

X線用イメージングプレートのフェーディング特性評価

物理工学科

野末佳伸, 長谷川祐司, 雨宮慶幸

はじめに

X線計測の分野においては、シンクロトロン放射の出現による高輝度化に伴って、強度の強いX線を有効に用いるために、高度感、広いダイナミックレンジを持つ検出器の開発が求められるようになった。そのような状況の中でこれらの要求を満たす検出器としてイメージングプレート(IP)が現れた。IPは2次元の積分型X線検出器であり100 μ m程度の分解能と6桁に及ぶ広いダイナミックレンジを有する¹⁾。これらの優れた性質のためにIPは様々なX線計測で幅広く用いられるようになった。しかし、このIPにも、検出器としての弱点がある。それが、フェーディング現象である。

フェーディング現象の説明のためにまず、IPの構造を説明する²⁾。IPはBaFBr:Euという輝尽性蛍光体からできている。アルカリ土類ハライドの性質として、X線などによる価電子帯の電子励起でFとBrの格子欠陥が電子を引き寄せて色中心を形成する、ということはよく知られている。色中心にトラップされている電子は伝導帯に比べて準安定な状態にあることになる(図1参照)。つまり、X線を照射すると、価電子帯や不純物Euの準位から電子が励起され伝導帯に持ち上げられて、伝導帯の電子は準安定な色中心の準位に落ち着く。この色中心にトラップされる量が、X線照射量に比例する。このようにして色中心を形成した状態のBaFBr:Euに対して、色中心から伝導帯への励起に相当する波長の光(よく使われるのは633nmのHe-Neレーザー)を照射すると、伝導帯に励起された電子は価電子帯やEuの準位

に落ちる。この過程でPhotostimulated luminescence(PSL)という光が照射される。結局、X線強度を観測する時にはPSLの強度を観測する事になる。ここで重要なのはPSLの波長が390nm程度である事である。というのも、PSLの波長がHe-Neレーザーの波長に近かったら光を分離して検出する事はできない。

もし、観測されるPSLの強度がX線の照射から読みだすまでの時間に依存しないのなら検出器として理想的である。しかし、実際には色中心の準位にトラップされている電子がより安定な状態に少しずつこぼれ落ちてゆくために、読み出しまでの時間が長くなるほど、観測されるPSL強度は単調に減少する。これをIPのフェーディングという。今回我々は、フェーディング量を時間の関数として正確に測定し、モデルを立ててフェーディングの原因を考察した。

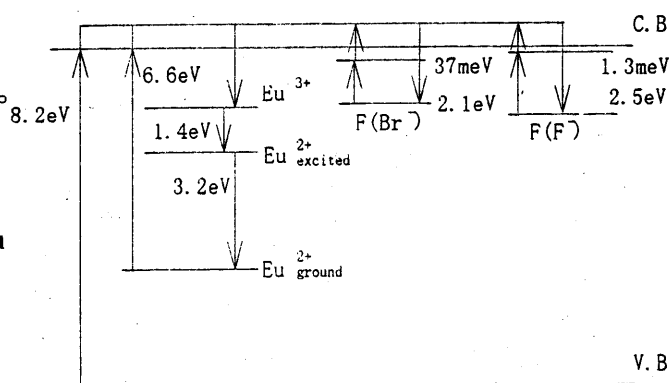


図1. BaFBr:Eu²⁺ のバンド構造

実験方法

富士フィルム社製のIPを使用して、線源は放射性同位体の⁵⁵Fe(RI)を用いた。まず、RI

を収納する真鍮のホルダーを作成し、そのホルダーのサイズに合った穴を16ヶ所開けた真鍮盤を作る。その真鍮盤をIPに被せておき、穴にホルダーを差し込んでX線を照射する(図2参照)。照射量が一定になるように照射時間の制御にはシャッター(リガク社製のX線シャッター)を用いた。このようにして、ある1ヶ所でX線を照射してしばらくしてからまた別の穴に対して同様の方法でX線照射する。同じ動作を16ヶ所の穴全てに対し

て行なった後で、IPを読み取り装置にかける。照射から読み取りまでの時間が短い穴ではPSLの強度は強いが、読み取りまでの時間が長い穴では観測されるPSL強度が弱くなる。こうして得られた時間と観測PSL強度の関係をグラフにしたものがフェーディングスペクトルである。正確なフェーディングスペクトルを測定するためには、IPの場所による感度ムラを測定する必要がある。感度ムラの測定には次の方法を用いた。

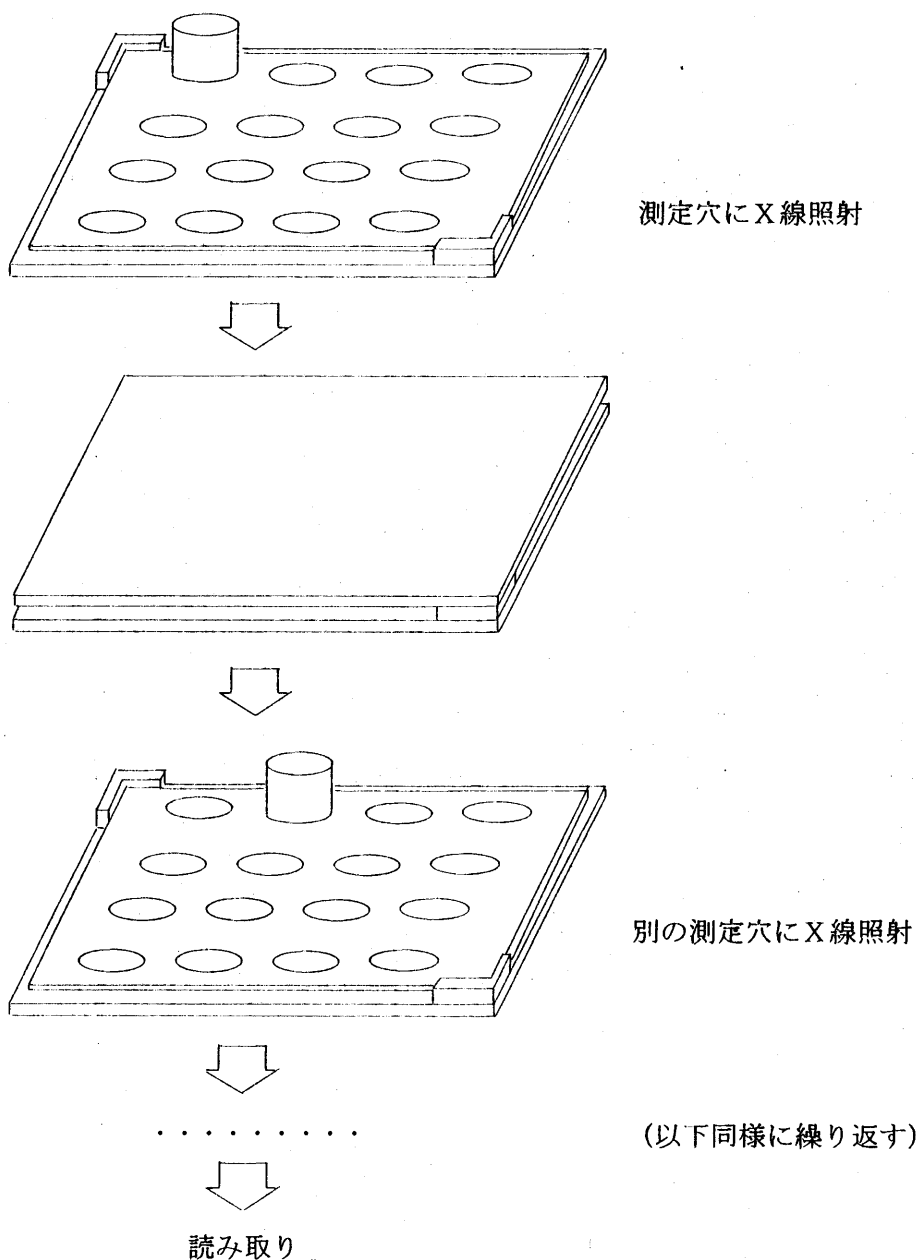


図2. 測定の手順

まず、16ヶ所の穴に次々と（後述する理由により照射が同時に行われる必要はない）同量だけX線を照射してゆく。16ヶ所全てにX線を照射したIPを2日程保存した後に、読み取りにかけて強度を測定する。これは、48時間経った時にはフェーディングが十分遅くなっていて照射から読み取りの時間が20分や30分ずれていても無視できることを利用している。

また、強度測定において再現性を確認するために、同一IPの同じ箇所を使って同一照射量かつ、同一のフェーディング時間でのPSL強度測定を行なった。

実験結果

(1) 感度ムラの測定結果

感度ムラの実験結果を図3に示す。場所によってほぼ±5%程度のムラがあることが分かった。また、感度ムラの再現性は期待される誤差の範囲内であり非常に良い事が分かった。

(2) 再現性の測定結果

再現性の実験結果を図4に示す。最初の数回は±1%程度で落ち着いているが更に測定を繰り返すと徐々に観測されるPSLの強度が大きくなっていく事が分かる。

(3) フェーディングスペクトルの測定結果

まず、X線の照射量を変化させた時のフェーディングスペクトルの変化を図5に示す。カーブフィッティングは $f(x) = A\exp(-t/\tau_1) + B\exp(-t/\tau_2)$ で行った。

フィッティングパラメータの値は図の下に記されている。

次に、温度を3通りに変化させた時のフェーディングスペクトルを図6に示す。

フィッティングは行なったが、精度が定量的に扱えるレベルではないので、パラメータは記さない。

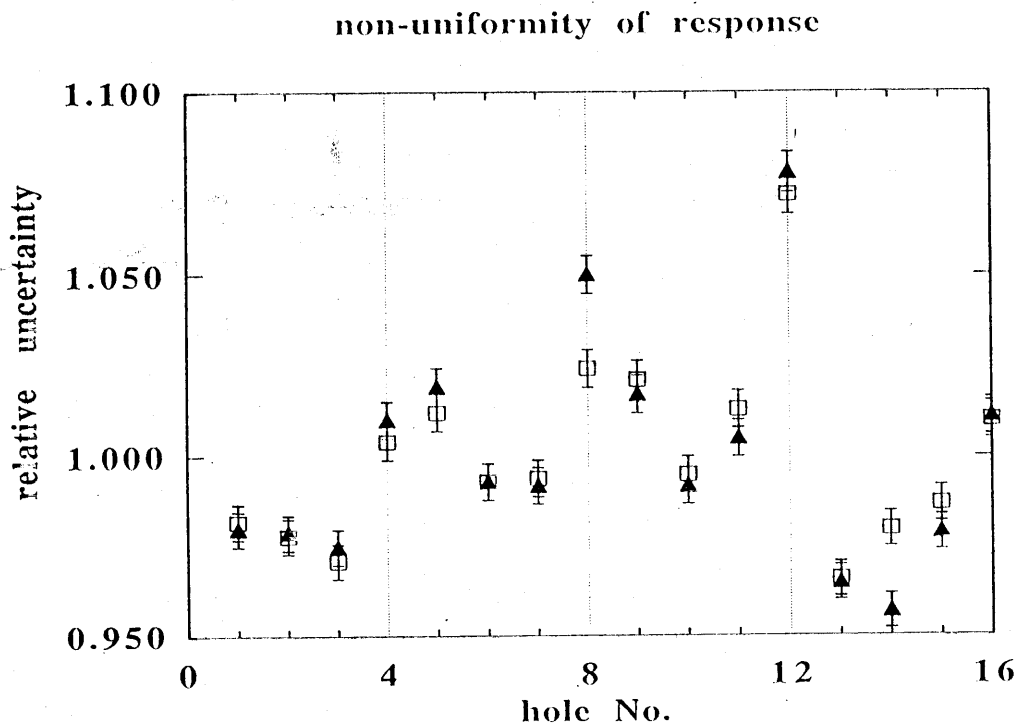


図3. 感度ムラの実験結果

横軸は照射する穴番号に対応し縦軸は相対的な強度のムラを表す。

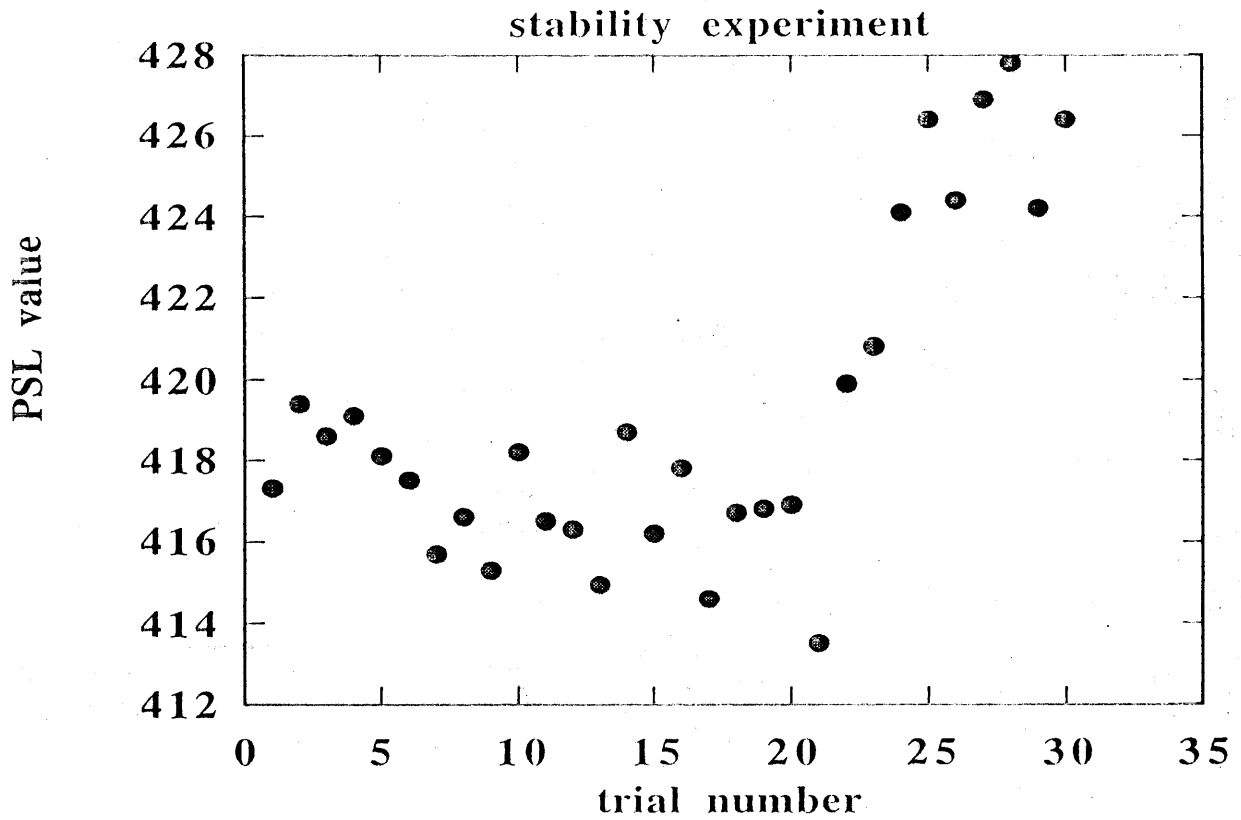


図4. 再現性の実験結果

横軸は測定の繰り返しの順番, 縦軸はPSL強度を表す。

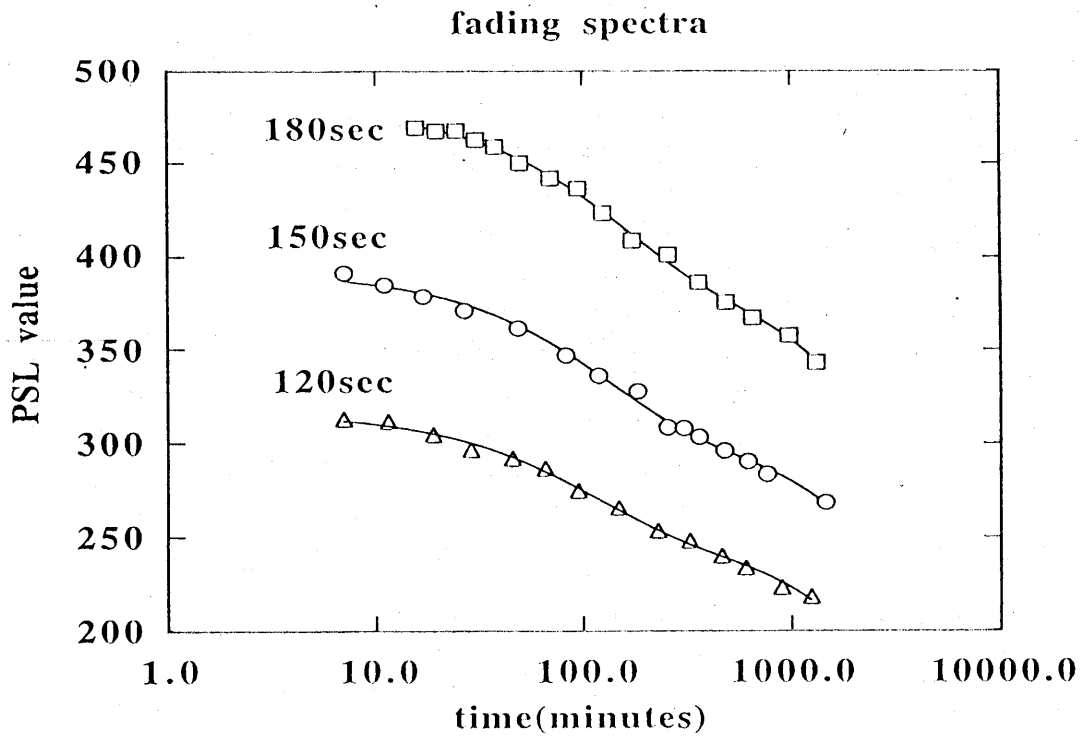


図5. 照射量を変えた時のフェーディングの変化

$f(t) = A \exp(-t/\tau_1) + B(1-p)^t$ でフィッティングしたもの

180秒: $\tau_1=140(12)\text{min}$ $p=0.00010(1)$ $A/B=0.22$

150秒: $\tau_1=122(12)\text{min}$ $p=0.00010(1)$ $A/B=0.26$

120秒: $\tau_1=108(11)\text{min}$ $p=0.00012(1)$ $A/B=0.27$

($\tau_2 \approx 10000\text{min}$)

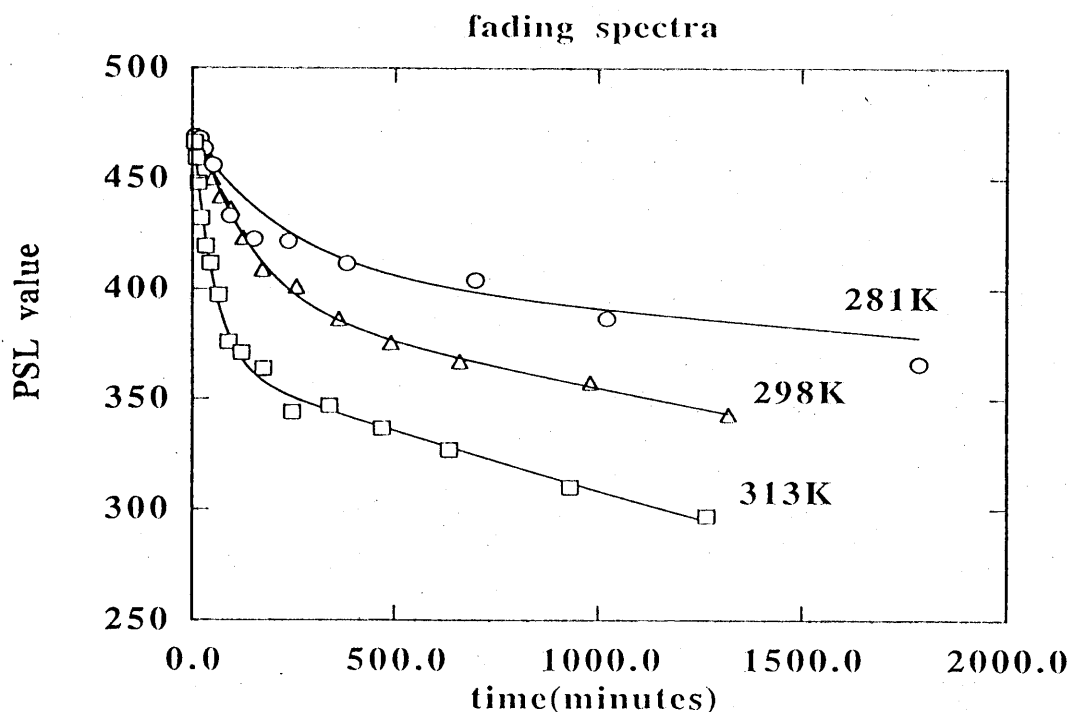


図6. 温度を変えた時のフェーディングの変化

温度の上昇と共に一様にフェーディングが加速されているのがわかる。横軸はリニアスケール

モデルと考察・展望

(1) 感度ムラについて

実験から得られた感度ムラは±5%程度であったが、IP自体の感度ムラは±2%程度であることが知られていて、本測定での感度ムラは強力X線実験室にあるIP読み取り装置による感度ムラを含んでいる事が予想される。

(2) 再現性について

再現性の実験は、明らかに測定系がドリフトしていくことを示す。ただし、ドリフトが起こるのは、1時間以上のレンジでIP読み取り機に読み取りの連続運転を行なわせ続けた時なので、通常の実験では影響は少ないと思われる。また、同一条件での測定でも日によって観測されるPSL強度が異なるので、この読み取り機では、絶対測定の信頼性は高くないことが分かった。ただし、感度ムラの測定の再現性の良さが、1回の測定中に強度が変わる事はないことを示しており、1回の

測定中でのスポット間の相対強度比の測定は信頼できる。

(3) フェーディングモデルとその考察・今後の展望

実験結果からフェーディングが $f(t) = A\exp(-t/\tau_1) + B\exp(-t/\tau_2)$ で良く表現できる事が分かった。このことから、我々は次のようなモデルを提案する。

フェーディングの、つまり色中心にトラップされている電子が格子欠陥から脱出する経路は次に示す2通りである(図7参照)。

1. 色中心の中でEuと色中心が隣接して存在している状態(これを一般的にはFA中心という)が20%程度存在する³⁾ことがこれまでの報告で分かっていて、そのFA中心の電子が熱励起されトンネリングを起こしてEuの準位に移る。
2. 価電子帯にあるホールのランダムウォークによって、色中心にトラップされている電子と再結合する。

C. B

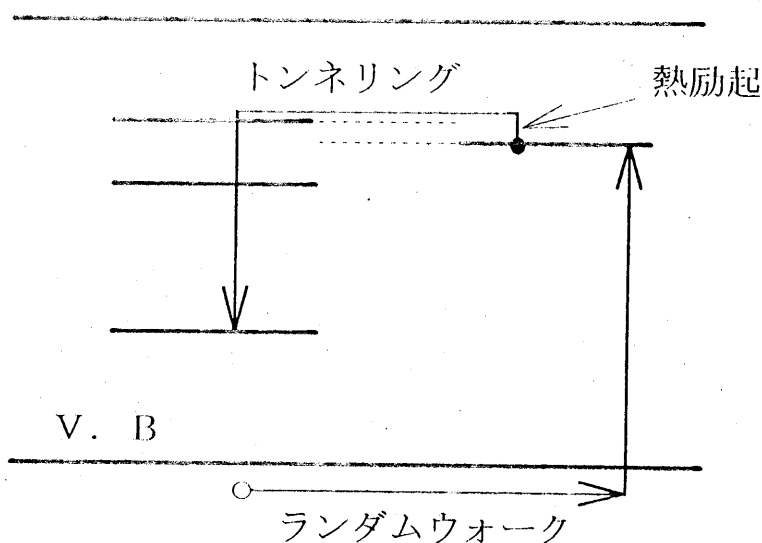


図7. フェーディング過程のモデル

2の過程では、ランダムに運動している時にホールが色中心に出会い確率を p とした時にフェーディングの関数として $f(x) = (1-p)^t \approx \exp(-pt)$ で表現できる。

ここで、 p が十分に小さい事を仮定している。

ただし、このモデルを考える際には、 F が形成する色中心は、He-NeレーザーによるPSL発光には関与していないことを仮定する。というのも、 F による色中心の準位はHe-Neレーザーによって励起できるエネルギーよりも深い準位 (2.5 eV) に存在するからである。また、色中心の準位についてははっきりしないところが多く、論議を呼んでいる事を触れておく^{2),3)}。ここでは、高橋(富士フィルム)らによって予想されたバンド図を用いて考えてきた。(しかし、高橋らは F による色中心もPSL発光に関与していると考えていることを断っておく)

このフェーディングモデルでは温度の上昇と共にフェーディングが速くなる事を説明できる。また、強度の変化による時定数の変化は、次のように考える。強度が上がると色中心の数が増えるので格子欠陥による構造不安定性が少なくなり、系として安定化する。

しかし、今回の実験では、時定数の変化が有意であるかの判別は困難であるので、より幅広い強度レンジでの測定が望まれる。また、温度の変化による時定数の変化についても、今回は定量的な議論ができる精度のデータが得られなかったので、強度依存性のフェーディングスペクトルと同程度の精度でフェーディングデータを測定する予定である。温度依存性を定量的に測定すれば、反応速度論的な考えを用いて熱励起で飛び越えているポテンシャルの高さを評価できることが期待される。

さらに本測定では、最大1日の期間のフェーディングであるので、更に長いレンジでのフェーディングを測定することが重要な課題である。なぜなら、もし、より長い時定数のフェーディングの項を含んでいて1日のフェーディングに影響を及ぼしていたら今回のフィッティングで得られた $f(x) = A\exp(-t/\tau_1) + B\exp(-t/\tau_2)$ のパラメータ自体が狂ってきて信頼できないものとなるからである。

謝 辞

本実験を進めるにあたって強力X線実験室の小野勝男助手と工作室の佐藤さんを始めとする多くの方々にご協力いただいた事を深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Y.Amemiya, J.Synchrotron Rad.
2,13(1995)
- 2) Y.Iwabuchi, N.Mori, K.Takahashi,
T.Matsuda and S.Shionoya, Jpn.
J.Appl.Phys 33,178(1994)
- 3) M.Thoms, H.von Seggern and A.
Winnacker, Phys.Rev.B44,9240(1991)