

岐阜県域における地盤データ整備と地震動予測事例の紹介

岐阜大学 流域圏科学研究センター 久世益充

Estimation of seismic intensity distribution that used the updated database of soil structure models at Gifu Prefecture

Masumitsu Kuse
Gifu University, Gifu, Japan

1. はじめに

地震災害の軽減策の一つとして、対象地域で発生する地震を想定した被害予測が挙げられる。地域の地盤データや人口、建物などの各種データに基づいて推定した震度や各種被害は、各地の被害様相を知る手がかりとなり、事前対策の基礎資料として活用される。本報では、岐阜県を対象とした地震被害想定調査¹⁾における、地域の地盤データ整備について概説する。これに加えて、岐阜県内の地震動予測に関連し、地域のゆれの特徴について検討した事例について紹介する。

2. 岐阜県域におけるメッシュ地盤データの整備¹⁾

地表地震動は局所的な地盤条件に依存するため、地震動を予測する場合、各地の地盤条件を的確に与える必要がある。近年、ボーリングデータベースの公開²⁾や、地震基盤から地表までの地盤構造や表層付近の地盤増幅率が整備・公開³⁾されるなど、全国レベルの地盤条件に関する情報を容易に入手できるようになった。対象地域の地震動をできる限り正確に予測するためには、これらのデータを活用し、地域の地震動増幅特性を把握する必要があるが、各地の地震動をできる限り詳細に予測するには、前述の全国的なデータに加えて、表層地質図などの地域の平面的な情報や、県内のボーリングデータを追加することが重要である。

岐阜県でも、県内のボーリングデータに基づき、500mメッシュ単位の表層地盤モデルを構築し、地震動予測に用いてきた⁴⁾。1998年に整備されたメッシュ地盤データは、県内の地震被害想定¹⁾の基礎的な情報として長く活用されてきたが、最新の被害想定調査¹⁾においては、各地の地震動をより精度良く推定するために、現行の世界測地系に対応した、250mメッシュ単位の地盤データベースが整備された。地盤データベースでは、既存の地盤モデルと県内のボーリングデータ(基盤面まで到達している約4,100本)、微地形を基に、図1に示す48種類のモデル柱状図を、県内約16.6万メッシュに割り当てた。地盤モデルの分布図を図2に示す。

3. 想定地震の概説と地震動・被害予測に関する各種検討事例の紹介

3.1 断層モデルの概説

2.で前述した地盤モデルを基に岐阜県は、図3に示す想定地震を対象に、地震動予測を実施した。断層モデルの詳細は本報では省略するが、南海トラフ地震は内閣府が公開している断層パラメータ(基本ケース)⁵⁾を基に、等価な断層モデルを作成した。内陸地震については、養老桑名四日市断層帯地震は中

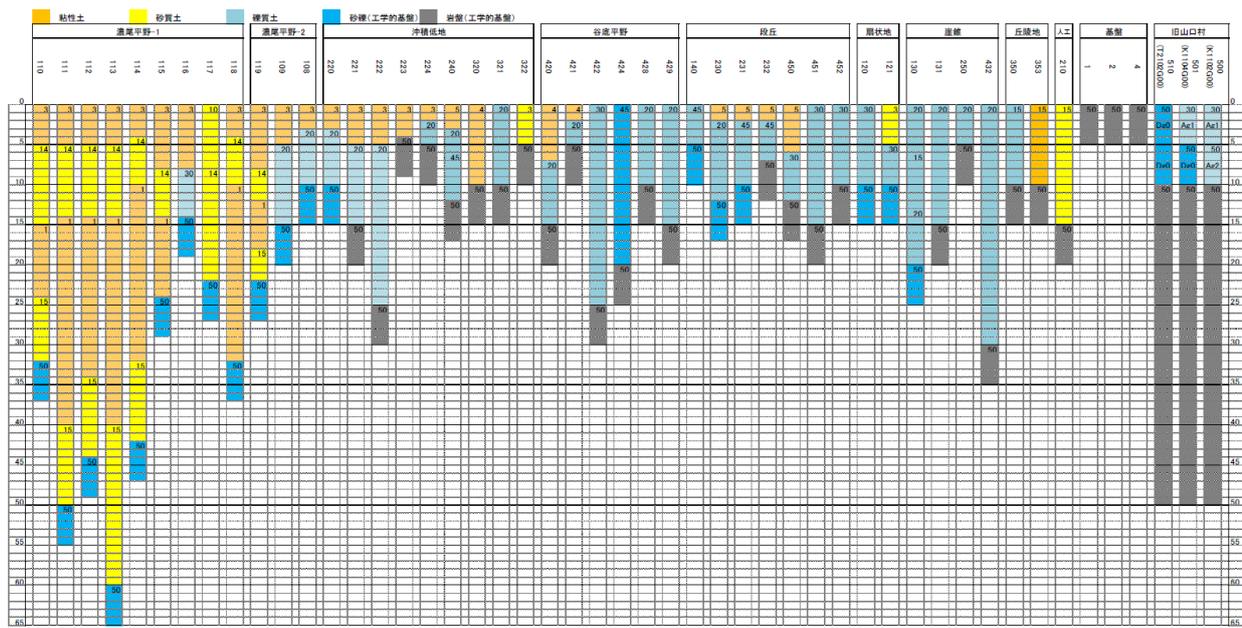


図1 岐阜県のモデル柱状図¹⁾

中央防災会議の資料⁶⁾を基に、等価な断層モデルを作成した。跡津川断層地震，高山・大原断層帯地震，阿寺断層系地震については，断層の大きさに基づいて経験的に設定されたパラメータ⁷⁾を使用した。

3.2 亜炭抗廃坑の影響による地震動増幅特性について

3.1に前述した断層モデルを用いて、岐阜県域の地震動を推定する。地震動の増幅特性については、2.に前述した地盤モデルを用いた。ただし、御嵩町内においては、亜炭抗廃坑の影響により、他地域と地震動増幅特性が異なることが指摘されている⁸⁾。亜炭抗廃坑の空洞を考慮した非線形2次元動的応答解析の結果、図4に示すように、空洞深度が5~15m程度あると地表地震動が大きくなった。そこで図5に示す空洞分布の中で、空洞深度5~15mのメッシュに対しては、推定した地表地震動に計測震度の割増(+0.2)を行った。

3.3 地震動予測結果

以上の検討を基に推定された、震度階分布を図6に示す。地震動の予測においては、非常地震動予測モデル EMPR⁹⁾を用いて工学的基盤レベル ($V_s=500\text{ms}$ 相当)の加速度波形を算出した。EMPR によって算出した基盤地震動と2.に前述したメッ

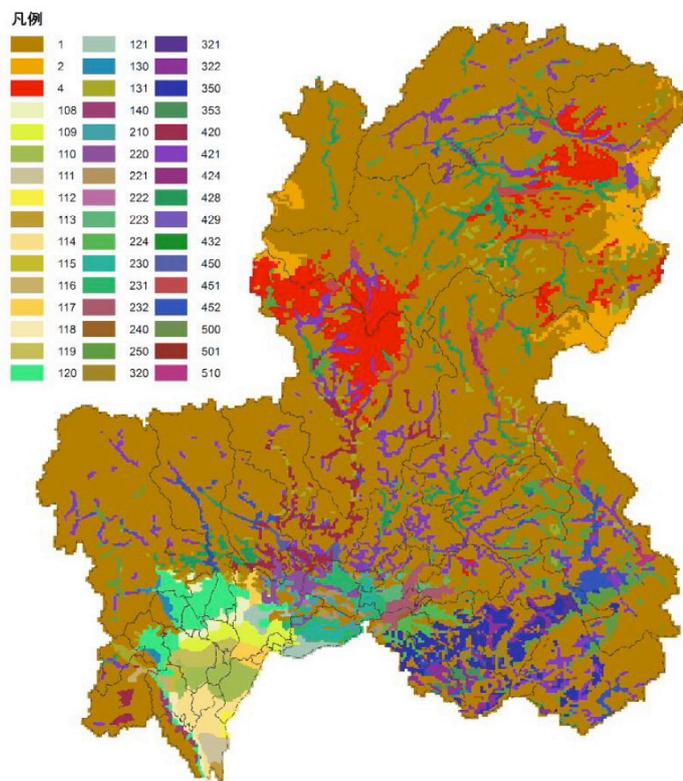
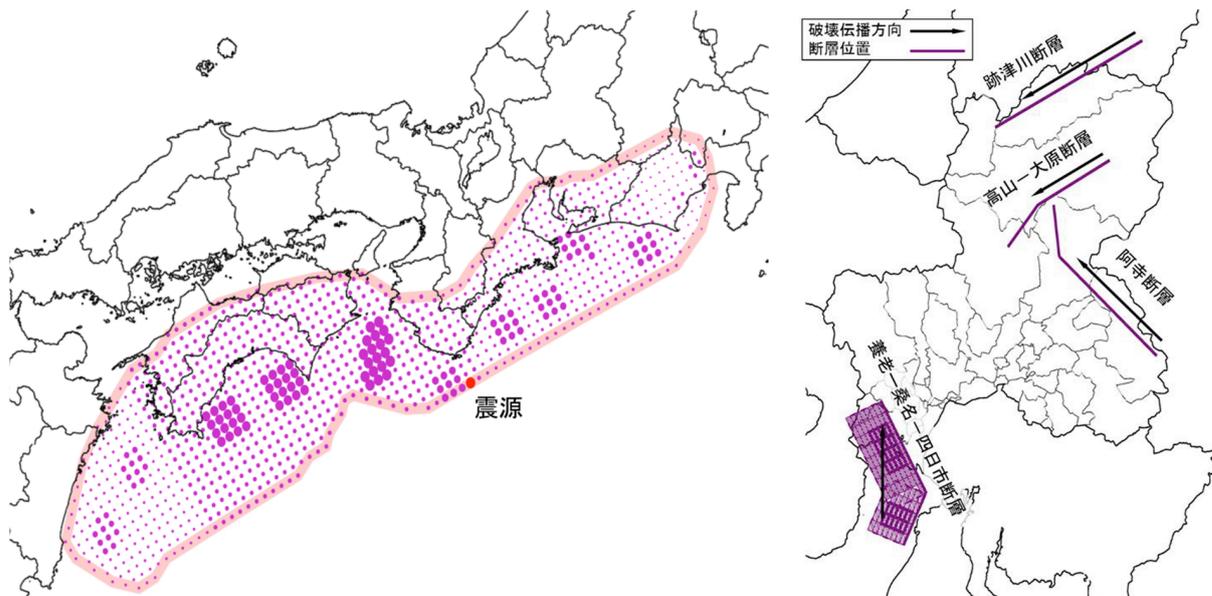


図2 岐阜県の地盤モデル分布¹⁾



(a) 南海トラフ地震

(b) 内陸地震

図3 想定した断層モデル (図中, (a)の丸は小断層位置, 丸の大きさは強震動生成域の分布, (b)の格子は小断層で, 太線の小断層が強震動生成域を示す)

シュ地盤データベースを用いて, 周波数依存型等価ひずみによる地震動応答解析法 $FDEL^{10)}$ により各地の地表地震動を算定した. 図6(a)に示すように, 南海トラフ地震では岐阜県全域で震度5強以上となった. 図6(b)~(e)に示す内陸地震については, (e)の跡津川断層以外は断層近傍で震度7が予測される.

4. 濃尾平野における地震動特性の推定と地震動予測事例の紹介

以上の検討に加えて, 筆者らによる, 濃尾平野特有の地震動特性の検討事例¹¹⁾について紹介する. 図7に示すように, 濃尾平野は深い基盤構造を有しており, 図1,2に前述したように, 比較的軟弱な地盤が厚く堆積している. 本章では, このような深い基盤構造に起因すると考えられる濃尾平野固有の地震動増幅特性について, 観測記録と地震動予測法⁹⁾を用いて推定を行い, 地震動を予測した事例を示す.

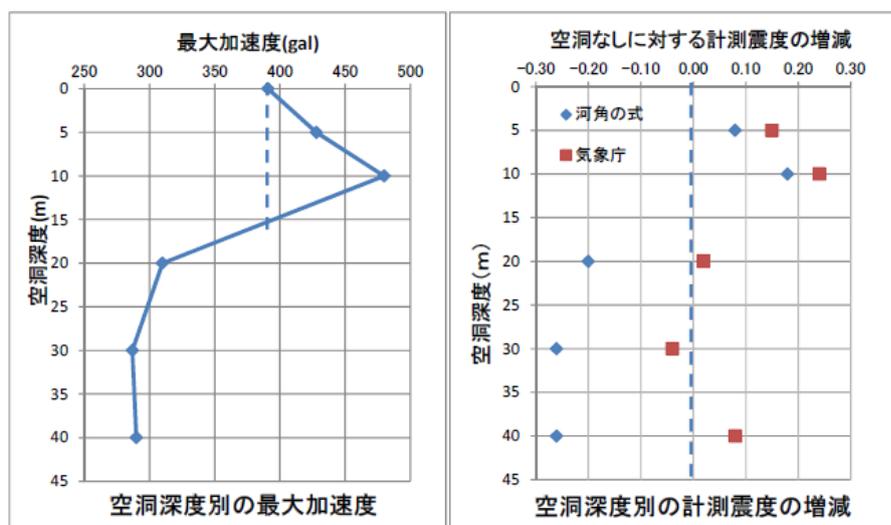


図4 垂炭抗空洞深度の違いによる最大加速度 (左) と計測震度 (右) の比較¹⁾

4.1 推定手法の概説

非定常性を有する地震動は、次式で表現できる。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{4\pi \cdot G_x(t, 2\pi f_k)} \cdot \Delta f \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (1)$$

ここに、 $G_x(t, \pi f_k)$ は時刻 $t = 0$ 、周波数 f_k における非定常パワースペクトル¹²⁾ ($\text{gal}^2/(\text{rad}/\text{sec})$)、 Δf は振動数の刻み幅、 ϕ_k は $t = 0$ における初期位相角 ($0 \sim 2\pi$ の一様乱数) である。

*Sugito et al.*⁹⁾ は、国内で観測された地震動記録、水平 118 成分を工学的基盤相当に変換した。これを基に、マグニチュード M と震源距離 R に対する、非定常パワースペクトルをモデル化した。さらに、断層の広がりや破壊伝播方向を考慮した大規模断層による非定常パワースペクトルを、小規模断層破壊の重ね合わせとして次式のように表現した。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f_k)} = \frac{\beta(f_k, M_0) \cdot N_G(M_0)}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{i,j}(t, 2\pi f_k)} \quad (2)$$

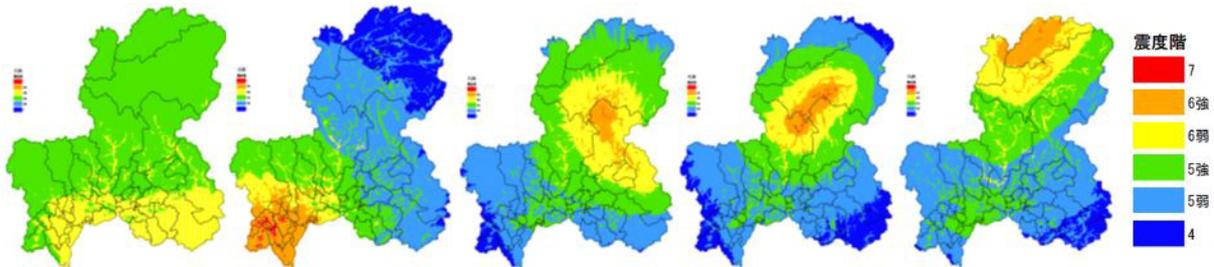
ここに、 $\sqrt{G_y(t, 2\pi f_k)}$ は $M=6$ 相当の非定常パワースペクトル ($\text{gal}^2/(\text{rad}/\text{sec})$)、 N_x, N_y は断層の長さ方向、幅方向の小断層分割数、 $N_G(M_0)$ は地震モーメント M_0 に対する、EMPR が対象とする全周波数帯 ($0.13\text{Hz} \sim 10.03\text{Hz}$) の平均的な非定常パワースペクトルの重ね合わせ数 (以下、本文では、「平均的な重ね合わせ数」と表記する)、 $\beta(f_k, M_0)$ は、周波数ごとに非定常パワースペクトルを補正する係数である。

式 (2) に示すように、EMPR では、モデル化された $M=6$ 相当の非定常パワースペクトルを、 $N_G(M_0)$ 、 $\beta(f_k, M_0)$ を用いて補正することで、所定の地震規模に対する非定常パワースペクトルを算出する。なお、 $N_G(M_0)$ と $M_0(\text{Nm})$ については、次式の関係がある⁹⁾。

$$\log N_G(M_0) = -13.02 + 0.4088 \log M_0 \quad (3)$$

前述の考えに基づき、ある地震の観測記録に対して、EMPR における $M=6$ 相当の非定常パワースペクトルに対する比率、すなわち、観測記録の持つ平均的な重ね合わせ数 $n_g(f_k)$ は、次式より算出できる。

$$n_g(f_k) = \frac{\int_0^T \sqrt{G_{obs}(t, 2\pi f_k)} df_k}{\int_0^T \sqrt{G_{x,M=6}(t, 2\pi f_k)} df_k} \quad (4)$$



(a) 南海トラフ (b) 養老-桑名-四日市断層帯 (c) 阿寺断層系 (d) 高山大原断層帯 (e) 跡津川断層

図6 海溝や断層で想定される地震の震度階分布の比較

ここに、 $\sqrt{G_{x,M=6}(t, 2\pi f_k)}$ は EMPR における、 $M=6$ 相当の非定常パワースペクトル、 $\sqrt{G_{obs}(t, 2\pi f_k)}$ は、観測記録より得られる非定常パワースペクトル、 T は観測記録長さ (sec) である。地域固有の地震動特性推定は、規模の異なる複数の地震により観測された、複数地点の地震動観測記録を使用する。EMPR における、等価な地震モーメント M'_0 は、式 (3) に基づき、次式で算出できる。

$$\log M'_0 = \frac{13.02 + \log \tilde{N}_G}{0.4088} \quad (5)$$

$$\tilde{N}_G = \frac{\sum_{i=1}^m n_{g,i}(f_k)}{m} \quad (6)$$

ここに、 m は用いた観測記録数である。 \tilde{N}_G は式 (6) に示すように、観測記録より得られる周波数軸上での平均値として、 $n_{g,i}(f_k)$ が算出される。すなわち、着目する地震における、地震の規模を考慮した補正パラメータ (式 (2) の $N_G(M_0)$ に相当) である。

式 (5)、(6) に基づき、 $M t_0$ における、EMPR の重ね合わせ数に対する、観測記録の重ね合わせ数の比 $\gamma_0(f_k)$ は、次式より得られる。

$$\gamma_0(f_k) = \frac{n_g(f_k)}{\beta(f_k, M'_0) \cdot N_G(M'_0)} \quad (7)$$

地域固有の地震動特性の補正係数 $\gamma(f_k)$ は、複数の地震、複数の観測記録より得られた $\gamma_0(f_k)$ の平均を用いる。ただし、 $\tilde{\gamma}_0(f_k)$ の高周波数領域では、ごく表層付近の地盤増幅の影響を受けていると考えられるため、 $\gamma(f_k)$ は、式 (8)、(9) により、高周波数領域を除外した係数として定義する。

$$\gamma(f_k) = \tilde{\gamma}_0(f_k)^{a(f_k)} \quad (8)$$

$$\gamma_0(f_k) = \begin{cases} 1.0 & f_k \leq 0.5 \text{ Hz} \\ 1.33 - 0.67f_k & 0.5 \text{ Hz} < f_k \leq 2.0 \text{ Hz} \\ 0.0 & f_k > 2.0 \text{ Hz} \end{cases} \quad (9)$$

以上の補正係数 $\gamma(f_k)$ を用いて、地域固有の地震動特性を考慮した地震動を算定する場合においては、 $\gamma(f_k)$ を式 (2) に加えた非定常パワースペクトルを用いて、式 (1) により加速度時刻歴を算出する。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f_k)} = \frac{\gamma(f_k) \cdot \beta(f_k, M_0) \cdot N_G(M_0)}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f_k)} \quad (10)$$

4.2 濃尾平野における地震動増幅特性

図 9 に、紀伊半島沖地震 (2004.9.5, $M7.1$)、東海道沖地震 (2004.9.5, $M7.4$)、能登半島地震 (2007.3.25, $M6.9$)、東北地方太平洋沖地震 (2011.3.11, $M9.0$) の地震に対して、重ね合わせ数を比較した結果を示す。

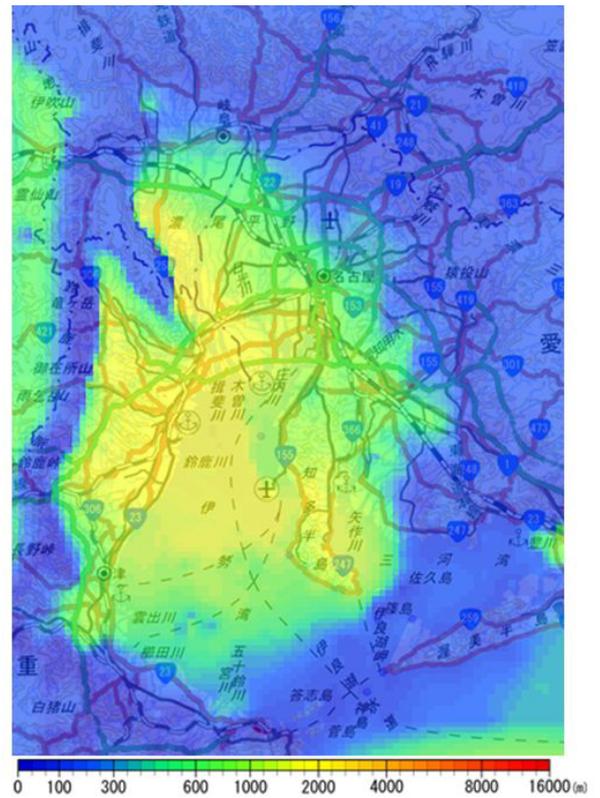


図 7 濃尾平野と周辺の地震基盤震度分布¹¹⁾

なお、地震ごとの比較を容易にするため、観測記録は水平 2 成分の平均値で示し、図中の縦軸は、EMPR の重ね合わせ数に対する観測記録の重ね合わせ数の比で示した。また、図 9 中の黒線で示した東海地方の平均値は、濃尾平野を含む、東海地方とその周辺の K-NET 観測点より算出した値である。この平均値は、EMPR モデルの重ね合わせ数 (図 9 の 1.0)、すなわち、過去の強震記録に基づいた平均的な地震動特性に対する違いであり、当該地震の平均的な地震動特性を現していると考えられる 11)。EMPR モデルの重ね合わせ数、ならびに黒線の平均的な地震動特性と着目地域の違いを比較することで、他の観測記録と異なる、地域特有と思われる傾向を確認することができる。

図より、青で示す濃尾平野内の地点においては、観測地点によって重ね合わせ数の比にばらつきが見られるが、概ね 0.2~0.6Hz 付近の卓越が共通していることが確認できる。なお、図 9(d) の東北地方太平洋沖地震は、他の地震 (図 9(a)~(c)) と概ね同様の傾向を示すが、その比率は小さな傾向を示した。

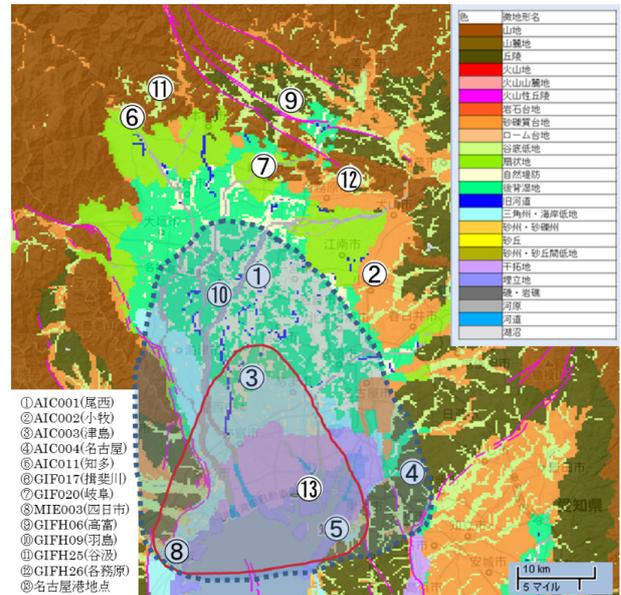
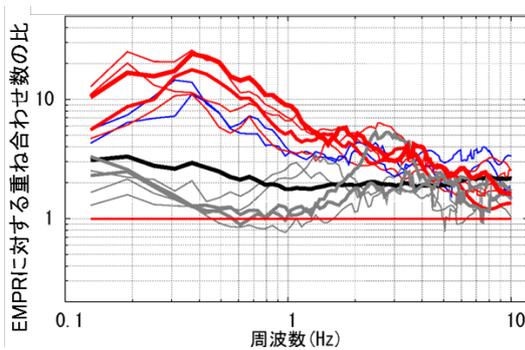
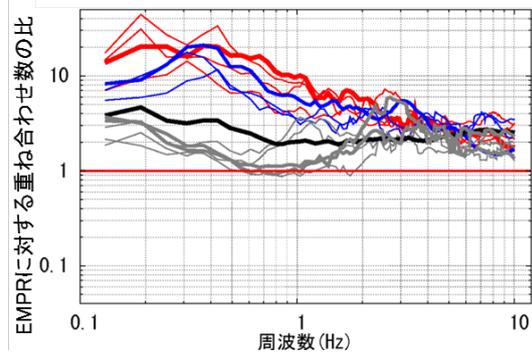


図 8 濃尾平野の地形区分と観測点分布 (J-SHIS に加筆)

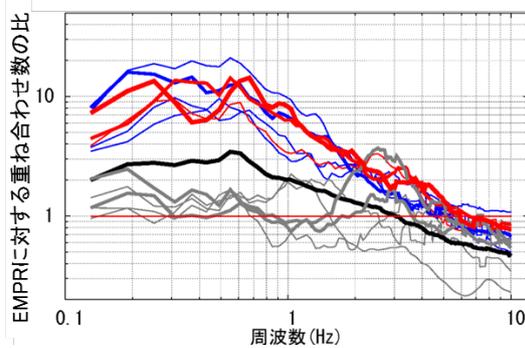
これらの観測地点は東北地方太平洋沖地震の震源



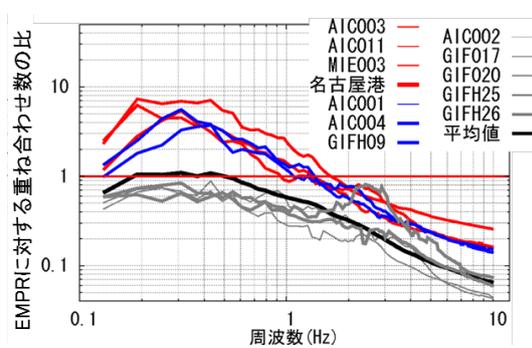
(a) 2004 年 紀伊半島沖地震



(b) 2004 年 東海道沖地震



(c) 2007 年 能登沖地震



(d) 2011 年 東日本太平洋沖地震

図 9 濃尾地震における重ね合わせ数の比較

域から 500km 以上離れており、EMPR の適用範囲外であるため、平均的な地震動の特性に正しく評価できていない可能性はあるが、図 9(a)~(c) と同様に、周波数軸上での相対的な卓越の傾向が認められる。

以上の考察結果より濃尾平野固有の地震動特性を推定し、名古屋港地点の地震動を算定した結果を示す。図 10 に濃尾平野の地震動特性を、補正係数として示した。補正係数は 4.1 で前述したように、観測波形の平均値より、式 (8), (9) を用いて高周波数領域を除外した補正係数を用いた。補正係数の算定では、後述の地震動算定で使用することを考慮して、想定地震と地震波の伝播経路が等しいと考えられる図 9(a) の紀伊半島沖地震、図 9(b) の東海道沖地震を使用した。両地震の重ね合わせ数より、図 9 中の赤・青線で示した観測記録の平均値を用いた。

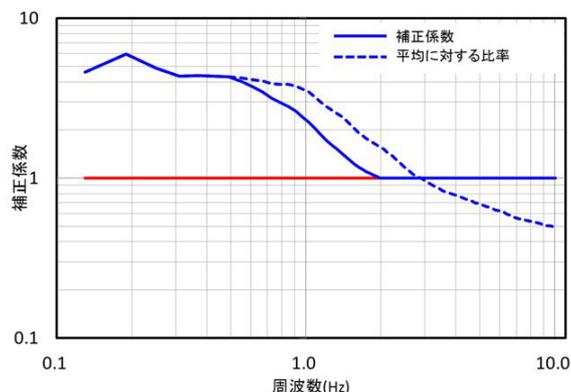
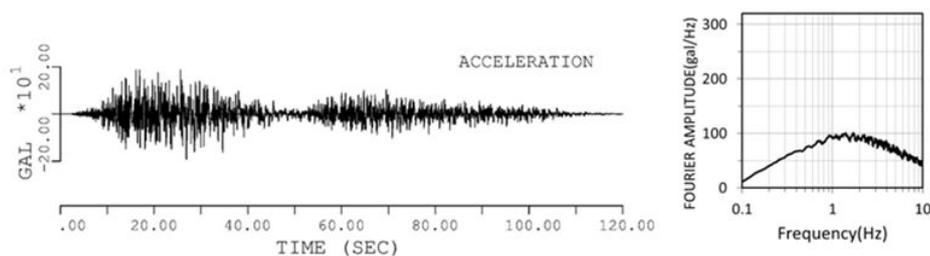
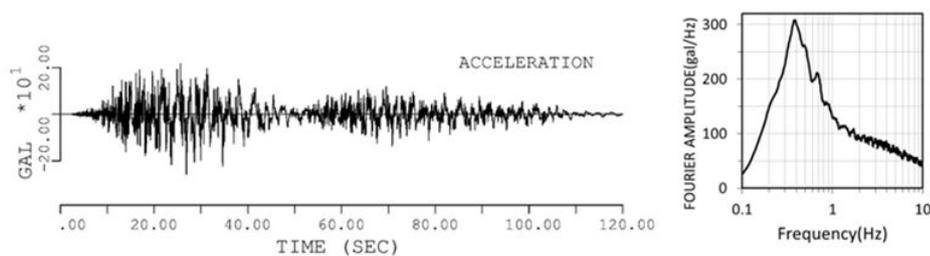


図 10 濃尾平野における地震動補正係数

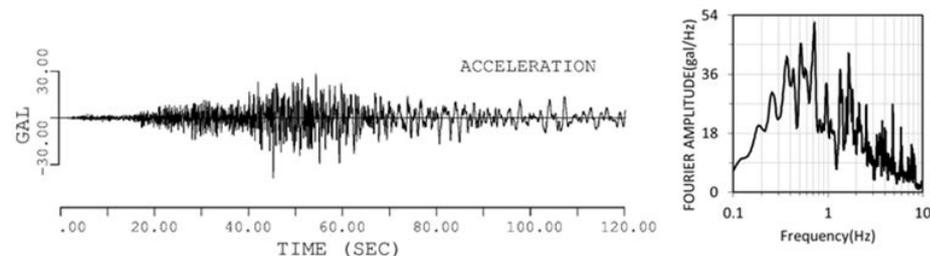
図 11 に、図 10 の補正係数を適用した地震動算定結果を示す。想定地震は複合型東海地震 (東海・東南



(a) EMPR による地震動算定結果 (基盤波形)



(b) 濃尾平野の地震動特性補正した結果 (基盤波形)



(c) 東海道沖地震の観測記録 (EW 成分, 地表波形)

図 11 名古屋港地点における地震動算定結果の比較 (想定地震：複合型東海地震)

海の連動型地震)として、断層パラメータは、中央防災会議¹⁴⁾、地震調査研究推進本部¹⁵⁾の断層モデルを基に、筆者ら¹⁶⁾が設定した断層モデルを使用した。比較のため、EMPRによる地震動算定結果(図11(a))と、名古屋港地点で観測された、東海道沖地震の観測波形(図11(c))を示す。図10に前述したように、2Hz以上の周波数では地震動特性の補正は行わないため、2Hz以上のフーリエ振幅は図11(a),(b)同じである。図10の補正係数により、1Hz未満のフーリエ振幅が増大しており、図11(c)の観測波形に見られる、0.5Hz付近のピークも見られる。前述したように、伝播経路の違いについて注意する必要があるが、南海トラフで発生する海溝型地震を対象とした地震動予測においては、図10の補正係数を用いることで、濃尾平野固有の地震動特性を考慮した地震動を算定することができた。なお、中小地震では長周期成分の卓越が見られないため、地震動特性の推定においては比較的規模の大きな地震による観測記録が必要である。さらに、図9に前述した地震ごと、地点ごとのばらつきについては、伝播経路特性の影響や表面波などの後続波の影響が考えられるため、より正確な地震動特性推定を行うには、いくつか検討が必要と思われる。

5. おわりに

本報では、岐阜県の地震被害想定調査¹⁾におけるメッシュ地盤データベースと地震動予測結果について紹介した。岐阜県内の地震動予測事例として、3.では、岐阜県地震被害想定調査で想定された5地震の地震動予測結果と、垂炭抗廃坑の地震動増幅特性について概説した。4.では、濃尾平野特有の地震動増幅特性に関して、筆者らが検討した事例について紹介した。

参考文献

1. 岐阜県, 平成 23~24 年度, 岐阜県南海トラフの巨大地震等被害想定調査報告書, 2013.
2. 国土地盤情報検索サイト, KuniJiban, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>
3. 防災科学技術研究所, 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>
4. 岐阜県, 岐阜県地震被害想定調査報告書, 1998.
5. 内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 強震断層モデル編 強震断層モデルと震度分布について, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report05.pdf
6. 内閣府中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」(第 26 回), 中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布等の検討資料集, 2006.
7. 岐阜県, 岐阜県東海地震等被害想定調査, 2003.
8. 早稲田大学理工学総合研究センター, 御嵩町垂炭鉋廃坑の危険度予測, 垂炭鉋廃坑の危険度に関する調査研究会, 2007.
9. Sugito, M., Furumoto, Y., and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.2111, 2000.
10. 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫, 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤震動解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58, 1994.
11. 久世益充, 杉戸真太, 地域固有の長周期地震動特性を考慮した地震動算定法の検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学) Vol.69, No4 地震工学論文集第 32 巻, pp.I-291-I.297, 2013.
12. 亀田弘行, 強震地震動の非常常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第 235 号, pp.55-62, 1977.
13. 古本吉倫, 杉戸真太, 梅原秀哲, 非常常スペクトル合成法による 1995 年兵庫県南部地震における強震動の推定, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.573-578, 2002.
14. 中央防災会議, 東海地震に関する専門調査会, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/>
15. 地震調査研究推進本部, 南海トラフの地震を想定した強震動評価手法について(中間報告) <http://jishin.go.jp/main/kyoshindo/01b/hyoka.pdf>
16. 久世益充, 杉戸真太, 能島暢呂, 南海トラフの巨大地震を想定した広域震度予測, 自然災害科学, Vol.22, No.1, pp.87-99, 2003.