

セラミックスにおける非破壊検査法

高 行 男

1. 緒 言

セラミックスは非金属無機材料で、製造工程において高温処理を受けた生成物である¹⁾。その歴史は、陶磁器、セメント、ガラス等大変古いが、従来セラミックスは工業の分野では単なる絶縁物としての役割を果たしていたにすぎなかった²⁾。しかし、1960年代における窒化珪素や炭化珪素の材料開発に伴い、セラミックスを構造用材料、特にエンジン部材として利用しようとする研究が1970年代アメリカにおいて国家的プロジェクトとして推進され、1977年のカミンズ社による断熱ターボコンパウンドエンジンや1978年のフォード社による自動車用ガスタービンの試作成功等、セラミックエンジンの開発が行われてきている。日本においても1981年日本特殊陶業や京セラ株式会社がセラミックエンジンの開発において成果を得たことからセラミックスに対する関心が一般的に高まり、1983年に第一回のセラミックスフェア、84年に第二回のそれが開催された。

セラミックスをエンジン部品に適用する大きな理由は、セラミックスが有する耐熱性、断熱性、耐摩耗性などの優れた特性により冷却装置の必要がないこと、これによる熱効率の向上(低燃費)および建設機械や軍用車両用など悪環境にも使用できること³⁾であろう。セラミックスは構造用材料として優れた特性を有するとともに、電気的、磁氣的、光学的、化学的等の機能においても特有な性質を持っているので、機能用材料としても多くの分野で注目されている⁴⁾。さらに、セラミックスは資源が豊富であるので、Ni, Co, Cr 等のスーパーアロイの保存、低価格の可能性⁵⁾、重金属汚染といった公害問題がない⁶⁾ことから将来有望な材料といえる。

しかし、セラミックスの利用、特に構造用材料として実用化するためには解決しなければならない諸課題があり、その一つが非破壊検査法(以下、NDE, nondestructive evaluation と称す)の確立であるが、このことについての報告は数少ないようである。以上の観点より、本論では、まずセラミックスの材料特性について整理し、セラミックスにおける NDE の位置付けを行う。次に、NDE の研究・開発動向の一端を国家的プロジェクトとしてセラミックスの基礎・応用について検討を行っているアメリカの自動車技術開発契約者総合会議(Automotive Technology Development Contractors Coordination Meeting)の最近の報告集に基づいて概説する。

2. セラミックスの特性と実用化の諸課題

2・1 特性

セラミックスを構造材や機械部品として用いる場合、その注目する特性^{4,5,7-9)}を表1に示す。セラミックスはこのような優れた特性により、エンジン部品などの自動車部品をはじめベアリング、切削チップなど種々の用途に利用および応用が検討されている¹⁰⁾。

しかし、セラミックスは表2に示したような問題点を有しており、これがセラミックスを構造材や機械部品として用いる場合、強度の信頼性の欠如という重大な問題を提示することとなる。

2・2 実用化の諸課題

セラミックスを構造材や機械部品として実用化するための課題の基本的内容は、前節で述べたセラミックスの持つ問題点の克服、すなわち強度の信頼性の向上である。表4には、実用化のための諸課題^{4,5,7,10,14)}を整理して示した。

表1 セラミックスの特性

項目	内容	
耐熱性	高温強度が大きい。	エンジンの燃焼
断熱性	熱伝導率が小さい。	室等への適用。
耐摩耗性	良い。メカニカルシール、ボールバルブへの適用。	
耐食・耐薬品性	化学的安定性。熱交換器への適用。	
低熱膨張性	Alの1/10。	
軽量	Alの比重と同程度、タービンへの適用。	
超硬性	例えば、Si ₃ N ₄ のHv=1700 ¹¹⁾ 。	
高剛性	変形しにくい。精密機械部品への適用 ⁶⁾ 。	

表2 セラミックスの問題点

項目	内容
もろさ ^{7,9)}	破壊靱性値K _{IC} が金属の1/5~1/30。
強度のばらつき ¹²⁾	金属で10%内外に対し30~50%。
破壊源となる欠陥寸法 ^{5,7)}	10~20μmの微小欠陥でも破壊源となる、この大きさは鋼材のその1/100程度である。表3 ¹³⁾ には、種々の材料における破壊源となる欠陥寸法を示す。
機械的・熱的衝撃性	金属に比べ弱い。
製造・加工性	金属に比べむづかしい。

表3 破壊源となる欠陥寸法

材	料	欠陥寸法 (mm)
鋼	4340	1.5
	D6AC	1.0
	Marage 250	5.0
	9Ni4Co20C	18.0
アルミ合金	2014-T6S1	4.5
	2024-T3511	25.0
チタン合金	6Al-4V	2.5
	8Al-1Mo-IV(β)	14.5
窒化珪素	ホットプレス	0.05
	反応焼結	0.02
ガラス	Soda Lime	0.001
	Silica	0.003

表 4 セラミックスの実用化の諸課題

分野	項目	内容
製 造	素材	高純度化, 微粉化。
	製造工程	結晶粒の微細化と均一性, 高密度組織 ⁴¹⁾ の達成。
品 質 評 価	強度の時間依存性をはじめとする機械的性質の把握	クリープ, 疲労 (熱疲労), 酸化抵抗性, き裂の安定成長。
	破壊現象の理論的解明	強度の統計的ばらつきなど。
	寿命予測技術	破壊の起こる時期を予測。
	寿命保証試験	必要な寿命を満足しないものを使用前に除外して品質保証を行う。
	非破壊検査法	セラミックス部品に適用可能なNDEの確立。
	設計法	構成品の形状においてセラミックスの特性が現れるようにする。
加 工	成形・加工法の確立	複雑形状品に対する方法, 正味寸法により近い成形法の確立 ³¹⁾ 。
	仕上げ法の改良	強度に及ぼす研磨技法の影響等の解明 ³²⁾ 。
その他	潤滑	高温下における潤滑問題の克服 ¹⁵⁾ 。

3. NDE の概要, 重要性および諸方法

3・1 NDE の概要

NDE とは, D. O. Thompson の言葉¹⁶⁾を借りれば, 適当な材料と構造物の破壊を予測・防止することを目的とした技術である。NDE の定義はこのように広い内容を含むが, その中心的内容は, 試験体の組織の異常や欠陥の存在とその程度を非破壊的に推定する方法である非破壊試験¹⁷⁾であるといえよう。非破壊試験における欠陥の検出には, 試験体の状態 (材質, 組織, 形状, 表面状態など), 欠陥の状態 (種類, 形状, 分布, 位置, 方向など), 試験方法 (物理エネルギーの種類, 検出素子の特性, 試験条件など) によって影響される¹⁷⁾。

NDE の概念が工業技術として必要であると認識され, 組織的活動が始まったのはアメリカにあり, 1942年のことであったが¹⁸⁾, その発展には工業における溶接技術の導入が大いに寄与した¹⁹⁾。

3・2 重要性

NDE は 2・2 節で述べた寿命保証試験とともにセラミックス部品の強度の信頼性を保証する手法として重要である。

セラミックスの破壊源は材料の表面および内部に存在する欠陥であり²⁰⁾, その種類としては気孔, 介在物, き裂の他に free silicon²¹⁾, 異常成長粒子²²⁾などが挙げられる。こうした欠陥を含まない部品の製造が不可能である²³⁾ので非破壊的に欠陥を検出し, それを取り除くことが強度の信頼性を高めるために重要となる。また, NDE は, 複雑な形状部品の製造工程中不測に混入する欠陥を検出してセラミックス部品の信頼性を高める点からも重要である。

なお、NDE は、欠陥の検出以外に表面のなめらかさや製造方法の相違による結晶粒や気孔率の差異を調査できるので²⁴⁾、よりよい製造工程の確立をはじめ種々の方面に利用できると考えられる。

3・3 NDE の諸方法

NDE には諸方法があるが、2・1節、表3に示したように、破壊源となる欠陥の寸法が非常に小さいセラミックスに適用が試みられている方法^{22,25,40)}を整理すると表5のよ

表5 NDEの諸方法

N D E	対象欠陥
(1) Photoacoustic Spectroscopy (PAS)	表面欠陥
(2) Ultrasonic Testing (UT)	内部欠陥
(3) Scanning Laser Acoustic Microscope (SLAM)	表面・内部欠陥
(4) X-Ray	内部欠陥
(5) Acoustic Emission (AE)	表面欠陥
(6) Electro-Magnetic Wave Irradiation	表面・内部欠陥
(7) Thermal Wave Microscope ²²⁾	表面欠陥
(8) Acoustic Surface Wave Measurements ⁴⁰⁾	表面欠陥

うになる。精力的に検討されている方法は、表中(1)~(4)の技法であるので、4章でそれらについて概説する。なお、材料内に蓄えられたひずみエネルギーが解放される時、弾性波が放出する現象を利用して欠陥を検出する表中(5)の AE 技法が²⁶⁾、ガスタービンのセラミックス構成品の品質確認試験における破壊開始時の検出に利用されている³⁹⁾。

4. NDE の研究・開発動向

[自動車技術開発契約者総合会議 (Automotive Technology Development Contractors Coordination Meeting, 以下 ATDCCM と称する。)の最近の報告集を中心として]

前章までにおいてセラミックスにおける NDE の位置付けおよびその概要を述べた。本章では、アメリカにおける ATDCCM の報告内容を整理・補足して紹介する形式によって NDE の研究・開発動向を概説する。ATDCCM は、アメリカにおいて国家的プロジェクトとして推進している AGT (the Advanced Gas Turbine) および CATE (Ceramic Application to Turbine Engine) 計画に参加している研究者の会議報告集であり、セラミックスをエンジン部品として実用化するための諸問題を検討している。

この AGT, CATE 計画で提示されている諸課題^{27~29)}(一般的事項については、2・2節、表4の項目を参照)において、NDE は重要課題の一つとして述べられている。また、NDE の重要性は、表6³⁰⁾に示したように、1979年に結ばれたアメリカと西ドイツにおける自動車用タービンエンジンのセラミックス材料に関

表6 自動車用タービンエンジンのセラミックス材料に関するアメリカと西ドイツにおける協力内容の概要

(1) 会議、研究施設の相互訪問等による情報交換の活発化
(2) セラミックスの材料特性値に対する調査協力
(3) 寿命予測技法とその成果の交換
(4) NDE (曲げ試験棒に対する vibration analysis, X-Ray, UT) に関する情報交換

する情報協力の内容に含まれていることからもうかがえよう。

4・1 NDE の開発目的³¹⁾

セラミックスにおける NDE の開発は、車用ガスタービンエンジンの構成品の開発において、現在使用されているセラミックス材料が $200\mu\text{m}$ 以下の欠陥により破局的破壊が生じるのでこれらの材料で作られるタービン構成品が容認できる信頼水準を持つためには、低強度の欠陥のある構成品の選別するため、現在利用できる識別度よりはるかに高い繊別度を有する NDE が必要であるためである。現在の構成品開発段階では、普通の NDE、例えば30倍目視、X-Ray、蛍光探傷が用いられているが、これらはせいぜい最小寸法が $250\mu\text{m}$ の大きな欠陥を見つけるにすぎない。

タービン部材に使用する炭化珪素材料の強度を支配する欠陥は、広範囲にわたる珪素基セラミックスの破面調査より、 $25\sim 200\mu\text{m}$ の大きさである。欠陥のタイプ(例えば、気孔、介在物、き裂など)は一般に一種類以上あり、材料表面または内部に独自の大きさで分布している。図1には、反応焼結と焼結(Sintered)炭化珪素の強度を支配している欠陥の例を示した。前者では、破壊の起点部に多孔領域と未反応炭素が典型的に観察され、後者では、小さな気孔ときには金属

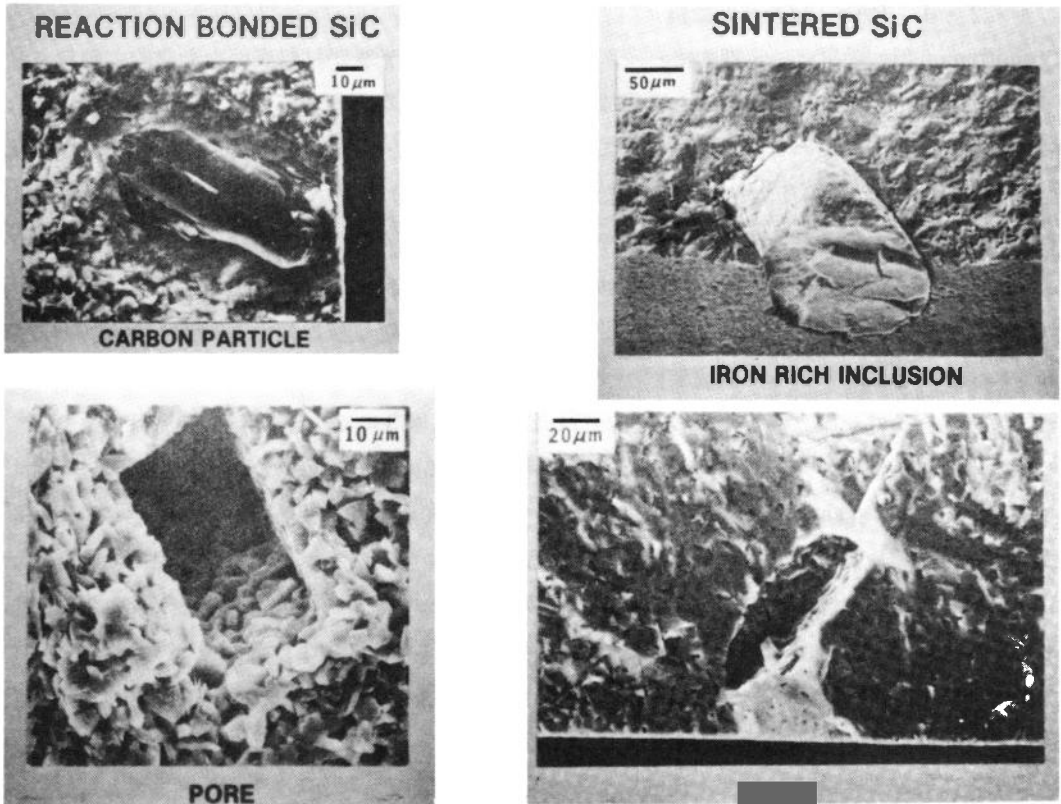


図1 SiC の強度を支配する欠陥

介在物が破壊を促進している。また、両者とも機械加工中に導入されるき裂のような欠陥から破壊につながりやすい。したがって、各材料に対し、特性が全く異なる表面と内部の欠陥を探知する技法が必要である。

セラミックスに存在する種々の欠陥の探知限界を明確にし、短期間(1985年頃まで)にセラミックスに適用しうる可能性を有する NDE を評価することが必要である観点より、本格的な調査研究が独立コンサルタント会社である Technology Associates, Inc. によって行われた結果、三つの NDE, Photoacoustic Spectroscopy(PAS), Scanning Laser Acoustic Microscopy(SLAM), High Frequency Ultrasonics (HFU, 本論では UT と称す) が挙げられたが、X-Ray についても注目している³²⁾。

4・2 各種 NDE の研究・開発動向

本節では、前節で述べた四つの NDE, すなわち PAS, UT, SLAM, X-Ray について概説する。これらの技法が AGT, CATE 計画における NDE として重視されている。表 7²⁹⁾には、参考のため、NDE の研究機関を示した。

表 7 NDE と研究機関

研究機関	NDE
Detroit Diesel Allison	UT, PAS, SLAM
NASA Lewis	UT, SLAM
Ford Motor	X-Ray

4・2・1 PAS (超音波顕微鏡)³¹⁾

photoacoustic 効果は、定期的にパルスまたは変調レーザ光線が材料表面を光学的に励起させるときに起こる。これは、試料または構成品へ、そしてそれをとりまくガス状の周囲へ定期的な熱の流れを生じ、目標の材料表面に接しているガス層の温度を上昇させガス内に変調周波数の圧力パルスをつくる。この圧力パルスはマイクロフォンまたはトランスジューサで acoustic 信号として探知できるので、この信号を増幅して X-Y レコーダ上に表示して解析することができる。この技法が PAS であり、Wayne 州立大学の R. L. Thomas によって完成された³²⁾。

Guilford Instrument Laboratories, Inc. で行われた最初の調査結果に基づき、今後の調査を容易にするため図 2 に示した試験装置が Detroit Diesel Allison で組立てられた。現在、この装置で最適走査条件を確立するための調査が行われている。図 3 には、 α -SiC に硬度計による二つの圧こんを含む領域の走査状況を示した。この特定な mapping に用いたテストパラメータは、レーザ出力レベル 600mW, 変調周波数 200Hz, 走査速度 250 μ m/s, 焦点スポットの大きさ 30 μ m 以下である。試験片は各走査後 25 μ m 移動した。図 3 は二つの圧こん以外の微視的組織の特徴を示している。例えば、図中 2 の箇所では一回の走査だけで一つのピークが出ているが、これは表面上の直径 30 μ m, 深さ約 6 μ m と推定される小さな気孔による。図中 1 の箇所では、一対のピークが直径 20 μ m, 深さ 6 μ m の一対の気孔によって生じている。最後に、長軸長 148 μ m の比較的大きな一対の圧こんが 5 つの連続的な走査線上で探知されている。

現時点における結論として、本技法による欠陥探知の再現性が欠陥の PAS 信号および位置の点からすぐれているといえる。また、研磨した α -SiC に自然に発生している表面気孔に対する

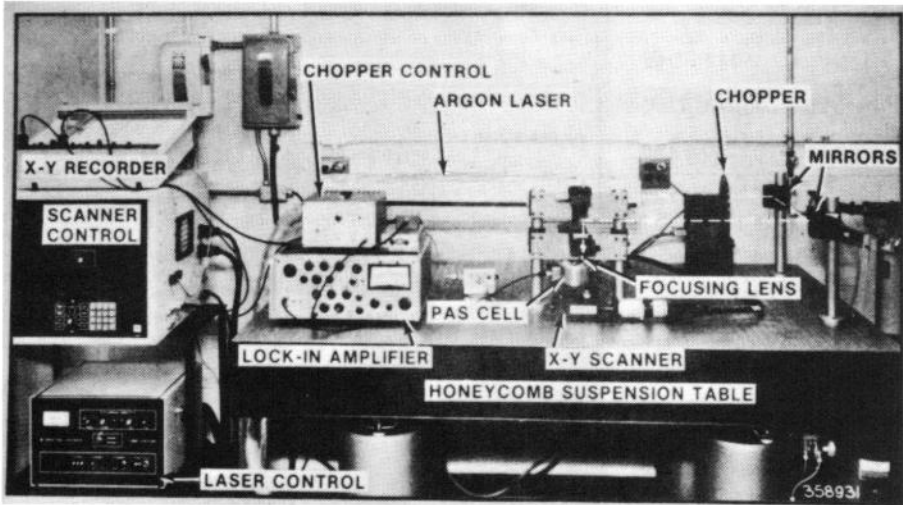


図2 PAS の試験装置

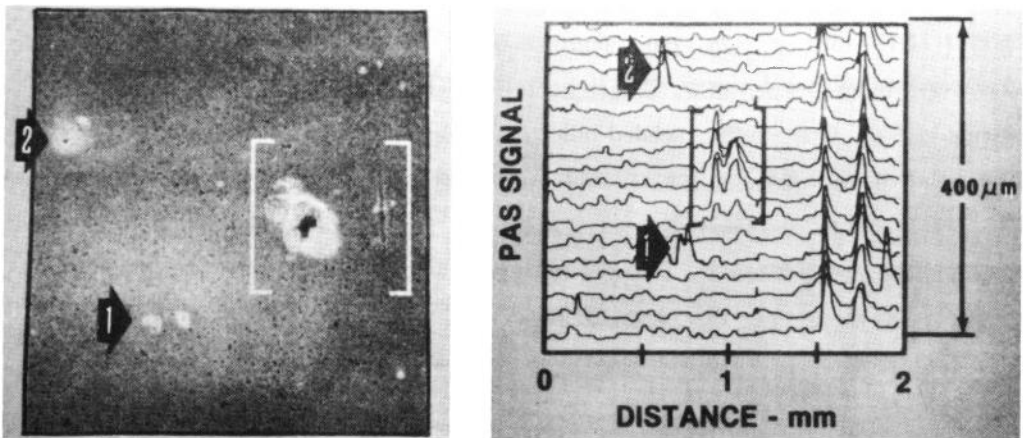


図3 PAS による走査状況

本技法の探知感度と分解能が $20\mu\text{m}$ である。さらに、Knoop 圧こんが $125\mu\text{m}$ と探知されたが、その測定長 $148\mu\text{m}$ と比較したときレーザ光線の焦点スポットの長径 ($30\mu\text{m}$) 以内であるので、欠陥の主表面寸法と本技法による探知寸法との間にはすぐれた定量的相関があるといえよう。なお、本技法の分解能は、表面欠陥に対し焦点スポットの大きさで決定され、表面下の欠陥は熱拡散によって制限される²⁴⁾。本技法によってタービンブレード等の複雑な形状に対する調査が予定されている³²⁾。

4・2・2 UT (超音波探傷法)³¹⁾

超音波を入射させ欠陥による散乱反射波を検出して欠陥の有無や寸法を測定する UT 技法は、セラミックス材料内部の欠陥探知に直接的なアプローチを提供する。本技法は金属や合金の構造用部品に対し十分良く開発されているが、商品として入手できる従来の超音波システムは1～20

MHz の低い周波数である。シリコン基セラミックス材料の破壊を支配する $25\sim 200\mu\text{m}$ の欠陥を探知するためには $50\sim 100\text{MHz}$ またはそれ以上の周波数が必要である。図4には、Detroit Diesel Allison で開発された 50MHz 超音波C-走査画像システムを示した。

予備的な欠陥探知の調査がホットプレス窒化珪素の seeded billet を用いて行われている。Norton 社から供給された

この材料 (NC-132) は、 $125, 250, 500\mu\text{m}$ の高密度 (Fe) と低密度 (Si, C, BN) の介在物を含んでいる。billet の寸法、密度、表面仕上げはそれぞれ $15.2\times 15.2\times 0.625\text{cm}$, $3.27\text{g}/\text{cm}^3$, $9\sim 13\text{rms}$ である。珪素と炭素の seeded billet の一部を longitudinal mode を用いて検討した。waterpath は 6.4mm に維持し、材料の肉厚中心に焦点を置いたトランスジューサを $2.54\text{cm}/\text{s}$ で走査し、各走査線端で 0.125mm の送りをした。図5に、 $125, 250\mu\text{m}$ の珪素と炭素を含む seed 領域の典型的C-走査画像を示す。図に示されているものの多くは明らかに欠陥の集団であるが、金属組織学的断面は、いくつかのものは表示されている大きさを持つ個々の欠陥と関連づけられることを示している。A-走査で見たような多数の欠陥の amplitude はC-走査で使用される 50mV の threshold value よりずっと低いので、システムエレクトロニクスの適当な調整によって $125\mu\text{m}$ よりずっと小さい欠陥を探知しうるかもしれない。

本技法において、 50MHz 以上の周波数を用いる計画がなされているようであるが³²⁾、既に 100MHz を使用して、窒化珪素における $50\sim 70\mu\text{m}$ の欠陥を探知した報告がなされている²⁵⁾。一方、 5MHz の超音波を用いて、 $50\mu\text{m}$ 程度の欠陥を探知した報告もある³³⁾。なお、セラミックスの強度がその密度と関係し、密度と超

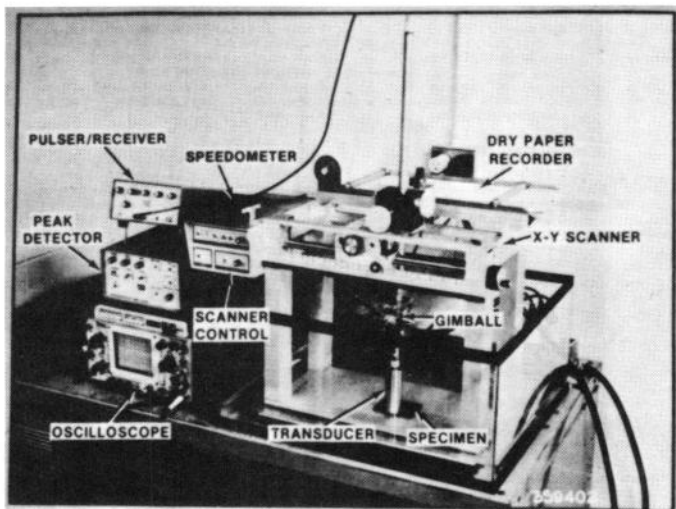


図4 UT の試験装置

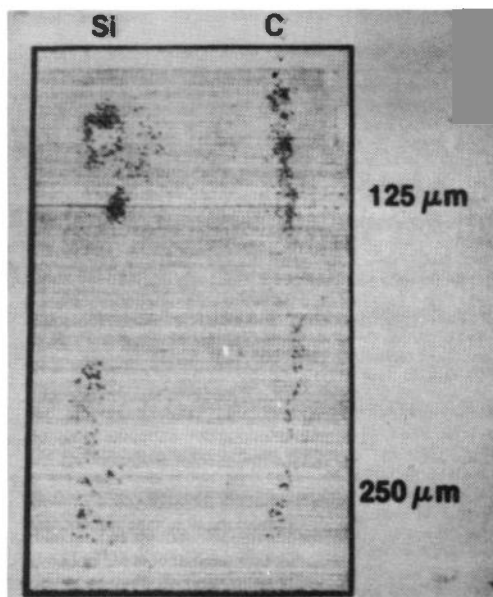


図5 UT による欠陥探知(C-走査画像)

音波速度が相関していることから、炭化珪素の密度の予測に本技法が利用されている³⁶⁾。

4・2・3 SLAM (レーザ走査型超音波顕微鏡)³¹⁾

acoustic microscopy は材料内の弾性的性質の不連続や局所的变化を光学的に画像化して写し出す技法である。欠陥探知の点から、このような弾性の不連続は探知超音波の散乱や吸収となるので、微視的組織の変化や欠陥(気孔, 介在物, き裂)は伝達される acoustic 信号の乱れとして観測される。本技法の感度と分解能は対象欠陥の大きさと形ばかりでなく欠陥のタイプ特有の相対的 acoustic 特性に依存する。

図6に模式的に示した acoustic microscopy は water stage の内側に据えつけた100MHz のトランスジューサより成っている。試験片は stage 上に置かれ入射 bulk wave によって insonify されると、裏表面に動的なさざ波(ripple)が生じる。この表面の乱れを焦点を絞ったレーザ光線で連続的に走査し、その反射光線を opto-acoustic 探知器で受けて、電子的に処理して一つの信号に変える。この信号の振幅と相が表面の乱れのレプリカとなる。

表面変位(すなわち音場)を探知する走査レーザ光線の使用は、送達される音場と散乱し変調される音場の写像(image)を独立に具象化する。これは、走査速度が非常に速いので探知信号と入射の音場との間に Doppler shift を作り出すためである。それ故、散乱波すなわち変調波は本来 insonify する場の特性周波数とはまったく異なる周波数として感知される。各波のタイプは適当な電子フィルタをかけることによって別々に写像することができる。このことは、構造用セラミックスの強度を支配する表面欠陥を探知し、その性格づけを行う場合特に役立つ。

いくつかの異なった写像モードが Sonoscan Inc. で生産され商品となっている超音波顕微鏡(acoustic microscope)で利用されている。次の二つのモードがセラミックス材料の欠陥探知に最も適している。

Bright Field Mode; このモードでは減衰による送信エネルギーの変化が写像される。明るい領域は良好な送信を示し、暗い領域は対象材料中の一つまたはそれ以上の弾性的性質の不連続による弱い送信を示す。

Dark Field Interferogram Mode; このモードでは欠陥すなわち不連続に関連した変調あるいは散乱波だけが写像される。送信波のこの写像への寄与が抑制されているので、光学顕微鏡による暗視野写像と類似の

写像を生成する。この写像と電子的に生成した reference 信号を組み合わせると縞模様(fringe pattern)ができ、干渉像(interferogram)をもたらす。こ

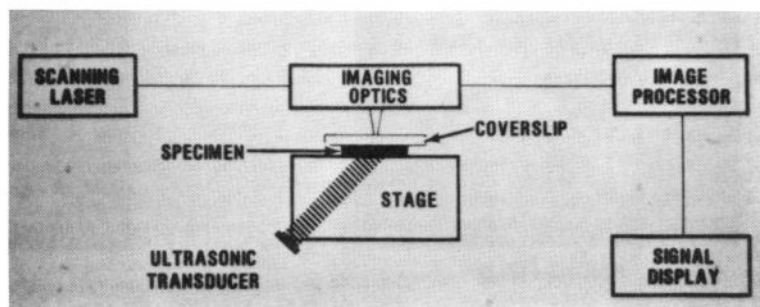


図6 SLAM の構成模式図

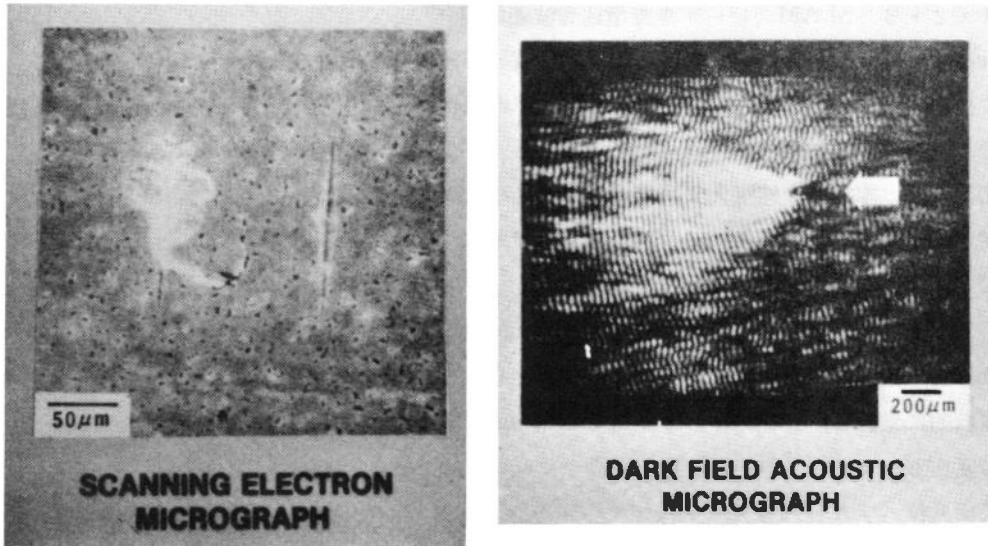


図7 SLAM による α -SiC における圧こんの欠陥探知

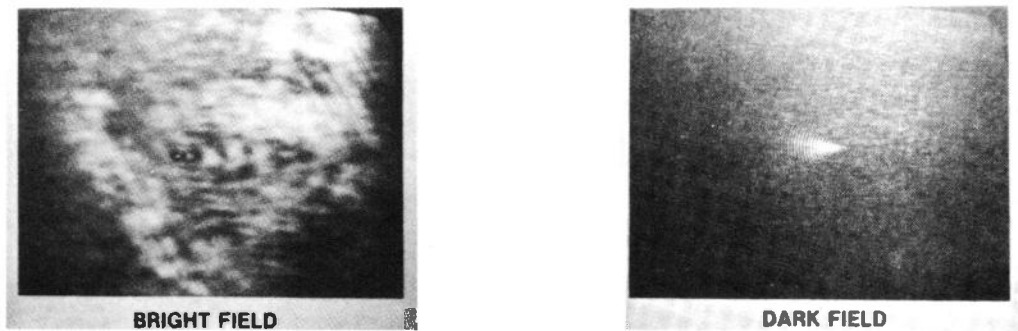
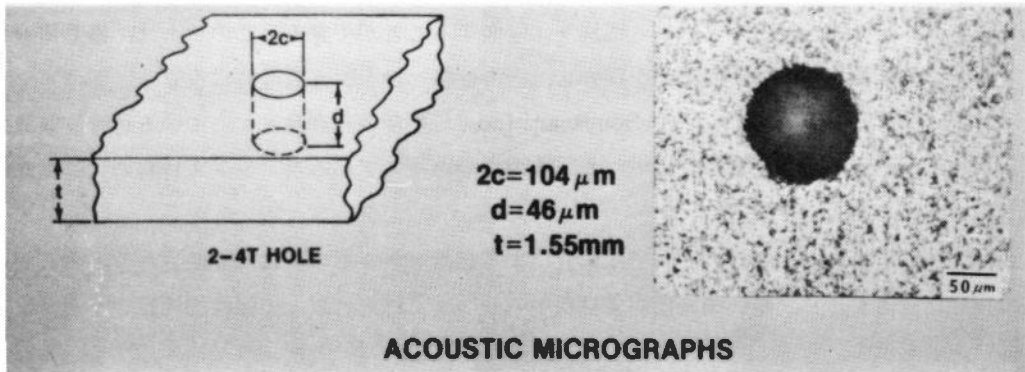


図8 SLAM による人工穴の欠陥探知

のモードは表面欠陥の探知に非常に有用である。Indianapolis Center for Advanced Research では、本モード技法を用いて焼結炭化珪素と焼結窒化珪素における模擬表面き裂（微小硬度計による圧こん）の調査に集中している。図7に示した例は、 α -SiCの研磨面にKnoop硬度計による一対の圧こん（4・2・1項で検討した欠陥と同じもの）によって生じたさざ波模様である。この欠陥対は分解できなかったが、その存在は散乱波と電子的に作り出した reference 信号との間の干渉によって生じる航跡のような縞模様によって容易に識別できる。同様な模様が0.5kgf程度の低荷重による一つの圧こんに対して観察できる。なお、この模様は圧こんを研磨して除去した後も残存しているため、圧子による半ペニー硬貨状のき裂およびその表面下の微視き裂が acoustic 信号に寄与していることがわかった。

SLAM 技法は前述した珪素基材料の強度を支配する欠陥のタイプに関係するので、この技法の探知能力の限界を確立するための適用調査が現在行われている。Indianapolis Center と Sonoscan で独自に調査されているが、後者では、炭化珪素材料において模擬表面気孔の探知に焦点をあわしている。

図8は、反応焼結炭化珪素の radiographic penetrometer に超音波であけた穴の光学および超音波顕微鏡写真を示している。radiographic penetrometer は ASTM E142-77 の一般ガイドラインに基づき2%の感度で設計された。この穴は、X-Ray では探知されなかったが、SLAM 技法における Bright Field Mode と Dark Field Interferogram Mode では容易に探知された。Dark Field Interferogram Mode では、この穴は明るい彗星状の尾をつくり、背景の組織から明確に際立っている。縞間隔は材料中を伝ばする表面波の周波数(100MHz)の波長である。Bright Field Mode では、穴はかすかな輪群によって囲まれた影のように見える。この輪群は、試験片表面に沿う bulk skimming wave (入射 bulk wave の水平成分)と欠陥による散乱波との干渉のために生じる。輪群は常に存在しているが、建設的な干渉が起こり、背景の信号と欠陥の信号とのコントラストが大きい場合にのみ観察できる。

SLAM 技法により、直径76 μ m、深さ18 μ m程度の小穴は反応焼結炭化珪素において明確に探知されるが、このレベル以下の穴は自然に生じている気孔と区別するのが困難であるため、本技法の識別度は材料の表面状態によって影響される³⁴⁾。本技法によって内部の気孔、炭素、炭化ボロンの検査や複雑な形状に対する調査が予定されている³²⁾。

4・2・4 X-Ray (X線透過試験)

X線は試験体を透過する性質があり、この透過度は材料を構成する元素と厚さによって異なる⁴²⁾。X-Ray は、試験体中でX線の吸収が異なると、透過写真上で濃淡となって現れることを利用して内部の欠陥を探知する技法である。

表8³²⁾に、 α -SiCの seeded disk に対する X-Ray の検査結果を示した。この結果は、X-Ray が特に50~125 μ mの欠陥に対して NDE として大いに有望であることを示すものであると述べられている。しかし、本技法による125, 250, 500 μ mの介在物(Fe, BN, Si, C)を含む seeded

表8 X-Ray による α -SiC の seeded disk の欠陥探知

Disk 厚さ (inch)	気 孔		C		B ₄ C	
	50~125 (μ m)	125~250 (μ m)	50~125 (μ m)	125~250 (μ m)	50~125 (μ m)	125~250 (μ m)
0.1	○	○	○	○	△	○
0.125	○	○	△	○	×	○
0.25	×	○	×	×	×	○
0.50	×	○	×	×	×	○

○は探知, △は探知可能, ×は今後の課題を示す。

billet に対する検査結果では, Fe, BN はすべての大きさの欠陥を探知できたが, Si, C は500 μ mのみ検出できたとする報告³¹⁾, Feのみ明確に探知できたとする報告³⁵⁾があるので, 本技法は試験条件等さらに検討される必要があると考えられる。

本技法は, 射出成形法によるセラミックス部品の生産工程において, 部品内部の欠陥の有無を調査するのに利用されている³⁸⁾。

4・2・5 NDE の現状および課題

本項では, 前項までにおいて概説した四つの NDE の現状について整理するとともに, 課題について若干検討する。

PAS 技法は, 種々の表面仕上げの窒化珪素と炭化珪素において微小硬度計による圧こんの模擬ペニー状き裂を再現性をもって探知することができ, 炭化珪素の研磨面においては20 μ m 程度の小気孔を検出できる³¹⁾。

UT 技法は, 高密度窒化珪素中の直径125 μ m の低密度介在物 (C, Si) を探知できる³¹⁾。

PAS, UT 技法は, 欠陥のタイプを広範囲に探知できる最大の可能性を有し, 前者は特に表面欠陥を探知しその特性をとらえるのに適し, 後者は内部欠陥の探知に適している³¹⁾。

SLAM 技法は, 少くとも研磨した炭化珪素であれば模擬表面き裂や気孔を探知することができ, 表面と内部の欠陥を探知する技法として大変有望である³¹⁾。

X-Ray 技法は, 150 μ m 以上の内部欠陥を探知できる³²⁾。

以上の NDE の現状からわかるように, 従来の NDE に比較して欠陥の検出能力が高く, セラミックスの微小欠陥を探知する NDE の確立の可能性は十分あるといえる。しかし, このためには³¹⁾, 欠陥の検出能力をさらに高めるとともに, 各種欠陥に対する検出限界の定量化を行う必要がある。また, NDE によって得られた物理的情報から欠陥の大きさやその他の特性を決定する方法を確立するとともに, 複雑な形状部品への NDE の適用技術を開発する必要がある。さらに, 各種 NDE によって得られる欠陥に対する物理的情報の相互の関連性を明確にすることも課題である。なお, NDE の確立には, 一定寸法の欠陥を含む標準試験片の作製²²⁾という基本的課題も重要であろう。

5. 結 言

本論では、セラミックスを構造用材料として実用化するためには NDE の確立が重要課題の一つであることを体系だてて説明するとともに、セラミックスにおける NDE の研究・開発動向を述べた。NDE の確立は、本論で述べたような実際的问题を解決するとともに、材料強度に及ぼす微小欠陥の影響の解明等破壊力学の学問分野の発展においても重要な役割を果たすと考えられる。著者の浅学のため、本論において重要な事実の見落とし、取り上げた事柄の体系上における取扱いなど、問題があるかもしれないと考えている。今後、さらに検討を行いたい。

終わりに、本論をまとめるにあたり御助力をいただいた本学面高和光教授に深謝するとともに、ATDCCM の資料を御提示していただいた本学客員教授近藤政市東京工業大学名誉教授に謝意を表します。

付記：NDE を非破壊検出法²²⁾というのが一般的であるのかもしれないが、本論では非破壊検査法と称した。

参 考 文 献

- 1) 例えば、柴田・浅野, 内燃機関, 21-258 (1982), 64。
- 2) 上垣外, 自動車技術, 34-8 (1980), 811。
- 3) 味岡, NIKKEI MECHANICAL, (1981-9), 42。
- 4) 例えば、大橋, セラミックス, 17-1 (1982), 3; 奥田, 機械の研究, 33-4 (1981), 459。
- 5) 西田, 自動車技術会, 点火系およびセラミックに関するシンポジウム, (1982), 20。
- 6) 奥田, ファインセラミックス利用技術集成, (1982), 39, サイエンスフォーラム。
- 7) 浜野, セラミックス, 17-1 (1982), 39。
- 8) 古浜, セラミックス, 17-1 (1982), 32。
- 9) 阿部・川合, セラミックス, 17-1 (1982), 44。
- 10) 例えば、河村・山本, 自動車技術会, 点火系およびセラミックに関するシンポジウム (1982), 30; 奥田, 自動車技術, 35-8 (1981), 904。
- 11) C.D. Greskovich, ATDCCM, 17th Summary Report (1980), 254。
- 12) R.W. Davidge 著, 鈴木・井関訳, セラミックスの強度と破壊, (1982), 144, 共立出版株式会社。
- 13) R.B. Thompson & A. G. Evans, IEEE, Trans. SU-23 (1976), 292。
- 14) 松末・他 2 名, 窯業協会誌, 90-4 (1982), 168。
- 15) J.R. Hartley, Automotive Industries, (1982-2), 56。
- 16) D.O. Thompson, IEEE Trans. SU-23 (1976), 283。
- 17) 富士, 金属の割れ・破壊資料集, (1980), 343, 経営開発センター出版部。
- 18) 磯野, 非破壊検査, 30-12 (1981), 989。
- 19) 磯村, 金属の割れ・破壊資料集, (1980), 424, 経営開発センター出版部。
- 20) 例えば、伊藤・他 2 名, 材料, 30-337 (1981), 1019。
- 21) D.S. Kupperman, 他 3 名, Ceramic Bulletin, 59-8 (1980), 814。
- 22) 奥田・伊藤, 材料, 32-358 (1983), 823。

- 23) 例えば, 曾我, 機械の研究, 33-11 (1981), 1236。
- 24) J.J. Pouch, 他 4 名, J. Opt. Soc. Am., 70-5 (1980), 562。
- 25) 岩崎, 材料学会, 高強度高靱性セラミック材料の基礎と応用に関する講習会, (1983), 66。
- 26) 例えば, 岸, 金属の割れ・破壊資料集, (1980), 405, 経営開発センター出版部。
- 27) F.A. Rockwood, ATDCCM, 17th Summary Report, (1980), 192。
- 28) J.A. Byrd, ATDCCM, 19th Summary Report, (1982), 360。
- 29) R.B. Schulz, ATDCCM, 19th Summary Report, (1982), 383。
- 30) R.B. Schulz, ATDCCM, 17th Summary Report, (1980), 190。
- 31) P.W. Heitman & P.K. Khandelwal, ATDCCM, 18th Summary Report, (1981), 184。
- 32) M. Srinivasan & Roger Strom, ATDCCM, 18th Summary Report, (1981), 121。
- 33) 岩崎・泉, 材料, 30-337 (1981), 1044。
- 34) P.K. Khandelwal, 他 3 名, Ceramic Bulletin, 61-5 (1982), 586。
- 35) 小塚・他 2 名, 非破壊検査, 30-9 (1981), 692。
- 36) S.T. Klima, 他 3 名, ATDCCM, 19th Summary Report, (1982), 530。
- 37) K. Styhr, ATDCCM, 19th Summary Report, (1982), 386。
- 38) C.L. Quakenbush, 他 2 名, ATDCCM, 19th Summary Report, (1982), 424。
- 39) G.L. Boyd, 他 3 名, ATDCCM, 20th Summary Report, (1983), 189。
- 40) B.T. Khuri-Yakub, 他 2 名, J. Am. Ceram. Soc., 63-1 (1980), 65。
- 41) W.D. Pasco & C.D. Greskovich, ATDCCM, 20th Summary Report, (1983), 205。
- 42) 非破壊検査マニュアル編集委員会, 非破壊検査マニュアル, (1980), 13, 日本規格協会。