

放射光利用による材料・構造物中の非破壊的応力評価を目指して

Toward Nondestructive Evaluation of Stresses in Materials and Structures Using Synchrotron Radiation

残留応力と強度評価研究会

Residual Stress and Strength Evaluation Research Group

秋庭義明, 名古屋大学

Yoshiaki Akiniwa, Nagoya University

機械や構造物中に存在する残留応力は「隠れた力」ともいわれ、部材の破壊や疲労強度に大きな影響を持つばかりでなく、部材寸法の安定性をも左右する。また量子ビームを用いた非破壊応力測定法は、結晶格子をゲージ長さとして結晶による回折を利用してひずみを計測することから、原理的にはあらゆる結晶質材料に適用できる。この中で放射光は高輝度、エネルギー可変であり、特に SPring-8 においては 100keV 以上の高エネルギーをも利用することから、材料内部（～数 mm）の微小領域（～数 μm ）における内部ひずみ・応力を求めることができる。

本研究会は、SPring-8 を利用して材料・構造物中の内部応力・ひずみの高精度かつ非破壊的評価技術を確立し、新しい材料・構造の設計、品質保証技術の開発に展開することを目的として発足し、研究開発のみならず産業界における課題解決に供している。

1. 未解決の研究課題やめざましい成果が期待される研究分野開拓にどのような放射光利用が有望か、そのためにどのような高度化が必要かの考察・提言

構造部材の内部応力と強度評価に関する未解決の研究課題として次の四つの項目を挙げる事ができる。

A. 新素材および複雑形状要素の高精度応力測定技術の確立と高信頼性設計への展開

近年では、高強度・高機能な新素材開発に際して、ナノテクノロジーを駆使した組織制御や複合化技術がキーテクノロジーとなっており、材料内部の個々の構成相の応力状態が重要である。測定対象によって必要とされる放射光の特性は異なるため、任意の単色光や白色光の選択を可能とする柔軟性が必要である。これにより新素材の最適構成相の形態や、最適構造設計が可能となる。また、機械構造要素には複雑形状を有するものが多く、測定対象の三次元幾何学形状に対応した試料姿勢の数値制御とともに、それに対応した応力導出システムの開発が必要である。

B. マイクロ・ナノ領域および微小構造体のひずみ・応力計測技術の開発

環境負荷低減には、軽量化とともに高効率化が求められ、MEMS に代表されるような微小構造体の開発に期待が寄せられている。高信頼性を有する微小構造体を開発するためには、局所領域の微小部測定が不可欠である。そのためには、サブミクロンオーダーの集光が必要であり、さらには対象が単結晶になる場合が多いため、二次元検出器の活用が不可欠である。また産業界への普及のためにはハードウェアの開発のみならず、ユーザフレンドリーなひずみ解析ソフトの整備が必要である。

C. 材料・構造体中のイメージングと応力の同時計測技術の開発

部材の強度を決定する損傷破壊の起点は表面ばかりでなく材料内部のクラックや異種材料が問題となる場合がある。部材の強度特性とともにその破壊機構を明らかにするためには、材料内部の異相や欠陥等の幾何学的情報の把握と同時に、それに起因するひずみ集中の度合いを把握することが重要となる。微小欠陥の高精細マイクロ CT 技術および高精度ひずみ測定技術等、個々の要素技術は確立されつつあるが、これを有機的に融合したシステムへと展開することが実用技術として要求される。

D. 材料・構造の劣化・寿命評価手法の開発

実用部材の信頼性確保のためには、主要な損傷原因である疲労、腐食、環境温度等を勘案した損傷評価技術を確立することが要求される。従来は、オフラインによる評価がなされてきたが、高精度な特性評価のためにはオンライン計測が不可欠である。実用環境下でのその場評価システムの開発は、損傷劣化機構の解明や寿命予測技術の開発に直結する。

以上のように、入射 X 線に関しては、マイクロビームの利用が必要不可欠である。これは、前述したように破壊の起点が粒界、粒内など結晶学的なマイクロレベルであることや、近年の新素材が薄膜を筆頭にナノテクノロジーの活用によって生産され、その材料強度評価が要求されるためである。

マイクロビーム生成の従来技術として K-B ミラーやゾンプレートが用いられているが、これらによるビームは発散角が大きいため角度分解能が低く、ひずみの精度が低くなる問題がある。従って、これらに代わる高指向性を保持したマイクロビームの開発が切望される。マイクロビームの特性は、屈折コントラスト法によるイメージングとの融合においても直接的に影響するため高度化がもたらす影響は極めて大きい。一方、50keV 以上の高エネルギーにおける集光技術は特に必須であり、SPring-8 の特性を最大限に活かした応力測定を実施するためには、高品位なマイクロビームが必要である。

一方、アプリケーションに関しては、時間分解能に優れた二次元検出器が必要となる。マイクロビームを利用することで単結晶回折となるため、広い逆格子空間を一度に計測することが測定の効率化につながるとともに高精度ひずみ解析につながる。また、二次元検出器によって高空間分解能で内部ひずみを評価するためには、受光側のスリットシステムを開発する必要がある。さらに、時間分解能の向上は、測定時間の短縮にとどまらず実時間でその場観察測定に利用することができ、溶融凝固過程の解析も可能となる。さらに、実用部材の強度評価で最も重要なのが、実機が使用される環境を模擬した条件下での評価である。そのためには、負荷装置、腐食環境槽、高温炉や低温装置などの配備が必要であり、二次元検出器と組み合わせた高度化が望まれる。

2. 放射光の利用研究をさらに促進するに効果的な将来性のある設備や研究組織・制度についての提言

素材を対象とする産業界から見ると、放射光施設の敷居は非常に高いという声が多く、産業界の利用に対してよりアクセスしやすい環境を整備する必要がある。応力測定を切望するユーザの多くは民間企業であり、より迅速に対応できることが要求される。申請に際しては、研究として卓越した課題を要求されることは妥当であるが、産業利用面では製品の開発や問題解決が主であり、卓越した研究とは趣旨が異なる。さらに、実験そのものが

採択に左右されることは産業利用では過大なリスクがある。産業利用のために、計画的に実験が進められ、かつ迅速に実験が遂行できる体制が必要であり、そのためには応力測定専用の装置が必須である。つまり、専用のビームラインまたは応力専用のハッチを設置し、そこに装置とユーザを集約し、効率化を図ることが **SPring-8** で応力測定を展開するために必要である。特に現在応力測定は同じエネルギーレンジを使用してもマシンタイム争いなどを考え、いくつかのビームラインに割れているが、各ビームラインで装置、制御システムが異なっているために、それらを習得するのが一苦勞である。さらには、習得した知識、技術を他のメンバーに伝達することも困難であり、情報の共有にいたっていない。ユーザは効率よくデータの収集だけに専念できる体制を整えるためにも、応力測定専用の装置の導入が必要である。また、その利用については、現状の申請採択制に固執せずに随時申請を基本とすることによって調整し、計画的に進められる制度がふさわしい。

一方、本研究会の研究組織は、放射光測定を主としたメンバーに限らず、材料強度を専門とする日本機械学会や日本材料学会のメンバーから構成されているため、産業界における問題の抽出が容易であり、さらには放射光による研究成果を学会および産業界へ応用する体制が整っているが、応力測定の放射光における整備は海外の放射光施設に比べるとかなり遅れをとっている。**ESRF** などの専用ビームラインでは、航空会社をはじめとして自動車産業や **EU** の各種企業の利用がまさに流れ作業的に進められている。**SPring-8** の体制と比較すると隔絶の間がある。この解決には本研究会のみならず、**JASRI** をはじめ関係諸団体の協力が不可欠であり、放射光の産業利用の新たな展開に向けて、ご協力を切にお願いしたい。