

## 話 題

## 北大 45 MeV 小型電子加速器を用いた最近の研究

鬼柳 善明\*・岩瀬 謙二・加美山 隆・古坂 道弘  
住吉 孝・西山 修輔・富岡 智・秋本 正

## Recent Researches Using the Low-Power Electron Linac at Hokkaido University

Yoshiaki KIYANAGI\*, Kenji IWASE, Takashi KAMIYAMA, Michihiro FURUSAKA,  
Takashi SUMIYOSHI, Shusuke NISHIYAMA, Satoshi TOMIOKA and Tadashi AKIMOTO

## Abstract

Hokkaido electron linac has been used actively for more than 30 years. Unique researches from the establishment are neutron science and pulse radiolysis. Many neutron moderators for accelerator based sources have been studied and the results contributed the design of high power sources such as J-PARC neutron source and SNS. Furthermore, many applications of neutrons have been recently in progress. Hokkaido linac also has been contributing to the development of the pulse radiolysis from the beginning of this field in Japan. Other researches of beam profile monitor, medical application, and parametric X-ray have been also performed. Here, we introduce the recent activity using the Hokkaido University electron linac.

## 1. はじめに

北大電子加速器は1973年にフルパワーのビームを発生して以来、大きなトラブルもなく順調に研究に使われてきている。最大加速エネルギーは45 MeV、最大パワー3 kWの小型加速器である。電子バースト幅が10 nsから3  $\mu$ sまで可変であること、繰り返しもシングルショットから200 Hzまで変えることが可能であり、非常にフレキシブルであることが、様々な研究に利用できる理由である。また、加速器パワーが小さいことが、実験装置をビームポート近くで設置・解体することを可能とし、実験エリアが広いことと相俟って実験の幅も広げることにつながっている。図1に加速器室の写真を示す。ビームポートは3箇所、右が冷中性子実験用、左は高速中性子実験用、中央はパルスラジオリス他種々の実験が行われている。

この加速器を利用した研究として、特にユニークなものは中性子科学に関する研究である。遅い中性子を発生する冷中性子源が設置されている小型加速器施設は、極最近までは北大だけであった。中性子源、中性子分光器、中性子光学素子開発や中性子利用実験が行われてきた。ここで開発された成果がKENSやJ-PARC中性子源に反映されている。さらにパルス中

性子を使ったラジオグラフィー等のイメージング、mfSANS（小型集束小角散乱装置）などの新しい試みが進められている。一方、パルスラジオリスについては日本の草分け的存在であり、また拠点の一つとしてこの分野の発展に寄与してきている。北大方式の



図1 北大電子加速器の3本のビームライン。右側のビームラインに冷中性子源が設置されている。

\* 北海道大学大学院工学研究科 量子理工学専攻  
(E-mail: kiyanagi@qe.eng.hokudai.ac.jp)

ビームモニターの開発, パラメトリック X 線に関する研究や医療分野への応用など新しい試みも行われている。ここでは, 北大で行われている最近の研究について紹介する。

## 2. 中性子科学

### 2.1 中性子透過分光法

原子炉, 飛行機や鉄道などの構造物に生じる亀裂や疲労破壊は大事故につながるだけに, それらの引き金となる構造物内部の情報を得る事は重要であると考えられる。材料がどれくらいの健全性や寿命を持つかを評価するためには, 材料内部に残っている残留応力の分布を捉えることが大切である。特に溶接の際に生じる溶接残留応力(引張り, 圧縮応力)は亀裂進展などの破壊メカニズムに影響を及ぼすことが知られている。中性子回折法は, 材料内部に発生する残留応力を非破壊で測定できる唯一の手段である。米国では空軍の航空機部品の腐食や欠陥を検査することを目的として空軍基地内に専用原子炉を建設し, 主要部品の中性子非破壊検査が行われている。近年, 中性子回折を利用した非破壊検査が盛んに行われている。

ここでは, パルス中性子を用いた透過分光法による非破壊検査<sup>1,2)</sup>について述べる。多結晶性の試料を透過したスペクトルは, Bragg edge と呼ばれる‘のこぎり歯状’の形を示す。Bragg edge は Bragg の法則によって生じ, 散乱角  $2\theta = 180^\circ$ ,  $\lambda = 2d_{hkl}$  を満たす。パルス中性子透過分光法の特徴は, 2次元位置敏感型の検出器<sup>3,4)</sup>を用いることによって, 歪み量の測定だけでなく, 組織変化や歪み部位を捉えることができることである。Bragg edge パターンの変化から, Fe 溶接材の溶接部, HAZ (熱影響部), 母材の各部位の特定を試みた。母材には鉄(純度 99%), 溶接棒は Fe 97.8%, C 0.09%, Si 0.73%, Mn 1.35%, P 0.009%, S 0.010% で構成されている JIS 規格品を用いた。溶接片の写真を図 2 に示す。最密原子面からの散乱(110 反射)に起因する Bragg edge (波長 4 Å 付近)を比べてみると, 図 3 に示すように, 溶接部付近を境にプロファイルが変化し, 中心付近から遠ざかるにつれて, edge がブロードに変化していくのがわかる。これは溶接の際の加熱温度, 冷却速度の違いによる各部位の組織の変化を表していると考えられる。Bragg edge プロファイルの変化から, No. 1~3, 11~13 は母材(幅 5.1 mm), No. 4~5, 9~10 は HAZ (幅 3.4 mm), No. 6~8 は溶接部(幅 5.1 mm)であると考えられる。パルス中性子透過分光法は部位の特定に有効であることがわかる。

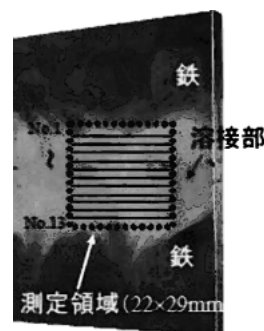


図 2 Fe 溶接材の写真。

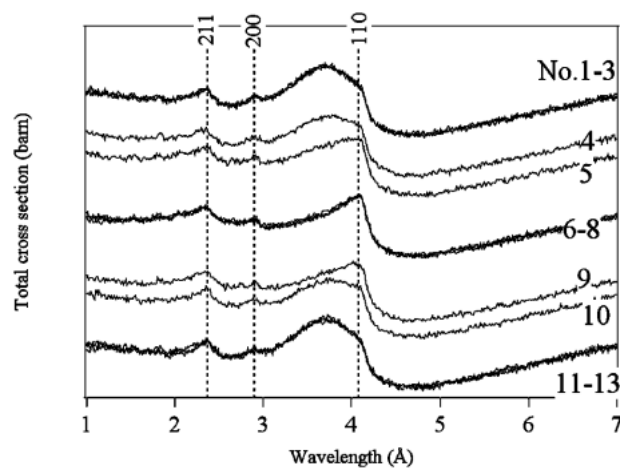


図 3 各層の Bragg edge パターン。

### 2.2 中性子共鳴吸収分光法

中性子共鳴吸収分光法 (N-RAS) は, 加速器を用いて発生させたパルス状中性子ビーム中に含まれる熱外中性子を利用して, 飛行時間法で中性子共鳴吸収スペクトルを得ることで, 測定対象物体内の核種やその温度(運動エネルギー)の分析を非破壊・非接触に分析する手法である。これは, 2006 年まで KEK と共同して, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のパルス中性子源 KENS を用いて, 中性子共鳴吸収分光器 DOG および EZO として開発を進めてきたが<sup>5)</sup>, KENS の停止により北大を範とする小型加速器中性子源を利用した分析システムとして新たな展開を図っている。

中性子の共鳴現象は物質の原子核の構造に大きく依存するため, 共鳴吸収の生じる中性子エネルギーは核種毎に異なる。このため, 物質中に共鳴吸収された中性子のエネルギーをパルス中性子源を用いて中性子飛行時間分析することで, 物質中の元素はもとよりその同位体までの同定が可能である(図 4)。さらに, 共鳴ピークの半値幅が原子の熱振動の激しさによって変

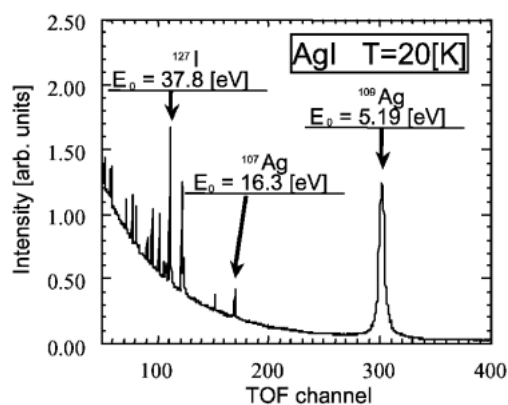


図4 KENSのDOGによる共鳴吸収スペクトルの例。



図6 Niコートされた3枚組の回転楕円体型収束ミラーの1枚。300 mm長さ、1/4円弧に対応したミラーである。

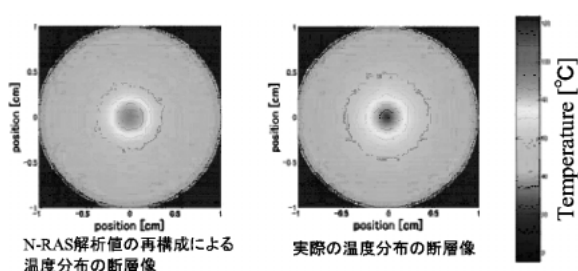


図5 N-RAS/CT法による温度分布測定例。測定対象はTaを均一に含む直径2 cmの円筒状試料。

化するという性質を利用すれば、それを分析することで物質中の特定元素の熱振動（運動エネルギー）に関する情報を得ることもできるという特徴がある。つまり、N-RASは物質中で核種毎にその置かれた位置の実効的な温度を測定することができる手法となる。また、共鳴吸収断面積は一般的な散乱断面積に比べて一桁以上大きい場合が多いため、小型加速器中性子源の応用に有望である。

この中性子共鳴吸収スペクトルの測定は一種の透過測定であるため、中性子スリットの移動や測定対象物体の回転と組み合わせることで、物体に関する実空間位置座標で分解した一連の部分スペクトルが得られる。我々は、この位置情報を併せ持つスペクトルをコンピュータ断層撮像（CT）の手法で再構成することにより、核種分布や温度分布のような物体断層内部の情報を非破壊・非接触で分析するN-RAS/CT法（図5）の開発を進めている<sup>6)</sup>。これはまったく新しい中性子イメージングの手法であり、実験・シミュレーションの両面から様々な評価を行っている。

### 2.3 小型集束型中性子小角散乱装置（mfSANS）の開発

集束ミラーで小型化した、飛行時間測定型中性子

小角散乱装置（mfSANS）による世界初のデータ取得を行ったので、それについて報告する。

mfSANSとは小型集束型中性子小角散乱装置（Mini-Focusing Small-Angle Neutron Scattering Instrument）の略である。中性子ビームを回転楕円体ミラーで集束し、通常は全長20～100 mにもなるSANS装置を2.5～4 m程度に小型化するとともに、計数率、運動量変化（Q）については汎用の装置と同程度になるようにしようというものである。トロイダルミラーを用いた巨大な小角散乱装置はすでにJülichで実現しているが、ビーム径の大きさが検出器上で10 mm程度である。それに対してmfSANSでは1 mm程度までビームを集束させることが出来る。

飛行時間法（TOF）とミラー集束の小角散乱装置を組み合わせることにより、通常原子炉における中性子散乱装置に比較し様々な利点が生まれる。装置の大きさを数分の1ないし1桁以上小型化でき、圧倒的に安く作ることが出来る。また、広い中性子波長領域を利用出来ることにより測定効率が大幅に向上する。従来はQ領域、あるいはQ分解能を変更するためにコリメータを変更する必要があるが、大げさな機構が必要であったが、集束型の装置では、入射側の焦点位置に設置されたコリメータの大きさを1 mmないし10 mmに変更することで、他に装置を移動することなく、簡単に分解能の変更が可能になる。

このような装置の原理検証を行うために、原理検証実験を行った。図6は回転楕円体型集束ミラーの写真である。また、図7にビームの集束の様子を示す。高エネルギー加速器研究機構の中性子科学実験施設（KENS）の1/100程度と非常に弱い中性子線源であるにも関わらず、通常の小角散乱装置でも測定が難しい、 $Q \approx 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$ までの測定が可能であることが示された（図8）。しかも、ダイレクトビームが測定出

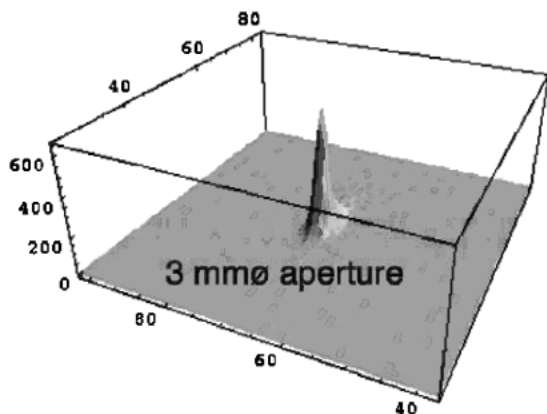


図7 3 mm 径のアパーチャーを用いたときの検出器面上でのダイレクトビームの形状.

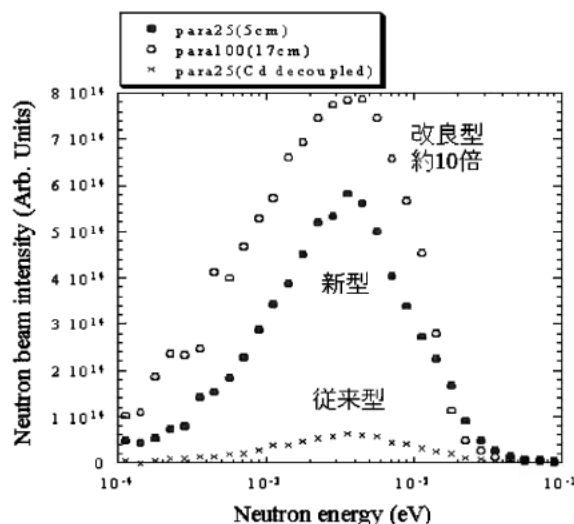


図9 J-PARC 中性子源のために開発された大強度液体水素冷中性子源の中性子エネルギースペクトル強度. 従来型のものに比べて約10倍の強度になる.

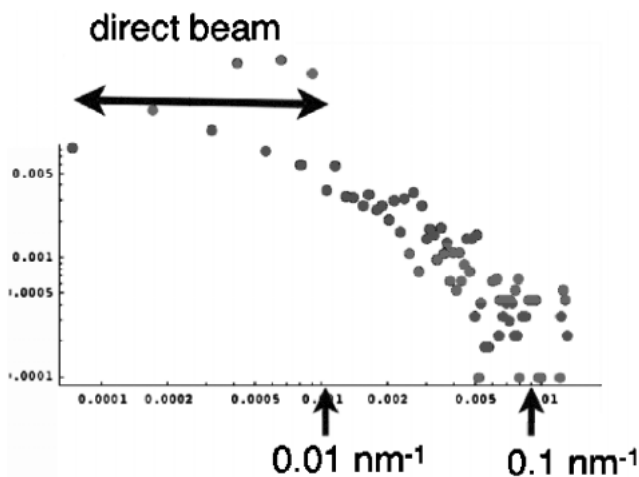


図8 鉄の20 nm 直径粉末からの小角散乱データの概算データ. 測定時間は約2時間である.

来ていることを含め、通常の SANS の装置での測定とは質的に異なった新しい測定法が可能になるなど、今後の測定法の工夫次第でまだまだ性能が上がりそうである。

これを発展させ、J-PARC のビームラインを分岐し、数十台の同様な装置を設置する計画を推進している。また、このような装置は小型の陽子加速器と組み合わせることで、更に多くの研究者の中性子散乱を行う機会を飛躍的に増大することができる。

## 2.4 加速器中性子源開発

物質研究用の加速器中性子源としては、大型の核破砕中性子源が主流となってきているが、発生中性子の大部分は蒸発中性子で、1-2 MeV にピークを持つスペクトルになっており、電子加速器で発生する中性子と同じである。そのため、電子加速器を用いて減速材開発の実験が可能である。最近の物質研究では遅い中

性子（冷中性子）の需要が多く、MeV で発生する中性子を使って、この遅い中性子を如何に効率よく作り出すかが問題である。パルス中性子の場合、エネルギー分析を飛行時間を測定することで行うため、所定のエネルギーの中性子が減速材から放出されるまでの時間、放出時間が短いことが一般的に重要である。短くすることによって、飛行時間誤差が減少するからである。ところが、放出時間を短くしようとすると減速材を小さくしなければならず、そうすると強度が減少するため、最適設計が容易ではない。小型加速器では、放射線損傷が小さいため温度が約 20 K の固体メタンが使用できる。この減速材は冷中性子強度も高いし、放出時間も他の減速材と比べると優れているということが北大実験で明らかにされていて<sup>7)</sup>、KENS では固体メタンが使われていた。ところが、J-PARC のような大型施設では使用できない。J-PARC 中性子源開発のために、非常に多くの実験とシミュレーション計算を行い、最終的に、現実的選択としては液体水素（超臨界水素）しか使えるものが無いということになった。ところが水素は、減速材特性としてはメタンと比べて極めて劣っていた。それで、従来のものに比べると放出時間が長くはなるが、強度は十倍位高くなる結合型液体水素減速材を開発した。さらに、パラ水素を使うことによって強度と放出時間特性を改善できることも示した。これが現在最高効率の冷中性子減速材であり、J-PARC では勿論アメリカの SNS でも使用されている。この減速材の中性子エネルギースペ

クトルの強度を従来型、このタイプのもの、さらにパラ水素を用いて改善したものの3種について図9に示す<sup>8,9)</sup>。他の減速材タイプとして、従来型の非結合型減速材も使用するが、それらの減速材においてもパラ水素を使うことによって、実質的な性能において固体メタンに近い性能を出せることを実験的に明らかにしている。

### 3. パルスラジオリシス

放射線照射により引き起こされる現象の解明に重要な役割を果たしてきたパルスラジオリシスでは、加速器から得られる電子線パルスの幅が短いほど放射線化学初期過程の高速現象の解明に有力な手法となる。北大の加速器から得られる10ナノ秒の電子線パルスを用いた装置<sup>10)</sup>に続いて、微細構造パルスとそれが空气中で発生するチェレンコフ光を分析光に利用したストロボスコープ法ピコ秒パルスラジオリシス装置<sup>11)</sup>が開発されて研究に用いられてきた。ナノ秒パルスラジオリシスは多くの有機系および水溶液系の初期過程の解明に77 K から 673 K の広い温度範囲で利用された。ピコ秒パルスラジオリシスは微細構造パルスを用いるという制約から照射後30 ps から 350 ps の現象の重ねあわせで観測が行われるので解析が複雑になるが、溶媒和電子やハロカーボン中の初期過程の解明に利用された。

ここでは、ナノ秒パルスラジオリシスとレーザーフラッシュフォトリシスを組み合わせたシステムを用いた最近の短寿命活性種の励起状態の反応ダイナミクスの研究例を紹介する。電子線・レーザー多重照射装置<sup>12)</sup>の概要を図10に示す。放射線源として45 MeV Sバンド線形電子線加速器（パルス幅：10-50 ns）、光

励起源としてNd:YAGレーザー（波長：355, 532 nm；パルス幅：6 ns）および窒素レーザー（337 nm, 6 ns）を用いた。

レーザー光は電子線（幅6 mm）に対し、逆方向から共軸に光学セルの電子線照射体積を照射する。キセノンランプからの分析光を電子線とレーザー光に直角に通し、過渡的吸収変化を分光器および光電子増倍管を用いてモニターした。

図11はキサンテン（XH）の電子線照射で生成するキサンテニルラジカル（X<sup>•</sup>）の種々の条件下における光化学反応を調べた結果を示している。レーザー照射によるブリーチは、アルゴン飽和下では不可逆的であるのに対し、空気飽和や酸素飽和条件下では可逆的であり、酸素濃度が高いほど回復速度が速くな

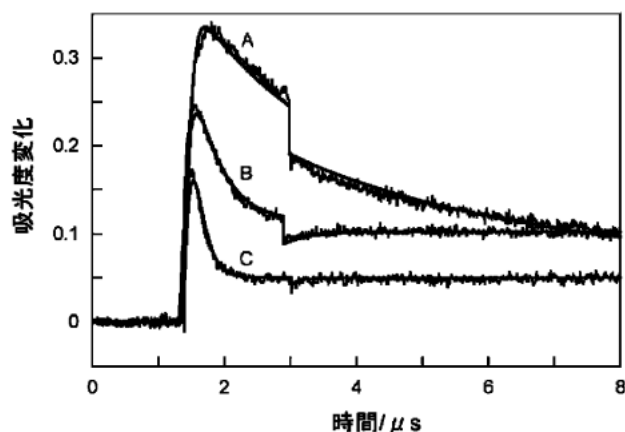


図11 キサンテンの電子線・レーザー多重照射に対する酸素の効果 ( $\lambda_{ex}=337\text{ nm}$ ,  $\lambda_{obsd}=348\text{ nm}$ )  
A: アルゴン飽和, B: 空気飽和, C: 酸素飽和 (文献13から許可転載)。

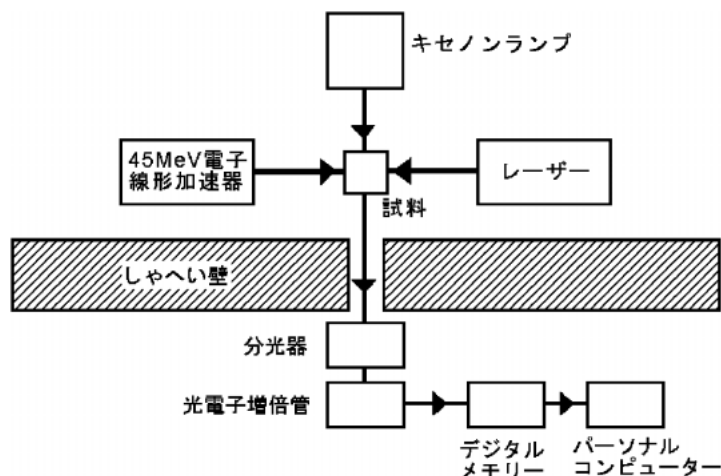
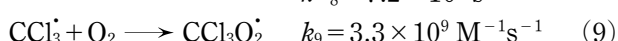
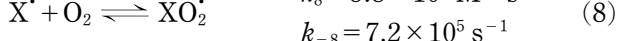
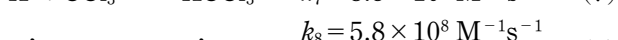
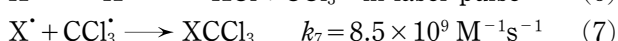
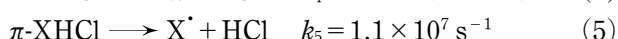
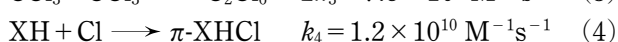
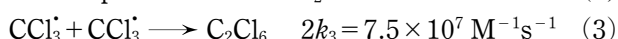
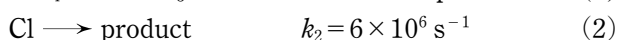
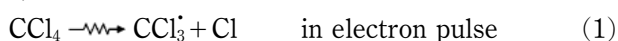


図10 パルスラジオリシス・レーザーフラッシュフォトリシス複合装置 (文献13から許可転載)。

る. 測定された長寿命成分のスペクトルは  $X^*$  のものと同一であることから, 過酸化ラジカル ( $XO_2^*$ ) と平衡になっている  $X^*$  が観測されていると考えられる. このような過酸化ラジカルと平衡にある  $X^*$  の光化学反応を明らかにするため, 起こりうる反応をすべて考慮して, 吸収線量, 溶質濃度, 酸素濃度などの実験条件を変化させたときのすべての動力学的トレースを再現するよう, ルンゲ・クッタ法により速度式を解析し, 最小自乗法により各素反応の速度定数を算出した. 考慮した反応式と得られた速度定数はスキーム 1 に示した<sup>14)</sup>.

#### スキーム 1



このような短寿命活性種の励起状態の反応ダイナミックスの研究をハロゲン原子の  $\pi$ -コンプレックスおよび  $\sigma$ -コンプレックスについても行い, 反応機構の詳細な情報を得るとともに, 溶媒, 温度, 置換基の効果などを明らかにすることに成功した<sup>15-17)</sup>.

#### 4. ビームプロファイルモニター開発

ビームプロファイルのプロファイルには, 進行方向に対する分布とビーム断面内の分布の二つの意味がある. 進行方向の分布には, さらに微細構造パルス (数十ピコ秒) に関する分布と, 複数微細構造パルスから構成されるマクロパルス (最大数マイクロ秒) の分布がある.

これまで, 微細構造パルスの時間分布についてはパルス幅を簡単に測定するために, ビームの進行方向と垂直な金属板をビームに直接当たらないように設置し, その反射電磁界とビーム自身に付随する電磁界との合成から, 時間的な情報を空間的な情報に変換し, それから微細構造パルス幅 (約 20 ps) を測定する技術を提案し, 実験と FDTD 法 (Finite Difference Time Domain 法) による解析結果から測定法の妥当性を確かめた<sup>18,19)</sup>.

空間的な分布の高時間分解能計測方法の一つとし

て, 遷移放射光 (OTR) を用いる方法が知られている. OTR スクリーンには一般に金属蒸着膜のように滑らかなスクリーンを用いられるが, この場合, OTR の指向性が強い計測装置の配置に制約が大きい. これは, 表面が粗い OTR スクリーンを用いることにより解決されることが, 実験により確認されている<sup>20)</sup>. 現在, この OTR スクリーンからの OTR の指向性の物理的なモデルを検討中である.

マクロパルスの単純な時間分布を求めることは, さほど難しいことではない. 我々のグループではこの断面プロファイルの時間変化測定を検討している. これは, ビームローディングが大きい場合にマクロパルスの先頭と後方で断面プロファイルが異なることが予想されるためである. この測定を目的として前述の OTR を用いて, シャッターリング時間 100 ns のカメラに遅延時間を変えながら複数のマクロパルスによる測定について報告しているが<sup>21)</sup>, この方法は, 全てのマクロパルスが同じプロファイルを持っていることが前提となる. 現在は, 一つのマクロパルスについての空間プロファイルの変化を計測するために, シャッターリング時間 10 ns, フレーム数 4, シャッターリング間隔, 数十ナノ秒程度の 4 駒高速度カメラを開発中である.

#### 5. 医療応用

近年盛んになっている医工連携の一環として, 北海道大学病院・医学研究科の放射線科と協力し, 医療応用に関する研究も行われている. もっとも, 工学研究用の加速器で発生できるビームは, 放射線治療に使われるビームとはエネルギーや電流量などが大きく異なることから, 培養細胞や小動物を対象とした基礎的な実験を行っている.

一例として, 微小領域に集中しているがん細胞の位置を検出し, その領域のみをマイクロビームで照射する 4 次元定位放射線治療の基礎研究がある. 現在行われている定位放射線治療では, 標的位置が固定されているか, 呼吸等で動く場合でも所定の位置にある場合のみに照射を行うようにして 1 mm 程度の位置精度で照射しているのに対し, 微小領域のがん細胞のみに対して照射するためにはさらに高精度で呼吸や拍動などで変動する標的位置を追跡して照射する必要がある. そのためには 10 ms 程度の応答速度で照射位置の位置決めを行わなければならないが, ガントリやステージの機械的移動よりも電気的なビームの偏向の方が良好な応答速度と精度を期待できる. 治療用ライナックはビームの位置決めをする偏向電磁石を持たな

いたため、工学部のライナックで実証実験を行い、区画された培養がん細胞に対して位置制御を行って電子ライナックで照射した結果、標的となった区画のみに照射の効果が現れていることを確認した。

## 6. パラメトリックエックス線の発生と利用

パラメトリック X 線放射 (Parametric X-ray Radiation: PXR) は、相対論的速度の荷電粒子が結晶に入射すると、入射電子の電磁場によって結晶の原子が分極し、その分極が回転・消滅する際に光子が生成され、媒質の結晶構造により干渉し、X 線回折におけるブラッグ条件を満たす角度方向に X 線の回折波が得られるものである。PXR は(1)単色性がきわめて良い。図 12 に示すように、(2)入射電子ビームに対する結晶面の角度を変えることで発生する X 線のエネルギーを連続的に変えることができる。(3)コヒーレントである。等の特徴がある。工学的には半導体物質などの結晶性の評価や X 線電子分光や X 線吸収微細構造分析など精密な物性や同定などへの利用、医学分野では X 線診断法としての利用、など多方面にわたる応用が期待できる。

PXR の研究は、近年本格的に始まり、北大では、45 MeV 電子線型加速器と Si 単結晶を用いて、 $^{55}\text{Fe}$  の 5.9 keV から  $^{241}\text{Am}$  の 59.54 keV までの間には適当な RI X 線源が無いことを踏まえ、7~30 keV の良質で波長連続可変の単色硬 X 線標準場を作製することを目的として研究を進めてきた。LINAC ビーム出口に 60~600  $\mu\text{m}$  の Si 単結晶を置き、適当な角度で

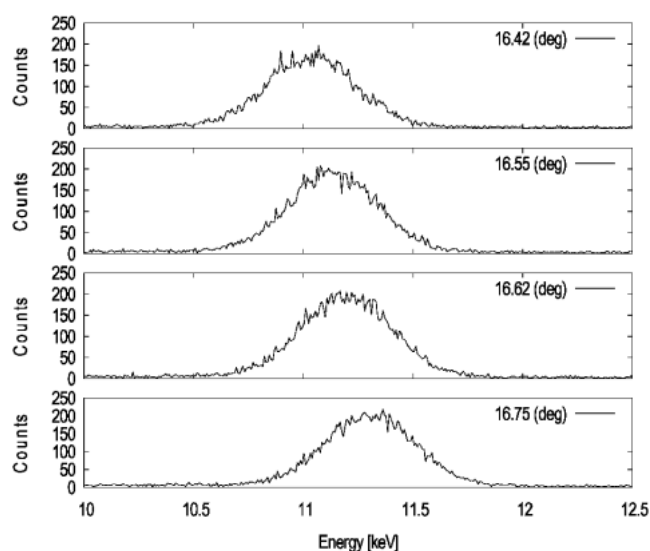


図12 結晶回転角を変えたときの PXR エネルギーの変化。

約 3 m の位置に Si-PIN フォトダイオード検出器を設置し実験を行っている。PXR の強度やエネルギー、エネルギーの拡がりなどは、LINAC の運転条件やターゲット結晶の種類、材質、結晶回転角、検出角、PXR の干渉面などにより変化する。PXR の強度・エネルギー広がり进行评估し、良質で波長連続可変の単色硬 X 線標準場の作製を検討している。強度は我々の実験条件では 45 MeV の電子で最大  $0.13 \mu\text{Gr}/\text{h}/12 \text{ nA}$  であるが、強度は電流量に比例して増加する。エネルギー幅 (半値幅) は 400 eV である<sup>22)</sup>。PXR の単色 X 線源としての利用と、標的結晶の評価への利用を目的に、半導体材料などの K 吸収端付近の質量減衰係数を測定してきた<sup>23,24)</sup>。

PXR は、電子加速器さえあれば、ビームライン上に結晶を置くだけで、手軽に単色性の良い X 線が得られ、放射光のような大型装置ではなく、小型の加速器で十分機能を発揮できるので、臨機応変の利用が可能である。また PXR の本質的な性質であるコヒーレント性を利用することにより、位相コントラスト法に適用できれば、吸収コントラスト法では難しい物体の観測が可能となり、医療分野への適用も期待できる。最近日大において「電子リニアックによる世界初の空間干渉 X 線源の実用化に成功」した報告もある。

## 7. おわりに

北大電子加速器はここで述べた研究の他に、中性子光学素子開発の一環としてパルス磁気レンズによる中性子集束、さらに医療用の加速器施設の遮蔽実験なども他機関と共同で行っている。当然、照射実験も可能である。共同利用施設としての正式位置づけができていないが、利用の申し出があれば外部の研究者も利用ができるようになっている。パルス中性子源として手軽に使用できる施設は、当面はここしかないという状況になっており、テストベンチとしての機能も果たす必要があると考えている。ある意味希少価値をもった施設であるので、今後も有用に使用していきたいし、外部ユーザーの利用も積極的にサポートしていきたい。

## 参考文献

- 1) Y. Kiyonagi, K. Mizukami, T. Kamiyama, F. Hiraga and H. Iwasa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A542, 316 (2005).
- 2) Y. Kiyonagi, T. Kamiyama, T. Nagata, F. Hiraga and S. Suzuki, Physica B 385-386, 930 (2006).
- 3) K. Mizukami, S. Sato, H. Sagehashi, S. Ohnuma, M. Ooi, H. Iwasa, F. Hiraga, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi, Nuclear Instruments and Methods in Physics

- Research A, Vol.529, 310 (2004).
- 4) K. Hirota, T. Shinohara, K. Ikeda *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys., **7**, 1836 (2005).
  - 5) K. Kaneko, T. Kamiyama, Y. Kiyanagi, T. Sakuma and S. Ikeda, J. Phys. Chem. Solids, **60**, 1499 (1999).
  - 6) T. Kamiyama, H. Noda, J. Ito, H. Iwasa, Y. Kiyanagi and S. Ikeda, J. Neutron Research, **13**, 97 (2005); T. Kamiyama, J. Ito, H. Noda, H. Iwasa, Y. Kiyanagi and S. Ikeda, Nucl. Instrum. and Methods A, **542**, 258 (2005).
  - 7) K. Inoue, N. Otomo, H. Iwasa and Y. Kiyanagi, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. **11**, 228 (1974).
  - 8) Y. Kiyanagi, N. Watanabe and H. Iwasa, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, **A312**, 561 (1992).
  - 9) Y. Kiyanagi, M. Ooi, H. Ogawa and M. Furusaka, J. Neutron Research, **11**, 3 (2003); M. Ooi, H. Ogawa, H. Iwasa and Y. Kiyanagi: Experimental studies of neutronic performance of a hydrogen moderator depending on para hydrogen concentrations, Proc. 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Germany, vol. **2**, 791 (2003).
  - 10) Y. Kondo, M. Aikawa, T. Sumiyoshi, M. Katayama and J. Kroh, J. Phys. Chem., **84**(20), 2544 (1980).
  - 11) T. Sumiyoshi, S. Sawamura, Y. Koshikawa and M. Katayama, Bull. Chem. Soc. Jpn., **55**(8), 2341 (1982).
  - 12) T. Sumiyoshi, M. Kawasaki and M. Katayama, Bull. Chem. Soc. Jpn., **66**(9), 2510 (1993).
  - 13) 住吉 孝, RADIOISOTOPES, **56**(4), 173 (2007).
  - 14) T. Sumiyoshi, S. Ueta, F. Wu and S. Sawamura, Radiat. Phys. Chem., **57**(2), 157 (2000).
  - 15) F. Wu, T. Shindo, S. Sawamura and T. Sumiyoshi, Bull. Chem. Soc. Jpn., **70**(8), 1839 (1997).
  - 16) T. Sumiyoshi, M. Nakayama, R. Fujiyoshi and S. Sawamura, Radiat. Phys. Chem., **75**(1), 20 (2006).
  - 17) T. Sumiyoshi, H. Minegishi, R. Fujiyoshi and S. Sawamura, Radiat. Phys. Chem., **75**(2), 195 (2006).
  - 18) 伊藤裕康, 加賀田誠, 西山修輔, 富岡 智, 榎戸武揚: 定在波測定を用いる電子ビーム微細構造パルス幅の計測, プラズマ・核融合学会誌, **74**(1), 29 (1998).
  - 19) S. Nisiyama, H. ITOH, S. Tomioka and T. Enoto, Numerical Analysis of the Electron Beam Micro-Pulses Width Measurement Method Using Standing Waves, Proc. of the 12<sup>th</sup> Symposium on Accelerator Science and Technology, 528 (1999).
  - 20) S. Nisiyama, S. Tomioka, T. Enoto and T. Shintake, Experimental study of OTR on uneven metallic surface, Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 477 (2005).
  - 21) T. Mogi, S. Nisiyama, S. Tomioka and T. Enoto, OTR profile measurement of a LINAC electron beam with portable ultra high-speed camera, Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 590 (2004).
  - 22) T. Akimoto, M. Tamura, F. Fujita, M. Narita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A, **459**, 78 (2001).
  - 23) M. Tamura, T. Akimoto, Y. Aoki, M. Narita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A, **484**, 642 (2002).
  - 24) T. Akimoto, T. Yoshida, R. Nakamura, et al., Rad. Phys. And Chem., **71**, 643 (2004).