

X線放射光・短パルスレーザー光の同期特性と超高時間分解測定技術

田中義人 (SPring-8/理化学研究所)

【はじめに】放射光源のパルス性を用いた時間分解実験の一つとして、レーザー光をポンプ光としたポンプ - プロブ実験が挙げられる。その際、短パルスレーザーを放射光パルスに同期させる技術が必要となる。これまでに SPring-8 においてピコ秒レーザーと硬X線アンジュレーター光を同期させて数十ピコ秒の分解能を有する時間分解測定を行ってきた。ここではまず、SPring-8 での放射光と短パルスレーザーの同期方法とその特性を紹介する。

一方、PF 将来計画として検討されている ERL では、100fs オーダーのパルス幅をもつ放射光が期待されている。ここまで短パルスになると、蓄積リングで行なわれている同期方法が通用する保証はなく、別の超高時間分解測定法についても検討しておくことが大切である。

【SPring-8 におけるパルスレーザーの同期特性】蓄積リングでの放射光とレーザーを同期させる場合、蓄積リングの RF 加速空洞に信号を与えている基準信号に、レーザーを同期させる方法をとるのが一般的である(図 1 参照)。用いたレーザーは、パルス幅 80fs で繰り返し 84.76MHz、すなわち、RF 基準信号の 1/6 の周波数で発振するモードロックチタンサファイアレーザーである。レーザーパルスと基準信号の間のジッター(図 1 中(a))は 50GHz 帯域のオシロスコープを用いて評価した結果 2.4ps 以下であることが確認できた。このレーザーパルスを再生増幅し、繰り返し約 1kHz、パルスエネルギー約 1mJ のパルスを得た。この際、電子バンチの周回周期も考慮して特定のバンチからの X 線パルスに対して同時照射させた[1]。

次に基準信号とリング中の電子バンチのタイミング特性(図 1 中(b))について、RF 基準信号により制御されている RF 加速電圧 (RF 加速空洞での印加電

圧) と電子バンチの間の位相が大きくずれる要因は二点考えられる。一つは RF 加速電圧の負荷によるピーク電圧降下の影響であり、もう一つはアンジュレーターの放射パワー変化による電子のエネルギー損失変化の影響である。いずれも、電子が一定のエネルギーを維持できるように、RF 加速電圧における安定点(位相)が変わるものである。前者、すなわち RF 加速電圧の負荷によるピーク電圧降下は、電子バンチが RF 加速空洞を通過する際に発生する。蓄積リング中の電子バンチが等間隔で均一に入射されている運転モードでは、その影響は小さかったが、非対称に電子バンチが振り分けられたハイブリッドモードのフィリングに対しては、その効果が無視できない($\approx 100\text{ps}$)ことがわかった[2]。しかしながら、この電子バンチの RF 加速電圧に対する位相は、電子バンチ毎には安定であり、レーザーパルスは特定のバンチからの放射光パルスだけを狙って当てられているので、電圧降下による位相変化の影響を殆ど受けないことになる。次に後者、すなわち他のビームラインのアンジュレーター放射パワーの影響について調べてみた[1]。その結果、1 アンジュレーターあたり約 3ps の時間のずれが見られた。通常の実験中には、アンジュレーターギャップを全開にすることは少ないので、

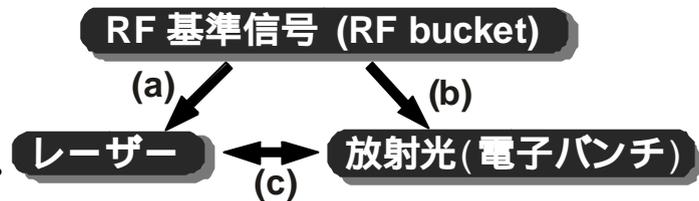


図 1：同期方法

深刻な影響はない。しかしながら、将来 SPring-8 に、より多くのアンジュレーターが設置された場合には無視できなくなる可能性があるため、フィードバックをかける方法も検討している。

最後にレーザーと放射光パルス間(図 1 中(c))の同期の様子をストリークカメラでモニターした結果、数時間に渡って $\pm 2\text{ps}$ の精度で同期していることがわかった。この精度は SPring-8 の放射光パルス幅約 40ps に対して十分高い精度であり、放射光のパルス幅を生かしたポンプ - プロブ実験を行うことができる。

【超高時間分解測定法の検討】 100fs オーダーの放射光パルス幅を生かした時間分解測定法を検討する場合、上記で示した SPring-8 の蓄積リングでの同期精度ではもはや十分でない。レーザーを外部電気信号にたとえ 100fs 以下の精度で同期できたとしても、ビームの安定性を含めて全体として 100fs 以下の精度となるとそれほど簡単なものではないことが予想される。

そこで、いっそのこと、パルスごとのジッターを抑えることは数ピコ秒の程度であきらめて、単ショットで行う方法を考えてみてはどうか。図 2 にその配置の一例を描いてみた。図では結晶表面上の左側と右側で、結晶の大きさのほぼ 2 倍の光路差がついていることになり、X 線検出器の位置が遅延時間の関数となる。レーザー照射による高速の格子膨張過程[3]や圧縮過程[4]、格子振動[5]等を見る場合には有効であろう。

また、非対称反射そのものでサンプル上への X 線パルスの到達時間を、その位置によって変えることができる。積算が必要な場合、ショットごとに時間間隔が記録できれば、後で時間間隔を考慮して積算することができる。図 2 で示した方法は、X 線、レーザー光の時間間隔を記録する方法としても利用できるものと期待できる。

これらについて予備的な実験を行ったので紹介したい。なお、実験は SPring-8 の原氏(理研)、村木氏(姫工大)、山崎氏(JASRI)、北村氏(理研)、石川氏(理研)らと行った。

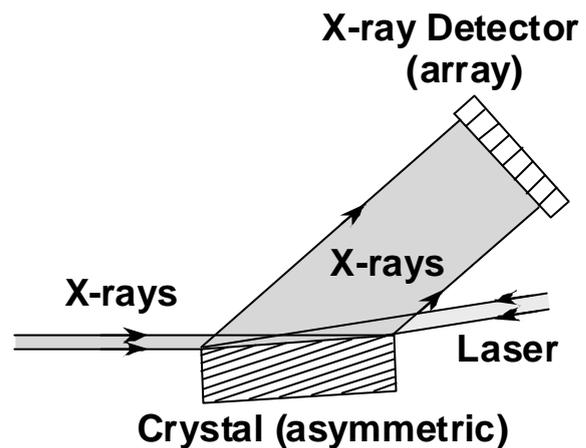


図 2 : シングルショットでの時間分解測定法

[1] Y.Tanaka *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **71** (2000) 1268-1274; Nucl. Instrum. & Meth. A, **467/468** (2001) 1451-1453.

[2] T.Hara *et al.*: Nucl. Instrum. & Meth. A, **467/468** (2001) 1125-1126.

[3] V.Tomov *et al.*: *Time-resolved X-ray diffraction*, ed. J.R.Helliwell and P.M.Rentzepis (Oxford Univ., New York, 1997) p.1; Y.Tanaka *et al.*: J. Synchrotron Rad. **9** (2002) 96-98.

[4] Y.Hironaka *et al.*: Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 1967-1969.

[5] A.M.Lindenberg *et al.*: Phys. Rev. Lett. **84** (1999) 111-114; A.Cavalleri *et al.*: Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 586-589.