

先端放射光を利用した超高速溶液反応ダイナミクスの研究 ～ MHz 繰り返しが可能にする高品質データ ～

野澤俊介

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

深谷 亮

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

足立伸一

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

■ 要旨

放射光のパルス性を活かしたポンプ・プローブ型の時間分解 X 線測定では、放射光の MHz オーダーの繰り返し周波数を、外部刺激の繰り返し周波数まで間引くために、微弱な X 線信号を計測の対象とする（いわゆる“photon hungry”な）測定手法には適用できないという難点がある。しかし、近年の周辺技術の進歩により、国内外の放射光施設において、MHz 繰り返しポンプ・プローブモードでの photon hungry な時間分解 X 線実験が、溶液反応ダイナミクス研究において実現している。本稿ではこのような物質ダイナミクス研究の国内外の状況について紹介する。

1. はじめに

放射光のパルス性を活かしたポンプ・プローブ型の時間分解 X 線測定法は、ここ約20数年の間に、より広範な放射光利用者のための測定手法へと、徐々に変化してきたように感じられる。その主な理由としては、国内外の放射光施設で、軟 X 線から硬 X 線までの幅広いエネルギー領域での時間分解 X 線実験が定常的に実施できる環境が整ってきたことに加えて、時間分解 X 線測定の対象となる試料が、気相分子に留まらず、固体表面、薄膜、粉末結晶、溶液試料、ソフトマター、タンパク質結晶など様々な広がっていることが挙げられる。また X 線自由電子レーザーの利用実験が本格的にスタートし、X 線領域では夢の実験であった、フェムト秒オーダーの時間分解実験が実現したことも要因の一つであろう。つまり、ここ約20数年の間に、放射光利用者にとって、時間分解 X 線実験の機会が広がり、より身近なものになってきたと言えるだろう。

時間分解 X 線実験が身近なものになってきた一方で、この手のパルス利用実験を実施する上で、いまだに障害の一つとなっているのは、繰り返し周波数の問題である。蓄積リングから放射されるのは MHz オーダーの X 線パルス列であるが、外場刺激の繰り返し周波数に合わせて放射光パルスを桁で間引くことによって、単位時間あたりの X 線光子数が桁落ちし、十分な信号強度を得ることができない。そのために、適用可能な試料が高い信号強度を与えるものに限定され、本当に適用したい系では信号強度が低いために適用できないといったことがしばしば起こる。

その典型的な例は、フェムト秒チタンサファイアレーザーと放射光を外部同期させる時間分解測定である。チタンサファイア再生増幅装置を用いる場合、その典型的な繰り返し周波数は数 kHz のオーダーとなる。一方、蓄積リングの周回周波数は数百 kHz から 1 MHz のオーダーなので、ここから数 kHz の X 線パルスを間引くと、単位時間あたりの入射光子数は 2~3 桁低下することになる。これは例えば、アンジュレタビームラインの通常モードでは入射光子数が 10^{12} フォトン/秒で実験が行えるにもかかわらず、時間分解実験モードになると入射光子数が $10^9 \sim 10^{10}$ フォトン/秒になり、偏向電磁石ビームライン並の入射光子数でしか実験を行うことができないという残念な状況になることを意味する。したがって、微弱な X 線信号を計測の対象とする（いわゆる“photon hungry”な）X 線分光法である EXAFS、X 線発光分光、共鳴非弾性 X 線散乱などの測定法において、ポンプ・プローブ型の時間分解 X 線測定を行うことは、以前は全く現実的ではなかった。しかしながら、近年の周辺技術の進歩により、この事情は変化しており、国内外の放射光施設において、MHz 繰り返し時間分解モードでの photon hungry 実験が実現している。本稿では、この状況について少し詳しく紹介したい。

2. 蓄積リング光源での MHz 繰り返し測定¹⁾

放射光のパルス間隔をなるべく広く空けて時間分解 X 線実験を行いたい場合、最もシンプルな運転モードはシン

グルバンチ運転モードである。核共鳴散乱や気相分子のコインシデンス実験など、放射光パルス間の時間間隔をなるべく広く取りたい実験の場合には、これまでシングルバンチ運転が好んで使用されてきた。しかし、シングルバンチ運転は蓄積電流の上限が低く、また1カ所のバケットに多くの電子を蓄積することにより、加速器コンポーネントへ悪影響が懸念されることから、世界的にも一部の放射光施設を除いて、シングルバンチ運転を定常的に実施する施設は限られてきている。

シングルバンチ運転に代わるパルス利用実験用の運転モードとして多くの施設で設定されたのが、ハイブリッド運転（孤立バンチとマルチバンチを組み合わせた運転モード）である。この場合、孤立バンチのタイミングに合わせて外場刺激を試料に印加し、孤立バンチからの信号のみ選

択的に計測する仕組みを計測システムに組み込むことにより時間分解計測を実現する。トータルの蓄積電流の上限はマルチバンチ側の蓄積電流値で決まるため、シングルバンチ運転のような蓄積電流の上限の問題は生じない。ただし、1カ所のバケットに蓄積できる電子数には限界があるので、時間分解測定で得られる信号強度が孤立バンチの電流値で決まるのは、シングルバンチ運転の場合と同様である。さらに、ハイブリッド運転では、孤立バンチからの信号を時間的に切り出すという別の手間が発生する。例えば、孤立バンチからのX線をハード的に切り出すための回転式シャッターを利用したり、検出系の側にゲート信号をかけて、あるタイミングの同期信号だけを取り出して積分するといったシステム上の工夫が必要となる。

では、等間隔に配置された複数のバケットに電子を蓄積

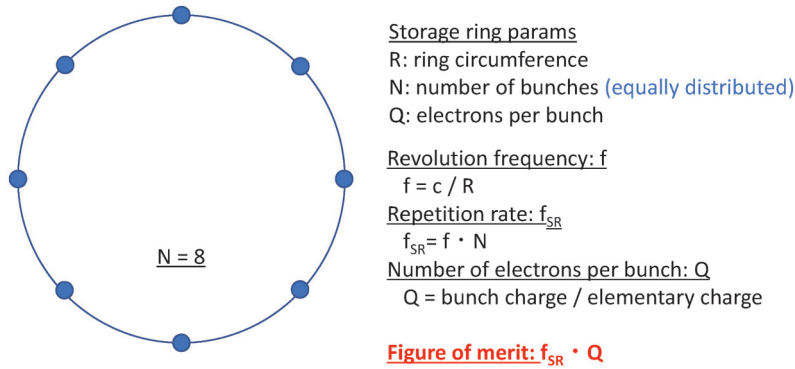


Fig. 1 (Color online) Parameters for characterizing pump-probe X-ray experiments at multi-MHz repetition rate.

Table 1 Overview of the electron bunch filling patterns at selected SR facilities together with their corresponding bunch charges.

| Synchrotron/ filling pattern | Revolution frequency, f (MHz) | Rep. Rate, f_{SR} (MHz) | Electrons/bunch, Q ($10^{10} e^-$) | $f_{SR} \times Q$ ($10^{16} e^-/s$) |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|---|--|
| APS / 24-bunch | 0.272 | 6.5 | 9.8 | 63.7 |
| PETRA III / 40-bunch | 0.130 | 5.2 | 12 | 62.4 |
| SPring-8 / 203-bunch | 0.209 | 42.4 | 1.47 | 62.4 |
| ESRF / 16-bunch | 0.355 | 5.7 | 9.9 | 56.2 |
| Soleil / 8-bunch | 0.850 | 6.8 | 7.4 | 49.9 |
| KEK PF-AR / 1-bunch | 0.794 | 0.794 | 47.1 | 37.4 |
| KEK PF / hybrid mode | 1.6 | 1.6 | 19.5 | 31.2 |
| ESRF / 4-bunch | 0.355 | 1.42 | 17.6 | 25.0 |
| ALS / 2-bunch | 1.5 | 3.0 | 7.1 | 21.3 |
| APS / hybrid mode | 0.272 | 0.272 | 37 | 10.1 |
| SPring-8 / H-mode | 0.209 | 0.209 | 4.0 | 0.84 |

した運転モード（等間隔孤立バンチ運転モード）はどうだろうか（Fig. 1）。この場合の放射光パルスが出射する繰り返し周波数は、周囲周波数 f と蓄積されたバケットの数 N の積 ($f \times N$) となり、数 MHz のオーダーに設定されることが多い。トータル蓄積電流の上限は孤立バンチの蓄積電流値の総和で決まり、かつ、すべての孤立バンチからの放射光をいれなく時間分解測定に使用することにすれば、入射X線光子を間引くことなく実験に使うことができる。先ほどの例で言えば、アンジュレータビームラインの時間分解実験モードであっても、通常モードと全く同じ入射光子数を使えることから、たとえ photon hungry な実験であっても時間分解実験モードで無理なく実施できる訳である。このような運転モードとしては、Advanced Photon Source の24バンチモード（繰り返し周波数6.5 MHz）や PETRA III の40バンチモード（5.2 MHz）、ERSF の16バンチモード（5.7 MHz）などがある。SPring-8 の203バンチモードを等間隔孤立バンチ運転モードとして利用すると、42.4 MHz の超高繰り返しでの利用が可能である。国内外の放射光施設の様々な運転モードを Table 1 にまとめる¹⁾。

これらの等間隔孤立バンチ運転モードを時間分解 X 線実験に活かすためには、外場刺激の繰り返し周波数も数 MHz オーダーとする必要がある。例えば、試料に高周波電場を印加する場合には、数 MHz の繰り返し周波数を比較的簡単に実現できそうである。外場刺激としてよく用いられるパルスレーザーの場合も、最近のレーザー技術の進歩により、MHz オーダーでの繰り返し実験が実現できる。上述のフェムト秒チタンサファイア再生増幅装置では、数 kHz の繰り返しで、1パルスあたりのエネルギー数 mJ、平均出力数 W といった仕様が一般的であるが、希土類元素を添加した光ファイバーをレーザー媒質として使用するフェムト秒ファイバーレーザーでは、さらなる高繰り返し周波数と高出力を実現できる。ファイバーレーザーの特長としては、光ファイバ内で効率良くレーザー増幅ができる、小型軽量で設置性に優れている、半導体レーザーを励起光源として使っており高出力を実現できるといったメリットがあり、加工用レーザーとして産業界でも広く利用されている。産業界で使用されている加工用ファイバーレーザーとしては平均出力 kW クラスの製品が市販されているが、放射光実験用にはそこまでの出力は不要（かつ高出力すぎて実験に用いるには危険）なので、我々のグループでは、波長1030 nm で、最大平均出力20 W、最大繰り返し周波数40 MHz、最大パルスエネルギー0.1 mJ 程度のフェムト秒ファイバーレーザー（Amplitude Systems 社の Tangerine）を使用している。また、最近のフェムト秒固体レーザーにおいても小型化、高繰り返し、高出力化が進んでおり、例えば、Yb : KGW 結晶をレーザー媒質とし、波長1028 nm で、最大平均出力20 W、最大繰り返し周波数1 MHz、最大パルスエネルギー0.2 mJ 程度の高出力フェムト秒レーザー（Light Conversion 社の

Pharos）は実験室でのポンプ・プローブ実験でも広く使用されている。我々のグループでは、実験の用途に合わせて、チタンサファイア再生増幅装置だけでなく、上記の Tangerine や Pharos を併用して時間分解 X 線実験を行っている。

容易に想像されるように、MHz オーダー高繰り返しの高出力レーザーを用いる実験では、レーザー光による試料の加熱・損傷が懸念される。実際のところ、平均出力20 W のレーザーを用いた実験は、時間分解実験を行なっているというよりは、むしろレーザー加工を行っているような光景になる。したがって、MHz オーダーの高繰り返し測定は、全ての試料に適用できるわけではないことは言うまでもない。様々な試料の中でも、特に固体試料の場合には、常に同じ位置に励起光を照射することになるので、試料のレーザー加熱による損傷には十分に配慮する必要がある。一方で、溶液試料は、高繰り返し測定が比較的適用しやすい実験系である。なぜなら、我々の溶液実験のセットアップでは、溶液試料をポンプで循環させながら実験を行うため、パルスレーザー光と X 線パルスが試料に入射した後、次のパルスが到達する1~数マイクロ秒程度の間に試料が照射位置から移動し、照射位置には常にフレッシュな試料が供給されるからである。そのため、励起光照射による試料の不可逆的なダメージの蓄積が十分無視できる場合には、比較的安定に MHz オーダー繰り返しの測定を行うことができる。具体的な測定例を次節で紹介する。

3. 蓄積リング光源での測定例

ここでは、Advanced Photon Source（7ID-D）と、KEK の PF-AR（NW14A）での測定事例を紹介する^{2,3)}。APS の事例では、2価の鉄ターピリジン錯体 $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$ （Fig. 2a）の溶液を試料として、可視部のパルスレーザー光（波長532 nm）で励起された鉄錯体の鉄原子のスピンの配置（ d^6 ）が、ナノ秒オーダーで低スピンから高スピンに過渡的に転移する過程を時間分解モードで測定した実験の例である（Fig. 2b）²⁾。鉄2価錯体におい

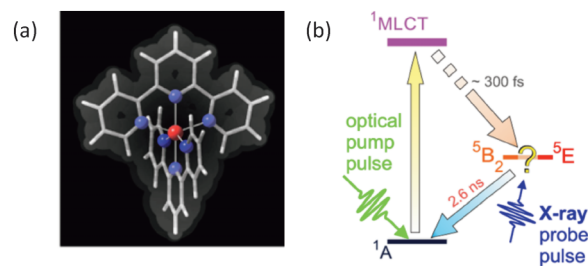


Fig. 2 (Color online) (a) The molecular structure of $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$, and (b) the energy diagram of ground ($1A$), $1MLCT$, and quintet high spin ($5B_2$ or $5E$) states. Reproduced from Vanko et al. *J. Phys. Chem. C* (2015).

て、六つの配位座を占める配位子がビピリジン (bipyridine) やフェナンスロリン (phenanthroline) 分子のような2座配位子が3個 ($2 \times 3 = 6$) の場合には、配位子場が正八面体対称 (O_h) となり、中間状態である高スピン状態の電子配置は 5T_2 となることが知られている。これに対して、3座配位子のターピリジン (terpyridine) 分子が2つが配位子の場合 ($3 \times 2 = 6$) には、配位子場が軸方向に歪んで、対称性が低下することにより、高スピン状態の電子配置の縮退が解ける。そこで、この錯体 $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$ の中間状態である高スピン状態の電子配置 ($^5B^2$ または 5E) を実験的に決定するというのが、この報告例での実験の動機となっている。

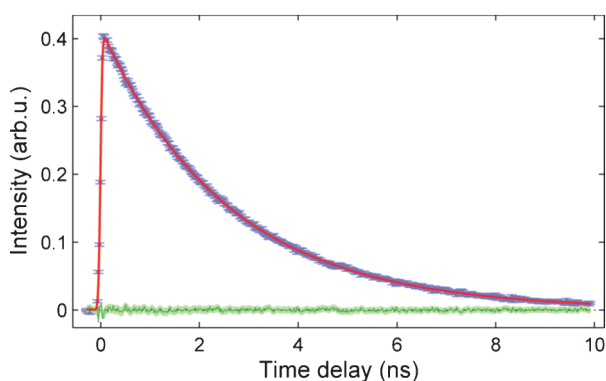


Fig. 3 (Color online) Time evolution of the intensity of the 7125 eV (B) feature of the $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$ XANES spectrum (Figure 4a), reflecting a quintet lifetime of $\tau_{\text{HS}} = 2.61 \pm 0.01$ ns. Reproduced from Vanko et al. *J. Phys. Chem. C* (2015).

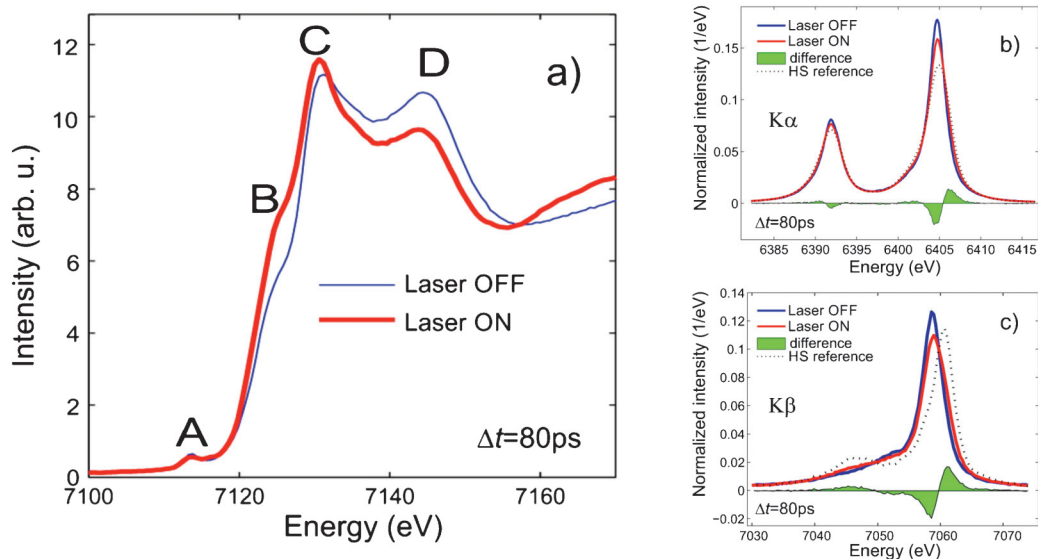


Fig. 4 (Color online) (a) Fe K-edge XANES, (b) $K\alpha$, and (c) $K\beta$ X-ray emission spectra of an aqueous solution of $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$, with (red line) and without (blue line) laser excitation, with a time delay $\Delta t = 80$ ps for the laser-excited data. The evolution of the intensity of the B and D features, as well as the changes in the emission lines, are the signature of a change from the LS to HS configuration. Reproduced from Vanko et al. *J. Phys. Chem. C* (2015).

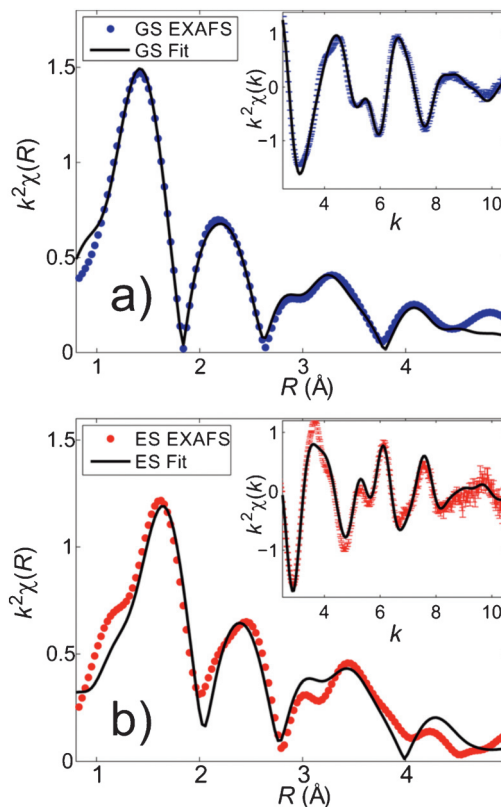


Fig. 5 (Color online) (a) EXAFS of $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$ in the ground state; the fitted bond lengths are $R(\text{Fe}-\text{N}_{\text{ax}}) = 1.874 \pm 0.004$ Å and $R(\text{Fe}-\text{N}_{\text{eq}}) = 1.969 \pm 0.004$ Å. (b) EXAFS spectrum of the photoexcited quintet state of $[\text{Fe}(\text{terpy})_2]^{2+}$; the fitted bond lengths are $R(\text{Fe}-\text{N}_{\text{ax}}) = 2.08 \pm 0.02$ Å and $R(\text{Fe}-\text{N}_{\text{eq}}) = 2.20 \pm 0.01$ Å. Reproduced from Vanko et al. *J. Phys. Chem. C* (2015).

APSのビームライン7ID-Dでは、APSの24バンチモード(6.52 MHz繰り返し)を利用し、励起レーザーには3.26 MHz繰り返しのピコ秒固体レーザーDuetto(Time-Bandwidth社)が使用された。レーザーの繰り返し周波数を放射光の繰り返しの1/2に設定しているのは、励起直後の状態の信号と、励起されていない状態の信号を交互に測定し、その差分をとることによって、放射光およびレーザーの長時間にわたる強度変動の影響を軽減することが目的である。

実験では、2.61 nsの寿命を持つ高スピン中間状態に対して(Fig. 3)、蛍光XANES(Fig. 4a)から始めて、発光分光(Fe K α およびK β)(Fig. 4b, c)、Fe-K EXAFS(Fig. 5)、X線溶液散乱およびFe 1s2p共鳴X線非弾性散乱(RIXS)(Fig. 6)を時間分解モードで計測している。これらの実験データを理論計算から予測される理論値と比較することで、最終的に、鉄2価錯体[Fe(terpy) $_2$] $^{2+}$ の中間状態である高スピン状態の電子配置は 5E であると結

論づけている。K α およびK β 発光分光、EXAFS、Fe 1s2p RIXSは、いずれもphoton hungryな実験であり、MHz繰り返しの実験配置を採用することで、初めてこのようなピコ秒オーダーの時間分解測定の対象になったと言える。

KEKのPF-R(NW14A)では、時間分解蛍光XAFS法により、金属錯体や半導体光触媒等の励起状態の電子状態と構造の計測を行なっている³⁻⁶⁾。特にPF-ARにおけるMHz繰り返し測定として、2価のルテニウムビピリジン錯体[Ru(bpy) $_3$] $^{2+}$ 錯体の溶液を試料に用いて実験を紹介する³⁾。このRu錯体は光増感材としてよく知られているが、可視部のパルスレーザー光で励起されると、三重項MLCT中間状態を経て、ナノ秒~マイクロ秒オーダーで基底状態へと緩和することが知られており、この緩和過程におけるX線吸収スペクトルの変化を時間分解モードで測定した。PF-ARのシングルバンチモードは、0.794 MHz繰り返しであり、励起レーザーには0.397 MHz繰り返し

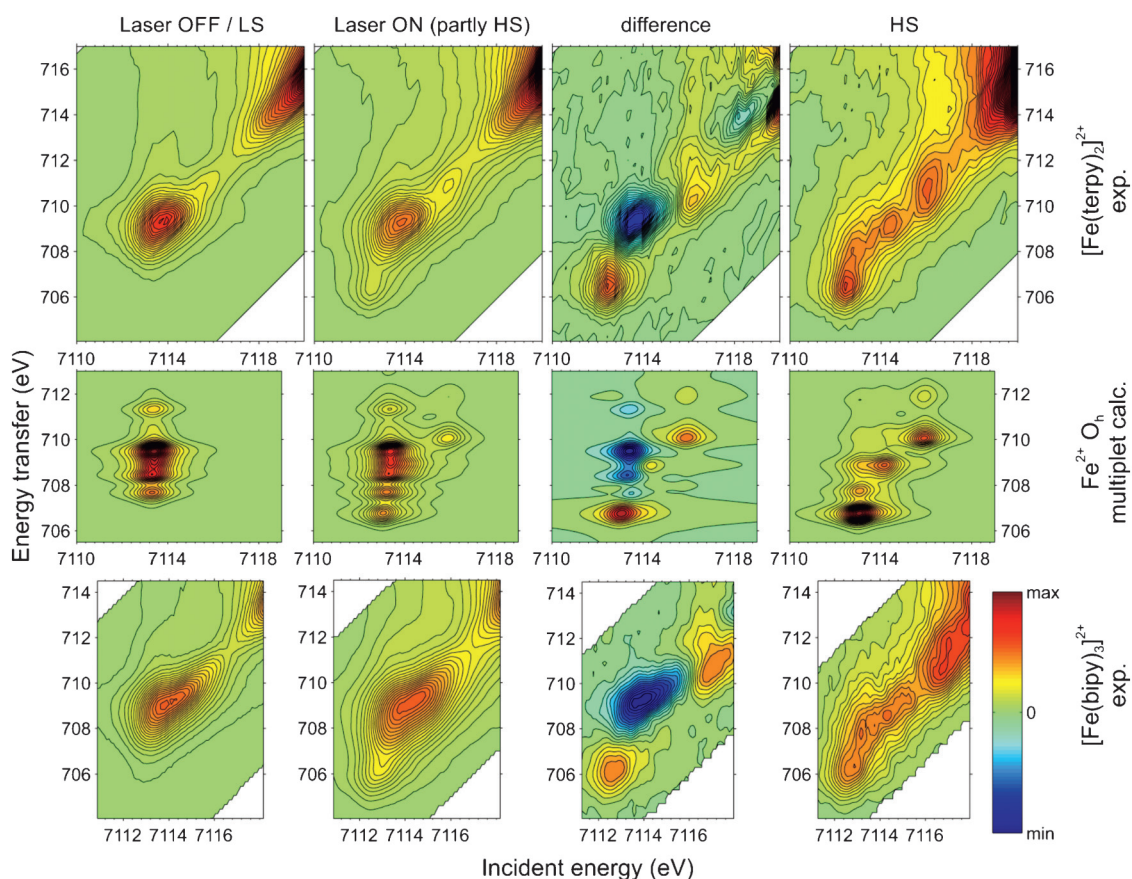


Fig. 6 (Color online) Experimental Fe 1s2p RIXS spectra, from aqueous solutions of [Fe(terpy) $_2$] $^{2+}$ (top row) and [Fe(bipy) $_3$] $^{2+}$ (bottom row), showing the ground state, the laser-excited state at 80 ps time delay, their difference, and the reconstructed HS spectra. The theoretical spectra (middle row) were obtained from ligand-field multiplet calculations in an approximate O_h local symmetry, and there the “Laser ON (partly HS)” panel was constructed by the superposition of 40% HS and 60% LS. The spectral intensity is plotted above the plane spanned by the incident energy and the difference between the incident and emitted energy, the energy transfer. The energy scaling is equal for both axes and identical for all the plots in order to aid the comparison. Reproduced from Vanko et al. J. Phys. Chem. C (2015).

返しのフェムト秒ファイバーレーザー (Amplitude Systems 社の Tangerine) を使用している。この測定も上記と同じ理由でレーザーの繰り返し周波数を放射光の繰り返し周波数の 1/2 に設定している。

Fig. 7 は、Ru-K XANES の基底状態スペクトル、および励起状態と基底状態の差分スペクトルを、繰り返し周波数 1 kHz で測定した場合と、400 kHz で測定した場合で比較したものである。同じ積算時間 (15 分) で比較すると、XANES スペクトルの S/N 比の違いは明白であり、繰り返し周波数が、測定精度の向上に大きく貢献していることがわかる。また、同じ試料について、Ru-K EXAFS を測定した例を Fig. 8 に示す。こちらも繰り返し周波数 1 kHz と 400 kHz で測定した例を比較しているが、1 kHz 測定と比較して、400 kHz 繰り返しによるデータの S/N 比の改善は極めて劇的であり、また測定時間の短縮にも大きく貢献することがわかる。

4. X線自由電子レーザー光源での MHz 繰り返し測定

従来の常伝導加速空洞を利用した SASE 型 X 線自由電子レーザー光源の繰り返し周波数は 10–100 Hz のオーダーであるが、近年、超伝導加速空洞を利用した欧州の European XFEL においてバーストモードながら MHz の繰り返しを実現した。今後米国 LCLS-II においても、まずは軟 X 線領域で、さらには硬 X 線領域で MHz 繰り返しのフェムト秒 X 線光源が実現する予定である。フェムト秒オーダーの時間分解実験においても、これまで困難とされてきた、より photon hungry な実験が計画されており、今後の発展が期待される。

例えば、軟 X 線領域の RIXS 測定例としては、すでに Fe 2p3d (L_3 -) RIXS の実験が米国 LCLS で実施されている⁷⁾。この実験の試料は、2 価の鉄原子に 5 個の CO 分子が配位した $\text{Fe}(\text{CO})_5$ というシンプルな鉄錯体である。紫外部 (266 nm) の光励起により、配位子である CO が鉄から解離・再結合し、それに伴って鉄原子の d 電子配置とスピン状態がサブピコ秒オーダーで変化する様子が Fe 2p3d RIXS によって明瞭にトレースされている。この試料は Fe と CO だけからなる比較的単純な組成であり、高濃度溶液として調製できるので、現在の LCLS の 120 Hz の繰り返しでも実験を行うことが可能であった。今後は、より難易度の高い試料、例えば希薄な生体試料を対象とした photon hungry 実験が想定される。例えば Photosystem II の酸素発生サイトであるマンガン・クラスターを対象とした Mn 2p3d RIXS 測定は、MHz 繰り返しの軟 X 線 FEL 光源施設である LCLS-II において計画されているとのことである⁸⁾。

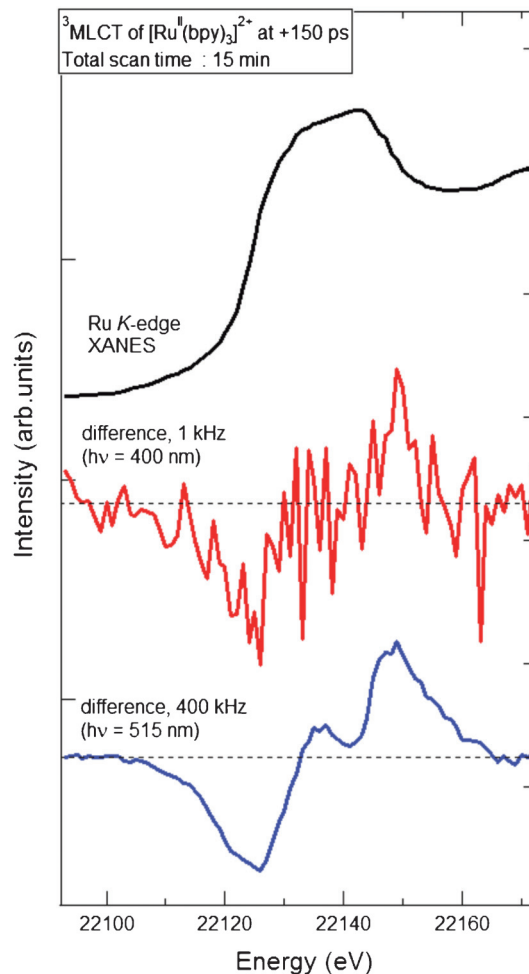


Fig. 7 (Color online) The Ru K-edge XANES spectrum of $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$ and its transient differences measured with 1 kHz and 400 kHz repetition rates. Reproduced from Nozawa, MEDSI, (2016).

謝辞

本稿で紹介した KEK での MHz 繰り返しの時間分解 X 線実験は、文部科学省の光・量子融合連携研究開発プログラム「レーザー・放射光融合による光エネルギー変換機構の解明」により整備されたものである。また測定は、PF-AR の NW14A において行った。KEK の光源加速器・ビームラインのスタッフ、関係者に深く御礼申し上げる。

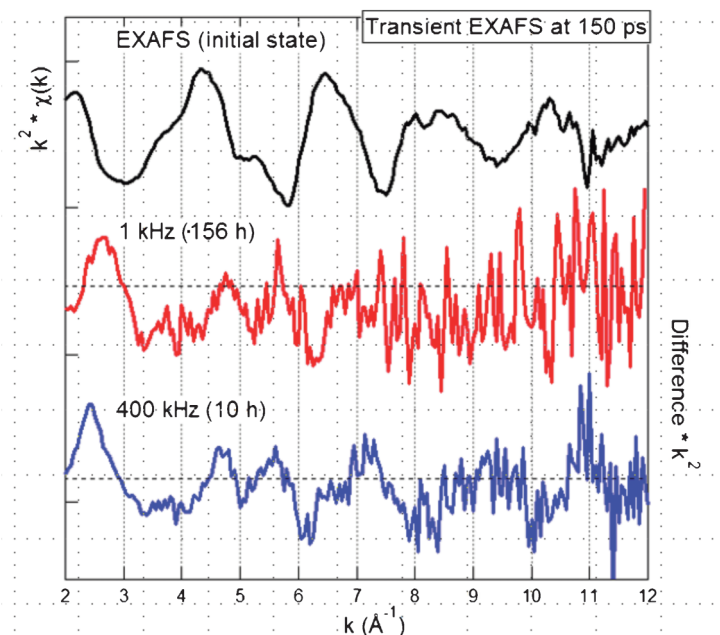


Fig. 8 (Color online) The Ru K-edge EXAFS oscillation of $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$ and its transient EXAFS differences measured with 1 kHz and 400 kHz repetition rates. Reproduced from Nozawa, MEDSI, (2016).

参考文献

- 1) A. Britz, T. A. Assefa, A. Galler, W. Gawelda, M. Diez, P. Zalden, D. Khakhulin, B. Fernandes, P. Gessler, H. S. Namin, A. Beckmann, M. Harder, H. Yavas and C. Bressler: *J. Synchrotron Rad.* **23**, 1409 (2016).
- 2) G. Vanko, A. Bordage, M. Papai, K. Haldrup, P. Glatzel, A. M. March, G. Doumy, A. Britz, A. Galler, T. Assefa, D. Cabaret, A. Juhin, T. B. van Driel, K. S. Kjær, A. Dohn, K. B. Møller, H. T. Lemke, E. Gallo, M. Rovezzi, Z. Németh, E. Rozsályi, T. Rozgonyi, J. Uhlig, V. Sundström, M. M. Nielsen, L. Young, S. H. Southworth, C. Bressler and W. Gawelda: *J. Phys. Chem. C* **119**, 5888 (2015).
- 3) S. Nozawa: *Proceedings of MEDSI2016*, 351 (2016).
- 4) Y. Uemura, D. Kido, Y. Wakisaka, H. Uehara, T. Ohba, Y. Niwa, S. Nozawa, T. Sato, K. Ichianagi, R. Fukaya, S. Adachi, T. Katayama, T. Togashi, S. Owada, K. Ogawa, M. Yabashi, K. Hatada, S. Takakusagi, T. Yokoyama, B. Ohtani and K. Asakura: *Angew. Chem. Intl. Ed.* **55**, 1364 (2016).
- 5) T. Sato, S. Nozawa, A. Tomita, M. Hoshino, S. Koshihara, H. Fujii and S. Adachi: *J. Phys. Chem. C* **116**, 14232 (2012).
- 6) S. Nozawa, T. Sato, M. Chollet, K. Ichianagi, A. Tomita, H. Fujii, S. Adachi and S. Koshihara: *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 61 (2010).
- 7) Ph. Wernet, K. Kunnus, I. Josefsson, I. Rajkovic, W. Quevedo, M. Beye, S. Schreck, S. Grubel, M. Scholz, D. Nordlund, W. Zhang, R. W. Hartsock, W. F. Schlotter, J. J. Turner, B. Kennedy, F. Hennies, F. M. F. de Groot, K. J. Gaffney, S. Techert, M. Odelius and A. Fohlisch: *Nature* **520**, 78 (2015).
- 8) *New Science Opportunities Enabled by LCLS-II X-ray Lasers*, (2015).

著者紹介



野澤俊介

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所准教授

E-mail: noz@post.kek.jp

専門：光物性，時間分解 X 線計測

【略歴】

2002年東京理科大学理学研究科物理学専攻博士課程修了，博士（理学）。名古屋産業科学研究所研究補助員，高エネルギー加速器研究機構研究機関研究員，科学技術振興機構 ERATO 腰原非平衡ダイナミクスプロジェクト研究員，高エネルギー加速器研究機構特任助教を経て，2012年4月より現職。



足立伸一

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所教授

E-mail: shinichi.adachi@kek.jp

専門：放射光科学，物理化学，構造生物学，時間分解 X 線計測

【略歴】

1992年京都大学大学院工学研究科分子工学専攻博士課程修了，博士（工学）。日本学術振興会特別研究員（高エネルギー物理学研究所），理化学研究所研究員（生体物理化学研究室），高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授を経て，2010年10月より現職。



深谷 亮

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所特任助教

E-mail: ryo.fukaya@kek.jp

専門：物性物理学，超高速光科学，時間分解 X 線計測

【略歴】

2010年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了，博士（理学）。東京工業大学産学官連携研究員，高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究員を経て，2014年9月より現職。

Studying chemical reaction dynamics in solutions with advanced synchrotron radiation and XFEL —High quality data collection with MHz X-ray pulses—

Shunsuke NOZAWA Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Ryo FUKAYA Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Shin-ichi ADACHI Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract The technical implementation of a MHz data acquisition scheme for pump-probe X-ray experiments with temporal resolution from 10 fs to 100 ps is presented. Such techniques are very attractive to benefit from high average photon flux of X-ray pulses due to the high-repetition rates, which enables “photon-hungry” SR experiments even with pump-probe modes.