

第3章 地震モニタリングの設計と実装

3.1 はじめに

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った。これは次の2つの理由による。1つ目は、これまでの地震工学では建造物の各階床が剛体であり、面的に同一の加速度が得られるという仮定に基づいていたからである。2つ目の理由は、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からである。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。これらの背景から、多数の小型加速度センサを実際の建物に対して設置し、地震による建物の被害をより詳細に解析することができる下地が整ってきたと言える。1つのフロアを複数のセンサによって面的な地震による影響を計測することは、地震工学的にも興味深い研究事例となる。

本章では、3.2でセンサノードを構成するPAVENETモジュールと加速度センサボードに関して述べ、3.3で地震モニタリングシステムにおいて建築構造物の健全性を評価するためのメカニズム、本システムの動作の流れ、アクティブとスリープの仕組み、ルーティングの流れ、同期手法、データ収集の方法の順に述べる。

3.2 センサノードの構成

当研究室では、これまで無線センサネットワークのユビキタスコンピューティング環境への適用を目指し、小型で低消費電力で使用しやすいシングル CPU の無線センサノードのハードウェア「PAVENET モジュール」と PAVENET モジュール上で動作するソフトウェア「PAVENET OS」の開発を行っている [23]. 本地震モニタリングは、PAVENET 用に開発した PAVENET モジュールに、加速度センサ、A/D コンバータ、SRAM などを搭載した加速度センサボードを接続してセンサノードを構築している. 図 3.1 がセンサノードである.

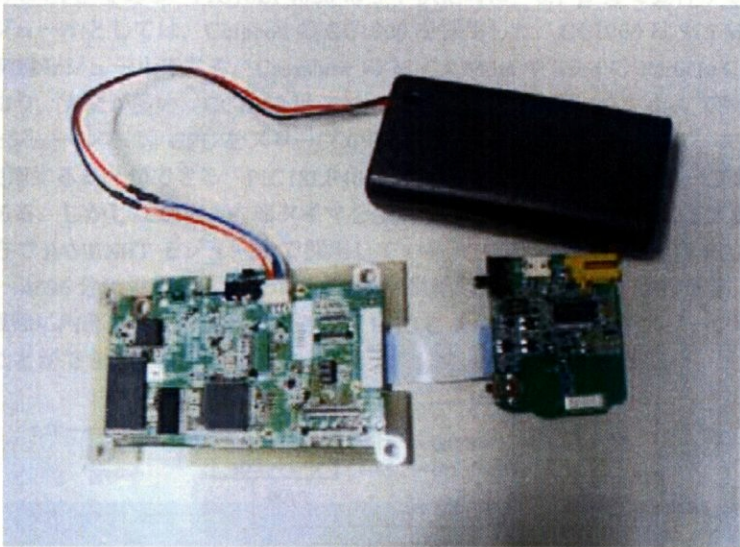


図 3.1: センサノード

3.2.1 PAVENET モジュール

無線センサノードは常に駆動しているわけではなく、簡潔的に動作する。そのため、スリープ時の消費電力が重要となるため、PAVENET モジュールにはスリープ時を想定して部品の選定を行った。CPU として Microchip の PIC18LF4620 [24]、無線モジュールとして Chipcon の CC1000 [17] を具備しており、MICA Mote [8] や Smart-Its [18] などと同程度の性能を具備している。PIC18Fxxxx シリーズは、Microchip の中でも nano Watt Technology として位置付けられており、これまで低消費電力向けの CPU として使用されていた PIC16 シリーズをも含めた置き換えをも考慮された非常に低消費電力な CPU である。PIC18LF4620 は 3 V 供給時に、0.1 μ A で動作する。

無線通信モジュールとしては、Chipcon の CC1000 を採用した。CC1000 は 315 MHz 帯の微弱無線で動作する無線モジュールである。Crossbow の MICA Mote や Teco の Particle Computer などでも使用されており、実績が多い。CC1000 はスリープ時に 3V 供給時に 0.2 μ A で動作する。

PAVENET モジュールでは、CPU をスリープから復帰させるための機構として、RTC (Real-Time Calendar) を使用することができる。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 μ 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 μ 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。

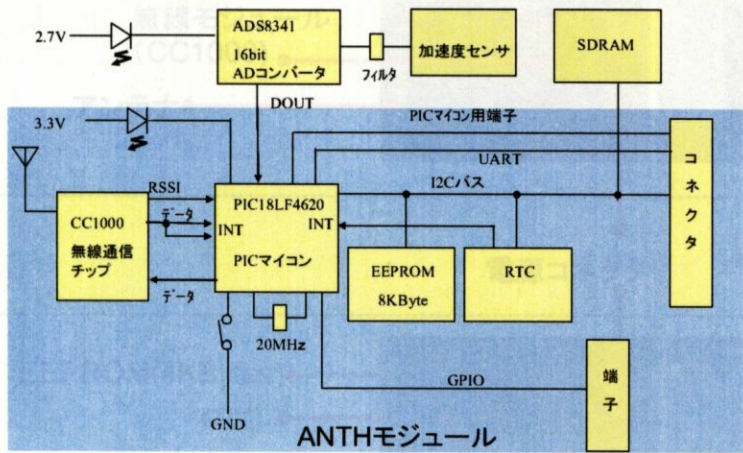


図 3.2: PAVENET モジュールのブロック図

図 3.3 にこれらの部品を具備した PAVENET モジュールを示す。PAVENET モジュールは、アンテナとしてチップアンテナを利用しているため、アンテナを含んで 30 mm × 40 mm × 5mm のサイズで実現されている。外部のインタフェースとしては、I2C、デジタル IO、10 bit AD 変換、シリアル通信インタフェースを具備している。消費電力を計測した結果、スリープ時に 0.5 μ A で動作することを確認した。すなわち、通信頻度が低い場合を想定すると単 3 電池 2 本で数年の動作が可能と

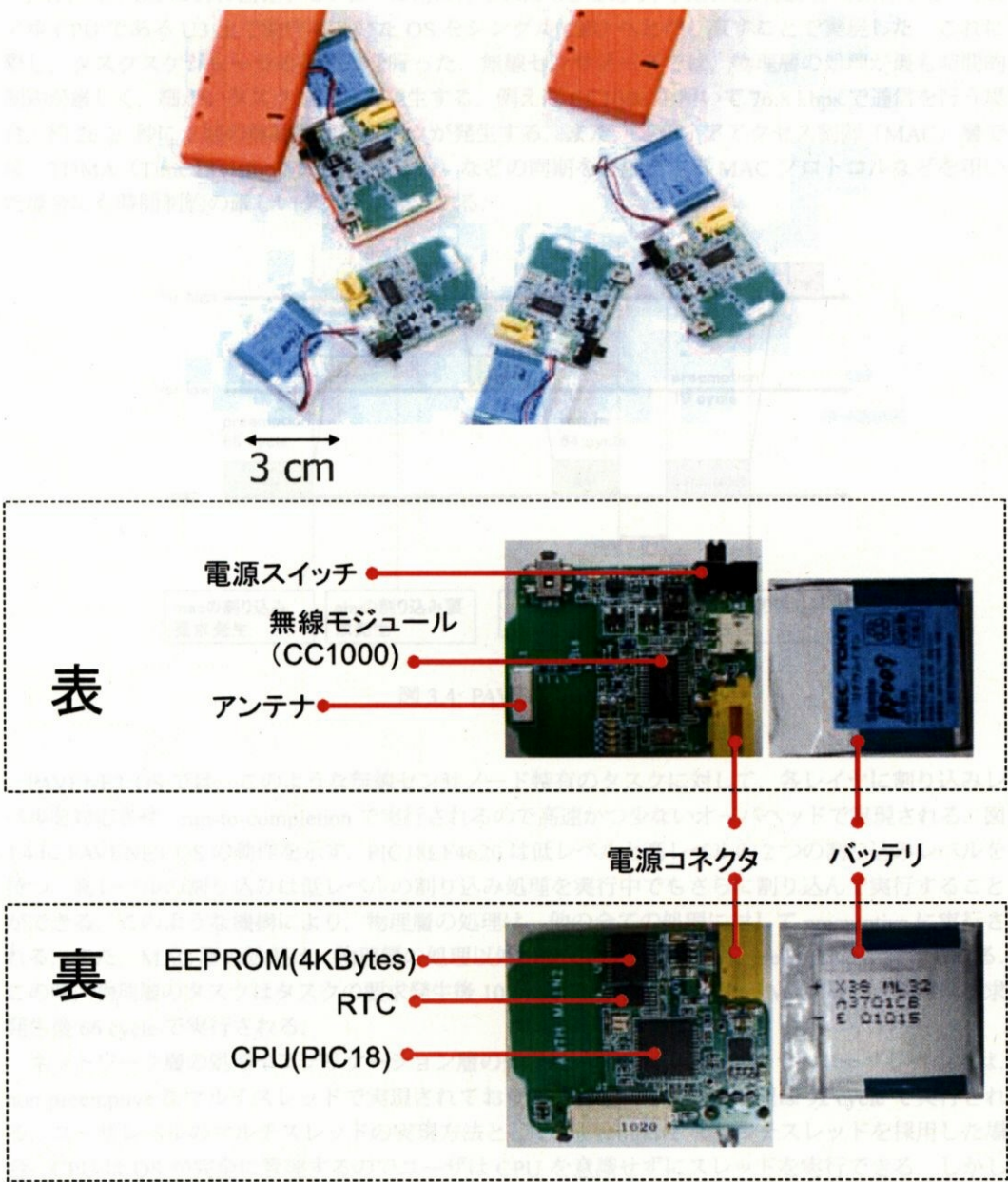


図 3.3: PAVENET モジュール

なる。

PAVENET OS は PAVENET モジュール用に作られた OS であり、PIC18LF4620 上で動作する。デュアル CPU である U3 上で動作していた OS をシングル CPU へと作り直すことで実現した。これに際し、タスクスケジューラの再設計を行った。無線センサノードでは、物理層の処理が最も時間的制約が厳しく、細かいタスクが頻繁に発生する。例えば CC1000 を用いて 76.8 kbps で通信を行う場合、約 26 μ 秒に 1 回の無線通信のタスクが発生する。また、メディアアクセス制御 (MAC) 層では、TDMA (Time Division Multiple Access) などの同期を必要とする MAC プロトコルなどを用いた場合にも時間制約の厳しいタスクが発生する。

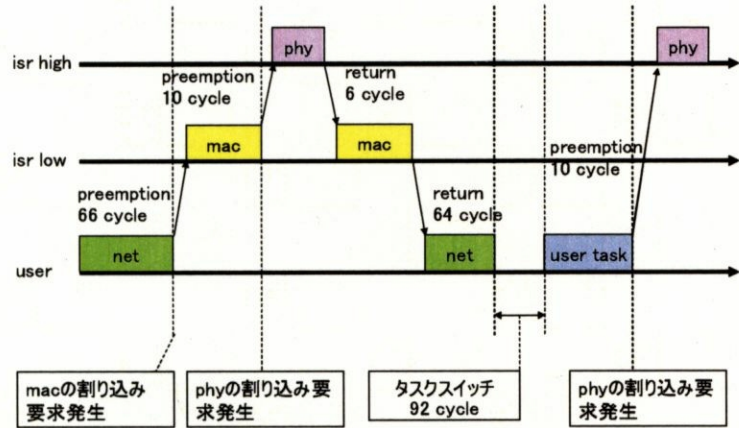


図 3.4: PAVENET OS

PAVENET OS では、このような無線センサノード特有のタスクに対して、各レイヤに割り込みレベルを対応させ、run-to-completion で実行されるので高速かつ少ないオーバーヘッドで実現される。図 3.4 に PAVENET OS の動作を示す。PIC18LF4620 は低レベルと高レベルの 2 つの割り込みレベルを持つ。高レベルの割り込みは低レベルの割り込み処理を実行中でもさらに割り込んで実行することができる。このような機構により、物理層の処理は、他の全ての処理に対して preemptive に実行される。また、MAC 層の処理は、物理層の処理以外の全ての処理に対して preemptive に実行される。この時、物理層のタスクはタスクの要求発生後 10 cycle で処理が実行され、MAC 層のタスクは要求発生後 66 cycle で実行される。

ネットワーク層の処理やアプリケーション層の処理は、ユーザレベルで行う。ユーザレベルでは、non-preemptive なマルチスレッドで実現されており、タスクスイッチの処理は 92 cycle で実行される。ユーザレベルのマルチスレッドの実現方法として、preemptive なマルチスレッドを採用した場合、CPU は OS が完全に管理するのでユーザは CPU を意識せずにスレッドを実行できる。しかしながら、無線センサノードではセンサなどのデバイスとの通信の処理など、意図的に CPU を占有したい場合が存在する。また、preemptive なマルチスレッドは OS が全ての CPU を管理するのでタスクスイッチのオーバーヘッドが大きい。それに対して non-preemptive なマルチスレッドではユーザが必要に応じて CPU を占有できるというメリットが存在する。また、non-preemptive なマルチスレ

ドではスレッドが自律的に処理を開放するため、タスクスイッチのオーバーヘッドを比較的小さく押さえることができる。さらに、non-preemptive なマルチスレッドは TinyOS など採用されている run-to-completion のマルチスレッドに比べて処理は若干重いものの、ユーザは 1 つのスレッドを 1 つの連続した処理として独立に記述することができるので開発がしやすい。

3.2.2 加速度センサボード

センサノードは、PAVENET モジュールに加速度センサボードを取り付けて構成される。加速度センサボードには加速度センサ、16 bit の A/D コンバータ、SRAM、加速度センサボード制御用の PIC マイコンなどが搭載されている。センサボードを図 3.5 に示す。

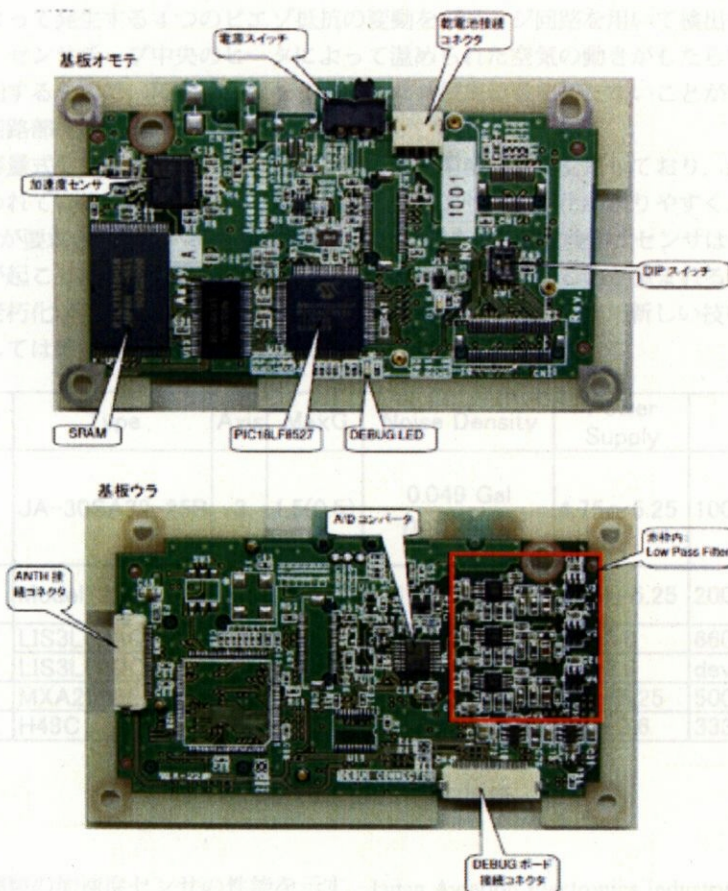


図 3.5: 加速度センサボード

地震モニタリングに使用する加速度センサは、小型で低消費電力というだけでなく、3 軸でのデータの取得、周波数特性が 0.1 Hz~20 Hz、最大加速度が 1000~1500 Gal、A/D 分解能が 16bit といった特性が必要である。これは小地震から大地震までを対象として、地震観測から超高層ビルでの振動計測まで幅広く用いるために必要な性能である。特に、超高層ビルや長周期地震動を対象にすると、周波数特性は 0.1 Hz からの低振動数領域での性能が重要であるが、MEMS 加速度センサでは、通常 10 Hz 以上の振動数領域でのみ性能が確認されていることが多い。これに向けて本研究では、ピエゾ抵抗式や熱分布検知式の MEMS 加速度センサを振動台による性能確認実験によって評価を

行っている [5]. 実用化されている MEMS 加速度センサでは、静電容量式、ピエゾ抵抗式、熱分布検知式等がある。

静電容量式センサは、固定電極と可動電極の組み合わせからなっており、加わった加速度により固定電極と可動電極との間の静電容量が変化することを利用して電圧として出力する。ピエゾ抵抗式センサは、センサチップ中央に設けたおもりを四方からピエゾ抵抗素子で支える構造で、中央のおもりの変動によって発生する 4 つのピエゾ抵抗の変動をブリッジ回路を用いて検出する。熱分布検知式センサは、センサチップ中央のヒータによって温められた空気の動きがもたらす温度変化を温度センサで検知するもので、可動部品がなく機械的な共振周波数を持たないことが特長であり、センサ部と周辺回路部を 1 チップの CMOS IC で実現している。

一般に静電容量式センサはピエゾ抵抗式センサよりも温度特性が安定しており、感度や精度を高めやすいと言われている。それに比べてピエゾ抵抗式センサは小型化が図りやすく、組込み用として小型・低背化が要求されるモバイル機器用途に適している。熱分布検知式センサは可動部品がないために老朽化が起りにくい。地震モニタリングは長期間駆動することが望まれるアプリケーションであるので老朽化が起りにくいことは大きなメリットであるが、まだ新しい技術であるため感度や精度に関しては静電容量式センサやピエゾ抵抗式センサに比べて劣る。

Company	Type	Axis	MaxG	Noise Density	Power Supply	Sensitivity
Japan Aviation Electronics Industry	JA-30SA32-25B	3	1.5(0.5)	0.049 Gal rms/ $\sqrt{\text{Hz}}$	4.75~5.25	1000mV/G $\pm 3\%$
SILICON DESIGNS	Model1221	1	2	5 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$	4.75~5.25	2000mV/G
STMicro electronics	LIS3L02AQ	3	2 and 6	50 $\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$	2.4~3.6	660mV/G $\pm 10\%$
	LIS3L02DQ	3	2 and 6	(digital)	2.7~3.6	device resolution
MEMSIC	MXA2500E	2	1	0.2mG/ $\sqrt{\text{Hz}}$	3.0~5.25	500mV/G $\pm 5\%$
Hitachi	H48C	3	3	1.8mg rms	2.2~3.6	333mV/G $\pm 3\%$

図 3.6: 加速度センサの比較

表 3.6 に 5 種類の加速度センサの性能を示す。Japan Aviation Electronics Industry の JA-30SA32-25B と SILICON DESIGNS の Model1221、ST Microelectronics LIS3L02AQ は静電容量式センサ、MEMSIC の MXA2500F は熱分布検知式センサ、Hitachi の H48C はピエゾ抵抗式センサである。

図 3.7 に、振動台実験の様子を示す。加速度センサを振動台の上に固定し、地震測定用のサイズの大きい加速度センサを正しいデータとして比較を行った。

図 3.8 は、JA-30SA32-25B の得た加速度データである。正確な加速度センサは振幅は 1 に沿って、位相のずれは 0 に沿ってスペクトルが得られる。JA-30SA32-25B は周波数が 10 Hz を越えたあたりから振幅が下がりはじめ、位相遅れがかなり見られる。

図 3.9 は Model1221 のデータである。参照した加速度センサとほぼ等しい波形が得られており、非常に優秀なセンサであるといえる。しかしながら、SILICON DESIGNS はミサイルといった軍事的な目的で Model1221 を製造している。そのため精度を高めるために部品の個体ごとに微調整を行って

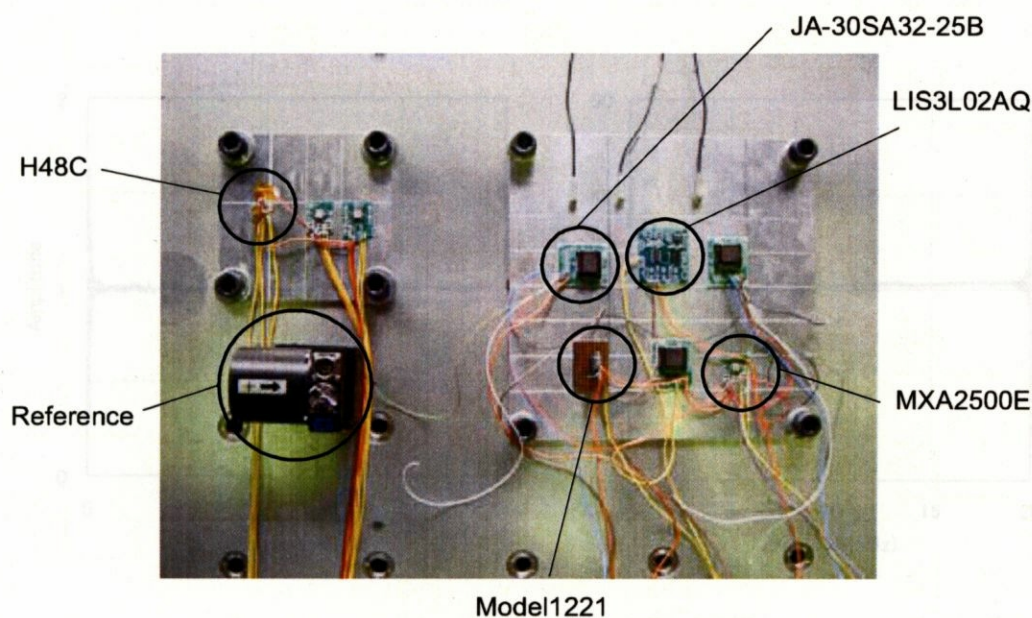


図 3.7: 振動台実験の様子

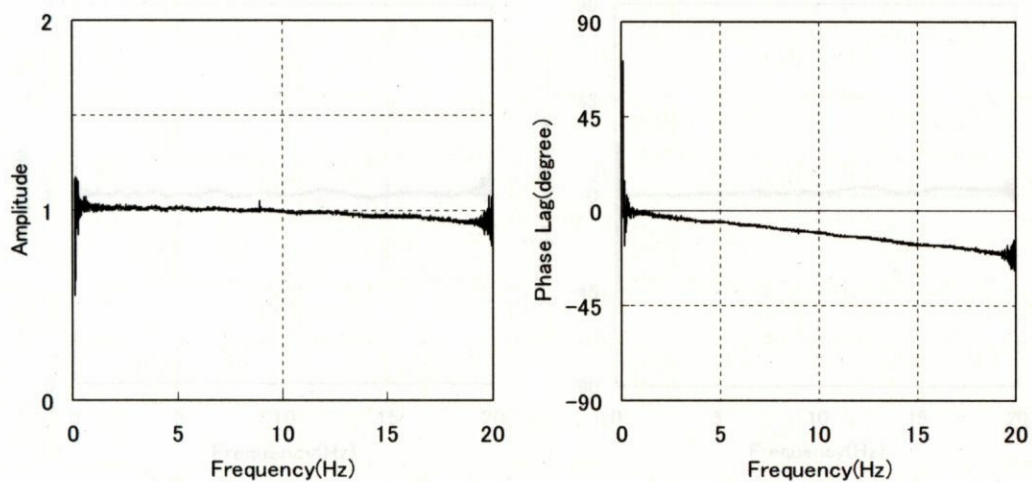


図 3.8: JA-30SA32-25B の加速度データ

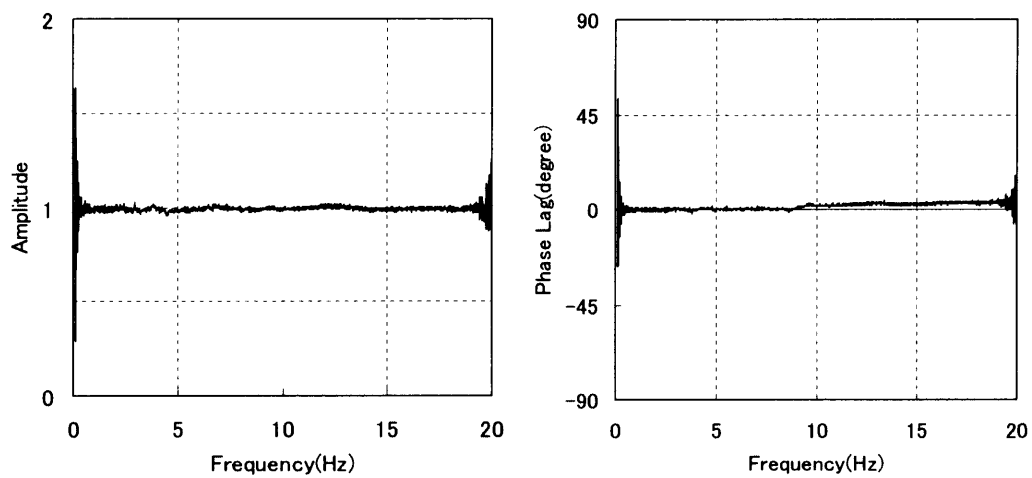


図 3.9: Model1221 の加速度データ

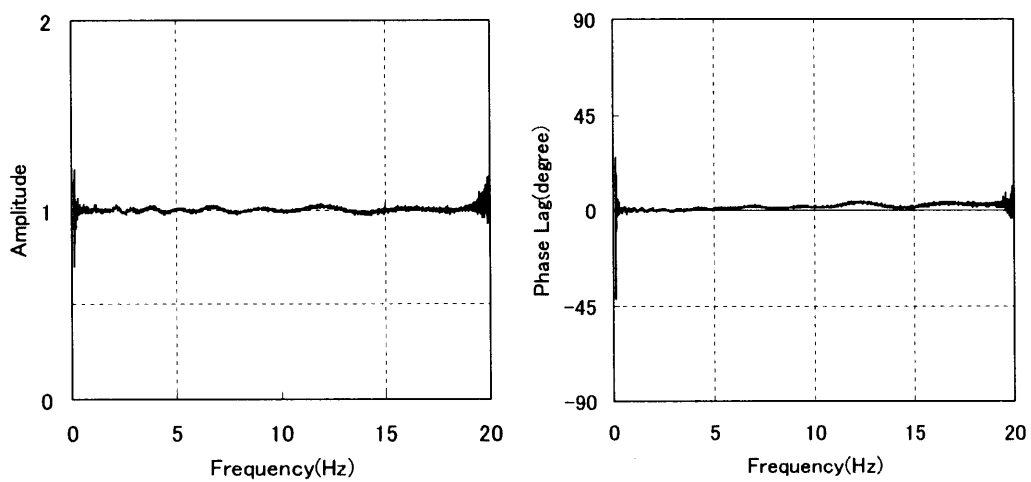


図 3.10: LIS3L02AQ の加速度データ

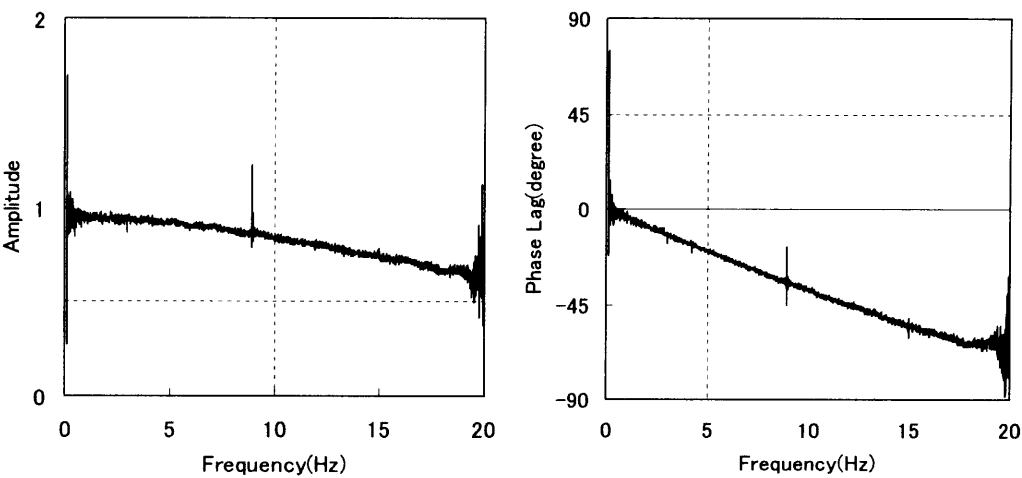


図 3.11: MXA2500E の加速度データ

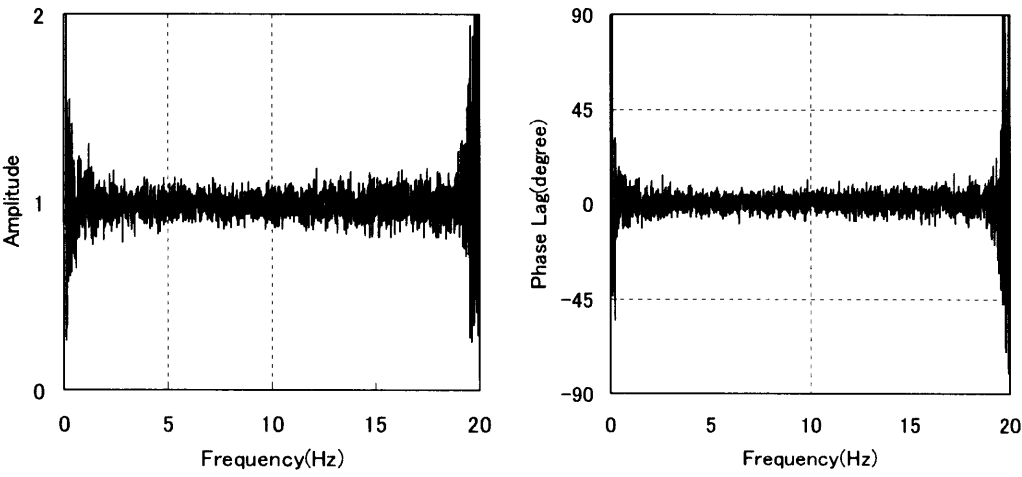


図 3.12: H48C の加速度データ

おり、1 軸方向しか測ることができないにも関わらず、他のセンサに比べて数十倍のコストがかかる。したがって、センサの精度としては優秀であるが、センサネットワークのような多数のセンサノードを用いるアプリケーションには不向きである。

図 3.10 は LIS3L02AQ の加速度データである。Model1221 には及ばないものの、非常に高い精度の結果が得られている。振幅も位相のずれも参照用の加速度センサに非常に似た値が得られている上にコストも手頃であり、多数のセンサノードを用いるセンサネットワークに非常に有効なセンサであるといえる。

図 3.11 は MXA2500E の加速度データである。熱温度検知式センサは可動部分がないために老朽化が起きにくいと、地震を測定するための精度が高ければ、地震モニタリングシステムに最も適したセンサであった。しかしながら、振幅と位相遅れが顕著に見られ、本地震モニタリングシステムには使用することが出来ない。熱温度検知式センサはまだ新しい技術であり、数年後には非常に精度の高いセンサが出現する可能性はあるが、現時点では静電容量式センサと比べて格段に精度が劣っている。

図 3.12 は H48C の加速度データである。H48C はピエゾ抵抗式センサであり、非常に小型で安価である。しかしながら、ノイズが非常に大きく、数十 Hz までの低い周波数では地震の揺れは測定できないことが分かった。

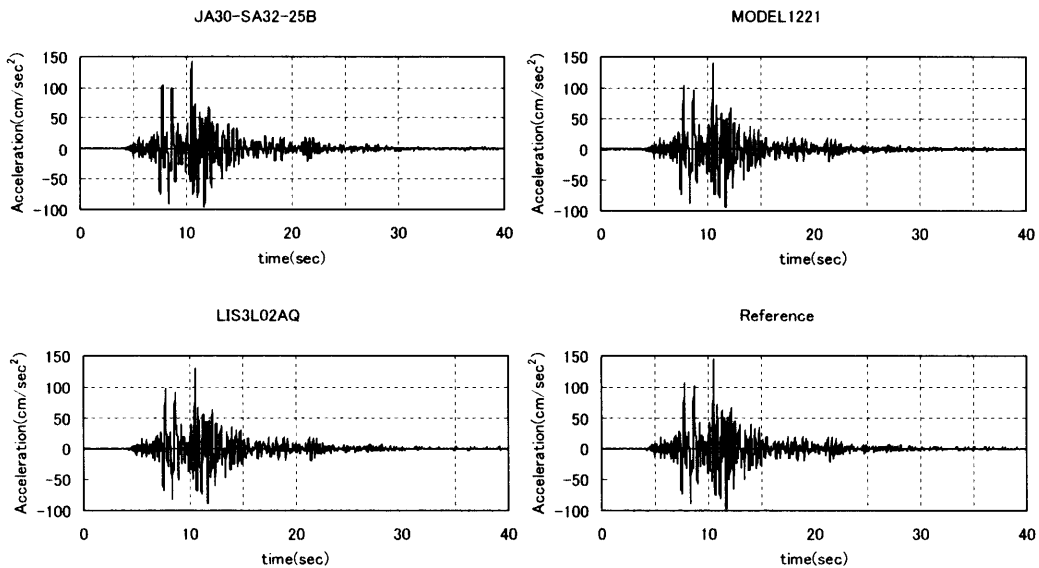


図 3.13: 振幅の大きな揺れを加えた測定データ

また、図 3.13, 3.14, 3.15 は静電容量式センサに 3 つのレベルの振幅の揺れを加えたときの比較を行ったものである。大きな揺れを加えたときは 3 つのセンサはほぼ同じ波形を得られているが、小さな揺れは測定の精度が非常に顕著に見られる。

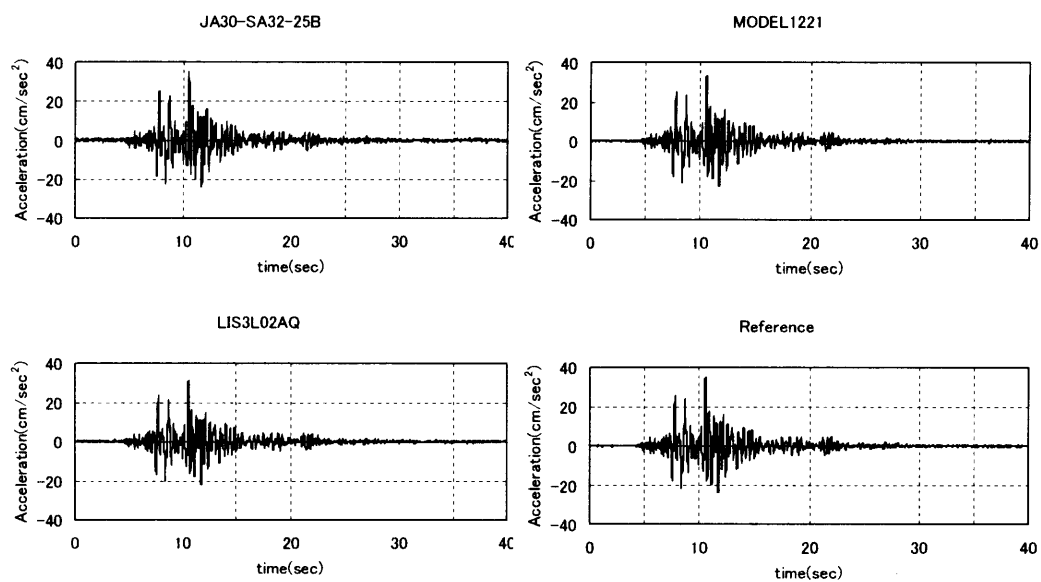


図 3.14: 振幅の中型の揺れを加えた測定データ

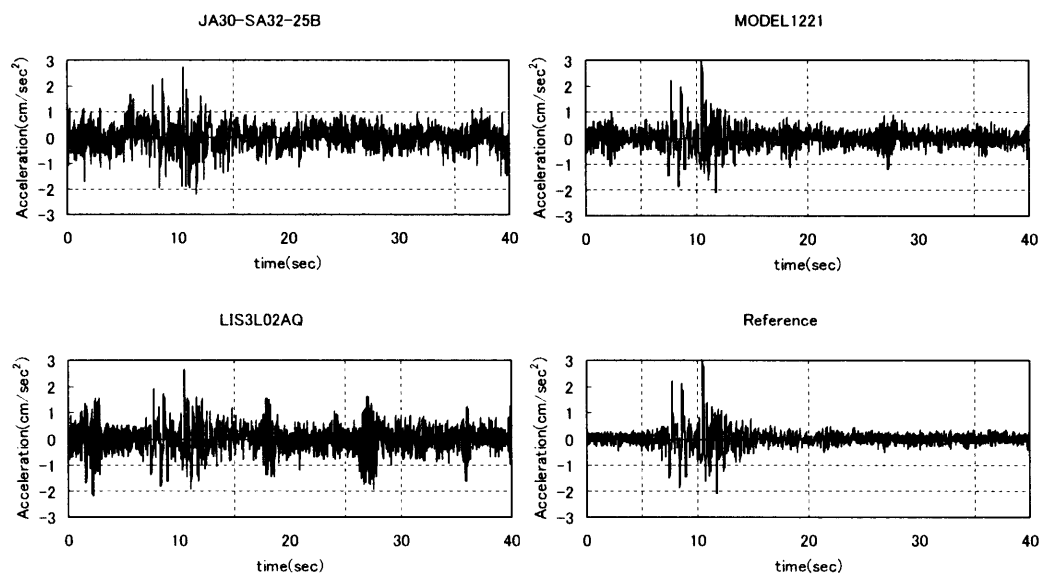


図 3.15: 振幅の小さな揺れを加えた測定データ

以上の実験の結果より、小地震まで測定可能で位相遅れも見られず、かつコストの小さい静電容量式センサの LIS3L02AQ を採用している。

SRAM はデータの一時保存用のストレージとして使用する。本研究では 16 bit の A/D コンバータでサンプリング周期が 100Hz を 3 軸で測定する。1 サンプルは 2 Byte のデータが 3 軸とデータのインデックスが 4 Byte で、計 10 Byte である。そのため、地震の加速度データを 30 秒間取得した場合、30 KByte のストレージが必要となる。本加速度センサボードには 2 MB の SRAM を搭載しているため、最大 35 分の記録が可能である。

ブロック図を図 3.16 に示す。PIC18LF8527 が PAVENET モジュールとの通信を UART 通信で行い、加速度センサや A/D コンバータなどの制御を PAVENET モジュールから行うことを可能にしている。

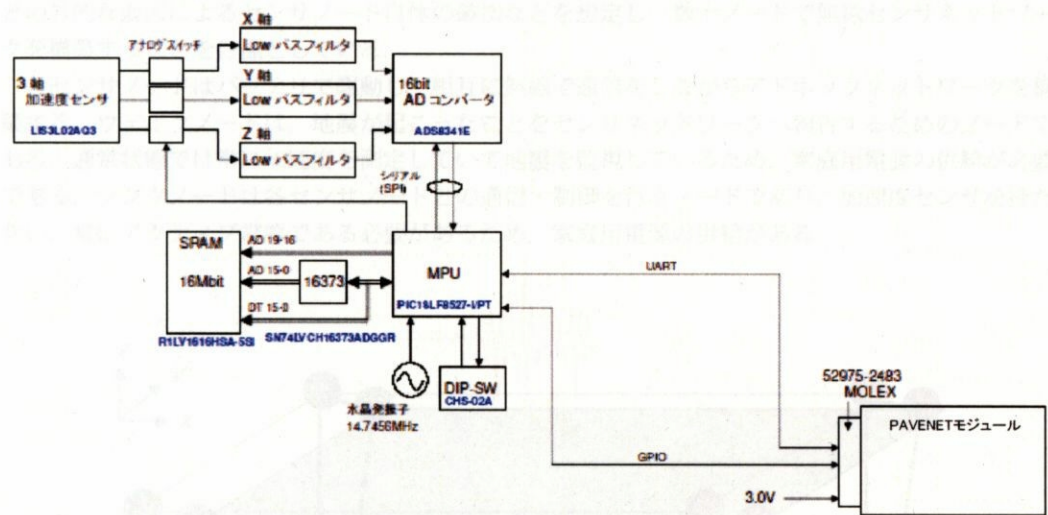


図 3.16: 加速度センサボードのブロック図

3.3 地震モニタリング

3.3.1 変位メカニズム

図 3.17 に変位の計測メカニズムを示す。まず、空間の 4 隅、天井と床あわせて合計 8 点の加速度センサを設置する。そして地震が発生したとき、各加速度センサで水平 2 方向、上下 1 方向の計 3 方向の絶対加速度を取得する。地震が起こっている間に測定された絶対加速度の各成分を時間で積分すると、各点での絶対速度が得られる。得られた絶対速度をさらにもう 1 度積分することで絶対変位の波形を得ることができる。これにより、空間が地震によって 3 次元的にどのように変形したかを把握することができ、地震直後の対象空間の構造健全性・安全性の評価を行う事が可能となる。

将来的には縦方向にセンサネットワークを展開して各階にセンサノードを設置することや、地震などの外的な要因によるセンサノード自体の破損などを想定し、数十ノードで無線センサネットワークを構築することを目指している。

各センサノードはバッテリーで駆動し、相互に無線で通信をしながらアドホックネットワークを構築する。ウェイクノードは、地震が起こったことをセンサネットワークへ報告するためのノードである。通常状態では常に加速度を測定して地震を監視しているため、家庭用電源の供給が必要である。シンクノードは各センサノードとの通信・制御を行うノードであり、加速度センサを持たない。常にアクティブ常態である必要があるため、家庭用電源の供給がある。

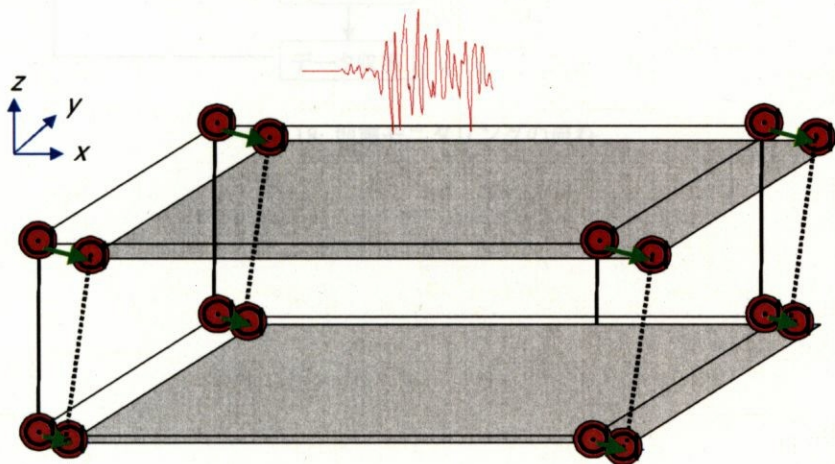


図 3.17: 変位の計測メカニズム

3.3.2 地震モニタリングの動作の流れ

図 3.18 に地震モニタリングの動作の流れを示す。まず、シンクノードを中心としたツリー構造を作成する。その後平常モードへ移行する。平常モードでは、各センサノードはスリープとアクティブの切り替えと、時刻同期パケットの送受信を行う。地震が起こった際にはウェイクノードがセンサネットワークへ報告し、直ちに地震モードへ移行して各センサノードは地震の揺れの測定を行う。地震終了後、各センサノードはシンクノードへデータを送信し、建築構造物の健全性の評価を行う。

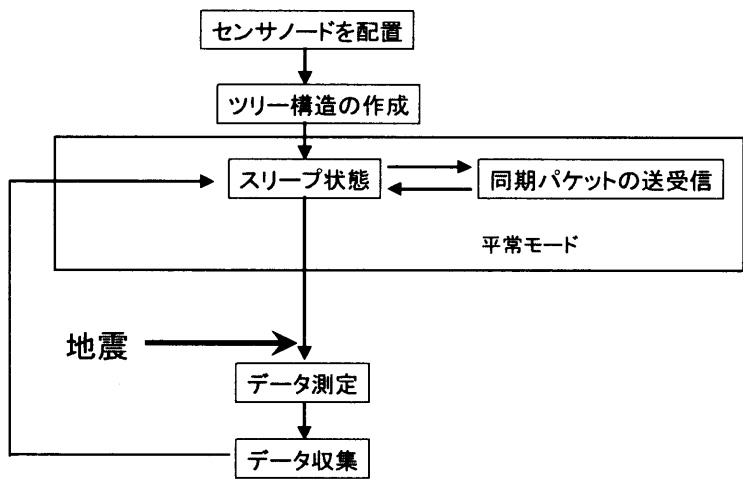


図 3.18: 地震モニタリングの流れ

3.3.3 パケット構成

通信を行う標準パケットの構成は図 3.19 のようになっている。パケットの受信を判別する preamble が 5 Byte、パケットの種類を示す packet mode が 1 Byte、パケットの行き先を示す destination が 1 Byte、パケットの送信元の node number が 1 Byte、パケットがシンクノードから何ホップしているかを示す hops が 1 Byte、ツリー構造において自分より先に何番のセンサノードがあるかを示す family number が数 Byte、計 9 Byte 以上から構成されている。packet mode が preamble の直後になっているのは、packet mode が wake up packet の場合にすぐ起きることが出来るためである。無線通信は 38.4 kbps であるため、1 Byte 送信するのに 0.2ms 程度必要である。

preamble	packet mode	destination	node num	hops	family num
5Byte	1Byte	1Byte	1Byte	1Byte	数Byte

図 3.19: 標準パケット構成

地震の加速度のデータを含んだパケットの構成は図 3.20 のようになっている。パケットの受信を判別する preamble が 5 Byte、data であることを示す packet mode が 1 Byte、パケットの行き先を示す destination が 1 Byte、データを取得したノード番号の data number が 1 Byte、data の index 番号が 4 Byte、data そのものが 6 Byte の計 18 Byte で構成されている。

preamble	packet mode	destination	data num	data index	data
5Byte	1Byte	1Byte	1Byte	4Byte	6Byte

図 3.20: データパケット構成

3.3.4 ツリー構造作成

3.3.4.1 親ノードの決定

システムを構築するに当たって、まず通信を行うツリーを生成する。ウェイクノードはシンクノードの子ノードであると決まっている。まず、各センサノードの電源を ON にしておき、最後にシンクノードの電源を入れる。シンクノードは周りに make tree packet をブロードキャストする。make tree packet を受信したセンサノードは、親ノードをシンクノードとして登録する。その後、make tree packet を受信したセンサノードは自分の周りに make tree packet を送信し、自分の子ノードを作成する。この際、図 3.21 の NODE4 は NODE3 から make tree packet を受信するが、すでに親ノードが決定しているために無視する。これを各ノードが続けていくことで、すべてのノードは親ノードを決定する。

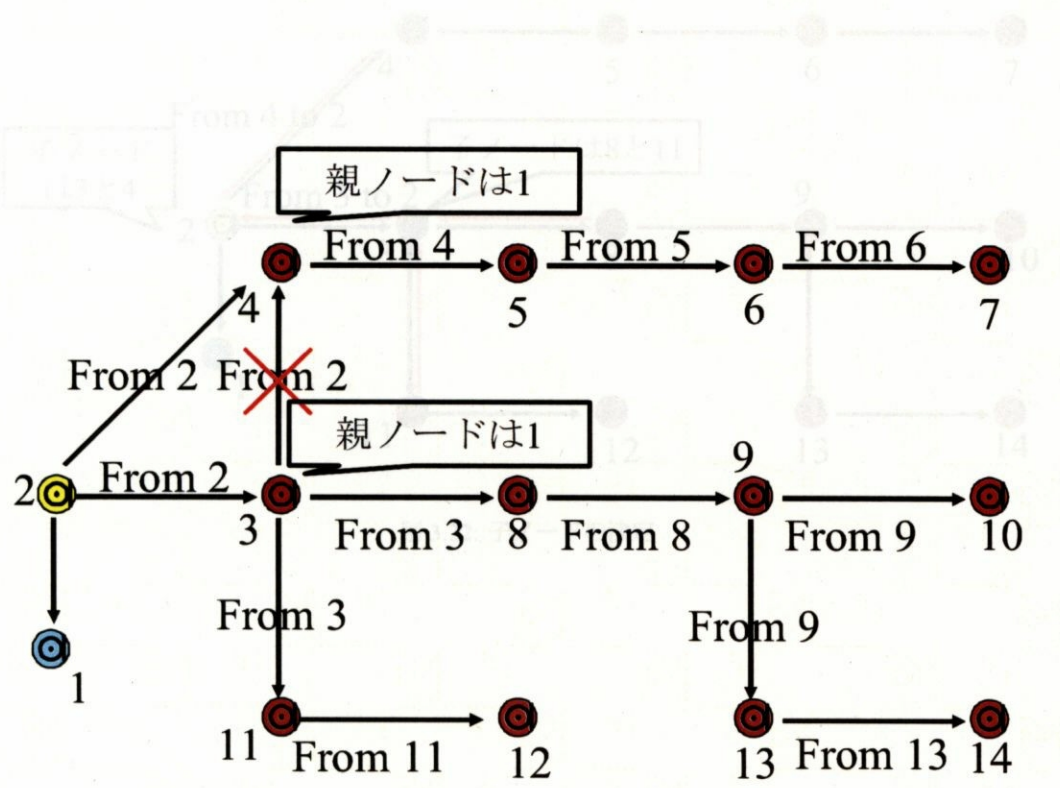


図 3.21: 親ノードの決定

3.3.4.2 子ノード情報の報告

次に、各センサノードは自分の親に自分が子であることを報告する必要がある。親ノードが決定した子ノードは、親を destination として report packet を送信する。この report packet を受信した親ノードは自分の子ノードを知ることが出来る。また、report packet を受信していないノードは、自分が木の枝の先のノードであることを知ることが出来る。

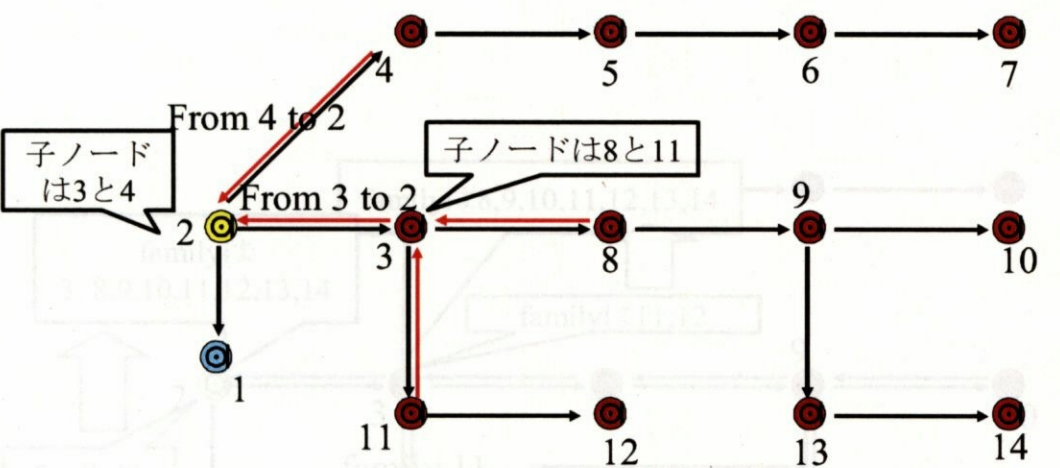


図 3.22: 子ノードの決定

3.3.4.3 ツリー構造情報の報告

次に、子ノードを持たない木の枝の先のノードは、自分の先にはノードが無いことを親に報告する。その family packet を受信したノードは、family に送信元の子ノードを追加して親ノードへ報告する。図 3.23 の例では、NODE12 が親である NODE11 に子ノードがないことを報告し、それを受けた NODE11 は NODE3 へ family に 12 を追加して報告する。NODE 3 は NODE11 から受信した情報を基に NODE2 へ報告しているが、後に NODE8 から報告を受けた場合はその追加情報を NODE2 へ報告する。最終的には各ノードは自分の先には何番があるか把握することができ、シンクノードはシステムに何番が存在しているかを知ることが出来る。これでツリー構造の作成は終了し、平常モードへ移行する。

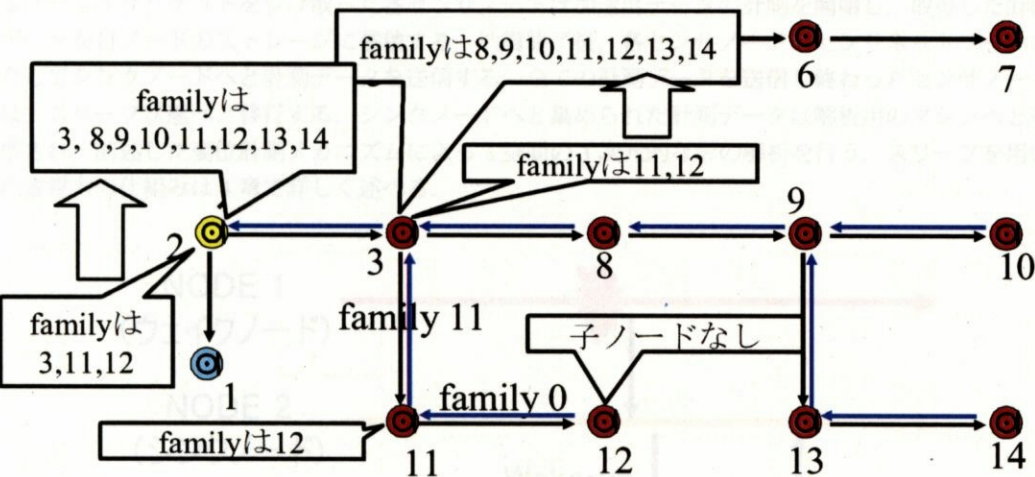


図 3.23: シンクノードへツリー情報の送信

3.3.5 平常モード

ツリー構造が作成された後は、平常モードへ移行する。平常モードでは主に次の二つのタスクが行われる。

- ・各センサノードは常にスリープとアクティブとの切り替えを行い、ウェイクパケットが送信されていないか監視している
- ・各センサノード間で時刻同期を取るために、時刻同期パケットの送受信を行う

3.3.5.1 ウェイクパケットの送信

図 3.24 にウェイクアップの仕組みを示す。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る。それに対してウェイクノードは常にアクティブ状態で加速度を測定しており、データを自ノードのストレージに記録している。地震が起こると、ウェイクノードはシンクノードへ直ちに報告する。シンクノードはセンサノードのアクティブ状態になる時間に合わせてウェイクパケットを送出する。ウェイクパケットは図 3.21 のツリー構造に沿って各センサノードに伝わる。ウェイクパケットを受け取った各センサノードは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。全ての計測データを送信し終わったセンサノードは、スリープ状態へと移行する。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へと送信され、前述した変位計測メカニズムによって空間の 3 次元的な形の解析を行う。スリープを用いた省電力の仕組みは 4 章で詳しく述べる。

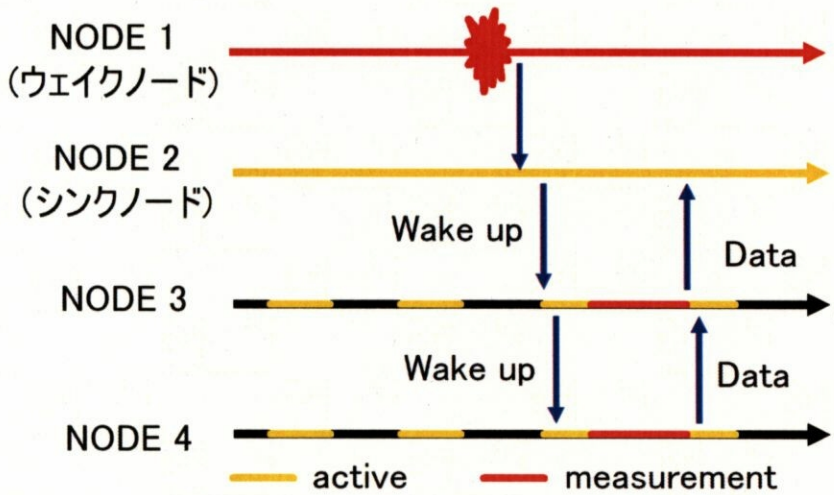


図 3.24: ウェイクアップの仕組み

3.3.5.2 時刻同期パケットの送信

本地震モニタリングシステムにおいては、地震の加速度データをサンプリング周波数 100 Hz で測定する。そのため、各センサノードは時刻同期パケットの送受信を行って、センサノード間の誤差の精度が常に ± 1 ms 以内で等間隔の時刻を刻む時刻同期を行っている。各センサノードは図 3.21 のツリー構造における自分の親ノードからのパケットで時刻同期を行う。時刻同期の方法についての詳細は、4 章で詳しく述べる。

3.3.6 地震後モード

地震測定後、シンクノードは各センサノードから加速度データを収集する。シンクノードは `destination` 情報を含んだデータ収集パケットを送信する。`destination` 先に指定されたノードはデータ収集パケットを受信すると、加速度データをシンクノードへツリー構造に沿ってマルチホップで送信する。シンクノードは加速度データを全て受け取ると、次の `destination` 先を指定してデータ収集パケットを送信する。これを繰り返すことによって、シンクノードは全てのセンサノードから加速度データを収集することが可能となる。シンクノードは収集した加速度データを基に、空間の 3 次元的な歪みを把握することで建築構造物の健全性を評価する。

地震後モードが終了すると、各センサノードは平常モードへ戻る。

3.3.7 秋葉原ダイビルへの設置

本地震モニタリングを、秋葉原ダイビルの東京大学の拠点に設置する。秋葉原テストベッドは総務省ユビキタス委託研究の成果を一体化する場所として構築され、産・官・学が一体となった研究成果の利活用についての効果測定を目標としている。そのテストベッドに本地震モニタリングシステムを実際に設置する予定である。

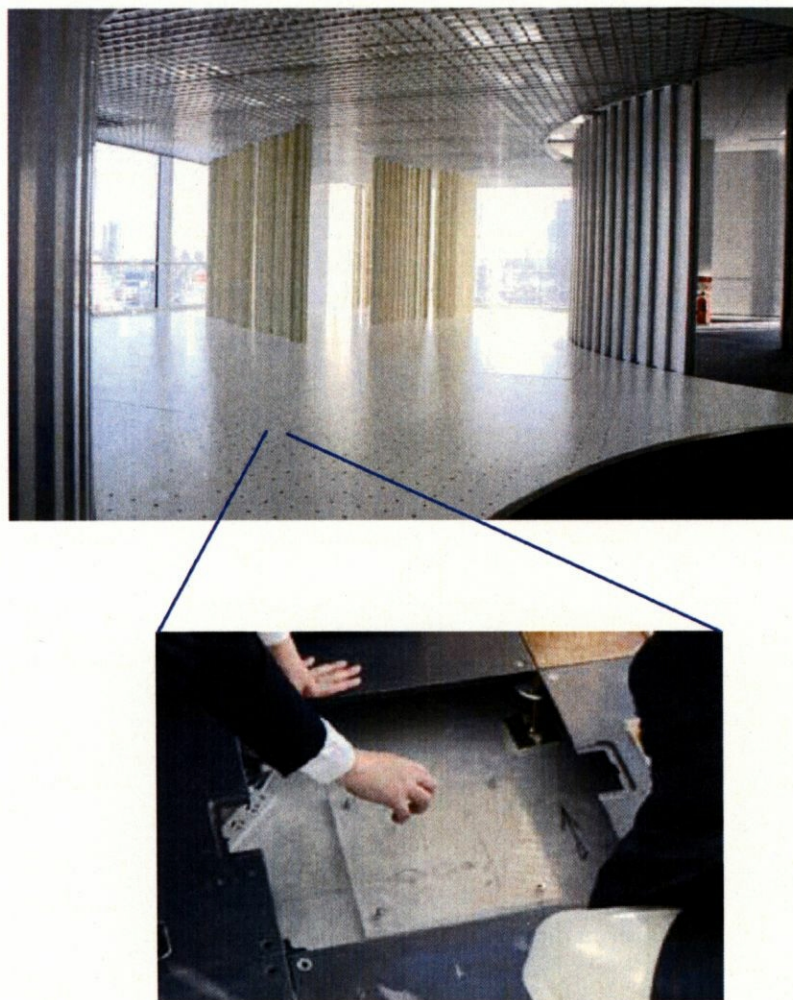


図 3.25: 秋葉原ダイビルのテストベッド

3.4 おわりに

本章では、地震モニタリングシステムを構成するセンサノードに関して詳しく述べ、空間的な歪みを把握する変位メカニズムや、地震モニタリングシステムの動作の流れについて述べた。次章では地震モニタリングシステムの評価について詳しく述べる。