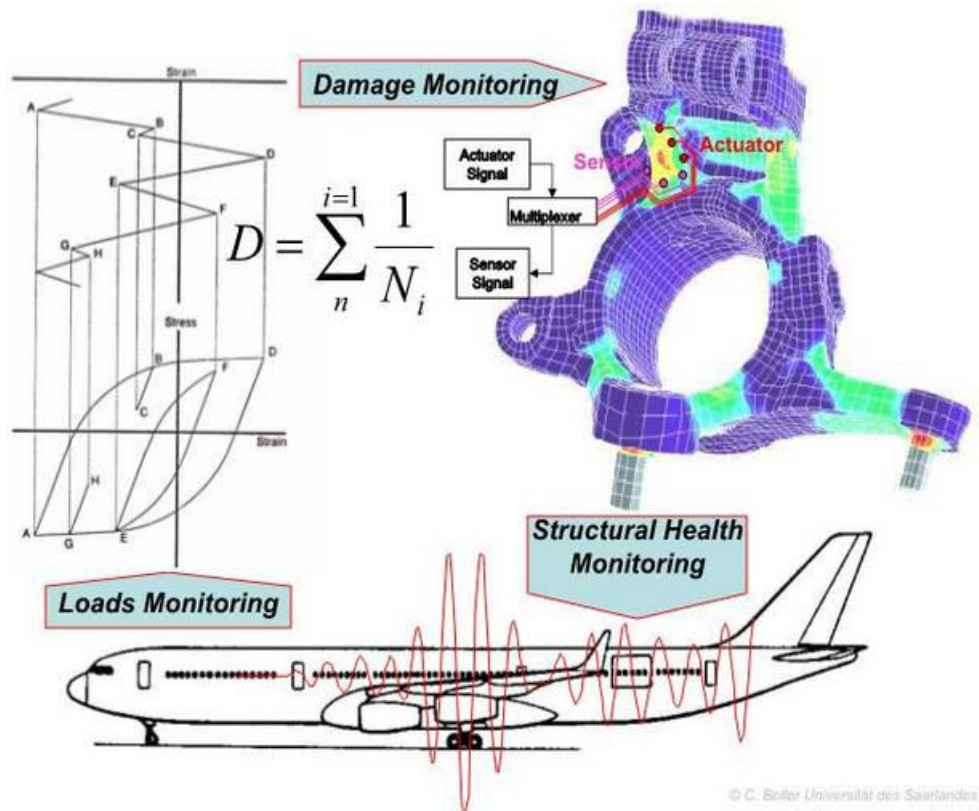


圖 3.5.1 飛機 SHM 可整合負荷監測、損傷監測之數據綜合分析研判

## Technologies Beyond State-of-the-Art in Aircraft NDT

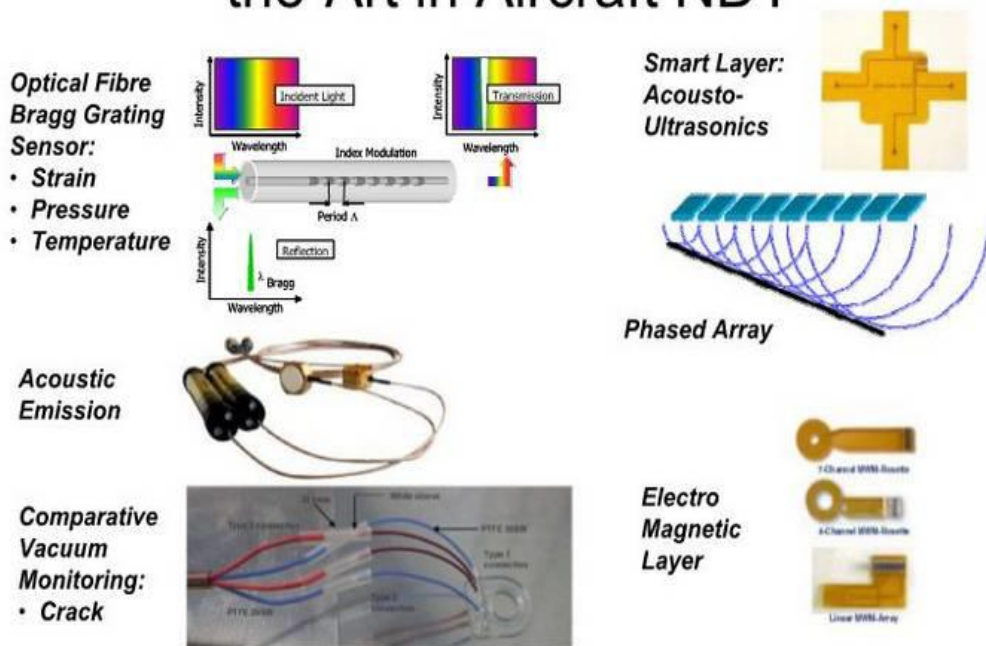
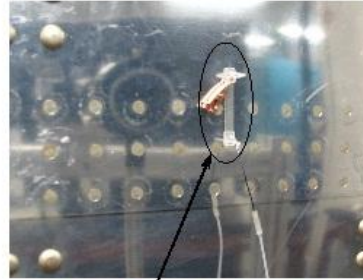
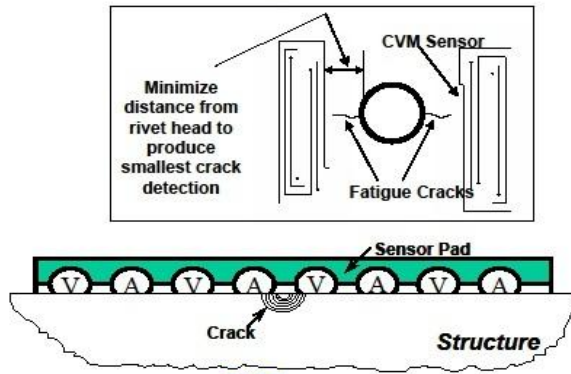


圖 3.5.2 目前較新的飛機結構 NDT 監測技術



# Comparative Vacuum Monitoring System

- Sensors with fine channels on the adhesive face - applies a vacuum to a thin film sensor with embedded galleries open to the surface
- Leakage path between the atmospheric and vacuum galleries producing a measurable change in the vacuum level
- Doesn't require electrical excitation or couplant/contact



CVM Sensor Adjacent to Crack Initiation Site

FAA Hughes Technical Center

Sandia National Laboratories

圖 3.5.3 CVM 系統工作原理

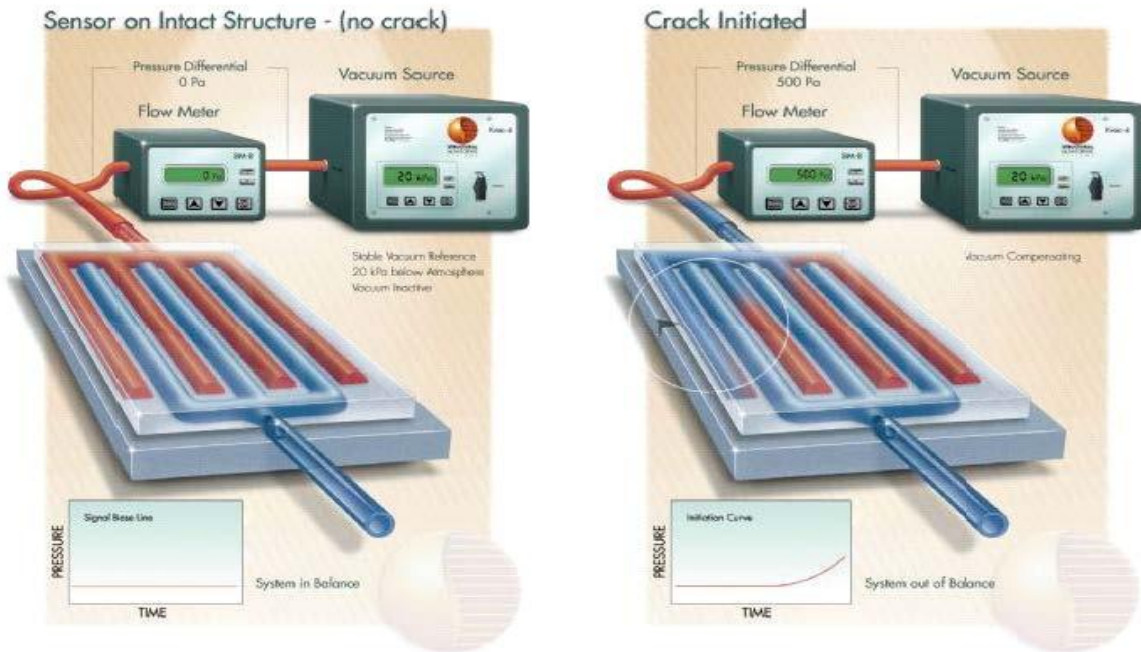
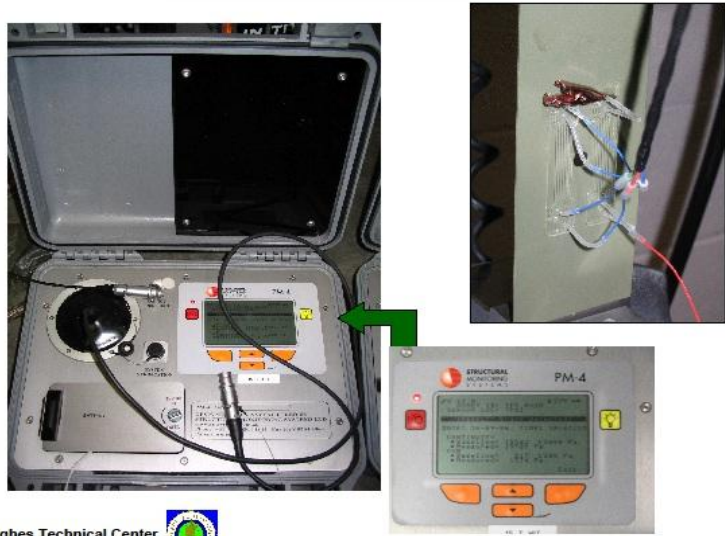


圖 3.5.4 CVM 系統：左圖為無裂縫時，右圖為裂縫發生時之結果(from Wiki)

# Monitoring CVM Sensors in the Field with a PM-4 Device



FAA Hughes Technical Center



Sandia National Laboratories

圖 3.5.5 CVM 系統，左為主機，右上角為貼片貼在圓孔附近

## Problems with the Status Quo

Common SHM Practice

```

    graph LR
      A[Measurements] --> B[Feature Extraction]
      B --> C[Feature]
      C --> D["Σ|v|²"]
      D --> E[Change Point]
      E --> F[Alert]
      G[Engineering Coverage] --> B
      H[Trial and Error Black Box] --> B
  
```

Without decision-making framework, the performance can not be evaluated in a meaningful way (e.g. rates of error)

Sum-of-squares is rarely an optimal detector: Missing out on performance enhancement

Risks of Trial and Error ("Black Box") approaches to feature extraction:

- Unknowingly throwing away valuable information
- Highly volatile, noisy, non-generalizing features
- Reinventing features that are statistically equivalent to those in previous studies (maybe not of particular industrial concern, but definitely of academic concern)

UCSD School of Engineering | Jacobs Engineering | Engineering Institute | Los Alamos

圖 3.5.6 SHM 現有的研究及其問題

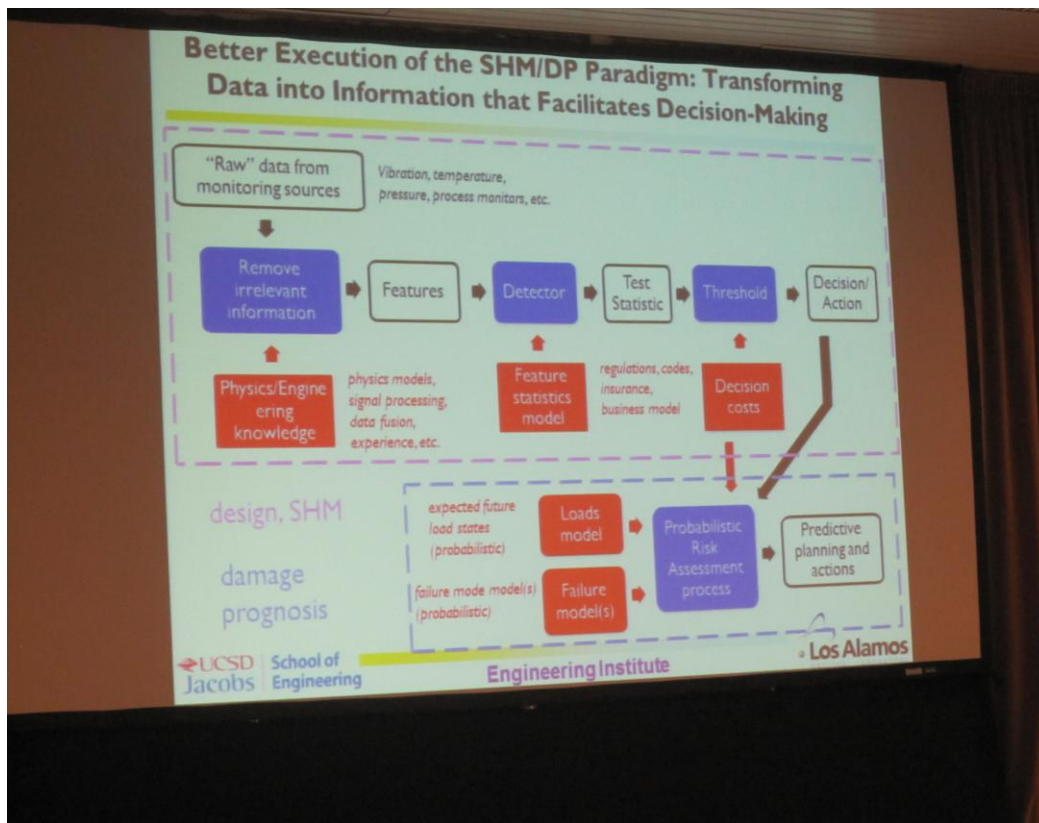


圖 3.5.7，將 SHM 結合 DP(Damage Prognosis)之構想

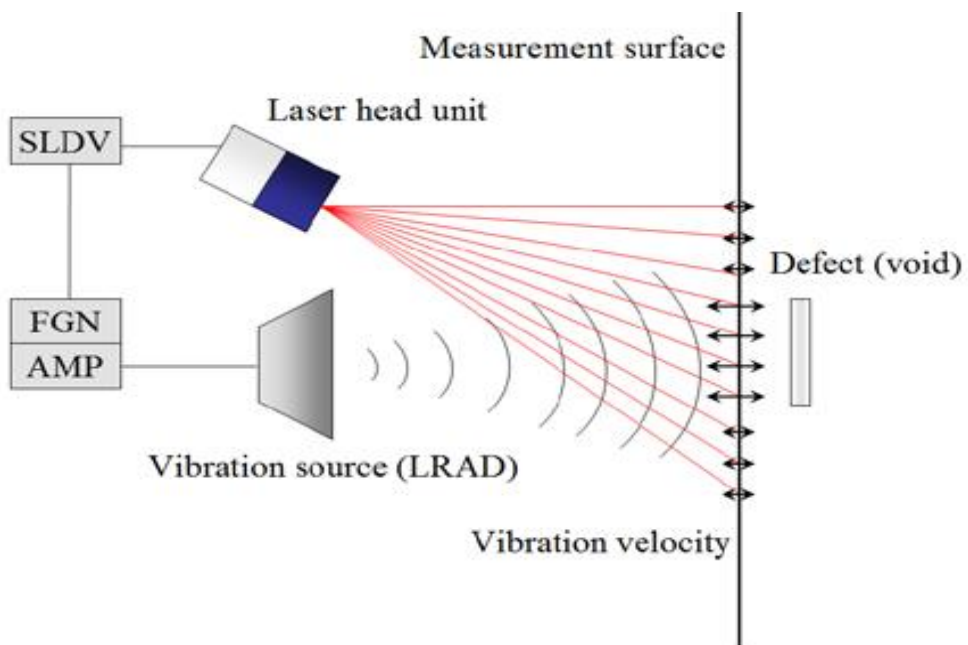


Fig.1 Fundamental concept

圖 3.6.1 以 Tone Burses 音波量測混凝土之系統示意圖

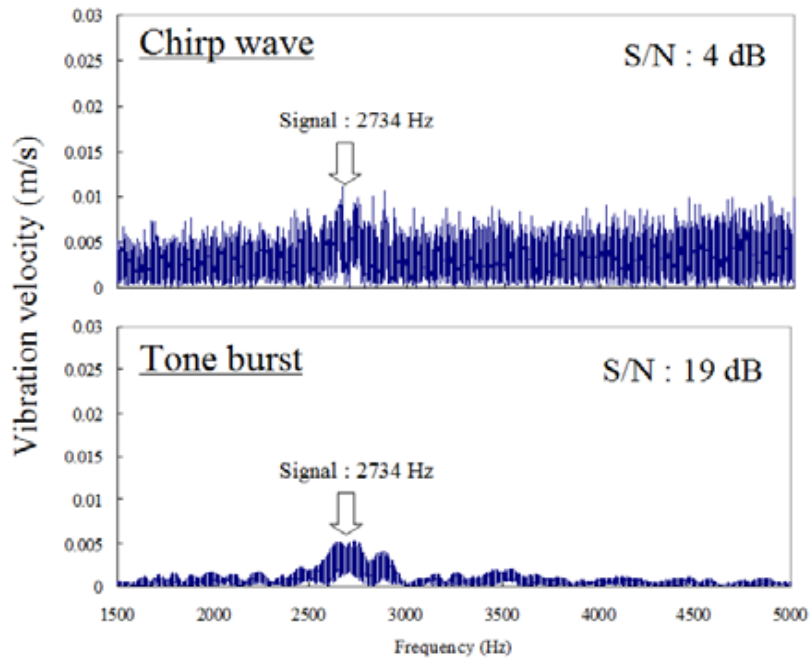


Fig.2 Vibration spectra on the defective part.  
The size of the defect is  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ , and the depth is 7.5 cm.

圖 3.6.2 使用 Chirp 波和 Tone Burst 波所得之振動頻譜比較

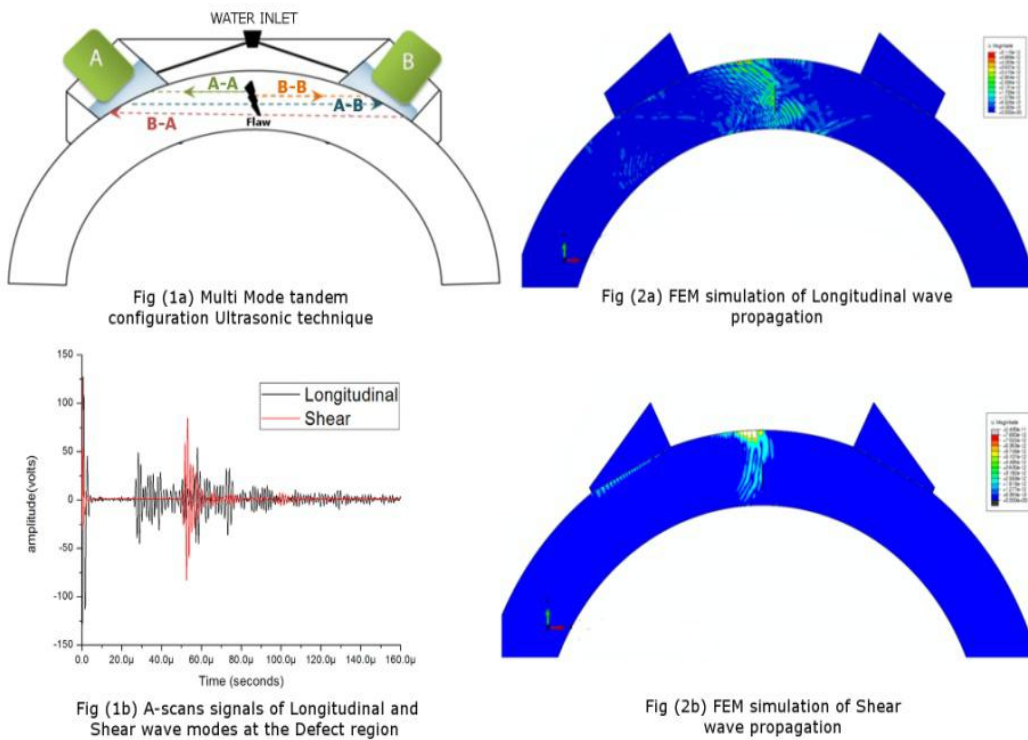


圖 3.6.3 多波式投捕法技術



圖 3.6.4 小型的超音波脈波產生/接收儀器(左下角)

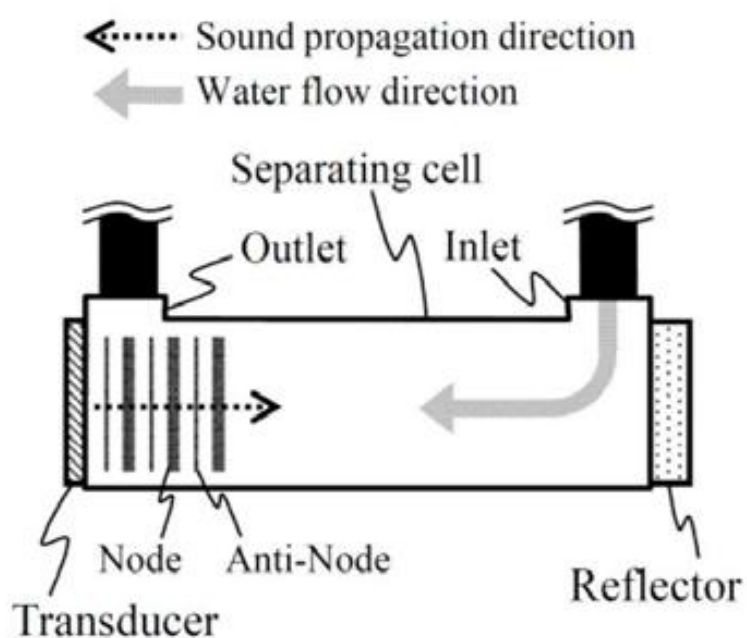


Figure 1 Schematic diagram of separating cell

圖 3.6.5 以聲波輻射力的技術做水過濾的方法

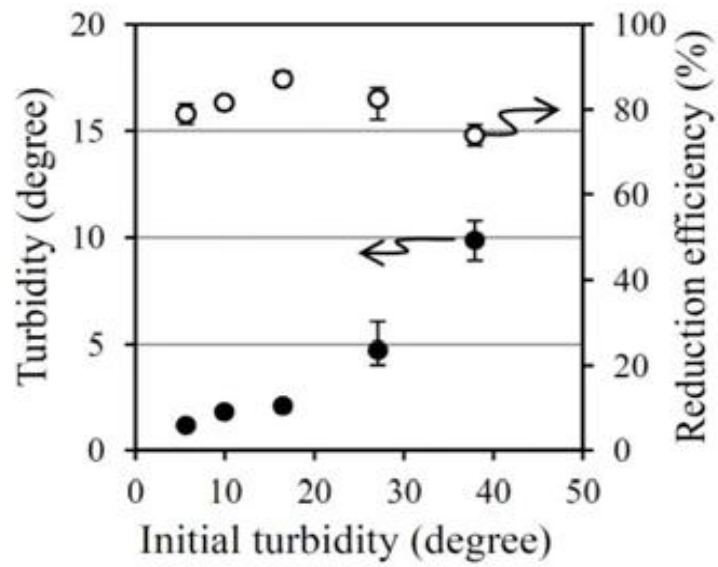


Figure 2 Turbidity after filtration vs. initial turbidity

圖 3.6.6 水的初始濁度與過濾後濁度比較