

地震情報伝達システム ROSE の開発 Real-time Operation System for Earthquakes

石田瑞穂¹⁾, 大井昌弘²⁾
Mizuho Ishida, Masahiro Ooi

- 1) 独立行政法人 防災科学技術研究所, 研究主監, 理博 (茨城県つくば市天王台 3-1, ishida@bosai.go.jp)
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Research Supervisor, Dr. Sci.
2) 独立行政法人 防災科学技術研究所, 研究員, 理修 (茨城県つくば市天王台 3-1, ooi@bosai.go.jp)
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Researcher, M.Sci.

防災科学技術研究所では, 高感度地震観測網(Hi-net), 広帯域地震観測網(F-net), 強震観測網(KiK-net, K-NET)の地震波形データを用いて, 地震情報(震源位置, マグニチュードなど)および地震動分布(最大速度分布, 震度分布)をリアルタイムで表示するシステムを開発した。このシステムは, 1) 最大地動の分布を常時解析して表示する「常時地動監視システム」, 2) 地震発生時に Hi-net によって決定された震源情報(震源位置, マグニチュード, P 波初動解など)から地震動を推定するとともに, 本震後の余震分布から断層面を推定することができる「地震動推定システム」によって構成される。

リアルタイム, 地震動推定, 地形分類図, 地盤増幅度, 距離減衰式, 高感度地震計
real-time, strong motion estimation, soil-type classification, amplification factor, attenuation relations, high sensitive seismometer

1. はじめに

防災科学技術研究所(以下, 防災科研)では, 1995 年兵庫県南部地震以降, 地震調査研究推進本部の下に基盤的地震観測網の整備を推進してきた。それらは, 図 1 に示されている高感度地震観測網(Hi-net), 広帯域地震観測網(F-net), 基盤強震観測網(KiK-net)である。これらの観測網は, 地震による被害の軽減と地震現象の解明を目的として構築された。

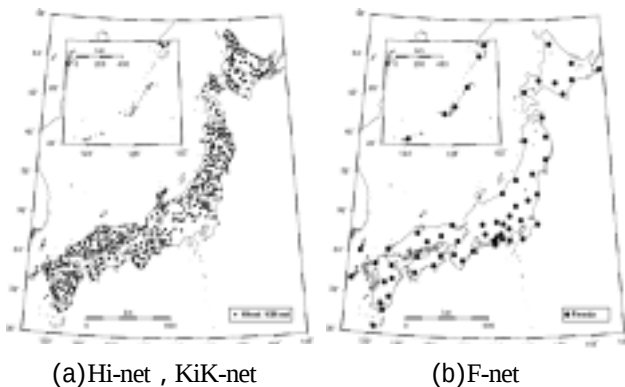


図 1 基盤地震観測網

Hi-net は, 日本全国の地震活動を正確に把握することを目的としており, 上部地殻内で発生する内陸地震の深さを精度良く求めるために約 20km 間隔で整備されている。平成 13 年度末時点での Hi-net の観測点数は約 640 点, F-net は約 70 点であり, 観測データは全てリアルタイムで防災科研に伝送されている。一方, K-NET(約 1030

点)および KiK-net(約 640 点)はともに地震発生後, 担当者がダイヤルアップでデータ収集を行っている。

したがって, 迅速な地震動推定のためには, リアルタイム伝送による Hi-net のデータを震源決定のみならず地震動推定にも用いることが必要である。そこで, 大地震の際にも Hi-net の地震情報(震源位置, マグニチュード等)に基づき面的な地震動分布(最大速度分布, 震度分布)を数分で表示できるシステム(Real-time Operation System for Earthquakes(ROSE))を開発した。

2. 表層地盤の増幅度の評価

観測点による「点」の地震動情報から「面」的な地震動情報を全国同水準で即時に推定するために, 簡便な方法として松岡・翠川による方法を用いた¹⁾。松岡・翠川は, 国土数値情報の地形分類, 標高, 主要河川からの距離に基づき, 表層地盤の増幅度を求め, 工学的基盤で得られた基盤速度にこの増幅度を掛けることにより, 地表面での最大速度を求める方法を提案している。

国土数値情報の地形分類は, 全国を 1 km メッシュごとに評価している(図 2 (a))。しかし, この分類は土地分類図²⁾の地形分類図(図 2 (c))と比較すると大きな地形しか表現できず, 細かな河川等が表現できていない。そこで, 我々は工学院大学久田研究室との地震動推定に関する共同研究の一環として, 500m メッシュの地形分類(図 2 (b))のデジタル化を行い, このデータに基づいた表層地盤の増幅度データベースを作成した³⁾。

表層地盤の増幅度の評価については, 松岡・翠川の方法に従い, 地形分類ごとに平均 S 波速度を求め, その平均 S 波速度から増幅度を算定した。

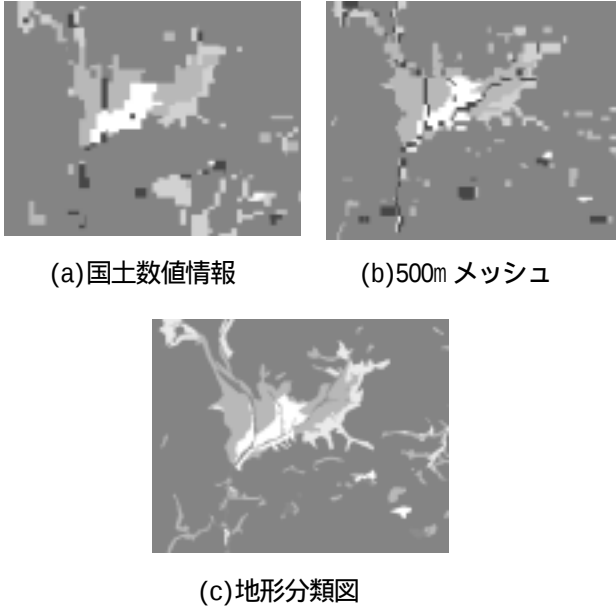


図2 作成した500mメッシュと国土数値情報との比較
(甲府盆地付近)

表層地盤の速度増幅度は次式で表される。

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \log AVS \quad (1)$$

ARVは工学基盤に対する表層地盤の速度増幅度、AVSは地表から深さ30mまでの平均S波速度(m/s)である。

平均S波速度AVSは次式で求められる。

$$\log AVS = a + b \log H + c \log D \quad (2)$$

ここで、 H は標高(m)、 a 、 b 、 c は係数である。500mメッシュの標高は、数値地図250mメッシュの標高データから500mメッシュ内での平均値を用いた。

(2)式では、主要河川からの最短距離 D (km)及び係数 c が考慮されているが、我々は次式によってAVSを算定した。

$$\log AVS = a + b \log H \quad (3)$$

a 、 b は地形分類ごとに対応した係数であり、それぞれの値は表1に示されている。

これにより求められた基盤速度に(1)式で得られた表層地盤の増幅度を乗じることによって、各メッシュでの地表速度を算定することができる。

3. 面的な地震動の推定

面的な地震動を推定するため、ここでは2つの推定方法を用いる。一つは、距離減衰式を用いて、マグニチュードと震源(断層)までの距離から工学的基盤面での最大速度を求め、それに表層地盤の増幅度を乗じて地表面での最大速度を求める方法である。もう一つは、基盤上のHi-net観測点で得られた速度波形をPS検層に基づき

表1 地形分類ごとの(3)式の係数

地形分類	Code	係数		標高(m)	
		a	b	下限	上限
山地	1	2.64	0	-	-
台地	2	2	0.28	10	400
扇状地	3	1.83	0.36	15	200
自然堤防	4	1.94	0.32	5	30
砂州	5	2.29	0	-	-
谷底平野	6	2.07	0.15	10	500
三角洲 旧街道	7	2.34	0	-	-
埋立地	8	2.23	0	-	-
河川 その他	0	-	-	-	-

地表面に引き上げた後、表層地盤の増幅度と工学的基盤上での補間から任意の点における地表最大速度を算定する方法である。

なお、地表面における震度は、内閣府の地震被害想定支援マニュアルに示されている最大速度と震度の関係式を用いて算出した。

$$I = 2.02 \log V + 2.4 \quad (4)$$

ここで、 I は震度、 V は最大速度である

1) 距離減衰式による面的推定

工学的基盤(S波速度300m~600m)での最大速度の距離減衰式として、安中らが提案する式⁴⁾を用いた。安中からは、断層面からの距離の取り方として、断層最短距離と等価震源距離の異なる式を提案しているが、ここでは断層最短距離を用いた式を適用した。

$$\log A = c_m M + c_h H - c_d \log(R + c_1 \exp(c_2 M)) + c_0 \quad (5)$$

ここで、 A は工学的基盤上での地震動強度、 M はマグニチュード、 H は震源の深さ、 R は断層面までの最短距離である。また、 C_m 、 C_h 、 C_d 、 C_0 、 C_1 、 C_2 は係数であり、最大速度の場合は以下のような値を取る。

$$C_m = 0.725, C_h = 0.00318, C_d = 1.918$$

$$C_0 = -0.519, C_1 = 0.334, C_2 = 0.653$$

(5)式により求められた各メッシュにおける工学的基盤面での最大速度 A に、(1)式で得られた表層地盤の増幅度ARVを乗じて地表面での最大速度 V を求め、この値を(4)式に代入することにより震度 I を算定した。

2) Hi-net観測値による面的推定

Hi-netは、平均深さ100m以上の観測井の底部に設置された3成分速度計(固有周波数1Hz、出力感度約200V/m/s)から構成されている観測網で、観測井掘削の際にPS検層が行われている。

観測井の底部と地表に併設された強震計からなる KiK-net のデータは、震度 3 以上の地震が発生した場合にダイヤルアップでデータ収集が行われる。したがって、地震発生後即時に震源情報を得るために、リアルタイムでデータ収集が行われている Hi-net を最大限活用することにした。Hi-net は、サンプリング周波数 100Hz の 27 ビットデータを 1 秒単位にパケットにして防災科研にリアルタイムで伝送されている。Hi-net で得られた地震波形を使用するにあたり、まず、地震計と AD のレスポンスを補正した。これらのレスポンス補正には、防災科研の WEB 上で公開されている値を用いた。なお、補正の際、長周期成分のノイズを抑えるために 0.1Hz のハイパス型の漸化フィルターを用いた。

図 3 (a) は鳥取県西部地震(2000 年 10 月 6 日, Mj 7.3)の際に、震央から 80km ほど離れた邑智観測点(島根県)で観測された基盤上での速度波形である。図 3 (b) は、地震計と AD を含むレスポンスを補正して得られた速度波形である。補正後の速度波形は、同じ基盤上の KiK-net で観測された加速度波形を積分して得られた速度波形(図 3 (c))と長周期成分まで良い一致を示している。なお、積分の際、Hi-net のレスポンス補正の際と同じく 0.1Hz のハイパス型の漸化フィルターを用いた。

地表面での地震動を推定するために、ここでは、PS 検層のデータを用いて 1 次元水平地盤の地震応答解析を行った⁵⁾。PS 検層では、密度及び地盤の減衰定数が不明のため、密度 ρ は $2.0(\text{tf/m}^2)$ と仮定した。地盤の減衰定数 h は次式で表される。

$$h(\omega) = \alpha / \omega + \beta \quad (6)$$

ここで、 α は散乱減衰(1/sec)、 β は材料減衰(無次元)である。地盤の減衰定数は、全ての地盤に対して $\alpha=2.0$ 、 $\beta=0.02$ を仮定した。

(6) 式は、各層のせん断弾性係数や減衰定数の歪み依存性が無視できる範囲でしか適用できない。この範囲はせん断歪みがたかだか 0.01% 程度までである。Hi-net は基盤上において約 3 cm/s で振り切れるため、この基盤入力波に対する系は線形と仮定し、ここでは(6)式を用いた。

基盤上で観測された Hi-net 速度波形のレスポンス補正後の波形(図 3 (b))から(6)式を用いて地表面における速度波形を推定したものを図 4 (a)に示す。地表面に設置されている KiK-net 加速度波形から得られた速度波形(図 4 (b))と比較すると短周期成分の振幅が大きく増幅されている。これは、地盤における短周期成分の減衰を過小評価しているためであり、それぞれの地盤での周波数による減衰等に関する評価は今後の課題である。

図 5 は、鳥取県西部地震および芸予地震(2001 年 3 月 26 日)の際に、Hi-net、KiK-net の同じ観測点で観測された速度波形の最大振幅の比較である。ここで、最大振幅は水平 2 成分の合成ベクトルの最大値である。

図 5(a)は、同じ基盤上における Hi-net と KiK-net で得

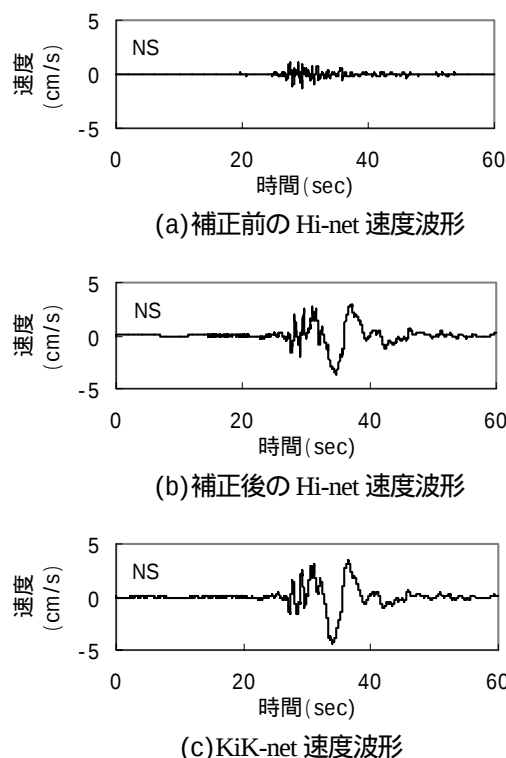


図 3 震央から 80km ほど離れた邑智観測点(島根県)の基盤上での Hi-net と KiK-net の速度波形の比較

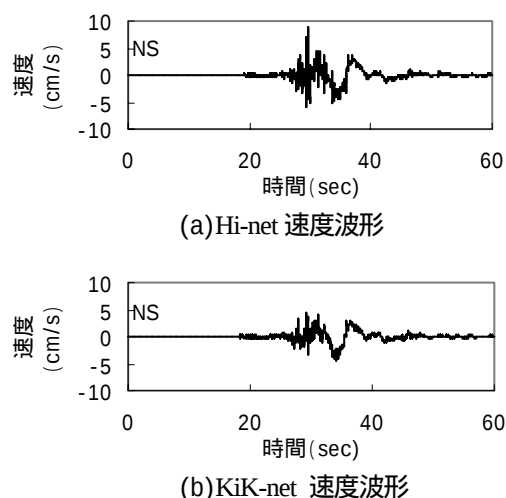


図 4 邑智観測点(図 3)における地表面での Hi-net と KiK-net の速度波形の比較

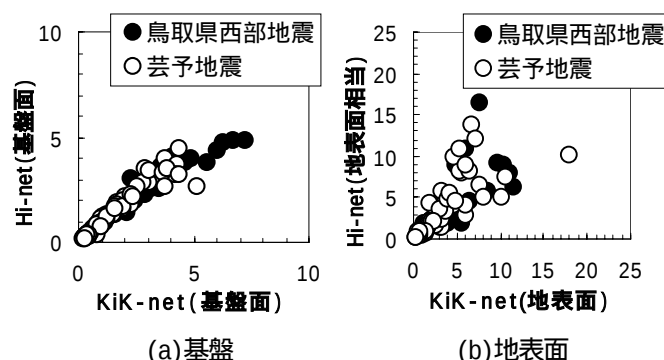


図 5 Hi-net と KiK-net の最大速度の比較

られた最大速度の比較を示しており、両者の最大振幅はほぼ同じであることがわかる。図5(b)は、Hi-netの速度波形をPS検層に基づき地表面に引きあげたものと、地表面上に設置されているKiK-netから得られた最大速度との比較を示している。図4でも示されたように、観測点によっては振幅の増幅が過大に評価されている。両者の振幅値の違いは20kineまでの範囲において最大で約2倍であった。

以上のように、Hi-netを用いた地表面での地震動分布にはいくつかの検討すべき点が残されているが、即時性を重視して次のような面的推定法を用いた。Hi-netの地表面相当の最大速度を(1)式で得られた表層地盤の増幅度で除して工学的基盤面に戻し、任意のメッシュ重心位置での最大速度を3次スプライン補間から算出する。算出された工学的基盤面での最大速度に、(1)式で得られた表層地盤の増幅度を乗じることにより、任意のメッシュ位置における地表面での最大速度と(4)式から震度が算定される。

4. ROSEの概要

本システムは、主として2つの部分から構成される。

1) 常時地動監視システム

図6に常時地動監視システムの処理フローを示す。

Hi-netの地震波形データは、1秒単位にパケットされて防災科研にリアルタイムで伝送されている。本システムでは、1秒パケットのデータを受取ると同時に漸化フィルターによって地震計とADのレスポンス補正を行い、これらの波形データから一定時間間隔（現在は1分）で最大地動分布を常時解析して地図上に表示する。また、レスポンス補正された波形データは、1秒パケットのデータとしてディスク上に蓄積されており、地震が発生した場合の解析データとして使用される。

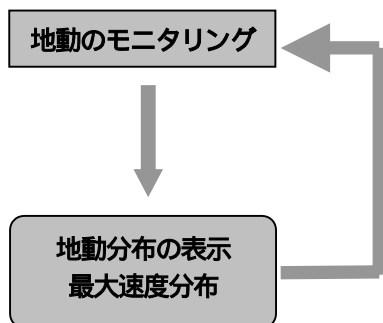


図6 常時地動監視システムの処理フロー

2) 地震動推定システム

図7に地震動推定システムの処理フローを示す。

本システムは、地震発生時にHi-netによって求められた震源情報(震源位置、マグニチュード、P波初動解など)

から地震動を推定するとともに、本震後の余震分布から断層面を推定する。

最初に、Hi-netによって1分以内に震源情報が即時決定される(図8(a))。決定された震源情報を受け取り、震源位置とマグニチュードから、まず点震源による距離減衰式を用いて面的な地震動推定を行う(図8(b))。その後、震源時から3分程度のHi-net波形データを用いて、最大速度、推定震度、卓越周期の分布を震源位置とともに地図上に表示する。また、地震動分布は地形分類に基づいた増幅率から面的分布として表示される(図8(c))。Hi-netは、約3kine程度で地震計が振り切れるため、大地震の際には震源近傍での地震動推定ができなくなる。そこで、欠測、振り切れなどによるHi-netの観測空白域における最大地震動の推定は、工学的基盤面に戻した値と距離減衰式により求められた値との差を最小二乗法で求め、この差を補正値として距離減衰式の最大速度分布を補正した。

本震発生後30分間における余震分布が本震とともに図8(a)に示されている。本システムでは、本震以後発生する地震に対して、本震から半径30km内で発生し、本震のマグニチュードより小さい場合は余震として本震と同じ地図上に震源を追加する。これにより、時間経過とともに余震分布から断層面を推定することが可能となる。

余震分布などから本震の断層面がわかると、Hi-net観測値と断層面を仮定した距離減衰式により地震動分布が再度計算される(図8(d))。最終的に、K-NET、KiK-netの強震計データがダイヤルアップで収集されれば、強震計の観測値に基づく面的な地震動分布を求めることができる(図8(e))。

このように、地震動マップは時間経過に伴い、図8(b)の点震源の距離減衰式による面的な地震動分布から図18(e)の強震計の観測値による面的な地震動分布へと随時更新されていく。現在、ROSEは所内ホームページ上で試験的に公開中である。

5. 被害推定システム

防災科研では、「地震動予測地図作成手法に関する研究」の一環として、「震災被害予測手法に関する研究」を行っている。昨年度は、基礎調査として、地震損傷度評価手法の文献調査、建物の被災度定義に関する検討、地震損傷度評価における不確定要因の分類などを行っており、本年度はそれらを踏まえて建物群(主に木造)の地震損傷度曲線の評価を行う予定である。すでにプロトタイプとして、東京都都市計画局等から提供された23区の地盤・建物データを用い、震源情報に基づいた建物被害が推定できるGISシステムを開発している。建物被害の計算は、既往の被害関数を調査し、東京都23区の建物分類

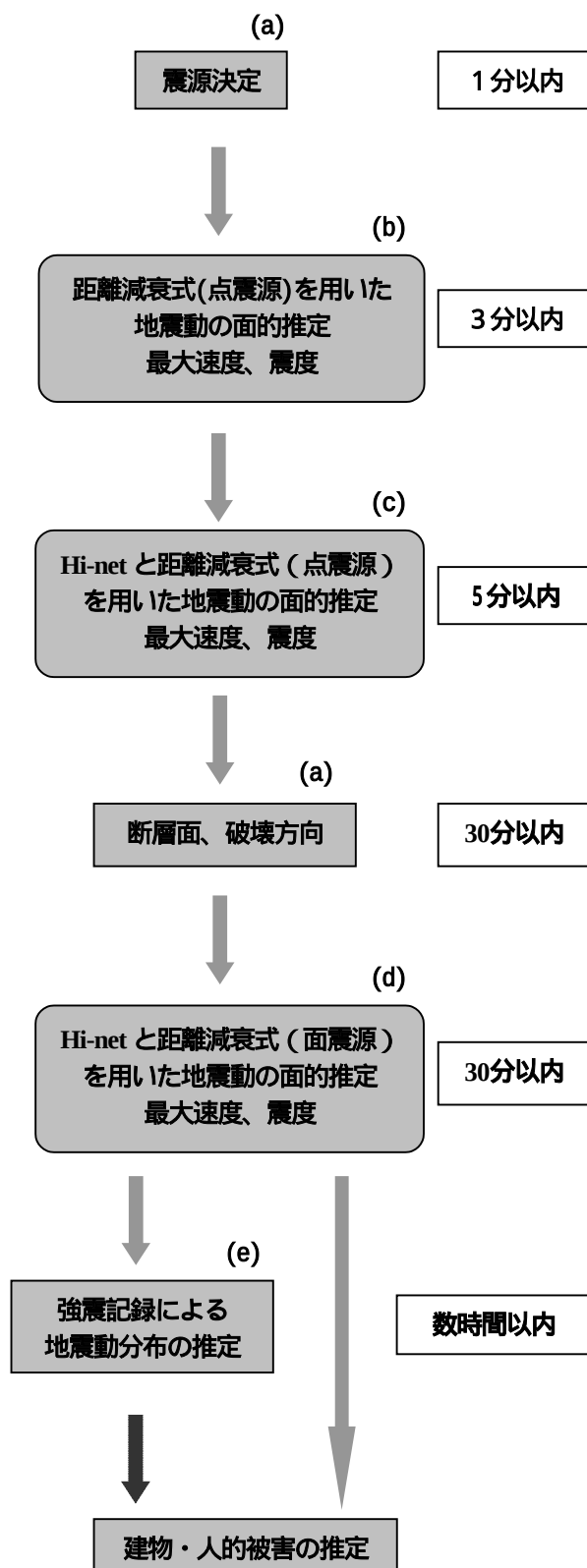
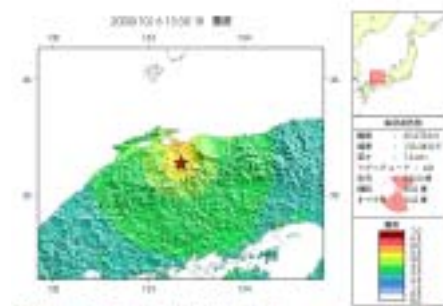


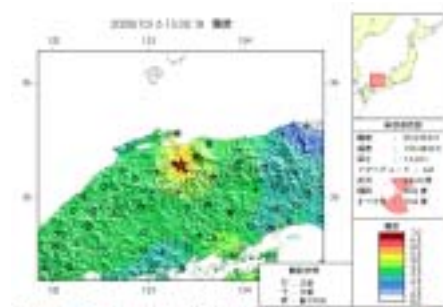
図7 地震動推定システムの処理フロー
(図中の(a)～(e)は図8の(a)～(e)に対応する)



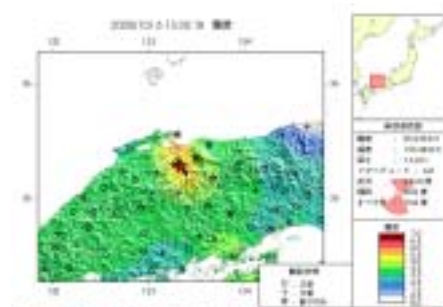
(a)震源情報



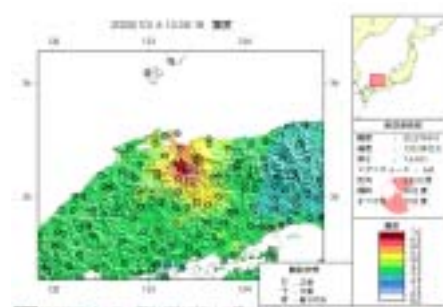
(b)距離減衰式(点震源)による面的震度



(c)Hi-net と距離減衰式(点震源)による面的震度



(d)Hi-net と距離減衰式(面震源)による面的震度



(e)K-NET と KiK-net による面的震度

図8 鳥取県西部地震における地震動推定の例

に対する被害関数との対応を検討した上で、最大速度での被害関数を構造別、築年代別に設定してある。

上記のシステムは、地震防災に役立てることを目的とし、ROSE によって推定された面的な地震動分布を入力として利用することにより、町丁目ごとの地震被害を推定することを目指している。

6. 今後の課題

ROSE では、防災科研における Hi-net、F-net、KiK-net、K-NET において個別に開発された解析技術を最大限活用できるシステムである。例えば、現システムでは断層面の決定は余震分布に基づいているが、広帯域地震波形を用いた波形インバージョン機能を組み込むことによって、短時間で断層面を決定することが可能となる。余震分布から断層面を判断する前に、即時情報として波形解析から断層面を推定することができれば、より早く正確な地震動情報を求めることができる。現在、F-net の波形解析については ROSE への組み込みを準備中である。

また、ROSE は、利便性を目的として GIS による地震動表示システムの開発も行なっている(図 9)。現時点では、関東地域に限定しているが、システムのレスポンス等を評価した上で日本全国版にすることを検討中である。

一方、こうした地震情報の活用例の一環として、横浜市総務局災害対策室と地震防災に関する共同研究を行っており、防災科研から横浜市に Hi-net による震源情報のメールを発信している。震源情報の発信に加えて、横浜市の地震災害対策に対して地震情報が有効利用されるために、防災科研では「震源情報表示システム(仮称)」を開発している。このシステムは、防災科研より発信される震源情報のメールを受信し、データベースに登録するとともに震源を 3D マップとしてパソコン上に表示することができる(図 10)。今後、横浜市の地震防災担当者との意見交換を通して、必要があれば ROSE の距離減衰式や観測値による地震動推定及び被害推定機能を表示システムに付加することを検討する。



図 10 地震情報表示システム

参考文献

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第 22 回地震震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.23-34, 1994
- 2) 国土庁土地局国土調査課(現在, 国土交通省土地・水資源局): 土地分類図, (財)日本地図センター, 1976
- 3) 久保智弘, 久田嘉章, 柴山明寛, 大井昌弘, 石田瑞穂, 藤原広行, 中山圭子: 全国地形分類図による表層地盤特性のデータベース化及び面的な早期地震動推定法への適応, 日本地震学会「地震」へ投稿中
- 4) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997
- 5) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994



図 9 GIS 版 ROSE(関東限定)