

# レーザーコンプトン光源のためのパルス型自発共鳴型光蓄積共振器の開発 DEVELOPMENT OF THE PULSED SELF-START BUILD-UP CAVITY FOR LASER-COMPTON BASED PHOTON SOURCES

保坂勇志<sup>#,A)</sup>, 赤木智哉<sup>B)</sup>, 浦川順治<sup>B)</sup>, 大森恒彦<sup>B)</sup>, 小菅淳<sup>B)</sup>, 本田洋介<sup>B)</sup>, 上杉祐貴<sup>C)</sup>, 高橋徹<sup>C)</sup>,  
坂上和之<sup>D)</sup>, 鷲尾方一<sup>A)</sup>

Yuji Hosaka<sup>#,A)</sup>, Tomoya Akagi<sup>B)</sup>, Junji Urakawa<sup>B)</sup>, Tsunehiko Omori<sup>B)</sup>, Atsushi Kosuge<sup>B)</sup>, Yosuke Honda<sup>B)</sup>,  
Yuuki Uesugi<sup>C)</sup>, Tohru Takahashi<sup>C)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>D)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>C)</sup> Graduate School of Advanced Sciences of Matter, Hiroshima University

<sup>D)</sup> Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

## Abstract

Laser-Compton based photon source is an X-ray source utilizing a laser-Compton scattering, but it has a problem that the brightness is low. To solve the problem concerning brightness, stacking high power pulsed laser in optical cavity with high finesse and high enhancement factor is important. Typically, the high finesse optical cavity should be controlled accurately, which has been a technical difficulty. Self-start build-up cavity is a new method to skip the difficulty. In this method, transmitted light of an optical cavity is amplified and injected the optical cavity again. Because the whole system selects a wavelength of resonance of the self-start build-up cavity, the control of cavity length is not required in principle. In this study, pulse oscillation of the self-start build-up cavity is discussed.

## 1. はじめに

### 1.1 自発共鳴型光蓄積共振器

レーザーコンプトン光源はレーザーコンプトン散乱により生成された X 線を利用した光源である。赤外・可視のレーザー光と加速器からの高エネルギーの電子ビームの衝突によりレーザーコンプトン散乱が発生し、X 線が生成される。レーザーコンプトン散乱によって生成される X 線は、波長選択性の高さや偏光調整の容易さなど他の X 線生成法に比べて本質的に優れた点を持っており、輝度が低いという問題を解決できれば優れた X 線源として利用可能である。レーザーコンプトン光源の輝度の問題を解決するには、光蓄積共振器を作成しハイパワーの短パルスレーザーを高フィネス・高増大率で蓄積させレーザーのピークパワーを上昇させることが重要である。<sup>[1]</sup> 通常、高フィネスの光共振器では非常に高い精度で共振器長を制御された高剛性キャビティの構築が必要であり、技術的な問題となっていた。

自発共鳴型光蓄積共振器はこれに対する新しいアプローチであり、光蓄積共振器とレーザー発振器を一体にすることで原理的に共鳴維持のための制御を必要としない方式のレーザー蓄積システムである。自発共鳴型の光蓄積共振器では、キャビティの透過光を増幅しキャビティの入射光とすることによってキャビティでの共振条件を満たしたレーザーのみが周回するループを作成できる。これによってキャビティを始めとする系全体が共振する波長を自発的に

選択するため、自発共鳴型光蓄積共振器では通常であれば高精度が要求されるキャビティ長制御を原理的には不要とすることができる。<sup>[2]</sup>

自発共鳴型光蓄積共振器の実用化には CW 動作における高フィネス化等、多くの検証が必要であるが、本研究は自発共鳴型光蓄積共振器のパルス発振に関するものである。

### 1.2 パルス発振

自発共鳴型光蓄積共振器のモードロックパルス発振には受動的もしくは能動的なモードロックシステムが必要である。今回、増幅部に Yb ドープのファイバーアンプを採用していることもあり、ファイバーベースのレーザー発振器として一般的に行われている非線形偏波回転(NPR: Nonlinear Polarization Rotation)を用いた受動モードロックパルス発振を軸に実験を行った。NPR によって強度に依存した非線形な偏光の回転が生まれるため、ループ内に偏光ビームスプリッターと波長板を配置し偏光回転の大きい高強度成分をループ内に多く残すように調整することによって、可飽和吸収体をループ内に配置した場合のように高強度の部分で位相を揃え、受動モードロックをかけることができる。

NPR によるファイバーベースのパルス発振には大きく分けて二種類がある。一つはループ内に回折格子対や異常分散ファイバーを導入し負の分散を与えることによって全体の分散補償をし、安定な周回を得る分散管理ソリトン型のパルス発振であり、もう一つはループ内に狭帯域のバンドパスフィルターを導入し、ファイバーループ内の正の分散によってスペクトル・パルス幅ともに広がっていくパルスの広

<sup>#</sup> uzzy@aoni.waseda.jp

がり部分を、導入したバンドパスフィルターを用いてカットし安定周回させるシミラリトン型のパルス発振である。<sup>[3]</sup>

本研究では光蓄積共振器が高フィネスとなったときにモードの制限が厳しくなりキャビティが狭帯域のバンドパスフィルターとして振舞う可能性も考慮してシミラリトン型のモードロックパルス発振を採用し、ループ内に狭帯域バンドパスフィルターを配置し実験を行った。

## 2. 実験手順

実験のために構築した空間中及びファイバーループの概略図を Figure 1 に示す。

凹面ミラー二枚を用いたファブリペロー型の光蓄積共振器を作成し、その透過光を光ファイバーに入射し Yb ドープファイバーにより増幅して再度光蓄積共振器の入射光とするループを作成した。Yb ドープファイバー励起用 LD の波長は 980 nm、出力は 330 mW。励起レーザーは WDM (Wavelength Division Multiplexed Coupler) を介して周回レーザーと同方向で入射され、前方励起となっている。狭帯域のバンドパスフィルターは中心波長 1030 nm、FWHM 3 nm であり、フィルターの角度を変更することで中心波長を若干変更可能である。

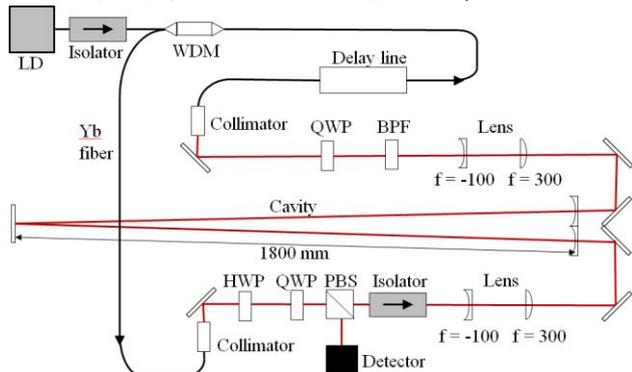


Figure 1: A schematic layout of a test of pulsed self-start build-up cavity.

当初は共振器長 450 mm の二枚ミラー光蓄積共振器を作成し試験を行っていたが、450 mm ではパルス発振時の繰り返し周波数が 333 MHz となり、330 mW の励起レーザーではピークパワーが不足し NPR による受動モードロックパルス発振が不可能である可能性が高かったため、曲率半径 2000 mm の凹面ミラーを導入し、共振器長 3600 mm・繰り返し周波数 41.67 MHz の非常に長いキャビティを持つ自発共鳴型光蓄積共振器を作成した。また、モードロックパルス発振に有利な条件にするため、凹面ミラーは反射率が 50% 程度の非常に低いものを用いている。

パルス発振時にはキャビティの周波数がファイバーループ全体の周波数の整数倍と一致していなければ周回するごとにずれが生じるため、これを一致させる必要がある。ファイバーの切断・融着により cm の精度で調整を行うが、さらに厳密な周波数調整のためにマイクロメーターによる調整が可能な

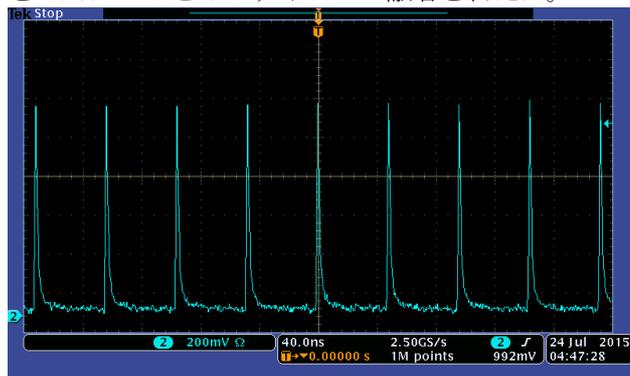
ディレイラインを Yb ドープファイバー前に挿入しており、凹面ミラーのうち一枚もマイクロメーターによる調整が可能な 1 軸ステージの上に配置されている。

## 3. 結果と考察

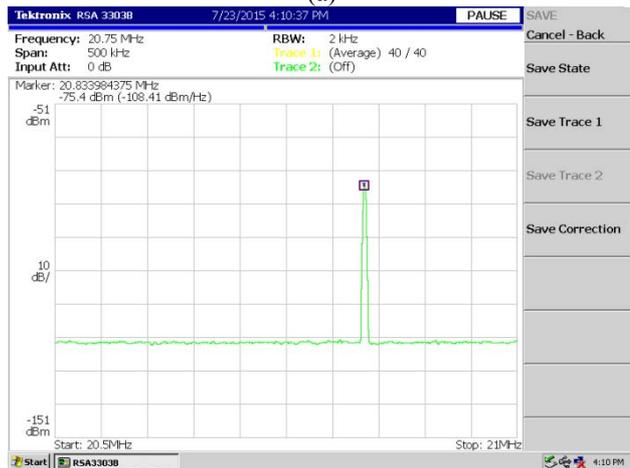
### 3.1 共振器凹面ミラーなしでのパルス発振

ループ全体の周波数の整数倍をキャビティの周波数と一致させる必要があるため、まずは凹面ミラーを取り除いた系での NPR を用いたモードロックパルス発振を行った。Figure 2 に偏光ビームスプリッター(PBS)の出力から得られたモードロックパルス発振時の時間軸の波形(a)とスペクトラムアナライザーで得られた周波数スペクトル(b)を示す。凹面ミラーを取り外すことにより通常のシミラリトン型のパルス発振が可能なファイバーループとなっているため、安定なパルスが得られた。PBS から出力されるパルスの最大強度は約 70 mW であった。

スペクトラムアナライザーによる周波数スペクトル測定からパルス発振の周波数が高精度で得られたため、キャビティ周波数の半値である 20.83 MHz へと近づける事としファイバーの切断・融着を繰り返して周波数の調整を行った。最終的にループの周波数を 20.83 MHz としファイバーの融着を終えた。



(a)



(b)

Figure 2: A waveform (a) and a frequency spectrum (b) of mode-locked pulsed oscillation.

### 3.2 共振器凹面ミラーありでの発振

Figure 3 に共振器ミラーを入れた状態での自発共鳴型の CW 発振の時間軸波形(a)と、前節で触れたループ周波数調整後に得られた自発共鳴型の発振の時間軸波形(b)を示す。自発共鳴型光蓄積共振器の CW 発振では低フィネスの場合はモードのスイッチングに由来する小さなステップ状の強度の揺れが観測されるのみだが、ループ周波数をキャビティ周波数の半値に近づけたことにより明らかなノイズが観測されるようになった。

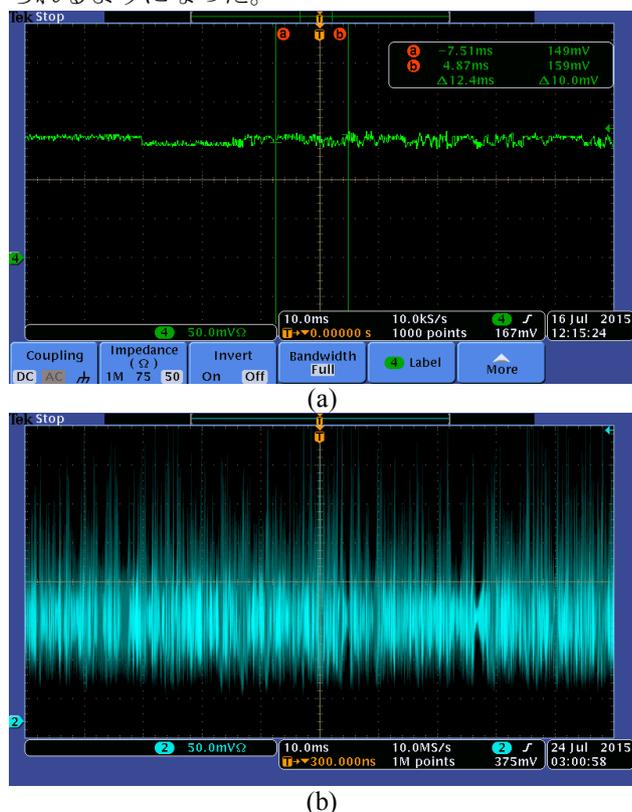


Figure 3: Waveforms of self-start oscillation before frequency adjustment (a) and after frequency adjustment (b) on the same time scale.

Figure 3(b)のループ周波数調整後の自発共鳴型発振波形の、より短いタイムスケールの時間軸波形を Figure 4 に示す。位相の完全にそろった安定なモードロック発振には至らなかったものの、パルス化の傾向のあるノイズが観測されるようになった。この波形についてスペクトラムアナライザーで周波数スペクトルを測定するとピーク周波数が 41.70 MHz であり、キャビティ周波数に強く影響されループ周波数の約 2 倍の周波数となっていることがわかった。この自発共鳴型発振のパルス性のノイズ周波数はディレイラインと凹面ミラーステージをマイクロメーターで動作させた場合に両方への依存性を示しており、これはループ周波数とキャビティ周波数の両方への依存性があることを示している。

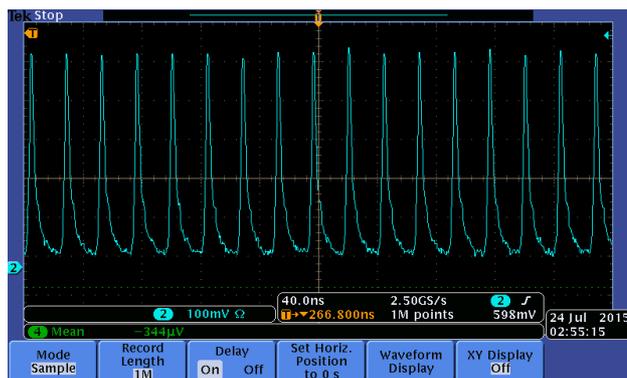


Figure 4: A waveform of self-start oscillation after frequency adjustment on a short time scale.

### 4. 結論と今後

自発共鳴型の光蓄積共振器の安定なモードロックパルス発振を目指し、反射率 50 % の凹面ミラーを用いてキャビティ長 3600 mm ・低フィネスのキャビティを作成し、時間軸波形と周波数スペクトルの測定を行った。ループ全体の周波数の 2 倍とキャビティ周波数を一致させる前は自発共鳴型光蓄積共振器によく観られる波形であったが、周波数をおおよそ一致させることによってパルス化傾向のあるノイズの観測に成功した。

今後の計画としては、まず NPR による受動モードロックを目指し周波数のより厳密な調整と、現在 60 %程度である共振器へのマッチング効率改善によるループ強度増強を行う予定である。また、現在反射率 50 %程度のミラーを使用しておりキャビティ内の増大率が理論的にも 2 倍にすぎないため、90 %から 99 %の反射率の凹面ミラーを新たに導入し増大率の上昇を狙うとともに、フィネスの変化によるパルス化傾向の違いを測定する予定である。

### 参考文献

- [1] K. Sakaue et al., “Development of a laser pulse storage technique in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering”, NIM A 637 (2011).
- [2] Y. Honda, “Development of self-start optical build-up cavity”, Proceedings of annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010).
- [3] B. Oktem et al., “Soliton-similariton fibre laser”, nature photonics 4 (2010).