

# 簡易 GPS モジュールを用いた LAN 用高精度時刻同期技術に関する検討

## Precision time synchronization technique for LAN employing simple GPS receiver module

桑野 茂\*

Shigeru Kuwano\*

### Summary

Precision time synchronization is essential for the ultra low latency services in the 5G era, and the requirement of time synchronization is sub-millisecond in general and lower than 1  $\mu$ s for mobile base stations. To achieve this accuracy by network-based synchronization scheme, distributed time server system employing GPS is an candidate for standard LAN that has large jitter in packet latency. We developed a simple and low cost network time protocol (NTP) server with simple GPS receiver module and small PC board. The achieved time synchronization accuracy of GPS module is within +/- 1 $\mu$ s under practical receiver deployment environment, and that of NTP server and a client in LAN are within +/- 10  $\mu$ s and +/- 200  $\mu$ s, respectively.

キーワード：時刻同期, GPS, ネットワークタイムプロトコル(NTP)

Keywords : Time synchronization, GPS, Network time protocol (NTP)

### 1. はじめに

5G 以降のネットワークでは、現状のパケットネットワークの仕組みを活用しつつ様々な品質のサービスを提供することが要求される<sup>1)</sup>。特に、自動運転等のリアルタイム系のサービスに対しては、Time Sensitive Network(TSN)<sup>2)</sup>で示されるような低遅延かつ遅延変動の小さいネットワークが要求される。このような低遅延が要求されるサービスにおいては、各端末の時刻の高精度な同期が必要であり、例えば携帯電話の基地局では 1 $\mu$ s 以下の時刻同期精度が要求され、さらに周波数では 50ppb 以下の同期精度が要求される<sup>3)</sup>。

このような高精度同期を実現するため、GPS 衛星を活用した同期技術とネットワークベースの同期技術を併用した同期システムが検討されている<sup>4)</sup>。この場合、GPS 衛星に搭載されている原子時計に同期する超高精度な発振器やネットワーク中でのパケットの遅延時間を高精度に計測可能なネットワーク装置を用いてシステムを構成しており、高い可用性が要求されるキャリ

アのネットワークや企業内の専用網に適用される。

一方、通常の LAN においてはそれぞれのネットワーク装置は非同期で動作しており、ネットワークベースの同期技術(Network Time Protocol(NTP)および Precision Time Protocol(PTP))で端末の同期が図られる。この際、NTP や PTP のサーバとしては GPS や原子時計に従属同期したものが用いられるが、LAN 内に多数配置されることはなく、通常のクライアントがサーバにアクセスして同期動作を行い、その周期は Linux を用いたシステムで通常数十秒から数千秒に 1 回程度である。また、サーバクライアント間の遅延時間もネットワークトラフィック変動の影響を受けて時間とともに大きく変動する(ジッタ)。このため、高い時刻精度を得ることは難しく、数 ms~数十 ms の精度となり、同期頻度が低い場合には数秒程度の誤差が生じることもある。通常の人が介するサービスにおいてはこの程度の精度で十分であるが、今後のモノのインターネット(Internet of Things(IoT))で自動運転等のミッションクリティカルなリアルタイムサービスを実現するためには、ミリ秒オ

\* 大同大学情報学部情報システム学科

データの時刻誤差は許容できない。

NTP を用いたシステムで同期精度を高くするためには、サーバとの間のパケット遅延揺らぎを抑えることとサーバへのアクセス頻度を増加させることが有効である。特に前者に関して、サーバを分散配置してサーバークライアント間のトラフィック変動を抑えて遅延変動を小さくすることが有効である。また、この場合、クライアントのサーバへのアクセスする頻度を増加させることが可能であり、統計的な処理により遅延変動を抑圧した高精度な動作が可能となる。

本稿では、NTP サーバを実験室やフロアといった範囲の LAN ごとに配置する分散型の同期システムを検討対象とし、これを実現する上で必要となる低コストで構築可能な簡易 GPS モジュールと小型マイコンを用いた NTP サーバおよび NTP クライアントについて行った同期性能評価について述べる。まず、簡易 GPS モジュールを用いたシステムについて概説したのち、その性能評価結果について述べる。次に、簡易 GPS モジュールを用いた NTP サーバならびに LAN 内に配置した NTP クライアントについて、その同期性能の評価結果について述べる。

## 2. 簡易 GPS モジュールを用いた同期システム

### 2.1 システム構成

検討する同期システムの構成を図 1 に示す。ネットワーク上に小型 GPS モジュールを接続した小型のマイコンモジュールを複数配置し、それぞれを NTP サーバとして動作させ、NTP クライアントは近接の NTP サーバに同期する構成とする。

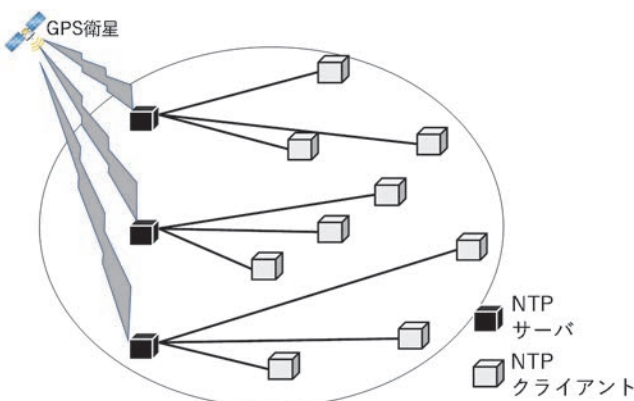


図 1: 同期システムの構成

### 2.2 GPS モジュール

図 2 に GPS モジュールの構成を示す。GPS モジュールでは 4 以上の GPS 衛星からの信号を同時に受信し、

それらの衛星の位置情報、送信および受信タイミングとからモジュールの測位情報ならびに時刻情報を演算し出力する。受信対象となる衛星はモジュールにより異なり、GPS 衛星のみではなく、Galileo, GLONASS, BeiDou に対応したものや、日本が打ち上げ運用を開始している準天頂衛星(QZSS)に対応したものもある。一般に受信可能な衛星数が多い方がより高い精度(場所および時刻)が実現可能である。

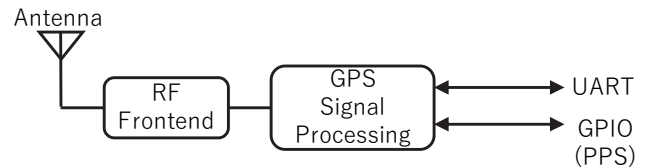


図 2: GPS モジュールの構成

### 2.3 モジュール出力信号

#### ・測位情報

測位情報はテキストデータとして出力される。フォーマットは標準である NMEA0183 にしたがっており、受信衛星数、各衛星の受信状態、位置情報、時刻情報、測位精度に関する情報といった様々な情報が 1 秒ごとに出力される。GPS モジュールからの NMEA0183 フォーマットのデータの一例を図 3 に示す。

```
$GPGGA,215959.000,3504.7602,N,13654.3563,E,2,7,1.36,24.6,M,36.7,M,0000,0000*6A
```

緯度、経度、高度、捕捉衛星数

```
$GPGSA,A,3,32,24,25,14,29,12,10,,,,,2.54,1.36,2.15*0F
```

捕捉衛星番号、測位精度

```
$GPGSV,3,1,12,32,74,325,18,25,73,049,42,14,51,319,15,50,48,166,30*7A
```

衛星番号、仰角、方位角、SN比

```
$GPRMC,215959.000,A,3504.7602,N,13654.3563,E,0.03,116.02,100617,,D*69
```

日時、緯度、経度、速度

図 3: NMEA0183 フォーマットの例

#### ・タイミング情報

図 3 に示すように、世界標準時(UTC)に関する時刻情報は測位情報と同じく NMEA0183 フォーマットで出力されるが、タイミングについては、1 秒に 1 パルスを生成する Pulse Per Second(PPS)信号として出力される。GPS モジュール内で演算される PPS パルスのタイミングは、UTC のタイミングと基本的には同期しているが、モジュールの自走の内部クロックから生成されるため、

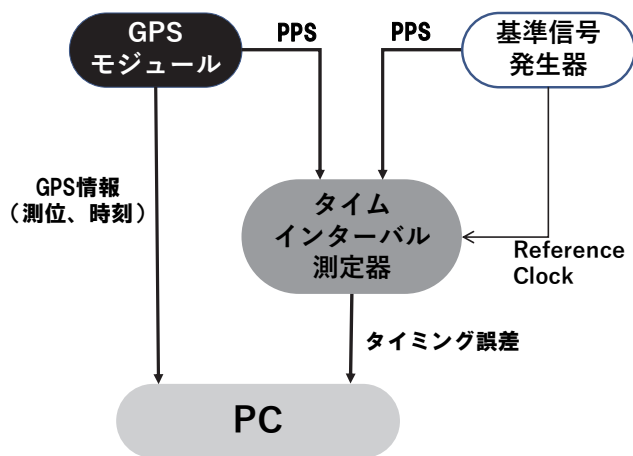
最大で内部クロックの周期分（通常数 ns 程度）の誤差を有している。また、衛星の受信状態が悪い場合には、演算による誤差が大きくなるためタイミングの誤差も大きくなる。

### 3. 簡易 GPS モジュールの基本性能評価

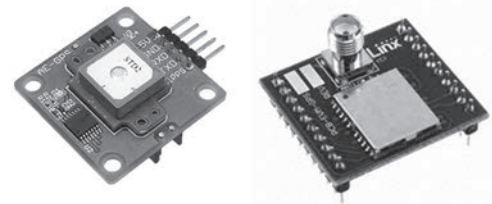
GPS モジュールは、ビルの屋上等遮るものが無く全天が見渡せる場所で多くの衛星からの電波を高い品質で受信できる場合に最高の精度を発揮できるが、実際には建物等の影になって捉えることのできる衛星数が減少することによる誤差や、建物等で反射された電波（マルチパス）の伝搬時間差による誤差が生じる。これらの影響を含めて評価するため、GPS モジュールは実験室内の窓際（東向き）に設置した。この場合、見通しが全天の半分以下となるとともに、近隣のビルからの反射によるマルチパスも受信しやすい環境となる。

#### 3.1 実験系の構成

図 4(a)に実験系の構成を示す。GPS モジュールからの NMEA フォーマットの GPS 情報をシリアル回線を介して PC に取り込むとともに、PPS 信号のタイミングを Rb 発振器を内蔵した GPS 受信機<sup>5)</sup>からの PPS 信号のタイミングと比較し、タイミング誤差を測定する。この GPS 受信機の周波数安定度は $\pm 2 \times 10^{-12}$ 以下であり、時刻精度は $\pm 30\text{ns}$ 以下である。また、タイミング誤差はユニバーサル周波数カウンタによるタイムインターバル測定により計測する。実験に使用した GPS モジュールの概要を表 1 に示すとともその外観を図 4(b)に示す。測定は各モジュールについてそれぞれ 7 日間以上連続で実施した。



(a)構成



太陽誘電製

Linx製

(b)GPS モジュール

図 4： 実験系

表 1：実験に用いた GPS モジュール

No.	ベンダ	型番	対応システム
1	太陽誘電	GYSFDMAXB	GPS
2	太陽誘電	GYSFDMAXB (QZSS 3 衛星版)	GPS, QZSS
3	Linx	RXM-GPS-RM	GPS, QZSS
4	Linx	RXM-GNSS-GM	GPS, QZSS, GLONASS, GALILEO

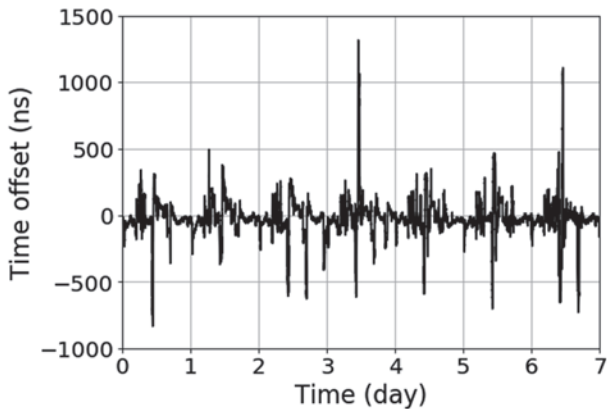
#### 3.2 評価結果

図 5 に 7 日間にわたる各モジュールの PPS 信号タイミング誤差の測定結果を示す。モジュール 1 の場合最大 $+1.5\mu\text{s}$ 程度の誤差が生じており、それ以外のモジュールでは 7 日間にわたって $\pm 1\mu\text{s}$ 以下の同期精度が実現できている。GPS モジュールの仕様上の同期精度は $30\text{ns(RMS)}$ であるが、これは常に十分な数の衛星をマルチパス等の無い環境で受信可能な理想的な場合での値であり、今回の場合、全天の半分以下の視野でありかつマルチパスのある環境であることによって仕様値よりも大きな誤差が生じていると考えられる。また、モジュール 1 で誤差が大きい理由として、受信可能な衛星数が他のモジュールより少ないことが挙げられる。このため、受信状態のよくない衛星の影響を受けやすくなっている。なお、モジュール 2,4 では $\pm 500\text{ns}$ 以下のより高い精度が実現されている。これは、どちらのモジュールも準天頂衛星(QZSS)が受信可能となっており、受信可能かつ直視可能な衛星数増加の効果によるものと考えられる。

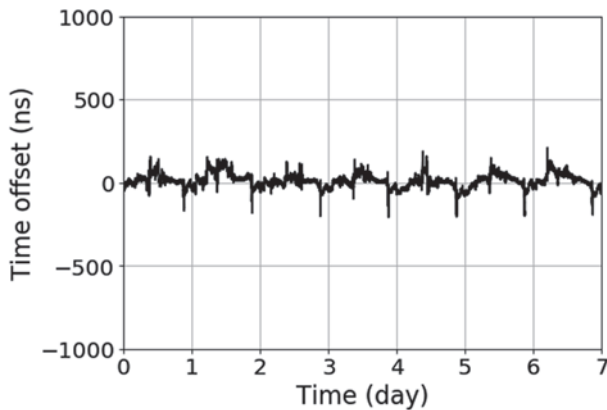
短時間での変動を確認するため、図 6 にモジュール 4 での短時間での PPS タイミングの変動を示す。数秒周期で $\pm 10\text{ns}$ 程度の変動が生じている。これはモジュール内蔵の基準クロックと GPS の基準クロックの誤差により生じているものである。両者が同期していないため誤差が累積し、それが PPS 生成の 1 クロック周期を上回ると 1 クロック分スリップすることに起因している。タイミング同期用の GPS モジュールの場合、位相

同期ループによりモジュールの基準クロックを GPS クロックに同期させることができるが、本検討では簡易なモジュールを用いたため、誤差が解消できずにこのような現象が発生している。

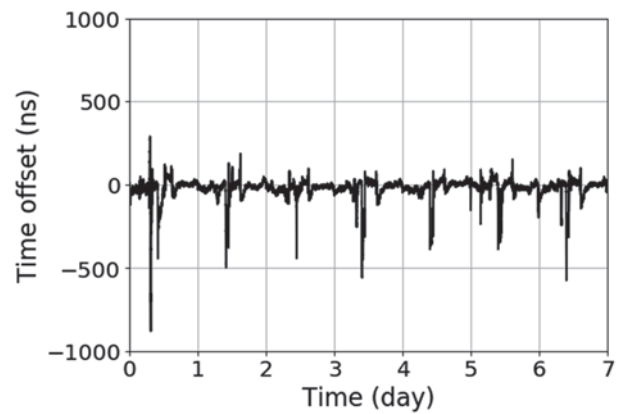
また、図 5 においてすべてのモジュールのタイミング誤差の変動にはほぼ 1 日単位の周期性が見られる。これを明確にするため、パワースペクトルを用いてタイミング誤差の周波数領域での解析を行った。モジュール 2 の 14 日分のタイミング誤差のパワースペクトルを図 7 に示す。ここで、タイミング誤差変動の周期性を明確にするため、図において、横軸は周波数ではなくその逆数である各周波数に対応する周期に変換している。図より、1 日(86400 秒)周期の強いピークとその整数分の 1 の周期のピークが確認できる。これは、GPS 衛星の公転周期 (12 時間) と昼夜間の時間帯の伝搬状態の周期に起因するものであり、1 日周期でマルチパスを含めてほぼ同じ伝搬環境で測位が行われるため、測位誤差に一日周期の強い相関が発生していると考えられる。また、図 7 において 1 秒周期の強いピークもみられるが、これは前述のモジュール内蔵基準クロックと GPS の基準クロックの間の誤差が原因で発生する PPS タイミングのスリップに伴う短周期の変動である。



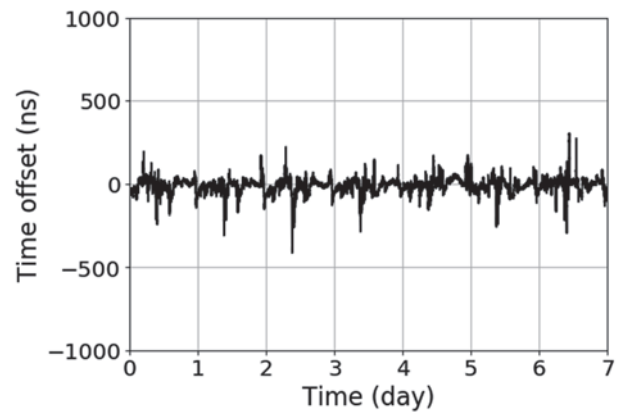
(a) モジュール 1



(b) モジュール 2



(c) モジュール 3



(d) モジュール 4

図 5 : PPS タイミング誤差測定結果

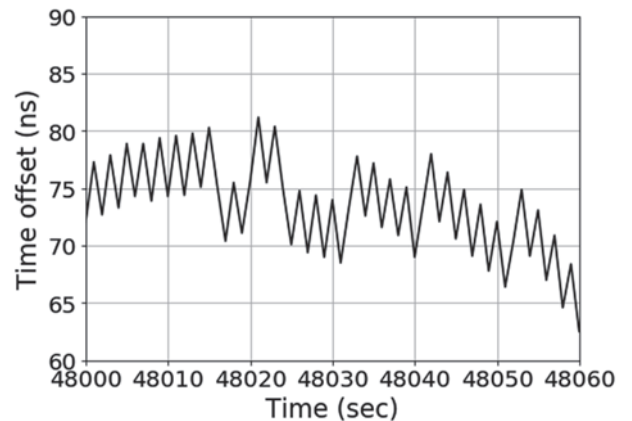


図 6 : 短時間でのタイミング誤差変動

タイミング誤差の観測時間に対する変動特性を見るため、通信系のクロックの性能評価でよく用いられる Maximum Time Interval Error (MTIE)<sup>6)</sup>による評価を行った。MTIE は観測時間( $\tau$ )内における信号のタイミング誤差変動の全測定期間における最大値(peak-to-peak)で定義され、全測定時間が  $T = N\tau_0$  で観測時間が  $\tau = n\tau_0$  の場合( $\tau_0$  : サンプル間隔), 次式で表される。

$$MTIE(n\tau_0) = \max_{1 \leq k \leq N-n} \left[ \max_{k \leq i \leq k+n} x(i) - \min_{k \leq i \leq k+n} x(i) \right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1.$$

ここで  $x(i)$  は各サンプル値を示す。

図 8 に各モジュールの MTIE を示す。また、通信系で必要とされる MTIE 値 (ITU-T のマスク値) <sup>6)</sup> も併せて示す。図より、各モジュールから出力される PPS 信号のタイミング誤差はいずれもマスク値を満足しており、通信系での時間基準としては十分使用可能なレベルであることがわかる。但し、10 秒程度の短時間で見ると、モジュール 3 を除いてマスクに近い値となっており特性としてはあまりよくない。長時間での安定度で見ると、図 5 の結果と同様にモジュール 2 が最も優れている。

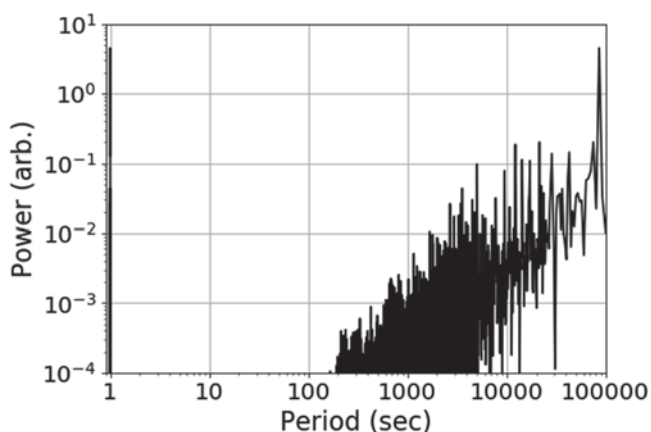


図 7: タイミング誤差のパワースペクトル

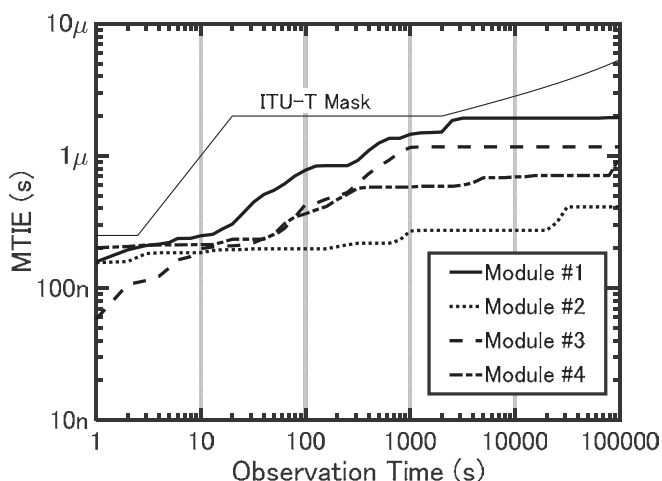


図 8: 各モジュールの MTIE

## 4. NTP サーバ・クライアント性能評価

### 4.1 NTP サーバ

図 9 に示すように GPS モジュール 1 の出力を小型マイコンである Raspberry Pi に入力し、NTP サーバとして動作させた。ここで、マイコンの OS としては Linux を使い、その上で NTP デーモンを実行することにより、NTP サーバを実現している。GPS モジュールからの NMEA フォーマットのデータは、シリアルデータとして GPIO から入力して時刻情報とする。また、PPS 信号を GPIO から入力してタイミングを調整する。これらの信号に対応するため、GPS のソフトウェアである `gpsd` を実行している。NTP サーバ用ソフトウェアとしては Linux 上の標準的な NTP サーバ<sup>7)</sup>を使用し、設定ファイルを変更することで GPS モジュールからの NMEA フォーマットによる時刻データおよび PPS 信号の入力に対応させている。

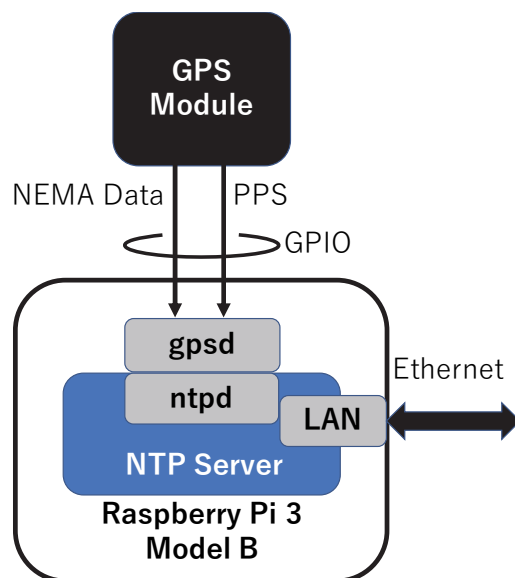


図 9: 簡易 NTP サーバの構成

NTP サーバの同期状態の例を図 10 に示す。NTP サーバが PPS 信号 (上段) ならびに NMEA フォーマットのデータ (下段) に同期して動作していることがわかる。時刻誤差(offset)はミリ秒単位で表示されており、この場合  $5\mu\text{s}$  程度となり、GPS モジュールのタイミング誤差よりも大きくなっている。これは GPS モジュールの PPS 信号のタイミング誤差に加えて、NTP サーバの処理がソフトウェアで実装されているために生じる誤差が加算されるためである。一般に誤差の大きさとしては後者の方が支配的である。また、NTP の階層としては GPS モジュールが `stratum 0` となるため、この NTP サーバは `stratum 1` のサーバとなる。

remote	refid	st	t	when	poll	reach	delay	offset	jitter
oPPS(0)	.PPS.	0	1	4	8	377	0.000	0.005	0.001
*SHM(0)	.GPS.	0	1	3	8	377	0.000	-268.32	23.661

図 10： NTP サーバの同期状態

## 4.2 NTP クライアント

NTP クライアントも Raspberry Pi を用い、NTP サーバと同様に標準的な NTP ソフトウェアをベースとして構成する。この場合、NTP クライアントのサーバへの問い合わせ周期が最小で 8 秒となっているため、より短い周期(1 秒)で問い合わせを行うことにより高精度化ができるよう改造を行っている。

## 4.3 評価結果

図 11 に NTP サーバ及び NTP クライアントの時刻オフセットの 12 時間での評価結果を示す。また、同図において、比較のため学内の NTP サーバに同期したクライアント(問い合わせ周期 64 秒以上)の時刻オフセットも示している。NTP サーバについて、 $\pm 10\mu\text{s}$  以下のオフセットが実現できており、比較的高い時刻精度のサーバといえる。また、NTP クライアントのオフセットは $\pm 200\mu\text{s}$  以下であり、クライアントにおいても 1ms 以下の高い精度が実現できている。これまでの学内サーバ(stratum 4)に同期させる方法では最大 1ms 以上のオフセットが生じている。すなわち、分散型の NTP サーバを用いた同期システムにより、クライアントにおいて 1 桁以上の時刻同期精度の向上が実現されている。

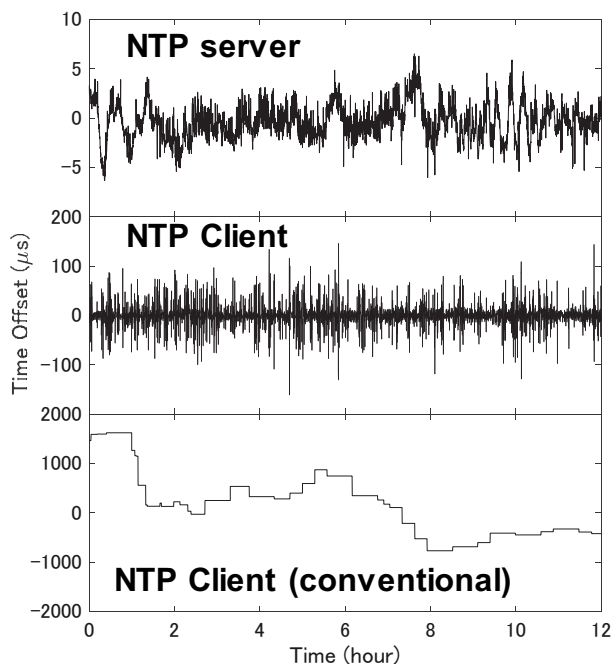


図 11； NTP サーバ・クライアントの時刻オフセット

## 5. むすび

本研究では、LAN 上の分散型の同期システムを簡易かつ低コストで実現するための、簡易 GPS モジュールと小型マイコンを用いた NTP サーバとクライアントによる同期システムについて検討を行った。

簡易 GPS モジュールの性能として、屋内設置の場合においても $\pm 1\mu\text{s}$  以下の時刻同期精度を実現している。また、この GPS モジュールからの時刻情報に基づいた NTP サーバならびにそれに同期する NTP クライアントを構成し、NTP サーバの時刻精度として $\pm 10\mu\text{s}$  以下、NTP クライアントの時刻精度として $\pm 200\mu\text{s}$  以下を実現している。

今後は、GPS モジュールの PPS 信号出力タイミングの平滑化による短時間変動の安定化、ならびに NTP 機能のハードウェア化による高精度の時刻・周波数基準の分配について検討を行い、低遅延サービスの適用範囲拡大につなげたい。

## 謝 辞

本研究での検討にあたり、特に実験系構築にご協力いただいた杉浦昂汰、鈴木陽太、渡邊 玲の各氏に感謝します。

## 参考文献

- 1) ドコモ 5G ホワイトペーパー, [https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper\\_5g/DOCOMO\\_5G\\_White\\_PaperJP\\_20141006.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf)
- 2) Time Sensitive Network Task Group, <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>.
- 3) Small cell forum, “Synchronization for LTE small cells,” SCF075.05.01, Feb. 2014.
- 4) 田代他, 信学会論文誌 B, Vol. J96-B, No.3, pp.321-329, Mar. 2013.
- 5) [https://nitsuki.com/products/broadcast/3272d\\_gps.html](https://nitsuki.com/products/broadcast/3272d_gps.html)
- 6) ITU-T G.8261/Y.1361, Aug. 2013.
- 7) <http://www.ntp.org/index.html>