

A会場 | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

2019年9月16日(月) 9:30 ~ 10:30 | A会場 百周年記念ホール

[S15]AM-1

座長: 吉田 沙由美(株式会社阪神コンサルタンツ)、松浦 律子(公益財団法人地震予知総合研究振興会)

9:30 ~ 9:45

[S15-01] 余震記録を用いた経験的グリーンテンソル微分 (EGTD) の限界高周波数の検討

\*吉田 沙由美<sup>1</sup>、堀家 正則<sup>1</sup> (1. 株式会社 阪神コンサルタンツ)

---

9:45 ~ 10:00

[S15-02] 入力波動場に基づく、3次元非線形建物-地盤相互作用解析法

\*飯田 昌弘<sup>1</sup> (1. 東京大学地震研究所)

---

10:00 ~ 10:15

[S15-03] 平面波入射を仮定しないで、地表地震動から地中の入射波を算定する方法

\*竹中 博士<sup>1</sup>、小松 正直<sup>1</sup>、渡邊 禎貢<sup>1</sup>、大島 光貴<sup>2</sup>、中村 武史<sup>3</sup> (1. 岡山大学、2. 清水建設、3. 防災科学技術研究所)

---

10:15 ~ 10:30

[S15-04] 過去400余年間の日本の既往最大震度の推定

\*松浦 律子<sup>1</sup>、石辺 岳男<sup>1</sup>、岩佐 幸治<sup>1</sup>、古村 美津子<sup>1</sup> (1. 公益財団法人地震予知総合研究振興会)

# 余震記録を用いた経験的グリーンテンソル微分 (EGTD) の限界高周波数の検討

## Investigation to estimate high-frequency limit of Empirical Green's tensor derivatives (EGTD) using aftershocks

\*吉田 沙由美<sup>1</sup>、堀家 正則<sup>1</sup>

\*SAYUMI YOSHIDA<sup>1</sup>, MASANORI HORIKE<sup>1</sup>

1. 株式会社 阪神コンサルタンツ

1. HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.

### 1. はじめに

地震動グリーン関数の空間微分は、地震動予測等に利用できる重要な情報である。これを数値的に推定するためには地下構造モデルが必要となるため、現状では1Hz以上の高周波数成分を含むことは難しい。高周波数成分を含むグリーン関数空間微分を作成する方法の1つとして、観測記録を利用する方法がある。Plicka and Zahradnik (1998)は、複数の小地震記録を用いて、グリーン関数の空間微分 (EGTD) の推定法を提案した。この手法は、伝播経路や地盤のモデル化を必要とせず、また異なるメカニズム解の余震からでも任意のメカニズム解の地震動の計算ができる手法である。しかし、どの程度の範囲の余震を用いればどの程度の高周波数(限界高周波数)まで信頼できるEGTDが推定できるかが明らかになっていない。本研究では、これらの検討を、2016年に発生した熊本地震の余震記録を用いて実施した。

### 2. データと手法

今回使用した2016年熊本地震の余震記録はおおよそマグニチュード2~4の範囲の余震である。EGTDを推定するためには、断層パラメータ (走向・傾斜・滑り角)、地震モーメントやコーナー周波数からなる震源パラメータが必要となる。そのため、断層パラメータはP波初動から、地震モーメント、コーナー周波数は $\omega$ -2モデルを仮定してS波のフーリエスペクトルから算出した。

初めに、ある半径の球内に位置する6個以上からなる余震グループを設定し、次にPlicka and Zahradnik (1998)により提案された手法を用いてグループ化された余震群から3成分地震動のEGTDを推定した。更に、EGTDの推定に用いてない余震の観測波形 (検証余震波形) と推定したEGTDを用いて算出した地震動波形を、相関関数を指標として比較し、EGTDの限界高周波数を評価した。

### 3. 結果

EGTD推定のための地震グループ化半径を500m、1000mにした場合、4 HzまでのEGTDが高精度で安定して推定できた。グループ化半径500mと1000mを比較すると半径500mの方がより高精度のEGTDが推定された。この結果は、グループ化をする余震はより接近したものを選択するとより高精度のEGTDが推定できることを意味する。これは、グループ化の範囲の代表的な長さ (直径) に対して、考慮している最短波長の比が、半径500mの方が大きいためであると考えられる。また、グループ化半径500mの場合はさらに10Hzまで高精度に推定できる可能性を示唆する結果となった。これらの結果は、比較的精度良く震源パラメータが決定できた余震記録を用いた場合である。一般に、規模の小さい地震の震源パラメータを一意的に決定することは難しい。しかし、震源インバージョン等に利用することを考えると、震源パラメータの精度がやや悪い余震記録からもEGTDを推定できるようにしたい。

EGTDの推定に利用することができる地震を増やすために、震源パラメータの決定精度が悪い余震記録に遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて、余震波形に良く合う震源パラメータとEGTDの同時推定を行った。その結果、走向・傾斜・滑り角の検索範囲( $\pm 0.1$  radians)でパラメータの決定精度が悪い余震を用いても、4 HzまでのEGTDが求められることが確認できた。また、余震グループによっては、4 Hzより高い高周波数限界まで利用できるEGTDを推定できる場合があることもわかった。

この研究の結論は、以下の3点である。

- (1) 余震地震動波形から推定したEGTDは、少なくとも4Hzまでは充分信頼できる。
- (2) グループ化する余震はより接近したものを選択するとより高精度のEGTDが推定できる。
- (3) 余震の震源パラメータの精度がやや悪くてもEGTDの推定に利用できる。

# 入力波動場に基づく、3次元非線形建物—地盤相互作用解析法

## 3D Complete Nonlinear Methods for Soil-Building Interaction Based on an Input Wavefield

\*飯田 昌弘<sup>1</sup>

\*Masahiro Iida<sup>1</sup>

1. 東京大学地震研究所

1. University of Tokyo, Earthquake Research Institute

1. 序 軟弱地盤で重要な短周期（周期数秒以下）表面波を適切に取り扱うために、入力地震波動場（波動が伝播している状態）に基づく、3次元建物—地盤相互作用解析法を提案した。その第一歩として、水平地震動を受ける多層地盤において、3次元線形相互作用解析を実施した [1]。次に、その解析法に、地盤の材料非線形を導入した [2]。提案法では、相互作用系と、波動場評価のための（数十mの浅い地下構造を含む）数百m以上の深い地下構造を使用する(図1)。短周期表面波が、浅い構造と深い構造の両方の物性に強く依存するからである。

本研究では、さらに上部構造と杭の材料非線形を導入し、垂直動も考慮する。解析法の効果を確認するために、メキシコ市の軟弱地盤の中層鉄筋コンクリート(RC)ビルと、東京湾の埋立区域の中層RCビルと木造建物、の3ケースの解析を実施する。そして、東京湾の埋立区域の中層RCビルのケースを説明する [3]。

2. 方法 図1の3次元相互作用系において、上部構造は集中質量のせん断モデル、摩擦杭に支えられる基礎は剛体である。杭は円筒要素、土は直方体要素、でモデル化される。数式は、ここでは割愛する。

3. 地盤応答 本研究に先立ち、3成分入力波動場に基づく、3次元非線形地盤解析法を使用して、東京湾の埋立区域の越中島観測点において、1923年関東地震(M=8.1)による線形、非線形、液状化地盤応答を実施した [4]。

非線形地盤では、地震動の振幅はあまり大きくならなかった。液状化地盤では、その剛性低下によって、表面波の振幅がきわめて大きくなった。

4. 非線形地盤における建物応答 本研究では、まず、非線形地盤において、8階建RCビルの非線形相互作用解析を実施する。建物（上部構造と杭）は、多少非線形挙動をする。1階や中間階、杭頭において被害が発生する可能性がある。

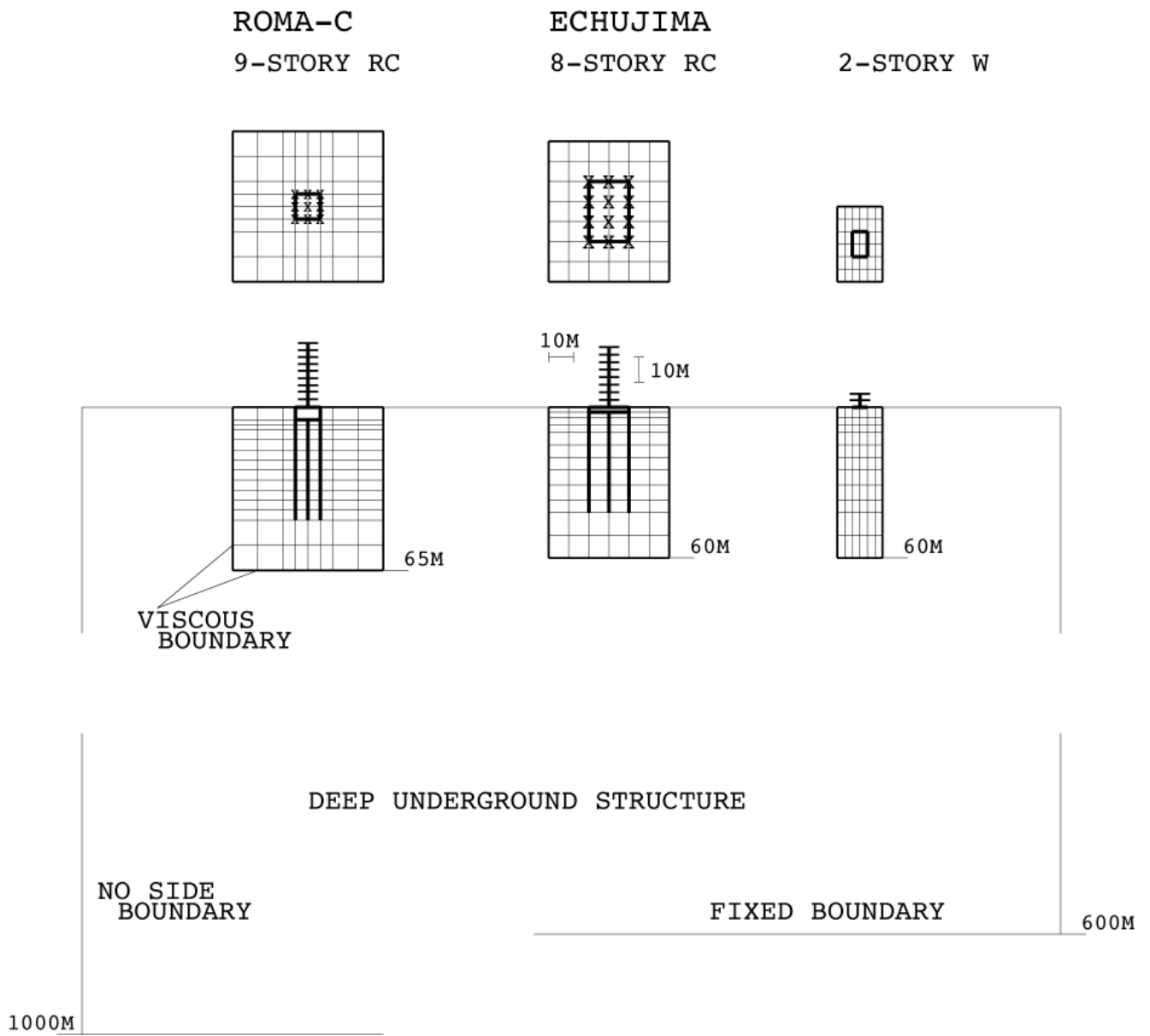
5. 液状化地盤における建物応答 次に、液状化地盤において、同じビルの非線形相互作用解析を実施する。建物の応答は、きわめて大きくなる。上部構造の層間変位とせん断力を見ると、1階だけが特に大きな応答になる。曲げモーメントを見ると、4mから8mの液状化層と、2mに位置する杭頭を含むその上の層において杭は降伏する。杭を有するRCビルでは、建物全体が液状化地盤の大きな応答に抵抗するので、1階で大きな層間変位やせん断力が発生すると考えられる。

6. 議論と結論 他の2つのケースでは、特徴が異なる建物応答が得られたが、ここでは割愛する。また、建物の応答に、垂直動の影響は見られない。解析法は適切に機能し、特に中層RCビルの応答を適切に説明できた。

参考文献 [1] Iida (2013). Int. J. Geomechanics, ASCE, 13(4), 430-440. [2] Iida (2017). Int. J.

Geomechanics, ASCE, 17(3), 04016081. [3] Iida (2019). Int. J. Geomechanics, ASCE (submitted). [4] Iida

(2016). Int. J. Geomechanics, ASCE, 16(1), 04015026.



# 平面波入射を仮定しないで、地表地震動から地中の入射波を算定する方法 Evaluation of seismic motion on a subsurface level from the ground motion at a free surface position without plane-wave incidence assumption

\*竹中 博士<sup>1</sup>、小松 正直<sup>1</sup>、渡邊 禎貢<sup>1</sup>、大島 光貴<sup>2</sup>、中村 武史<sup>3</sup>

\*Hiroshi Takenaka<sup>1</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Tomotsugu Watanabe<sup>1</sup>, Mitsutaka Oshima<sup>2</sup>, Takeshi Nakamura<sup>3</sup>

1. 岡山大学、2. 清水建設、3. 防災科学技術研究所

1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Shimizu Corporation, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震動による基礎地盤や施設の安定性評価などにおいて、解析地盤モデルの下端（基盤面）に入力する地震動を作成する際に、地表1点の地震動（以下「基準地震動」と呼ぶ）から地中のある深さにおける地震動（入射波）の分布を算定する必要がある（図1(a)）。従来、基準地震動を平面波の鉛直入射を仮定して1次元の多重反射理論に基づいて地中に戻し、鉛直入射平面波として解析モデル下端に入力することがしばしば行われている。しかし、このような鉛直入射平面波を仮定する設定では、入力地震動の水平動成分はS波として扱われる一方、上下動成分はP波として扱われる。その結果、主要動であっても、モデルでは上下動はP波として伝播することになり、自然現象を模擬（シミュレート）しているとはいえない。また、鉛直ではなく斜め入射の平面波を仮定する場合においても、一般に地震動には様々な水平スローネスを持つ波線の波が含まれており、それをひとつの水平スローネスの平面波を仮定して地中に戻すことは、特に多成分の継続時間の長い地震動を扱う場合には、やはり理論的な矛盾を生じてしまう。本研究では、平面波入射の仮定に基づかない、ひとつのシンプルな方法を提案する。

その方法とは、震源を含む地下構造モデル（図1(b)）を用意し、時間関数がインパルス（デルタ関数）の食い違い震源を仮定して、地表の基準地震動の観測点と入力地震動が必要な地中位置（例えば、2次元解析モデルでは水平な直線状に分布）における地震動（理論波形）を計算し、地表位置の理論波形に対する地中位置の理論波形の伝達関数を基準地震動に作用して得られる波形を入力地震動に用いるというものである。この伝達関数は地中位置各点の理論波形を地表の理論波形でデコンヴォリューション（周波数領域で割り算）して得られるが、実際には以下のようにすれば直接伝達関数を計算する必要はない（地中の点の数だけデコンヴォリューションを実施する必要はない）。実際には、基準地震動を地表の理論波形でデコンヴォリューションして得られる波形（一種の「実効的な震源時間関数」）を地中の理論波形にコンヴォリューション（周波数領域で掛け算）するだけで（基準地震動に対応した）地中地震動が得られる。「実効的な震源時間関数」は一度計算すれば、それを地中の任意の点（今の場合は、入力地震動が必要な地中の全ての点）で共通に適用できる。理論波形の計算には、震源を含む地下構造モデルとして水平成層構造を採用すれば、reflectivity法（離散化波数法や波数積分法など）などの準解析的な手法で十分短周期まで計算可能である。また、地中の点の地震動を上昇波と下降波（いずれもエバネッセント波を含む）に分解することが可能なので、地中の理論波形に上昇波成分だけを用いることにより、入射波を算定することができる。この方法だと、平面波入射を仮定することなく、解析モデルの下端全体の入力地震動を設定することができる。本発表では、地表における基準地震動から地中における入力地震動（入射波）を算定する具体的な手順を式と計算例によって示す。

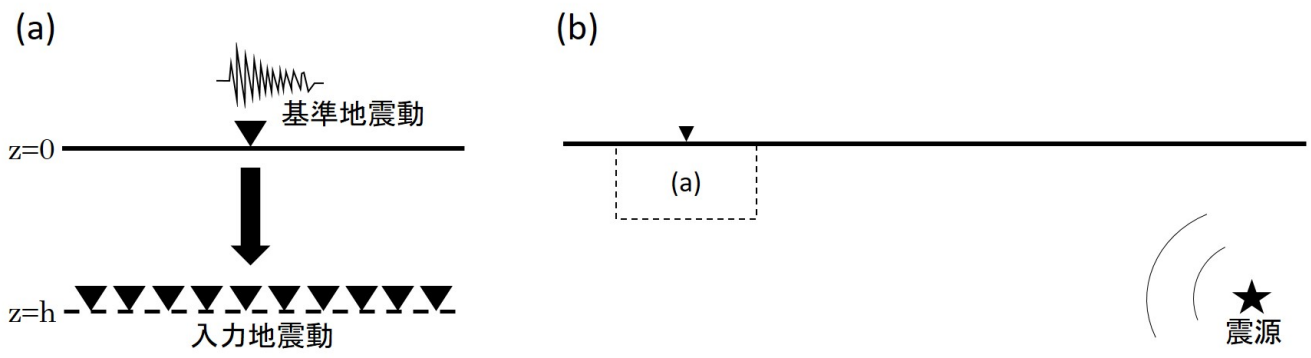


図1:(a)解析地盤モデル. (b)震源を含む地下構造モデル.

## 過去400余年間の日本の既往最大震度の推定

### Estimation of the maximum seismic intensity of each 250m-mesh in Japan for 1585-2018

\*松浦 律子<sup>1</sup>、石辺 岳男<sup>1</sup>、岩佐 幸治<sup>1</sup>、古村 美津子<sup>1</sup>

\*Ritsuko S. Matsu'ura<sup>1</sup>, Takeo Ishibe<sup>1</sup>, Koji Iwasa<sup>1</sup>, Mitsuko Furumura<sup>1</sup>

1. 公益財団法人地震予知総合研究振興会

1. Association for the Development of Earthquake Prediction

これまで、四半世紀近く、近世の被害地震の系統的な解析を実施して、震源域・深さ・規模の推定を系統的に蓄積し [e.g. 中村・松浦(2018)], 種々の歴史地震によって地震動の強さが推定された地点は、250mメッシュ以上の分解能で8000点以上蓄積されている [e.g. Matsu'ura (2017)]. 未だ安政東海・南海地震など解析が完了していない地震が1割程度残されているものの、この8000余点の分布と、Miyazawa and Mori (2009) による最近500年間の各地の既往最大震度分布図とには、大きな乖離がある。

最近、地震の場所とMw, 震源タイプ, 地点のAVS30と関連する直下のスラブの深さ, が与えられれば, 地点の計測震度を予測できる簡単な式ができた [Matsu'ura et al. (2019)]. この式は, 表層の影響も, 東日本の太平洋側で顕著である異常震域等も含まれており, 一切の後付け補正項が必要ない。震源の深さの精度で式が切り替わる心配もない。

そこで, J-SHISの250mメッシュのAVS30の値, 及びCAMPモデル [Hashimoto et al. (2004)] を利用した国内陸地の各250mメッシュ直下のPAC及びPHSスラブの上面深さを用意して, 1585年以降2018年までに日本で発生したM6.8以上の地震による日本の全メッシュ毎の震度を推定した。推定に用いた震源は, 1884年~1922年は宇津 (1999), 1923年~2018年は気象庁震源カタログ, さらに両者に松浦・石辺 (2018) など近代に関する個別の検討を加えた。1585年から1884年までは松浦・ほか (2010) などの近世の解析結果 [e.g. Matsu'ura (2017)] をMに関わらず含め, 未解析のM6.8以上とされる大地震は宇佐美・ほか (2013) などを参考に震源および震源域を補充して用いた。利用したカタログはすべて気象庁Mが与えられているので, Mwは気象庁Mより0.2小さいと仮定した。使用した震度推定式は, Mw7.5以上は震源域からの最短距離を用いるので, 「日本の地震活動」等に示された震源域を参考とした。

こうして, 1585年以降434年間の既知の大地震による, 各メッシュの既往最大震度の全国推定図が得られた (図1)。比較のために, 1585年天正地震以降288年間の史料から判る範囲での既往最大の震度の分布図 [Matsu'ura (2017)] を示す。比較して全国推定図の方が著しく赤い部分は, 例えば1894年根室沖, 1952年と2003年十勝沖地震等, 北海道東部の巨大地震のような明治以降しか地震履歴が判らない場所で発生した地震による高震度や, 濃尾地震・福井地震・鳥取地震・東北地方太平洋沖地震とその後の一連の珍しい場所の地震など, 近代以降の大地震による震度が既往最大となっている地域である。その他で両者は良く合致している。蓄積された歴史地震の震度データ, 推定された歴史地震の震源, 現代データから導出された震度推定式が相互によく合致しており, 3つが一貫していることが確認できた。一方, Miyazawa and Mori (2009) で周囲より高くなる中国山地は, この推定図では震度5.5以上にならない。彼らの空間補間がうまく機能していない証左であり, 確率論的予測地図の検証には不向きであることを示している。

震度に対する地盤の影響は大きいので, 歴史地震データを用いて震源推定を行う際は, 史料地点の地盤の影響考慮が不可欠である。逆に地盤の影響を推定できる程度の精度で位置が決まっている歴史地震の震度でなければ, 確率論的な震度予測の検証には使えないことがよく判る。長期間の予測地図があれば, 今回のような全国推定最大震度を対応期間用に作成可能なので, 地図の検証が可能である。

本研究は地震調査研究推進本部の評価等支援事業の一部として文部科学省からの委託によって実施された。

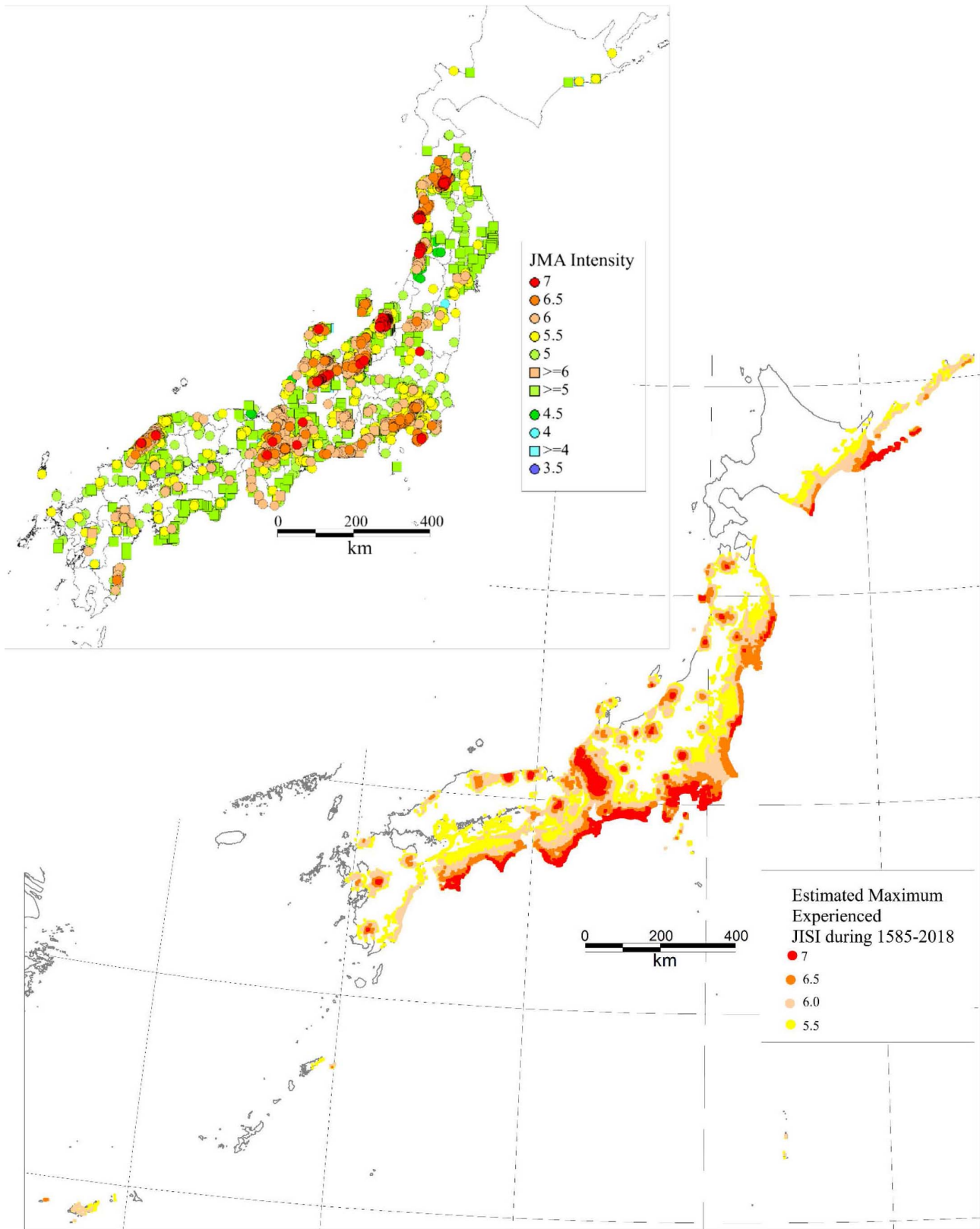


Fig. 1. 250m-mesh areas estimated to be experienced 5.5 or larger Japanese Instrumental Seismic Intensity in 1585-2018. Upper figure shows the maximum intensities experienced in the early modern [after Matsu'ura (2017)]. Intensities due to 1854 Ansei Tokai and Nankai earthquakes and some known historical large earthquakes are not yet included in the upper map.