

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540321

研究課題名（和文） 光ファイバーを用いた高精度同期技術の開発

研究課題名（英文） Development of an optical signal transmission system for highly stable reference signal

研究代表者

内藤 孝 (NAITO TAKASHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・専門技師

研究者番号：90391713

研究成果の概要（和文）：光ファイバーを用いて高精度同期信号を伝送するために、我々は位相安定化光ファイバーを用い伝送媒体の位相の変動を抑え、さらに多重信号伝送技術を使って往復信号の位相差を補正する技術を確立した。高エネルギー加速器研究機構、産業総合研究所で試作機の評価を行い、900mの試験ファイバーに於いて20fsの時間安定度を測定した。

研究成果の概要（英文）：A timing distribution system with femto-second stability has been developed for the RF synchronization of accelerator and the laser synchronization of the pump-probe experiments. The system uses a phase stabilized optical fiber(PSOF) and an active fiber length stabilization. The PSOF has 5ps/km/degreeC of the temperature coefficient. The active fiber length stabilization uses the phase detection of the round-trip sinusoidal wave and the deviation is compensated with the fiber stretcher. The time delay stability reached to 20fs in the case of a 900m long PSOF.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器

## 1. 研究開始当初の背景

高エネルギー物理実験や大型放射光利用に用いられる加速器では、加速装置は km 以上離れた場所に分散配置される。この間を加速粒子はほぼ光速で移動する。加速粒子の移動

に同期して安定した電界を与えることによって加速粒子は高エネルギーに達する。通常、電界は高周波によって与えられるが、高周波の加速粒子に対する位相安定性が必要となる。その基準信号の精度は ps ( $10^{-12}$  秒) オー

ダーが要求される。

長距離に渡りこの安定度を実現するには通常の同軸ケーブルでは不可能であり、我々は温度変動に対して伝送時間の極めて安定な位相安定化光ファイバーケーブルを開発し、実用化してきた。この位相安定化光ファイバーケーブルは、国内外の多くの加速器で使われ(KEKB, ATF, Spring8, JPARC, LEP など)、また、国立天文台野辺山電波望遠鏡の基準信号伝送にも用いられた。

近来の加速器技術はさらなる高安定な加速を実現するために、安定度は  $10^{-13}$  秒から  $10^{-14}$  秒が要求されるようになってきた。現在、世界各国で建設が進められている X 線 FEL の実験のための同期信号には、この安定度が必要なため盛んに研究が進められている。また、高エネルギー物理で計画されている SuperKEKB、リニアコライダー等将来加速器でも安定な加速の実現のために必要な技術となっている。電波望遠鏡(VLBI)は複数のアンテナでミリ波(数 GHz~数十 GHz の高周波)を使い電波干渉計を構成する。その精度は電波干渉計の位相安定性に依るため加速器と同様に安定な高周波伝送が必要とされる。この分野でも ALMA(Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)など巨大化するシステムにさらなる安定度が求められている。高精度時間標準の分配に於いては、原子時計により生成された時間標準信号を必要とする場所へ伝送するために精度を劣化させずに伝送する技術の一つとして光ファイバーを使った技術が使われている。位相安定化光ファイバーケーブルはメーカーと共同開発によって、世界に先駆けて我々が加速器で実証した。フィードバックによる位相補償の技術は産業技術総合研究所計測標準研究部門での実績がある。本研究は、これら二つの技術を融合することによって高精度伝送を可能にする点に特色がある。他ではなされていない試みである点に独創性がある。

この技術は、特に X 線 FEL の実験のための同期

信号としては実験の精度を決定するために不可欠の技術となっている。この技術により高精度の時間応答の測定が可能になり、物性研究の進展が予想されている。特にタンパク質などの高分子解析に大きな進展が期待される。加速器のみならず電波望遠鏡分野でこの技術を使用することによって性能が向上し、宇宙の起源の解明が期待されている。高精度時間標準の分配の分野でも、この技術によって高精度時間標準が多くの場所で使用される可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、主に粒子加速器に於ける加速粒子と加速装置の時間関係を高精度に保つための同期技術の開発に関する研究である。この技術は加速器及び実験装置の信号同期、さらには電波望遠鏡(VLBI)の基準信号伝送、高精度時間標準の分配システム等、多くの分野で必要とされる技術である。この技術によって加速器を使った省エネルギー研究、バイオ研究の進展が期待され、また宇宙物理等の研究に寄与することを目的としている。

実際の加速器で使用することによって加速器の性能が向上することを目的としており、高エネルギー加速器研究機構の加速器に於いて使用実験を行い  $10^{-13}$  秒以下の安定度の測定を目指す。近来、加速器で行われている放射光を用いたポンププローブ実験では、その安定度を指標化して評価することが出来る。また、現在開発研究が進められている ERL(Energy Recovery Linac)の試験加速器(Compact ERL(C-ERL))がビーム試験を予定している。この C-ERL のビームとの同期実験によって本システムの実用性が実証される予定である。

## 3. 研究の方法

本研究の開発計画として、1) 基準信号フィードバックに関する要素開発、2) 実際の加速器環境に於ける安定度の評価、3) 長期運用に於ける安定度の評価に分けられる。

1) については産業技術総合研究所、高エネ

ルギー加速器研究機構のテストベンチで行い試作機の評価をおこなった。評価を行ったのは何種類かの電気・光変換、光・電気変換装置に関する時間安定度を測定し、今回の目的に使用出来るデバイスの選定を行った。デバイスの評価試験を行った結果、各デバイスの温度を安定化させることが最終到達の精度を決定する上で重要であることが判明し、温度安定化するためにペルチェ素子を用いた温度安定化装置を製作し、0.02℃以下の温度安定化を実現した。この値は通常市販されている恒温槽よりはるかに良い値であり、高精度化に大きく寄与した。

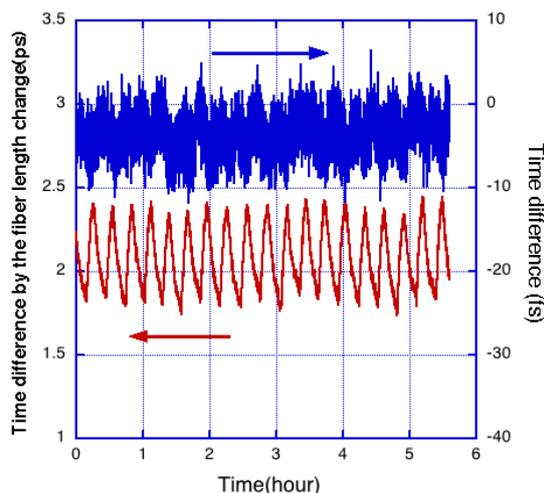
2) 3) については高エネルギー加速器研究機構の加速器に於いて行った。研究開発途中に関する諸問題については独立法人・産業技術研究所計測標準研究部門と連携し、議論を進めながら解決した。

#### 4. 研究成果

900m の試験ファイバーに於いて 20fs の時間安定度を測定した。この値は、既存の基準信号の安定度に比較して2桁安定である。

下図に試験ファイバーの長さの変動による伝送時間の変動と補正回路による時間補正を示す。

また、高エネルギー加速器研究機構 KEKB 入射器ライナックに於いて既存の基準信号と



の比較を行い十分な安定度を持つことを確認した。

初期の目的であった安定度を実現することは出来たが基準信号として実装、運用するには初期位相設定を自動で行うなど解決すべき課題もいくつか見いだされた。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1) “Optical Timing Distribution System with Femtosecond Stability”

Masaki Amemiya, Ken-ichi Watabe, Tomonari Suzuyama, Takashi Naito, Hidemi Tsuchida, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 7, Issue S1, pages*

*S187–S189, 21 December 2012,*

DOI: 10.1002/tee.21824 , 査読有

2) “System for Precise Dissemination of Frequency Standard via Optical Fiber” MASAKI AMEMIYA, MICHITO IMAE, YASUHISA FUJII, TOMONARI SUZUYAMA, TAKASHI NAITO, JUNJI URAKAWA, KIYOKAZU EBIHARA, and NOBUHIRO TERUNUMA,

*Electronics and Communications in Japan, Vol. 95, No. 3, 2012 Translated from Denki Gakkai Ronbunshi, Vol. 130-C, No. 4, April 2010, pp.*

*644–650 , 査読有*

[学会発表] (計 4 件)

1) 内藤孝、他. “光ファイバーを用いた高精度基準信号伝送システムの開発 (2)”, *8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 8–11, 2012, Osaka, Japan)*

2) “Stable RF Distribution System for the S-band Linac”

K. Ebihara, T. Naito, S. Nozawa, J. Urakawa, N. Terunuma (KEK, Tsukuba), M. Amemiya (AIST, Tsukuba), *International Particle Accelerator Conference 2012, New Orleans, Louisiana, USA,*

*May 2012.*

3) T. Naito et al., “Development of Timing distribution system with femto-second

stability”, International Particle  
Accelerator Conference 2011, San  
Sebastian, Spain, Sep. 2011

4) 内藤孝、他. “光ファイバーを用いた高精度  
基準信号伝送システムの開発”, *the 8th  
Annual Meeting of Particle Accelerator  
Society of Japan (August 1-3, 2011,  
Tsukuba, Japan)*

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内藤 孝 (NAITO TAKASHI)

機関名・所属・職名

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・加速器研究施設・専門技師

研究者番号：90391713

### (2) 研究分担者

照沼 信浩 (TERUNUMA NOBUHIRO)

機関名・所属・職名

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：70237014

### (3) 連携研究者

雨宮 正樹 (AMEMIYA MASAKI)

機関名・所属・職名

産業総合研究所・計測標準研究部門・  
主任研究員

研究者番号：20392582