

モニタリング技術が防災の形を進化させる An Advancing Aspect of Real-Time Earthquake Protection Supported by the Monitoring Technology

岡田成幸¹⁾, 中嶋唯貴²⁾

Shigeyuki OKADA, Tadayoshi NAKASHIMA

1) 北海道大学大学院工学研究院, 教授, 工博 (okd@eng.hokudai.ac.jp)

Hokkaido University, Faculty of Engineering, Professor

2) 北海道大学大学院工学研究院, 助教, 博士(工学) (nakashima@eng.hokudai.ac.jp)

Hokkaido University, Faculty of Engineering, Assistant Professor

事前のリスク予防やリスク軽減という手法でも防ぎきれない災害に対して、災害発生時におけるリアルタイムのリスク回避の道が開かれつつある。発生事象(状況)をモニタリングし、それを防災情報へ変換し地域住民へ届けることで、危険回避を誘導することが可能となる。観測やモニタリングをデータ取得に留めることなく情報変換し活用することで、機械系制御のみならず人間系制御への活用方法の道を展望する。活用事例として音声誘導システムを紹介する。また、数少ない点情報から面の災害をリアルタイムで推定し情報の逐次更新をすることで面のモニタリングを現実化させる。活用事例として行政初動対応システムを紹介する。

リアルタイム地震防災, 防災情報, 面のモニタリング, 音声誘導システム, 行政初動対応システム
Real-time earthquake protection, Information for disaster protection, Area monitoring, Active evacuation system,
Supporting system for administrative initial response

1. はじめに

2000年代初頭に流行った言葉がある。リアルタイム地震学またはリアルタイム地震防災である。まだ、時々は耳目を引くことがあるが、用語として定着したようには思えない。しかし、これの意味するところは現象を発生の実時間で観測・分析・評価することで情報化し、その情報を防災に利用しようというものであり、本シンポジウムの主題である「モニタリング」と本質的には同じであると筆者は思っている。一つ違うところは、リアルタイムには情報の応用性が強調され、モニタリングには観測の継続性が強調されている側面がある点であろうか。そうであるならモニタリングはリアルタイム防災を支える情報化技術という位置づけが可能となろう。本稿の目的はモニタリングにより提供できる情報を如何に利用すればリアルタイムの地震防災へ活用可能かを議論することである。

まず DIKW Hierarchy の話から始めたい。これは情報工学でよく使われる価値のレベルに対するモデルである(図1)。DIKW の定義によれば、データ(Data)とは現象から抽出されたまだ評価されていないメッセージのことを言い、情報(Information)とはデータをある程度処理した状態のもので意思決定者に対するメッセージを言い、データの上位に位置づけられる。知識(Knowledge)とは情報を分析し傾向などを見いだした普遍的な価値を言い、知恵(Wisdom)とは知識の上位に位置づけられるもので次のステップに進むための様々な解決力を持つ深い理解を意味する。これまで観測(特に機械観測)という行為は、自然現象の観測に限定されることが専らで

あり、現象からデータを取り出し記録するという定義が一般的理解であろう。しかし、データを防災へリアルタイムで利活用することを考えた場合、このヒエラルキーで言うところのもう一つ上位の情報にまで踏み込む必要がある。

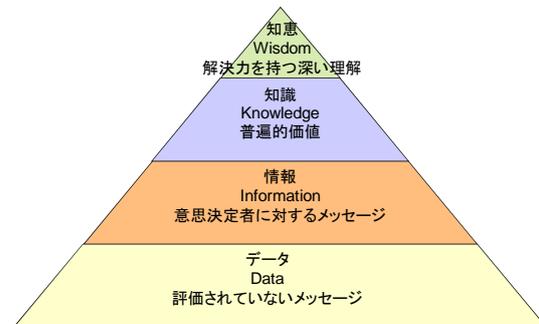


図1 DIKW Hierarchy

これからの防災は【情報】がキーワードになると筆者は思っている。そうであるならばモニタリング技術は「現象」をセンサーやフィルターを通して「データ」化し、それを加工処理することで意思決定に役立つ「情報」へ変換し、その情報を我々社会・地域関係者に届けてくれるその一連の手続きを含めてモニタリングのカバレッジとして扱うことが自然であろう(図2参照)。これまでのモニタリングのイメージは現象をセンサーで切り取りデータとしてそのまま記録し、例えば機械系制御への利用に供しよう(図2の破線のルート)というのが一般的な理解であろう。違いは情報化に焦点を当てることである。

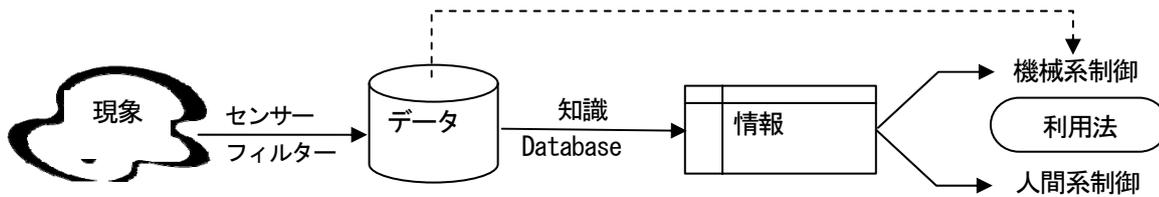


図2 モニタリング技術のカバレッジ

モニタリングにより提供されるリアルタイム情報の使われ方には大きく2種類ある。一つは機械系システム(列車/エレベータ/工場生産ライン等)の自動制御(緊急停止)であり、二つ目は人への危険回避行動支援である。前者を機械系制御利用、後者を人間系制御利用と呼ぶこととし、本稿は、後者についての議論展開である。

この「リアルタイム」という概念はこれまでの防災を大きく変貌させた。これまで地震防災と言えば、事前対策としてのハード的耐震(構造物の耐震技術に代表される)と事後対策としてのソフト的対応(応急支援、復旧・復興計画に代表される)の2つであった。被害分布などのいわゆる地震後情報は地震後の復旧作業への情報(一段落後の情報)であった。これが情報処理伝達の高速化によりリアルタイムで現地に情報伝達が可能となり、かつての地震後情報が予測震度分布や予測被害分布に形を変え近未来予測情報として“最適な危険回避行動”をサポートする新たな情報として利用可能になったことであり、いわゆる最中対策の道が開けたことを意味する。

危険回避行動の一つである直後避難は、意外なことと思われるかも知れないが、その意思決定はそう簡単なことではない。不適切な避難は逆に危険に近づくことと等価である。たとえば、高層階で大きな揺れに遭遇したとしよう。建物自体は安全であったとしても住民に建物への信頼性(安心情報)が十分に伝わっていなかったとしたなら、不必要な避難パニックを誘発させそれにより、明石市の花火大会での横断歩道橋での圧死事故(2001年)のような二次被害の発生に繋がらないとは言いきれない。また、積雪寒冷地においては避難所は極めて危険な場所である。地震直後に避難所が即時に開設されることは限らないからである。積雪期において避難途上また施錠された避難所の玄関先で凍死する危険性がないとは言いきれないのである。以上の例にみる重要な点は、逃げる必要があるのか・逃げた先に安全は確保されているのかという意思決定情報であり、それが欠落した場合は悲劇に繋がる可能性が極めて高くなるということである。危険回避行動や避難(リアルタイム防災)に代表される最中対策の要諦は「情報」である。単に周辺に注意を喚起するアラーム(警報)に留めるのではなく、情報の質とその与え方が、特に人間系制御への利用を企図した場合は鍵となる。天気予報に降雨確率が報じられるようになってから日が経つが、我々は降雨確率10%と50%の違

いを皮膚感覚として認識できるようになってきた。明らかに「ところにより雨が降るでしょう。」という予報よりも、その情報としての価値は高い。

本稿は地震防災の観点より、モニタリングに期待されるリアルタイムの情報取得の方法とそれによる防災の新たな形を将来像も含めて論考する。

2. リアルタイム防災の位置づけ

本論を進める前に少し一般的な整理をしておきたい。前章で触れた事前対策—最中対策—事後対策を時系列で筆者流に整理したのが、図3である。用語の解説となるが、リスクとは社会的又は個人的に望ましくない事象の発生の不確実さの程度及び結果の大きさの程度を言う。要は、不確実性(Probability)と損傷程度(Damage Impact)の積式(1)で表されるのがリスクであり、不確実さが取り除かれた時点(発生時)においてリスクではなくなる。

$$Risk = Probability \times Damage Impact \quad \dots (1)$$

よって災害管理の立場からは、発生前がリスク管理(Risk Management)であり、発生後は危機管理(Crisis Management)と呼ばれる。前者が事前対策であり、後者が事後対策である。このように区分するのは単なる言葉の遊びではない。対策上の理由がある。リスク管理(事前対策)には不確実性を念頭に置いた意思決定が求められ、危機管理(事後対策)には発生現象(事実)に対する意思決定が求められる。すなわち、リスク管理(事前対策)には対策を主導するリーダーの不確実性に対する考え方が反映せざるを得なく、多くの対策の選択肢が存在し、事が起こる前に対策に正解を求めることはナンセンスである。換言するならリーダーの価値観(たとえば、

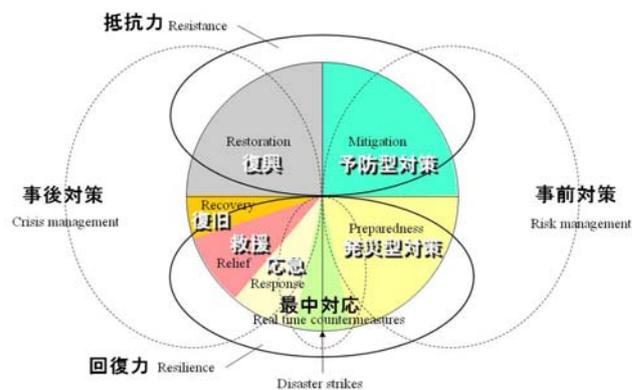


図3 対策の時間展開

経済合理主義を尺度にするか結果悲観主義を尺度にするかで対策は逆方向を向く場合もある) が対策を決定すると言っても過言ではない。災害発生後に事前対策の責任を議論しても詮無いことである。仮に災害が発生しなかった場合、防災への投資は公共投資の無駄遣いとして低評価されたであろうことは容易に想像される。不確実さを伴うリスクへの投資はその当時の防災リーダーの価値観を問い詰めることであり、民主政治の下では彼を選出した国民に責任が帰される。このような状況下にあつて防災リーダーに求められる資質とは問われるならば、国民にとりより好ましい防災価値観を提言していくことが関係者には求められている、と忠告するくらいである。しかし、危機管理(事後対策)は出現した現象に立ち向かう対策であり、対策の巧拙は評価されるべきものである。ただし、二次・三次と言った後続被害はその時点で未出現であり、事前対策程ではないもののある程度の不確実性は存在している。ここで意思決定の巧拙を決定づけるに重要となるのが、「先読みの情報」である。これは今回の主題であるモニタリングに通じる議論となる。

さて図3に戻る。リスク管理(事前対策)には大きく2つの手法があり、筆者の分類では予防型対策と発災対応型対策である。また事後対策はさらに筆者の分類では応急・救援・復旧・復興と分類されるが、詳細な説明は本論から外れるので機会をあらため別稿とさせて頂き、以下に簡単に記す。強調したいのは、情報処理伝達の高速化に伴い新たに最中対策が加わったことであり、これが以降の対策の巧拙を司る面が非常に大きいという点である。ここにモニタリング技術が大きく関与してくる。

■事前対策 Risk Management

- 予防型対策(リスク予防: Risk Protection)
 - : 発生の確率を抑える対策
- 発災対応型対策(リスク軽減: Risk Reduction)
 - : 損傷程度を下げる対策

■最中対策 Real-Time Management

- 最中対応(リスク回避: Risk Avoidance)
 - : 逃げるまたは回避行為をサポートする対策

■事後対策 Crisis Management

- 応急対応・救援(リスク保有: Risk Tolerance)
 - : 発生後の対応で被害拡大を阻止
- 復旧・復興
 - : 元に戻す、あるいはよりよい姿への更新
- 補償(リスク転嫁: Risk Transfer)
 - : 金銭またはそれに代わるものによる補償

3. リアルタイム性と情報の関係について

ここまで「リアルタイム」という語句を定義せずに使ってきたが、リアルタイム防災といった場合、多少の時間幅が許容されている。現象の発現時点を原点とするが、ここでは現象を地震とした場合、地震発生時点を原点としてリアルタイムを論じる場合と、観測点において地震動を観測した場合を原点とする場合がある。すなわち前者は、地震波が到達するまでの時間は、その観測点においては現象未発生と考える立場である。本稿では前者の立場をとり、地震発生時点との関係で以下の4区分の命名を与えリアルタイム情報として扱う(図4)。

図4の意味は、地震動などの【現象】をまずセンサーやフィルターを通して【素のデータ】として計測する。この現象の切り取り作業がモニタリングシステムのハード技術的には主たる役割となる。次にデータは防災の意思決定に必要な【防災情報】へ変換される。その際のリアルタイム性により(1)先行情報、(2)擬先行情報、(3)同時情報、(4)遅行情報の4区分が可能であり、それぞれ利用方法が異なる。【データ】から【情報】への変換は、実はリアルタイム防災にとってはモニタリングシステムの第一義的役割とも言うべき重要な事項である。

(1) 先行情報

情報のリアルタイム性に関して、地震発生前に発信できる情報として地震予知情報がある。これは地震発生時間原点前の情報であり、先行情報と名付けられる。日本では東海地震が唯一その対象となっており、微小地震観測や地殻変動のモニタリングが継続されており、予知情報が発信された場合の対応方法(生産システムの稼働停止や就業者の早期帰宅奨励等々)についても東海圏各組

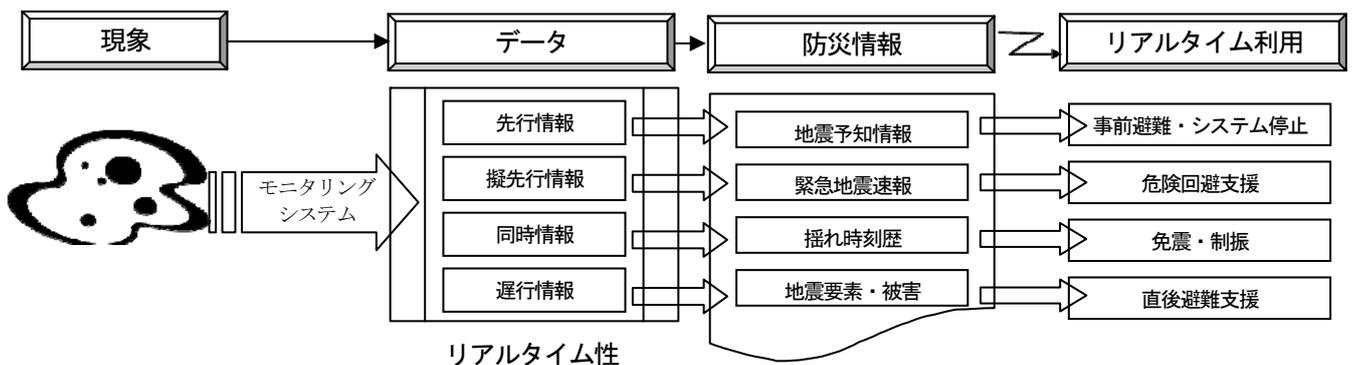


図4 データのリアルタイム性とその活用方法

織において準備されている。しかし、現時点で地震予知情報の発信事例（成功事例）はない。

(2) 擬先行情報

地震発生後に地震波到達の時間差を利用したものとしての擬似的先行情報（擬先行情報）を利用しようとする動きが活発である。これは地震動をモニタリングするものであり、その情報から当該地域の揺れの大きさを予想し警報とするものである。当該サイトでモニタリングし、P波とS波との位相速度差を利用して警報するオンサイトモニタリング（代表的なものとして新幹線の自動停止装置ユレダスがある）と、震源近傍での観測点での揺れ情報を利用し、遠方のサイトへ警報を知らせる方法（気象庁の緊急地震速報が代表である）がある。稼働している装置の自動制御や危険箇所からの避難行動をトリガーさせるための警報として利用されている。

また、地震発生に伴う津波警報もこれに分類されるであろう。地震観測ネットによる揺れ情報から、震源要素（マグニチュード、深さ、震源位置）を特定し、津波が襲来する前に津波の高さを情報として提供しようとするものである。最近では、GPS波浪計による波高の直接モニタリングによる情報を利用することが出来るようになり、より迅速かつ高精度な津波警報が可能となってきている。

(3) 同時情報

建築で馴染みがあるのは、揺れている情報をそのままリアルタイムで利用する免震・制振システムであろう。これは揺れをそのまま入力として装置を駆動させるためリアルタイム情報利用と認識する者は少ないかも知れないが、AMD（Active Mass Damper）やAVS（可変剛性型制御）などのアクティブ制振は揺れの信号をシステムに再帰させ振動を制御するものであり、同時情報の利用と言えよう。今のところ、同時情報は機械系の制御に用いられることが多い。

(4) 遅行情報

揺れが収まった後、避難行動を開始しようとするまでに届く情報を言い、たとえば、地震要素・震度分布・被害分布等々の情報を言う。この情報は直後の避難開始の意思決定や行政の危機対応（図3のCrisis Management）の端緒を与える情報となるものであり、速報性と正確性が求められる。モニタリングとしては震度計による観測情報やマスコミ等による災害映像情報などリアルタイムで送られてくる事実情報の場合もあるが、揺れ情報から災害の規模を予想し予測情報として提供するシステムもある（後述）。

4. モニタリングに要求される条件

前章において、リアルタイム防災に利用される情報をリアルタイム性の関係から整理したが、本稿の目的である人間系制御利用としては(2)擬先行情報と(4)遅行情報がメインとなる。この観点からモニタリングに要求される条件は以下にまとめられ、それを達成するために

はそれぞれに工夫が必要となる。

(1) 速報性

現象発生直後に、稼働中のシステムを停止させるべきかどうか・従業員や滞在者を別の場所に避難させるべきかどうか・初動対応の要員をどこにどれだけ配置すべきか等々、防災リーダーには意思決定すべき事項は多々あり、そのための情報として緊急性・速報性の要求は極めて高い。原子力発電所被災による放射性物質拡散状態は計測自体が不可能な状況に置かれるなど、事実をモニタリングできない場合には実測値の代替としての予測値を提供することも方法論としては考えておかねばならない。事実情報がない場合、予測値ではあるが緊急時における情報としての価値は高い。この種の情報システムとして文部科学省の放射性物質拡散予測システム SPEEDIは東日本大震災で有名となった¹⁾。また地震関係としては、気象庁の緊急地震速報²⁾や地震直後の行政対応支援としての震災対策支援システムが川崎市において実用化されている³⁾。これらは必要情報（放射線量や震度・地震被害）を直接モニタリングするシステムではないが、間接情報（風速等の気候情報や地震要素）を観測あるいは情報として取り込むことにより必要情報（放射性物質の環境への予測情報、当該地域襲来予測震度、当該地域内発生予測被害）に変換して当該関係者に提供するものであり、筆者はモニタリング技術と位置づけるべきものと考えている。

(2) 正確性（信頼性）

構造ヘルスマニタリング（SHM）ではその目的の一つに構造特性の経年変化の監視があげられる。その場合は速報性よりも正確性がより重要視されるべきものである。一方、リアルタイムの意思決定情報も情報の正確性・信頼性は当然求められる条件ではあるが、速報性という不可避条件の下での正確性・信頼性であり、両者は二律背反の下で同時に満足しなければならない極めて難しい条件となる。情報の正確性・信頼性はモニタリングした素のデータ（例えば地震動データ）に様々な状況を加味して意思決定に必要な情報（たとえば被害情報）へ変換する知識（被害関数等）の変換精度に影響される。よって、正確性・信頼性の向上は地震工学・地震防災学の研究成果に期待するほかないのであるが、データの逐次更新という処理技術により情報の正確性を高める試みが行われるようになってきた。詳細は6章「活用事例(4)情報更新について」において記載する。

(3) 補完性

現象をモニタリングすることから始まるリアルタイム防災システムのこれまでの主たるセンサーは地震計であった。揺れという自然現象を計測するには最も合理的な方法である。SHM分野では地震計以外のセンサーの開発も活発に進められている。たとえば光ファイバーセンサーや炭素繊維センサーなど材料特性を生かして構造体へ直接埋め込むセンサーや、ワイヤレスセンサーのように

伝送技術を改善する試みなどが行われている。一方で、災害時における意思決定においては機械計測できない事象（被害事象）も極めて重要な情報となる。さらに情報利用が人間系の制御にあるなら人間の動きもモニタリングする必要がある。また広域を同時把握する必要性も出てくる。これまでの地震計測を補完する技術としてビデオ映像技術は平常時のモニタリング情報として既に有効性が認識されており、災害発生時におけるモニタリングへの応用が期待できる。

(4) 継続性

モニタリングという言葉からも、状況の時間変化を測定すること（継続性）は必須条件である。それに加え、継続性はもう一つ重要な意味を持つ。先にリアルタイム防災に必要な情報は速報性に加えて正確性であることを記したが、速報性にはどうしても誤報や情報の欠落に伴う内挿・外挿誤差がつきまとう。正確性を上げるには情報を更新することが必須条件となる。情報が先の意思決定にとり有効であり続ける（情報が継続性を持つ）には、情報の逐次修正（更新）が極めて重要である。ここでいう情報の継続性とは情報獲得のための計測の継続性に加え、情報更新も意味する。(2)正確性を確保する方法とも関連させ、方法の詳細は後述する。

5. 意思決定に必要なのはリスク情報

話題が防災の核心に近づいてきた。リアルタイム防災に必要な情報とは意思決定を支援する情報のことである。起きている現象そのままのデータではなく、安全か危険かの判断情報である。すなわちセンサーが直接モニタリングしている現象データではなく、それを加工した判断情報が必要と言うことである。

意思決定に必要な情報とはどういう情報を言うのであろうか。気象庁の緊急地震速報に準えて話をすると、速報として送られてくるのは震度情報（＝ハザード情報）である。しかし当該地域の住人にとりより重要なのは、震度ではなく自分たちは安全なのか危険なのか、すなわち当該地域にどれだけの被害が発生するのかという情報（＝リスク情報¹）である。人々は緊急地震速報により震度を知るが、現状の緊急地震速報では、その震度情報から周囲にどれだけの被害が発生しそうなかの評価を個人がしなくてはならない。すなわち震度情報（ハザード情報）から被害評価というエキスパートに求められる換算（リスク情報への換算）を瞬時にしなくてはならない。揺れの情報（ハザード情報）を直接的意思決定情報（リスク情報）に変換するにはその場の環境情報（バルナラビリティ情報）が必要であり、以下の変換作業が必須である。

¹ ここで言うリスクは式(1)の $Damage\ Impact$ にほぼ等しい。ただし、被害の発生が不確かであるのでリスクとして扱う。以下同様。

$$Damage\ Impact = Hazard \times Vulnerability \text{ 関数} \dots(2)$$

ここに、 $Damage\ Impact$ は被害情報、 $Hazard$ は震度情報、 $Vulnerability$ 関数は置かれた環境情報を意味する。

たとえば建物被害（被害情報）を取り上げた場合、揺れの情報（震度や最大加速度）に今いる建物の地震脆弱性（耐震性能、すなわち構造物のフラジリティ曲線や性能マトリクス）を合わせ考えることで換算できる。この思考作業を一般住民が危険回避の意思決定の中で行うことは大きな負担となることは容易に理解できる。震度情報のみ与えられるよりも、意思決定に直接的な被害情報を与えられた方が情報としては有効である。繰り返す。リアルタイムの意思決定にとり速報的に必要なのはハザード情報ではなく、リスク情報なのである。

一方で、同時に正確性が求められる。リスク情報はハザード情報に種々の環境情報や被害関数が関わって誘導されるため、事象発生直後には種々の情報欠落等による僅少情報からはリスク情報に誤差が蓄積しやすい。情報の正確性を担保するためには、リアルタイム防災情報は逐次的情報更新が必須なのである。そのための情報更新の手法としてペイズ更新が注目を浴びている。更新に必要な情報として、かつ記録として保存すべき情報としては推測リスク情報よりも情報エントロピーが低位なハザード情報（素のモニタリングデータ：原計測記録）を保存する意義は大きい。即ち強震記録の同時保存である。記録・情報の蓄積は情報の正確性を担保する式(2)の変換精度の向上に必須である。

6. 活用事例：危険回避・避難情報としてのモニタリング

(1) 気象庁緊急地震速報

気象庁の緊急地震速報は、地震計の多数配置による我が国の内陸及び周辺の地震活動のモニタリングであり、地震発生時には早期地震波到達地点の観測記録を使い震源位置及び地震規模を推定し、その情報を用いて各地域の地震の揺れ（震度）と到達時間を推定し防災情報として提供するものである。なお、地震発生後地震波が到達するまでの数十秒の猶予時間を防災に利用しようというこのアイディアは、当時の我が国の先鋭的地震工学者で組織された $Earthquake\ Alarm\ Group$ （金井清・岡本舜三・小林啓美・勝又護・白野元彦・太田裕）により、1973年ローマで開催された第5回世界地震工学会議（WCEE）において発表されている⁴。四半世紀を経て実用化された先進的アイディアであったが、当時は余り注目されなかったと聞いている。

緊急地震速報の活用法については、気象庁の緊急地震速報検討委員会が審議されてきており、その内容は「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」の最終報告⁵に詳しい。内容を抜粋すると、2種の活用法が検討されており、鉄道やエレベータ等の施設の緊急停止に代表され

る「制御系における活用」については高く評価されており早期運用を強く示唆する一方、避難を目的とする「人間系（避難行動）における活用」については特別な活用法は提案されておらず、残念ながら、広く一般国民へ情報提供するには周知・啓発が十分ではなく時期尚早との判断に留まっている。「制御系における活用」については、緊急地震速報としての情報を機械が自動で判断（意思決定）し装置をシャットダウンする具体的システムとしての提案があるのに対し、「人間系」については、提供された情報を住民それぞれが判断することを前提とした議論しかなく、活用法が熟成されていない。その理由は明らかである。つまり、緊急地震速報の配信情報が予測震度という揺れの情報（ハザード情報）のみであり、我々が知りたい被害情報（リスク情報）との間に乖離があるからである。我々が知りたいのは、予測される揺れによってその場がどの程度の危険状態になるのか・その際に何をなすべきかという、意思決定に直接役立つリスク情報である。前章で既述のとおりハザード情報からリスク情報への変換作業は一般住民には難しく、よって緊急地震速報（ハザード情報）は即座の意思決定を混乱させる負の情報となる恐れ無しとせず、住民への一般配信には十分な防災教育を含む環境整備が必要であり時期尚早との気象庁の見解に至っているであろう。

近年発生した新潟県中越地震(2004)のような内陸直下地震では、緊急地震速報が伝わったのは-2秒（すなわち揺れが来てからの通報）であり、その有用性について疑問が投げかけられている。その対応策としてフォワードリアルタイムネットワーク等の新たな提案がなされている（源栄・本間⁶⁾）。またオンサイト情報による地震発生警報機の提案も行われている（阿部・他⁷⁾）。

(2) 室内避難誘導システム

上記の関係式(2)を理解すれば、人間系制御利用への問題解決は簡単である。揺れの情報（ハザード情報）を意思決定に直接関わる被害情報（リスク情報）又は指示情報に変換し配信すればいいのである。

緊急地震速報の活用の要諦は、その情報からの確かな行動をいかに早く意思決定するかに掛かっている。筆者らは緊急地震速報と連動させ、室内滞在の住人に対して揺れが襲来する直前に家具転倒等の可能性のある危険空間から安全な空間へと避難誘導させるシステム開発を行っている^{8,9)}。地震襲来時に今いる場所が安全かどうか・避難すべきかどうかの意思決定を時に間違える住人に委ねるのではなく、コンピュータに的確に自動判定させ、揺れるまでの猶予時間を有効に使う安全な避難誘導をサポートするシステムの開発を目的としたものである。

システムは図5に示すハードウェアと図6に示すソフトウェアで構成される。システムへの要求は室内空間全体を時刻歴で追跡することにあるため、環境データ（転倒危険性のある家具類や居住者の位置情報）の取得はCCDカメラ（または赤外線カメラ）からの映像信号処理

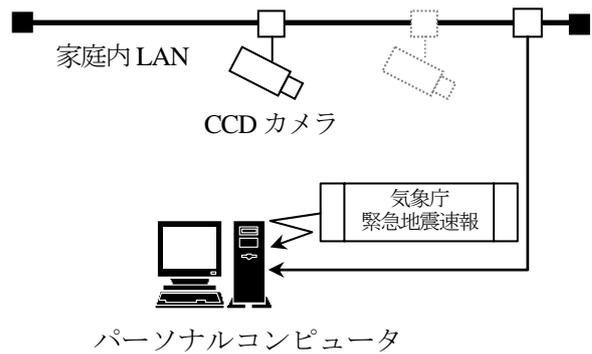


図5 室内避難誘導システムのハードウェア構成

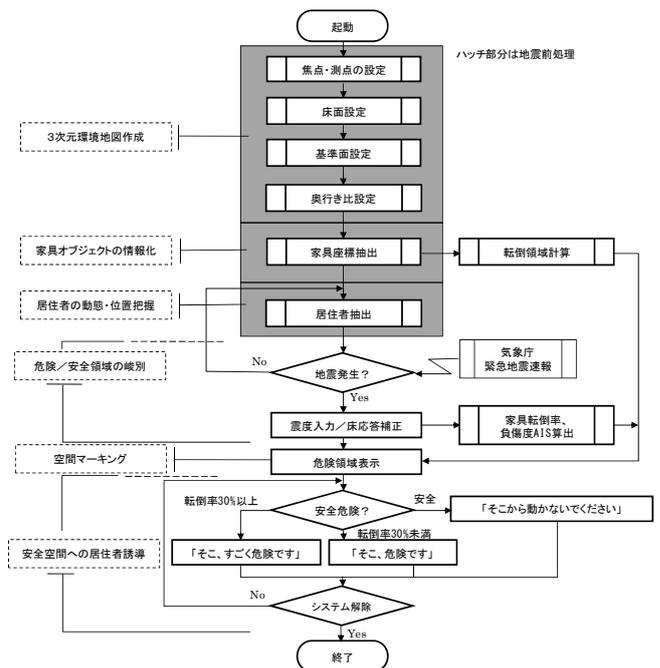


図6 室内避難誘導システムのソフトウェア構成



図7 室内避難誘導システムプロトタイプ全容



図8 システムのモニター画面

による方法を採用している。実験用のプロトタイプ装置の全容を図7に示す。システムは常時室内の人間の位置を走査している。地震発生時に気象庁からの緊急地震速報（地域に襲来する推定震度）を入電し、その推定震度データを基に家具のアスペクト比を勘案し転倒確率を計算し、防災情報に変換する。転倒危険箇所到人がいる場合は「そこ、危険です！」のような音声により移動を喚起する。システム作動時のパソコンのモニター画像例を図8に示す。

(3) 点のモニタリングから面のモニタリングへ

ここまでの議論では、モニタリングは1点（あるいは建物単体）についての観測が暗黙の了解事項であった。所謂、点のモニタリングである。しかし防災行政という観点からはある広がりの中で発生する災害事象をモニタリングする必要がある。所謂、面のモニタリングである。本稿の1章「はじめに」において、直後避難の意思決定の難しさについて触れた。どこが安全な場所なのかの情報なしに・避難所開設の情報なしに・そこまでのアクセスルートの安全情報なしに、指定された避難所であってもむやみに移動するのは危険行為となる。また、行政等の防災組織の初動対応も、地域の被害情報は意思決定の最重要情報であり、まず被害状況の把握から始まる。面としての地域のモニタリングの重要性が理解できよう。しかしこれには大きな問題が付きまとう。エリアが広くなればなるほど、モニタリングのセンサーが数多く必要になることである。これを解決するための少ないセンサー情報の補完は「被害の推定」という手法を持って代替できそうである。推定精度に問題は残るものの、地震動情報（ハザード情報）を直接モニタリングして得ることで、エリアの被害状態（リスク情報）への推定変換（間接モニタリング）は可能である。実用化の第一号は、1985年に川崎市において導入された震災対策支援システムである¹⁰⁾。これは川崎市7区に地震計を設置しておき、そ

の地震動情報から即時に全市域の震度分布推定（第1段階推定）・全市域の各種被害分布と被害量推定（第2段階推定）・市の各種必要対策レベル決定（第3段階推定）の3段階情報をリアルタイム（遅延情報として）で提示することが出来るシステムである（図9参照）。図10は強震計を含めたシステムの全容である。



図9 震災対策支援システム



図10 川崎市の震災対策支援システムの全容



図11 震災対策支援システムの出力画面

このシステムの利点は被害予測という点からも従来にはないメリットが発生する。すなわち従来被害推定は地

震の発生時間・天候等に関して特定できず想定の下での被害評価である（同様に、人口・住家棟数等の社会データも評価時のものを使用するのが一般である）が、本システムは社会データに関しては逐次の更新をすることで、また発生時間・季節・天候に関してはリアルタイムの情報を利用できることで、評価精度の向上が期待できる。近年富みにその問題点がクローズアップされている帰宅難民問題についても、難民数の推定把握・近隣避難所の受入数等の情報をオーバーラップさせることも可能であり、対策の活路が見えそうである。当該システムの表示情報例を図11に示す。この中で、対策指針は推定被害量に合わせ職員動員規模を表示させている。行政の初期対応情報として有効なものであろう。

最近では、世界レベルで地震発生がモニタリングされており、その地震動情報から地震発生とほぼ同時に被災国を単位とした被害推定が公開されている。米国地質調査所 (USGS) の PAGER というシステムである¹¹⁾。図12は東日本大震災発生時に発表されたものである。内容は逐次更新されており、図は Version 13 (6週間経過後) となっている。震度情報に加え、予測死者数 (1,000~10,000人 (確率 37%))、予測被害額 (10,000~100,000[Million US\$] (確率 35%))、主要都市の予測震度暴露人口が地図と共に表示されている。開発途上国が地震に襲われた場合、被害情報がなかなか入電してこない。PAGER システムは国際救助の観点から、早期応援体制を各国に訴える災害モニタリングシステムと言えよう。

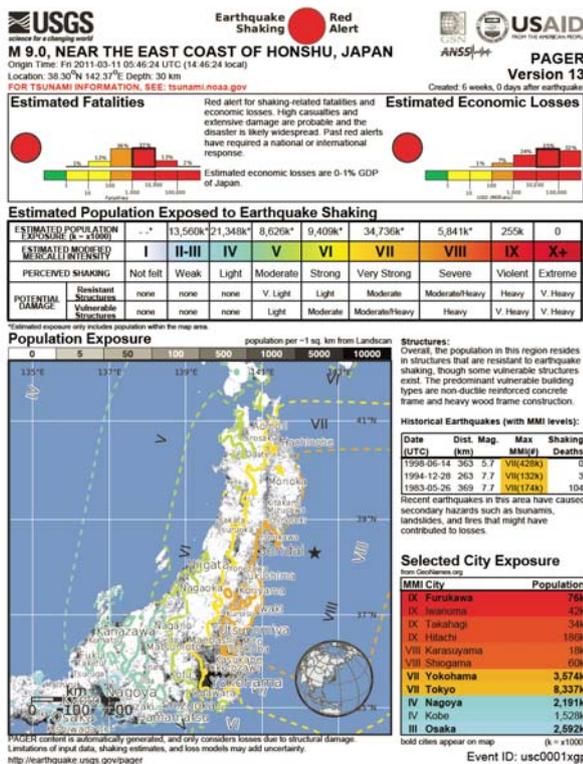


図12 USGS (米国地質調査所) の即時被害予測システム (PAGER) の出力

(4) 情報更新について

面のモニタリングで特に重要なことは、4章で述べた特性の内の「継続性 (情報更新)」である。現象を直接モニタリングしているわけではないので、推定誤差を新情報入手により更新することを考えねばならない。新情報で全て再計算する方法もあり得ようが、過去の情報を事前確率分布 $f(\theta|Z_{n-1})$ 、新情報を尤度関数 $p(Z_n|\theta)$ と見立て、最新の推定情報を事後確率分布 $f(\theta|Z_n)$ として求めるベイズ統計に基づく更新手法が試みられ、成果を上げてきている¹²⁾。ベイズの基本式は以下で与えられる。

$$f(\theta|Z_n) = \frac{p(Z_n|\theta) \cdot f(\theta|Z_{n-1})}{\int f(\theta|Z_{n-1}) \cdot p(Z_n|\theta) d\theta} \quad \dots (3)$$

ここに、 θ が未知母数の分布特性 (平均値、分散、モード等) であり、たとえば被害率のような所求値 (リスク情報) である。 Z_n はサンプル値 (n はサンプル数) である。尤度関数 $p(Z_n|\theta)$ は実際のサンプリング調査結果 $Z_n=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を与える事象発生確率分布として求められる。サンプル数 $n-1$ のデータで求められた未知母数に関する分布を事前確率分布 (Z_{n-1} の条件付き確率) とし、それに新たに加わったサンプルの元で成立する未知母数分布 (Z_n の条件付き確率) が事後確率分布となる。なお、分母の逆数は正規化係数として知られる。

太田は道路被害率の更新にベイズの方法を適用し、道路被害を [あり, なし] の二分法記載とし、尤度関数に二項分布を採用した¹³⁾。この場合、事前分布及び事後分布は自然共役分布を採用しベータ分布となる。

また、同様の問題設定で能島は尤度関数としてポアソン分布を仮定し、事前分布及び事後分布には自然共役分布としてのガンマ分布を採用している。能島の更新データの結果を図13に示す。被害報告数の増加に伴い最終報告値に収束していく状況が示されているが、ベイズの方法はより早い段階で近い値に収束しているのがわかる¹⁴⁾。

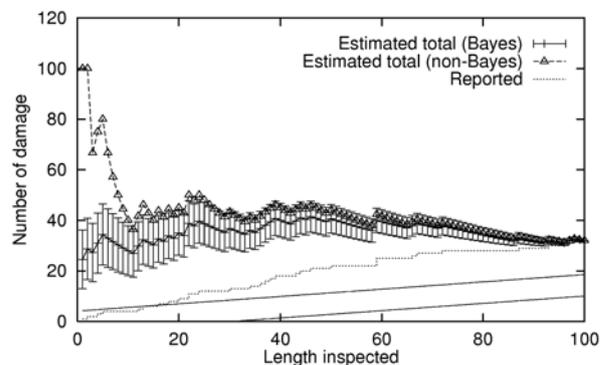


図13 道路被害箇所数のベイズ更新の効果¹⁴⁾

リスク情報のみならず、直接のモニタリングデータの更新にもベイズの方法は応用可能である。図 14 は岐阜県内で観測された計測震度情報の受信状況を調査したものである¹⁵⁾。震度（ハザード）の直接モニタリングにおいても観測点数が多くなると計測器や伝達経路の不具合によりデータ収集に時間を要することがわかる。図より地震に依らず岐阜県の場合、全域の震度データが送られてくるのに 10 分程度を要すること、また特別に遅延する地域も見られることがわかる。この場合も遅延データや欠損データの部分は内外挿の手段で補完されるがベイズ更新の方法を応用することで全データ入手前の初期段階における高精度のデータ補完が可能となろう。

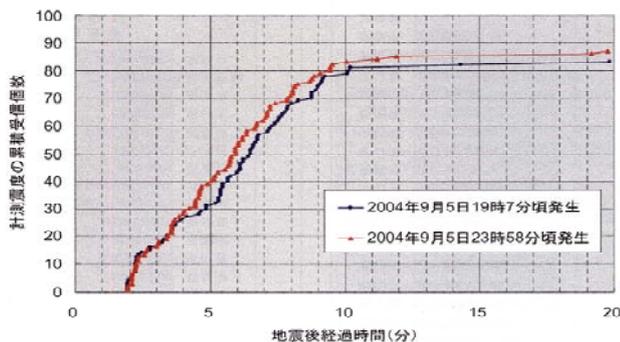


図 14 岐阜県における震度情報の受信状況 (2004 年 9 月 5 日紀伊半島沖の地震 (M=6.9) および東海道沖の地震 (M=7.4))¹⁵⁾

7. 将来像

現象をモニタリングし、そのデータから防災情報へ変換することでリアルタイム防災への利活用を目的としたシステムについて紹介してきた。現象を情報化しリアルタイムで利用するという防災理念は、今後色々な方面への応用が考えられよう。

(1) 建物単体の挙動モニタリング

これは正に構造ヘルスマニタリング (SHM) そのものである。これまで SHM による情報は機械系制御への利用 (免震・制震装置の効果評価等) またはアラーム等による住民への注意喚起に重点が置かれており、人間系への制御利用はあまり顧みられてはいないと思われる。人間系の制御はアラーム (警報) に留めるのではなく、状況やその先の行動を決定づける情報を提供することが鍵となることは 1 章に既述のとおりである。また SHM が浸透していかない理由として建物健全性の診断の難しさと正確な診断をするためには建物全体系に多数のセンサーを有機的にネットワーク化させるための投入コストやシステム維持が高価なことがネックとなっているとの指摘もある。最近ではセンサー自体に信号処理能力を持たせたスマートセンサーの開発やそれを利用した SHM の研究も盛んに行われるようになってきている¹⁶⁾。このような風潮を眺めるにつけ、SHMこそ人間系制御への活用期

待度は大きくなる。建物全体あるいは建物区画ごとの構造安全性をリアルタイムで簡便に評価することが出来るなら、その情報を住民に即時提供することで建物の応急危険度即時診断と名付けることが出来よう。応急危険度判定による色識別張り紙と同様、建物内居住者への誘導情報 (待機情報・退避情報・あるいは立入禁止情報) となるであろう。同時に、建物が安全であることが SHM 情報により判定されたなら、周辺住民に対して当該建物が避難ビルとして利用できることを宣言することになる。当該建物所有者および居住者のみならず周辺住民への安心情報として活用が期待できる。

(2) 高層建物内避難

超高層および高層建物における避難計画は全館一斉避難を想定してはいない。高層建物の想定災害は建物内出火火災であり、延焼を防火区画あるいは階の中に閉じ込めることが大前提となっており、よって火災の発生した階、及びその上下複数の階にいる在館者のみがそれ以上または下の安全な領域へ階段で移動する、所謂階避難が計画されている (図 15)。すなわち、数フロアの在館者数の移動に十分な避難通路幅・階段が用意されているのみである。言い換えれば、全館避難することは現実的に不可能であるのみならず、そのような状況に至った場合、相当の混雑が予想され、逆に極めて危険な状況を作り出すこととなる。このような高層建物の現状を承け、日本建築学会と土木学会は海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言の中で、高層建物の避難計画について以下のような提言を行っている¹⁸⁾。

「全館避難の必要性を在館者が認識した場合、避難誘導がなされなくても自発的に全館避難が発生する可能性がある。また、在館者は高層階に閉塞される恐怖心が強く、災害時には他者に追従したパニック的一斉行動をとる場合がある。このような在館者による意図しない全館避難の発生および混乱を防止するための手段として、緊

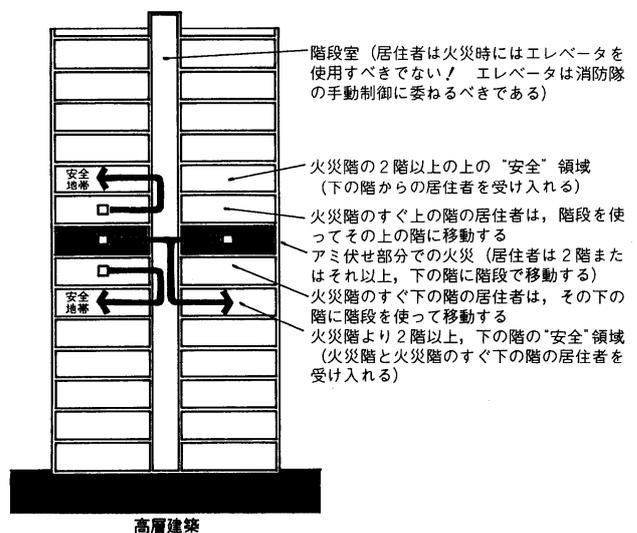


図 15 高層建物における火災階からの避難例¹⁷⁾

急地震速報や館内モニタリングによりできるだけ早期の事態把握に努め、安心情報と共に館内同報するシステムを導入することが有効である。」これはまさしく、モニタリングによる避難誘導システムの提案である。

(3) SAR への展望

モニタリングが将来に期待できる分野として倒壊建物からの人命の救出救助 (Search And Rescue : SAR) を挙げておきたい。倒壊建物に閉じ込められた場合、その建物の構造種別にも大きく影響されるが、一般に 24 時間以内に救出しなければ救命の可能性が著しく低下する。よってこの 24 時間は SAR のための黄金時間 (Golden Time) と呼ばれている。救出・救命に要する時間 (T_{SAR}) は一般に以下の式で与えられる。

$$T_{SAR} = T_{arr} + T_{src} + T_{rsc} + T_{car} \quad \dots (4)$$

ここに、

- T_{SAR} : 救出・救命時間
- T_{arr} : 現着時間
- T_{src} : 探索時間
- T_{rsc} : 救出作業時間
- T_{car} : 搬送時間

現着時間 (T_{arr}) とは救助隊員が被災現場に到着に要する時間であり、大災害時には交通事情より数時間以上を要する。探索時間 (T_{src}) は倒壊建物内の生存者が確認できるまでの時間であり、状況により数分から数日を要する。救出作業時間 (T_{rsc}) とは倒壊建物内に閉じ込められている生存者を助け出す時間であり、阪神淡路大震災の例に見るなら 1 人助け出すのに救助隊員 1 人で平均 6.5 時間を要している¹⁹⁾。搬送時間 (T_{car}) とはその後病院へ搬送するに要する時間であり、我が国の場合、平時において平均 22 分を要している。以上より、最も不確定な要因は探索時間である。救助犬を使つての懸命の捜索でもなかなか成果は上がっていない。最近はレスキューロボットの開発も試みられているが、筆者が期待するのは建物構造種別ごとの倒壊パターンにより生存者の確率がある程度固定されているという事実である^{20,21)}。建物内での閉じ込め者の死に至るプロセスのモデル化も進められているところであり^{22,23)}、生存者の存在確率の高い状況を判断する道が開きつつある。被災後にむやみに瓦礫を探索するのではなく、建物倒壊パターンをモニタリングすることにより生存確率の高い建物を絞り込むことが可能となり、SAR に要する時間短縮が期待され生存者確保に有効な手段の提案に繋がるであろう。

8. 最後に

災害現象をモニタリングし、そのデータを情報化することで防災～特に人間系制御利用～への道を探ってきた。本稿では災害時利用のみをうたってきたが、モニタリングとは観測の継続を意味する言葉であり、災害時のみに

活用が限定されるものでもない。システムは平時の利用が主にあり、災害時には又特別の働きをするものを筆者は理想としている。災害時だけのものであるならそのシステムは cost/performance から普及しないであろうことは明らかである。普及が望めないシステムは、結局は防災の役には立たないシステムということになってしまう。防災の普及の鍵は平時の利用にこそあると思っている。ここで紹介したいくつかのシステムは、平時においては防災教育としての利用方法が組み込まれている。しかし、それを超えた平時の利用方法も防災関係者は考えるべき時に来ている。

本稿でも話題とした放射性物質拡散予測システム SPEEDI は東日本大震災時には活用されなかった。これは皮肉なことに、せっかくの情報も使う側 (意思決定者・為政者) の能力が不足していたなら使えないことの好例となってしまった。緊急事態における予測情報の価値を認めず、予測だから使えないと判断した防災リーダーは明らかに間違っていたわけであるが、この事実をただ批判するだけに留めず、緊急時におけるこのような判断ミスを犯させない情報あるいは情報提供のあり方、そして普段からの防災教育のあり方を考えるきっかけとすべきである。

参考文献

- 1) 文部科学省原子力安全課：環境防災 N ネット (<http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/030104.html>)
- 2) 気象庁：緊急地震速報について (<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/>)
- 3) 座間信作：自治体における地震防災システム，リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，1，53-58，1999.
- 4) Earthquake Alarm Group: A Plan for Strong Earthquake Alarm System 10 Seconds before It Attacks The City of Tokyo, 5th WCEE, Rome, 1081-1084, 1973.
- 5) 気象庁・緊急地震速報の本運用開始に係る検討会：「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会」最終報告，pp.16, 2007.
- 6) 源栄正人・本間誠：構造ヘルスマニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発—その1—その2—，東北地域災害科学研究，44，13-22，2008.
- 7) 阿部雅史・神田克久・宮村正光：現地地震計による早期地震警報の研究—その1—その2—，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，659-662，2007.
- 8) 岡田成幸・中嶋唯貴：緊急地震速報を利用した個人世帯における負傷回避システムの開発，日本建築学会総合論文誌，8，93-98，2010.
- 9) 岡田成幸・中嶋唯貴・小山真紀・松下孝星：コンピュータビジョンによるリアルタイム音声誘導システムの開発～地震時室内負傷低減のための多重対策の一環として～，地域安全学会論文集，13，213-221，2010.
- 10) 太田裕・岡田成幸：震害予測情報システムに関する

研究 ―基本構想と実現への考察―, 文部科学省研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」研究成果報告書, pp.210, 1990.

11) USGS : Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response

(<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/pager/>)

12) 岡田成幸：地震防災における意思決定, オペレーションズ・リサーチ, 43(6), 316-323, 1998.

13) 太田裕：地震被害調査の合理化戦略に関わる基礎理論の展開(1) ―モデル化の考え方と簡単なシミュレーション―, 科学的情報収集体制に関する調査研究, 川崎市, 1-32, 1995.

14) 能島暢呂：ベイズ更新に基づく被害の逐次推定に関する考察, 第 18 回日本自然災害学会学術講演会, 49-50, 1999.

15) 能島暢呂・太田裕・杉戸真太：2000～2004年に岐阜県内で観測された計測震度の分析, 土木学会地震工学論文集, 28, 1-10, 2005.

16) たとえば, 三田彰：センサネットワークを活用した都市・建築健全性診断システム, 計測と制御, 46(8), 612-617, 2007.

17) D.イーガン：建築の火災安全設計, 鹿島出版会, 1981.

18) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性, 丸善, 2007.

19) 村上ひとみ：1995年阪神・淡路大震災における応急救助の実態と活動, 地震時死傷者問題に関する学際シンポジウム報告, 人的被害研究会, 49-5, 1997.

20) Sakai S. : Survival Modeling of Victims Trapped in Collapsed Buildings in Earthquakes, J. Natural Disaster Science, 13(2), 69-95, 1991.

21) 岡田成幸・鏡味洋史：地震時の建物内死者発生メカニズム解明のためのデータベース構築とデータマイニング, 平成 14～16 年度科学研究費補助金基盤研究(B)(2)研究成果報告書, pp.181, 2005.

22) Shiono K and Krimgold F. : A Computer Model for the Recovery of Trapped People in a Collapsed Building: Development of a theoretical framework and direction for future collection, International Workshop on Earthquake Injury Epidemiology, The Johns Hopkins University, 260-295, 1989.

23) 太田裕・村上ひとみ・和藤幸弘・小山真紀：住家倒壊による閉じ込め者の震後余命特性 ―モデルの構築と神戸における適用, 地域安全学会梗概集, 15, 7-10, 2004.