



電 気 1014

## 修士論文

# 無線センサネットワークを用いた 地震モニタリングの設計と実装

提出日 平成18年2月3日

指導教員

青山 友紀 教授

森川 博之 助教授

東京大学大学院工学系研究科  
電気工学専攻

学籍番号 46374

堀江 信吾

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 はじめに	2
1.2 本報告書の構成	3
<b>第2章 関連研究</b>	<b>4</b>
2.1 はじめに	5
2.2 構造ヘルスモニタリングに関する研究	5
2.2.1 構造ヘルスモニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究	6
2.2.2 MICAをつかった地震モニタリング	7
2.2.3 ゴールデンゲートブリッジの構造モニタリング	9
2.2.4 Wisden	10
2.2.5 考察	11
2.3 無線センサネットワークにおける時刻同期技術	12
2.3.1 時刻同期手法に関する研究	13
2.3.2 無線センサネットワーク用の同期プロトコル	14
2.3.3 RBS	14
2.3.4 TPSN	15
2.3.5 FTSP	16
2.3.6 考察	17
2.4 おわりに	18
<b>第3章 地震モニタリングの設計と実装</b>	<b>19</b>
3.1 はじめに	20
3.2 センサノードの構成	21
3.2.1 PAVENET モジュール	22
3.2.2 加速度センサボード	26
3.3 地震モニタリング	34
3.3.1 変位メカニズム	34
3.3.2 地震モニタリングの動作の流れ	35
3.3.3 パケット構成	36
3.3.4 ツリー構造作成	37
3.3.4.1 親ノードの決定	37
3.3.4.2 子ノード情報の報告	38

---

3.3.4.3	ツリー構造情報の報告 . . . . .	39
3.3.5	平常モード . . . . .	40
3.3.5.1	ウェイクパケットの送信 . . . . .	40
3.3.5.2	時刻同期パケットの送信 . . . . .	41
3.3.6	地震後モード . . . . .	41
3.3.7	秋葉原ダイビルへの設置 . . . . .	42
3.4	おわりに . . . . .	43
<b>第 4 章</b>	<b>地震モニタリングシステムの評価</b>	<b>44</b>
4.1	はじめに . . . . .	45
4.2	時刻同期の仕組み . . . . .	46
4.2.1	本システムの同期手法 . . . . .	47
4.2.2	時刻同期の評価実験 . . . . .	48
4.3	スリープを用いた省電力の仕組み . . . . .	50
4.3.1	アクティブ状態への移行 . . . . .	50
4.3.2	CC1000 の復帰時間の評価 . . . . .	51
4.3.3	CC1000 の水晶振動子のキャパシタの交換 . . . . .	53
4.3.4	地震波の情報を利用した復帰の可能性 . . . . .	54
4.4	振動台実験結果 . . . . .	55
4.4.1	マニュアル起動による測定 . . . . .	55
4.4.2	ウェイクノードの起動による測定 . . . . .	62
4.4.3	マルチホップによる通信 . . . . .	63
4.5	おわりに . . . . .	64
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>65</b>
5.1	本論文の主たる結果 . . . . .	66
5.2	今後の課題 . . . . .	66
5.2.1	RTC を使った同期手法 . . . . .	66
5.2.2	パケットを受信するのに必要な時間の個体差の考慮 . . . . .	67
<b>参考文献</b>		<b>69</b>

# 目次

1.1	地震モニタリング	2
2.1	Infrastructure Mode	6
2.2	Sensor Unit	7
2.3	MICA Mote	8
2.4	振動台実験	8
2.5	ゴールデンゲートブリッジ	9
2.6	wisden	10
2.7	無線通信における遅延	12
2.8	NTP	13
2.9	RBS	15
2.10	tpsn	16
2.11	ftsp	17
3.1	センサノード	21
3.2	PAVENET モジュールのブロック図	22
3.3	PAVENET モジュール	23
3.4	PAVENET OS	24
3.5	加速度センサボード	26
3.6	加速度センサの比較	27
3.7	振動台実験の様子	28
3.8	JA-30SA32-25B の加速度データ	28
3.9	Model1221 の加速度データ	29
3.10	LIS3L02AQ の加速度データ	29
3.11	MXA2500E の加速度データ	30
3.12	H48C の加速度データ	30
3.13	振幅の大きな揺れを加えた測定データ	31
3.14	振幅の中型の揺れを加えた測定データ	32
3.15	振幅の小さな揺れを加えた測定データ	32
3.16	加速度センサボードのブロック図	33
3.17	変位の計測メカニズム	34
3.18	地震モニタリングの流れ	35
3.19	標準バケット構成	36

---

3.20	データバケット構成	36
3.21	親ノードの決定	37
3.22	子ノードの決定	38
3.23	シンクノードヘッリー情報の送信	39
3.24	ウェイクアップの仕組み	40
3.25	秋葉原ダイビルのテストベッド	42
4.1	同期手法	47
4.2	同期手法	48
4.3	実験結果（補正前）	49
4.4	実験結果（補正後）	49
4.5	アクティブ状態までの復帰	50
4.6	PIC への割り込みまでの時間	51
4.7	アクティブ状態までの復帰	52
4.8	アクティブ状態までの復帰	52
4.9	改造後の PIC への割り込みの時間	53
4.10	P 波と S 波	54
4.11	振動台実験の様子	55
4.12	シングルホップの通信	56
4.13	兵庫県南部地震	56
4.14	最初のピークの拡大	57
4.15	ローパスフィルタに通す前のデータ	58
4.16	ローパスフィルタに通したデータ	59
4.17	ノード 3 との位相の比較	60
4.18	無線通信における遅延	61
4.19	ウェイクノードの起動の仕組みのトポロジ	62
4.20	ウェイクノードの起動による測定 of データ	62
4.21	ウェイクノードの起動の仕組みのトポロジ	63
4.22	マルチホップでウェイクさせたデータ	63

# 表 目 次

4.1	アクティブ状態とスリープ状態の消費電力の比較 . . . . .	46
4.2	CC1000 の復帰時間の内訳 . . . . .	51

# 第1章 序論



## 1.1 はじめに

2004年の新潟中越地震、スマトラ沖地震による津波や、パキスタン北部地震などにより、人々の防災意識はこれまでになく高まっている。2004年の新潟中越地震では、建物の倒壊を恐れて避難する人々の数が住家被害から推測される人数よりもはるかに多かった。これは、地震によって住家がどの程度被害を受けたかというのは、専門家でなければ判断できないことに起因する。すなわち、一般の人々は自分の住家が地震による被害をどの程度受け、住家が安全であるかどうかという判断をすることが困難なのである。これまで、耐震設計という観点から、建物の地震に対する健全性を評価するためにシミュレーションや実験装置を用いて多くの研究が行われてきた[1]。

これらの研究の多くは、建物を建てる前にあらかじめ設計された建物がどの程度の地震に対する耐性を持っているかを評価するための研究であり、実際に人々が暮らしている建築構造物が地震によってどの程度の影響を受けたかを評価するといった用途には使用することは現実的ではない。例えば、これまでの地震観測の事例では、3方向の加速度センサ1つ当たり値段が数十万円のコストが発生し、さらに計測装置、計測用の通信線の敷設などのセンサ設置コストを含めると数百万円のコストがかかる。システムの導入において低価格化および導入時間の低減が実現されれば、地震が人々が暮らしている建築構造物に与える影響を評価するシステムは広く普及していくものと予測されている。

しかしながら、近年の半導体技術やMEMS技術の進歩により、小型で安価、かつ高性能な加速度センサが開発されるようになった。さらに、無線センサネットワークなどの無線通信技術により、センサの設置コストを大幅に減少させることが可能になった[2, 3]。これらの点に鑑み、筆者らは、実際の建物に対して設置可能、かつ地震による空間の3次元的な変位を計測することを可能とする無線センサネットワークを用いた地震モニタリングシステムの研究を進めている[4, 5]。本システムでは、図1.11つのフロア当り数十のセンサノードによって計測を行い、最終的には1つの建物全体で数百から構成される高密度地震モニタリングを目指す。

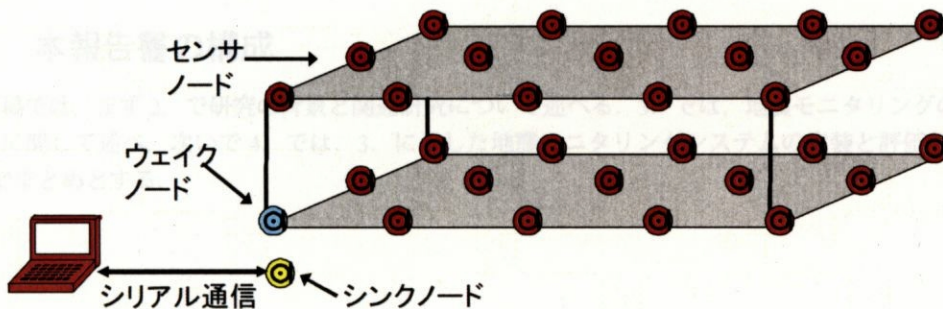


図 1.1: 地震モニタリング

これまでの地震観測の事例では多くても 1 つのフロアに 1 つの振動センサを設置して計測を行うという程度であり、本研究で目指しているような多点かつ高密度な地震モニタリングを実現することは地震工学的にも興味深い研究事例となる。

このようなシステムを構築する際、通信を無線で行うメリットとしては、システムの導入時間とワイヤリングコストの削減が挙げられる。例えば、1997 年に完成した香港にある青馬大橋への構造ヘルスモニタリングシステムの導入の際には、導入時間の約 75% が対象構造物にセンサデータの伝送路であるワイヤを敷設する作業にかかる時間であり、システムを導入する費用のうちの約 25% がワイヤリングの費用だという報告がある [6]。しかも、一般の人々が普段暮らしている住家に地震モニタリングを新しく導入する際には、ワイヤリングの工事の削減の効果はさらに大きいと考えられる。

しかし、無線で通信を行うシステムは、有線でセンサ同士をワイヤリングするシステムと比べて二つ大きな問題が挙げられる。一つは駆動電力の問題である。有線のシステムにおいてはセンサに電力を供給するのが容易であり、一度敷設してしまえば半永久的に機能することが可能である。ところが、無線のシステムにおいては電力供給は不可能であるため、バッテリー駆動で長い期間機能するシステムを構築する必要がある。そのためには、センサノードの消費電力を出来るだけ抑える必要がある。現在の無線センサネットワークのいろいろなシステムにおいて消費電力の低減が大きな問題とされているが、この地震モニタリングシステムにおいても、数年間機能するために消費電力を抑えたシステムを構築することが必須となってくる。

また、無線のシステムが困難な点としては、センサノード同士の時刻同期の問題である。有線のシステムにおいては時刻同期は簡単に行うことが出来るが、無線のシステムにおいては同期パケットの交換などの仕組みが必要になってくる。地震モニタリングでは 100 Hz の周期でデータを取得するため、計測データの信頼性を保つためにはおよそ 1 ミリ秒以下の同期の精度が求められる。また、無線通信プロトコルの効率や、消費電力のための仕組みにも同期精度は非常に大きく関与してくる。そのため本研究では、消費電力の削減を行ったシステムにおいても正確な時間間隔を刻む時刻同期の仕組みを考案し、実装した。

## 1.2 本報告書の構成

本稿では、まず 2. で研究の背景と関連研究について述べる。3. では、地震モニタリングのシステムに関して述べ、次いで 4. では、3. に示した地震モニタリングシステムの実装と評価を行い、5. でまとめとする。

# 第2章 関連研究

---

## 2.1 はじめに

本地震モニタリングシステムに関連する研究について述べる。2.2 では構造ヘルスモニタリングの関連研究、2.3 では時刻同期手法についての関連研究と述べ、2.4 でまとめる。

## 2.2 構造ヘルスモニタリングに関する研究

構造物は、建設してから年を重ねるごとに構成する部材の強度が徐々に低下して、構造物全体の耐震性能が低下する。構造物の耐震性の低下を予測することは、社会的資産である構造物の保守・保繕を計る上で重要な課題である。年を経るに従って発生する構造物の耐震性の劣化の程度を判定するための技術を構造ヘルスモニタリングと呼ぶ。近年の頻発する地震や、耐震強度偽装問題によって構造ヘルスモニタリングが注目され、建物の健全性を評価するためにシミュレーションや実験装置を用いて多くの研究が行われている。

我々は、無線センサネットワーク技術を用いることで実際の高層ビルに対する導入コストを削減することで高密度な地震モニタリングを目指しているが、構造ヘルスモニタリングを無線通信で行うという観点から、これまでの研究と本研究の関連性について述べる。

2.2.1 構造ヘルスモニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究

慶応大学の構造ヘルスモニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究 [7] では、コンピュータネットワーク標準プロトコルとして普及が進んだ TCP/IP プロトコルを用いたネットワーク技術と、近年接続の容易性から普及が進む無線技術を用いて、建築・土木建造物を対象とした無線センサネットワークシステムを提案し、その検討を行っている。無線通信には大別して 2 つの通信形態が存在する。各ノードの役割がアクセスポイントとステーションが固定されているインフラストラクチャ形態と、各ノード同士が通信を行うアドホック形態の 2 つである。インフラストラクチャ形態を、図 2.1 に示す。

インフラストラクチャ形態はアクセスポイントを介してすべての通信を行うため、アクセスポイントからの電波到達半径が無線ネットワークの構成範囲になる。この論文では、アドホックネットワークを用いずに、このインフラストラクチャ形態を採用している。まず、通信方式として無線 LAN を利用した場合のビット誤り率を解析している。また、我々と同じように、センサの時刻同期性に関して注目しており、図 2.2 のようなセンサユニットを用いて同期実験を行っている。

さまざまな検討の結果、提案したセンサネットワークは、目標として設定した性能を満足し、ワイヤ敷設コストと、敷設に要する時間を大幅に削減することが可能で、かつリアルタイムな損傷検知に必要とされる高い同期性能を確保できることが確認されている。この研究では、センサの給電部分は有線であった。これに対して本研究は、バッテリー駆動の無線センサノードを用いているために低消費電力のシステムを構築する必要がある。また、本研究は実際の地震をモニタリングすることを明確な目的としている点でも大きく異なる。

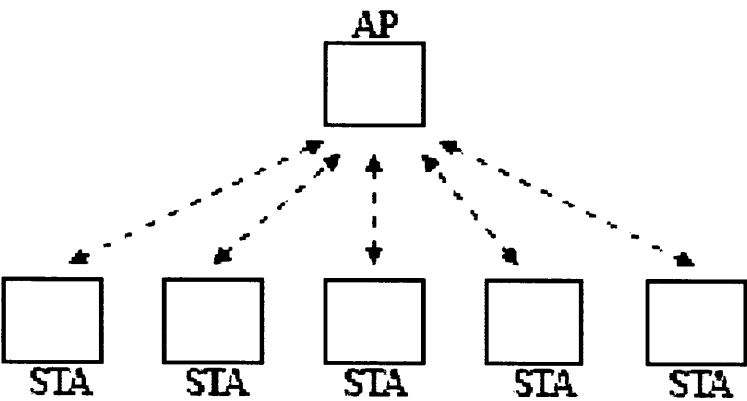


図 2.1: Infrastructure Mode



図 2.2: Sensor Unit

### 2.2.2 MICA をつけた地震モニタリング

また, MICA Mote[8, 9, 10]を用いた地震モニタリング[11]では, 無線センサネットワークをビルに設置することにより, 加速度・変位・歪といった構造性能を評価するための物理量以外に, 温度・光・映像・臭い・煙・音などをセンシングし, ビルが直面するあらゆるリスクのモニタリングを提案している. そのため MICA Mote を用いて振動台実験を行い, 地震モニタリングと建物の損傷検知に対する性能の確認を行っている. MICA Mote を図 2.3 に示す.

MICA Mote は高機能でありながら市販品を利用した低コストなデバイスで構成され, 商業的に販売されている, 無線センサネットワークの研究用テストベッドとしては, もっとも著名なシリーズである. MICA Mote に付属する標準的なセンサボードには, 2方向加速度センサ, 温度センサ, 光センサ, 2方向磁気センサなどが実装されているが, 彼らは建築土木構造物に対する汎用性を考え, 特に低振動数帯において高感度でノイズの少ない加速度センサを搭載したセンサボード, 計測対象となる振動数領域と対応したバンドパスフィルタボード, 歪ゲージセンサボードを別途開発している[12]. 図 3.7 のような建物を模擬した2層構造物に MICA Mote を設置して, 振動台実験を行っている. 2層構造物の頂部と基部にそれぞれ2台, 1台の MICA Mote と比較用の有線の加速度センサを, そして振動台の前にノート PC のシリアルポートに接続されたベースステーションを設置している. 各センサノードとベースステーション間でアドホックネットワークが構築され, マルチホップ通信でのデータ計測が可能となっている. 阪神大震災の際に神戸海洋気象台で観測された地震波を振動台に入力して2層構造物を振動させる実験を行い, MICA Mote と比較用の加速度センサによる加速度波形はよく一致していることが確認されている. よって, 地震動そのもののモニタリングおよび建物での振動モニタリングが可能であると述べている. この研究はあくまでもシミュレーションや実験環境での評価であり, センサの数も少なく厳密な意味では無線センサネットワークとは言えない. これに対して我々は, 消費電力の削減を出来るだけ行い, 複数のバッテリー駆動の小型センサノードでグリッド状の無線センサネットワークを構築し, 実際の地震が構造物に与える影響を長期間に渡ってモニタリングするという目的で研究を行う.

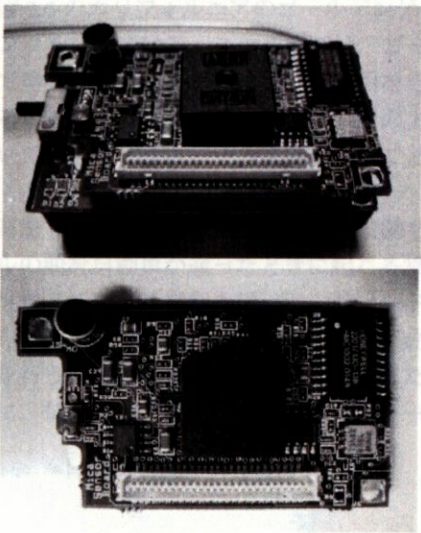


図 2.3: MICA Mote



図 2.4: 振動台実験

### 2.2.3 ゴールデンゲートブリッジの構造モニタリング

また、センサノードを用いて実地実験を行っている研究として、カリフォルニア大学バークレー校の研究 [13] が挙げられる。図 2.5 のカリフォルニアのゴールデンゲートブリッジに MICA Mote を設置し、構造ヘルスモニタリングを行っている。この研究では、ゴールデンゲートブリッジに高分解能の加速度センサを設置して得たデータを、いかに正確に通信を行い、シンクノードへ収集するかという点に焦点を当てている。橋梁などの土木構造物には、その上を自動車や鉄道が通行しているために常に振動が起こっていて、その加速度や歪みを測定することで構造ヘルスモニタリングを行うことが可能となる。

これに対して本研究は、超高層ビルという建築構造物で実地実験を行う。建築構造物では地震以外に大きな振動源がなく、ビルの前を自動車を通ったときに起こる常時微動を測定しても、構造物の耐震性は評価できない可能性がある。そこで我々は、センサノードを空間に遍在させることにより、地震が実際に構造物にあたえる 3 次元的な捻れや歪みによる健全性の評価を行う。すなわち、建築構造物の地震モニタリングを行う、という点で異なっている。また、我々は数年単位という長期間のモニタリングを行うために、低消費電力の無線センサネットワークシステムの設計を行うという点でも焦点が異なっている。



図 2.5: ゴールデンゲートブリッジ

### 2.2.4 Wisden

南カリフォルニア大学では、無線センサネットワークを用いた構造ヘルスモニタリングを行う Wisden という研究を行っている [14]。Wisden では、加速度センサを搭載したセンサノードを建築・土木構造物に取り付け、周囲の振動あるいは強制的な励振によって得られるデータを元に構造物の健全性を評価する、というものである。図 2.6 は収集したデータである。この研究で焦点がおかれているのは正確なデータの送信と、データの圧縮、センサノード同士の同期など、主に通信プロトコルに関わる部分である。

この構造ヘルスモニタリング [14] はセンサノードの消費電力を全く考慮していない。センシングデータをリアルタイムにシンクノードへ収集するという形式で行い、スリープの仕組みなどの省電力のためのタスクスケジュールを導入していないため、消費電力が極めて大きい。そのため、長期間機能するのが不可能であり、実地震が建物に与える影響を評価することは視野に入っていない。それに対して本研究では、実地震モニタリング、および地震時における空間の変形の抽出に焦点を当てているため、低消費電力を実現しつつも構造ヘルスモニタリングを行える点に特徴がある。また、Wisden は加速度センサの選定は行っておらず、分解能が低いものを使用しているために震度 3 程度の弱い地震は測定できないと考えられる。

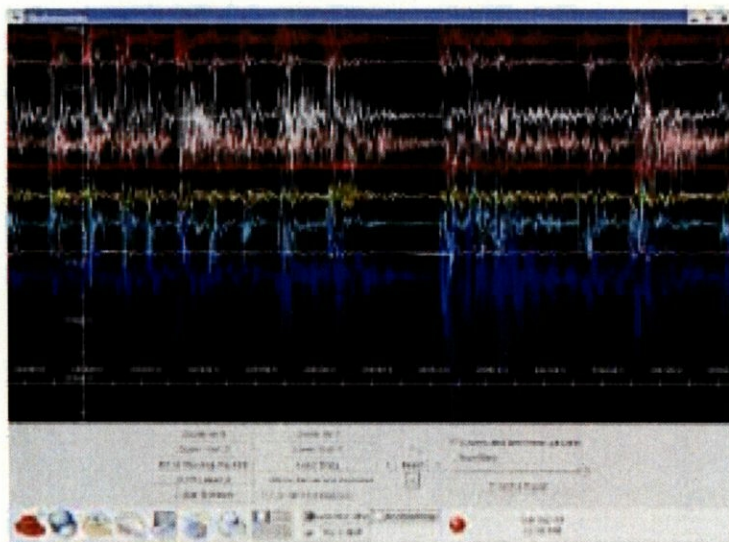


図 2.6: wisden

### 2.2.5 考察

これらの研究はあくまでも実験環境での評価であり、センサの数も少なく、既存の技術を使用した初期的な実験評価という位置付けであると言える。特に通信プロトコルや MAC プロトコルに関しては既存のものを用いており、実際に機能するモニタリングシステムとしては実用的であるとは言えない。それに対して本研究では、地震モニタリングというアプリケーションターゲットからトップダウン的に無線センサネットワークアーキテクチャを模索している点に特徴がある。特に、本研究では実際の建物にセンサノードを設置し、実地震をモニタリングすることで実際の構造物の健全性を評価することを視野に入れている点は、これまでの構造ヘルスモニタリングの研究とは大きく異なる。

2.3 無線センサネットワークにおける時刻同期技術

センサノードが通信を行うとき、静的な遅延と動的な遅延の 2 種類の遅延が発生する。静的な遅延は水晶振動子のクロックのずれによるところが大きい。水晶振動子は生産時に固定された固有の発信周波数を持つが、表記の周波数に比べて最大で 0.1% の誤差を持つ。すなわち、時間に直すと 1 秒当たり 1~100 マイクロ秒他のノードと時刻周期にずれがある。水晶振動子の発信周波数は温度や月日の経過による劣化により変化するが、短期的には固定値であるとみなすことができる。

動的な遅延は無線のハードウェアによる処理と CPU による処理の不確定な要素によって発生する。図 2.7 にセンサノードが無線通信を行うときの遅延を示す。send と receive は CPU による処理であり、アプリケーション層から MAC 層へデータを渡すときに生じる遅延である。この遅延はオペレーティングシステムのタスクの負荷やクリティカルセクションの有無に左右される。access は MAC 層でのメディアヘアクセスするための時間であり、B-MAC[15] や S-MAC[16] などの CSMA (Carrier Sense Media Access) 型の MAC プロトコルではキャリアセンスをしている時間に相当する。この遅延は通信の状況に応じて左右される。また、transmission、reception の段階でもハードウェア処理による微妙なずれが生じる。例えば、CC1000[17] を用いた MICA Mote[8] や SmartIts[18] では 1 ビット送受信時の割り込みのタイミング、無線の変調、復調時の処理などによって微妙な遅延の揺らぎが発生する。静的な遅延はほぼ固定値であると想定できるため、最小二乗法による直線回帰で補正することができる。そこで無線センサネットワークでは動的な遅延をどのように補正するかが要点となる。

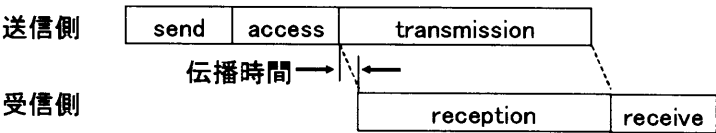


図 2.7: 無線通信における遅延

2.3.1 時刻同期手法に関する研究

既存の時刻同期技術としては、GPS を用いた手法、Network Time Protocol(NTP) [19] が存在する。GPS を用いた場合は 10 ナノ秒という高い精度で同期を行うことが可能であるが、消費電力が高い、室内では使えない、モジュールが高価などの問題により今回の目的では使用することができない。

NTP はインターネット上で時刻同期を行うためのプロトコルである。図 2.8 に NTP の同期の仕組みを示す。

NTP では、T1～T4 の 4 種類のタイムスタンプを利用して時間のずれを算出し、時刻同期を行っている。

$$T2 - T1 = delay + error \tag{2.1}$$

$$T4 - T3 = delay - error \tag{2.2}$$

$$error = \frac{(T2 - T1) - (T4 - T3)}{2} \tag{2.3}$$

NTP は遅延の大きいインターネット上で数ミリ秒と高い精度を実現しているが、同期を取るために双方向で通信しなければならないため、低消費電力性が求められる本研究の要求要件を満たすことができない。

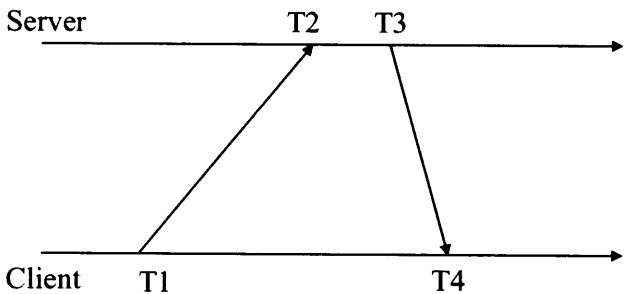


図 2.8: NTP

### 2.3.2 無線センサネットワーク用の同期プロトコル

無線センサネットワーク用の同期プロトコルとしては、Reference Broadcast Synchronization (RBS) [20] や、Timing-sync Protocol for Sensor Networks (TPSN) [21], Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP) [22] が存在する。これらは全て MAC レイヤでタイムスタンプを記録することで同期を取る際の不確定な時間を削減している。

### 2.3.3 RBS

RBS (Reference Broadcast Synchronization) は自律的に動作する同期手法であり、UTC (協定世界時) に時刻を合わせるといった用途ではなく、近傍のノードと同期を取る際に有効な手法である [?]. RBS は、ある任意のブロードキャストパケットを受け取った 2 つのノードで受け取った時刻を記録し、ブロードキャストパケットを受け取ったノード同士で時刻情報を交換することで図 2.7 における send, access 時の不確定要素を無視することを可能とする手法である。このとき、RBS はブロードキャストパケットを受け取った異なるノードの時刻のずれがガウシアン分布になる性質を利用している。図 2.9 に RBS の動作例を示す。

まず、基準ノードが同期パケットをブロードキャストする。同期パケットを受け取った各受信ノード内で受信した時刻を記録する。そして各受信ノードは、受信ノード同士で受信した時刻の交換を行う。これにより、 $n$  を受信ノードの数、 $T_0$  を自ノードが同期パケットを受信した時刻、 $T_i$  を受信ノード  $i$  が同期パケットを受け取った時刻とすると、

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_0 - T_i \quad (2.4)$$

によって時刻の補正值  $\theta$  を求めることができる。また、基準ノードをランダムに変更することでネットワーク全体の同期を実現することができる。このように、受信ノード間で情報を交換することで同期を実現する手法を「receiver-receiver synchronization」と呼ぶ。

式 (2.4) において、ノード間の同期パケットを受け取った時刻のずれ  $T_0 - T_i$  がガウシアン分布になることから、受信ノードの数  $n$  が大きければ大きいほど時刻精度が向上することが分かる。しかしながら、受信ノードの数  $n$  が大きくなればなるほど受信ノード間で交換する情報の量が増えるため、消費電力が増すという欠点がある。

RBS を MICA Mote に実装して実験した結果、平均で約 30 マイクロ秒の精度で同期が取れることが確認されている [20]。

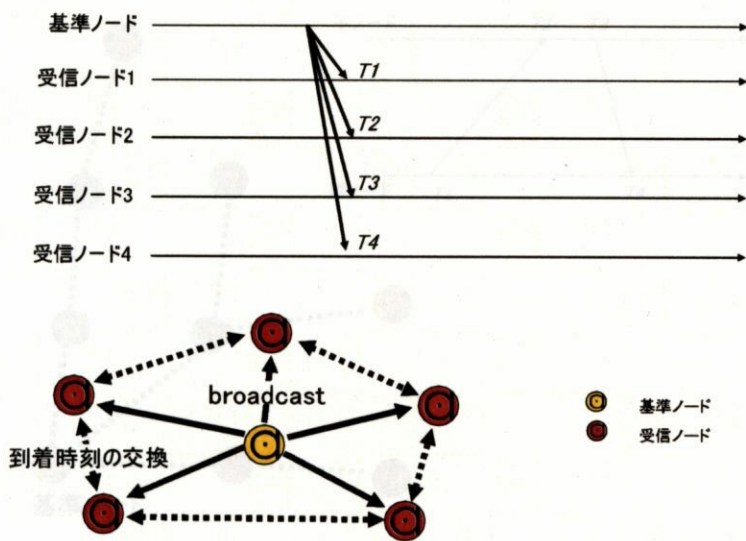


図 2.9: RBS

2.3.4 TPSN

TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) は 2.3.1 で述べた NTP と同様の仕組みである 2-way handshake を利用した同期プロトコルである。RBS が receiver-receivers synchronization だったのに対し、TPSN は NTP と同じ sender-receiver synchronization を採用している。図 2.10 に TPSN の動作を示す。TPSN ではまず、同期する際に基準となるノードを root として全域木を構築する。次にその構築した全域木の親ノードと子ノードで NTP と同様の 2-way handshake によるタイムスタンプを利用して同期を行う。この時、MAC 層でデータを送受信するとき、すなわち図 2.7 における transmission, reception 時にタイムスタンプを記録することで send, access, receive による時刻同期のエラーを削減することが可能となる。TPSN を MICA に実装した結果、RBS の 2 倍である約 15 マイクロ秒の精度の同期が確認されている [21]。

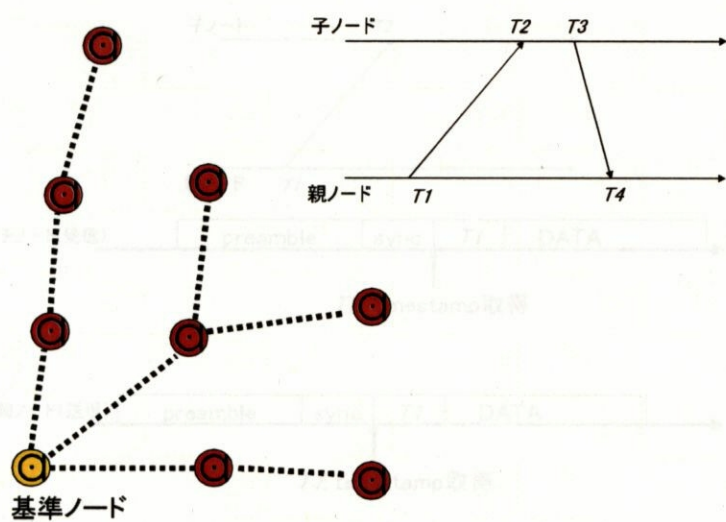


図 2.10: tpsn

2.3.5 FTSP

FTSP は送信側と受信側で MAC 層でタイムスタンプを取ることで sender-receiver synchronization を実現する。FTSP では、送信側、受信側で図 2.7 における transmission, reception の間にタイムスタンプを取ることで一方向の同パケットの送信だけで精密な同期を実現することができる。さらに、FTSP はこの一方向で同期可能という性質を利用し、同期パケットのフラッディングによるネットワーク全体の同期も実現できる。図 2.11 に FTSP の動作例を示す。無線通信では実際のデータを送信する前に、ノード間のタイミング調整を行うための preamble, bit を byte に直すバイト・アライメントを行うための sync を付与する。FTSP では送信ノードでは sync を送った直後、受信ノードでは sync を受信した直後でタイムスタンプを取る。これにより図 2.7 の send, receive, access における時刻のエラーを無視することが可能となる。送信ノードのタイムスタンプを  $T1$ 、受信ノードのタイムスタンプを  $T2$ 、無線の通信速度を  $speed$  とすると、時刻の補正值  $\theta$  は、

$$\theta = T2 - T1 - \frac{1}{speed} \tag{2.5}$$

によって求められる。このようにして取得した  $\theta$  を複数回に渡って平滑化することで、図 2.7 における transmission および reception 時の時刻同期の揺らぎを削減することが可能となる。  
FTSP を MICA に実装した結果、TPSN や RBS よりもはるかに精度の高い、約 1 マイクロ秒の精度の同期が確認されている [22]。

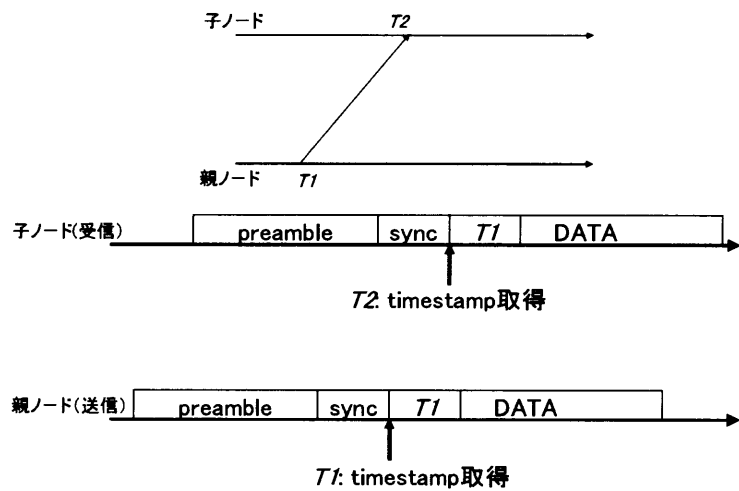


図 2.11: ftsync

2.3.6 考察

実装の容易性という観点からは、RBS がもっとも多くのシステムに応用できるプロトコルであるといえる。RBS では受信側で同期パケット受信時のタイムスタンプを交換する送信時の時刻の不確定性を無視することができる。RBS はアプリケーション層に実装してもある程度の精度が実現できると考えられるため、無線センサネットワークだけでなく、802.11 を用いたアドホックネットワークなどにも幅広く応用できると考えられる。TPSN は、NTP と同様の 2-way handshake を利用した同期プロトコルであるが、本来 NTP は伝播遅延が大きいインターネット上で同期を取るために考案されたプロトコルであり、伝播遅延をほとんど無視できる無線センサネットワークでは NTP の持つ利点が失われている。同期プロトコルの精度という観点からは、FTSP が 1 マイクロ秒ともっとも精度のよい同期プロトコルであり、しかも FTSP は一方向の通信での同期が実現できるため、通信の負荷も RBS や TPSN に比べて格段に小さい。しかしながら FTSP は既存の無線では MAC 層をソフトウェアで処理しているときに使用することができるが、MAC 層をハードウェアで実装されている 802.11 などには利用することができない。MAC 層に FTSP に似た仕組みをハードウェアとして組み込むことで、時刻同期の高精度化と消費電力の削減が実現でき、無線センサネットワークにおけるインパクトは大きい。

これらの同期手法は数マイクロ秒から数十マイクロ秒の誤差であり、非常に高精度な時刻同期が実現されている。しかしながら、基本的には B-MAC[15] などのランダムアクセス型の MAC プロトコルを想定しており、同期をとる際の機構が複雑になり、パケットの大きさや送受信の頻度が高くなるために消費電力などのオーバーヘッドが大きくなる。それに対して、本研究では低消費電力なシステムを構築するために、スリープの仕組みを採用した CPU のタスクスケジュールや MAC プロトコルを考慮した同期手法を採用する必要がある。

## 2.4 おわりに

本研究と関連のある、構造物のヘルスマモニタリングの研究について述べ、センサネットワークにおける時刻同期の研究について述べた。本研究では、実際の建物にセンサノードを設置し、実地震をモニタリングすることで実際の構造物の健全性を評価するために、消費電力を抑えた設計を行う必要がある。センサネットワークにおいては、消費電力の要因のうち高い割合を占めるのが送受信にかかる電力であるため、要求される時刻同期精度を満たした上で有効な同期手法を採用することが重要である。次章ではセンサネットワークを用いた地震モニタリングの技術に関して述べる。