

安定化とノイズ対策

1. はじめに

X線自由電子レーザー (X-ray Free Electron Laser, XFEL) [1] は図1のような構成である。図1は、理化学研究所に設置してある SACLA [2] の例であるが、他の装置の構成も大きくは変わらない。このレーザー装置は通常のレーザーとは大きく異なり、電子線を高エネルギーに加速する線型加速器とその加速電子によりレーザー光を発生するアンジュレータで構成されている。皆さんに装置の具体的な構成を説明するにはこの講義時間では足りないので、本 OHO スクール以外の講義を参考にさせていただきたい。この装置を動作させるには、構成機器の温度的、機械的、電気的に高度な安定性が必要である。そうでなければ、電子ビームのエネルギーと時間、位置、角度の 6次元の安定性は確保できず、ビームで駆動するレーザーの安定性もままならない。ここで言う 6次元は、エネルギー、パルス幅、X と Y 軸の位置、X と Y の傾きである。しかしながら、レーザーの駆動装置である電子線型加速器[3]は、円形加速器と異なり原理的に安定解が存在しない。そのために装置を安定にするには、構成する大電力高周波源などの個々の要素を、可能な限り安定にしなければならない。言い換えれば、安定性を計測するための測定精度との戦いでもある。本講義では、この安定性とはどのようなものかと、外

乱が装置に、または安定性にどのように影響するかを説明する。加えて、SACLA における安定性を実現するための工夫についても述べる。

SACLA は巨大装置であり、電子の加速および軌道制御に関連した非常に多くの装置が、電子ビームやそれで駆動される X 線レーザーの安定性に関連している。本稿では、紙面の関係で全てを取り上げられないので、以下に代表的な装置に対する安定化の工夫を述べる。加えて、式などの細かい導出はそれだけで 1 つの講義テーマになるので、全てを書き下すことは難しい。よって読者には、理解のために引用文献ほかを参照していただきたい。

2. 加速電子の特性に影響するパラメータ

2.1. 時間変動に関する影響

アンジュレータ中では、高エネルギー電子とそれから発生した光による相互作用で、X線の非線形自己増幅 (Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE) を行う。この自己増幅作用には、キロアンペア領域の高輝度な電子ビームが必要である。現状の加速器の技術では、このような高い電流値を電子銃から直接発生することは不可能である。よって、電子銃から発生する数アンペアでナノ秒幅の電子ビームから、レーザーが発生可能なキロアンペアピークでフェムト秒幅の

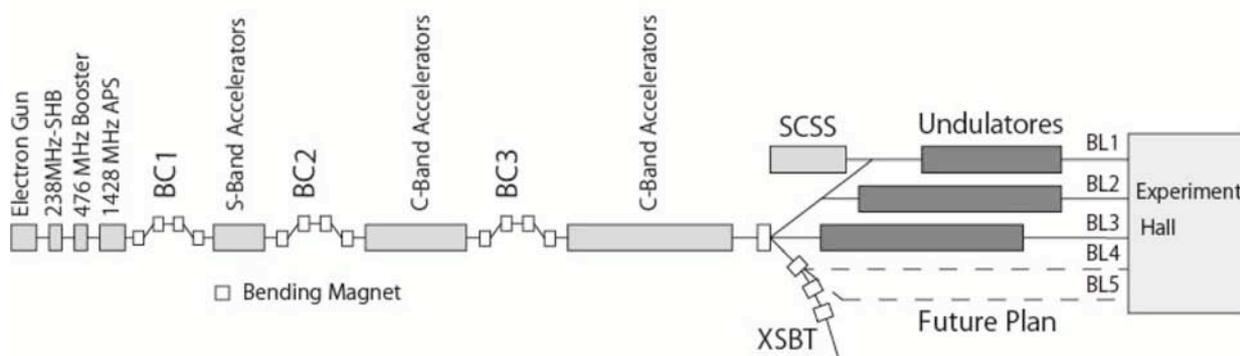


図1 SACLA の構成。左から、入射部である、500 kV 熱電子銃、238 MHz のサブハーモニックバンチャー(SHB)、476 MHz ブースター、1428 MHz Alternating Periodic Structure (APS) 高周波空洞。続く、バンチ圧縮器の BC1~BC3、それぞれの BC の前にあるビームにエネルギーチャープを与える S (2856 MHz) バンド加速管と C (5712 MHz) 加速管、8 GeV に加速する C バンド加速管、X 線レーザーを発生するアンジュレータである。

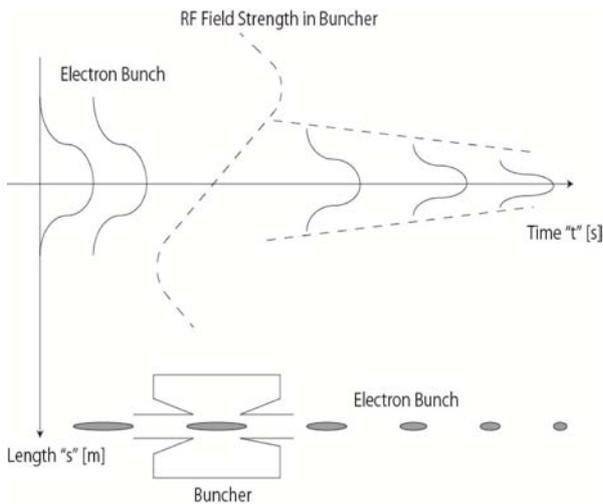


図 2 バンチャーでの電子の速度変調によるバンチング過程。バンチャー中の加速および減速高周波電場により、通過電子に速度変調が生じ、空洞後のドリフト空間通過後にバンチが圧縮（電子の密度変調）される。

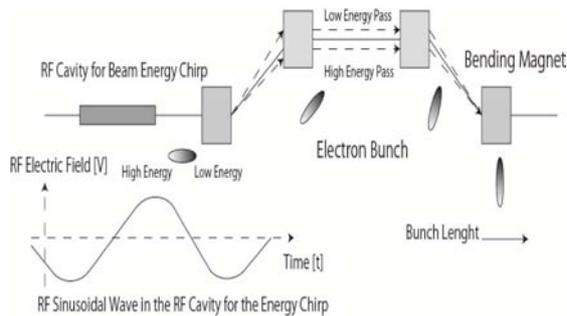


図 3 偏向電磁石によるシケインと加速空洞で構成されたバンチ圧縮器。加速空洞で与えられる電子のバンチに沿ったエネルギーチャープにより、シケイン内では電子の行路差が生じる。この行路差でバンチを圧縮する。

電子ビームをバンチ圧縮により生成するしか方法がない。このことから理解できるように、SACLA では 3000 倍のバンチ圧縮を行わなければならない。そして、このようなキロアンペアピークでフェムト秒幅の電子ビームがアンジュレータ中を通過する。アンジュレータ中での SASE の増幅は FEL パラメータの ρ により支配されている[4]。 ρ は、

$$\rho = \left(\frac{\gamma \lambda^2 r_e n_e}{8\pi} F(K) \right), \quad (1)$$

$$F(K) = \frac{K^2}{\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)^2} \left\{ J_0 \left(\frac{K^2}{1 + \frac{K^2}{4}} \right) - J_1 \left(\frac{K^2}{1 + \frac{K^2}{4}} \right) \right\}^2, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (3)$$

で表され、ここで γ は相対論のローレンツ因子、 λ は FEL における放射する光の波長、 r_e は電子古典半径、 n_e は電子の密度（数と言っても良い）、 K は偏向パラメータ（アンジュレータパラメータまたは磁場の規格化ベクトルポテンシャル）、 J_0 と J_1 は 0 次と 1 次のベッセル関数、 λ_u はアンジュレータの永久磁石セルの間隔である。この式 (1) ~ (3) の詳細について、読者には、本 OHO スクールの中田隆次氏のテキストを参照してください。以上の式から言えるのは、電荷密度（ピーク電流）の変化がアンジュレータ中での SASE の増幅度 ρ に直接影響するということである。このことは、ピーク電流がバンチ圧縮により形成されるので、電子のパルス幅の安定性が非常に重要になることを意味する。図 2 には、入射部の速度変調バンチ圧縮によるピーク電流の形成過程を図示し、図 3 には 4 つの偏向電磁石を使った磁気シケイン（バンチ圧縮器）によるビームのパルス圧縮の過程を示す。入射部における電子のエネルギーが数 MeV 程度までの非相対論領域では、電子ビームの速度変調が可能である。

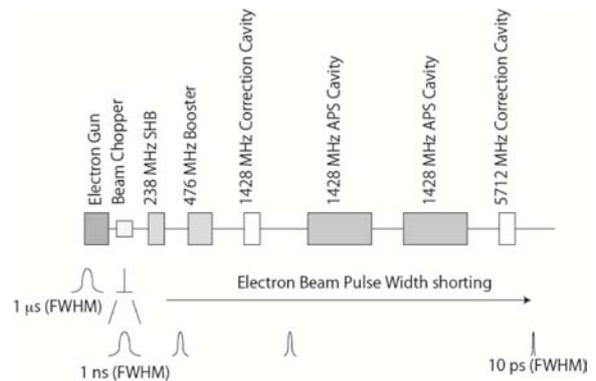


図 4 SACLA の入射部の構成。下流（左）から、500 kV 熱電子銃、ビームチョッパー、238 MHz サブハーモニックバンチャー（SHB）、476 MHz ブースター（電子のエネルギーは、1 MeV）、1428 MHz 3 次補正高周波空洞、1428 MHz APS 高周波空洞、5712 MHz 3 次高周波補正空洞である。

SACLA の場合、図 4 に示すように電子ビームは、主加速高周波数 5712MHz のサブハーモニクスである 238MHz の高周波空洞のサブハーモニックバンチャー (Sub-Harmonic Buncher, SHB) で速度変調され、その後のドリフト空間でバンチ圧縮される。その過程は、参考文献[5]の Slater の Microwave Electronics に従って以下の関係で示される。詳細については、読者には文献を参照していただきたい。まず電子銃から出た電子のエネルギー (SACLA の場合は 500 KeV) は、

$$\frac{1}{2}m_0v_0^2 = \int \rho E_{gun} ds = \rho V_0 \quad (4)$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\rho V_0}{m}} = \sqrt{2\eta V_0} \quad (5)$$

で示される。ここで、 m_0 は電子の静止質量、 v_0 は電子の電子銃から出射時の速度、 ρ は電荷、 E_{gun} は電子銃の加速電界、 s は電子の進行方向の座標 (z を使用する場合もある。)、 V_0 は加速電圧 (電子銃の印加高電圧)、 $\eta = \rho/m$ は比電荷である。この電子の初速度に対して、238MHz-SHB の高周波電界 $V_1 \sin(\omega t + \phi)$ にて速度変調される。電子の変調後の速度 $v(t)$ は、 v_0 と SHB で変調された速度 v_1 の加算になり、

$$v(t) = v_0 + v_1 = \sqrt{2\eta V_0} \sqrt{1 + \frac{v_1}{v_0} \sin(\omega t + \phi)} \quad (6)$$

になる。 ω は高周波の角周波数で、 t は時間、 ϕ は高周波の位相である。理解をやすくするために式を簡略化して $v_1/v_0 \ll 1$ で近似すると、

$$v(t) = v_0(1 + \frac{v_1}{2v_0} \sin(\omega t + \phi)) \quad (7)$$

になる。ここで電子の走行時間と言う概念を取り入れて、電子銃から SHB までの到達時間を t_0 とし、SHB 後の一定のドリフトスペース後への到達時間を t_1 とすると、

$$t_1 = \frac{s}{v(t)} + t_0 = \frac{s}{v_0(1 + \frac{v_1}{2v_0} \sin(\omega t + \phi))} + t_0 \quad (8)$$

になる。式(8)の両辺に ω を掛けて、

$$\omega t_2 = \frac{\omega s}{v_0} \frac{1}{(1 + \frac{v_1}{2v_0} \sin \omega t)} + \omega t_0 \quad (9)$$

になる。いま $v_1/2v_0 \ll 1$ とし、電子の走行角 $\theta = \omega s/v_0$ を導入すると

$$\omega t_2 = \theta(1 - \frac{v_1}{2v_0} \sin(\omega t + \phi)) + \omega t_1 \quad (10)$$

になる。次に電子の s 方向の集群度合いを表すバンチングパラメータ $X = (v_1/2v_0)\theta$ を導入すると、

$$\omega t_2 = \theta - X \sin(\omega t + \phi) + \omega t_1 \quad (11)$$

なる。この式は単粒子の運動を記述しているが、 s 方向に分布を持つ単粒子の集まりである電子ビームにおいても成り立つ。また、個々の粒子の乗る高周波位相を考慮して空間電荷効果などの非線形の効果を見捨てた場合にも、近似的に成り立つ。であるので、SHB 下流のドリフトスペース長を固定すれば、電子ビームが速度変調される SHB の高周波位相を変化させることにより、ドリフトスペース終端でのバンチ幅が変化することは容易に理解できると思う。同様に、SHB への高周波投入電力の変化も速度変調電場強度を変化させることから、バンチ幅が変化することも理解できると思う。この電子集群の様子を描いた図をアップルゲートダイアグラムと言うが、その一例を図 5 に示す。このことから言えるのは、ビームの電荷量が保存すると仮定すると、電子を集群させるに従いピーク電流が増加することである。このため、前記したようなアンジュレータ中での電子ビームのピーク電流を安定化するためには、SHB などの入射部空洞の高周波電力および位相を安定化しないとイケない。

今までは、入射部の電子の速度変調によるバンチ圧縮過程に使用する SHB などの空洞の高周波電力・位相安定性が、X 線のレージングの安定化にどのように寄与するかを述べて来た。本稿では、これに加えて、入射部後段のバンチ圧縮器による電子ビームのピーク電流形成過程の安定性が、レージングの安定化に重要であることを述べる。バンチ圧縮器の動作については、以下に文献[6]の DESY (ドイツの加速器研究所) の報告や、文献[7]の International Committee for Future Accelerator (ICFA) の報告に従って説明する。ここでは紙面や講義時間が無いので、読者には、詳細に関して文献を参照していただきたい。バンチ圧縮器 (Bunch Compressor, BC) の一般的な構成は 4 つの偏向 (2 極) 電磁石からなるシケインで、図 3 に示すものである。この場合での

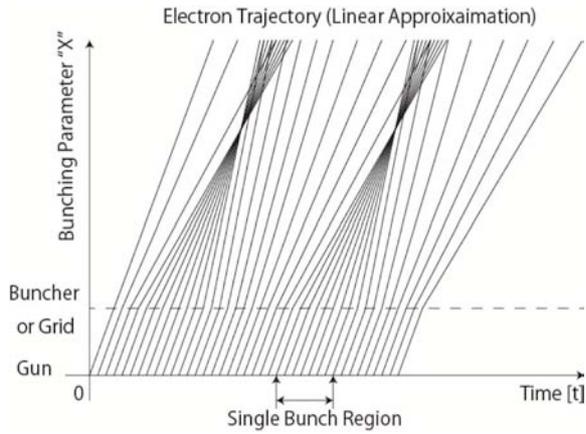


図 5 アップゲートダイアグラム。クライストロンの設計で使用される図である。電子ビームは高周波が入力された空洞を通過する時に速度変調される。その後、電子がドリフトスペースを通過する後に密度変調（バンチ圧縮）に変換される。その様子をバンチングパラメータ X を使い模式的に描いた図である。

ビームの軌道偏差（バンチ幅と直結）と運動量幅の関係は、モーメントムコンパクションファクター（ビーム輸送マトリックス表現では、 R_{56} 成分で表される。） α_c を介して、

$$ds = \alpha_c \frac{dE}{E} \quad (12)$$

で表される。この式で E は電子の運動量で、 s は電子の進行方向の長さである。ここでの dE は、バンチ圧縮器に入射される電子バンチのエネルギー変動やバンチに沿ったエネルギー幅である。SACLA のバンチ圧縮器（図 1）の場合、 dE は、電子銃による熱的（エミタンス）なもの、入射部の速度変調で与えられるもの、バンチ圧縮のためにシケイン前段の L-band 加速空洞でバンチの時間方向（ビームの進行方向）に与えられるエネルギーチャープ（変調） $hs_0 = dE/E$ である。エネルギーチャープは、図 3 に示すようにバンチ圧縮器前段の高周波空洞の加速電圧で決まる。電子の加速エネルギーは、加速電圧 V から

$$E(s_0) = \rho V \cos(\phi + ks_0) \quad (13)$$

で表される。ここで s_0 はビームの縦方向（進行方向）のシケインへ入射する前の位置で、 $k = 2\pi/\lambda$

λ は加速周波数の波長、 λ は空洞内の高周波の管内波長である。この式を展開すると、

$$E(s_0) = E(1 + p's_0 + \frac{1}{2}P''s_0^2 \sim) \quad (14)$$

になる。この場合、エネルギーチャープ hs_0 は p' の 1 次微分の項で、

$$hs_0 \equiv p' = -\frac{\rho V}{E} k \sin(\phi) \quad (15)$$

である。この場合、シケインに入射される電子ビームのエネルギー分散 δ は、入射部で形成されるランダムな初期エネルギーの分散 δ_{inj} とエネルギーチャープ hs_0 の加算である

$$\delta = hs_0 + \delta_{inj} \quad (16)$$

で表される。次にシケイン通過後のビームの縦方向の位置 s_1 は、 α_c に相当するビームの伝送マトリックスの縦方向分散 R_{56} を使用して高次の項を無視すると、

$$s_1 = s_0 + R_{56}\delta \quad (17)$$

で表される。最終的に s_1 は、

$$s_1 = (1 + hR_{56})s_0 + R_{56}\delta_{inj} \quad (18)$$

になる。以上の式は、個々の電子について言えることで、圧縮される最終的な電子ビームの幅 σ_s は、電子ビームの縦方向の個々の電子の集合平均を取って、

$$\sigma_s = \sqrt{(1 + hR_{56})^2 \sigma_0^2 + R_{56}^2 \sigma_{inj}^2} \quad (19)$$

になる。いま δ_{inj} が非常に小さいと仮定すると、

$$\sigma_s = |1 + hR_{56}| \sigma_0 = \frac{\sigma_0}{C} \quad (20)$$

になる。ここで C はバンチ圧縮係数である。この式から、エネルギーチャープ h を与える高周波空洞の位相変化と圧縮されたバンチ幅の変動の関係は、

$$\frac{\Delta\sigma_s}{\sigma_s} \simeq (1 - C)(3 \tan \phi + \frac{1}{\tan \phi}) \Delta\phi \quad (21)$$

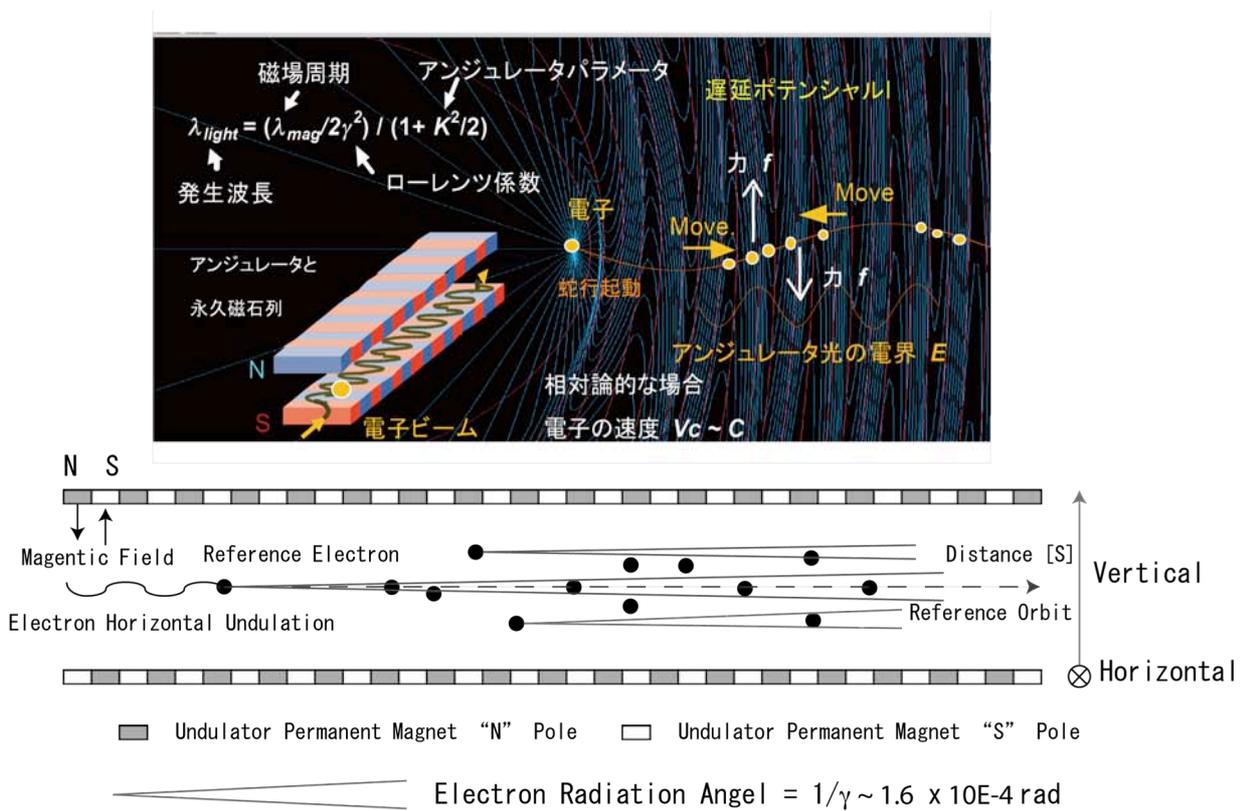


図 6 アンジュレータ内での電子のマイクロバンチ形成の模式図。アンジュレータ磁場で蛇行したバンチの後ろの電子から放射される光（遅延ポテンシャル）で、バンチ前方の電子のマイクロバンチが形成される。このことから、前方の電子の放射した光の $\theta = 1/\gamma$ の狭い角度内にほぼ前方の電子が入らないと、マイクロバンチが形成されない。

になる。いま $C \gg 1$ で、高周波位相がクレストから大きく外れない場合 $|\phi| \ll 1$ だとしたら、(21)式は、

$$\frac{\Delta\sigma_s}{\sigma_s} \simeq -C \frac{\Delta\phi}{\phi} \quad (22)$$

で近似される。すなわちこの式から、電子ビームをバンチ圧縮するためのエネルギーチャープを与える高周波空洞の位相変動が、第一次近似を考えれば、直接バンチ幅の変動につながる事が理解できると思う。また、このバンチ幅の変動が、ピーク電流の変動に直接つながることも簡単に理解できると思う。

2.2. 空間変動に関する影響

アンジュレータ中で安定に SASE の増幅を行うためには、以上のような電子ビームの時間的な安定性に加えて、空間的な指向性の安定度も重要である。アンジュレータ区間では、通過する電子とそれにより発生する光が安定に重なり合わなけ

れば、両者の相互後作用によるマイクロバンチの形成は望めない。この重なり合わせ、OF、とピアス増幅度定数 ρ との関係は、

$$\rho = \frac{OF^{\frac{1}{3}}}{\gamma_0} \left(\frac{\omega_b K}{4ck_u} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (23)$$

で表せる。ここで $OF = \sigma_b / \sigma_r$ 、 σ_b は電子ビームの rms サイズ、 σ_r は放射した光の rms サイズ、 γ_0 は電子の静止エネルギー、 k_u は λ_u の端数、 ω_b は電子のプラズマ周波数である。この式の詳細に関しては、過去の OHO 加速器スクールの文献[8]などを参考にさせていただきたい。繰り返になるが、アンジュレータ中で電子と発生した光による安定な相互作用を行い X 線レーザーを非線形増幅するためには、両者の重なり合わせが重要である。その重なり合わせの過程を図示したものが図 6 である。図から簡単に理解できると思うが、SASE の増幅を行うためには、遅延ポテンシャルである後方の電子から発生した光

表 1 SACLA の高周波空洞の電力・位相の許容値

Cavity	DV/V (%rms)	Df (deg. ms)	Dt (ps rms)
238 MHz SHB	0.01	0.01	0.12
476 MHz Booster	0.01	0.02	0.12
L-band Cavity Cor.	0.03	0.06	0.12
L-band Cavity APS	0.01	0.06	0.12
C-band Cavity Cor.	0.1	0.1	0.049
S-band Accelerator	0.01	0.1	0.097
24C-band Accel. (up-stream)	0.01	0.2	0.097
104 C-band Accel. (Down-stream)	0.01	0.5	0.24

が先行する電子と同一軌道を取る、すなわち先行電子に当たらなければ相互作用は望めない。

3. X 線自由電子レーザーで必要な安定度とそれに影響する外乱要因

3.1. 必要な機器の安定度

X 線レーザーの強度変動を統計的な SASE の自然の変動である 10 % (rms) に押さえるためには、前節で述べた入射部やバンチ圧縮用のエネルギーチャープをビームに与える高周波加速空洞の位相と電力の変動を、表 1 に示す値以下にしなければならない。この事はシミュレーションから導き出されている。[9] 5章で後述する SCALA における安定度に関する実験でも、シミュレーションで導かれた安定度が必要であると言う傍証が得られている。

3.2. 安定性に影響する外乱要因

前節で述べたように、入射部高周波空洞の位相や電力変動、バンチ圧縮のためのエネルギーチャープをビームに与える高波空洞の位相・電力変動が、主に X 線レーザーの特性変動に直結する。この節では、現実にこのような電子ビームへの外乱要素としてどのようなものがあるかを論ずる。外乱要素とは何であるかであるが、10 秒以上の長期およびそれ以下の短期の温度変動や機械振動と電気ノイズが上げられる。ここでは取り扱を容易にするために、仮に 10 秒以上を長期でそれ以下を短期と定義して、外乱要素をノイズと総称する。長期ノイズは、たとえば機器の周辺温度などで、変化の波長 (周期) が装置の構成要素の大き

さより長くて装置全体に同相で影響を及ぼすものである。短期ノイズは、機械振動や電気ノイズなどで、ノイズの波長 (周期) が機器の大きさと同等か短いことが多くて非同期 (random) に機器へ影響することが多い。そのことを高周波空洞の加速電圧を例にとって式で表すと、同相の長期ノイズは

$$\delta V_{acc} = \delta V_{cav1} + \delta V_{cav2} + \delta V_{cav3} \sim + \delta V_{cavn} \quad (24)$$

で表され、また短期の非同期の成分は

$$\delta V_{acc} = \frac{\sqrt{(\delta V_{cav1})^2 + (\delta V_{cav2})^2 + (\delta V_{cav3})^2 \sim + (\delta V_{cavn})^2}}{\sqrt{n}} \quad (25)$$

で表される。[10] ここで δV_{acc} は加速器全体の加速電圧の変化、 $\delta V_{acc1} \sim \delta V_{accn}$ は個々の加速空洞の加速電圧の変化、 n は加速空洞の番号を表す添

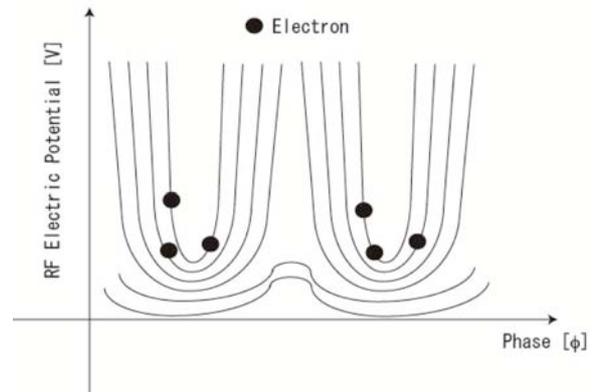


図 7 リニアック加速管中の位相空間と電子。電子が準光速になると、電子は加速管中の高周波位相のどの点でも加速および減速される。よってポテンシャルの底 (安定点) は無い。これは、ある意味では不安定な機械であることを意味する。

え字である。それぞれの加速電圧の変化は、以降に説明する加速器の構成要素からのノイズで発生する。そのノイズは、電気ノイズであり機械的な空洞の振動ノイズなどである。ここで特に重要なのは、線型加速器は、円形加速器と異なり位相安定性による電子ビーム軌道の安定解を持たない。すなわち図 7 に示すように、線型加速器は加速電子が相対論的 (準光速) になると、位相空間のセパトリクスが上に開き、どの高周波位相でも

加・減速されてしまうことである。[5] 基本的に電子線型加速器は、強制的に帰還制御をしなければ安定化しない開ループ制御の装置である。それ故に線型加速器に於いては、構成機器の安定性を個々に追求していかないと安定した加速が実現しない。そうでないと、安定な X 線レーザーも望めない。

それでは、上記ノイズが如何に電子ビームに影響を与えるかである。たとえば、環境温度の変化は高周波加速空洞の大きさを金属（一般的には銅）の線膨張率に従って変化させる。それにより共振周波数が変わり、加速電子ビームから見た空洞内の高周波位相を変動させて、バンチ圧縮条件を変化させる。機械振動は高周波加速空洞を揺らし、ビームの軌道が固定していたとしても空洞との相対位置が変わる。この相対位置変化は、空洞内の加速高周波共振モードの位置に依存した強度分布に従って、振動により電磁場の強度が変化して電子に横方向のキックなどの摂動を与える。また、加速高周波信号に含まれる電気ノイズは、先に述べた電子バンチの圧縮過程でエネルギーチャープを与える高周波の位相を振る。以上に述べたような、X 線自由電子レーザーの安定性に影響する外乱の種類を表 2 に整理する。

表 2 SACLA への外乱要素

外気温の変化	受電電圧の変動
日射の変化	商用電源周波数とその高調波のリプル
地動	機器の生み出す電気ノイズ
地面・床面の変動	機器の生み出す機械振動（ポンプの脈動など）

4. 機器の安定化と低ノイズ化対策およびその実例

4.1. 安定化と低ノイズ化対策の概要

表 2 に示すレーザー増幅に対する外乱の一番大きなものが、外気温の変動である。これに対しては、建物の外気に対する断熱効果を向上させる必要がある。加えて、個々の装置に付随した外装ラックなどで温度絶縁や温調を行い、恒温化する必要がある。これにより、外気から装置への何重かの熱絶縁を施す。もちろん原理上は、1 重（たと

えば建物）の熱絶縁のみでも恒温化は可能である。しかし現実には、1 重では X 線自由電子レーザーに要求される安定度に達するのは難しい。たとえば現状の SACLA の性能を維持するためには、入射部の高周波加速空洞において 10 mK の温度安定度が必要である。これを 1 重の熱絶縁や温度制御で実現しようとする、非常に大きな冷却水量とヒーターによる、広いダイナミックレンジの帰還制御が必要である。詳細は後述するが、気温変化に対応する数十 K におよぶダイナミックレンジで、10 mK に及ぶ繊細な制御精度を両立するのは困難である。以上に加えて、温度変化は装置の伸び縮みも引き起こす。金属の線膨張係数はだいたい $10^{-4} \sim 10^{-5}/\text{K}$ である。アンジュレータラインなどのレージングに必要な 10 μm 以内のアライメント[11]では、温度変化による機械の架台の高さの変化も無視できない。それは、室内の 1 K の温度変化で、その高さが 10 μm 以上の変化になるからである。電気的な素子も温度係数を持ち、特に高周波のものは温度変化で位相や電力が変化する。この対策には、低線膨張率の加速器装置の架台を使用したり、低温度係数の高周波電力・位相制御素子を使用したりするなどの対策が考えられる。

表中の機械振動の要素は、主に装置に使用されている冷却水や空調の風に起因するものである。このような影響の例としては、高周波ケーブルや光ファイバーケーブルの恒温化に使用する冷却水用ポンプの脈動ある。この脈動が、ケーブルを伝送する高周波の位相を変化させた実例がある。もちろん、機器収納ラックなどの冷却用ファンによる風に起因するケーブルの振動も、高周波ケーブルの場合は無視できない。以上に加えて、加速器やアンジュレータビームライン自身も、建屋の地盤が弱かったり、架台が脆弱に出来ていたりする場合は、表層地盤の振動増幅効果や架台の倒立振り子的な動作により特定の固有周波数の振動が起こる。このような機械振動を減衰させ影響を受けにくくさせる、機械構造や架台も重要である。

電気的なノイズの要素では、商用電源の 50 Hz や 60 Hz のリプル成分、熱ノイズ（ジョンソンノイズ）、ショットノイズなどが加速高周波に混入すると、空洞の加速電圧を変化させてビームを不安定にする。この電気ノイズを低減するためには、磁気、電気シールドを充実したり、なるべく自己ノイズの小さい素子を装置に使用したり

することが重要となる。アナログ増幅器などの集積回路素子のノイズレベルは、数 nV/\sqrt{Hz} に到達しているものが多くある。その性能を如何に実装で引き出すかが重要となる。そのためには、特に回路を駆動する電源の低ノイズ化が重要である。加えてアナログ値の計測にも、同相や差動ノイズ除去を行うために、キャリア信号による変調方式（ロックインアンプ方式）や差動検出原理を応用することが考えられる。これにより計測装置を外来ノイズからの影響に強くする。基本的にノイズに強い装置を作るには、ノイズ絶縁（アイソレーション）度の高い方式を採用することが肝要である。

4.2. 実例

4.2.1 機器の温度安定化

A. 建物の外気温変化に対する熱絶縁機能の向上
 SACLA では、外気温の変化の機器への影響を最小限に抑えるために、図 8 に示すような建物の屋根も含めた外装部の 2 重化を行っている。これは、日射変化による温度変化の加速器機器への影響の軽減対策でもある。また、外気からの影響の更なる緩和のためには、内側の建物と外側の外装と間の天井裏に、建物を空調した空気の一部を排気している。このことで、天井裏の空間の温度をある程度一定に保ち、外気温の変化に対する機器収納部への熱絶縁を計っている。現在、アンジュレータ収納部に対して、同様の熱絶縁の向上のために天井裏に空調用ファンコイルの設置も進めている。SACLA の場合は、以上の熱絶縁を行うほかは、加速器収納部の厚いコンクリート（2 m 厚）の内部では積極的な空調を行っていない。地下トンネルなどもそうであるが、外気や日射への絶縁が良い場所は、年間を通じて温度はほぼ一定で 1 K 以内の変動に収まっている。この事実から、2 m 厚のコンクリートの放射線遮蔽壁を持つ SACLA の加速器収納部は地下と同等な扱いが可能では無いかと考え、積極的な空調の採用を考えなかった。空調は制御を伴うので、場合によっては、かえって温度の摂動源となり得るからである。この積極的な空調の不採用の手法の有効性は、SACLA の開発機である 250 MeV の SCSS 試験加速器のコンクリート収納部内で実証された。その時の結果としては、数ヶ月の範囲で収納部内の温度変化が 1 K を十分下回る値となって

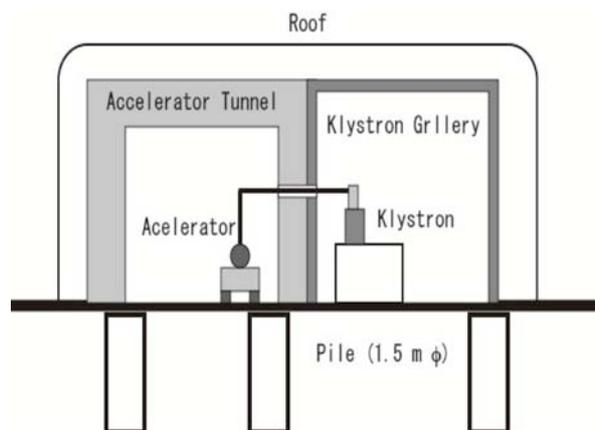


図 8 SACLA の建物の外装の 2 重化および床の下部のパイル構造。加速器本体室などへの日射や外気温の影響を避けるために外装が 2 重化されている。2 重化された中間の空間に内部の空調された空気が排気されている。これにより、2 重化と併に外気に対する熱絶縁性能を向上させている。床の下部のパイルは、直径 1.5 m のものが建物の断面で 3 本あり、建屋の長手方向に沿って 136 本ある。最長のパイルは約 60 m もある。

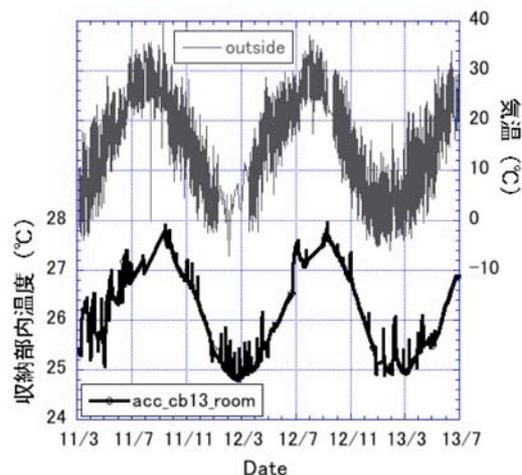


図 9 SACLA 加速器収納部の年間温度変化。年間の収納部内の温度変化は、3 K 程度になっている。

いた。この手法が正しいことの検証の後に、我々は空調の不採用の手法を SACLA に採用した。こ

の SACLA の加速器収納部内の長期温度変化を図 9 に示す。収納部の年間の温度変化は 3 K 程度に収まっており、我々の要求に対して十分な性能である。

B. 水冷による機器の恒温化

SACLA では、高周波空洞やその制御機器などの加速器構成要素は、温度安定化のために水冷を多用している。恒温化には、水冷以外にヒーターやペルチェ素子、ヒートポンプ方式など色々あるが、SACLA ではコスト面から恒温水による機器の温度安定化法を採用している。

冷却システムは図 10 に示すように、空調や機器冷却用冷媒供給源としての 17 °C 程度（可変）の 1 次冷却水と、0.1 K 程度に温調されている 26°C の 2 次冷却水に分けられる。2 次冷却水は、1 次冷却水熱との交換およびバイパス流調弁、ヒーターによる温度制御が行われており、高周波

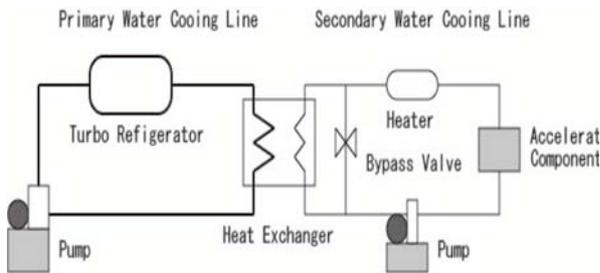


図 10 SACLA の装置冷却系。この冷却系は、建物の空調や装置冷却のための冷・熱源ラインである 1 次冷却水と、加速器の装置を冷却するための 2 次冷却水からなる。

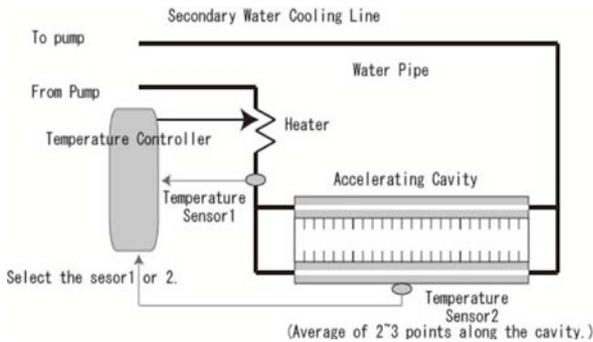


図 11 高周波空洞の精密温度制御系。入射部の空洞には高度な温度安定性が要求される。この理由から、図 10 の 2 次冷却水系には 10 mK に及ぶ恒温性を確保するために、精密温度制御装置が設置されている。

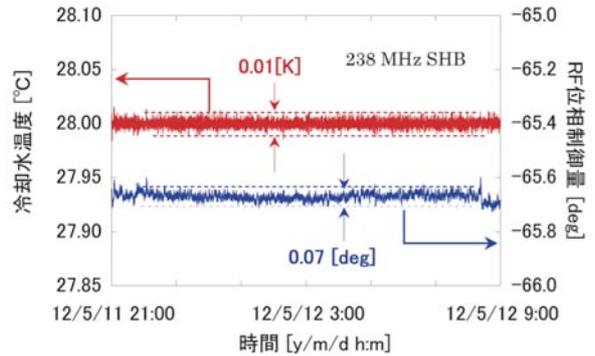


図 12 空洞精密温度制御装置の温度制御性能。238 MHz-SHB の場合を示す。空洞に入力される冷却水の温度は、10 mK 以内に制御されている。これにより空洞の高周波位相は、0.07 度以内に収まっている。

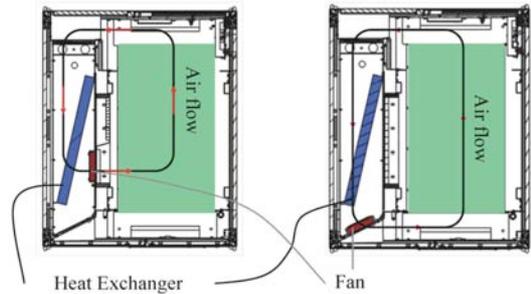


図 13 高精度低電力高周波・タイミング系用の水冷恒温 19 インチラック。0.1 K に制御された水で恒温化されたラックである。恒温水は、ラック内部の熱交換機に流され、ファンによりラック内部を閉循環する空気を恒温化する。この恒温空気は、ラック内設置機器の冷却と温度安定化を行う。特に温度安定度が必要な入射部のラックには、図 11 の精密温度制御装置が取り付けられ、10 mK の温度安定度が得られている。図中の左は、挿入機器の側面から風を入れるタイプである。これは、前面にある高周波ケーブルを風で振動させないためである。右は、挿入機の前面から風を入れるタイプである。

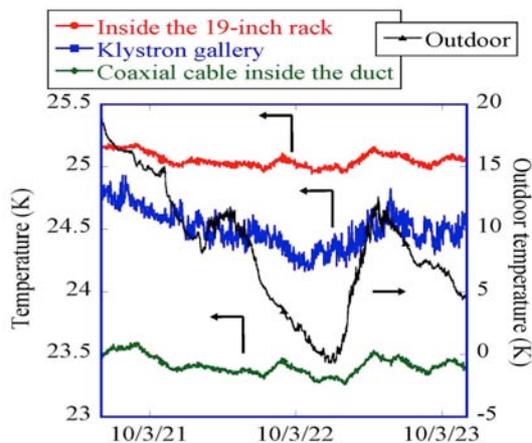


図 14 19 インチ恒温水冷ラックの温度制御性能 (1 番上の線)。3 日間で 0.2 K の範囲に入っている。2 番目の線は、クライストロンギャラリーの温度変。3 番目は外気温の変化。4 番目は、水冷恒温化された高周波同軸ケーブルの温度変化である。

空洞や高周波制御機器などを直接冷却している。更に高度な 100 mK 以下の温度制御が必要な高周波空洞などは、図 11 に示す空洞へ行く 2 次冷却水路にヒーターを直接挿入した精密温調装置で恒温化を計っている。[12] 特に温度変化に対するレージング強度への影響が大きい入射部の高周波空洞や低電力高周波機器では、精密温調装置を更に高度化した 10 mK の温度安定度を持つものを使用している。図 12 には、入射部高周波空洞の温度制御性能を示す。ちなみに低電力高周波機器は、図 13 に示す SACLA 用に開発した水冷で恒温化した密封型 19 インチラックに挿入されている。[13] 図 14 には、水冷恒温 19 インチラックの温度安定度を示す。ラックの温度安定度は 3 日間で 0.2 K の範囲に入っている。

既に述べたように、X 線自由電レーザーにおいては発生する光がフェムト秒領域の短パルスであるために、バンチ圧縮の機構で高精度な時間安定性が必要である。そのために、今まで述べた高周波空洞などの恒温化とは別に、加速器の高周波機器を駆動・制御することや電子ビームの特性を測定するために、高い時間安定度を有する基準高周波信号が必要である。加えて、時間分解を行うポンプ・プローブ実験[14]でも、安定で高い時間精度を持ったトリガーパルスおよび時間基準信号が必要である。この信号により実験機器を X

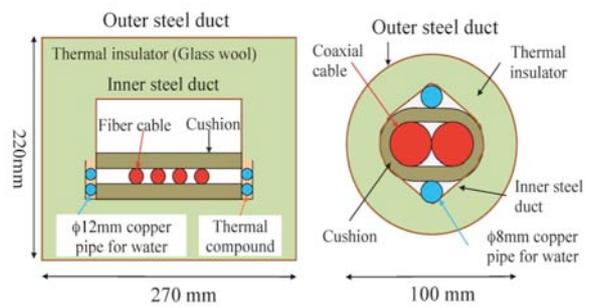


図 15 高精度時間基準高周波信号伝送のための位相安定化光ファイバー用水冷恒温ダクト。2 重の金属面および温度絶縁体で構成された温度安定化ダクトである。この構造は SACLA 用に開発され、これにより水温の 0.1 K/h の変化が 1/3 以下に低減される。

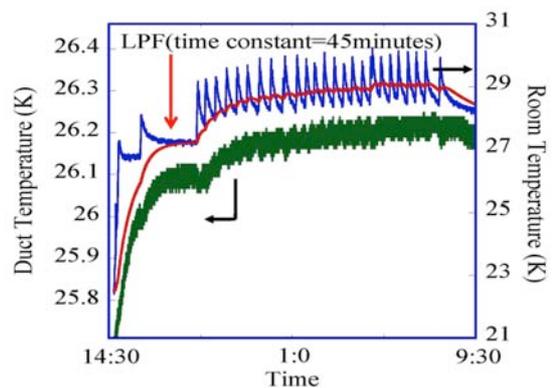


図 16 恒温光ファイバーダクトの温度安定性能。ダクトの周りの外気温 (1 番上のギザギザのあるもの、空調による変化) が 6 K 以上変化しても、下段に示したファイバーダクト内の温度は 0.3 K 程度しか変化しない。1 段目の線にかぶった 2 段目の線は、外気温の変化を数値的なローパスフィルターで平滑化したものである。

線自由電子レーザー装置に同期させて駆動させる必要がある。ちなみに現状の SACLA でのポンプ・プローブ実験は、800 nm のチタンサファイヤレーザーの短パルス (数十 fs) で物質を励起して、励起後の物質の緩和過程などを X 線レーザー (数十 fs) で時間分解する。以上の理由から、SACLA では温度変化に対する光路長の変化が少ない位相安定化光ファイバーを採用している。そ

のファイバーには、高時間精度の 5712 MHz 高周波信号と Phase Switch Keying (PSK) 手法により 5712 MHz 高周波信号にトリガーパルスを変調した信号を、波長 1.5 μm の光信号に乗せて伝送している。この位相安定化光ファイバー [15]は、20~30℃の通常環境で 2 ppm/K の光路長変化の温度係数をもつ。それでも、X線自由電子レーザー装置の km 領域の長さでフェムト秒領域の時間安定性を確保しようとすると、不十分である。SACLA の場合は、1 km に渡る時間基準伝送用の光ファイバーも、この理由から図 15 に示すような水冷で恒温化した特殊形状のダクトに納められている。[13] このダクトは、外気温の変化がファイバーに伝わりにくくした 2重の金属遮蔽と絶縁層で成っている。この機能により、外の温度変化がその内部で約 1/20 以下に低減されている。図 16 には、このダクトの温度安定化性能を示す。

SACLA では、以上に述べたものに代表される機器に対して恒温構造を多く採用しているが、そのための弊害として機器は密封構造となる。密封構造の場合、電源や高周波増幅器のような大きな発熱を伴う機器は、冷却不全が致命傷になる。致命傷にならない機器の設計として、前記した密封型の恒温水冷ラック内の冷却風の流れや発熱による機器の内部温度上昇などを、シミュレーションにより評価した。それは、例を図 17 に示す個々の機器内部の風の流れや温度上昇の計算である。それにより、機器の冷却効率が最適になりラック挿入機器が許容温度を超えないようにしている。SACLA の建設の初期段階では、試作機設計でこのようなシミュレーションを行った。その後の試作機において、機器内部の実際の風の流れおよび温度上昇を、吹き流しや冷却流体の対流の観察、熱電対やサーモビューアーによる測定により評価した。また、機器内部の部品の温度上昇も評価した。これにより、シミュレーションと実際が調和的かどうかを確認した。このようなこまめな熱設計および測定過程を経て、多くの SACLA の機器は、熱的に高い信頼性を持つ機器として完成された。蛇足かもしれないが、過熱予防のインターロックにより機器が保護されていることは言うまでもない。

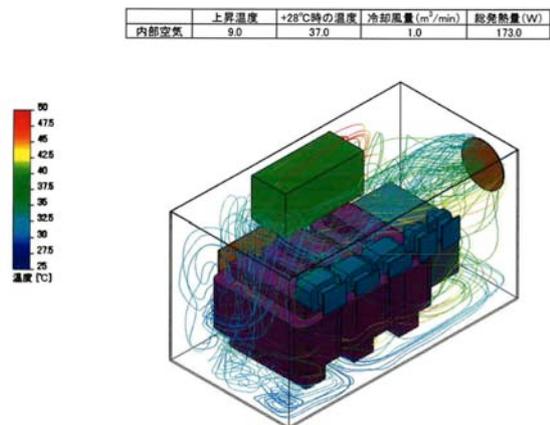


図 17 高精度低電力高周波・タイミング系用低ノイズ電源の冷却シミュレーション。冷却風と温度の計算である。この電源は、ビーム位置検出器などの精度の必要なモニター機器の電源としても使用されている。SACLA の精度の必要な電源および制御機器の多くは、このようなシミュレーションを使用して注意深く設計された。

4.2.2 機器への振動および床レベル変動の低減
 加速器構成機器の架台にかかる外力は、 F (外力) = m (架台や土台の質量) * a (加速度) で表される。外界からの振動力が既知で一定とすると、架台上に設置された機器に生じる加速度は質量に反比例して小さくなるのが式より言える。架台にかかる加速度を小さくしようとすると、質量が大きい架台の採用や非常に大きな岩盤に架台を一体と見なせるように密着することが肝要である。このことから言えることは、X線自由電子レーザー装置構成機器への振動の低減対策は、第一として強固な岩盤の上に機器を設置することである。次に質量の大きな建物を作ることである。堅い岩盤上に建物を作る場合は、パイルを無しに出来るので金銭面でも有利である。SACLA の場合、アンジュレータ用建て屋は、一部は岩盤の上にある。岩盤に建物を設置出来ない部分は、図 8 に示すように建物の下部にコンクリートパイルを使用した。岩盤が深くない場合は、碎石で土壌を置換した人工岩盤を形成して、その上に建物を建てた。岩盤の上に重い建物を作ると言っても、建設には金銭面の問題があるので限界がある。しかしながら加速器の場合は、厚いコン

クリートの放射線遮蔽が必須なので、この重いと言うことはある程度は自動的に満足している。

次に床レベルの変動低減であるが、もちろん前記したような岩盤(特に乾燥した古い花崗岩の岩盤)に建物を建てるのが非常に有利である。それ以外には、低収縮コンクリートを建物の床や構造体にも使用することも必要である。

以上のような建物の振動減衰や床沈下低減の対策以外に、振動発生源を少なくすることや装置の防振対策も重要である。特に振動の場合は、影響は kHz 程度までの可聴周波まで及ぶ。可聴周波数領域のノイズは、主に光ファイバーなどのレーザー素子や高周波信号素子に影響を与える。ちなみに、加速器の本体機器に大きく影響する振動は、数百 Hz 以下のものと考えて差し支えない。それは、機器の質量が大きく、その共振周波数がせいぜい数百 Hz までだからである。このような数百 Hz 以下の振動源として考えられるのは、冷却水の圧送ポンプによる機械振動と水の圧力脈動である。SACLA では、このような影響を低減するために冷却水の圧力を 0.3~0.4 MPa 程度に押さえている。これは、従来の加速器施設で使用されている水圧 1 MPa の半分以下である。もちろんこのような振動発生源を少なくする努力をしても、振動と言うものは地震も含めて自然に存在する。それ故に、加速器のビーム特性に重要な装置の架台や機械構造には、防振対策が必要である。このような防振と環境温度変化による高さ変動対策のために、SACLA では、図 18 に示す内部に砂を詰めて振動減衰を実現したコージライト架台を開発した。[16] このコージライトは、煙突などで高電圧をかける集塵機用のセラミック磚子なので、高温で使用可能なように非常に小さい線膨張率を持つ。加えて、内部に砂を詰めて、砂の動きによる摩擦で振動を減衰している。

このような機器の防振対策に加えて、ラックにある冷却ファンの振動による高周波ケーブルへの影響を低減するために、ファンは防振用ラバー(ゲル) ブッシュのワッシャーにより取り付けられている。更に、高精度低電力高周波タイミング用の恒温水冷ラック(図 13 左)では、冷却風がラック前面の高周波ケーブルを振動させないよ

うに、挿入機器の側面から風を入れて背面に排気するようになっている。このような細部にまで渡る工夫と配慮および努力により、現状の SACLA の安定度は達成されている。



図 18 コージライトを使用した低熱膨張の加速器用架台。コージライトは、煙突などで高電圧をかける集塵機用のセラミック磚子なので、高温で使用可能なように非常に小さい線膨張率を持つ。加えて、内部に砂を詰めて、砂の動きによる摩擦で振動を減衰している。

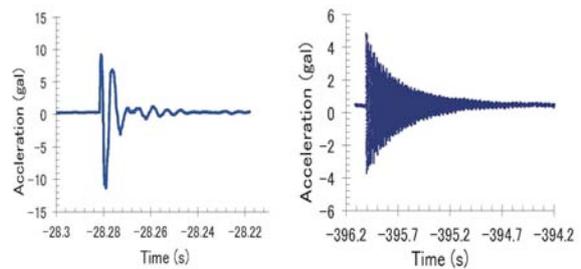


図 19 コージライトの振動減衰機能。主に架台内部に詰めた砂による機能と考えている。図の左はコージライトのインパルス応答で、右は鉄の架台のインパルス応答である。コージライトの振動減衰時間は、鉄架台に比べて 1/10 以下になっている。

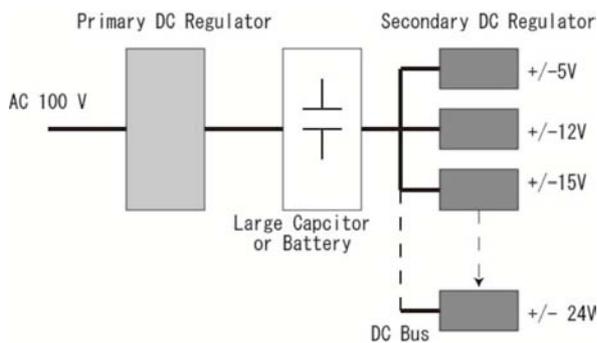
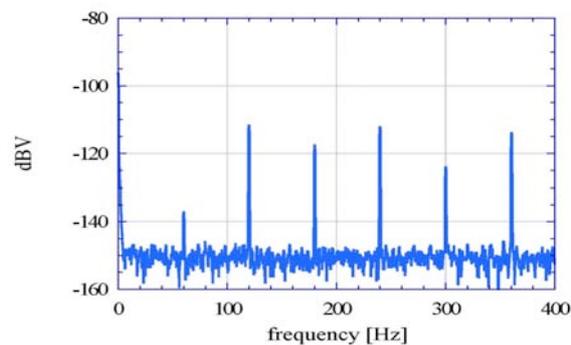


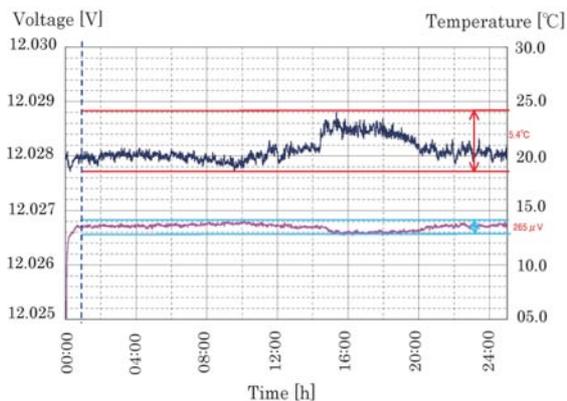
図 20 高精度低電力高周波・タイミング系の低ノイズ電源の基本構成。低ノイズで高い電圧安定性を得るための機器構成である。商用電源からいったん DC 化し、その後にバッテリー（大容量コンデンサー）に充電して、再度直流バス方式で各種電圧の直流電流を作る。これにより、電池に匹敵する低ノイズを実現している。

4.2.3 装置と電源の低ノイズ化および安定化

X 線自由電子レーザーの構成装置を開発する時は、電氣的に極端に低いノイズ性能を要求される場合がある。このように低ノイズな機器をつくる場合、機器内部の構成素子として出来るだけ nV/\sqrt{Hz} 領域のノイズ特性を持った演算増幅器（オペアンプ）などを選定するのは言うまでもない。しかしながら、このような素子はその性能を大きく製造メーカーに依存しており、我々のような末端のユーザーは部品を選ぶだけで選択の余地は少ない。性能が不十分だと言って、半導体素子などを開発するにはお金がかかりすぎる。であるが幸運なことに、現状技術では前記した nV/\sqrt{Hz} 領域のノイズを持った演算増幅器は非常に一般的である。実際に装置を製造してこのノイズレベルが達成できれば、X 線自由電子レーザーを構成する低ノイズな装置としては十分なものがあがる。しかしながら、このような低ノイズを部品実装で実現するのは容易でない。であるがこの理由から、部品実装の工夫により機器への必要な外来電気ノイズに対する絶縁度を達成して、電源を要求のノイズレベルにする。そうでなければ、素子がいくら良い性能を持っていても何の意味もなさなくなる。この点は実装なので、我々の装置開発技術の入り込む余地がある。このような技術開発の余地を使って、SCALA のために進めたのが水冷で恒温化した低ノイズ電源である。



a



b

図 21 低ノイズ電源のノイズ特性（周波数スペクトラム）”a”と長時間安定度”b”。ノイズレベルは、商用電源の 60 Hz およびその高調波成分を除けば -150 dBV に達している。電圧安定度は、12V の出力に対して 20 ppm/K に達している。

この電源では、高精度低電力高周波・タイミング機器を駆動しており、ビームモニターのデータ収集機器も同様である。これらの機器は、クライストロンモジュレーターなどからのノイズを嫌い、低ノイズ特性や長期安定度が必要なものである。基本的なノイズレベルの目標は電池のノイズ性能で、たとえば $-150 \text{ dBV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下である。ちなみに、半導体メーカーの素子のノイズ性能の評価は、電池を電源に使用して行ったものもある。この点に我々は着目して、前記したノイズ性能の達成目標を設定した。すなわち、電源に電池を応用することが目標達成の近道と考え、図 20 の構成の低ノイズ電源を考案した。[18] 電池の場合は、寿命が X 線自由電子レーザーのような常時運転の機器には、非常に問題である。この点を解決するためには、充電電池を使用して、常に電池を充

電し続ければ良いと考えた。この場合、電池とは通常の鉛蓄電池などとは限らず、容量の大きいコンデンサーなどでも良い。要は、効率の良いノイズフィルターの役目を果たせば良いのである。図 20 の電源の場合、容量の大きいコンデンサーを前段の直流電源で充電し続け、後段の直流電源で負荷である機器に必要な電圧を作る直流バスの構成となっている。この電源は、±数ボルトから±24V までの各種電圧を作り、500W の C-band クライストロン駆動用の固体化パルス高周波増幅器や IQ (Inquire Quadrant) 検出・変調器などの高周波電力・位相制御機器、諸々のアナログ値検出用の演算増幅器、低ジッターのトリガー回路などを駆動している。[19] 電流容量も、VERSAmodule Eurocard bus (VME) 駆動用の +5 V などは 50 A 近くになる。ちなみに、高精度の検出が必要な ADC や DAC が挿入されている VME フレームは、低ノイズ電源で駆動されて 19 インチの恒温水冷ラック内に設置されている。

この手法で低ノイズを実現しているが、長期の電圧安定度は、電圧温度係数の低い基準電源 (2~4 ppm/K) を採用することと、電源自身を 0.1 K 以内に制御された恒温水で冷却すること、水冷恒温 19 インチラック (温度安定度が 0.1/K) 内に設置することで実現された。開発した電源の性能の一例を図 21 に示す。ノイズレベルは、図 21-a のノイズの周波数スペクトルから判るように、-150 dBV/√Hz になる。ちなみに、通常の品質の悪い直流電源は、場合によっては 100 dBV/√Hz 以上ある。また長期電圧安定度であるが、図 21-b にその一例を示す。安定度は、電源の種類によるが数 ppm/K に入っている。このことから、この電源の品質の高さが理解できると思う。

4.2.4 ノイズの発生の低減と計測信号の伝送方式

X 線自由電子レーザーに使用する大電力機器の機器設計で大事な事は、計測機器などへ影響するノイズを少なくすることである。そのためには、機器の電磁シールドを良くするなどの工夫が必要である。加えて、電子ビームと大電力機器を商用電源同期にすることも、商用周波数やその高調波のリップルの計測機器への影響を低減すると言う意味で重要である。サイラトロンノイズの放出などを低減するために SACLA では、ステンレス容器内の絶縁油中に素子を納めたクライストロンモジュレーターを開発した。[20]

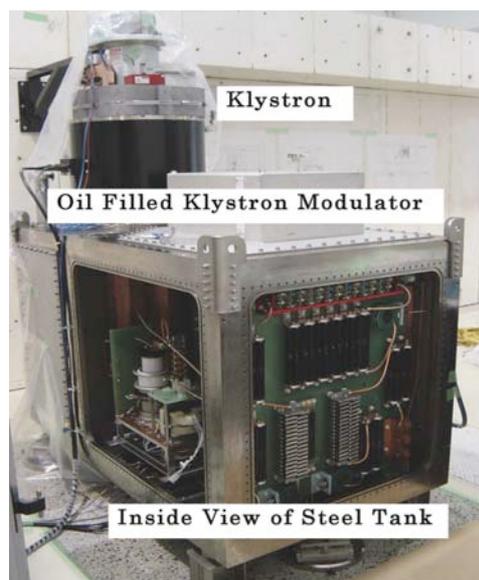


図 22 従来より低ノイズ化された、絶縁油充填型のクライストロンモジュレーター。サイラトロンノイズほかを極力容器外部の出さないように、工夫されている。そのために、機器は金属容器 (ファラデー容器) に全て収められ、外部への信号の入出力では、フィルターなどでノイズの低減に努められている。

その外観を図 22 に示す。加えて、電磁石用スイッチング電源の電磁シールドを強化して、スイッチングノイズの低減に努めた。以上のような努力をしても、まだ大きなノイズは大電力機器から発生する。このノイズの存在する環境から品質の良い計測データを取得するために、我々は以下の 2 種類の信号検出手法を主に採用している。1 つは差動検出・伝送方式で、検出器および伝送ケーブルに印加される同相のノイズを除去する方法である。もう一つは、高周波の包絡線検波も含む同期検波方式である。同期検波方式は、キャリア信号を検出信号により振幅変調をすることで、ノイズのある周波数帯から信号をシフトして検出する手法である。両方法とも、ノイズの影響低減にはそれなりに効果がある。以下に、2 種類の方法の詳細を解説して、加えて SACLA での実用例も示す。

A. 差動信号伝送

計測器に対する外来ノイズの影響を低減する方法の一つとして、差動演算増幅器の同相ノイズ除去機能がある。これは Common Mode Rejection

Ratio (CMRR) で定義され、市販の演算増幅器で -100dB 程度である。クライストロンモジュレータにおいてサイラトロン点弧などで発生する数十 Hz ~ MHz のノイズ信号から、この機能を使って検出器やケーブルへの影響を低減する。SACLA でのこのような回路の例は、図 23 に示す差動のビーム電流モニターである。[21] このシステムでは、ビーム電流を検出するコアに付随した検出軸に沿った 2 つの検出巻き線の方向が、それぞれ逆になっている。これにより、図 24 に示すビーム電流波形のような正と負極性の 1 対の差動信号を得る。この差動信号を図 25 に示すような演算増幅器を使った検出回路に入力すると、差動成分のみが増幅・伝送されてコンピュータに接続された AD 変換器に送られる。これに対して、モニター本体や信号伝送ケーブルへの外来ノイズは、一対の正極と負極信号を伝送する差動伝送ケーブル上に同相ノイズとして生成され除去される。図 26 に示した例では、同相ノイズはビーム電流の観測波形（波形自身はパルス幅が短く、オシロスコープの観測には明確に現れていない。）に重畳され、ビーム電流波形より比較的長周期のリングングとして現れている。このノイズは、正・負極の差動信号伝送線には図に示したように同相波形として現れる。このノイズ信号を差動検出システムに通すと、図に示すように演算増幅器の同相ノイズ除去の機能により大きさが低減される。このように差動検出機能は、同相成分を持つある種のノイズに対しては有効に働く。この事実により SACLA では、トリガー伝送にも Low Voltage Differential Signaling (LVDS) 方式の差動パルス信号伝送方式を採用している。[19] ちなみに、LVDS のトリガーパルスの伝送では、そのケーブルをクライストロン用高電圧インバータ電源からモジュレータへの接続ケーブルに巻いても、大きなノイズ信号の発生は観測されなかった。このようなトリガーパルス伝送への差動原理の使用を含め、SACLA では各所にこの方式が採用されている。

B. 同期検波方式

キャリア信号に変調した信号（直流成分の場合もある。）の振幅成分（包絡線、エンベロープ）を検出する方式を、同期検波（包絡線検波）と言う。[22,23] そのやり方を図示したのが図 27 である。この包絡線検波は、通常のダイオードミキサーを使用した高周波の検波方法も、デューティー

50 % のパルス列に変調された包絡線情報を検波する方法も、広義の意味で同期検波と言える。

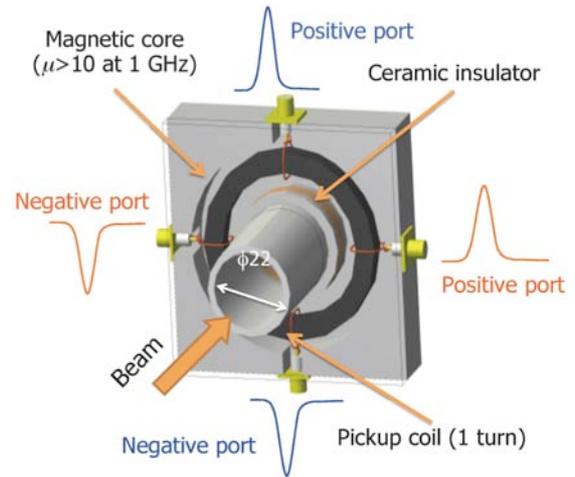


図 23 差動ビーム電流コアモニター。水平および垂直軸に沿って、電子ビームのモニターへの通過に伴ってプラスとマイナスの対の信号が出力される。その信号を演算増幅器に入力することで、差動成分の信号のみが増幅され、ノイズである同相成分は低減される。

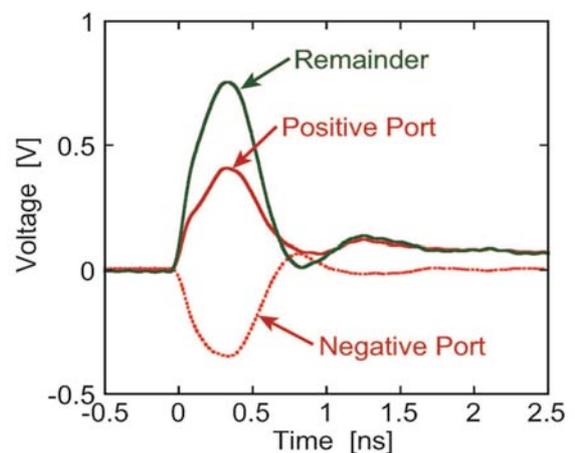


図 24 差動ビーム電流コアモニターの出力波形。500 ps 以下の高速な立ち上がり有している。図に示すように差動信号が出力され、それぞれを差し引くことで差動信号検出を行う。

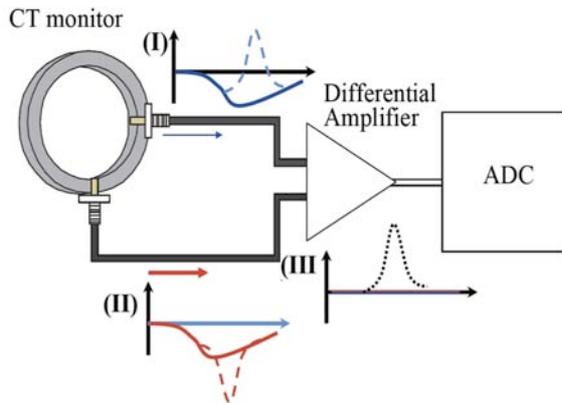


図 25 差動ビーム電流コアモニター用検出回路。演算増幅器の同相信号除去（たとえば CMNR < -100 dB）機能を利用することで、(I)と(II)の波形から同相成分（ノイズ）を除いた(III)の波形を得ることができる。その波形(III)を ADC に入力して、コンピュータによりデータ収集する。

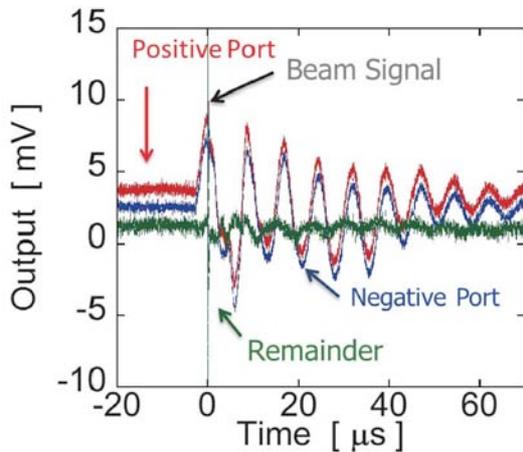


図 26 差動ビーム電流コアモニターの同相ノイズ低減機能。差動出力に同相で出力されているノイズは、同相成分の除去を行う事で低減されている。この場合の同相成分除去は、オシロスコープの演算機能による。

後者は本来の同期検波手法であり、パルス列に変調された振幅情報のみを取り出す方法である。この手法の耐ノイズ性向上の本質は、図 28 に示すものである。キャリア信号に振幅変調する過程

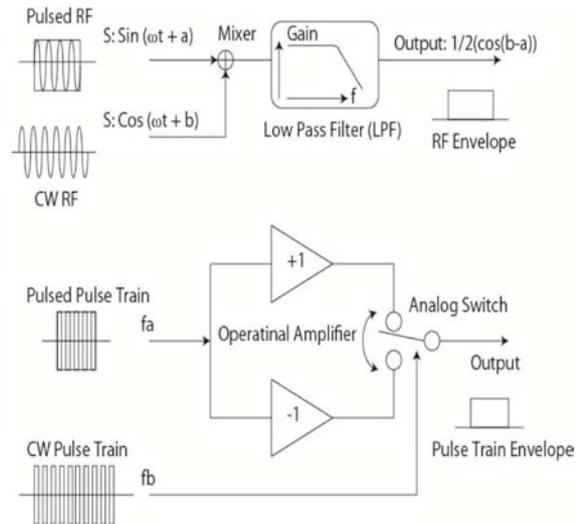


図 27 同期検波の原理。上は、高周波の振幅の包絡線検波に使用されている。検波に使用するキャリア信号は正弦波である。下は、デジタル的な包絡線検波で、ロックインアンプなどはこの手法である。検波用のキャリア信号はパルス列である。

で、信号自身の占有する周波数帯が、低周波からキャリア周波数の周りにシフトされる点である。この変調された信号を、シフト先のキャリア周波数を中心としたバンドパスフィルターに通すことで、ノイズを含めた低周波成分の信号を低減できる。この手法により検出器でのノイズの影響を少なくする。SACALでの本手法の実例は、加速管などの加速電磁場のモニターに使用している IQ 検出法が相当する。これは、IC 型のダイオードミキサーを使用した包絡線検波法に含まれる。もう 1 つの実例は、476 MHz ブースター空洞へ 80 kW の高周波電力を供給している Induction Output Tube (IOT) 用高電圧電源への応用である。この電源は、パルス幅変調 (Pulse Width Modulation, PWM) 法を使用したインバーター電源である。この電源の 38 kV の出力高電圧のモニター回路に、同期検波方式の一つであるロックインアンプが使用されている。この電圧モニターは、電圧安定化のための帰還制御ループに組み込まれている。このロックインアンプの方式では、インバーター電源のスイッチング周波数の

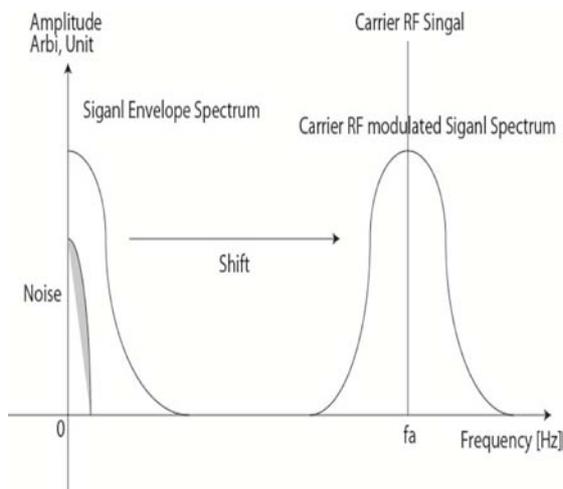


図 28 同期検波による信号周波数スペクトルのシフト。低周波にある信号をキャリア信号により変調することで、キャリア信号の周りの高い周波数にシフトする。これにより、ノイズの存在する周波数帯から逃げ、フィルターによりノイズのみを低減することが可能となる。

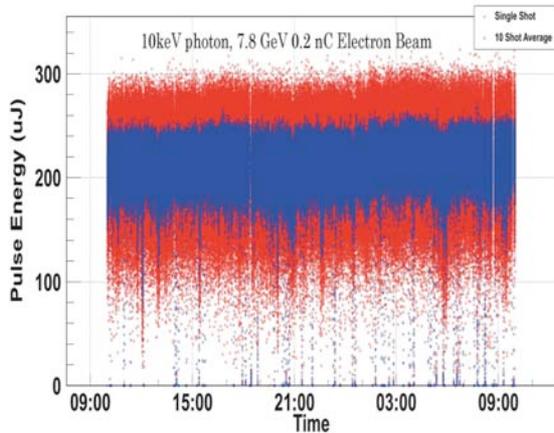


図 29 SACLA の 24 時間のレーズング強度の安定度。この安定度を実現するためには、アンジュレータラインへの入射軌道を固定する帰還制御や高周波加速空洞の電力・位相の時間基準高周波信号への帰還制御ほかを適用している。加えて、運転員の 1 時間から 30 分に 1 回程度の、入射部高周波空洞への電力・位相の微調整も行っている。これにより、ほぼ SASE の原理的な強度ふらつきである 10 % (rms) を達成している。

キャリアパルス列（デューティー 50 %）に対して、高電圧プローブの出力電圧で振幅変調している。この変調された信号は、電源本体の電圧制御回路に送られ、その後に復調器によりキャリアパルスが取り除かれて誤差検出増幅器に印加されている。IOT 電源では、この方法により数 ppm の長期電圧安定度（1 K 程度の環境温度変化）や 2~5 ppm (rms) の短期の電圧ジッターを達成している。ちなみに、スイッチングパルスは電源同期である。

5. 実現した SACLA のレーザー安定度

SACLA では、図 29 に示すほぼ 1 日で 10 % (rms) 以内の X 線のレーザー強度安定度を実現している。現状では、たとえば運転員の 1~0.5 時間に 1 度の入射部高周波空洞の電力・位相の微調整により、図のユーザー運転が可能となっている。

このような状況であるが、今まで述べてきた短期的なノイズの SACLA への影響に関する指標としては、BC3 での最終的なバンチ圧縮後のビーム到着時間の短期変動（時間ジッター）がある。この値は、バンチ圧縮過程の時間変動を表し、表 1 に示した高周波空洞群の電力・位相の許容値を満足しているかの間接的な指標になる。このビーム到着時間の時間ジッターを、ストリークカメラのような動作をする RF デフレクターで計測した値を図 30 に示す。[24] ちなみに RF デフレクター[25]の詳細については、本 OHO13 加速器スクールの恵郷氏の講義を参考にさせていただきたい。図 30 に示すビーム到着時間の時間ジッターは 22.7 fs（標準偏差 STD）であり、表 1 の空洞の高周波位相の許容値を満足していることが間接的に言えると考えている。

次に長期的な SACLA の安定度であるが、運転員の機器の微調が無く時間基準ラインへの空洞の高周波位相の帰還制御のみでも、図 31 のようなほぼ 3 日間連続のレーズングが実現できている。この安定度はいかにレーズングが維持できる程度であるが、図中のレーズング強度の変化は色々な外乱に影響されている。主なる影響は、外気温の変化による電源機器が設置してあるクライストロンギャラリーへの僅かな摂動である。その影響によるギャラリーの温度変化を図 14 に

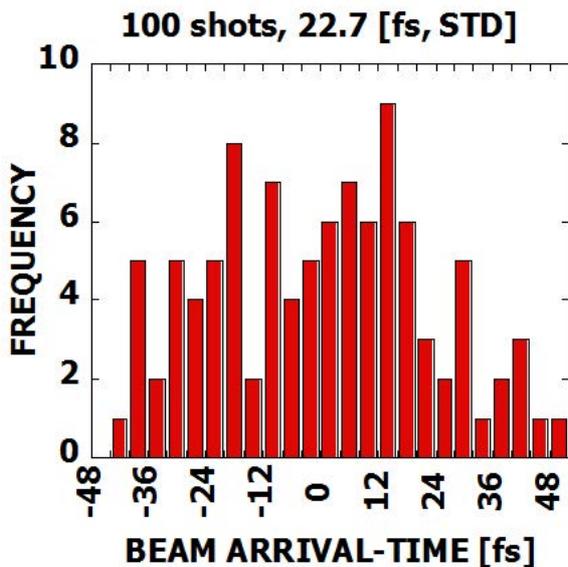


図 30 バンチ圧縮最終段の BC3 直後の位置におけるビーム到着時間のジッター。RF デフレクターで測定したものである。100 ショットの標準偏差の到着時間の値は、22.7 fs である。

示す。3 日間で 1K を下回る程度であるが、X 線自由電子レーザーにとっては大きな外乱である。図 31 から読み取れるものは、入射部末端で高周波空洞によりモニターしているビームの到達時間が 300 fs の範囲を逸脱すると、レージングの強度が低下し始めると言うものである。この値は、3 章の表 1 で述べた、バンチ圧縮のための加速高周波空洞の位相変動に対する許容値と調和的である。C バンド補正空洞(5712MHz)は、バンチ圧縮のための正弦波加速電場によるビームのエネルギーチャープの非線形性を補正するためにある。その空洞の位相の許容値は、高周波位相を時間で焼き直した値で 50 fs (rms) 程度である。それ以内でなければ、X 線レーザーの強度変動を SASE の原理的な統計的ふるつきの 10% 以内に押さえられない。この 50 fs の値は rms なので、変動がガウス分布であると仮定してピーク変動が 6 倍の標準偏差の値であると仮定すると、300 fs がピーク変動の許容値となる。この 300 fs の許容値は、非常に粗い議論ではあるが図 31 の実験結果と矛盾しない。このような変動を未だに含んでいる SACLA の機器の安定度であるが、我々は先に述べたようないろいろな改善を行っている。それは、入射部高周波空洞の温調制御性能の 10 mK 以内への向上、

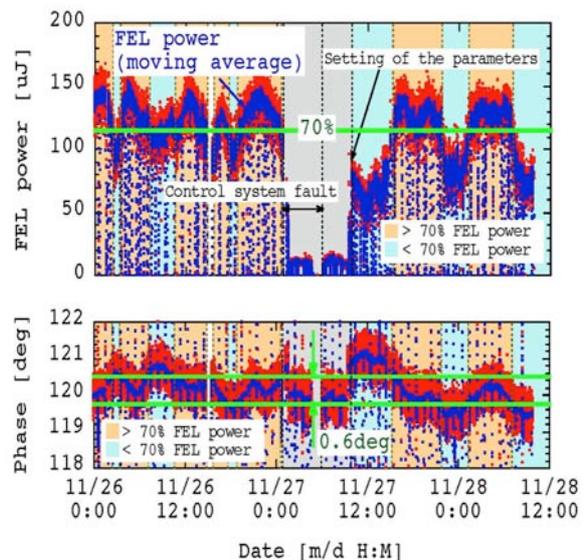


図 31 SACLA の 3 日間のレージング強度の安定度 (上)。ビームの到達時間変動 (下)。下は、入射部端の 5712MHz の空洞によるビーム誘起波の位相測定である。ここでの測定値の 5712 MHz の 0.6 度 (図中の横線間隔) は、約 300 fs に相当する。この安定度は、機器本来の安定度に近い。実験条件としては、高周波加速空洞の電力・位相制御のみを適用している。このレージング強度の変動の一番大きな要素は、外気温の変化に影響されたクライストロギャラリーの 1 K 以内の温度変化である。

入射部高周波空洞の温調ヒーター電源の直流化、アンジュレータ区間への電子ビームの入射軌道帰還制御、実験サンプル近傍での X 線レーザーの位置制御などの恒常的な安定性改善の努力である。[26] この地道な努力で、レーザーの安定度はユーザー運転が可能な程度になっている。ちなみに印象深い改善は以下である。入射部高周波空洞の温調では、ヒーター電源の直流 (DC) 化の改善までは、半導体リレーによる交流 AC のパルス幅変調 (PWM) によって行われてきた。この交流制御では、PWM によるパルス状の磁場変化によりビームがキックされ、レージング強度に影響していた。その影響である電子ビームの軌道変化の周波数スペクトルを図 32 に示す。この変動のピークの周波数は、先に述べた AC の PWM の周波数と一致していた。ヒーター電源の DC 化によって、このような電子ビームやレージング

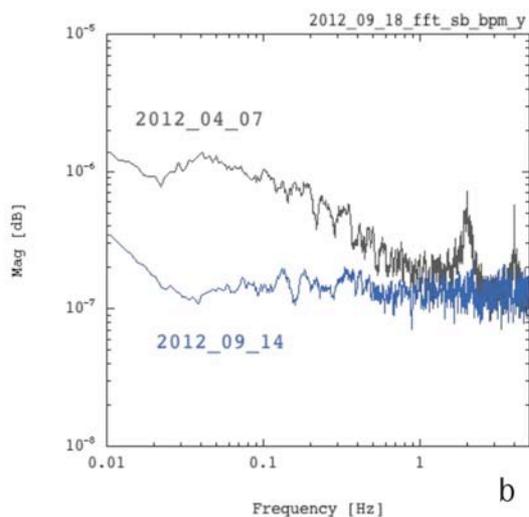
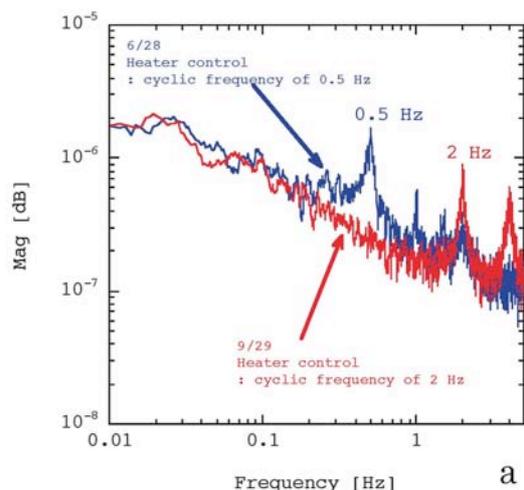


図 32 上(a)は、入射部空洞用の温度制御用 AC ヒーター電源における PWM 制御周波数に依存した、電子ビームの位置変動周波数スペクトルである。下(b)は、上のラインが AC ヒーターの状態、下のラインがヒーターの DC 化でビームへの位置外乱がほぼ消えた状態である。

に対する摂動は消えた。以上のような改善の後に、現状の X 線レーザー安定度は、図 29 に示すような 10% (rms) 程度の強度変動と図 33 に示す数十マイクロメートル (rms) 以下の位置変動に収まっている。

6. 終わりに

今まで述べてきたように、X 線自由電子レーザー装置は、その構成機器の安定度を極限まで必要

とする。その安定度は、現状の機器の計測精度をはるかにしのぐものもある。唯一、増幅するレーザーやそれを駆動する電子ビームの質のみが、構成機器の安定度を示すと言っても過言ではない。以上に述べた数々の機器の安定化、低ノイズ化、ノイズ絶縁度の強化により、SACLA はユーザー運転に供用できる程度になっている。もちろん、今まで筆者たちが行ってきた機器への安定化は、一部は過剰なものもあるかもしれない。しかしながら、この安定度は手放しで実現できるというわけではなく、1 時間に 1~2 回程度の運転員の調整を伴うものである。現在の技術水準では、これでも筆者としては至高の機器安定度と評価したい。例えば高周波空洞の駆動と言うことを例にとれば、信号源から空洞まで多分数十ではきかな

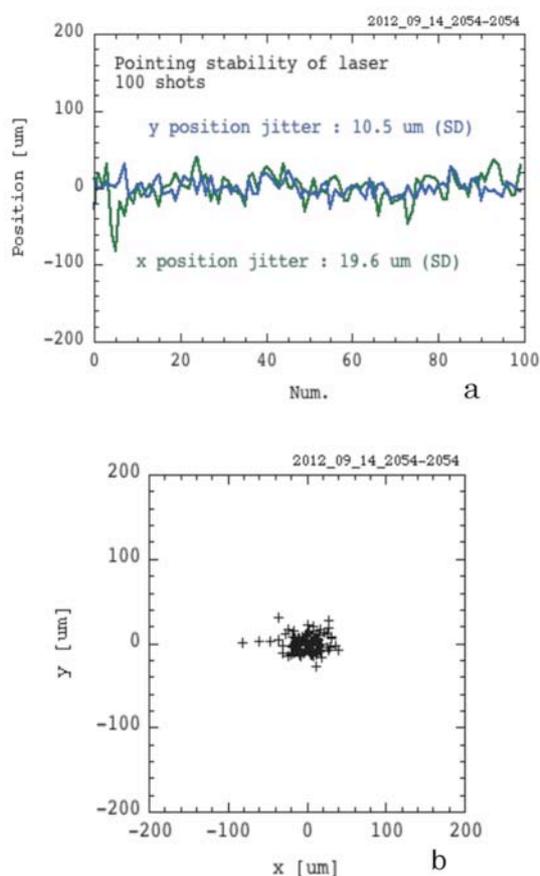


図 33 入射部空洞の温度制御電源の DC 化後の電子ビームの位置安定性。AC ヒーター時は 100 μm (rms) あった位置変動が、ほぼ rms で数十 μm 以下に改善している。上(a)が時系列のデータで、下(b)は、X-Y 軸の 2 次元のデータである。

い（多分 100 以上）素子がある。この内の一つでも必要な安定度を満足しなくて、綻びが生じたら、実現しない安定度である。しかしながら、このような地道な努力果てにも未だに手放しでレーザー増幅を維持できない装置である。それほど、安定度に関して X 線自由電子レーザーは難しい装置である。もちろん、今後のレーザー強度安定化のための更なる機器の安定化やフィードバック制御の高度化により、安定度を向上させる可能性は十分ある。筆者は、読者の方々に、大志を持ってこの命題にチャレンジしてほしいと思っています。

謝辞

本稿を纏めるにあたって、XFEL 研究開発部門のメンバーには多大な協力をいただきました。また本稿の内容は、筆者を含む SPring-8 の XFEL 建設組織である合同推進本部のメンバーによりなされた仕事であります。ここに筆者は、XFEL 研究開発部門の皆様と合同推進本部の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller, M. V. Yurkov, *The physics of Free Electron Laser*, Springer, 52 (2000).
- [2] T. Ishikawa et al., *Nature Photonics*, doi:10.1038/nphotonics (2012).
- [3] J. C. Slater, *The Design of Linear Accelerator*, REVIEW OF MODERN PHYSICS, Vol. 20, No. 3, 473-518 (1948).
- [4] T. Tanaka, T. Shintake, (Eds.) SCSS X-FEL Conceptual Design Report, (RIKEN Harima Institute, Japan, 2005).
- [5] J. C. Slater, *Microwave Electronics*, D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC., 222-232, 222-232 and 268 (New Jersey, 1959).
- [6] P. Castro, Beam Trajectory Calculations in Bunch Compressors of TTF2, 1-20 (2003).
- [7] M. Dohlus et al., Electron Bunch Compression, I. S. Ko. (Eds), ICFA Beam Dynamic Letters, Chapter 4.1, No, 38, 15-23 (2005).
- [8] 平松成範、自由電レーザー基礎論、OHO 高エネルギー加速器セミナー98 テキスト、I-1 - I-55 (1998).
- [9] 田中 均ほか、第4回加速器学会論文集、613 (2007).
- [10] 柳原弘毅、工科のための入門数値解析、共立出版、108-110 (1990).
- [11] T. Tanaka et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **528**, 172 (2004).
- [12] S. Takahashi et al., Proc. APAC2004, 678-680 (2004).
- [13] N. Hosoda et al., Proc. IPAC10, 2191-2193 (2010).
- [14] A. M. Lindenberg et al., *Science*, Vol 038, pp. 392-395 (2005).
- [15] S. Tanaka, Phase Stabilized Optical Fiber, Tec. Rep. of Sumitomo Electric Ind. Ltd., (1989).
- [16] T. Saeki et al., Proc. APAC2004, 149-151 (2004).
- [17] Yuji Otake et al., Proc. MEDSI2006, (2006).
- [18] 大竹雄次ほか、永久磁石による錘の反発浮上と板バネ振り子を併用した水平地動検出器の開発、平成13年度～14年度科学研究補助金（基盤研究(B)(2)）研究成果報告書、61-65 (2003).
- [19] Y. Otake et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **696**, 15-163 (2012).
- [20] T. Shintake et al., Proc. IPAC10, 3287-3289 (2010).
- [21] A. Higashiya et al., Proc. FEL2007, 464-467 (2007).
- [22] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, Cambridge Univ. Press, 1031-1032 (1994).
- [23] 遠坂俊昭、計測のためにフィルター回路設計、9章、CQ出版社、223-234 (1998).
- [24] Y. Otake et al., *PRST-AB*, **16**, 042802-1-15 (2013).
- [25] H. Ego et al., Proc. of IPAC11, 1221 (2011).
- [26] 大竹雄次ほか、第9回加速器学会論文集、102-107 (2012).