

# 光ファイバと光周波数コムを用いた X 線自由電子レーザー用 高精度 RF・パルスタイミング伝送システムの開発

量子・物質工学専攻 植田研究室 流王登志雄

## 1. 背景

現在、兵庫県佐用郡にある大型放射光施設・Spring-8 サイト内において、X 線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser: XFEL) 施設の建設が進行中である。本施設は低エミッタンス熱電子銃・C バンド電子線形加速器・真空封止アンジュレータからなり、全長は約 700 m に及ぶ。本施設では電子を 80 億電子ボルト (8 GeV) まで加速することで、最短波長 0.06 nm の X 線レーザーの発生を目指している。XFEL はこれまでにない非常に強い光で超高速のパルス光であるため、原子や分子といった非常に微細なものが非常に早く変化する様子を連続的に観察できるようになると期待されている。



図 1 XFEL 完成予想図

XFEL 発生装置は電子銃、線形加速器、アンジュレータ (永久磁石列) の 3 つの部分に分けられる。まず、電子銃から撃ち出した自由電子のバンチを複数の線形加速器で加速させ、アンジュレータに通すことで電子に制動輻射をかけ X 線レーザーを発生させる。この時、電子を効率よく加速させるためには各加速器間で動作の高周波 (RF) 信号を同期させておく必要がある。

そのため最大 5.712 GHz の RF 信号を分配しなければならない。また、ポンプ・プローブ実験などの XFEL を用いた解析実験を行う際には利用者が X 線レーザーの到達するタイミングを知る必要があるため、発生側から利用者側にパルス幅 100 fs 以下の X 線レーザーの来るタイミングを伝達しなければならない。このとき求められる要求値は RF 位相揺らぎが 0.007 rad 以下、パルスタイミングの揺らぎ (以下タイミングジッター) が 50 fs 以下となっている。

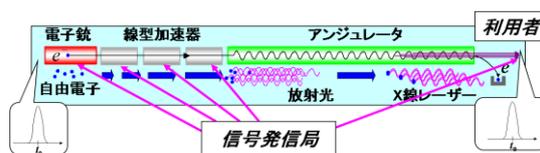


図 2 XFEL 概略図

## 2. 原理

### 2.1. 光周波数コム

今回は RF 信号とパルスタイミングを同時に伝送するため、伝送信号には光周波数コムを用いた。光周波数コムは周波数領域では縦モード間のビートとして RF 信号を伝送でき、時間領域ではパルスタイミングをクロックとして伝送できるためである。

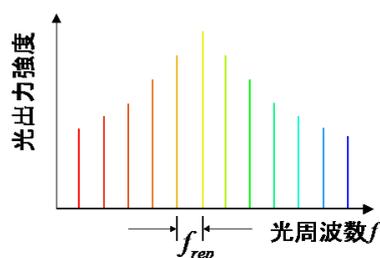


図 3 周波数領域で見た光周波数コム

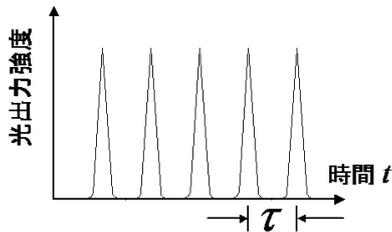


図 4 時間領域で見た光周波数コム

今回は株式会社光コム の位相変調型光周波数コム発生器 (OFCG) を用いた。発生原理は EOM (Electro Optic Modulator) により入射光に RF で位相変調をかけることにより入射光の周波数を中心にサイドバンドを生成し、ファブリ・ペロー共振器で増幅することにより光周波数コムを生成する。

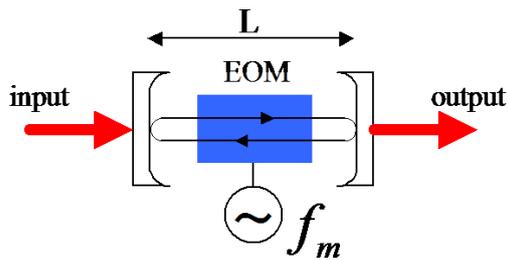


図 5 EOM を用いた光周波数コム発生

## 2.2. ファイバ長安定化回路

光ファイバには光の高い周波数による高精度伝送が可能で、電気的外乱に強く、電気信号を電線で伝送するのに比べ、低減衰で長距離伝送が可能であるという長所がある反面、熱や振動に敏感でその影響が位相雑音として現れるという欠点がある。そのため、熱や振動によるファイバ長の変化を抑え、位相雑音を抑制するためにファイバ長安定化回路を用いた。この回路は非対称マイケルソン干渉計を構成しており、光の位相によりファイバの光路長を測定する。光源には $10^{-11}$ の安定度を持つ波長1550 nm

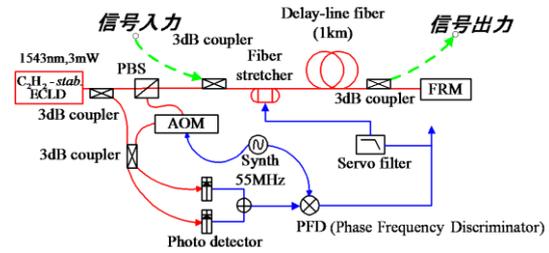


図 6 ファイバ長安定化回路概略図

のアセチレン安定化レーザーを用いた。まず光源から出た光は 3dB カプラーによって参照光と計測光に分けられる。計測光は 1 km の delay fiber を伝送し、終端に達し、終端のファラデーローテータミラー (FRM) で偏光を 90 度回転させられ、伝送元に返される。この時、計測光は偏光が 90 度偏光回転しているためビームスプリッターで反射され、AOM (Acousto-Optic Modulator) によって 55MHz の周波数シフトを受ける。この計測光と参照光で光ヘテロダインを行い 55 MHz のビート信号を検出し、このビート信号をフォトディテクターで電気信号に変換し、PFD (Phase Frequency Discriminator) に入れることによって位相変動の情報を検出できる。これをサーボ回路に通し、ファイバストレッチャにフィードバックすることによってファイバの光路長を一定に保つ。

この光路長を制御したファイバに対して、図の緑のラインで伝送信号を 3dB カプラーから入射し、伝送させて終端の 3dB カプラーから出射する。なお今回の実験では、光路長制御時ではファイバ長変化は 20  $\mu\text{m}$  以下に抑えられた。

## 2.3. 分散シフトファイバ (DSF)

今回は光周波数コムというパルス光を伝送信号として用いたが、パルス光をファイバ

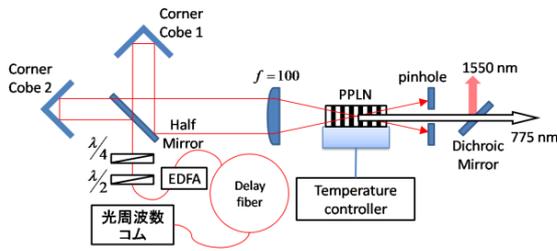


図 7 SHG 自己相関計

に伝送させると群速度分散によりパルス幅が広がるという現象が起こる。この影響を抑えるため今回は伝送ファイバには分散シフトファイバ (DSF) を用いた。今回は古河電工製の分散シフトファイバ (波長分散:  $\pm 3.5$  ps/km/nm @1525~1575nm) を用いた。この分散シフトファイバを評価するため SHG 自己相関計を自作し、delay fiber が 0 m、1 km のシングルモードファイバ (SMF)、800 m の分散シフトファイバを用いた場合において自己相関波形を観測し、パルス広がりを調べた。その結果、分散シフトファイバを用いた場合にはシングルモードファイバを用いた場合に比べパルス広がりを格段に抑えられ、パルス波形を保ったまま信号伝送できることが分かった。

この分散シフトファイバを 2.2 のファイバ長安定化回路の delay fiber に用いること

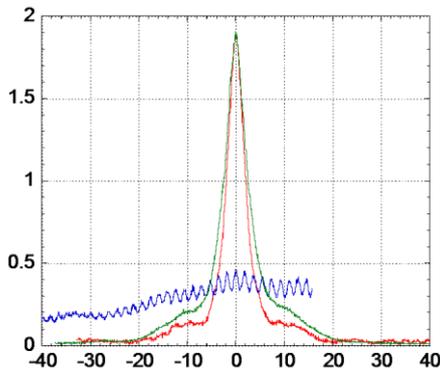


図 8 自己相関波形

(赤: 0 km、青: SMF1 km、緑: DSF800 m)

で信号伝送システムを構築した。次に実験として、この伝送システムの評価を行った。

### 3. 実験(1) RF 位相揺らぎ測定

#### 3.1. 実験方法

まず RF 位相揺らぎの測定を行った。実験系は図 9 に示す。

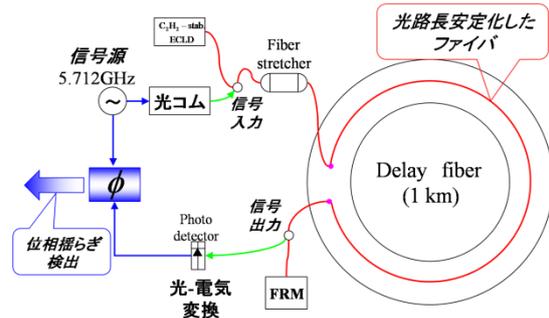


図 9 RF 位相揺らぎ実験系概略図

最初に作製したファイバ長安定化回路を用いて 1 km のファイバの光路長を一定に制御した。このファイバに対して信号源から出た 5.712 GHz の基準となる RF 信号をのせた光周波数コムを伝送した。光周波数コムは終端のフォトディテクターで電気信号に変換され、この信号と基準信号を比較することで RF 位相揺らぎを検出した。

次に RF 位相揺らぎ検出計について説明する。測定計は図 10 に示す。

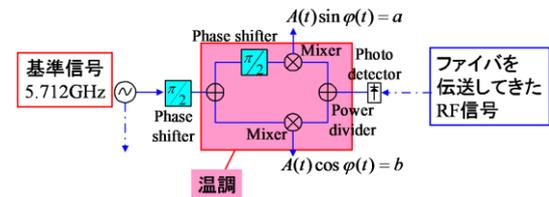


図 10 RF 位相揺らぎ測定計

測定計には高周波ミキサーを使った。高周波ミキサーには温度に敏感な部品を使っていたため、温度調整装置を自作し、温度を

一定に保った。図 10 に示したように、ミキサーに基準信号とファイバを伝送してきた RF 信号が入ると内部のフェイズシフタにより、位相が $\pi/2$ ずれた二つの信号が検出される。これらの信号を模式的に  $\sin$  と  $\cos$  の式で表すことで、 $\tan$  の式から位相揺らぎを求めた (式(1))。

$$\tan \varphi(t) = \frac{\sin \varphi(t)}{\cos \varphi(t)} = \frac{a}{b}$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left( \frac{a}{b} \right) \quad (1)$$

### 3.2. 実験結果

測定結果を以下に示す (青：ファイバ長制御時、赤；ファイバ長非制御時)。

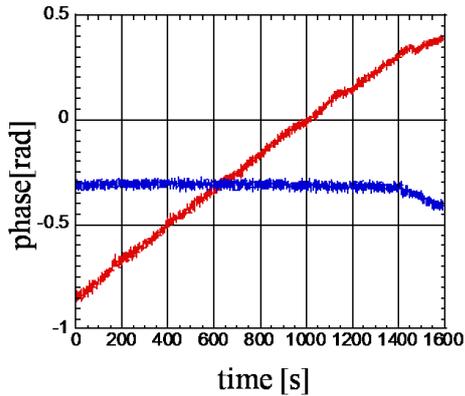


図 11 RF 位相の時間変化

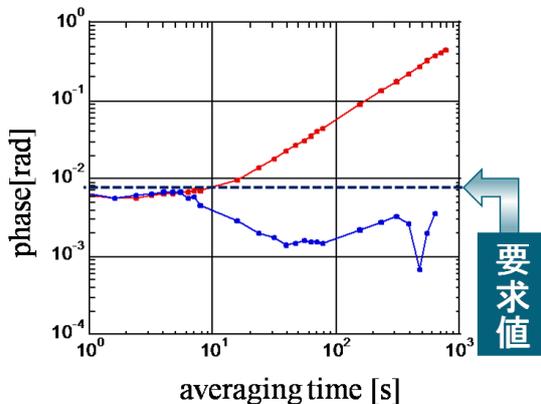


図 12 RF 位相の時間変化のアラン分散

図 11 よりファイバ長制御時では非制御時に比べて RF 位相がほぼ一定に保たれていることが分かる。また XFEL で使用するために RF 位相揺らぎの要求値が  $0.007 \text{ rad}$  以下となっているが、図 12 よりファイバ長制御時には要求値を満たす結果を得ることができた。

## 4. Timing jitter 測定

### 4.1. 実験方法

次に timing jitter 測定を行った。実験系を図 13 に示す。

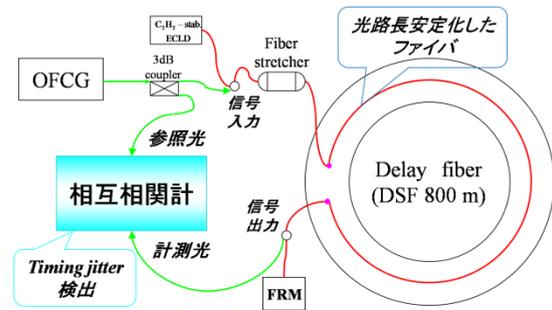


図 13 timing jitter 測定実験系概略図

RF 位相揺らぎ測定と同様にファイバ長安定化回路を用い、光路長を一定に保ったファイバに対し光周波数コムを伝送し timing jitter を測定した。光周波数コムは 3 dB カプラにより参照光と計測光に分けられ、計測光は制御されたファイバを伝送していき、終端の相互相関計で参照光との相互相関を取ることで timing jitter を測定した。なお今回の実験では 800 m の分散シフトファイバを用いた。

次に timing jitter 測定用相互相関計について説明する。相互相関計を図 14 に示す。今回は二つの相互相関計を同時に用いた。図 13 で説明した参照光と計測光は図 14 に示すように伝送していき、非同軸で

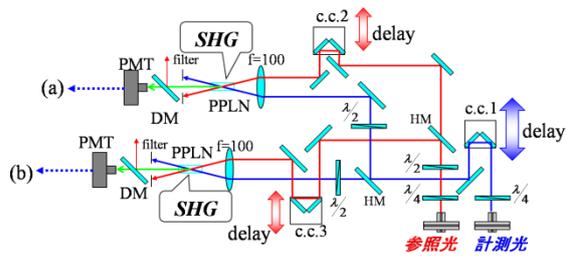


図 14 相互相関計概略図

PPLN 結晶に入射する。このとき、二つのパルスが PPLN 結晶内で重なると重なったパルス幅の面積に応じた出力の SHG（第 2 高調波発生）が起こる。この SH 光をフォトマルで観測し、それぞれの相関計から得られる信号を(a)、(b)と置いた。ここでコーナーキューブ 1（C.C.1）を動かすことで図 15 の上図のような相互相関波形を得る。また、C.C.2 と C.C.3 を動かすことにより(a)と(b)の相関波形が半波形分だけずれるように調整しておく。その状態で(a)、(b)を差し引きすることにより、図 15 の下図のような弁別曲線が得られる。この 0 点付近での電圧の揺らぎを見ることで、ファイバ長の揺らぎに起因する timing jitter を検出する

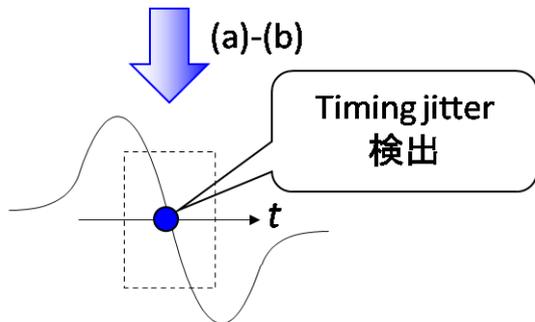
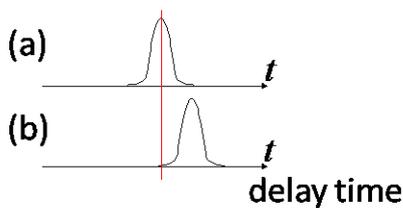


図 15 相関波形（上）と弁別曲線（下）

ことができる。timing jitter は得られた弁別曲線から傾きを取り、測定した 0 点付近での電圧 ( $V_0$ ) の変化のデータを用いることで(2)のような式から得た。

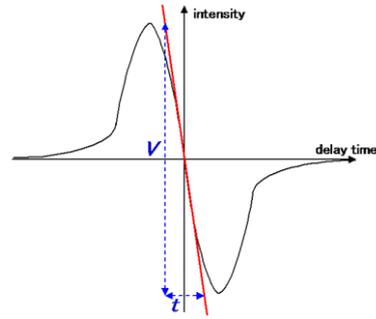


図 16 弁別曲線からの傾きの求め方

$$\text{弁別曲線の傾き} : a = \frac{V}{t}$$

$$\text{timing jitter} : \tau = V_0 \cdot \frac{1}{a} = V_0 \cdot \frac{t}{V} \quad (2)$$

また相関計上での温度による光路長の揺らぎを抑えるために、相関計全体を発泡スチロールと段ボールで作った断熱シールドで覆うことにより、温度を一定に保った。

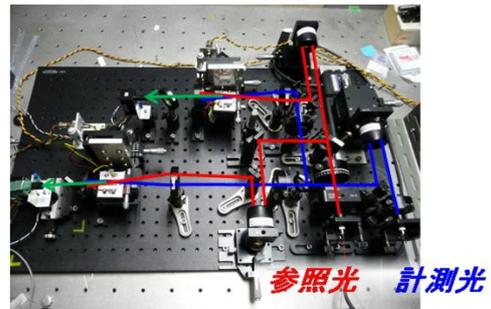


図 17 相互相関計（写真）



図 18 断熱シールド

## 4.2. 測定結果

測定結果を図 19 と図 20 に示す。

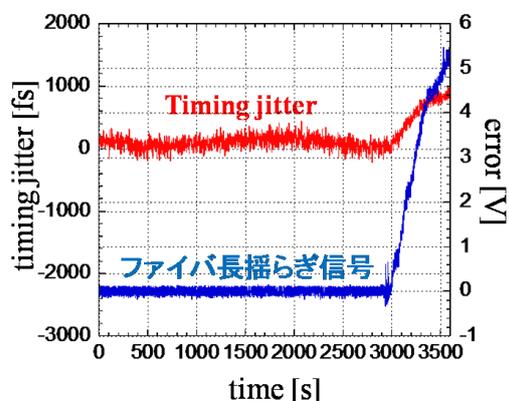


図 19 ファイバ制御時の評価

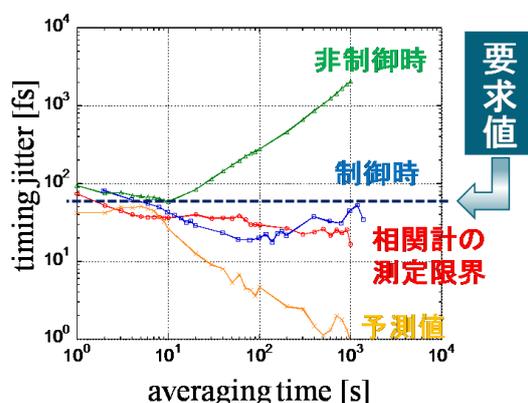


図 20 timing jitter のアラン分散

図 19 はファイバ長制御時の timing jitter (赤) とファイバ長揺らぎ信号 (青) を表したものである。ファイバ長揺らぎ信号が一定の時 (ファイバ長が一定の時) には timing jitter も一定に保たれていることが分かる。また、約 3000 s で制御を外すと、ファイバ長揺らぎ信号が大きく変動してファイバ長が変化していることが分かるが、それと同時に timing jitter も大きく変動しており、この二つの信号には相関があることが分かる。

また図 20 は timing jitter のアラン分散を表したもので緑のラインがファイバ長非

制御時、青が制御時、赤が相関計自体の測定限界、黄がファイバ長揺らぎ信号一定時の結果から求められる予測値となる。図 20 より制御時の結果は相関計の測定限界で制限されていると考えられる。しかし、要求値が 50 fs 以下となり、平均時間 10 s 以上では制御時において要求値を満たす結果を得ることができた。

## 5. まとめ

本研究では XFEL 用の RF・パルスタイミングの伝送システムの開発とその評価を行った。具体的には偏光を用いたファイバ長安定化回路を製作しファイバ長揺らぎを 20  $\mu\text{m}$  以下に制御し、信号伝送ファイバに分散シフトファイバを用いることでパルス広がりを抑制した。そして完成した伝送システムを用いて RF 位相揺らぎと timing jitter を測定した。その結果 RF 位相揺らぎでは 0.007 rad 以下、timing jitter では平均時間 10 s 以上において 50 fs 以下という要求値を満たすことができた。

## 6. 今後の展望

今回の結果より timing jitter は予測値よりより jitter を抑えることができると推測されるが、相関計の測定限界で制限されていることが分かった。そのため、光周波数コム光源により短期安定度の高い光源を使用することにより、ノイズレベルを下げることで、相関計の測定限界を下げられるのではないかと考えられる。

### 参考文献

- [1] M. Musha *et al*, Appl. Phys., B82, 555-559 (2006)
- [2] J. Kim *et al*, Opt. Letter, 32, 9, 1044-1046 (2007)