特 集

新しい非破壊検査手法

③ シンクロトロン放射光の非破壊検査への応用*

林 一 雄**

Application of Synchrotron Radiation to Non-destructive Inspection*

by Hayashi Kazuo**

キーワード：シンクロトロン放射光, X 線光音響法, X 線 CT, K 吸収
端差分法, X 線回折

1. はじめに

シンクロトロン放射光（以下放射光と称す）の非破壊検査への応用は、X 線源としての利用がほとんどある。通常の非破壊検査で利用される X 線領域での光源として利用は、1980 年代に始まり比較的最近のことである。また、放射光は、大規模システムであり、国内において X 線領域の光源として専用運転可能な施設は、数ヵ所と非常に少なく、まだまだ研究用システムという色彩が強いものである。

今回、非破壊検査への放射光の応用について解説を依頼されたが、筆者と放射光の接点は、放射光を利用した X 線 CT の開発のみであるので、その他の分野については文献データベースの検索結果ならびにいくつかの書籍¹⁻³⁾を参考資料として利用した。従って、解説が表層的な部分もあるかも知れないが、詳細については参考文献を参照していただくことでご容赦願いたい。なお、文献データベースからは、

（シンクロトロン放射光+シンクロトロン+放射光）*（検査+非破壊検査+非破壊）の検索式で 190 件の文献が出力されたが、ほとんどが破壊検査または、医学応用の文献であり、非破壊検査に関する文献は、X 線 CT 以外では数件しか見出されなかった。以下では、それらの中から比較的産業応用に近いものと X 線 CT への応用について紹介する。

2. 放射光とは¹⁻⁴⁾

(1) 特徴

高速の荷電粒子（電子、陽電子）が、磁場によって軌道が曲げられた時、その軌道の接線方向に放射

される鋭い指向性を持った電磁波が、放射光である。一般的な放射光のおもな装置構成は、1) 荷電粒子を発生し、高速度に加速する線形加速器、2) 1) で発生した高速荷電粒子に円形軌道を描かせる磁石と高周波加速空洞からなる電子蓄積リング、3) より高輝度な放射光を発生させる挿入光源、4) 発生した放射光を利用するためのビームライン、などである（図 1²⁾）。

放射光の際だった特徴は、著しい指向性、高輝度、広い帯域にある。指向性は、レーザに匹敵するほどであり、数ミリラジアンからコンマ数ミリラジアンである。輝度は、X 線管に比べ、3~4 倍程大きい。帯域は、可視光から X 線領域（数 1000~0.1 オングストローク）までの白色光である。このような特徴を示すため、ゲルマニウムやシリコンなどの単結晶のフラッグ反射を用いたモノクロメータによって輝度の高い単色 X 線を自由に波長選択して取り出すことが可能である。

(2) 応用

以上のような特徴を活かして表 1 に示す分野での

図 1 放射光施設の概略²⁾

*原稿受付 平成 6 年 12 月 5 日

**非会員 新日本製鐵(株) Non-member Nippon Steel Corp.

表1 シンクロトロン放射光の実験技術と応用分野¹⁾

	原子物理学	分子物理学	光化学	固体物理学	表面・界面・吸着	凝縮相構造	凝縮相・相転移	格子欠陥	核物理	化学	分子生物学	細胞生物学	医学(ハゲ・皮膚病)	工学(加工・検査)
分光吸収・反射	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
蛍光分析	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
EXAFS/XANES	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
光電子分光	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
光イオン分光	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
蛍光X線分析	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
メスbauer分光	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線非弾性散乱	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線回折・散乱	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線散乱散乱	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線小角散乱	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線トポグラフィ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線干渉	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線ラジオグラフィ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線マイクロスコピー	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X線リソグラフィ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

応用が研究されている¹⁾。この表からわかるように、ほとんどが、小型試験片を用いた材料評価にしか適用できない技術である。しかし、高輝度、広帯域を活かした微量元素の検出や構造解析などにおいて従来のX線管では出来なかった新たな製品・材料分析ツールとして欠かせないものとなっている。材料評価以外の応用としては、微細加工への応用があげられる。特に、国内においてX線リングラフィの半導体製造技術への応用研究が専用放射光源を用いて進められている。また、海外では、マイクロメカニクス用微小機械部品の製造技術としての利用も図られている。

一方、非破壊検査技術の検査対象を工業製品だけでなく、破壊することなく検査・分析するという利用方法の観点から応用分野を広く考えると、最も応用研究が進められているのが、医療分野である⁵⁻⁸⁾。特に、海外では人体での実験もすでになされた冠動脈造影法は、従来の方法では検出できなかった心臓の冠動脈の狭窄や閉塞を診断する優れた方法として注目されている。最も実用化が近く、X線リソグラフィ以外で専用設備としての建設が計画されている数少ない分野である。

産業応用では、X線回折やトポグラフィを用いて、半導体ウエハの品質評価、加工表面の損傷評価、などへの応用が報告されている。また、高分解能で組成分析の可能性が示されているX線CTも多く報告されている。従来のX線CTでは撮影困難な断層画像(CT画像)が得られている。

以下では、比較的製品レベルでの検査方法として適用可能性の高いX線回折トポグラフィ、X線光音

響法、X線CTについて紹介する。

3. X線回折

X線回折は、物質の構造や状態を調べる方法として非常にポピュラーな技術であり、X線管球を線源として測定方法の確立した技術である。基本的には、被検体にX線を入射し、被検体内部または表層で回折したX線を検出、評価することによって被検体の構造分析を行なう技術である。非破壊検査では、被検体表面の応力測定や加工歪み測定として利用されている。

放射光をX線源とすることによって次のような利点が得られる。1) 高輝度・広帯域により測定X線波長の選択が可能、2) 回折強度の向上による統計誤差低減による回折X線測定時間短縮、などである。

1) の利点を生かした例として、波長可変により被検体に対する浸入深さを変え、被検体表面から深さ方向の加工歪みの評価を試みた実験結果が赤木らによって報告されている⁹⁾。被検体はフェライトであり、従来法である化学エッチングとの比較を行なった結果比較的良く一致した結果が得られたと報告されている。

2) および3) の利点を生かした例としてX線トポグラフィによる各種材料の結晶性評価への応用が上げられる^{1-3,10)}。X線トポグラフィは、別名X線回折顕微鏡とも言われ、X線の回折斑点を詳細に観察することによって被検体の結晶欠陥を観察するものである。従来のX線管では、回折強度が小さいため写真撮影に長時間の露出が必要であり、動的観察ができなかった。これに対して放射光を用いることによってX線テレビによる動的観察や半導体の溶融過程観察なども可能にしている。

4. X線光音響法

非破壊検査技術の一つとして知られている光音響法において光源をX線としたものが、升島らによってX線光音響法として報告されている¹¹⁾。X線が被検体に照射されると、透過、回折、散乱、蛍光X線の発生などの物質と相互作用を生じるが、一部のエネルギーは吸収され、熱に変わる。この熱の発生を検出することによって、被検体表面近傍の状態を評価する方法である。装置構成を図2に示す。被検体は、気密の保たれたセル中に入れられる。そして、ウィンドウから放射光を被検体に照射し、その熱の発生によるセル中の気圧変化をPA(Phot Acoustic: 光音響)セル中に装着されたマイクロフォンで検出する。このとき、照射X線に単色X線を用い、

図2 X線光音響法の実験装置構成¹¹⁾

K吸収端付近でその波長を変化させるとEXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure: 広域X線吸収微細構造) のような構造情報が得られたと報告されている。これは、被検体が厚くて透過X線が十分に得られないような場合に非常に有効と言える。

また、薄膜の膜厚への応用や2次元イメージングへの検討も行っており、かなり有望な結果が得られている。

5. X線CT¹²⁻¹⁷⁾

単色X線を利用するX線CTのおもな特長は、1) 特定元素のCT画像を得ることが可能である、2) 高空間分解能のX線CTが実現できる、である。また、単色X線では、X線質量吸収係数を特定できるので、ビームハードニングの問題を原理的に回避することが出来、CT画像の濃淡から正確な密度を求めることが比較的容易であるという利点もある。このビームハードニングは、白色X線を利用した場合に生じ、X線の波長が短いものほど物質のX線質量吸収係数が小さくなるという波長依存性によるもので、被検体透過X線の平均波長が透過前の照射X線のそれよりも短くなる現象である。

特定元素のCT画像を得る原理を図3に示す。注目元素aのK吸収端前後でのX線質量吸収係数の変化 $\Delta\mu_1$ に比べ、他の元素bのX線質量吸収係数の変化 $\Delta\mu_2$ は、非常に小さい。そこで、それぞれの単色X線で撮影されたCT画像の差分をとると、元素a以外は、ほとんどキャンセルされる。結果としてCT画像の濃淡は、元素aの密度差のみを意味することになる。

高空間分解能なX線CTは、透視像を拡大することによって実現できる。白色X線の放射光から単色X線を取り出すときに非対称反射のブラッグ回折を利用することによって、透視像の拡大を行う。こ

図3 K吸収端差分法

図4 非対称反射

図5 装置構成図

の原理を図4に示す。非対称反射では、図中のように結晶表面に対して傾いているので、透視像を拡大することができ、高分解能なCT画像が得られる。この場合の拡大率Mは、次式で決定される。

$$M = \sin(\theta_B + \alpha) / \sin(\theta_B - \alpha)$$

基本的な透過型のX線CTの装置の構成を図5に示す。これは、筆者らが開発した装置の一例であり、モノクロメータ、被検体支持台、X線検出器、コンピュータからなる。放射光は、準平行光なので、CCDなどの2次元検出器の場合には、多断面のデータを一度に収集可能である。その結果、複雑な計算処理を必要とすることなく、それら多断面の再構成計算ができ、被検体の3次元画像を比較的容易に得ることが可能である。

図 6 ヨウ素での K 吸収端差分法

図 6 にヨウ素だけの CT 画像化を試みている例を示す。図 6 b, c は、ヨウ素の K 吸収端エネルギー 33.17 KeV の前後で CT 画像撮影行ったものである。b は、40 eV 高いエネルギーで、c は、40 eV 低いエネルギーで、それぞれ撮影したものである。図 6 d は、b と c の画像の差分処理した結果である。80 eV 程度のエネルギー変化では、ヨウ素以外の X 線吸収量はほとんど変化しないので、ヨウ素のみが明瞭に観察できている。

6. おわりに

放射光を利用した非破壊検査について概説した。放射光の設備は大規模であり、検査コストを考慮すると一般の非破壊検査としての利用は難しいのが現状である。そのため、ここで紹介したほとんどのものが研究段階であるか、あるいはその可能性を探索する段階であった。

しかしながら、医療への応用のように実用化が具体的に検討できつつあるものもあり、これらに対する専用の放射光施設の建設も計画されている。工業製品の非破壊検査は、このような専用設備に同居する形で研究開発を行なうことが、検査コストの低減と適用対象の拡大の一方法ではないかと考えられる。

放射光は、従来の X 線線源では得られない能力を

持っているで、今後の放射光科学の技術進歩ならびに応用分野の拡大などによる中小型の放射光装置の普及とともに、非破壊検査への放射光の利用が広まることを期待したい。

参考文献

- 1) 日本物理学会編：シンクロトロン放射，培風館 (1986)，1-18，112-131.
- 2) 富増多喜夫編著：シンクロトロン放射技術，工業調査会(1990)，15-29，511-529.
- 3) 高良和武監修：シンクロトロン放射利用技術，サイエンスフォーラム(1989)，13-34，289-299，373-383.
- 4) 中静：シンクロトロン放射光の特徴とその応用，電気評論，78-12 (1993)，24-32.
- 5) 豊福：放射光を用いた蛍光 X 線源とその応用，放射線医学物理，13-3 (1993)，273-280.
- 6) 中井，本間，下条：放射蛍光 X 線による体内微量元素分布の画像化，放射線医学物理，13-3 (1993)，290-299.
- 7) 武田，板井，秋貞：放射光を利用した冠状動脈造影の現状と展望，放射線医学物理，13-2 (1993)，155-161.
- 8) 宇山：放射光を利用した単色 X 線 CT，放射線医学物理，13-2 (1993)，162-168.
- 9) 赤木，石野，中嶋：(Mn, Zn) フェライトの加工歪評価，シャープ技報，39 (1988)，15-18.
- 10) J. M. Winter, R. E. Green: Characterization of Industrially Important Materials Using X-Ray Diffraction Imaging Methods, Nondestruct. Mater. Mater. (1989)，771-779.
- 11) 升島，河田，安藤：X 線光音響分光法の開発，放射光，1-3 (1988)，27-38.
- 12) L. Grodzins: Optimum Energies for X-ray Transmission Tomography of Small Samples. Application of Synchrotron Radiation to Computed Tomography I, Nucl. Instrum. Method, 206 (1983)，541-545.
- 13) L. Grodzins: Critical Absorption Tomography of Small Samples. Proposed Application of Synchrotron Radiation to Computed Tomography II, Nucl. Instrum. Method, 206 (1983)，547-552.
- 14) A. C. Thompson, J. Llacer, L. C. Finman, E. B. Hughes, J. N. Otis, S. Wilson and H. D. Zeman: Computed Tomography Using Synchrotron Radiation, Nucl. Instrum. Method, 222 (1984)，319-323.
- 15) P. Flannery, H. W. Deckman, W. G. Roberge and K. L. D' Amico: Three-dimensional X-ray Microtomography, Science, 237 (1987)，1439-1444.
- 16) T. Hirano, K. Usami and K. Sakamoto: High Resolution Monochromatic Tomography with X-ray Sensing Pickup Tube, Rev. Sci. Instrum., 60 (1989)，2482-2485.
- 17) Y. Nagata, H. Yamaji, K. Hayashi, K. Kawashima, K. Hyodo, H. Kawata and M. Ando: High Energy, High Resolution Monochromatic X-ray Computed Tomography System, Res Nondestruct Eval, 4 (1992)，55-78.