

# チップスケール原子時計を搭載した 自律型時刻同期デジタルセンサモジュール

## An Autonomous Time Synchronized Digital Sensor Module with Chip Scale Atomic Clock

○倉田 成人<sup>\*1</sup>  
Narito Kurata<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> 筑波技術大学産業技術学部 教授 博士(工学)

Professor, Faculty of Industrial Technology, Tsukuba University of Technology, Ph.D.

**キーワード:** チップスケール原子時計; デジタルセンサ; 時刻同期; 構造ヘルスマニタリング; 地震観測

**Keywords:** chip scale atomic clock; digital sensor; time synchronization; structural health monitoring; earthquake observation.

### 1. はじめに

高層ビルなどの建築物や、橋梁、高速道路などの社会インフラの経年劣化が進み、これらの維持管理のための点検の自動化は重要な社会課題である。また、日本は地震等の災害が多いため、災害直後の構造物の損傷検知や被災状況の把握が求められる。こうした異常検知の自動化には、センサ群によるデータ収集と分析が有効である。筆者らは、無線センサネットワーク技術を応用して、地震観測と構造モニタリング用のセンサを開発し、超高層ビルで性能を実証した<sup>1,2)</sup>。この実証における重要な課題の1つは、センサ間の時刻同期であった。複数のセンサで計測したデータ群を分析し、構造物の構造安全性評価を行うためには、センサ間の時刻同期を確保しなければならない。無線センサネットワークシステムでは、センサ間で無線パケットを送受信することで時刻同期を実現した<sup>1,2)</sup>。しかし、無線センサネットワーク技術では、複数のビルや、橋梁などの長大構造物、広域な都市空間を対象とすることは不可能である。一方、いろいろな場所に設置したセンサが、自律的に正確な時刻情報を保持できれば、この問題を解決することができる。GPS 信号を使う方法は屋外では有効であるが、ビルの中や地下、橋梁の下部、トンネルなどでは利用できない。そこで、超高精度な時計であるチップスケール原子時計 (CSAC)<sup>3-5)</sup>を利用して、自律的に正確な時刻情報を保持するセンサモジュールのプロトタイプを製作した<sup>6,7)</sup>。次に、プロトタイプモジュールの高機能化と実用化を目指して改良を行い、実用版装置を開発した<sup>8)</sup>。さらに、開発したセンサモジュールを地震観測に応用するため、地震の発生を検知し、地震のイベントのみのデータを保存するロジックを実装し、振動台実験でその機能を確認した<sup>9)</sup>。

これらより、正確な時刻情報を自律的に保持できるセンサ装置の性能を確認し、地震観測や構造ヘルスマニタリングに応用可能であることを示した。さらに開発したセンサモジュールを実建物や実橋梁に設置して、地震観測と構造健全性評価に応用した<sup>10)</sup>。しかしながら、開発したセンサモジュールに搭載したのは MEMS 加速度センサであり、微小振動まで精度よく計測することは難しい。開発したセンサモジュールは外部アナログ入力インタフェースを装備しており、これを介して、任意のアナログセンサを接続することが可能である。高性能なサーボ型加速度センサを接続することも可能であるが、アナログ信号にノイズが混入するリスクは残る。そこで、センサモジュールに搭載する加速度センサをデジタル型として、ノイズに対するリスクを解消した。本論文で開発するデジタルセンサモジュールにはカメラセンサを接続可能とする予定であり、異種デジタルセンサプラットフォームの開発を目指している。本論文では、デジタルセンシングプラットフォームの設計について述べ、CSAC によりセンサデータに超高精度な時刻情報を付与するメカニズムと回路構成について詳細を示す。さらに、デジタルセンシングモジュールの時刻同期性能を確認するために行った試験結果について報告する。

### 2. デジタルセンシングプラットフォームの開発

センサモジュールは、通常、計測を制御する CPU、センサ、メモリ、ネットワーク・インタフェース等から構成され、CPU には水晶発振器が使われている。これに CSAC を搭載し、その時刻情報でそのままセンサモジュールの CPU を補正し、計測を行おうとすると、CSAC の計時精度が高いが故に遅延が生じてしまう。そこで、

CSAC による時刻情報を、直接、センサの計測データにハードウェア的に付与するため、専用の集積回路である Field-Programmable Gate Array (FPGA) を装備するメカニズムを開発した。これによりセンサモジュールの CPU は負担を受けず、FPGA により付与された CSAC の時刻情報を持つ計測データをメモリに保存し、ネットワーク経由でデータを収集することが可能となる。また、FPGA はプログラマブルであるため、CSAC の時刻情報を扱いながら、計測データを利用した異常検知等のロジックを組み込むことができる。これまでの開発では、アナログ型のセンサを使うことを前提としていたが、本論文では、デジタルセンサのデジタル出力に CSAC による正確なタイムスタンプを付与するメカニズムを開発した。

本研究で開発したデジタルセンシングプラットフォームとしてのセンサモジュールは、図 1~5 に示すように、CSAC ボード、FPGA (Field-Programmable Gate Array) ボード、センサボードで構成している。CSAC ボードには CSAC、GPS 等を装備し、正確な時刻情報を生成する。CSAC は数十ピコ秒級 ( $5 \times 10^{-11}$  秒) の超高精度時刻測定を実現する時計で、ボード上に実装できる超小型な外形である。CSAC ボードには、CSAC の 1 PPS (Pulse Per Second) 信号の入出力コネクタを装備している。これを利用して、センサモジュールから 1 PPS 信号を出力し、他のセンサモジュールへ入力することで同期できる。FPGA ボードは、CSAC による超高精度な時刻情報を付与しながら各センサの計測を制御し、計測データをメモリに保存した上で、データを Ethernet、W-Fi、3G 経由でネットワークへ送信する。計測データは常時計測するデータと、地震等のイベント時のみに計測するデータの 2 種類を保存する。前者は常に SD カードに保存を行い、一定量を過ぎると古いデータを削除し、新しいデータを上書きしていく。後者は、地震の始まりと終了を検知するロジックを FPGA に組み込んでおき、地震後すみやかに地震のイベントのみのデータをネットワークへ送信する。センサボードは、FPGA ボードからの指令により、センサによる計測を行う。搭載したセンサは、デジタル型高精度加速度センサ、及び温度センサである。デジタル型高精度加速度センサの仕様を表 1 に示す。センサボードには、異種デジタルセンサ間の時刻同期性能の確認用に、任意のアナログセンサを外付けで接続できる外部アナログセンサインターフェースを装備した。これには、16 bit の分解能を持つ A/D 変換器を搭載しており、通過した信号を分岐して 10 倍に増幅したデータも計測し、広いダイナミックレンジを必要とするアナログ型センサを接続することも可能である。

これらを、デジタルセンサプラットフォームとしてパッケージ化し、開発を行った。複数台のセンサモジュールを初期同期すると、その後は、自律的に高精度な時刻

情報を保有し続けるため、任意の場所に設置し、計測データをストリーミングすることもできるし、SD カードに保存しておき、任意のタイミングで収集することもできる。計測データの各サンプリングにおいて正確なタイムスタンプを記録しているため、データ収集は、Ethernet、Wi-Fi、3G などの方法を選択できる。また、GPS 信号やネットワークが利用できない場所でも、計測してデータを収集するだけで良いため、移動計測や、可搬型のセンシングシステムとしての利用にも適している。

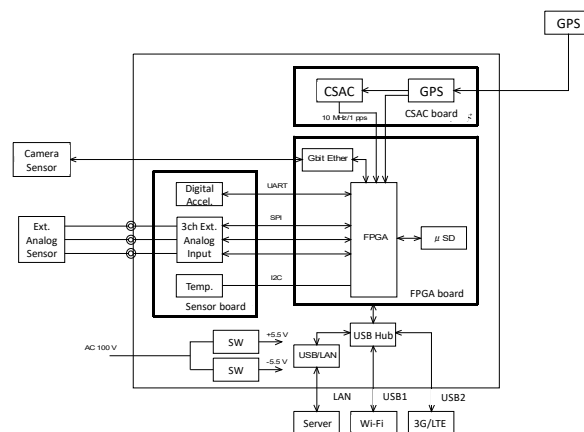


Figure 1. Circuit configuration of digital sensing platform.

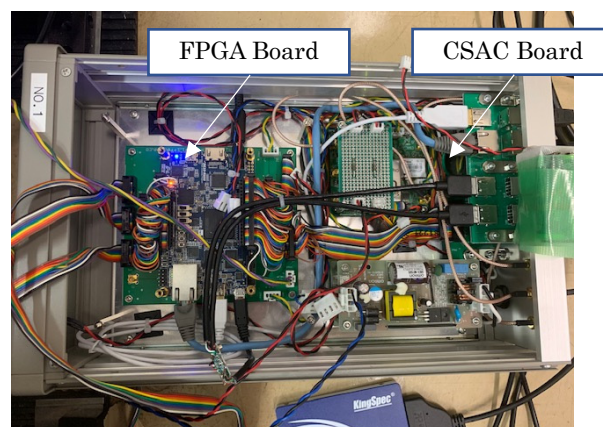


Figure 2. Configuration of sensor module.

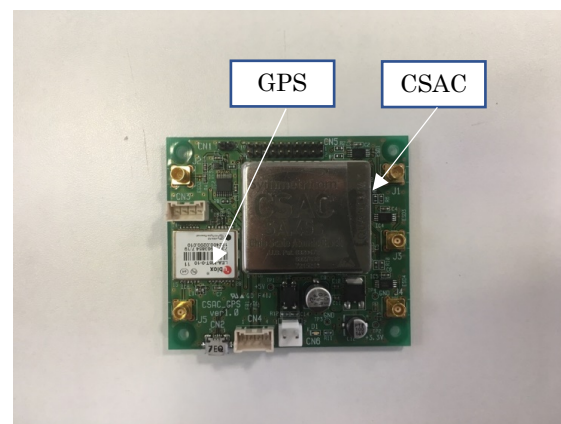


Figure 3. CSAC board.



Figure 4. FPGA board.

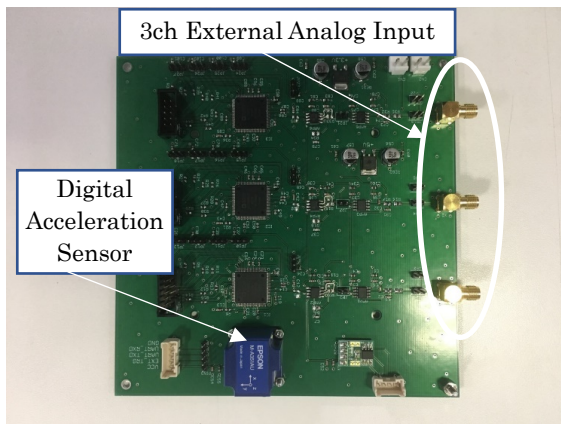


Figure 5. Sensor board.

Table 1. Specifications of the mounted digital sensor.

Model	M-A351AS、セイコーエプソン製
Range	$\pm 5\text{G}$
Noise Density	$0.5 \mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Average)
Resolution	$0.06 \mu\text{G}/\text{LSB}$
Outside dimensions (mm)	$24 \times 24 \times 19$
Operating Temperature	$-20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $+85 \text{ }^\circ\text{C}$
Power Consumption	3.3 V, 66 mW

### 3. センサモジュールの計測・時刻同期機能に関する性能確認試験

開発したセンサモジュールの計測・時刻同期性能を確認するために、振動台を用いた試験を行った。図 6、7 に示すように、3 台のセンサモジュールを振動台上に固定して水平 1 方向に対して同じ振動を加え、計測結果を比較した。試験は、2~10Hz のスイープ波 (図 8) を入力波として振動台の加振を行い、計測サンプリング周波数は 1000 Hz とした。振動台上の 1 台のセンサモジュールをマスターとして、他の 2 台 (スレーブ) の加速度計測波形のフーリエスペクトル比を取った結果を図 9、10 に示す。図 9 のフーリエ振幅スペクトル比は 2~10Hz の

振動数帯で 1.0 であり、3 台のセンサモジュールで計測した振幅が同一であることがわかる。図 10 のセンサモジュール間のフーリエ位相スペクトル比は 2~10Hz の振動数帯でゼロ近辺になっており、位相遅れが無く、時刻同期が確保できていることがわかる。これらにより、CSAC によりセンサデータに超高精度な時刻情報を付与するメカニズムを搭載したデジタルセンシングプラットフォームの時刻同期性能を確認することができた。

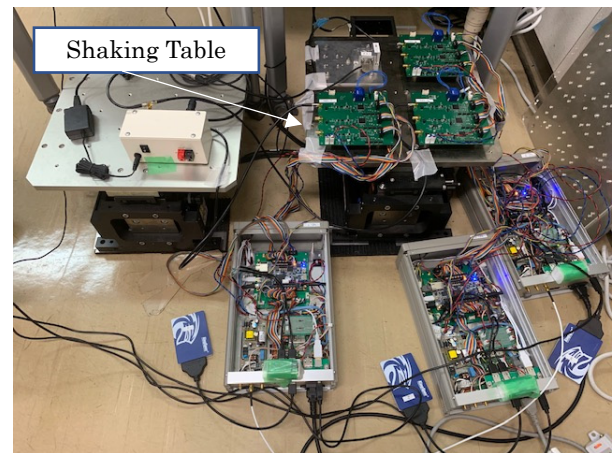


Figure 6. Experimental setup.

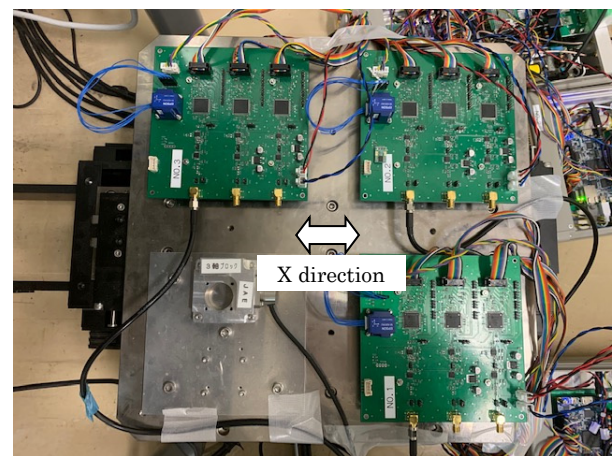


Figure 7. Sensor modules on shaking table.

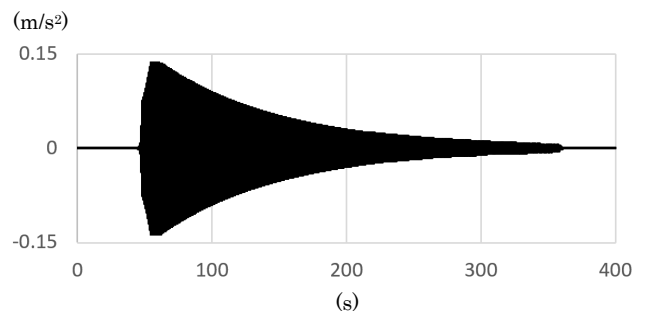


Figure 8. Input swept sine wave.

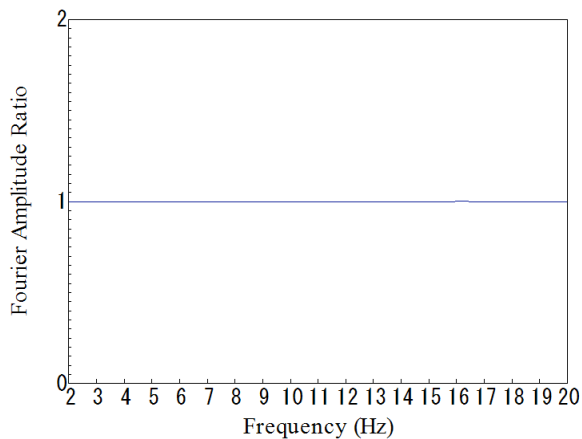


Figure 9. Spectrum ratios of Fourier amplitude of two slave modules to master module (X direction).

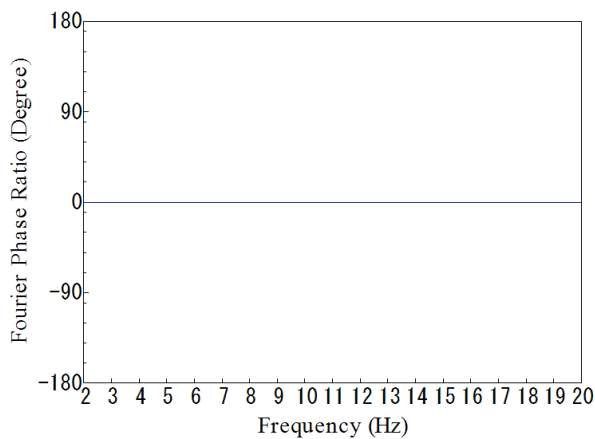


Figure 10. Spectrum ratios of Fourier phase of two slave modules to master module (X direction).

#### 4. まとめ

本論文では、チップスケール原子時計（CSAC）を応用して、自律的に高精度な時刻情報を保持するデジタルセンシングプラットフォームに関する研究について報告した。まず、これまで開発をしてきたアナログ型センサを前提とするシステムの課題を指摘し、それを解決する方法として、デジタル型センサを基本とするシステムを考案し、開発した。また、センサモジュールの時刻同期性能を確認するために行った試験結果について報告した。デジタル型加速度センサを搭載した3台のセンサモジュールを振動台上に設置し、同時に振動を加える試験を行い、計測結果の振幅・位相特性を比較することで、振幅が正しく得られていることと、時刻同期が確保できていることを確認した。次の開発ステップにおいては、カメラセンサを接続可能とする予定で、異種デジタルセンシングプラットフォームの開発を目指す。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04963 の助成を受けた。

#### [参考文献]

- 1) N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa, "Actual Application of Ubiquitous Structural Monitoring System using Wireless Sensor Networks," Proc. 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Paper ID:11-0037, pp. 1-8, Beijing, China, Oct. 2008.
- 2) N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari, and H. Morikawa, "Application of Ubiquitous Structural Monitoring System by Wireless Sensor Networks to Actual High-rise Building," Proc. the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Paper No. 013, pp. 1-9, Tokyo, Japan, July 2010.
- 3) S. Knappe, et al., "A microfabricated atomic clock," Applied Physics Letters, vol. 85, Issue 9, pp. 1460-1462, Aug. 2004, doi:10.1063/1.1787942.
- 4) Q. Li, and D. Rus, "Global Clock Synchronization in Sensor Networks," IEEE Transactions on Computers, vol. 55, Issue 2, pp. 214-226, Jan. 2006, ISSN: 0018-9340.
- 5) R. Lutwak, et al., "The Chip-Scale Atomic Clock - Prototype Evaluation," Proc. the 39th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp. 269-290, Long Beach, USA, Nov. 2007.
- 6) N. Kurata, "Disaster Big Data Infrastructure using Sensing Technology with a Chip Scale Atomic Clock," World Engineering Conference and Convention (WECC2015), pp. 1-5, Kyoto, Japan, Dec. 2015.
- 7) N. Kurata, "Basic Study of Autonomous Time Synchronization Sensing Technology Using Chip Scale Atomic Clock," Proc. the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE2016), pp. 67-74, Osaka, Japan, July 2016.
- 8) N. Kurata, "An Autonomous Time Synchronization Sensor Device Using a Chip Scale Atomic Clock for Earthquake Observation and Structural Health Monitoring", The Eighth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications (SENSORDEVICES 2017), pp.31-36, Rome, Italy, Sept. 2017.
- 9) N. Kurata, "Improvement and Application of Sensor Device Capable of Autonomously Keeping Accurate Time Information for Buildings and Civil Infrastructures," The Ninth International Conference on Sensor Device Technologies and Applications (SENSORDEVICES 2018), pp. 114-120, Venice, Italy, Sept. 2018.
- 10) N. Kurata, "A Sensing System with High Accurate Time Synchronization for Earthquake Observation and Structural Health Monitoring of Structures," Proc. 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE), Paper No. 9a-0008, pp. 1-9, Sendai, Japan, Sept. 2020.