



関東地方の揺れやすさ分布特性

栗田哲史¹⁾、高橋聡²⁾、安中正³⁾

1) 正会員 東電設計株式会社、博士 (工学)

e-mail : kurita@tepsco.co.jp

2) 東京電力株式会社

e-mail : takahasi.satoru@tepcoco.jp

3) 正会員 東電設計株式会社

e-mail : annaka@tepsco.co.jp

要約

本研究は、各種機関の地震観測網によって観測された記録を用いて、関東地方における揺れやすさの空間的分布特性について検討したものである。揺れやすさの空間的分布特性は、観測記録と経験的に得られる平均的な地震動強さとの差異として抽出した。ここで、地震動強さとしてはPGA、PGV、計測震度の3種類を対象としている。72地震の観測記録を用いて統計的処理により検討した結果、PGVと計測震度の空間的分布特性については、表層地盤の増幅特性の影響を強く反映していることが分かった。また、いずれの地震動強さ指標の空間的分布特性にも、表層地盤の増幅特性だけでなく、震源特性や伝播経路特性などが影響していることが明らかになった。

キーワード： 地震動強さ、空間分布特性、強震観測網、地盤増幅、関東地方

1. はじめに

本邦では、最近5年ほどの間に気象庁によって命名された被害地震に限っても、2004年新潟県中越地震 ($M_j6.8$)、2007年能登半島地震 ($M_j6.9$)、2007年中越沖地震 ($M_j6.8$)、2008年岩手・宮城内陸地震 ($M_j7.2$) などが発生している。これら頻繁な被害地震の発生は、改めて日本列島の地震活動が活発であることを思い起こさせる。これらの被害地震に見られる特徴は、ライフラインへの被害が大きく、これが市民生活や経済活動に支障を来すような負の影響を長期間に渡って及ぼしていることである。現在、地震災害時における企業の事業継続の必要性が唱えられている¹⁾中で、ライフラインの復旧戦略の重要性は益々高まっていると言える。そのような状況の中で、首都圏を含む関東地方では、1923年関東地震 ($M_j7.9$) 以降、大きな被害地震は発生しておらず、迫り来る首都圏直下地震への懸念が高まっている。以上のような背景から、関東地方の地震動特性を明らかにすることは、同地域の防災上関心の高いところである。また、企業等が事業継続計画を立案する場合、ライフラインの復旧想定が主要な前提条件の一つとなり得る。電力設備の被害については、これまでの経験から被害数量の大半は配電設備が占めることが分かっている²⁾。電力設備の中でも、とりわけ配電設備に関しては、地震動の強さが被害量に直結することから^{例えは³⁾}、各地域特有の地盤の揺れやすさを把握しておくことは、防災戦略上大きな課題である。

一方、地震の観測体制に関しては、気象庁の震度観測網に加え、防災科学技術研究所のK-NET及び

KiK-netの整備などにより、国土全域における地震動の空間的な分布が捉えられるようになってきた。現在、約20km間隔で2,000以上の観測点が国土をカバーしている。

そこで、本研究では地震動強さとしてPGA、PGV、計測震度の3種類を対象とし、各種機関によって観測された地震記録の空間的分布性状を調べて、関東地方の揺れやすさの空間的特性について検討する事を目的とする。

観測記録に基づく関東地方の揺れやすさに関する既存の研究としては、神田・武村⁴⁾が震度分布に関する検討を行い、表層地形区分との比較から、表層堆積層の厚さと揺れやすさとの対応が考えられると指摘している。本研究では、計測震度だけでなくPGAやPGVにも対象を広げ、更に、具体的な表層地盤の増幅率との比較を行って、関東地方の揺れやすさを把握しようとするものである。また、各地震動強さ指標間の比較も行い、指標毎の空間分布特性についても考察した。

2. 観測地震データ

2.1 対象地震

解析対象の地震は、各機関の観測体制が充分整備された時期以降の期間に発生したものとした。基本的に1997年～2007年3月に関東地方近辺で発生した気象庁マグニチュード (M_j) 5以上の地震とした。しかし、南関東については M_j 5以上の地震が少ない事から4.5以上にまで基準を下げた。また、内陸部のデータ不足を補うために、2004年新潟県中越地震とその余震群 (16地震)、2007年新潟県中越沖地震とその最大余震を対象に加えた。解析の対象とした計72地震の震央分布図を図1に示す。また、気象庁カタログ⁵⁾に基づく地震諸元一覧を表1に示す。

2.2 地震観測網

本検討では、気象庁 (JMA) 震度観測網、K-NET、KiK-net、東京ガス (SUPREME)、東京電力 (TEPCO) 地震観測網の5観測網を使用した。本検討で使用した各観測網の観測点分布図を図2に示す。SUPREMEについては都心部で高密度に集中している。一方、それ以外については各機関の観測網を合わせると、観測点はほぼ均等に関東地方をカバーしている。利用可能な観測点数は地震毎に異なるが、本検討で使用した観測網毎の最大観測点数は、それぞれJMA : 110、K-NET : 204、KiK-net : 121、SUPREME : 3947、TEPCO : 34である。

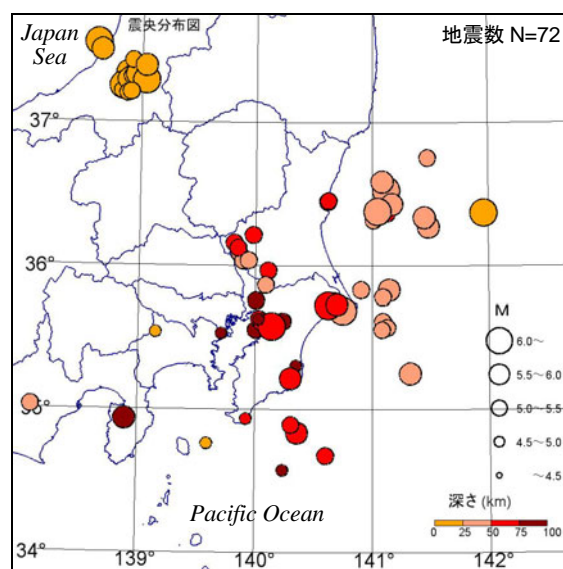
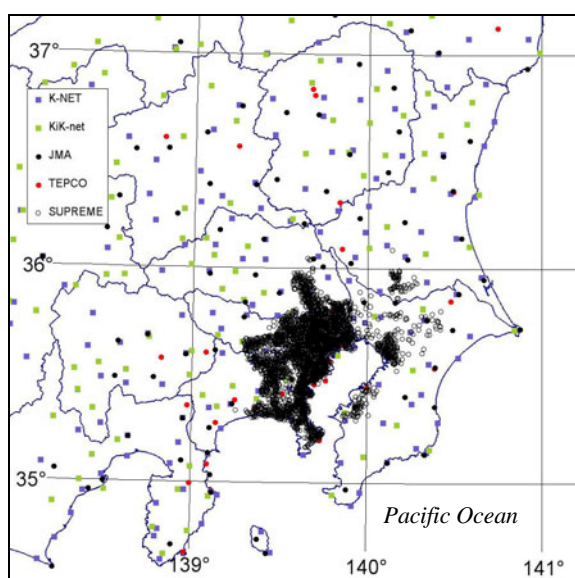


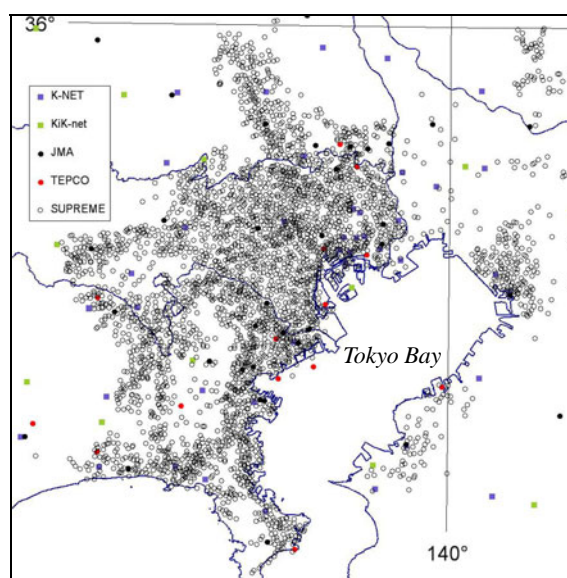
図1 対象地震の震央分布図

表1 対象地震諸元一覧

| EQ. No. | Origin Time | | Epicenter | | Depth (km) | M _j |
|---------|-------------|-------------|-----------------|------------------|------------|----------------|
| | Date | Time | Latitude (deg.) | Longitude (min.) | | |
| 01 | 1997/03/23 | 14:58:55.18 | 35 58.12 | 140 06.62 | 71 | 5.1 |
| 02 | 1997/09/08 | 08:40:38.47 | 35 33.48 | 140 00.32 | 109 | 5.1 |
| 03 | 1998/01/14 | 02:17:07.88 | 35 36.99 | 140 14.17 | 78 | 5.0 |
| 04 | 1998/01/16 | 10:57:55.61 | 35 13.17 | 140 19.35 | 53 | 4.7 |
| 05 | 1998/04/26 | 12:21:45.08 | 34 34.63 | 140 14.27 | 97 | 4.7 |
| 06 | 1998/05/16 | 03:45:05.56 | 34 56.28 | 139 55.55 | 73 | 4.8 |
| 07 | 1998/08/29 | 08:46:42.35 | 35 37.98 | 140 01.96 | 65 | 5.3 |
| 08 | 1999/03/26 | 08:31:09.38 | 36 27.04 | 140 37.13 | 59 | 5.0 |
| 09 | 1999/04/25 | 21:27:02.95 | 36 27.36 | 140 37.52 | 59 | 5.2 |
| 10 | 1999/09/13 | 07:56:46.82 | 35 35.86 | 140 09.79 | 76 | 5.1 |
| 11 | 2000/06/03 | 17:54:47.70 | 35 41.39 | 140 44.99 | 48 | 6.1 |
| 12 | 2000/07/21 | 03:39:18.60 | 36 31.76 | 141 07.32 | 49 | 6.4 |
| 13 | 2000/07/21 | 14:16:33.91 | 35 15.17 | 141 19.50 | 37 | 5.7 |
| 14 | 2000/08/19 | 21:41:28.33 | 36 16.46 | 141 29.02 | 46 | 5.5 |
| 15 | 2000/09/29 | 08:56:08.89 | 35 32.02 | 139 42.58 | 86 | 4.6 |
| 16 | 2000/12/05 | 01:47:34.57 | 35 50.07 | 141 08.75 | 35 | 5.5 |
| 17 | 2001/02/25 | 14:05:31.98 | 34 45.88 | 139 35.55 | 23 | 4.5 |
| 18 | 2001/04/03 | 23:57:12.43 | 35 01.45 | 138 05.84 | 30 | 5.3 |
| 19 | 2001/04/10 | 10:03:59.40 | 35 18.46 | 140 21.06 | 99 | 4.6 |
| 20 | 2001/04/17 | 09:39:54.45 | 35 37.02 | 141 05.53 | 38 | 5.0 |
| 21 | 2001/05/25 | 15:55:04.54 | 35 45.55 | 140 40.16 | 47 | 5.0 |
| 22 | 2001/07/20 | 06:02:36.23 | 36 09.72 | 139 48.95 | 55 | 5.0 |
| 23 | 2001/09/04 | 23:54:39.41 | 36 45.41 | 141 28.58 | 42 | 5.3 |
| 24 | 2001/12/08 | 04:07:39.75 | 35 32.48 | 139 08.94 | 24 | 4.6 |
| 25 | 2002/02/11 | 10:09:53.75 | 35 47.17 | 141 05.55 | 35 | 5.2 |
| 26 | 2002/02/12 | 22:44:37.93 | 36 35.38 | 141 05.16 | 48 | 5.7 |
| 27 | 2002/06/14 | 11:42:49.32 | 36 12.98 | 139 58.83 | 57 | 5.1 |
| 28 | 2002/10/16 | 13:04:34.20 | 35 50.12 | 140 54.37 | 34 | 5.0 |
| 29 | 2002/10/21 | 01:06:01.13 | 36 22.14 | 141 07.61 | 50 | 5.4 |
| 30 | 2003/03/13 | 12:12:58.00 | 36 05.41 | 139 51.54 | 47 | 5.0 |
| 31 | 2003/04/08 | 03:28:35.01 | 36 22.41 | 141 57.61 | 24 | 6.0 |
| 32 | 2003/05/12 | 00:57:06.08 | 35 52.13 | 140 05.34 | 47 | 5.3 |
| 33 | 2003/05/17 | 23:33:10.79 | 35 44.31 | 140 39.24 | 47 | 5.3 |
| 34 | 2003/09/20 | 12:54:52.20 | 35 13.13 | 140 18.22 | 70 | 5.8 |
| 35 | 2003/10/15 | 16:30:35.79 | 35 36.82 | 140 03.19 | 74 | 5.1 |
| 36 | 2003/11/15 | 03:43:51.64 | 36 25.95 | 141 10.11 | 48 | 5.8 |
| 37 | 2003/11/23 | 07:00:20.02 | 35 34.50 | 141 07.60 | 39 | 5.1 |
| 38 | 2004/03/11 | 11:34:57.57 | 36 19.32 | 141 00.49 | 48 | 5.3 |
| 39 | 2004/07/17 | 15:10:18.17 | 34 50.29 | 140 21.36 | 69 | 5.5 |
| 40 | 2005/02/16 | 04:46:36.13 | 36 02.31 | 139 53.33 | 46 | 5.3 |
| 41 | 2005/04/11 | 07:22:15.63 | 35 43.61 | 140 37.27 | 52 | 6.1 |
| 42 | 2005/05/19 | 10:14:26.28 | 35 33.56 | 141 04.92 | 33 | 5.4 |
| 43 | 2005/06/20 | 01:15:14.20 | 35 44.03 | 140 41.68 | 51 | 5.6 |
| 44 | 2005/07/23 | 16:34:56.32 | 35 34.90 | 140 08.31 | 73 | 6.0 |
| 45 | 2005/07/28 | 19:15:35.01 | 36 07.57 | 139 50.78 | 51 | 5.0 |
| 46 | 2005/08/08 | 00:06:43.81 | 36 20.37 | 141 26.74 | 46 | 5.6 |
| 47 | 2005/10/16 | 16:05:42.60 | 36 02.36 | 139 56.25 | 47 | 5.1 |
| 48 | 2005/10/19 | 20:44:42.68 | 36 22.90 | 141 02.59 | 48 | 6.3 |
| 49 | 2006/02/01 | 20:35:53.06 | 35 45.66 | 140 00.22 | 101 | 5.1 |
| 50 | 2006/04/11 | 17:46:05.13 | 34 40.77 | 140 35.95 | 66 | 5.0 |
| 51 | 2006/08/31 | 17:18:18.69 | 35 37.93 | 140 01.49 | 76 | 4.8 |
| 52 | 2006/10/14 | 06:38:01.68 | 34 53.69 | 140 18.29 | 64 | 5.1 |
| 53 | 2007/01/16 | 03:17:57.75 | 34 56.29 | 138 53.50 | 175 | 5.8 |
| 54 | 2004/10/23 | 17:56:00.30 | 37 17.55 | 138 52.03 | 13 | 6.8 |
| 55 | 2004/10/23 | 17:59:37.66 | 37 18.76 | 138 51.35 | 16 | 5.3 |
| 56 | 2004/10/23 | 18:03:12.65 | 37 21.24 | 138 59.00 | 9 | 6.3 |
| 57 | 2004/10/23 | 18:07:30.95 | 37 20.89 | 138 51.90 | 15 | 5.7 |
| 58 | 2004/10/23 | 18:11:56.77 | 37 15.18 | 138 49.77 | 12 | 6.0 |
| 59 | 2004/10/23 | 18:34:05.69 | 37 18.38 | 138 55.80 | 14 | 6.5 |
| 60 | 2004/10/23 | 18:36:50.92 | 37 15.33 | 138 56.47 | 7 | 5.1 |
| 61 | 2004/10/23 | 18:57:26.28 | 37 12.38 | 138 51.81 | 8 | 5.3 |
| 62 | 2004/10/23 | 19:36:45.99 | 37 13.02 | 138 49.46 | 11 | 5.3 |
| 63 | 2004/10/23 | 19:45:57.19 | 37 17.74 | 138 52.57 | 12 | 5.7 |
| 64 | 2004/10/23 | 23:34:45.66 | 37 19.02 | 138 54.35 | 20 | 5.3 |
| 65 | 2004/10/25 | 00:28:08.93 | 37 12.15 | 138 52.24 | 10 | 5.3 |
| 66 | 2004/10/25 | 06:04:57.57 | 37 19.80 | 138 56.81 | 15 | 5.8 |
| 67 | 2004/10/27 | 10:40:50.24 | 37 17.51 | 139 02.00 | 12 | 6.1 |
| 68 | 2004/11/01 | 04:35:49.15 | 37 12.71 | 138 54.05 | 8 | 5.0 |
| 69 | 2004/11/04 | 08:57:29.53 | 37 25.82 | 138 54.94 | 18 | 5.2 |
| 70 | 2004/11/08 | 11:15:58.55 | 37 23.76 | 139 01.92 | 0 | 5.9 |
| 71 | 2007/07/16 | 10:13:22.55 | 37 33.41 | 138 36.57 | 17 | 6.8 |
| 72 | 2007/07/16 | 15:37:40.41 | 37 30.24 | 138 38.67 | 23 | 5.8 |



(1) 対象領域全域



(2) 中心部の拡大

図2 観測点の分布図

2.3 観測値

殆どの観測網では加速度時刻歴が得られているため、解析では各観測地点の地表で観測された3成分の加速度時刻歴を使用した。PGVについては、加速度時刻歴を数値積分したものをを使用した。この時、加速度時刻歴データに対して0.1Hzのハイパス・フィルター処理を施している。但し、SUPREMEでは、PGVデータが得られないために対象外とした。一方、同観測網では水平の最大加速度とSI値のみが利用可能であるため、計測震度についてはそれらを活用し、童等⁶⁾の提案する関係式(1)を用いて推定した値を使用した。

$$I_{JMA} = 1.68 + 1.29 \cdot \log[SI] + 0.69 \cdot \log[PGA] \quad (1)$$

ここで、 I_{JMA} ：計測震度、 SI ：SI値 (cm)、 PGA ：地表最大加速度 (cm/s^2)、である。なお、SUPREME以外の観測網で得られた観測記録については、気象庁の定める算出方法⁷⁾に則って3成分の加速度時刻歴より計測震度を求めた。

本研究で着目した地震動強さの指標のうちPGAとPGVについては、地表における水平2成分の最大値の平均値とした。観測記録の分析に用いた全データに関する地震動強さのレベル毎の度数分布図を図3に示す。PGAとPGVについては、弱震動である程データ数が多くなる傾向が見られる。計測震度については、震度II～III付近にデータ数のピークを有する山形の分布形状を示している。

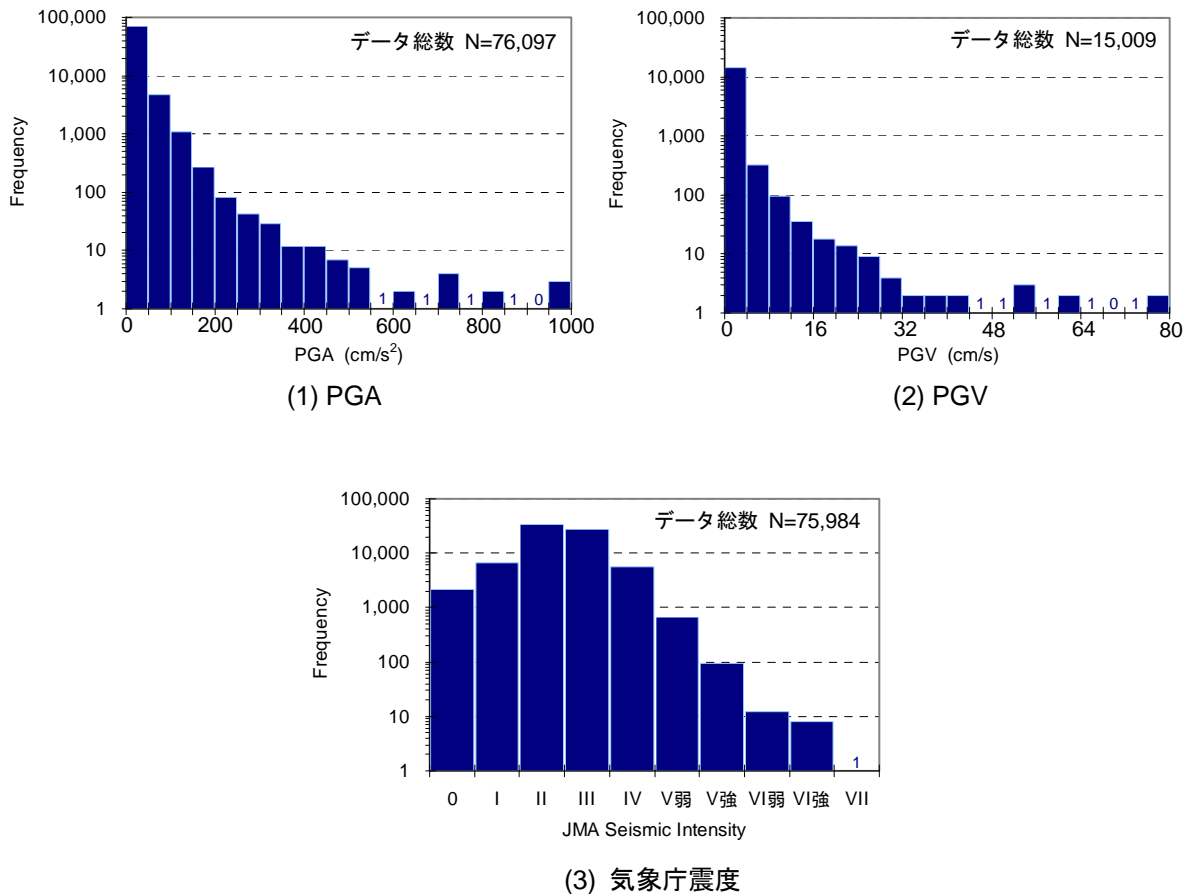


図3 観測値の度数分布

3. 空間分布特性の解析

3.1 観測値の補間

観測点は空間的に不規則に分布するため、データを非線形最小二乗法により空間補間して格子状のデータとした。空間補間の手法には塩野 等⁸⁾の手法を用いた。二次元平面空間における $N_x \times N_y$ 個の格子データを未知変数 $\mathbf{f} = \{f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{N_x N_y}\}$ と表すと、最適化問題の目的関数は、次式の通りとなる。

$$J(\mathbf{f}) = w_1 \cdot J_1(\mathbf{f}) + w_2 \cdot J_2(\mathbf{f}) \quad (2)$$

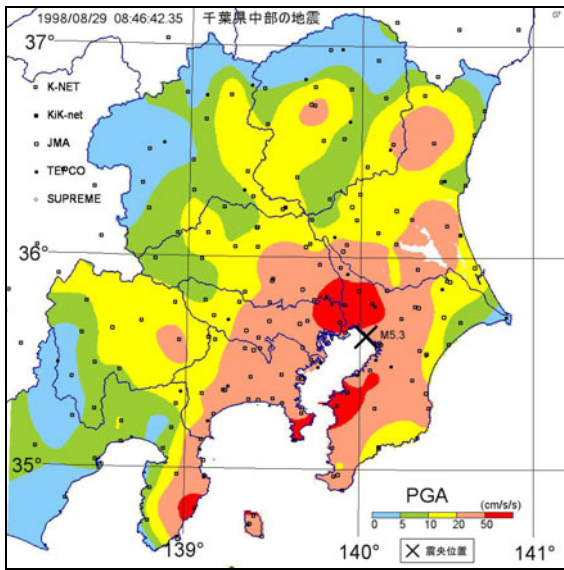
ここで、 $J_1(\mathbf{f})$: 隣接格子間の差 (1 次の導関数) のノルム、 $J_2(\mathbf{f})$: 隣接格子間の差の変化量 (2 次の導関数) のノルム、 w_1 と w_2 は重み係数、を表している。式(2)は離散化データ \mathbf{f} で表された曲面の平滑度を評価する。式(2)の目的関数を次式の制約条件の下で最適解 $\hat{\mathbf{f}}$ を求めることにより、滑らかな格子状の補間データが得られる。式(3)は線形補間を利用して、観測値を対応する格子セル 4 隅の格子点で近似している。

$$(1 - \varepsilon_k)(1 - \eta_k) \cdot f_{i(k),j(k)} + (1 - \varepsilon_k) \cdot \eta_k \cdot f_{i(k),j(k)+1} + \varepsilon_k \cdot (1 - \eta_k) \cdot f_{i(k)+1,j(k)} + \varepsilon_k \cdot \eta_k \cdot f_{i(k)+1,j(k)+1} = z_k \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

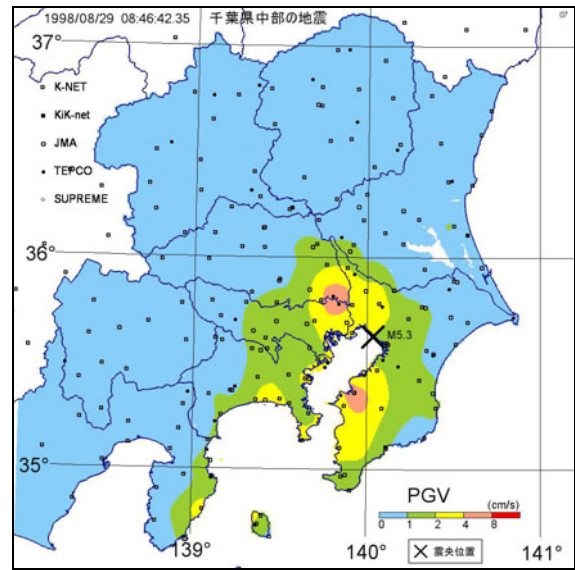
ここで、 z_k : 観測値である。なお、 x 軸方向と y 軸方向の格子刻みを、それぞれ Δx 、 Δy とすると、 $\varepsilon_k = (x_k - x_{i(k)})/\Delta x$ 、 $\eta_k = (y_k - y_{j(k)})/\Delta y$ である。また、 i 、 j は格子番号を表す。

表 2 各地震の補間処理に使用した観測点数

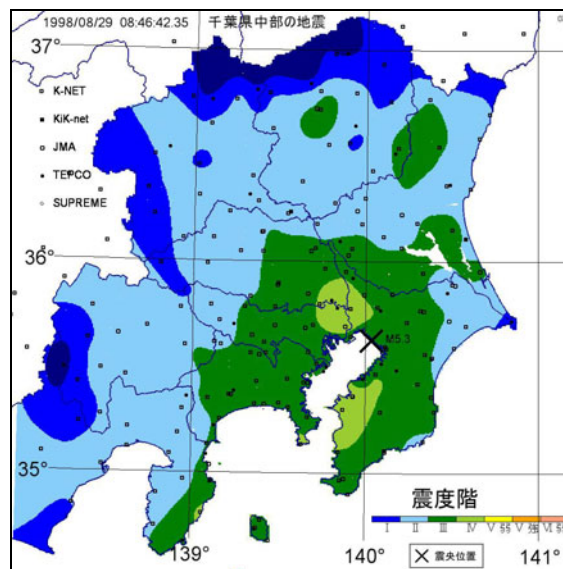
| EQ. No. | PGA | PGV | JMA Instrumental Seismic Intensity | EQ. No. | PGA | PGV | JMA Instrumental Seismic Intensity |
|---------|-------|-----|------------------------------------|---------|-------|-----|------------------------------------|
| 01 | 134 | 134 | 134 | 37 | 99 | 99 | 99 |
| 02 | 172 | 172 | 172 | 38 | 1,373 | 176 | 1,344 |
| 03 | 110 | 110 | 110 | 39 | 2,788 | 284 | 2,782 |
| 04 | 76 | 76 | 76 | 40 | 3,643 | 370 | 3,640 |
| 05 | 31 | 31 | 31 | 41 | 3,518 | 369 | 3,517 |
| 06 | 94 | 94 | 94 | 42 | 1,238 | 128 | 1,226 |
| 07 | 210 | 210 | 210 | 43 | 3,709 | 320 | 3,708 |
| 08 | 132 | 132 | 132 | 44 | 3,897 | 444 | 3,896 |
| 09 | 189 | 189 | 189 | 45 | 3,396 | 325 | 3,389 |
| 10 | 147 | 147 | 147 | 46 | 210 | 210 | 210 |
| 11 | 201 | 201 | 201 | 47 | 3,383 | 312 | 3,376 |
| 12 | 265 | 265 | 265 | 48 | 3,517 | 356 | 3,513 |
| 13 | 43 | 43 | 43 | 49 | 3,820 | 358 | 3,812 |
| 14 | 78 | 78 | 78 | 50 | 109 | 109 | 109 |
| 15 | 109 | 109 | 109 | 51 | 4,161 | 312 | 4,161 |
| 16 | 126 | 126 | 126 | 52 | 4,148 | 301 | 4,148 |
| 17 | 53 | 53 | 53 | 53 | 4,253 | 306 | 4,253 |
| 18 | 115 | 115 | 115 | 54 | 3,121 | 413 | 3,119 |
| 19 | 123 | 123 | 123 | 55 | 204 | 204 | 204 |
| 20 | 65 | 65 | 65 | 56 | 323 | 323 | 323 |
| 21 | 65 | 65 | 65 | 57 | 179 | 179 | 179 |
| 22 | 234 | 234 | 234 | 58 | 294 | 294 | 294 |
| 23 | 124 | 124 | 124 | 59 | 388 | 388 | 388 |
| 24 | 108 | 108 | 108 | 60 | 158 | 158 | 158 |
| 25 | 97 | 97 | 97 | 61 | 158 | 158 | 158 |
| 26 | 224 | 224 | 224 | 62 | 169 | 169 | 169 |
| 27 | 239 | 239 | 239 | 63 | 254 | 254 | 254 |
| 28 | 54 | 54 | 54 | 64 | 236 | 236 | 236 |
| 29 | 149 | 149 | 149 | 65 | 212 | 212 | 212 |
| 30 | 264 | 264 | 264 | 66 | 293 | 293 | 293 |
| 31 | 115 | 115 | 115 | 67 | 2,850 | 389 | 2,847 |
| 32 | 2,154 | 307 | 2,153 | 68 | 144 | 144 | 144 |
| 33 | 1,970 | 213 | 1,960 | 69 | 146 | 146 | 146 |
| 34 | 2,435 | 349 | 2,431 | 70 | 238 | 238 | 238 |
| 35 | 2,660 | 304 | 2,654 | 71 | 4,121 | 445 | 4,121 |
| 36 | 1,991 | 277 | 1,983 | 72 | 259 | 259 | 259 |



(1) PGA



(2) PGV



(3) 気象庁震度階

図4 観測値 (EQ.07) の補間例

本検討で対象とする領域は、東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県、茨城県、栃木県、群馬県、山梨県、静岡県東部の1都8県の行政区とした。格子には標準3次メッシュを縦横2等分割した小メッシュ（以降4次メッシュと称する）を使用した。4次メッシュのサイズは、東西方向の幅22.5"、南北方向は15"となる。なお、対象領域縁部付近の精度を確保するために、補間処理域は分析対象領域よりやや広めの北緯34.5°～37.5°、東経138°～141°の範囲とした。地震ごとの補間処理に用いた観測点数を表2に示す。

空間補間処理の一例として、地震番号：EQ.07の「千葉県中部の地震」の観測記録に対する、3種類の地震動強さ指標の分布図を図4に示す。図中のクロス印は震央の位置を表している。基本的に震央からの距離に応じて地震動強さが減少しているが、局所的に周囲より大きくなる箇所や逆に小さくなる場所が見られ、地震動強さの分布に空間的特性が有ることが明瞭である。図中の静岡県に関して、富士川以西の地域には観測点が殆ど無いことが見てとれる。このような地域は補間計算の精度が期待できないことから、以降の空間分布特性算出の過程では対象から除外している。

3.2 空間分布特性の抽出

地震動強さの空間的な分布特性は、基準となる平均的な地震動強さとの差異として求めることとした。この差異を多くの地震に対して求め、それを平均化することにより揺らぎ成分を取り除き、空間的な地震動強さのトレンド成分を抽出した。関東地方の平均的な地震動強さとして、同地域の観測記録をデータベースとして作成されたAnnaka & Nozawa⁹⁾の提案する距離減衰式で得られる値を使用した。距離減衰式を次に示す。

$$\log[A] = C_m \cdot M_J + C_h \cdot H - C_d \cdot \log[D] + C_0 \quad (4)$$

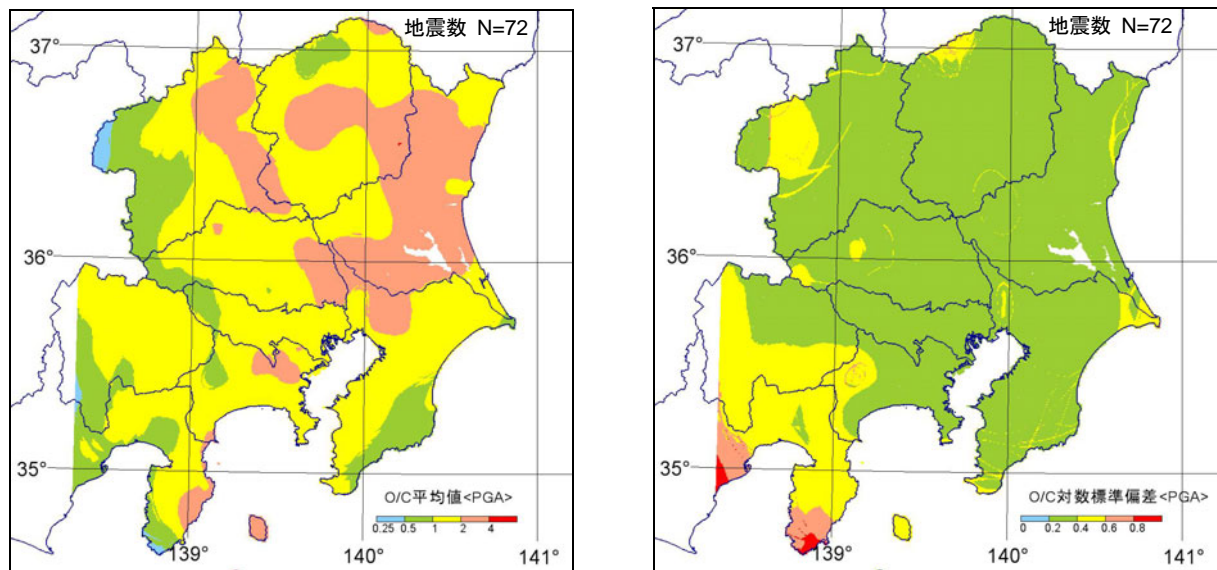
$$D = R + 0.35 \cdot \exp(0.65 \cdot M_J)$$

ここで、 A ：工学的基盤上 ($V_s \geq 300\text{m/s}$) の地震動強さ（最大加速度、最大速度、減衰定数 5% の加速度応答スペクトル）、 M_J ：気象庁マグニチュード、 H ：震源断層中心の深さ (km)、 R ：震源断層からの最短距離 (km)、 $\{C_m, C_h, C_d, C_0\}$ ：回帰係数、である。式(4)の距離減衰式を回帰するために使用された地震データのマグニチュードは M_J ：4.0～7.5 に分布しており、特に M_J ：4.5 以上のデータ数は充分である¹⁰⁾。本検討で使用している地震データのマグニチュードの分布は表 1 に示す通り M_J ：4.5～6.8 であり、この範囲に包含されている。従って、基準となる地震動強さの推定式として式(4)を使用することは妥当であると考えられる。なお、本研究では全ての地震の震源を点震源として取り扱っている。

以下、観測記録の補間値を“O”，距離減衰式による推定値を“C”と表す事とする。計 72 地震の観測データを用いて、PGA と PGV に関しては O/C の幾何平均値、計測震度は O-C の平均値を求めた。

3.2.1 PGA

PGAのO/Cの幾何平均値と、同時に得られた対数標準偏差を図5に示す。図5より、対象領域の北東部にあたる茨城県から栃木県中部、群馬県東部にかけての帯でO/Cが大きくなる傾向にあることが分かる。また、栃木県、群馬県、山梨県などの山間部においても、O/Cの幾何平均値が1.0以上となる場所が見られ、それらの地域では基準的な地震動強さよりも大きくなる傾向がある。一方、外房南部や群馬県西部はO/Cが1.0以下であり、地震動が小さくなる傾向が見られる。また、図5(2)より、対象領域の大半が対数標準偏差0.4以下の領域に含まれており、ばらつきがさほど大きくない事から、図5(1)の結果は十分信頼できるものとする事が出来る。一方、静岡・山梨両県は比較的ばらつきが大きい傾向がある。これは、相対的に観測データが少ない事に起因していると考えられる。さらに、銚子や房総半島及び伊豆半島の先端部のばらつきが周辺部と比べて大きい事の原因も、周囲が海に囲まれて観測点が少ない為、補間の精度が内陸部と比べて低下している事によると思われる。



(1) 幾何平均値

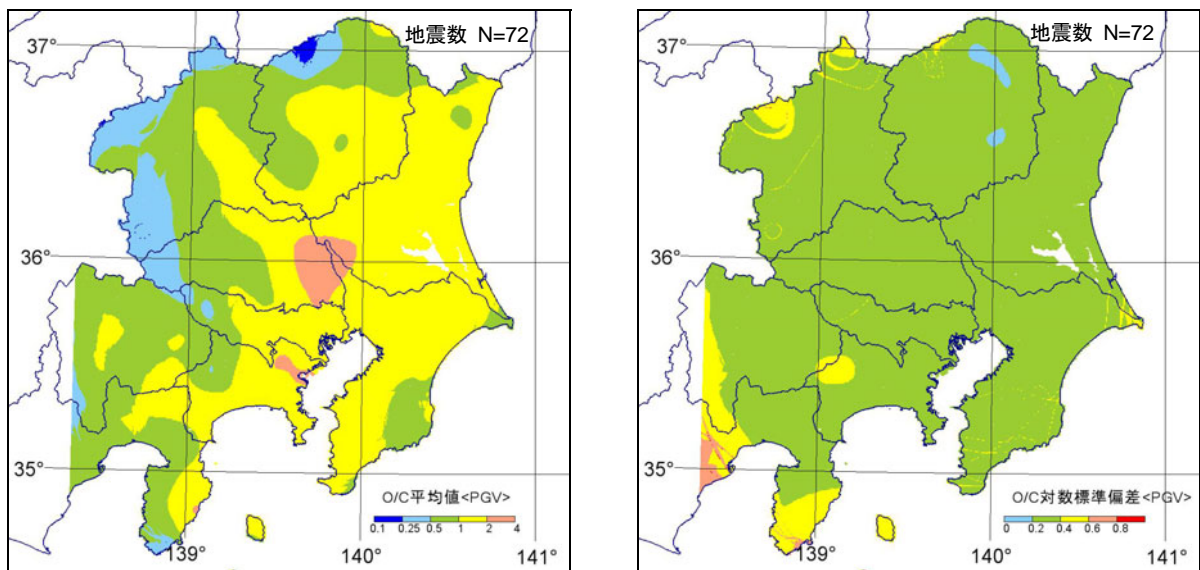
(2) 対数標準偏差

図5 PGAのO/Cの平均と標準偏差の分布図

本検討で使用したAnnaka & Nozawa(1988)の式は、工学的基盤相当 ($V_s \geq 300\text{m/s}$) の平均的な地震動強さを与える。工学的基盤から沖積地盤地表への最大加速度の平均増幅率は、既往の検討結果から約1.5倍と得られており¹¹⁾、関東平野の大半の領域でO/Cが1.0~2.0の範囲に属する事と調和的である。

3.2.2 PGV

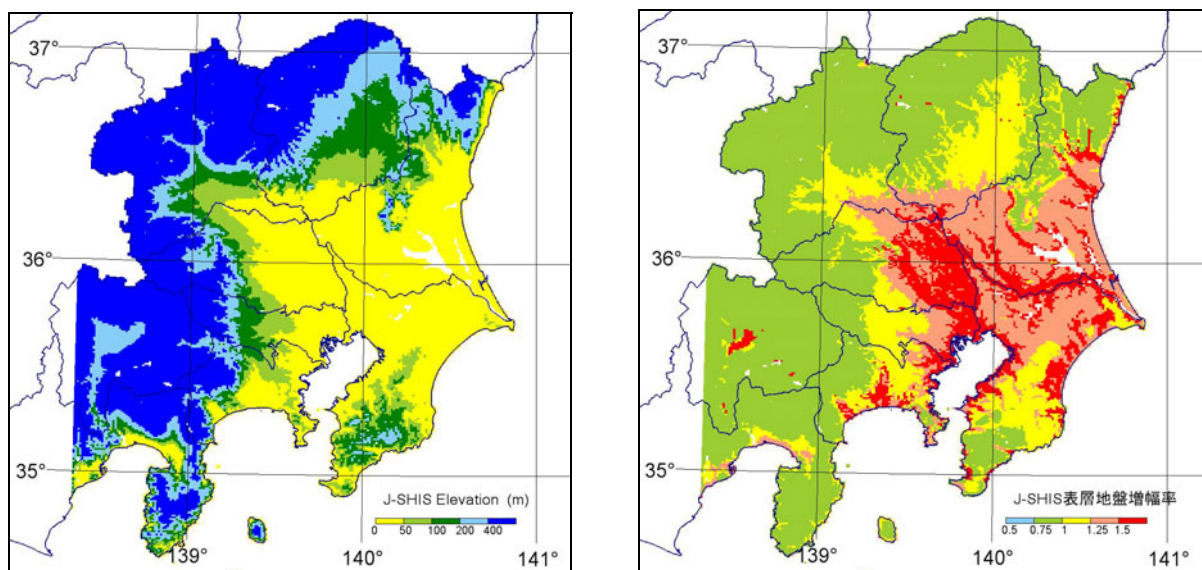
計72地震に対して求めたPGVのO/Cの幾何平均値と対数標準偏差を図6に示す。図6(1)より、神奈川県東部の一部（横浜付近）及び埼玉・千葉・茨城3県の境界地域（中川低地～下総台地付近）でO/Cが大きくなる傾向にある事が分かる。一方、栃木県北部や群馬・埼玉両県の西部についてはO/Cが0.5以下であり、地震動が工学的基盤レベルの平均値より大幅に小さくなる傾向が見られる。図6(2)より、対象領域の殆どが対数標準偏差0.2~0.4の範囲に含まれており、幾何平均値の信頼度は十分なものと考えられる。



(1) 幾何平均値

(2) 対数標準偏差

図6 PGVのO/Cの平均と標準偏差の分布図



(1) 各メッシュの平均標高

(2) PGVの表層地盤増幅率

図7 J-SHIS¹²⁾で使用されている表層地盤特性の分布図

PGVに関する揺れやすさの分布特性に見られる特徴は、図7(1)の平均標高¹²⁾との比較より、関東平野の中心部において地震動強さが大きくなり、山間部に近づくに従って小さくなる傾向であると言える。この傾向は図7(2)に示すAVS30から算定した表層地盤の増幅率分布図¹²⁾と比較的良好に対応している。特に、O/Cと表層地盤増幅率それぞれの1.0倍の境界線に着目すると、両者の形状及び位置関係に高い類似性が見られる。また、この線は平野部と山間部との境界とも対応している。AVS30から算定した表層地盤の増幅率分布の中から、対象範囲内の平野部に相当する部分（ここでは、標高50m以下とした）を抽出したものの幾何平均値は1.4倍であり、図6(1)に示したO/Cの平野部における大部分が1.0~2.0の範囲にある事と調和的である。以上の結果より、PGVの空間的分布特性は表層地盤の増幅特性の影響を強く反映していると考えられる。なお、AVS30から算定した増幅率は工学的基盤（ $V_s=400$ m/s）と地表との間の最大速度の比率を表している。

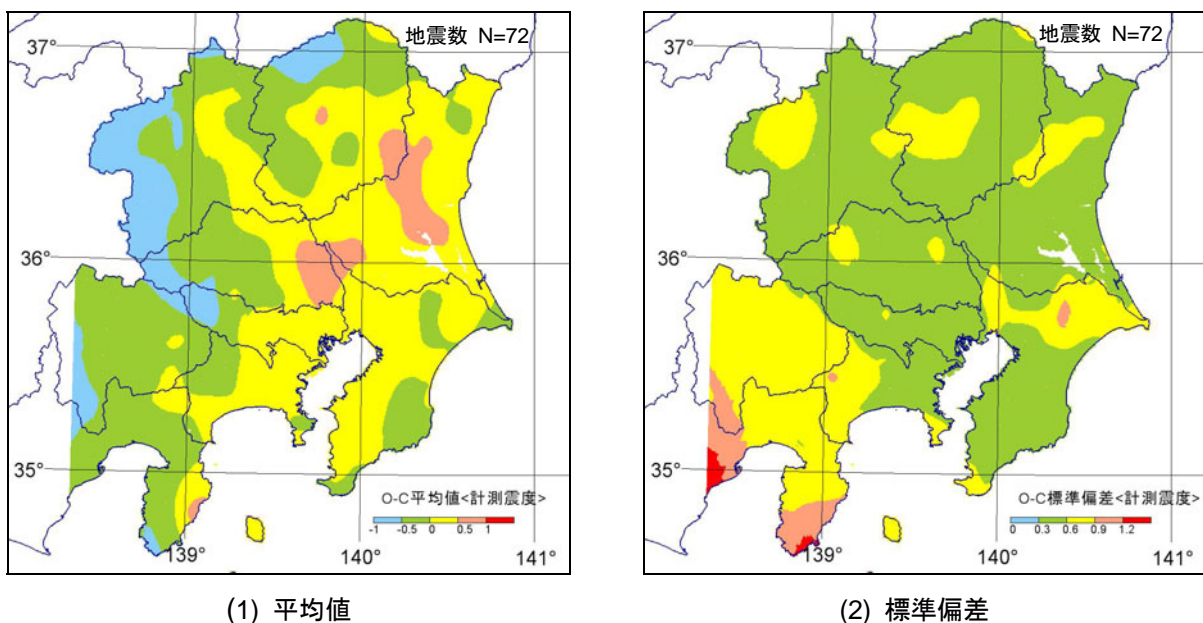
一方、図6(1)の栃木県、群馬県、埼玉県の間部では、O/Cが0.5以下となっている領域が見られ、この部分については図7(2)の表層地盤増幅率との間で相違が認められる。これらの地域については、図5(1)のPGAにおいてO/Cが1.0以下となる領域と重なる部分が多いが、PGVの場合の方が顕著に低減している。山間部において、O/Cが小さくなる原因については、基準としている距離減衰式(4)が工学的基盤相当（ $V_s \geq 300$ m/s）の地震動強さを与えているため、それより硬質地盤となる山間部においては地震動強さの推定値を過大評価していることによるものと考えられる。

3.2.3 計測震度

計測震度は、気象庁が定めた算定手法に則って計算する必要がある⁷⁾。基準値として用いる計測震度についても、本来そのように算出すべきものであるが、前述の距離減衰式(4)を用いた場合には3成分の時刻歴が得られないため、不可能である。そこで本研究では、栗田 等¹³⁾が提案する加速度応答スペクトルから計測震度に換算する次式を用いて、基準となる計測震度を求めることとした。

$$I_{JMA} = a_0 + a_1 \cdot \ln[S_a(T_1)] + a_2 \cdot \ln[S_a(T_2)] + \dots \dots + a_{81} \cdot \ln[S_a(T_{81})] \quad (5)$$

ここで、 I_{JMA} ：計測震度、 $S_a(T_i)$ ：減衰定数5%の加速度応答スペクトル（ cm/s^2 ）、 T_i ：周期（s）、 a_i 、（ $i = 0, 1, 2, \dots, 81$ ）：回帰係数、である。式(5)の回帰係数は、日米の強震記録277組を用いて決定したものである。本研究では、式(4)の距離減衰式で得られた加速度応答スペクトルに式(5)の換算式を適用して、基準となる計測震度を算定した。



(1) 平均値 (2) 標準偏差

図8 計測震度のO-Cの平均と標準偏差に関する分布図

計測震度のO-Cの平均値と標準偏差の分布図を図8に示す。図8(1)に示した計測震度に関するO-Cの平均値の幾何学的模様は、図6(1)に示したPGVに関するO/Cの幾何平均値との間に高い類似性が認められる。計測震度に関するO-Cの標準偏差は、殆どの領域で0.6以下であり、信頼し得る程度に十分小さいと言える。従って、計測震度の揺れやすさ分布特性についても、PGVと同様に表層地盤の増幅特性の影響を強く受けているものと思われる。計測震度の結果は、PGAの結果と同様に茨城県中部から栃木県中部にかけての範囲でO-Cが大きくなる傾向と、栃木県、群馬県、埼玉県の間山間でO-Cが小さくなるPGVの傾向を併せ持っている。翠川 等¹⁴⁾は、計測震度の算定時に施されるフィルター特性に起因して、計測震度がPGAとPGVとの中間の物理量と相関が高いと指摘しており、本検討に見られる2つの傾向を併せ持つ事と整合している。

神田・武村⁴⁾が行った結果では平野部の大部分で相対震度が0.4~0.4の範囲に含まれている。本研究の検討結果では、同じ領域のO-Cが-0.5~0.5の範囲に含まれており、数値の比較においては近い結果が得られている。しかし、O-Cの絶対値が大きい箇所などに関する分布形状の比較では、平滑化処理の違いもあって判断は難しいが、両者には差異が認められる。

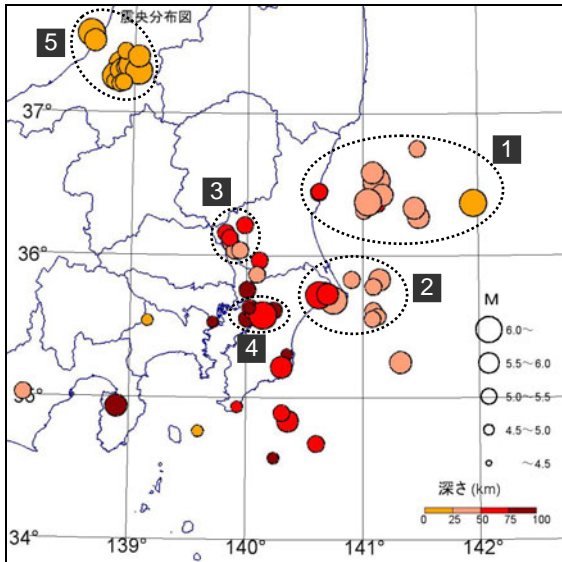
4. 議論

ここまでの検討結果より、PGVと計測震度の空間的分布特性に関しては、表層地盤の増幅特性の影響を強く反映していることが分かった。一方、関東地方平野部におけるPGAのO/Cの幾何平均値は、沖積層の工学的基盤～地表間の最大加速度の平均増幅率とほぼ一致することが分かった。しかし、これまでの検討結果では空間的分布特性の全ての部分を説明できていない。特に、対象領域の北東部にあたる茨城県から群馬県東部にかけての領域でO/Cが卓越する理由是不明である。そこで、地震観測データを震源域で区分して、震源域毎に揺れやすさ分布特性を求めることを行った。

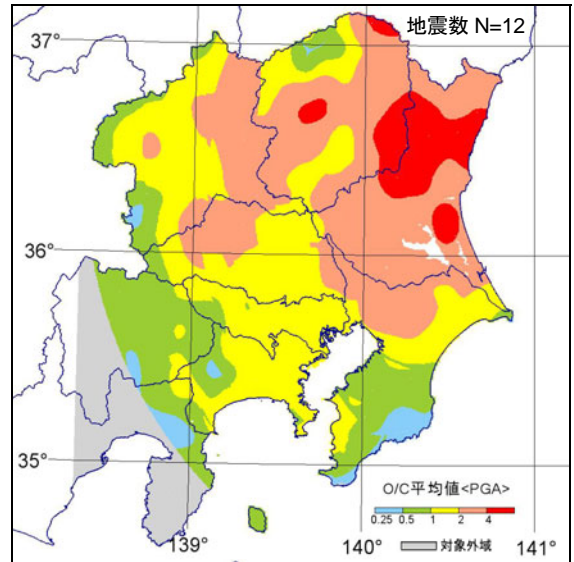
対象領域は複数のプレートが接する所であり、様々な地震活動域が存在する。本研究では、図9(1)に示す5つの震源域に着目した。各震源域は、震源域1：沈み込む太平洋プレートと陸のプレートの境界、震源域2：太平洋プレートとフィリピン海プレートの境界のうち深さ約40~50kmの範囲、震源域3：沈み込むフィリピン海プレートと陸のプレートの境界で深さ50km前後、震源域4：太平洋プレートと沈み込むフィリピン海プレートの境界のうち深さ80km前後、震源域5：新潟県の地殻内地震、である。震源域別に求めたPGAに関するO/Cの幾何平均値の分布図を図9(2)~(6)に示す。なお、図中の灰色で表された領域は、観測データ数不足により解析精度が十分に確保できないため、検討の対象から除外した地域を示している。O/Cの幾何平均値の分布図は、震源域毎に大きく異なった様相を呈している。しかし、いずれの震源域の場合でも、茨城県中部から栃木県中部にかけての範囲で、O/Cが大きくなる共通点が見られる。但し、O/Cが卓越する領域での絶対的な大きさについては各ケース間でばらつきが大きい。震源域1及び3については、対象領域の北東部において、広範囲にわたって他の地域よりO/Cが非常に大きくなる傾向が見られる。両震源域は、共に陸のプレートとの境界で発生する地震の集合である。以上の結果より、PGAに関する揺れやすさ分布特性は、表層地盤の増幅特性のみでなく、震源や伝播経路の特性を反映している可能性が指摘できる。

図10に震源域別に求めたPGVに関するO/Cの幾何平均値の分布図を示す。図9のPGAの結果と比較すると、震源域毎の大きな分布形状に関しては、震源域5を除く震源域近傍でO/Cが大きくなる点において両者に類似した傾向が認められる。しかし、それ以外の部分に関しては隔たりがあり、両者は明らかに異なった特性を有していることが分かる。また、値に関しては、PGVの結果にはO/Cが4.0以上となる領域が現れず、逆に山間部でO/Cが0.5以下となる地域が全ての震源域の結果に共通して見られる。

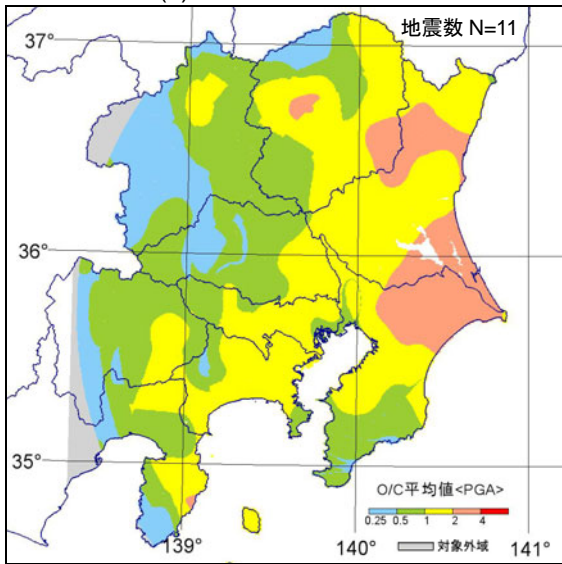
震源域別に求めた計測震度に関するO-Cの平均値の分布図を図11に示す。前述の2種類の地震動強さに関する検討結果と同様、震源域近傍でO-Cが大きくなる傾向が認められる。但し、震源域5の結果は、この限りではない。計測震度の結果は、震源域1及び3の場合に茨城県中部から栃木県中部にかけての範囲でO-Cが非常に大きくなる傾向と、栃木県、群馬県、埼玉県の間山間でO-Cが小さくなる傾向を併せ持っている。このPGAとPGV両者の特徴を併せ持つような傾向については既に3.2.3で述べたが、図8(1)に示した結果よりも明瞭に現れている。



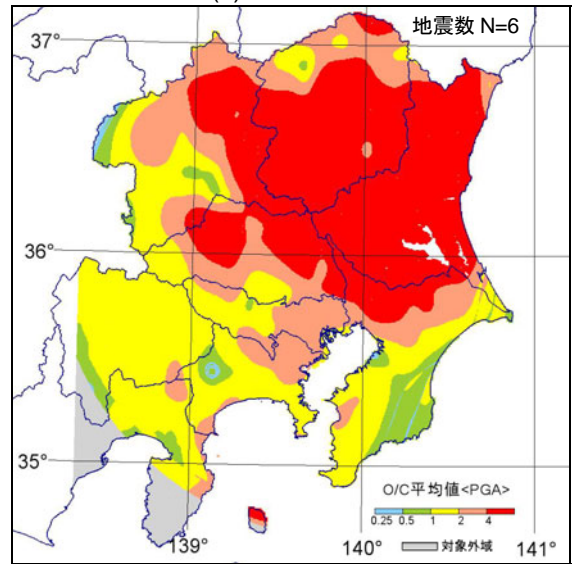
(1) 震源域の区分



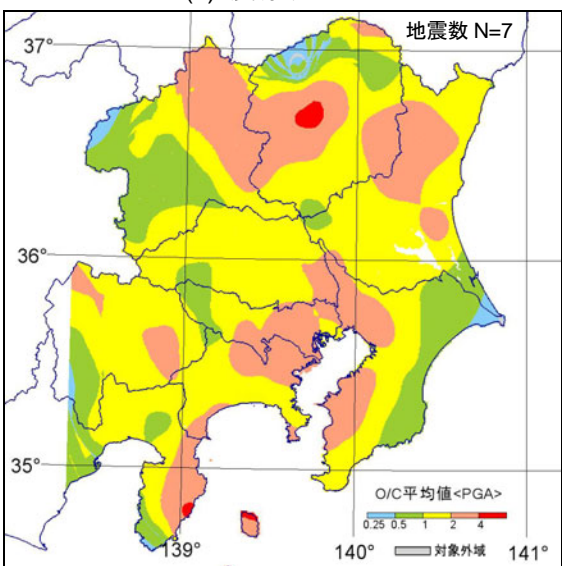
(2) 震源域 1



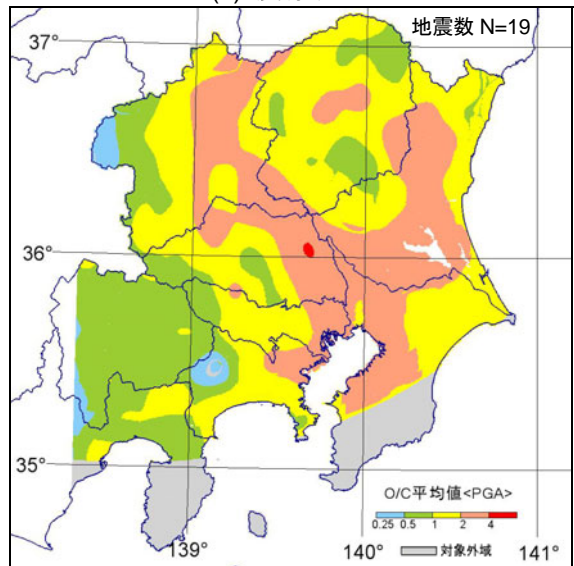
(3) 震源域 2



(4) 震源域 3

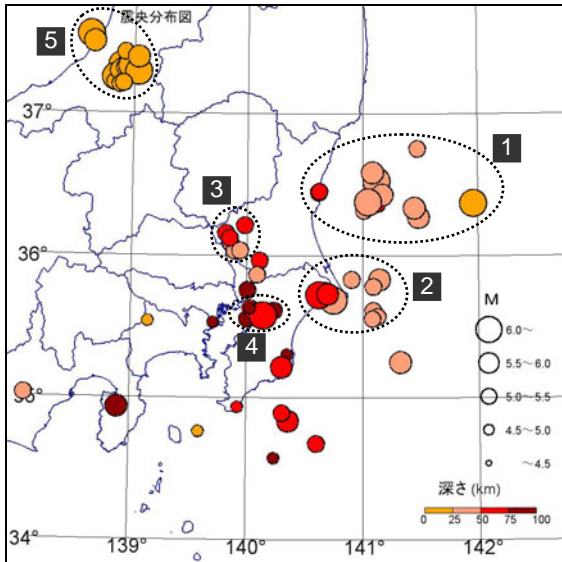


(5) 震源域 4

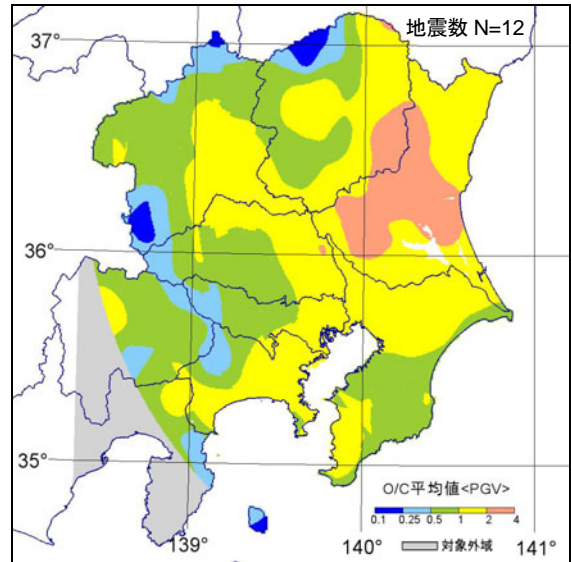


(6) 震源域 5

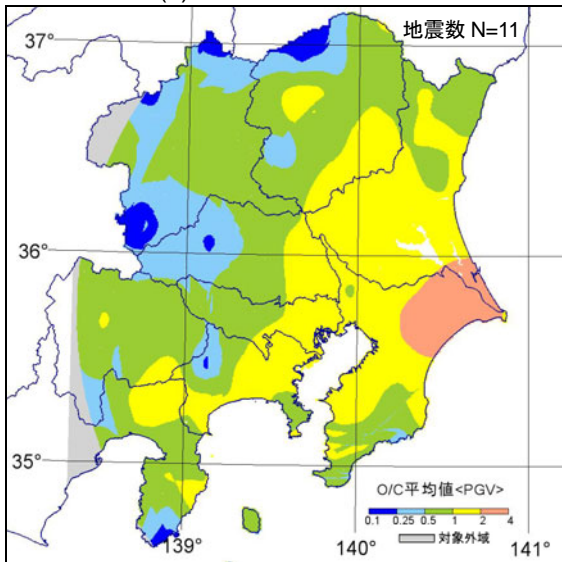
図9 震源域別に整理したPGAのO/Cの幾何平均値分布図



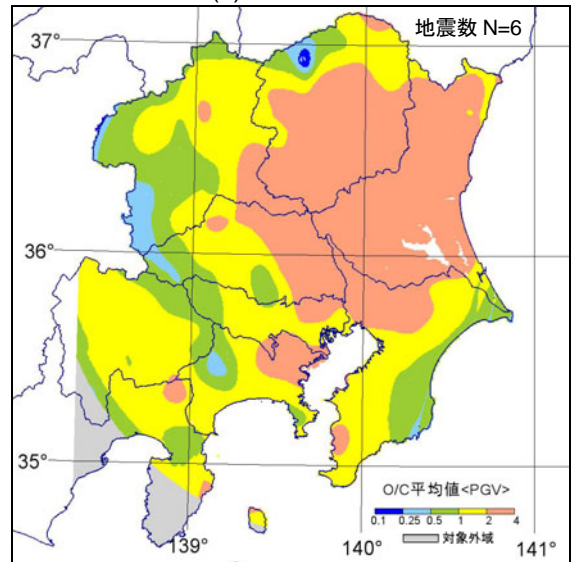
(1) 震源域の区分



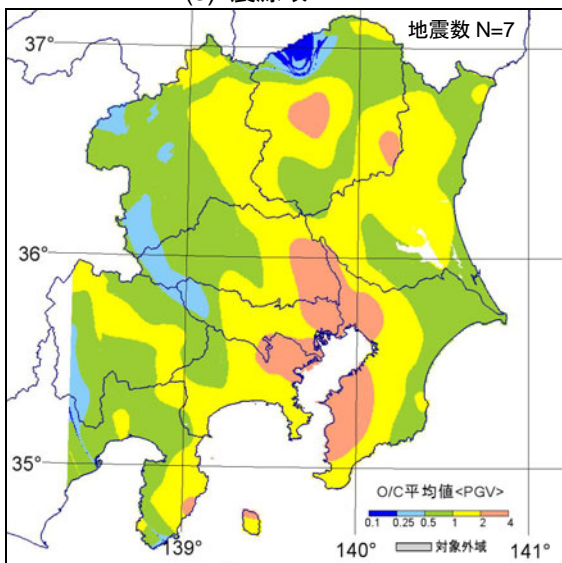
(2) 震源域 1



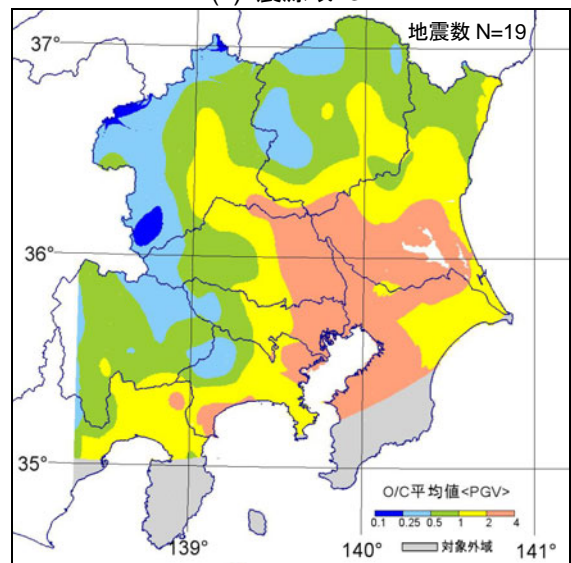
(3) 震源域 2



(4) 震源域 3

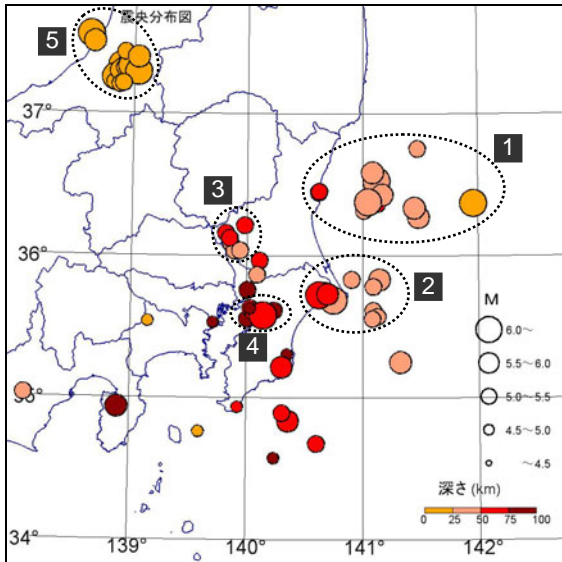


(5) 震源域 4

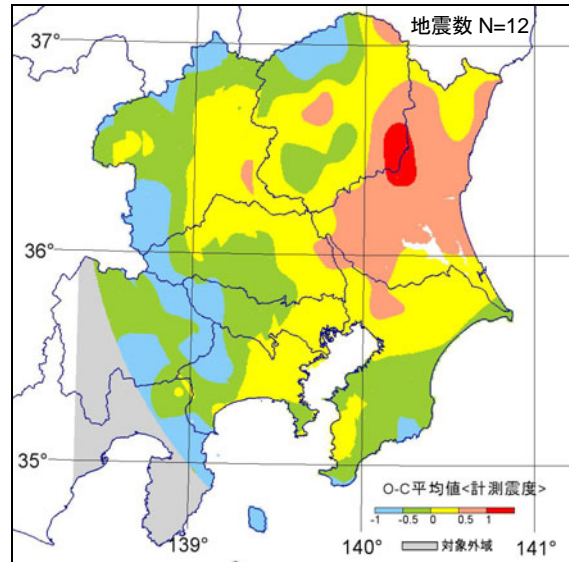


(6) 震源域 5

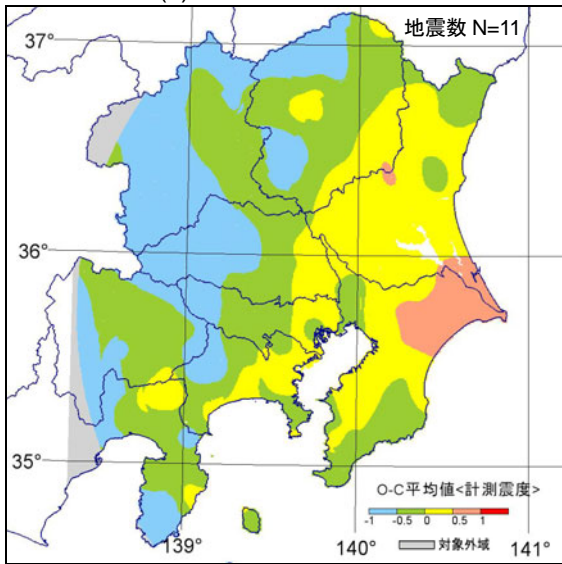
図 10 震源域別に整理した PGV の O/C の幾何平均値分布図



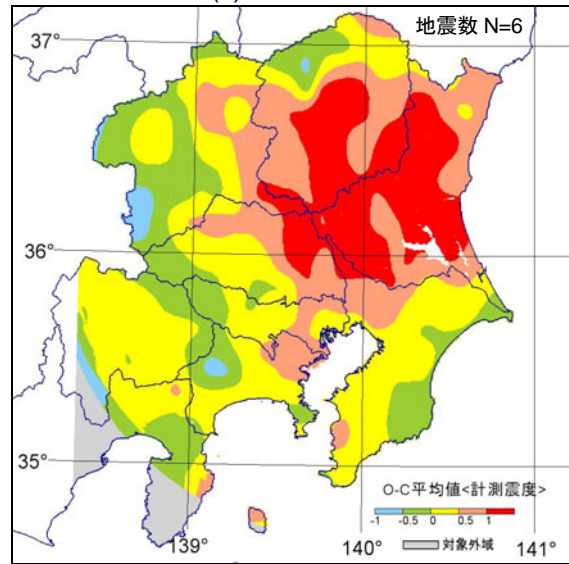
(1) 震源域の区分



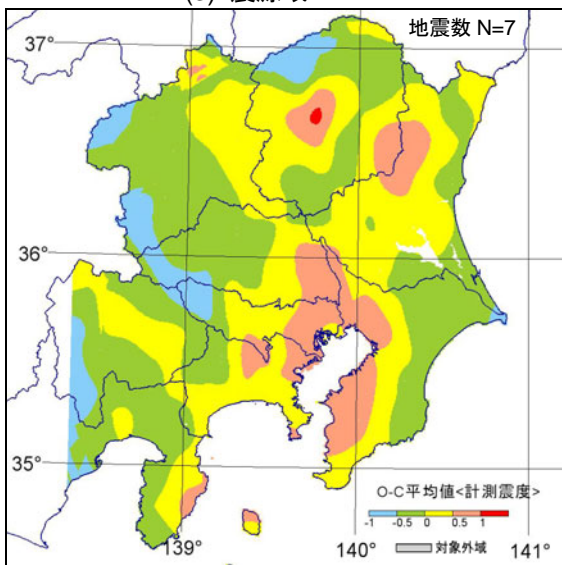
(2) 震源域 1



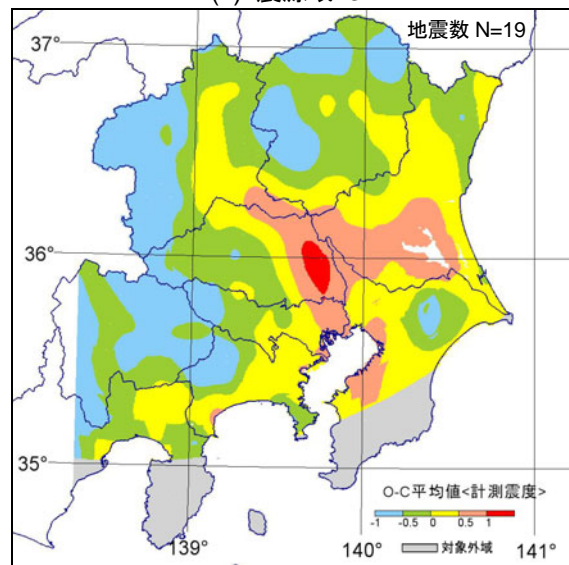
(3) 震源域 2



(4) 震源域 3



(5) 震源域 4



(6) 震源域 5

図 11 震源域別に整理した計測震度の O-C の平均値分布図

図9～図11の結果より、地震動強さ指標の種別によらず、震源域の違いによって揺れやすさの分布特性は異なることが分かった。関東地方の震源域による揺れやすさ分布形状については、中村 等¹⁵⁾が千葉県北部から茨城県南部付近の非火山性の高減衰域の存在に起因するものだとしており、本研究の結果にも、このような影響が現れている可能性がある。

5. まとめ

本論文は、関東地方における各種地震動強さの空間的な分布特性について検討したものである。ここまでの検討結果および議論より、本論の結論を以下の通りまとめる。

- ・ 72地震の観測記録を用いて、距離減衰式から得られる基準値との差異として、揺れやすさの分布特性を抽出した。ここで、距離減衰式は関東地方の工学的基盤における平均的な地震動強さを与えるものとして使用している。PGA、PGV、計測震度の3種類の地震動強さ指標について、統計的处理を行った結果、何れも標準偏差が十分小さく、安定的な結果が得られた。
- ・ PGAに関しては、関東地方北東部の、特に茨城県から栃木県中部、群馬県東部にかけた範囲で、揺れが大きくなる傾向に有ることが分かった。
- ・ PGVと計測震度は、関東平野中心部の中川低地から下総台地付近で大きくなり、山間部に近づくに従って小さくなる傾向が見られる。また、空間的な分布特性に関しては、表層地盤の増幅特性の影響を強く反映していることが分かった。
- ・ PGAの場合、PGVや計測震度と異なって、山間部においてもO/Cの幾何平均値が1.0以上の比較的大きな値を示す場所が見られる。これについては、震源域1及び3で発生する地震に関して、対象領域の北東部において他の地域よりO/Cが非常に大きくなる傾向が、PGAの場合の方がPGVよりも顕著に現れることや、表層の薄い風化層や堆積層によってPGAが大きく増幅される可能性、両者の複合的なものなど、複数の要因が考えられる。
- ・ PGAの空間的分布特性に関して、関東地方平野部におけるO/Cの幾何平均値は、同地域の沖積層における工学的基盤～地表間の最大加速度の平均増幅率とほぼ一致する。PGVについても同様の結果が得られた。
- ・ 震源域別に区分した観測データによる検討結果より、地震動強さの空間的分布特性は表層地盤の増幅特性だけでなく、震源や伝播経路の特性の影響を受けていることが示唆された。

PGAの空間的分布特性に関して、陸のプレートとのカップリングで発生した地震（太平洋プレートと陸のプレートとの境界及びフィリピン海プレートと陸のプレートとの境界の2震源域）の場合に、なぜ関東地方北東部で地震動が強く励起されるのかについては、更なる検討が必要であり、今後の課題とした。

謝 辞

本研究では、気象庁、防災科学技術研究所（K-NET及びKiK-net）から公開されている地震観測記録を使用させて頂いた。関係諸機関に謝意を表します。更に、査読者の方々からは多くの有益なご指摘を頂き、本稿の改善に大いに役立ちました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中央防災会議「民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会」：事業継続ガイドライン 第一版— わが国企業の減災と災害対応の向上のために —, 内閣府 防災担当, 2005年8月。
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：第5章 電力施設 5.2 構造的被害, 阪神・淡路大震災調査報告, 土木・地盤編 ライフライン施設の被害と復旧, 丸善, 1997年9月, pp.346-368。

- 3) 地盤工学会 新潟県中越地震災害調査委員会：13.4 電力, 新潟県中越沖地震災害調査委員会 報告書, 地盤工学会, 平成2007年5月, pp.461-467.
- 4) 神田克久・武村雅之：震度データから推察される相模トラフ沿いの巨大地震の震源過程, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号, 2007年, pp.68-79.
- 5) 気象庁：気象庁震源データファイル 1923-2007年, 地震年報 2007年, 気象業務支援センター, 2008年.
- 6) 童華南・山崎文雄・清水善久・佐々木裕明：計測震度と従来の地震動強さ指標の対応関係, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第1部(B), Vol.51, 1996年, pp.458-459.
- 7) 気象庁 監修：震度を知る 基礎知識とその活用, (株)ぎょうせい, 1996年9月.
- 8) 塩野政治・升本眞二・弘原海清：BASICによるコンターマップ II応用編, 共立出版, 1988年11月.
- 9) Annaka, T. and Nozawa, Y. : A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 1988, pp.129-132.
- 10) 安中正・山谷敦・桃林治彦・野沢是幸：関東および周辺地域の地震観測記録を用いた基盤における最大加速度推定式の検討, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, 1987年, pp.129-132.
- 11) 藤井直樹・安中正・野沢是幸：表層地盤による最大加速度増幅率の予測方法, 第19回地震工学研究発表会講演概要, 土木学会, 1987年, pp.137-140.
- 12) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション<旧J-SHIS(Japan Seismic Hazard Information Station)>, <http://www.wold.j-shis.bosai.go.jp/>.
- 13) 栗田哲史・高橋聡・嶋田昌義・安中正：応答スペクトルを用いた計測震度推定と震源断層推定への応用, 土木学会応用力学論文集, Vol.3, 2000年8月, pp.547-557.
- 14) 翠川三郎・藤本一雄・村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol.1, 1999年11月, pp.51-56.
- 15) 中村亮一・植竹富一・佐竹健治・遠田晋次・宇佐美龍夫・島崎邦彦・渡辺健：関東地域の三次元減衰構造・異常震域とそれに基づく1855年安政江戸地震の震源深さの推定, 歴史地震, 第22号, 2007年, pp.101-107.

(受理：2009年10月21日)

(掲載決定：2010年 2月26日)

Spatial Distribution Characteristics of Seismic Ground Motion Intensities in the Kanto Region

KURITA Tetsushi¹⁾, TAKAHASHI Satoru²⁾ and ANNAKA Tadashi³⁾

1) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., Dr. Eng.

2) Tokyo Electric Power Company

3) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

ABSTRACT

This study aims to assess the distribution characteristics of seismic ground motion intensities in the Kanto region of Japan based on the seismic records observed by several organizations' networks. The spatial distribution characteristics of seismic ground motion intensities are extracted as the difference between the arranged observation data compiled from these networks and the standard values derived from empirical models. In this study, three indices were used to represent the seismic ground motion intensities: peak ground acceleration, peak ground velocity, and the Japan Meteorological Agency (JMA) seismic intensity. The results of investigation

suggest that the distribution characteristics of seismic ground motion intensities based on the peak ground velocity and JMA seismic intensity are largely affected by the site amplification factors of the subsurface layers. The distribution characteristics of the seismic ground motion intensities may be influenced not only by the site amplification of subsurface layers, but also by the effect of the seismic source and/or path characteristics.

Key Words: Ground motion intensity, Spatial distribution characteristics, Strong motion seismograph network, Site amplification, Kanto region