

第4章 地震モニタリングシステムの評価

4.1 はじめに

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。

本研究では、消費電力の削減を行うためにスリープの仕組みを採用し、数年間機能することが可能なシステムを設計して実装した。また、消費電力を抑え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。

本章では、4.2 において時刻同期の仕組みについて述べ、次いで 4.3 において低消費電力のためのスリープの仕組みについて述べる。4.4 において地震波の情報を利用した復帰と消費電力の検討を行い、4.5 で振動台実験について述べ、4.6 でまとめとする。

4.2 時刻同期の仕組み

本地震モニタリングシステムを構築する際、次の 3 つの理由から各センサノード間の同期の精度が重要となる。まず 1 つ目は、同期の精度が各センサノードの計測データの取得時間の整合性の精度に大きく関わるという理由である。本地震モニタリングでは 100 Hz で毎秒 16 bit の加速度情報を取得する。すなわち、加速度データは 10 ms ごとに取得されるため、1 ミリ秒の精度で同期が取れていることが好ましい。

2 つ目は、センサノードが地震が起きた際にウェイクパケットを受け取ってスリープ状態からアクティブ状態へと遷移するときの仕組みに関する理由である。表 4.1 にアクティブ状態とスリープ状態の消費電力の比較を示す。表 4.1 から分かるように、センサノードはスリープ状態にすることで消費電力を大きく削減することができる。本地震モニタリングシステムでは、センサノードはウェイクパケットを受け取る事ができる時間のみアクティブ状態となり、それ以外の時はスリープ状態となることで消費電力を削減する。すなわち、アドホックネットワークを構築する本システムでは、各センサノード間の同期の精度が高ければ高いほど同期を取るために必要な通信のオーバーヘッドを削減することが可能となる。

3 つ目は、センサノードがデータを収集するときの通信プロトコルの効率に関する理由である。本地震モニタリングシステムでは地震が終了した後、一斉に計測データの転送が始まるのでランダムアクセス型の CSMA のようなキャリアが空いたらすぐにデータの転送を始めるようなメディアアクセス制御 (MAC) プロトコルでは衝突が頻発して通信効率が悪化し、結果として消費電力が増加する原因になる。既に提案されている多くのセンサネットワークの MAC プロトコルでも消費電力を低く抑えるために同期の仕組みを採用している [16, 25, 26, 27, 28]。また、MAC プロトコルほどの同期の精度は必要としないものの、ルーティングプロトコルにおいてもノード間で同期をとることによって効率のよいデータの配送を行うという提案もされている [29]。このような点に鑑みると、無線センサネットワークの通信プロトコルにおいて効率や低消費電力を実現するためには同期が重要な要素となる事が分かる。

表 4.1: アクティブ状態とスリープ状態の消費電力の比較

	動作時 (受信時/送信時)	スリープ時
PIC18LF4620	8 mA	0.1μA
CC1000	7.4/10.4 mA	0.2 μA
PIC18LF8527	7 mA	2.4μA
加速度センサ	1.5 mA	5μA
A/D コンバータ	1.85 mA	3μA
SRAM	8 mA	2μA

4.2.1 本システムの同期手法

2 章で述べたように、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。しかしながら、これらの同期手法は基本的には 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いる。そのため、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。

本研究では、同期パケットを送信するのをある一定の時間間隔にし、受信側はパケットを受信する時間間隔のずれだけを知ることによって同期を行う方法を採用する。この方法ではタイムスタンプの値を通信する必要がなく、単純な機構で本地震モニタリングシステムに要求される 1 ミリ秒以下の精度の同期が可能となると考えられる。

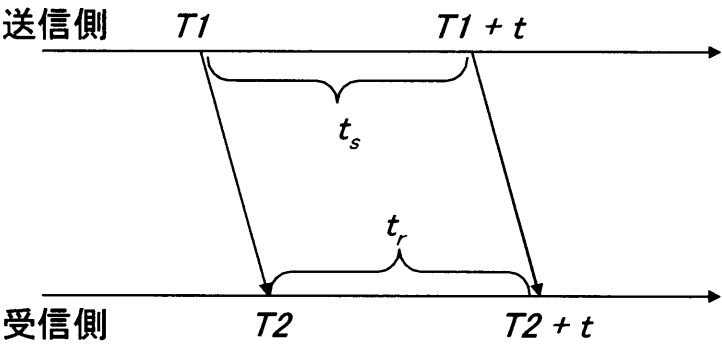


図 4.1: 同期手法

図 4.1 に本研究で用いる同期の手法を示す。
本手法では受信側は正確な t の値をあらかじめ知っている。送信側がある時間 $T1$ に同期パケットを投げるとする。受信側は $T2$ にパケットを受信した際、タイマの値を 0 にする。次に送信側が $T1 + t$ に同期パケットを投げると、受信した際に受信側のタイマの値 t_r が t からどれだけずれているかを計算することで正確な時間間隔を刻むことが可能となる。この時、受信側が送信側と同期を行うためには、 $T2 - T1$ の値が必要になる。 $T2 - T1$ の値は、物理レイヤにおけるパケットのエンコード時間、空間を伝播するのにかかる時間、受信の割り込みにかかる時間、物理レイヤにおけるパケットのデコード時間の合計である。この時間は数マイクロ秒の揺らぎはあると考えられるものの 1 ミリ秒以下の同期の精度が求められる本研究ではほぼ固定値とみなすことができると考えられる。
そこで本研究で問題となってくるのはクロックを刻む、水晶振動子の周波数のドリフトである。ドリフトが激しく、時刻同期のずれが大きい場合は頻繁な同期パケットの送信が必要となり、消費電

力に大きく影響する。また、ドリフトがある程度予測できる場合は、補正をかけることで正確なクロック周波数に近づけることが可能である [22]。

以上のことから、PAVENET モジュールの CPU クロックのドリフトがどの程度であるか、またそのドリフトがどの程度予測できて、補正したあとのジッタがどれくらいであるかを評価する実験を行った。

4.2.2 時刻同期の評価実験

本研究ではサンプリング周波数 100 Hz で地震のデータを測定するため、各ノードは常に 1 ミリ秒以下の精度で正確な時間を刻むことが望ましい。本来、ANTH モジュールに搭載されている PIC は製造上のばらつきと温度による周波数誤差が大きい。出荷の際にはキャリブレーションデータによってある程度周波数誤差を修正しているが、それでも 1% 程度の誤差がある。そのため、ネットワークを構築する初期段階で各ノードは自分の上位のノードと比べてクロック周波数がどれだけずれているか計算し、補正を行う必要がある。そこで筆者らは、クロック周波数の誤差はどの程度なのか、また補正した後の周波数のジッタはどの程度であるのか、ANTH モジュールを用いて実験を行った。

図 4.2 に実験手法を示す。送信ノードはあるクロック数ごとに定期的に受信ノードに同期パケットを送信する。受信ノードは同期パケットを 0, t_1 , $2t_1$ で受信した際にタイマの値を記録し、タイマの値を 0 に戻す。そして送信側の同期パケットの送信間隔 t_1 を徐々に広げて行き、受信側のタイマの値のずれの計測を行った。

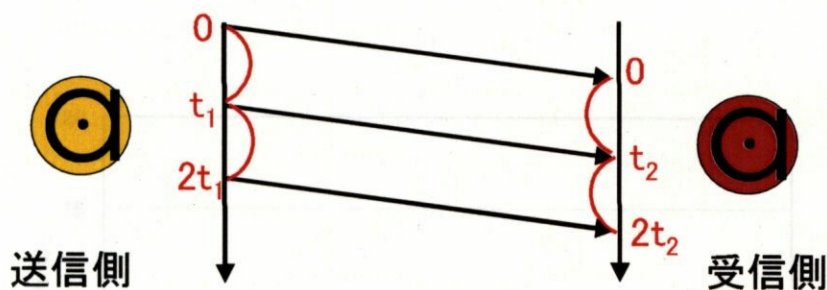


図 4.2: 同期手法

図 4.3 に受信ノードとのクロックの誤差を示す。送信ノードのクロック数の 1 つの値につき、30 をサンプル数としている。縦軸がクロックのずれであり、横軸が同期パケットの送信間隔である。図 4.3 から、クロックのずれは送信間隔によってほぼ線形に時間間隔が開いている事が分かる。これはクロック周波数のずれであると考えられ、直線回帰法による補正が可能である。クロック周波数のずれを直線回帰法により修正したグラフが図 4.4 である。グラフより、1 時間（3600 秒）に ± 1 ミリ秒のずれがあることが分かる。このずれはクロックの揺らぎによるものだと考えられる。

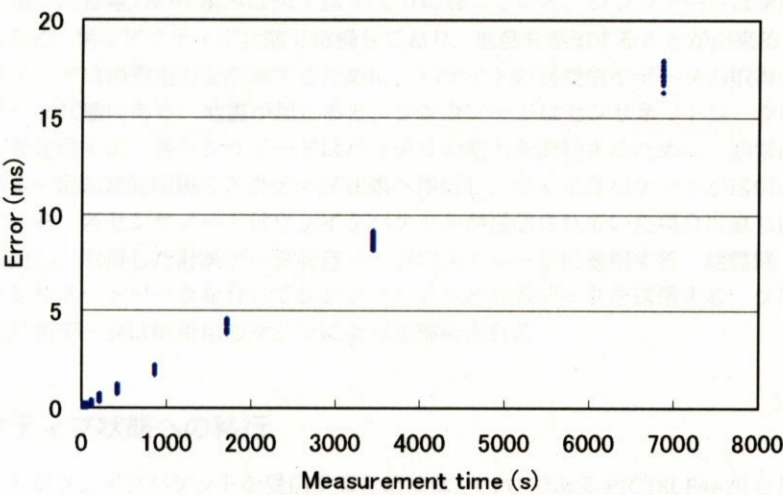


図 4.3: 実験結果（補正前）

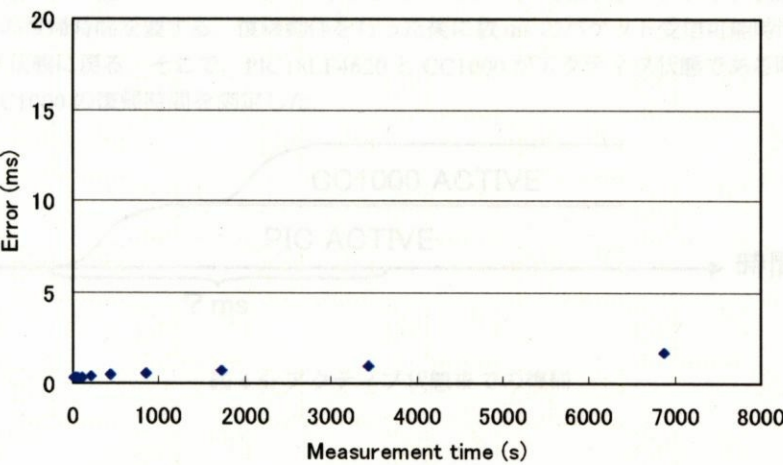


図 4.4: 実験結果（補正後）

4.3 スリープを用いた省電力の仕組み

スリープを用いた省電力の仕組みは図3.24のようにになっている。シンクノードは家庭用電源に接続されているため、常にアクティブ状態で待機しており、地震を感知することが出来る。それに対して、各センサノードは消費電力を削減するために、パケットの送受信やデータの取得などを行うとき以外はスリープ状態にある。地震が起こると、シンクノードはセンサネットワークに対してウェイクパケットを送信する。各センサノードはバッテリーの電力を節約するために、通常はスリープ状態にあり、ある一定の時間間隔でアクティブ状態へ移行し、ウェイクパケットが送信されていないかを監視している。各センサノードはウェイクパケットが送信されていた場合は直ちに加速度データの計測を開始し、取得した計測データを自ノードのストレージに蓄積する。地震終了後、各センサノードはセンサネットワークを介してシンクノードへと計測データを送信する。シンクノードへと集められた計測データは解析用のマシンによって解析される。

4.3.1 アクティブ状態への移行

センサノードがウェイクパケットを受信するためには、CPUであるPIC18LF4620と無線モジュールであるCC1000がアクティブ状態である必要がある。PIC18LF4620及びCC1000はスリープ状態とアクティブ状態の消費電力が表4.1のように非常に異なるため、スリープ状態の時間の割合を大きくすることでセンサノードの消費電力を減らすことが可能となる。

各センサノードは、アクティブ状態への移行を数秒に一回行うことで、ウェイクパケットが送信されていないかを監視している。すなわち、アクティブ状態へ移行している時間の長さはシステム全体の消費電力と密接に関係している。

PIC18LF4620及びCC1000は、図4.5に示すようにスリープ状態からアクティブ状態に復帰するために数msの復帰時間を要する。復帰動作を行った後に数msのパケット受信可能時間があり、その後スリープ状態に戻る。そこで、PIC18LF4620とCC1000がアクティブ状態である時間を評価するために、CC1000の復帰時間を測定した。

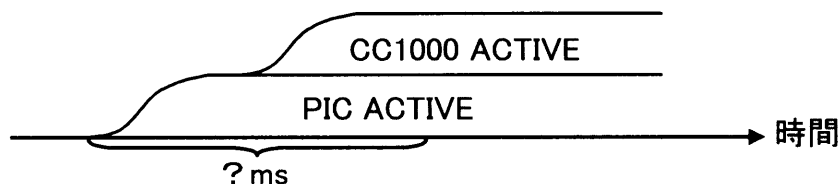


図 4.5: アクティブ状態までの復帰

4.3.2 CC1000 の復帰時間の評価

CC1000 が受信可能状態にあるときは CC1000 から PIC へ割り込みが常に入っている。CC1000 への復帰命令を行ってから PIC への割り込みが起こるまでの時間が CC1000 の復帰時間であると考えられる。そこで、割り込みが入った直後の値をタイマに記録するという試行を繰り返す実験を行った。実験結果を図 4.6 に示す。CC1000 は約 4.4 ms で受信可能状態となり、受信可能状態になるまでの時間の揺らぎは± 0.3 ms 程度であることが分かった。

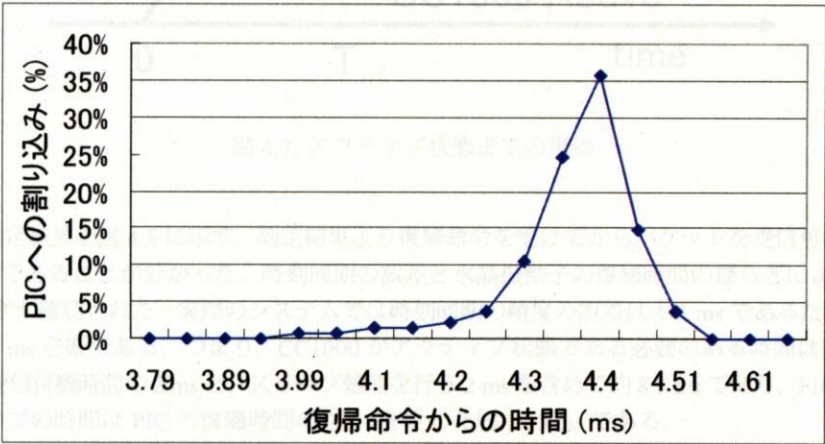


図 4.6: PIC への割り込みまでの時間

CC1000 の復帰時間の内訳の理論値を表 4.2 に示す。bias generator をオンにするために必要な時間は 200 μ s, RX mode に移行するために必要な時間は 250 μ s である。水晶振動子をオンにするために必要な時間は周波数とキャパシタの負荷容量に依存している。受信可能状態になるまでの時間の揺らぎは、水晶振動子をオンにするための時間の揺らぎであると考えられる。

また、実際にシステムを構築した際におけるウェイクパケットを受け取ることが出来るまでの時間を測定するために実験を行った。時刻同期を± 0.1 ms の精度でとっている二つのセンサノードを 5 m 間隔で配置した。送信側のセンサノードはある一定の時間間隔でウェイクパケットを送信した。受信側のセンサノードは、図 4.7 に示されるようにパケットを受信する T の数 ms 前に自分のタイマの値を 0 に設定し、同時に CC1000 のスリープ状態からの復帰命令を実行した。パケットを受信す

表 4.2: CC1000 の復帰時間の内訳

デバイス	時間
crystal oscillator	variable
bias generator	200 μ s
RX mode	250 μ s

ると同時にタイマの値を記録した. T の値を徐々に小さくしていき, パケットを受信できなくなったときのタイマの値がウェイクパケットを受け取る事が出来る時間の限界である.

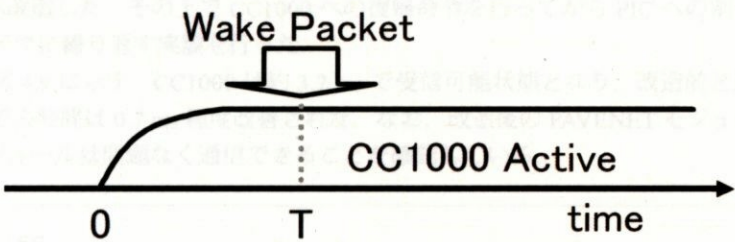


図 4.7: アクティブ状態までの復帰

実験の測定結果を図 4.8 に示す. 測定結果より復帰命令を受けてからパケットを受信可能になるまで 4.55 ms であることが分かった. 時刻同期の誤差と水晶振動子の復帰時間の揺らぎにより, 約 0.7 ms の揺らぎが確認された. 実際のシステムでは時刻同期の精度の誤差は ± 1 ms であるため, 受信待機時間は 2 ms 必要である. つまり, CC1000 がアクティブ状態である必要のある時間は復帰時間の 4.55 ms, 受信待機時間の 2 ms と, スリープ処理を行う 2 ms を含めて約 8.5 ms であり, PIC18LF4620 のアクティブの時間は PIC の復帰時間の 2 ms を足した約 10.5 ms である.

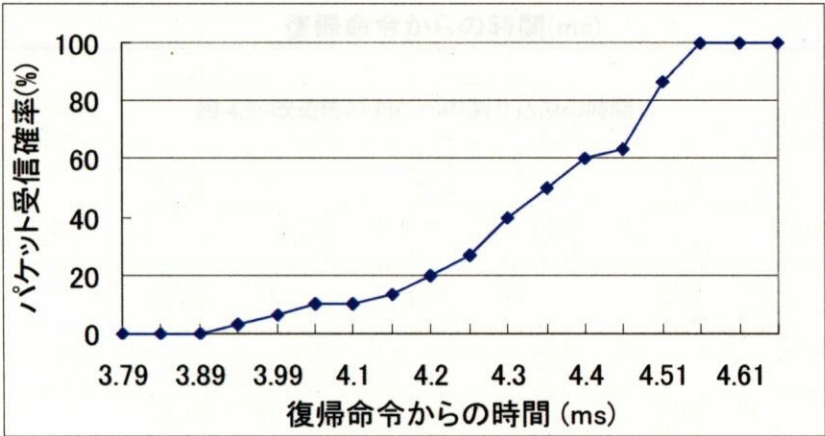


図 4.8: アクティブ状態までの復帰

4.3.3 CC1000 の水晶振動子のキャパシタの交換

CC1000 の復帰時間の短縮を図るために、水晶振動子のキャパシタを負荷容量が 22 pF のものから 18 pF のものへ改造した。その上で CC1000 への復帰命令を行ってから PIC への割り込みが入った直後の値をタイマに繰り返す実験を行った。

実験結果を図 4.9 に示す。CC1000 は約 3.7 ms で受信可能状態となり、改造前と比べて受信可能状態になるまでの時間は 0.7 ms 程度改善された。なお、改造後の PAVENET モジュールと改造前の PAVENET モジュールは問題なく通信できることを確認している。

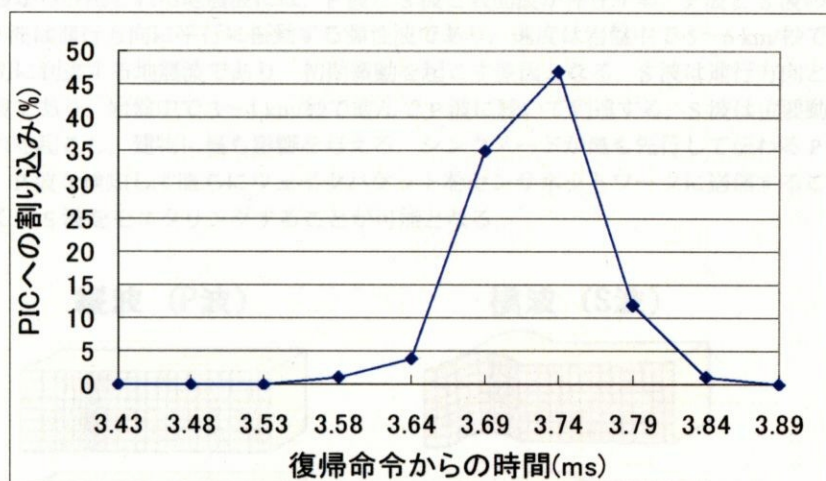


図 4.9: 改造後の PIC への割り込みの時間

4.3.4 地震波の情報を利用した復帰の可能性

シンクノードが地震を感知してから各センサノードを起こすまでに時間がかかるために、センサノードは地震の揺れ始めのデータを測定することが出来ない。測定出来ない可能性のある時間の長さは、センサノードのスリープの時間の長さに依存する。スリープの時間の長さは建築構造物の種類やシステムの設置場所、システムの耐久年数などさまざまな要求要件によって決定されるが、一つの方法としてP波(Primary wave)とS波(Secondary wave)の到達時間差を利用して決定することが可能性として考えられる。

震源断層から放出される地震波には、P波とS波と表面波が存在する。P波とS波の図を図4.10に示す。P波は進行方向に平行に振動する弾性波であり、速度は岩盤中で5~6 km/秒である。地震発生時最初に到達する地震波であり、初期微動を起こす原因となる。S波は進行方向と直角に振動する弾性波であり、岩盤中で3~4 km/秒で進んでP波に続いて到達する。S波は主要動と呼ばれる大きな揺れを起こし、建物に最も影響を与える。シンクノードが最も先行して伝わるP波を検知できる場合、P波を検知して直ちにウェイクパケットをセンサネットワークに送信することで、遅れてやってくるS波をモニタリングすることが可能となる。

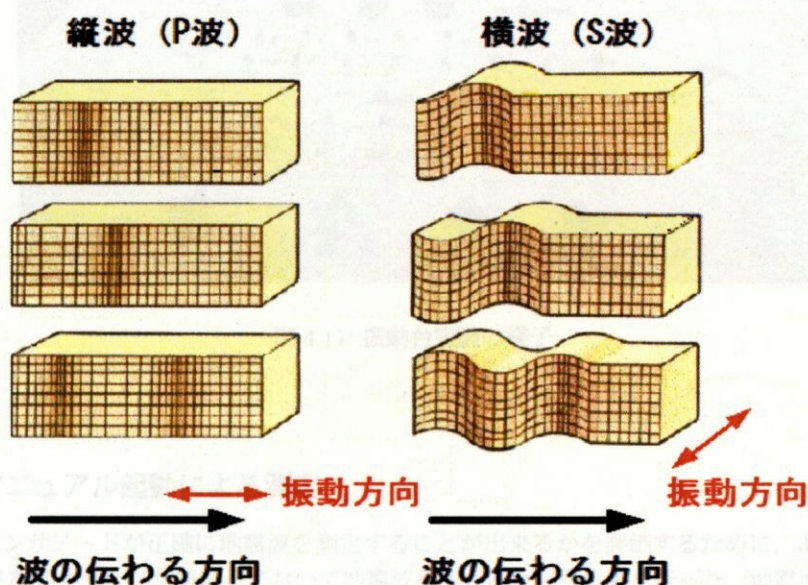


図 4.10: P 波と S 波

4.4 振動台実験結果

実装した地震モニタリングシステムの動作を評価するため、飛田給にある鹿島建設技術研究所において振動台実験を行った。図 4.11 に振動台実験の様子を示す。この振動台は図 4.11 の左右方向の 1 方向のみに振動を加えることができる。振動台に 8 個のセンサノードを設置し、その真ん中に解析用のマシンと接続したシンクノードを配置した。加えた地震波は兵庫県南部地震のデータであり、3 つのケースに関して実験を行った。

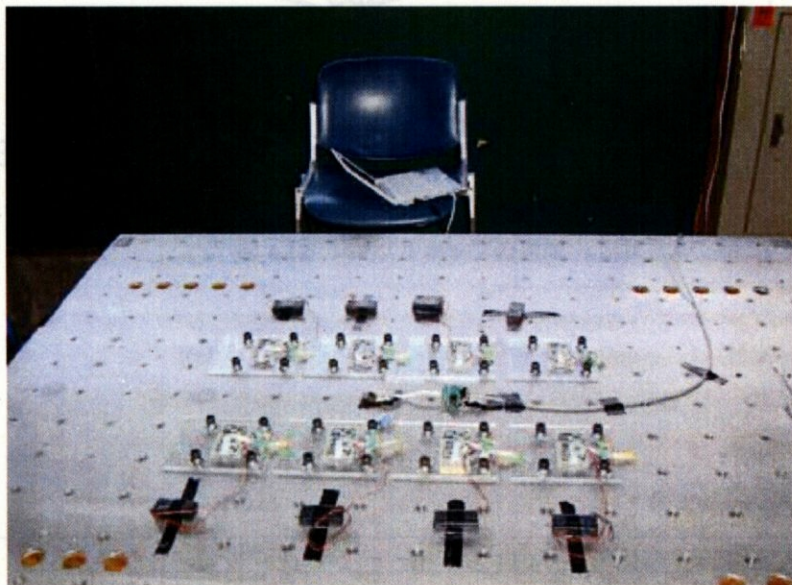


図 4.11: 振動台実験の様子

4.4.1 マニュアル起動による測定

8 個のセンサノードが正確に地震波を測定することが出来るかを評価するために、あらかじめセンサノードをアクティブ状態にしておいて地震波を加えるという実験を行った。地震波を加振する数秒前にシンクノードからマニュアル操作でウェイクパケットを送信し、8 個のセンサノードに同じタイミングで加速度の測定を開始させた。データは図 4.12 のようにシングルホップの通信でシンクノードに集めた。

実験結果を図 4.13 に示す。図 4.13 における最初のピーク付近の拡大図を、図 4.14 に示す。図 4.14 より、8 個のノードのうち、同期がずれているものがあることが分かった。ウェイクパケットをトリガーとして測定を開始しているため、各センサノードは同時に測定を開始しているはずである。しかしながら、測定の開始時間がずれているのは、パケットを受信開始してから加速度データを測定開始するまでの時間に時間差があるからであると考えられる。

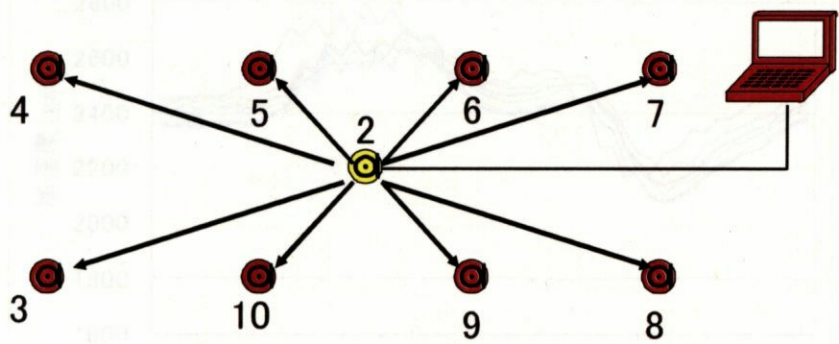


図 4.12: シングルホップの通信

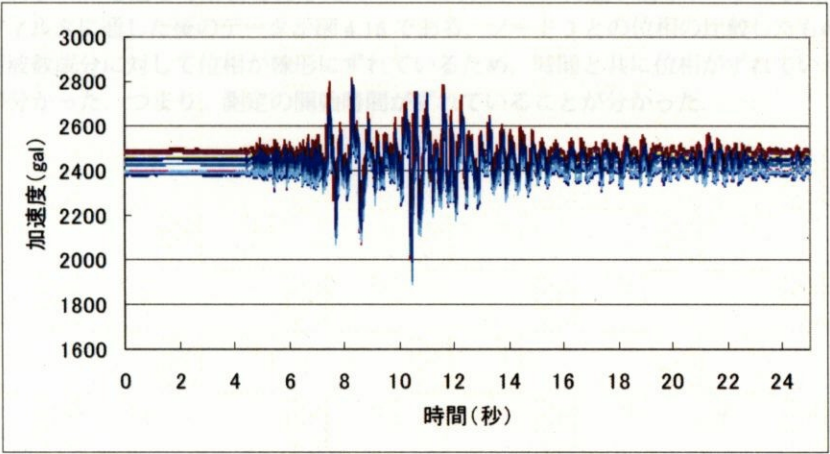


図 4.13: 兵庫県南部地震

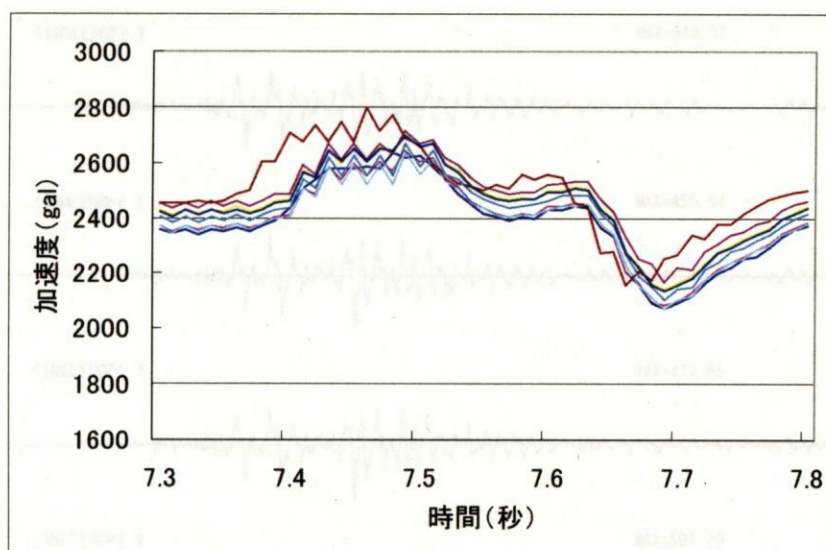


図 4.14: 最初のピークの拡大

また、図 4.14 の大きな揺れの中に、小さな揺れが見られることが分かる。この小さな揺れは振動台の交流電流に含まれる 50 Hz の成分である。50 Hz の周波数成分を取り除くため、20 Hz のローパスフィルタにデータを通して解析を行った。ローパスフィルタに通す前のデータが図 4.15 であり、ローパスフィルタに通した後のデータが図 4.16 である。ノード 3 との位相の比較したものを図 4.17 に示す。周波数成分に対して位相が線形にずれているため、時間と共に位相がずれていくわけではないことが分かった。つまり、測定の開始時間がずれていることが分かった。

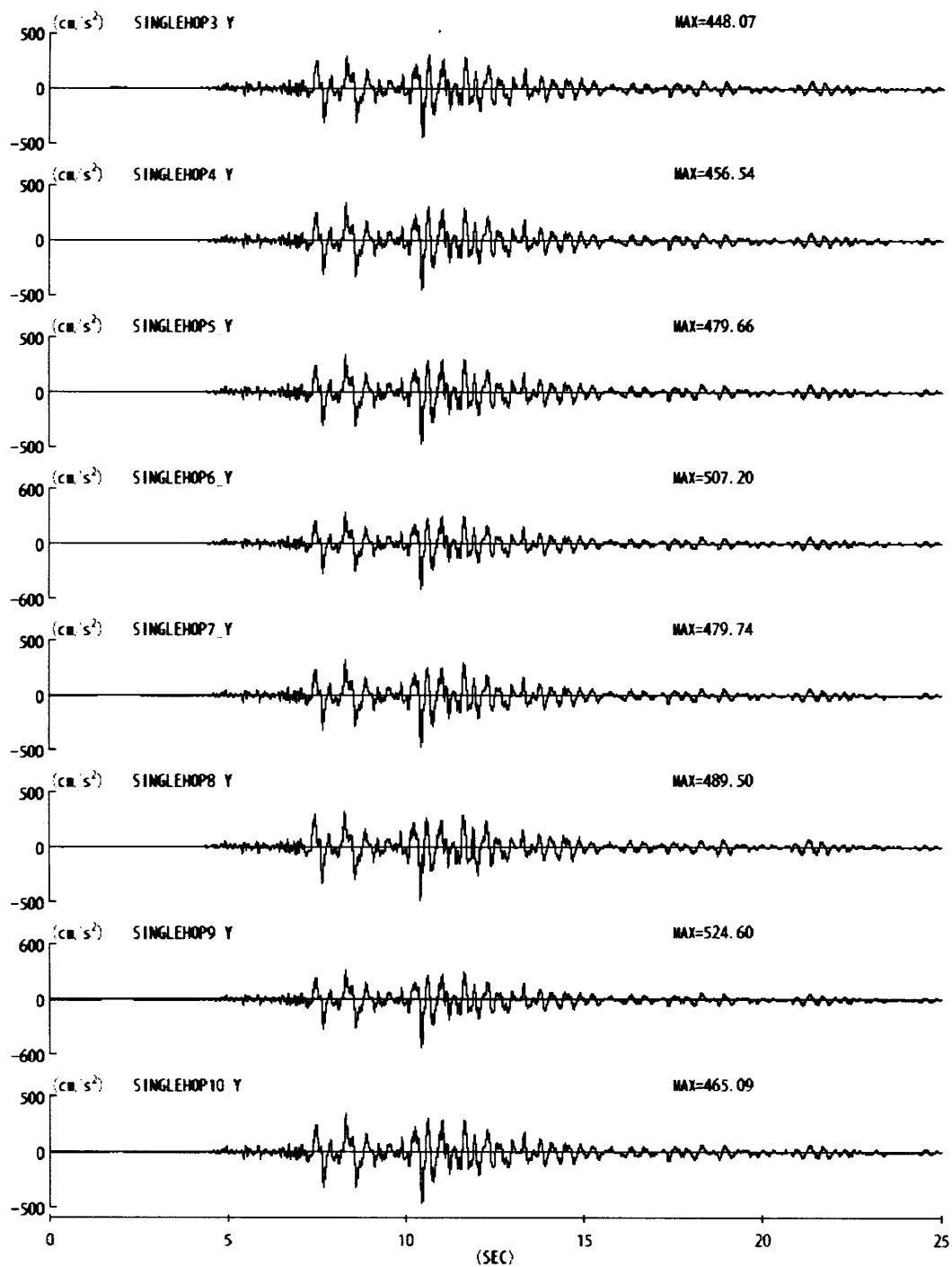


図 4.15: ローパスフィルタに通す前のデータ

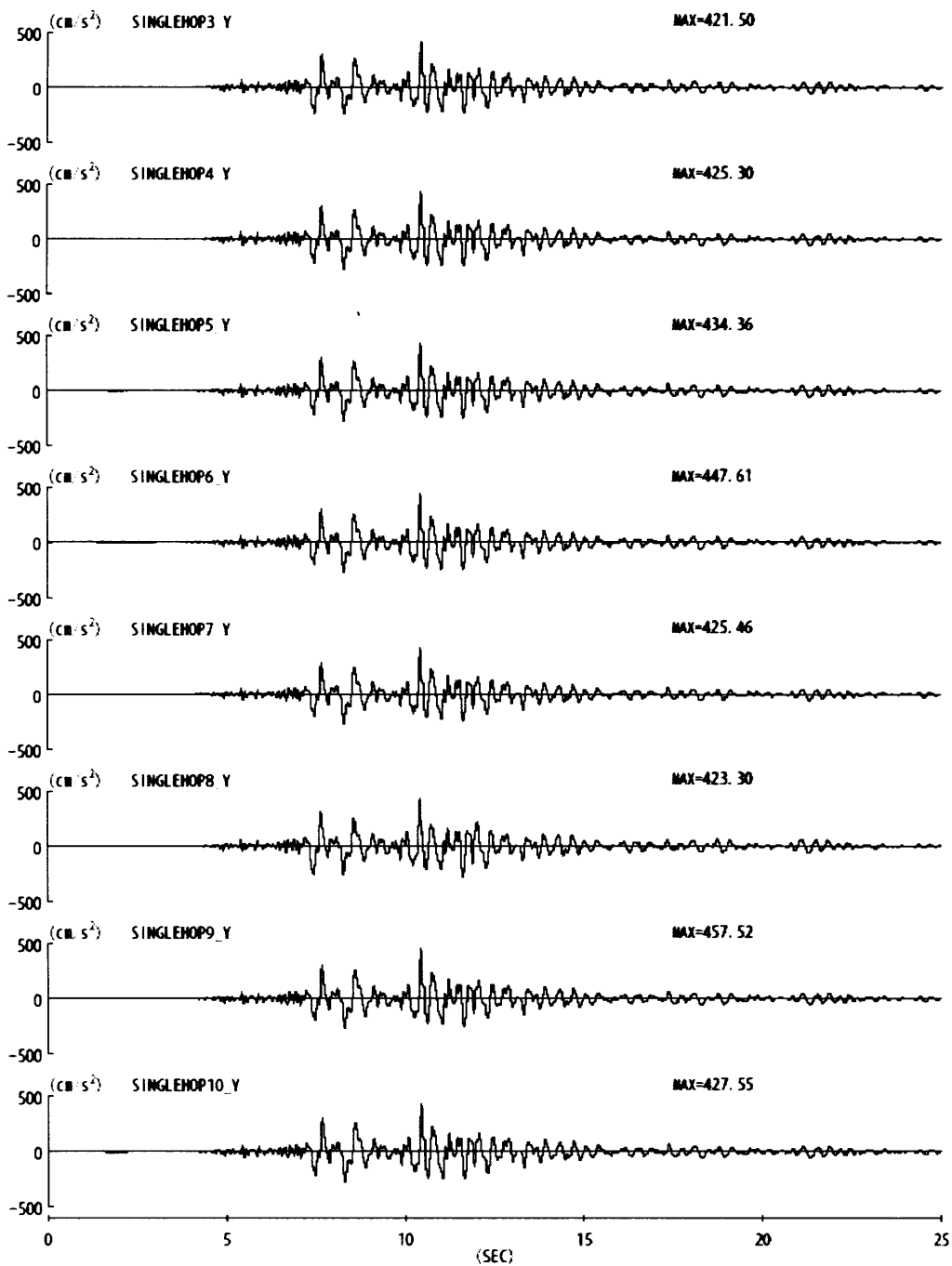


図 4.16: ローパスフィルタに通したデータ

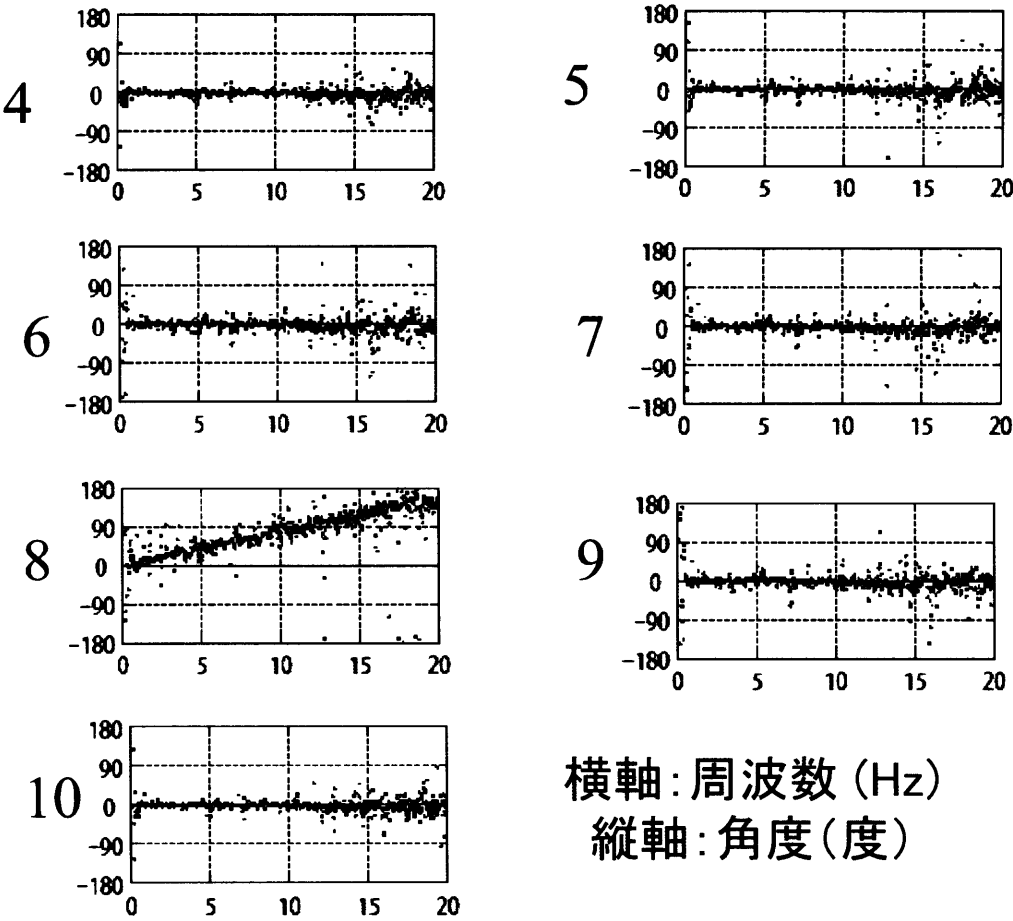


図 4.17: ノード 3 との位相の比較

測定開始の時刻のずれの一つの理由として、パケットを受信する際の receive time の個体差が考えられる。無線通信における遅延を図 4.18 に示す [22]。ある 2 つのノード間において、パケットの送受信にかかる時間のゆらぎは数十マイクロ秒以内であることは 4.2 の評価実験で示されている。伝播時間は無線が伝わる時間であり、数マイクロ秒とほぼ固定である。reception time はデータ量に比例するため、同じパケットの受信にかかる時間は各ノードとも固定である。しかしながら、receive time の時間は各ノードに個体差があり、データの測定時間のずれに反映されている可能性がある。各ノードで時間のそろったデータを測定するためには、receive time を正しく評価する仕組みを構築する必要があることが分かった。

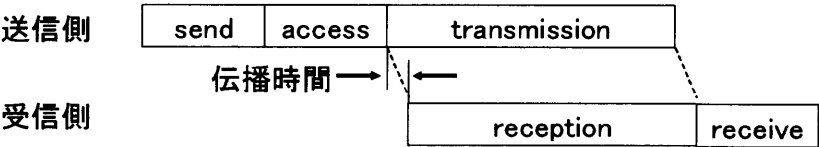


図 4.18: 無線通信における遅延

もう一つの理由として、加速度センサ及びフィルタのウェイクまでの待機時間のゆらぎが考えられる。加速度センサ及びフィルタは通常はスリープしていて、ウェイクパケットを受信した後にアクティブ状態へ移行する。加速度センサおよびフィルタがアクティブ状態へ移行するまでの時間を PAVENET モジュールは待機する必要があるが、この待機時間にゆらぎがある可能性が考えられる。待機時間のゆらぎは、内部タイマを用いてウェイクするのに十分でかつ正確な時間間隔を待機することで解決すると考えられる。

また、データ収集の際のパケットロス率はシングルホップでは 0.1775% であった。そして 25 秒の加速度データを集める時間は約 150 秒であった。

4.4.2 ウェイクノードの起動による測定

通常、センサノードはスリープとアクティブの状態を繰り返しており、ウェイクパケットが送信されていないか監視を行っている。ウェイクノードは家庭用電源に接続されており、常に加速度を測定して地震を監視している。地震が起こった際にはウェイクノードはシンクノードに直ちに報告する。そしてシンクノードは各センサノードのアクティブ状態の時間に合わせてウェイクパケットをブロードキャストする。ウェイクパケットを受信した各センサノードは加速度の測定を開始する。

地震が起こった際に、ウェイクノードが地震を感知することが出来るかどうか、そして各センサノードがウェイクすることが出来るかどうかを評価するために実験を行った。トポロジを図4.19に示す。図4.19の青色のノードがウェイクパケットである。地震波を測定した後、シングルホップでデータ収集を行った。測定した加速度を図4.20に示す。図4.20より、ウェイクノードによるウェイクの仕組みは正しく機能していることが分かった。

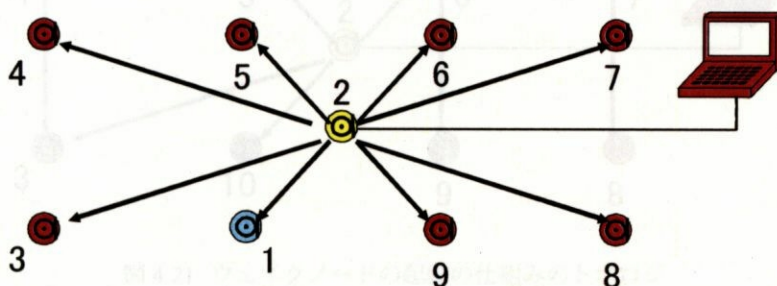


図 4.19: ウェイクノードの起動の仕組みのトポロジ

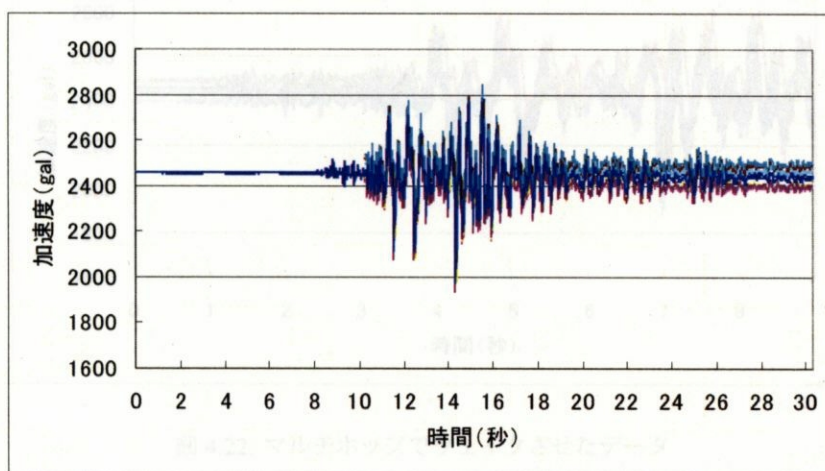


図 4.20: ウェイクノードの起動による測定データ

4.4.3 マルチホップによる通信

地震波を加振する数秒前にシンクノードからマニュアル操作でウェイクパケットを送信し、図 4.21 のようにマルチホップでウェイクさせて加速度の測定を開始させた。データはマルチホップ通信でシンクノードに集めた。しかしながら、図 4.22 のように 4.4.1 で見られた同期のずれがマルチホップ通信ではさらに顕著になっている。パケットロス率に関しては、2 ホップのものは 0.48%、3 ホップのものは 0.22% であった。ただ、2 ホップのものはサンプル数が約 2700 であるのに対し、3 ホップのものはサンプル数が約 900 しかないためデータとしての信頼性は薄い。9 秒間のデータを収集する時間に関しては、1 ホップのものは約 36 秒、2 ホップのものは約 50 秒、3 ホップのものは約 63 秒であった。

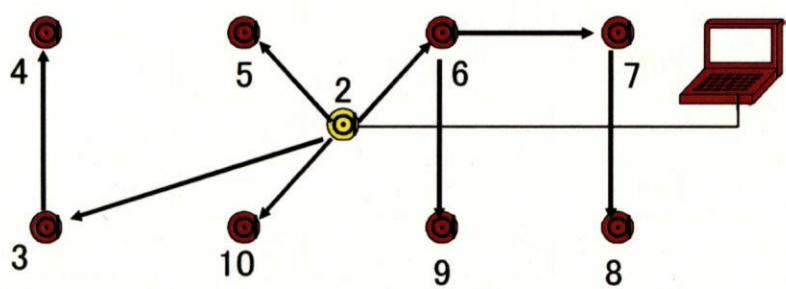


図 4.21: ウェイクノードの起動の仕組みのトポロジ

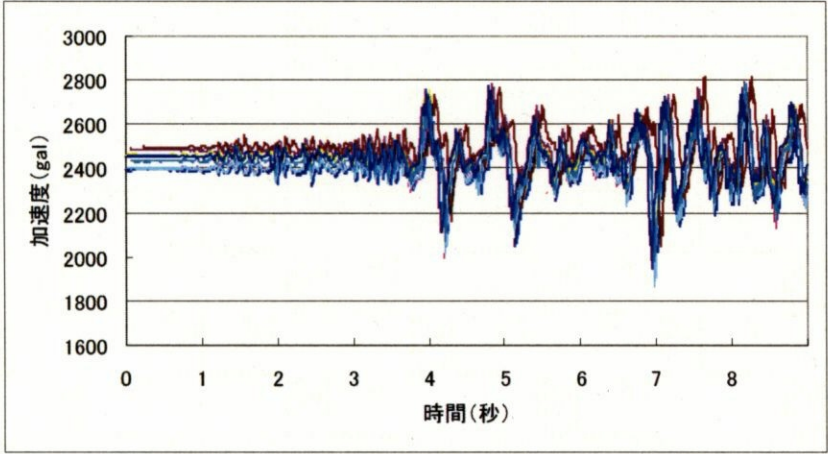


図 4.22: マルチホップでウェイクさせたデータ

4.5 おわりに

本章では、時刻同期の仕組みについて述べ、評価実験を行ったことを述べた。次いで低消費電力のためのスリープの仕組みについて述べた。さらに振動台実験について述べ、実験結果よりパケットを受信するのに必要な時間の個体差と加速度センサおよびフィルタがアクティブ状態へ移行するまでの PAVENET モジュールの待機時間を考慮する必要があることが分かった。

第5章 結論

5.1 本論文の主たる結果

本論文では、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について述べた。本地震モニタリングシステム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が可能であり、地震直後の建築構造物の健全性の評価を行う。

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。そのため、スリープを仕組みを導入することで消費電力を抑えたシステムを実現した。

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。

5.2 今後の課題

5.2.1 RTC を使った同期手法

PIC18LF4620 は内部タイマを用いてスリープから復帰させることが可能である。しかしながら、内部タイマを使用する場合、スリープ時に $5.2 \mu\text{A}$ の消費電流が流れる。一方で PAVENET モジュールで採用している RTC である EPSON の RX-8581JE はタイマを 1/4096 秒～4096 分に設定することができ、3 V 供給時に $0.45 \mu\text{A}$ で動作する。すなわち、スリープからの復帰に内部タイマを使ったときよりも RTC を使用したほうがスリープ時の消費電力を小さく抑えることができる。

しかしながら、RX-8581JE との通信は I2C 通信で行うため、RX-8581JE の値を設定するのに時間のロスが生じる可能性がある。また、詳細なタイマの値を表示させることが出来ないため、細かな精度の時刻の制御が困難である。本地震モニタリングシステムは時刻同期の精度が非常に重要であるため、RX-8581JE のみを用いた時刻同期は考え難いが、PIC の内部タイマと組み合わせることにより非常に低消費電力の同期手法、及びスリープの仕組みを実現させる可能性がある。

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

図 4.18 に示される無線通信における遅延において、ある 2 つのノード間において、パケットの送受信にかかる時間のゆらぎは数十マイクロ秒以内であることは 4.2 の評価実験で示されている。伝播時間は無線が伝わる時間であり、数マイクロ秒とほぼ固定である。reception time はデータ量に比例するため、同じパケットの受信にかかる時間は固定である。しかしながら、receive time の時間は各ノードに個体差があり、データの測定時間のずれに反映されている可能性がある。各ノードで時間のそろったデータを測定するためには、recieve time を正しく評価する仕組みを構築する必要があることが分かった。

謝辞

本研究を進めていく過程で直接御指導いただき、さまざまな知識、研究に対する姿勢などを御教示下さり、また研究室打合せでの有益な御指導、御批評、そして励ましの言葉をいただいた青山 友紀教授、森川 博之助教授に感謝致します。

また常日頃、研究室において研究環境の整備に尽力してくださった渡邊 廣次助手、川原 圭博助手、今泉 英明助手、川北 敦子秘書、宮島 史子秘書に深く感謝致します。

博士2年の猿渡 俊介さんには、研究が何たるかという根本の部分から論文の書き方、実装方法など、私に非常に多くのご教授を下さいました。ここに深く感謝の意を述べたいと思います。また、共同研究者である鹿島建設の倉田 成人工学博士には、地震工学の観点からだけでなく、研究者としての心構えをご教授下さいました。本当に感謝致します。NEC エンジニアリングの八重樫 富士勝様にはセンサボードの設計やデバイスに関するご指導、非常にお世話になりました。深く感謝しております。

また、あるときは共に研究活動を行い、あるときは共に時間を割いて励まし合った、今泉 英明助手、卒業生の橋口 知弘さん、鹿島 拓也さん、博士2年の猿渡 俊介さん、修士2年の丸山 達也君、水野 浩太郎君、木田 信雄君、平井 肇君、修士1年の鈴木 誠君、神田 敦君、学部4年の小澤 政博君、北田 亘君、本当に大変お世話になりました。共に過ごした時間は大事な思い出です。ありがとうございます。

そして、至らない私の面倒を何とかみていただいた、博士3年の金子 晋丈さん、三村 和さん、岡 敏生さん、博士2年の松本 延孝さん、川西 直さん、本当にお世話になりました。また、修士2年の小森田 賢史君、学部4年の倉沢 央君、天野 翔君、鈴村 理絵子さん、おかげで楽しい生活を送ることが出来ました。ありがとうございます。

修士の2年間、研究生活を助けて頂いた青山・森川研究室の皆様、色んな面で生活を支えてくれた友人達に深く感謝致します。

平成18年2月3日

参考文献

- [1] Z. S. Wu and M. Abe: "Proceedings of the First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure" (2003).
- [2] J. M. Kahn, R. H. Katz and K. Pister: "Next Century Challenges: Mobile Networking for Smart Dust", Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'99), Seattle, Washington, ACM, pp. 483-492 (1999).
- [3] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann and S. Kumar: "Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks", Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCom'99), Seattle, Washington, ACM, pp. 263- 270 (1999).
- [4] 堀江, 猿渡, 倉田, 森川, 青山: "無線センサネットワークを用いた地震モニタリングにおける同期性能の評価", 第2回センサネットワーク研究会予稿集 (2005).
- [5] 倉田, 猿渡, 堀江, 森川, 青山: "ユビキタス・センサネットワーク用 MEMS 加速度センサの振動台実験", 日本建築学会大会学術講演概集 (2005).
- [6] M. Beigl, T. Zimmer, A. Krohn, C. Decker and P. Robinson: "Smart-Its - Communication and Sensing Technology for UbiComp Environments", Technical Report ISSN 1432- 7864 (2003).
- [7] 長井, 三田, 矢向, 佐藤: "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", 日本地震工学会論文集, 3, 4, pp. 1-13 (2003).
- [8] J. Hill and D. Culler: "MICA: A Wireless Platform For Deeply Embedded Networks", IEEE Micro, Vol. 22, pp. 12- 24 (2002).
- [9] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, "An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", Proceeding of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2002.
- [10] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, "Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring", Proceeding of the First ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, 2002.
- [11] Narito Kurata, B. F. Spencer, Jr. and Manuel Ruiz-Sandoval, "Building Risk Monitoring Using Wireless Sensor Network", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1406, 2004.

- [12] B. F. Spencer, Jr., Manuel E. Ruiz-Sandoval, and Narito Kurata, "Smart sensing technology: opportunities and challenges", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 11, pp. 349–368, 2004.
- [13] <http://www.eecs.berkeley.edu/binetude/ggb/>
- [14] N. Xu, S. Rangwata, Krishna Kant Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan and D. Estrin: "A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring", *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland (2004).
- [15] J. Polastre, J. Hill and D. Culler: "A Versatile Low Power media Access for Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys'04)*, Baltimore, Maryland (2004).
- [16] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin: "An energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks", *Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 02)*, New York, New York, pp. 1567–1576 (2002).
- [17] Chipcon: "CC1000 Datasheet Rev. 2.1". [http://www.chipcon.com/files/CC1000 Data Sheet 2.1.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC1000%20Data%20Sheet%202.1.pdf).
- [18] L. E. Homquist, H. W. Gellersen, G. Kortuem, S. Antifakos, F. Michahelles, B. Schiele, M. Beigl and R. Maze: "Building Intelligent Environments with Smart-Its", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, pp. 56–64 (2004).
- [19] D. L. Mills, "Internet time synchronization: The Network Time Protocol", *Global States and Time in Distributed Systems*. IEE Computer Society Press, 1994.
- [20] J. E. Elson, L. Girod, D. Estrin, "Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts", *The 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, 2002.
- [21] S. Ganeriwal, R. Kumar, M. B. Srivastava, "Timing-Sync Protocol for Sensor Networks", *The 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys)*, 2003.
- [22] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon, A. Ledeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol", *The 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor System (SenSys)*, 2004.
- [23] 猿渡, 森川, 青山: "シングル CPU で実現される無線センサノードのためのフレームワークの実装", *電子情報通信学会総合大会* (2005).
- [24] Microchip Technology Inc.: "PICmicro Microcontrollers". <http://www.microchip.com/>.
- [25] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J. A. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, and V. Bahl: "Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, pp. 70–77 (2002).
- [26] T. van Dam and K. Langendoen: "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*, Los Angeles, California (2003).

- [27] V. Rajendran, K. Obraczka and J. GarciaLunaAceves: "Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks", Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sen- Sys'03), Los Angeles, California (2003).
- [28] 森戸, 南, 鹿島, 猿渡, 森川, 青山: "バッテリーレス無線センサネットワークの設計と実装", 電子情報通信学会技術研究報告 (2004).
- [29] 茂木, 吉原, 堀内: "センサネットワークのモニタのための高信頼なネットワーク内集約方式", 第2回センサネットワーク研究会予稿集 (2004).
- [30] 防災科学技術研究所, <http://www.bosai.go.jp/>

発表文献

堀江信吾、猿渡俊介、倉田成人、森川博之、青山友紀：“無線センサネットワークを用いた地震モニタリングにおける同期性能の評価”，第2回センサネットワーク研究会予稿集 (2005).

倉田成人、猿渡俊介、堀江信吾、森川博之、青山友紀：“ユビキタス・センサネットワーク用 MEMS 加速度センサの振動台実験”，日本建築学会大会学術講演概集 (2005).