



石川 哲也

理化学研究所放射光科学研究センター長

SPring-8 を活用した社会インフラ物性研究

1. はじめに

SPring-8 は兵庫県たつの市、佐用町、上郡町に跨る理化学研究所播磨キャンパスにある、電子加速器から強力な X 線を発生させて様々な分析に応用する放射光施設である。1997 年の運転開始以来、産官学の研究者によって利用されてきた。キャンパスの航空写真を図 1 に示すが、右側にある円形の建物が SPring-8 であり、周長 1436m、エネルギー 80 億電子ボルトの加速器から出る、主として X 線領域の光を 62 箇所に取り出し口から引き出して、様々な実験装置に導き利用する構造になっている。左側の直線状建物には SACLA という X 線レーザー施設が格納されている。2つの世界最先端施設を擁する理化学研究所播磨キャンパスは、世界の高エネルギー光科学研究の一大拠点となっている。

X 線自体は、波長の短い電磁波であり、ナノ構造の解析などに広く使われている。このため従来の主な用途はナノレベルの構造解析や、原子分子の深いエネルギーレベルの構造などを中心としていた。

一方で様々な分野でのイメージングにも応用されており非常に空間分解能の高い X 線 CT にも利用されており、學術利用、産業利用を問わず多くの目的に応用されている。

これまで、SPring-8 利用の多くは文部科学省傘下のアカデミアと、経済産業省が見ている産業界に限られてきたが、応用範囲は原理的にもっと広いはずであり、いままであまり利用されてこなかった農林水産分野や社会インフラ分野に広げていくべきであろうという議論は以前から存在した。一方で理化学研究所の中での議論として、SPring-8 が生み出す大量・良質データと理化学研究所神戸キャンパスにあるスーパーコンピュータ富岳を組みあわせて、新しい形での計算科学を展開し、未来予測が可能なサイエンス手法を確立したいというものがあつた。

そこで対象の一つとして着目したのが、複雑系の劣化・疲労・破壊のプロセスをナノレベルから解明することであり、将来的には「壊れることを予測し、設計す

る」科学技術的手法の創成を進めていきたいと考えている。そのような研究開発を進めるにあたり、ターゲットとなる領域の探索を進めたが、最終的な候補として先端半導体評価、全脳シナプス結合マッピング、および社会インフラ劣化評価の 3 点を選定し、それぞれ進めていくこととした。社会インフラの劣化・疲労・破壊を本当の意味で理解するためには、材料物性レベルからの研究が重要となる可能性が高く、その意味で放射光利用はこの分野の評価技術の将来を切り拓く可能性を持っている。

本稿ではまず放射光の歴史、特徴、近い将来予定されている高度化などについて、簡単に触れた後に、社会インフラ物性応用として現在進行中の道路舗装の劣化に関する研究を紹介し、さらに今後の計画として鉄道線路の劣化評価等についても紹介したい。

2. 放射光とは

放射光は、光速近くまで加速された荷電粒子の軌道が曲げられるときに、軌道の接線方向に放射される電磁波である。荷電粒子としては、殆どの場合電子が使われる。電子のエネルギーが数十億電子ボルトになると X 線領域の電磁波が出てくるが、X 線は波長がナノメートル以下になるので、原理的にナノメートル以下の物体が観察できる。

我国は放射光科学の先進国の一つであり 1970 年代から世界に伍してこの分野を牽引してきた。SPring-8 は 1990 年代に世界最大の放射光施設として企画され、1997 年に利用運転を始めた。以来昨年度までに 33 万人以上の利用者が利用している。近年、諸外国に SPring-8 を上回る性能を持つ放射光施設が建設されて、SPring-8 の競争力が低下するとともに、SPring-8 自体の老朽化が急速に進んできた。このため、SPring-8 を作り変えて、



図1 理化学研究所播磨キャンパス。右側の円形建屋がSPring-8。

現在より 100 倍輝度が高く、しかも電力消費量は半分になる SPring-8-II の建設が計画された。最初の概念設計書は 2014 年に完成したが、紆余曲折を経て 2024 年 12 月の補正予算で計画スタートが認められ、2029 年度に利用運転を再開するスケジュールで準備が進んでいる。2027 年夏までに必要な部品を全て製造し、2027 年夏から 2028 年秋まで運転を止めて加速器の入れ替えを行い、2029 年初から調整運転を行って 2029 年度に利用再開するのが現時点での予定である。

ナノメートル以下の波長を持つ X 線は、物質を構成する原子の並び方を定める X 線結晶構造解析等の手法に応用される。また、各原子は量子力学的にエネルギー準位が定まった電子軌道を持つため、一定のエネルギーの蛍光 X 線を放出する。これを利用すると、物質を構成する元素の分析ができる。またエネルギーを走査して物質の吸収率を測定する吸収分光法や、X 線を当てて出てくる光電子のエネルギーを分析する光電子スペクトル分析からは物質内の原子や分子の電子状態を知ることができ、例えば化学結合の様式を決定することが可能となる。

また、医療診断での X 線撮影と同じように物体の内部を透視して観察するイメージング手法も広く使われている。これも医療診断と同様に CT による断層撮影から、物体内部の 3 次元的な立体構造を得ることも行われている。インフラ物性応用の第一歩はこのような CT 観察をコア抜きした道路舗装面に適用することによって行われた。次節では、道路舗装面の劣化評価の簡単な例を紹介する。

3. 社会インフラ物性科学

社会インフラの劣化過程に関する点検・モニタリング、力学的劣化機構の解明、劣化現象の力学的・統計的モデル化などを含むアセットマネジメント技術は、過去 10 年間に長足の進歩を遂げてきた。しかし物性レベルでの劣化現象の発現やその進展メカニズムに関しての研究事例や実務的知見は極めて限られていた。これは社会インフラのような複雑系に対して、要素還元的アプローチは極めて困難だと考えられてきたためだと思われるが、近年の放射光などの観察手段の革新と

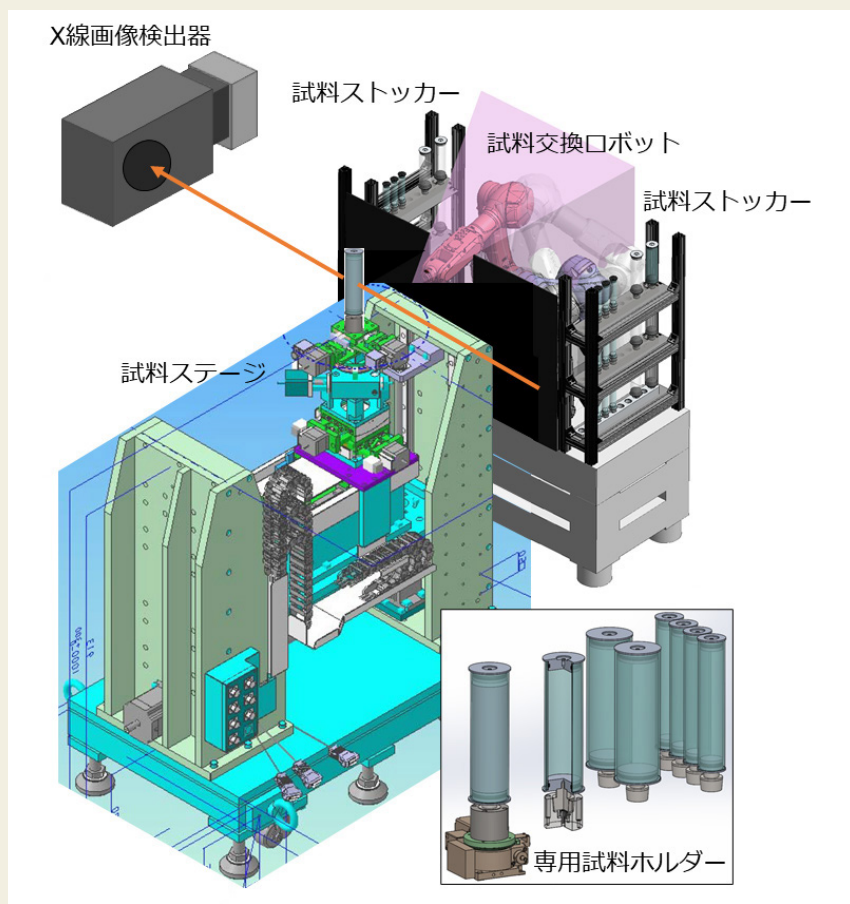


図2 SPring-8自動放射光X線CT装置

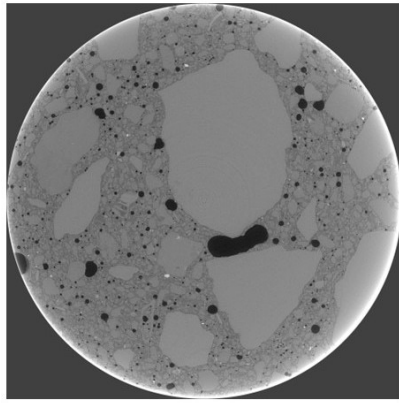
スーパーコンピュータによる解析能力の向上によって、いままで手付かずだった対象が解析可能な対象に変わりつつある。

放射光の立場から言うと、放射光とスーパーコンピュータを組み合わせたデータサイエンスベースの新しい対象評価手法の確立を模索していた時に、チャレンジングな対象として浮かび上がってきたものの一つが道路舗装だった。全国の道路からコア抜きした供試体を集め、使用年数、交通量、気象条件等のパラメータと劣化具合の相関を取ることで面白いサイエンスが展開できるに違いないと考え、小林潔司先生にご相談したところ、ご賛同いただきインフラ物性工学を真面目に始めましょうというところで意見の一致を見た。その後、仕事を進める中で工学より幅広い科学が必要ということになり、最近ではインフラ物性科学と称している。

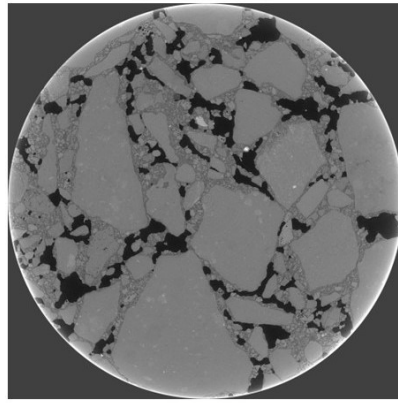
SPring-8 には、図 2 に示されるような自動放射光 X 線 CT 装置が整備されており、供試体を専用ホルダーに収納しておくことで自動的に CT 撮影、試料交換を

繰り返す。そこで撮影された阪神高速大阪湾岸線で 28 年間使い続けられたコンクリート舗装路面と、新品の舗装路面の X 線 CT 像を図 3 に示す。図中、黒く見える部分は空隙で、長年の使用によって 28 年物では空隙が増えていることが一目でわかる。例えば、似たような場所で 5 年、10 年、15 年、・・・と使用された舗装面を比較し、劣化の年次進行を計算機的に外挿していくことによって、将来予測が可能となろう。放射光 X 線による劣化評価の欠点は、供試体を放射光施設まで運ぶ必要があることだが、ある程度以上のデータ数が揃えば、時間軸も含むデジタルツイン創成が可能になると考えることができる。

CT データから 3 次元構造を再構成するためには、大きな計算機能力が必要であり、図 3 に示される構造再構成には、手元の計算機で週の単位での時間が必要になる。ところが、同じ計算をスーパーコンピュータ富岳で行うと、秒単位の計算時間で済んでしまう。CT データの取得には、一つ当たり数時間が必要で、富



新品



45.3mm
大阪湾岸線 28年物

図3 道路舗装コンクリートの劣化状況 (阪神高速(株)提供試料)

岳を利用する前は構造再構成のための計算時間が全体のスループットを律速していたが、富岳を利用するとCTデータ取得時間が全体の律速過程になる。

これを短縮するためには、X線光源強度を上げる必要があるが、SPring-8-IIになったときに、どの程度短縮できるかの検討が進められている。

4. 今後の展開

放射光を用いた社会インフラ物性研究は、漸く始まったばかりではあるが、今後鉄道レールの劣化過程、橋梁等鉄構造物の劣化、防錆塗料の問題、電気供給インフラ、上下水道管など、研究対象候補は数多く存在する。

それぞれに、X線CTだけでなく、X線回折、X線分光などの様々な手法を駆使して取り組んでいくことが求められるが、それらの最高峰の分析技術が一か所に集まっているのがSPring-8である。今後もインフラ物性分野の新しい応用展開がないか探求していきたい。

いしかわてつや / 国立研究開発法人理化学研究所放射光科学研究センター長。
1982年東京大学大学院修了(工博)、1983年国立高エネルギー物理学研究所助手。
1989年東京大学工学部助教授、1995年理化学研究所主任研究員。
2006年理化学研究所放射光科学研究センター長、現在に至る。