

南海トラフ地震を対象とした緊急地震速報の猶予時間の評価

Evaluation of Warning Time Provided by Earthquake Early Warning for the Nankai Trough Earthquakes

焦 禹禹¹, 能島 暢呂², 熊野 颯³

Yuyu JIAO¹, Nobuoto NOJIMA² and So KUMANO³

¹ 岐阜大学大学院 工学研究科工学専攻 博士課程

Graduate School of Engineering, Gifu University

² 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

Department of Civil Engineering, Gifu University

³ 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科環境社会基盤専攻 修士課程

Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University

In this study, we investigate the warning times provided by the Earthquake Early Warning (EEW) system for Nankai Trough earthquakes. Focus is placed on the effect of the diversity in combinations of characterized earthquake fault models (CEFM) and hypocenter settings. First, we develop a method to predict and evaluate the warning times for Nankai Trough earthquakes based on seismic observation networks. Based on this, we overlay the distributions of the warning times and population exposure to shaking intensity for the entire set of CEFMs, obtaining joint probability distributions of them. Finally, we examine the effect of the N-net, a newly deployed seismic observation network over the southwest region of Nankai Trough, in the light of extension of warning times.

Keywords: Nankai Trough earthquake, Earthquake Early Warning (EEW), warning time, seismic observation networks in Japan, Characterized Earthquake Fault Model (CEFM)

1. はじめに

気象庁は、2007年10月に緊急地震速報の提供を開始した¹⁾。緊急地震速報は主要動到達までに間に合わない場合や、わずかな猶予時間しか確保されないことがあることから、緊急地震速報の特性や限界や利用上の注意点²⁾を理解し、地震発生時に利用者が正しい対応行動をとることや、建物の耐震化や室内安全確保など、日頃から事前対策を行っておくことが重要である²⁾。

一方、緊急地震速報の有効性に関する検証を多面的に行っておくことも重要である。一例として吉成ら³⁾は、1923~2007年に発生したM4.0以上の地震を対象として、全国各都市における猶予時間を統計的に分析し、地域特性を考慮した緊急地震速報の活用戦略を提案した。その後、Hi-netの活用など地震観測網の拡充が進められ、強震動を伴う地震も多数発生し、緊急地震速報の実績が蓄積されている。気象庁は緊急地震速報の発表状況について継続的に資料を公開し⁴⁾、的中率・空振り・見逃しなどに関する検証結果も報告している⁵⁾。また筆者らは、警報発表履歴⁴⁾と走時表⁶⁾をもとに、既往地震における猶予時間分布を算出し、観測震度に基づく補間推定震度分布および人口分布との重ね合わせによって、震度曝露人

口⁷⁾(所定の震度レベルに曝される人口)と確保される猶予時間との関係について定量的に評価し、地震間比較を行った⁸⁾。

海外でもEEWS (Early Earthquake Warning System) の実装・試験運用あるいは導入検討が進められている。実地震を対象として検証された例は少ないが、ネパールで発生した地震に対する北インドのEEWSの検証事例⁹⁾が挙げられる。また、ハイチにおける既往地震を対象として、仮想的な地震観測網のもとでの猶予時間と震度(MMI)との関係を調べた例¹⁰⁾もある。想定地震を対象とした検証事例としては、北カリフォルニアの地震活動モデルに基づいて、ElarmS (Earthquake Alarms Systems) によりもたらされる猶予時間と震度(MMI)の同時確率分布を評価した事例¹¹⁾のほか、イスラエル¹²⁾やヨーロッパ¹³⁾におけるEEWSの有効性の検証事例が挙げられる。

一方、日本において、南海トラフ地震を想定とした検証例として、気象庁は、緊急地震速報のシミュレーション¹⁴⁾を公開している¹⁵⁾。震源(破壊開始点)を潮岬沖に設定し、震度予測手法としてハイブリッド法を適用して、緊急地震速報(警報)の発表基準に従った場合に、発表地域が時間経過とともに広がる様子とP波・S波の到達状況を1秒ごとに表示するものであり、リアルタイム震

度との比較を通じて緊急地震速報による猶予時間の有効性が示されている。

ここで、南海トラフに発生する地震は、発生パターンが様々であり多様性が非常に高い。このため、確率論的津波ハザード評価を目的として、不均質すべり（大すべり域と背景領域）を考慮した2720の津波波源モデル¹⁶⁾が構築されている。焦ら¹⁷⁾は津波波源モデルに対して条件付発生確率を付与し、等価震源距離による地震動予測式に基づいて確率論的地震ハザード評価を行う手法を提案している¹⁸⁾。緊急地震速報の猶予時間分布は、震源域や震源などの条件の違いによって大きく異なると考えられ、効果検証においても、こうした多様性が及ぼす影響を考慮しておくことが重要と考えられる。

前報⁸⁾では実地震における発表実績に基づいて、観測震度を補間した震度分布と猶予時間を用いた評価を行った。一方、本研究では南海トラフ地震を想定地震とした評価を行うため、震源域や破壊開始点などの多様性を考慮したうえで、震度分布と猶予時間を推定する必要がある。このうち震度分布の推定に関しては、震源域の広がりやすべり量分布の多様性を表現した2720の波源断層モデルと、不均質すべりの影響による多様性を反映できる等価震源距離による地震動予測式を組み合わせた評価方法^{17), 18)}を適用する。また、猶予時間の推定に関しては、気象庁による評価方法¹⁹⁾を適用する（後出の3.を参照）。なお、前報⁸⁾と同様に、マグニチュードの推定値やそれに基づく推定震度分布および警報発表の対象範囲については扱わず、全域に警報が発表されたと仮定して検討を行う。また、地震動の経時特性を考えると、震度に相当

する強い揺れはS波到達より後に到達するが、本研究では、安全側の評価を行う観点から、その時間差については考慮せずに猶予時間を評価することとする。

以下、2.では、緊急地震速報に用いられる地震観測網の概要について説明し、本研究での扱いについて述べる。3.では、気象庁による緊急地震速報のデータ処理の流れとそれに関する本研究の扱い、および、猶予時間の評価方法について述べる。4.では、過去の南海トラフ地震の発生履歴を参考に代表的な震源域を3ケース取り上げ、それらの波源断層モデルに破壊開始点を設定して猶予時間分布を算出するとともに、推定震度分布および人口分布と重ね合わせて震度曝露人口と猶予時間の定量的評価を行う。5.では、2地点を対象として、2720の波源断層モデルを全て考慮し、震度ごとの猶予時間の確率分布を算出する。6.では、新たな観測網N-netの導入効果を視野に入れた分析を行う。7.では、本研究のまとめと今後の課題を述べる。

2. 緊急地震速報のための地震観測網の概要

緊急地震速報に利用されている地震観測点を図1、図2に示す。気象庁の全国約670箇所の地震計²⁰⁾に加え、防災科学技術研究所の「高感度地震観測網 (Hi-net)」²¹⁾と「基盤強震観測網 (KiK-net)」²²⁾の一部を合わせて約1,000箇所の地震計が利用されている。加えて、海底地震観測網として、「地震・津波観測監視システム (DONET)」²³⁾および「日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)」²³⁾が活用

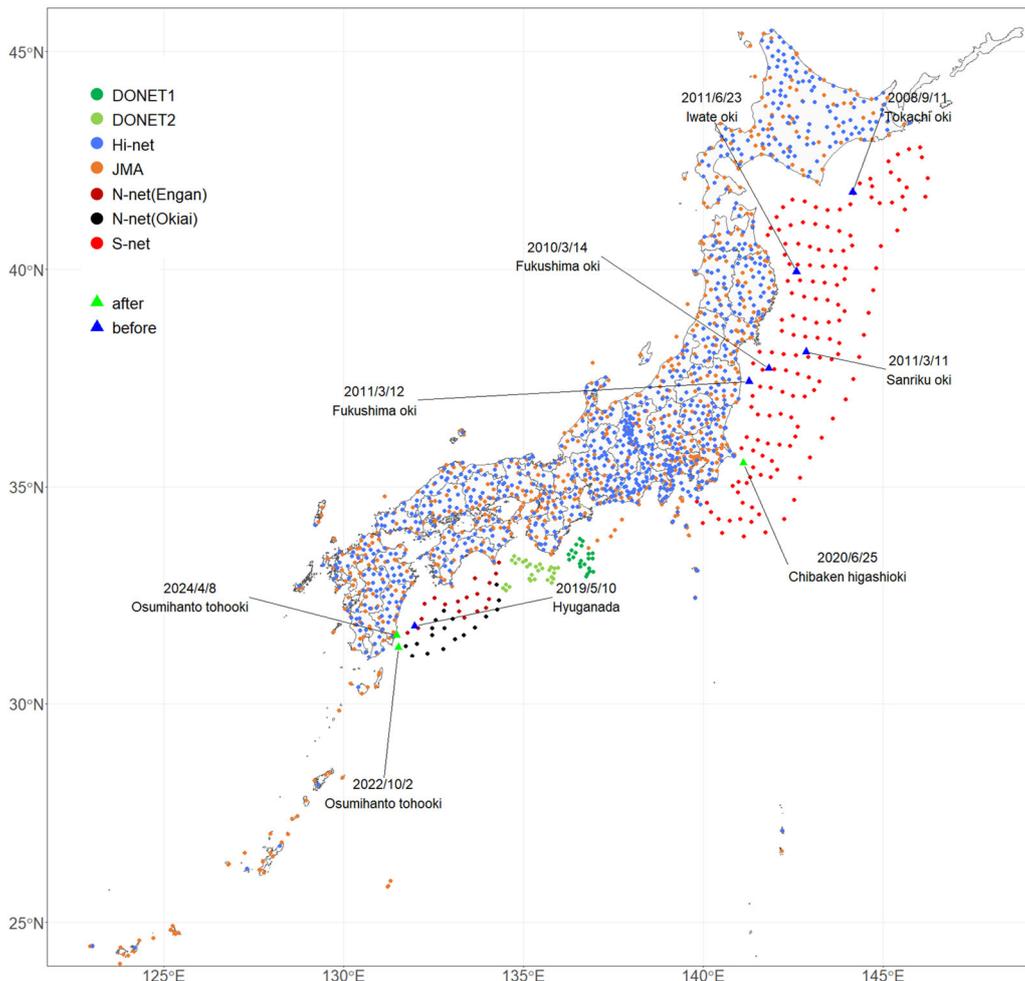


図1 緊急地震速報に用いられる地震観測網（導入予定のN-netを含む）および表1の9地震の震源

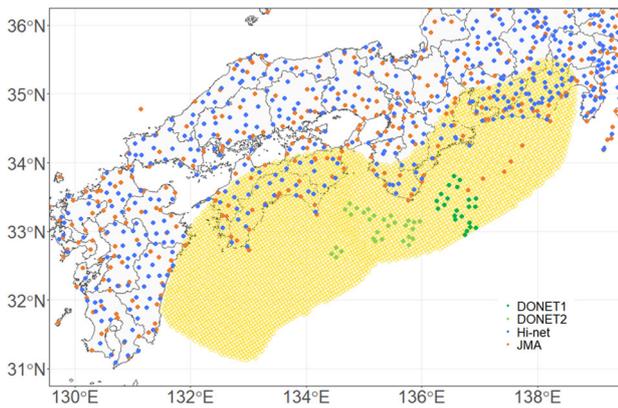


図2 南海トラフ地震の全体の震源域と現行の地震観測網（西日本，2024年8月時点）

されている。DONETは、南海トラフ付近を対象として海洋研究開発機構が開発・設置した観測網（現在では防災科学研究所に移管）であり、DONET1とDONET2の計51観測点から構成されている。S-netは、日本海溝付近を対象として防災科学研究所が管理・運用する観測網であり、計150観測点から構成されている。2015年3月31日からはDONET1の一部の活用が開始され、2019年6月27日からはDONET全体とS-netの一部（海溝軸より陸側の125観測点）、2020年3月24日からはS-net全体（海溝軸外側を含む150観測点）の活用が開始され、それぞれの海域で発生する地震に関する緊急地震速報の発表の迅速化が図られている²⁴⁾。

さらに防災科学技術研究所は、南海トラフ地震の震源域における観測空白域（高知県沖から日向灘）を解消するため、36観測点からなる「南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)」を整備している^{25),26)}。このうち沖合システム（18観測点）については整備を完了し、2024年11月21日に運用が開始され²⁷⁾、沿岸システム（18観測点）についても2024年度末に整備完了予定とされている²⁵⁾。

以下では、主として図2に示す現行の地震観測網を用いた検討を行うが、6.においては近い将来の観測体制としてN-net導入を踏まえた比較検討を行う。

3. 緊急地震速報の猶予時間の評価方法

(1) 気象庁のデータ処理の流れと本研究での扱い

気象庁による緊急地震速報のためのデータ処理などの手続き¹⁹⁾は大きく分けて、a)震源決定、b)地震動予測、c)主要動到達時刻予測、d)発表処理で構成される。以下、各項目に関する気象庁の扱いと本研究での扱いについて説明する。なお、緊急地震速報の発表基準に長周期地震動階級が追加され¹⁾、下記のb),d)に関しては別の規定²⁵⁾があるが、本研究では対象外とする。

a) 震源決定（震源設定）

震源要素（震源とマグニチュードM）を決定するためには、「単独観測点処理」の集積に応じてパーティクルフィルタを用いて逐次推定するIPF(Integrated Particle Filter)法に加えて、Hi-netを用いた着未着法、EPOS(Earthquake Phenomena Observation System)による自動震源処理が用いられてきたが²⁵⁾、2023年9月には、これらを統合した改良IPF法に一本化された²⁸⁾。

本研究では、南海トラフにおける想定地震を対象とするため、震源決定ではなく震源設定のプロセスとする。不均質すべり（大すべり域と背景領域）を考慮した波源

断層モデル¹⁶⁾に震源（破壊開始点）を設定して震源要素とする。また、猶予時間を評価するためには、実際の観測によるP波検測に代えて、模擬的にP波検測状況を付与する必要がある。本研究では、気象庁により震源深さ・震央距離ごとに作成された走時表（陸域用：JMA2001、南海トラフ用：JMA2020C）⁶⁾のP波走時 T_P を用いて状況付与する。これに関しては(2)で具体的に説明する。

b) 地震動予測

震源要素（震源とM）に基づく方法として、点震源からの最短距離（断層長を考慮）とMを工学的基盤上の地震動予測式に適用し、表層地盤による地盤増幅度を考慮して震度を予測する方法と、震源要素によらない方法（観測されたリアルタイム震度の面的展開によるPLUM(Propagation Local Undamped Motion)法や上下動振幅100galを閾値としたレベル法）が組み合わせて用いられている²⁵⁾。

本研究では震源とMに基づく方法を採用するが、震源域の広がりや不均質すべりの影響による多様性を考慮するため、波源断層モデル¹⁶⁾に等価震源距離²⁹⁾に基づく地震動予測式³⁰⁾を適用して震度を予測する¹⁸⁾。地盤増幅度に関しては、確率的地震ハザード評価で用いられる手法³¹⁾を適用する。

c) 主要動到達時刻予測

着目地点における主要動到達時刻は、気象庁により震源深さ・震央距離ごとに作成された陸域用の走時表(JMA2001)⁶⁾を用いて、S波走時 T_S として算出されている¹⁹⁾。本研究でもこの方法を踏襲する。

d) 発表処理

推定M3.5以上または予測最大震度3以上の場合、高度利用者向けの予報が発表され、さらに予測最大震度5弱以上の場合、予測震度4以上の地域に警報が発表される¹⁹⁾。本研究では、予報と警報の双方を扱うことはできるが、警報を対象とした例についてのみ報告する。ただし警報の発表範囲については扱わず、全ての地域に警報が発表されることを前提として評価を行う。

(2) 警報発表から主要動到達までの猶予時間 T_{WS} の評価方法

上記のa),c)に基づいて、緊急地震速報（警報）発表から主要動到達までの猶予時間 T_{WS} を評価する。 T_{WS} は、地震発生(Occurrence)から警報発表(Warning)までの時間 T_{OW} を、S波走時 T_S から差し引いた時間として次式で算出される。

$$T_{WS} = T_S - T_{OW} \quad [1]$$

ここで、 T_{OW} を、式[2]に示すように地震発生から地震検知(Detection)までの時間 T_{OD} 、地震検知から予報(第1報)発表(Alarm)までの時間 T_{DA} 、予報発表(第1報)から警報発表までの時間 T_{AW} に分解する。

$$T_{OW} = T_{OD} + T_{DA} + T_{AW} \quad [2]$$

以下、式[2]の右辺各項の時間を予測するための方法について説明する。

a) 地震発生から地震検知までの時間 T_{OD}

地震検知は、震源に最も近い観測点におけるP波検測により行われると考えられる。本研究では基本的に、陸域用の走時表(JMA2001)⁶⁾と南海トラフ用の走時表(JMA2020C)⁶⁾に基づいてP波走時 T_P を算出して T_{OD} とする。南海トラフ地震の震源域の全域において、概ね5km間隔

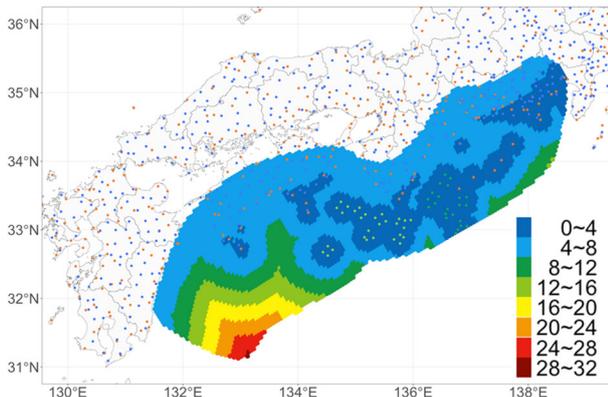


図3 現行の地震観測網の1観測点による T_{OD} の分布

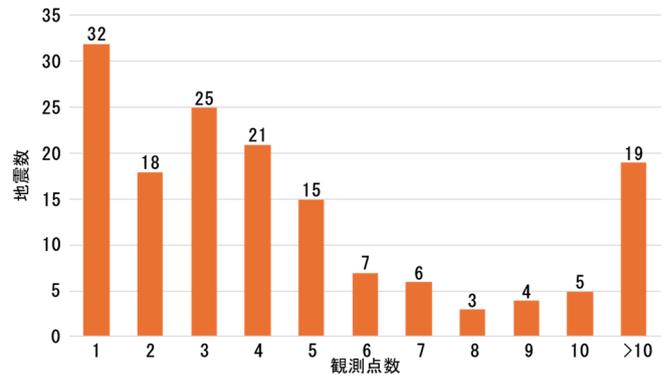


図4 発表記録の T_{OD} 内に含まれる観測点数の頻度分布

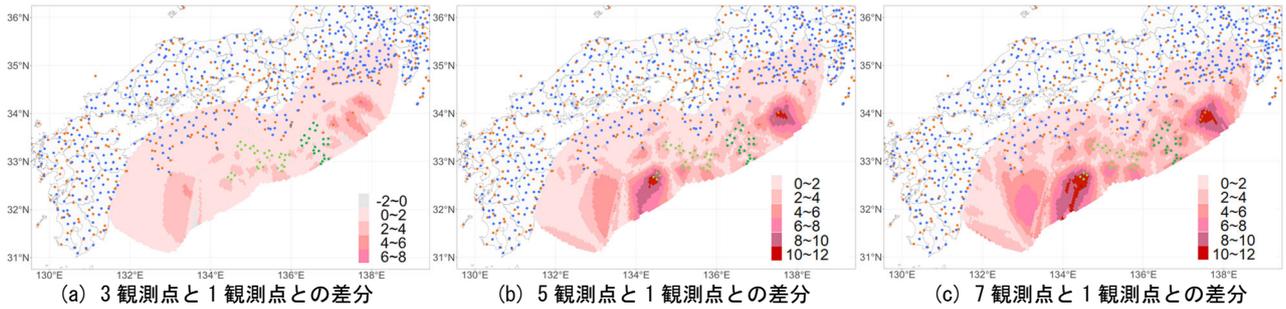


図5 現行の地震観測網に基づく T_{OD} に及ぼす必要観測点の影響

表1 震源深さ40 km以浅のプレート境界地震に関するデータ (2007年10月~2024年4月)

番号	震源地	深さ (km)	M_w	地震発生日付	地震発生時刻	地震発生から検知までの時間 T_{OD} (s)	地震波検知から第一報(予報)発令までの時間 T_{DA} (s)	予報発令から警報発令までの時間 T_{AW} (s)	地震波検知から警報発令までの時間 T_{DW} (s)
1	十勝沖	31	7.1	2008/09/11	09:20:51.0	12.8	7.8	1.9	9.7
2	福島県沖	40	6.7	2010/03/14	17:08:04.1	15.2	3.2	0.4	3.6
3	三陸沖	24	9.0	2011/03/11	14:46:18.1	22.1	5.4	3.2	8.6
4	福島県沖	40	6.2	2011/03/12	22:15:00.0	10.3	3.2	6.9	10.1
5	岩手県沖	36	6.9	2011/06/23	06:50:50.7	11.4	3.5	3.8	7.3
6	日向灘	25	6.3	2019/05/10	08:48:41.6	10.6	4.3	3.8	8.1
7	千葉県東方沖	36	6.1	2020/06/25	04:47:44.4	7.5	3.8	5.0	8.8
8	大隅半島東方沖	29	5.9	2022/10/02	00:02:32.8	7.2	4.5	0.0	4.5
9	大隅半島東方沖	40	5.2	2024/04/08	10:25:28.8	6.9	3.7	2.7	6.4
平均値							4.4	3.1	7.5

で5690の震源を設置して算出した T_{OD} の分布図を図3に示す。 T_{OD} の範囲は0~32sとなり、震源が観測点に近いほど短く概ね8s以下となる一方、現状では観測網が展開されていない区域(日向海盆、土佐海盆など)では8s以上となっており、海溝軸付近ほど長くなることが分かった。

ここで、2007年10月から2024年4月までの間に発表された166件の緊急地震速報(警報)の記録を用いて、 T_{OD} に関する分析を行った。 T_{OD} に関しては、地震タイプ依存性は小さく、震源と観測網との位置関係でほぼ決定づけられると考えられることから、全データを一括して分析した。まず各地震発生当時の地震観測網(2.参照)において実際の T_{OD} 内に含まれる観測点数をP波走時より求めた。異常値を除去した155件の結果を図4に示す。1観測点が最多であるが、ばらつきが大きく、数点の観測点が含まれる場合も多い。従って、実際の T_{OD} は図3より長くなる可能性もある。このため、3箇所、5箇所および7箇所の地震計でP波検出されるまでの時間を T_{OD} とした

場合と図3の T_{OD} との差を図5に示す。ほぼ変化がないところもあるが、観測点が少数のみ存在する領域で差が大きくなり、より長時間を要することが分かる。必要とする観測点数が増加するにつれて差は大きくなり、7箇所の場合では最大12s程度増加する。本研究では T_{OD} として1観測点での地震検知を基本とするが、複数観測点を要する場合は図5のように算出される差分値を追加すればよい。

b) 地震検知から予報発表までの時間 T_{DA} および予報発表から警報発表までの時間 T_{AW}

上述の発表実績を用いて T_{DA} と T_{AW} をプロットした結果を図6に示す。ここで、 T_{DA} と T_{AW} については、地震タイプや震源深さに依存すると考えられる。本研究では、南海トラフ地震を対象としているため、震源深さ40km以浅のプレート境界地震である9地震(図6の●)のみを使用する。これらを表1および図1の▲(S-net・DONET活用前:▲, 活用後:▲)に示す。表1中の T_{OD} は観測網に依存し、S-net導入前の日本海溝沿いの地震については

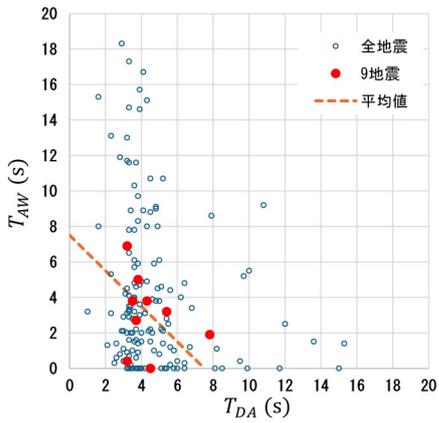


図6 T_{DA} と T_{AW} との関係および T_{DW} の平均値

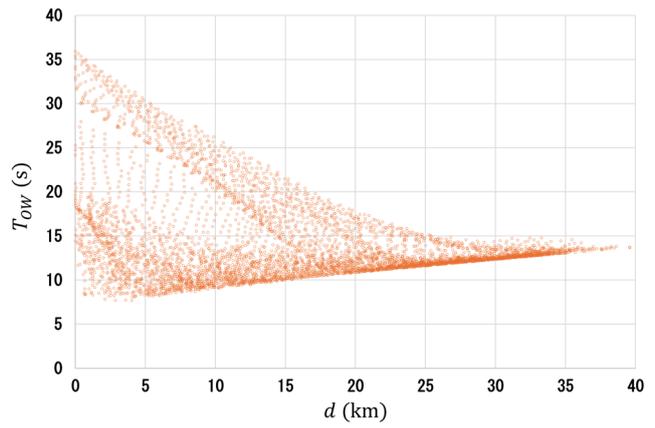
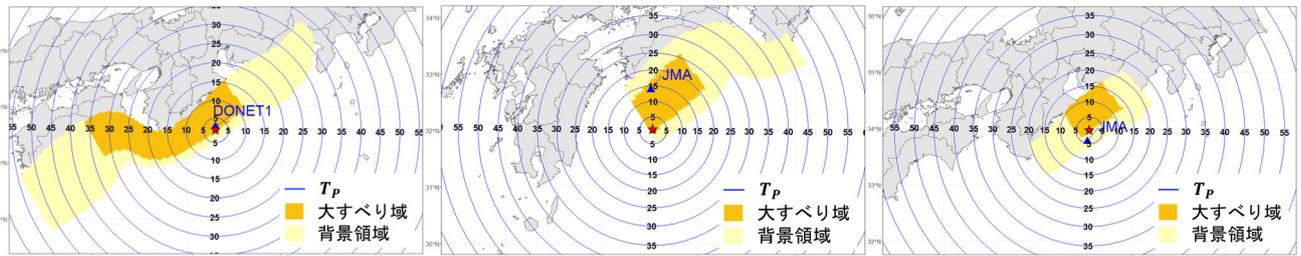


図7 現行の地震観測網による T_{OW} と震源深さ d との関係

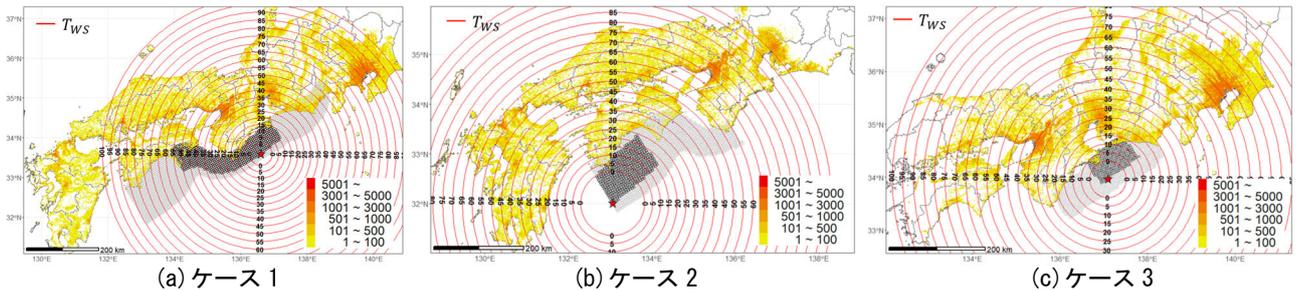


(a) ケース1 (3連動地震)

(b) ケース2 (南海地震)

(c) ケース3 (東南海地震)

図8 波源断層モデルにおいて大すべり域の最も浅い点に設定した震源(★)に対するP波走時(同心円)と最も近い地震計(▲)

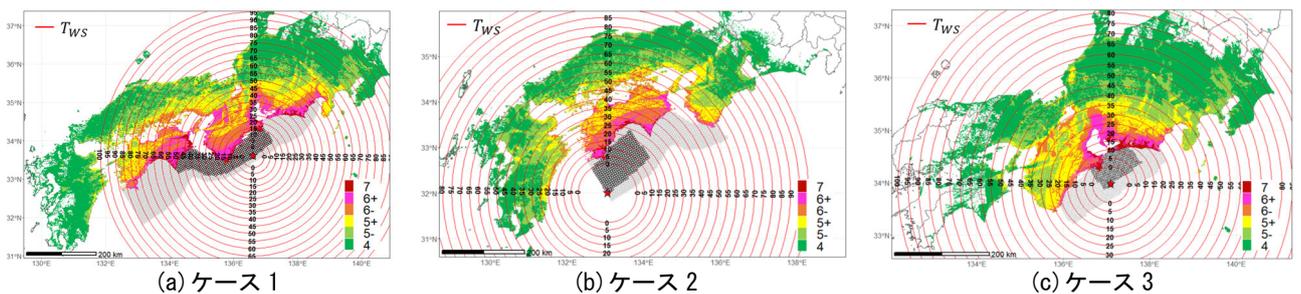


(a) ケース1

(b) ケース2

(c) ケース3

図9 猶予時間 T_{WS} と人口分布



(a) ケース1

(b) ケース2

(c) ケース3

図10 猶予時間 T_{WS} と震度分布

長くなっており、前項 a)で規定するためここでは使用しない。 T_{DA} については3.2~7.8sで平均4.4s、 T_{AW} については0~6.9sで平均3.1sとなっている。図6に示すように、 T_{DA} と T_{AW} には弱い負相関が認められ、 $T_{DA} + T_{AW}$ は3.6~10.1sで幅がやや狭くなり平均7.5sである。本研究ではこの平均値である $T_{DA} + T_{AW} = 4.4 + 3.1 = 7.5$ sを採用することとした。図6の破線はその平均値に相当する。

以上により、地震発生から緊急地震速報(警報)発表までに要する時間 T_{OW} を予測する。南海トラフ地震の震

源域全域に設定した5690の想定震源のそれぞれについて $T_{OW}(=T_{OD} + 7.5)$ を算出し、震源深さ d との関係を示すと図7のようになる。震源深さが深いところは陸域に近いため観測点密度が高く、 T_{OW} は14s程度に収束する傾向が認められる。震源深さが浅いところはほぼ海域であり、現状の地震観測網では観測空白域も含まれるため、 T_{OW} の幅は7~34s程度と広がっている。

4. 猶予時間の評価事例

本章では、3. の手法を用いて、現状の地震観測網に基づいて、南海トラフ地震の想定震源に対する緊急地震速報の猶予時間を評価する。さらに、猶予時間と人口分布、震度分布と重ね合わせ、猶予時間と震度曝露人口との関係について評価を行う。本研究では、過去の南海トラフ地震の発生履歴を参考に、震源域として1707年宝永地震、1946年南海地震、1944年東南海地震に相当する以下の3ケースを取り上げる。

ケース1：東海・東南海・南海の3連動地震（ほぼ全域：Mw8.7）

ケース2：南海地震（西側：Mw8.5）

ケース3：東南海地震（東側：Mw8.2）

各震源域に不均質すべり（大すべり域：橙色、背景領域：黄色）を設定した波源断層モデルを図8に示す。ここでは、波源断層モデルの大すべり域の中で最も浅い点に震源を設定している（後出の5.(2)を参照）。

(1) 猶予時間の評価

図8に示すように、震源から最も近い地震計の位置とP波走時 T_p （青線）の関係から T_{OD} を求める。ケース1では、震源近くのDONET1観測点により検知され $T_{OD} = 2.1$ sである。ケース2では震源が足摺岬沖にあり、陸域のJMA観測点により地震検知されるため、 $T_{OD} = 13.8$ sと長い。

ケース3では震源はJMAのケーブル式海底地震計と近く、 $T_{OD} = 4.4$ sとなった。以上より式[2]の T_{OW} は以下のよう求められる。

$$\text{ケース1： } T_{OW} = 2.1 + 7.5 = 9.6 \text{ s}$$

$$\text{ケース2： } T_{OW} = 13.8 + 7.5 = 21.3 \text{ s}$$

$$\text{ケース3： } T_{OW} = 4.4 + 7.5 = 11.9 \text{ s}$$

これとS波走時 T_S を用いて式[1]により算出した T_{WS} を図9に示す。5秒刻みの同心円で示しており、背景地図は250mメッシュの人口分布データ（2020年国勢調査夜間人口）である。ケース1については、陸域は猶予時間が確保されている。ケース2とケース3では、最短猶予時間は短くなる。

(2) 猶予時間と震度との関係に関する評価

猶予時間分布と震度分布との関係について、震度曝露人口の観点から評価を行う。震度分布の算出にあたっては、地震本部の確率論的津波ハザード評価で用いられる不均質すべりを考慮した2720の波源断層モデル¹⁶⁾を活用し、震源域の広がり不均質すべりの多様性を反映するため、等価震源距離²⁹⁾を用いた地震動予測式³⁰⁾によりPGV₄₀₀を算出する¹⁸⁾。PGV₄₀₀から計測震度への変換については、確率論的地震ハザード評価で用いられる手法³¹⁾を適用する。得られた震度分布を図10に示す。

図9の1秒刻みの猶予時間および人口分布と、図10の震度分布を重ね合わせて、震度階ごとの曝露人口（縦

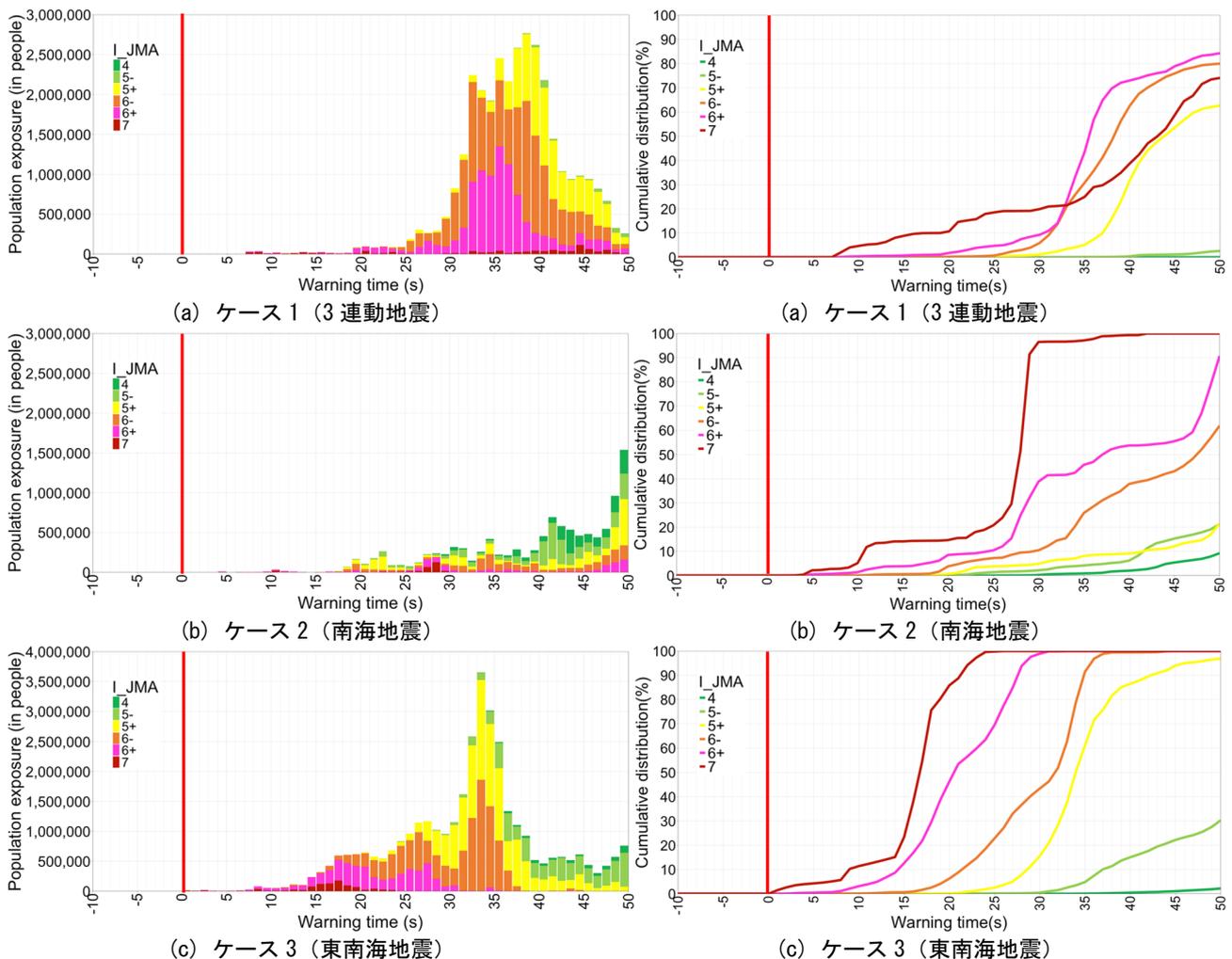


図11 猶予時間と震度曝露人口との関係

図12 猶予時間に関する震度曝露人口の累積分布

軸), 猶予時間(横軸)の関係をプロットしたものが図 11 である。さらに, 震度階ごとの曝露人口の総数を 100%に基準化して, 猶予時間に関する震度曝露人口の累積分布として表示したものが図 12 である。図 11 の震度階ごとの曝露人口の分布の違いを反映して, 図 12 の累積分布曲線の勾配にも違いが生じている。

(a)に示すケース 1 の結果をみると, 陸域では最短でも 7 s 程度の猶予時間が確保される。震度 6 弱や 6 強となる地域では 28 s 以上となる場所が多い。また, 震源域が広いので, 震度 7 となる地域でも震源から遠ければ猶予時間が 50 s 以上になるところもある。

(b)のケース 2 をみると, 震源が観測網から遠いため, 猶予時間が最短 3 s 程度しか確保されないところもある。ただし高震度となる地域でも, 猶予時間が 22 s 以上となる場所が多く, 震度 6 強の曝露人口の約 90%, 震度 7 の曝露人口の約 80%に相当する。

(c)のケース 3 をみると, 震度 7 の地域のうち震源に近い室戸岬では猶予時間は 0 s となり間に合わないが, 13 s 以上確保される地域が多く, 震度 7, 震度 6 強, 震度 6 弱の曝露人口のそれぞれ約 80%, 約 90%, 100%の人口に相当する。

以上の結果が示すように, 波源断層モデルと震源の組み合わせによって, 緊急地震速報の猶予時間も異なる。こうした多様性について網羅的かつ定量的に検討するため, 次章では, 2 つの対象地点に焦点を絞った評価例を示す。

5. 震源と波源断層モデルによる猶予時間の多様性に関する評価

本章では, 南海トラフ地震の波源断層モデルとして設定された全モデルを用いて, 緊急地震速報の猶予時間の多様性について, 確率論的に検討を行う。本研究では多数の地点を対象として評価を行ったが, ここでは震度および猶予時間の両面において顕著に異なる 2 つの例として, 震源域の直上に位置する室戸岬と, 震源域の外側に位置する重要な交通拠点である関西空港の 2 地点(図 13 の●)に関する結果を示す。

(1) 震源の多様性が猶予時間に及ぼす影響

南海トラフ地震の震源域に限定すれば, 猶予時間は対象地点と震源の位置関係のみで決まる。全震源域内を網羅するように設定した 5690 点をそれぞれ震源とする地震に対する猶予時間を図 13 に示す。猶予時間は対象地点から遠くなるほど長くなるが, 観測点の空間分布を反映してやや不規則な形状となっている。図 13 (a)の室戸岬は南海トラフ地震の震源域の直上に位置するため, 震源が近傍の場合は間に合わない場合もあり, $T_{WS} = -10 \sim -110$ s の範囲である。図 13 (b)の関西空港では $T_{WS} = 0 \sim 100$ s の範囲となり, 震源から距離があるため, ほぼ間に合う結果となっている。室戸岬は南海トラフの全体の震源域のやや西寄りであるため, 震源が東端付近の場合に猶予時間が長くなり, やや東寄りである関西空港では逆の傾向を示している。

(2) 波源断層モデルによる猶予時間と震度及びハザードレベルの関係

波源断層モデルの震源域および大すべり域の設定によ

り震度は大きく異なる。また震源に関して 5. (1)では網羅的に検討したが, 1944 年東南海地震および 1946 年南海地震の解析結果に基づいてアスペリティの浅い側に震源が設定された事例が見られる^{32), 33)}。一方, 「海溝型地震の強震動予測のレシピ」³⁴⁾においては, 「破壊の進む方向に地域性があり, 三陸沖では浅い方から深い方へ, 逆に南海トラフでは深い方から浅い方へ破壊が進む傾向がある」とされている。こうした多様性を考慮して, 猶予時間と震度との関係について確率論的な評価を行う。

まず, 2720 の波源断層モデルのそれぞれの最大すべり域の中の「最も浅い点」(図 13 の○)に震源を設定し, 各対象地点での猶予時間と震度を算出した。沈み込む海洋プレートにおいて, プレート境界の大すべり域における「浅い/深い」位置は, 陸域の大部分から見ると「遠距離/近距離」にそれぞれ対応する。従って「最も浅い点」に震源を設定すると, 猶予時間は相対的に長くなる傾向を示すと考えられる。次に, 波源断層モデルに重み(南海トラフ地震の発生を条件とした場合の各波源断層モデルの相対的地震発生確率)¹⁸⁾を付与した。これは長期間(例えば 30 年)での南海トラフ地震の発生確率を 1 とし, その期間での地震発生パターン(先発地震, 後発地震, さらにそれに続く後続地震)における先発地震としての条件付確率であることに注意されたい。高い確率が与えられているのは, 昭和東南海・南海地震, 安政東海・南海地震, 宝永地震など, 過去の発生履歴が確認されているものである。

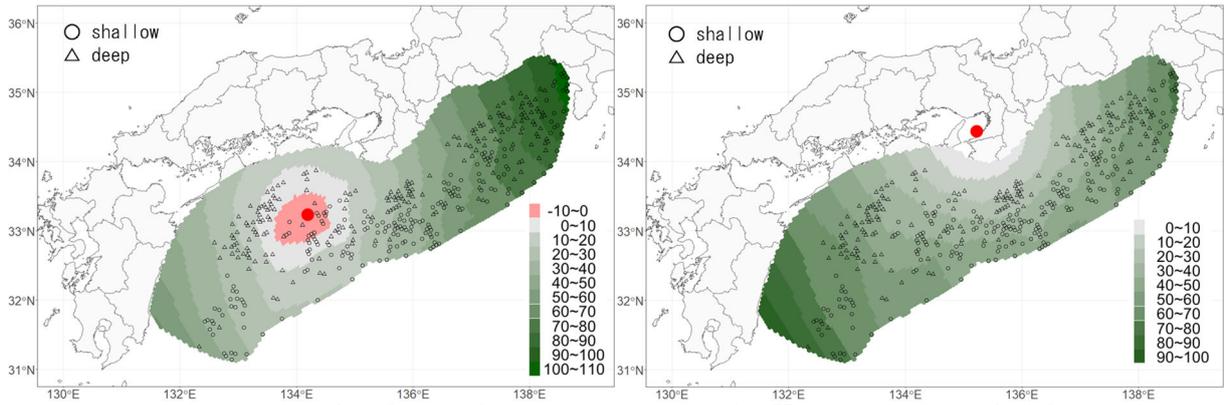
以上より, 1 秒刻みの猶予時間と震度階との同時確率としてプロットしたものが図 14 (a), (b)である。さらに猶予時間の短い順に震度階ごとの同時確率を累積し, 累積確率分布(非超過確率)を震度階で分解表示したものを図 14(c), (d)に示す。図右端の確率構成は, 各地点のハザードレベル(震度階の条件付発生確率)に相当している。

図 14(a), (c)の室戸岬では, 最大震度 7 で, 震度 7 の確率が最も高く, 次いで震度 4, 震度 6 強の順となっており, 震度レベルが大きく二分されている。猶予時間は高震度ほど短く, 震度 7 と 6 強では間に合わない場合もあるが, 震源が遠方で大すべり域が近傍にある場合は 100 s 程度確保される場合もある。猶予時間の幅は非常に広く, 10 s, 25 s, 70 s 程度にピークが見られる。これに対し, 図 14(b), (d)の関西空港の結果を見ると, 最大震度は 6 弱で, 震度 5 強の確率が最も高い。猶予時間は 25 s 以上となっており, 30 s と 45 s 程度にピークが見られる。

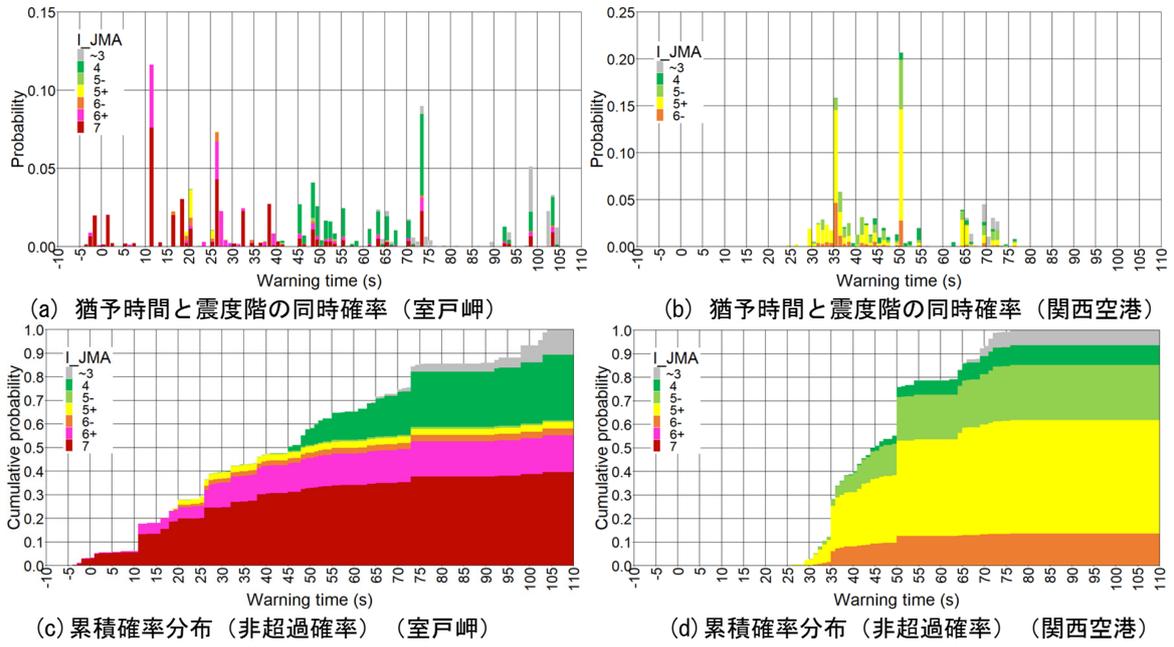
比較のため, 2720 の波源断層モデルのそれぞれの最大すべり域の中の「最も深い点」(図 13 の△)に震源を設定して, それ以外については同じ条件で検討を行った結果を図 15 に示す。「最も深い点」に設定した震源は, 浅い点よりも陸域から近距離となるため, 猶予時間は全般的に短くなる傾向が見られる。また, 室戸岬で猶予時間が 5~10 s に集中する様子が見て取れる。震度分布には変化がないため, 図 13 においてどの位置に震源が設定されたかによる違いが現れたものである。

6. N-net 導入後による緊急地震速報発表時間の短縮効果を考慮した評価

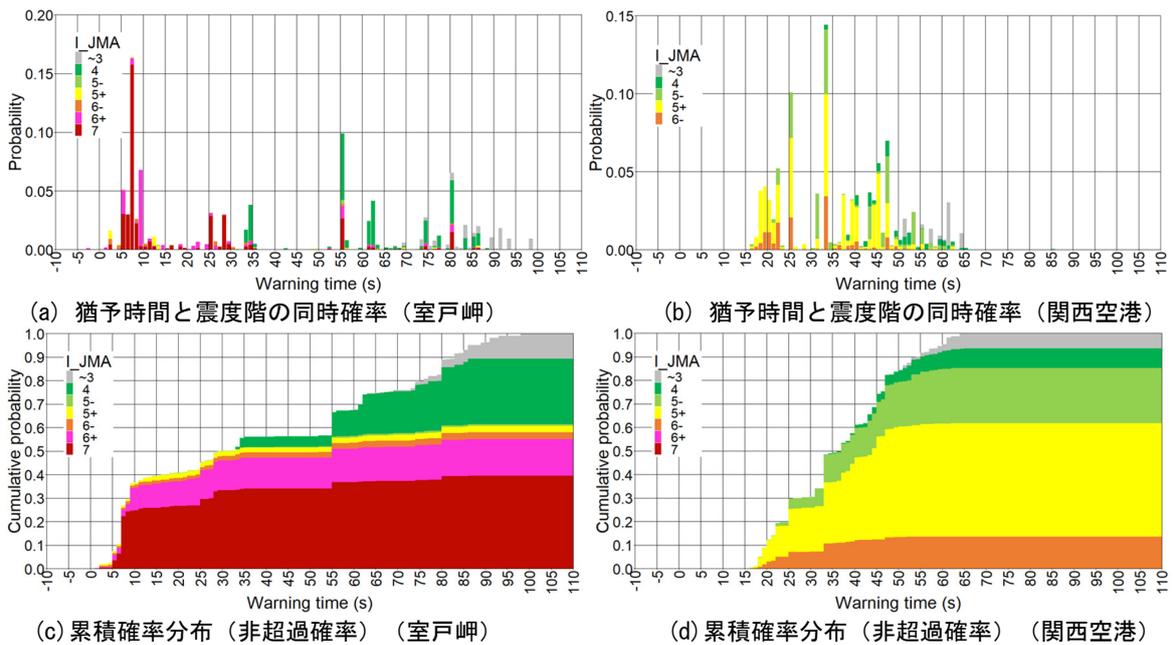
前章 5. までは, 現行の観測体制を前提とした評価を行った。本章では, 近い将来の観測体制として, 2. で述べた N-net (沖合システム 18 観測点および沿岸システム 18



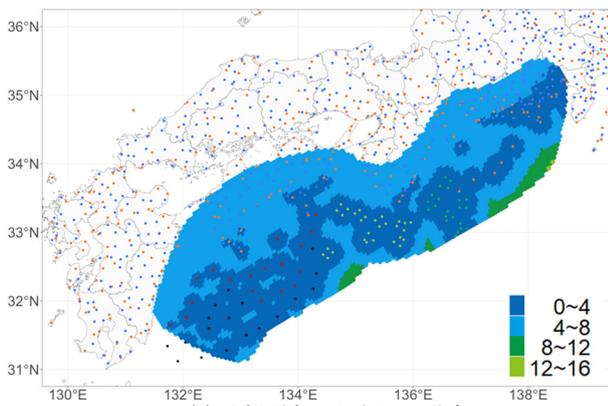
(a) 室戸岬 (●印) における T_{WS} の分布 (b) 関西空港 (●印) における T_{WS} の分布
 図 13 南海トラフ地震の震源域全域に震源を設定した場合の T_{WS} の空間分布 (-10~110 s を 12 階調で表示) と大すべり域の最も浅い点に設定した震源 (○印) と最も深い点に設定した震源 (△印) (図 14, 15 で使用)



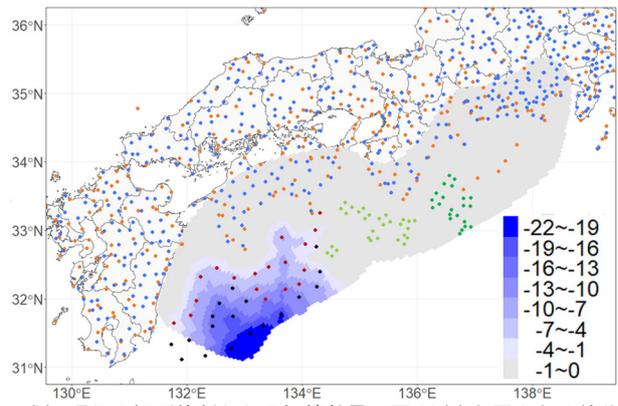
(a) 猶予時間と震度階の同時確率 (室戸岬) (b) 猶予時間と震度階の同時確率 (関西空港)
 (c) 累積確率分布 (非超過確率) (室戸岬) (d) 累積確率分布 (非超過確率) (関西空港)
 図 14 震度階と T_W の同時確率および非超過確率分布 (震源: 大すべり域の最も浅い点)



(a) 猶予時間と震度階の同時確率 (室戸岬) (b) 猶予時間と震度階の同時確率 (関西空港)
 (c) 累積確率分布 (非超過確率) (室戸岬) (d) 累積確率分布 (非超過確率) (関西空港)
 図 15 震度階と T_W の同時確率および非超過確率分布 (震源: 大すべり域の最も深い点)

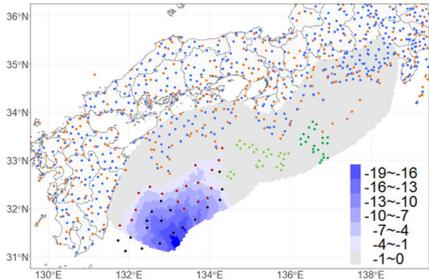


(a) 1観測点による T_{OD} の分布

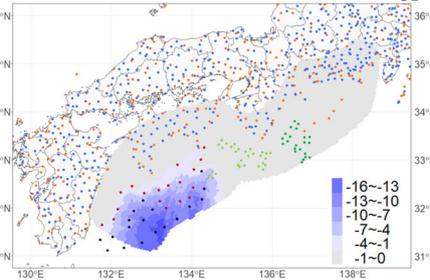


(b) 現行の観測体制からの短縮効果 (図16(a)と図3との差分)

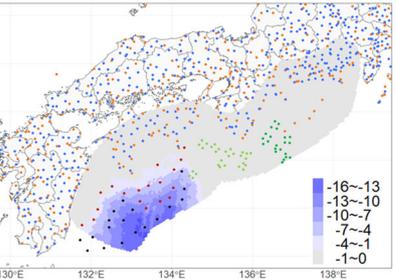
図16 N-net導入後の1観測点による T_{OD}



(a) 3観測点



(b) 5観測点



(c) 7観測点

図17 N-net導入による T_{OD} の短縮効果 (図3との差分)

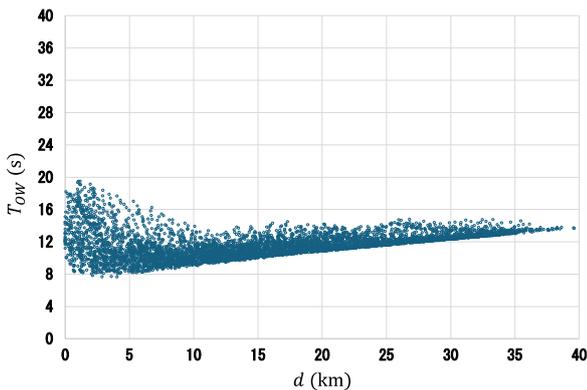


図18 N-net導入後の T_{OW} と震源深さ d の関係

観測点^{25), 26)}の導入後の緊急地震速報(警報)の猶予時間について、現行の観測体制との比較を行い、本研究における評価結果に及ぼす影響について検討する。

南海トラフ地震の震源域に設定した5690点を震源とする地震について、N-net導入後の1箇所の地震計による T_{OD} を図16(a)に示し、現行の観測体制を前提とした図3との差分を図16(b)に示す。N-netが展開される日向海盆と土佐海盆の領域で地震検知の短縮効果が認められる。その最大値は21sであり、文献²⁶⁾で指摘されている20sとほぼ整合する結果が得られた。同様に、現行の観測体制において3箇所、5箇所、7箇所の観測点による場合に、N-net導入前後の T_{OD} の差分を図17(a)~(c)にそれぞれ示す。必要とされる観測点数の増加につれて差分が小さくなるが、7箇所の場合でも最大15s程度の短縮効果がある。

N-net導入後の観測体制に基づいて式[1], [2]で算出される T_{OW} と震源深さとの関係を図18に示す。導入前の図7と比較すると、日向海盆と土佐海盆に相当する震源深さ25km以浅で T_{OW} が短縮されている。

このようにN-net導入により警報発表までの時間の短縮

効果があるため、それに応じて、本研究で評価した猶予時間よりも伸長することが期待される。

7. おわりに

本研究では、南海トラフ地震を対象として、緊急地震速報の猶予時間の有効性について、多面的な検討を行った。得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 代表的な3ケースの地震(東海・東南海・南海の3連動地震, 南海地震, 東南海地震)を対象として、それぞれに震源(破壊開始点)を設定し、緊急地震速報の猶予時間分布を算出した。地震発生から地震検知までの時間については、震源直近の観測点におけるP波走時により求めた。複数観測点を要する場合の差分情報も示した。地震検知から警報発表までの時間については、9個のプレート境界地震の緊急地震速報の発表実績に基づく平均値7.5sを採用した。
- 2) 猶予時間分布, 人口分布, 震度分布を重ね合わせ、猶予時間と震度曝露人口の関係について評価を行った。大すべり域を考慮した波源断層モデルと震源設定との組み合わせによって、猶予時間が大きく異なることについて、震度曝露人口の観点から定量的に明らかにした。
- 3) 2地点(室戸岬, 関西空港)を対象として、猶予時間の多様性について、網羅的かつ確率論的に明らかにした。南海トラフ地震の全震源域に震源を網羅的に配置し、対象地点における猶予時間を可視化した。さらに、南海トラフ地震の全2720の波源断層モデルを対象として、猶予時間と震度階の同時確率を評価するとともに、猶予時間の累積確率分布を震度階ごとに分解して表示した。震源設定については、大すべり域の浅い点に設定した場合と深い点に設定した場合を比較して示し、後者の方が前者よりも陸域か

らの距離が全般的に短くなるため、猶予時間も短くなる傾向を示すことを明らかにした。

- 4) 「南海トラフ海底地震津波観測網 (N-net)」の本格的な導入を視野に入れて、導入前後の比較を行った。土佐海盆から日向海盆にかけて発生する地震に対する緊急地震速報発表までの所要時間については最大 20 s 程度の短縮効果が認められた。本研究で評価した猶予時間を更新するための差分情報を表示した。

本研究では、地震動強度の経時変化については扱わなかったが、継続時間が長い南海トラフ地震の地震動においては、S 波到達時刻と震度に相当する強い揺れの発現時刻の時間差も長いと考えられる。猶予時間の検証³⁵⁾にあたっては、強い揺れの下での人間行動³⁶⁾や行動難度³⁷⁾を考慮するのが理想的であり、今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 24K01130 の助成、および、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2125 による「東海国立大学機構メイク・ニュー・スタンダード次世代研究事業」の支援を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁：緊急地震速報について、
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eww/data/nc/index.html>
(2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 2) 気象庁：緊急地震速報の特性や限界、利用上の注意、
<https://www.data.jma.go.jp/eww/data/nc/shikumi/tokusei.htm>
(2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 3) 吉成英俊，大原美保，日黒公郎：地域特性を考慮した緊急地震速報の効果検証と今後の活用戦略に関する研究，生産研究，第 63 巻，第 6 号，pp.817-822，2011.
- 4) 気象庁：緊急地震速報の発表状況，
<https://www.data.jma.go.jp/eww/data/nc/rireki/rireki.html>
(2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 5) 気象庁地震火山部：令和 5 年 4 月から令和 6 年 3 月までに発表した緊急地震速報の検証，2024.
<https://www.data.jma.go.jp/eww/data/nc/rireki/hyoka/fy2023.pdf>
- 6) 気象庁：走時表・射出角表・速度構造データファイル，
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/catalog/appendix/trtme/trt_j.html (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 7) 能島暢呂，久世益充，杉戸真太，鈴木康夫：震度曝露人口による震災ポテンシャル評価の試み，自然災害科学，Vol.23, No.3, pp.363-380，2004.
- 8) 熊野颯，熊禹禹，能島暢呂：近年の地震を対象とした緊急地震速報による猶予時間と観測震度分布との関係について，第 44 回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号 No.335，2024.
- 9) Kumar, P., Kamal, Sharma, M. L., Pratibha., Jakka, R. S., Kumar, A., Joshi, G. C. and Rautela, P.: Successful alert issuance with sufficient lead time by Uttarakhand State Earthquake Early Warning System: Case study of Nepal earthquakes, Journal of Geological Society of India, Vol. 99, Number 3, pp.303–310, 2023.
- 10) Finazzi, F. and Massoda Tchoussi, F. Y.: Assessing the alerting capabilities of the Earthquake Network early warning system in Haiti with Monte Carlo simulations, Stochastic Environmental

Research and Risk Assessment, Vol.38, 10p., 2023.

- 11) Allen, R.: The ElarmS earthquake early warning methodology and application across California, Chapter 3, Earthquake Early Warning Systems (Eds. Gasparini, P. et al.), pp.21-43, Springer, 2007.
- 12) Pinsky, V.: Modeling warning times for the Israel's earthquake early warning system, Journal of Seismology, Vol.19, pp.121–139, 2015.
- 13) Cremen, G., Galasso, C. and Zuccolo, E.: Investigating the potential effectiveness of earthquake early warning across Europe, Nature Communications, 13, Article number 639, 2022.
- 14) 気象庁：緊急地震速報評価・改善検討会（第 7 回，平成 28 年 3 月 8 日）資料，2016.
- 15) 気象庁：緊急地震速報シミュレーション，
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/eeew-hyoka/07/EewSim/> (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 16) (国研)防災科学技術研究所：南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価，防災科学技術研究所研究資料，第一部 付録編一，第 439 号，2020.
- 17) 熊禹禹，能島暢呂：南海トラフ地震の地震ハザード評価のための等価震源距離の適用と不確定性評価，JCOSAR2023 論文集（第 9 回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム），講演番号 OS10-5B, pp.359-362，2023.10.
- 18) Jiao, Y. and Nojima, N.: Application of equivalent hypocentral distance for seismic hazard assessment, The 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), Milan, Italy, SHR2 (Mon, AM), 9p., 2024.
- 19) 気象庁地震火山部：緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料（令和 6 年 4 月 11 日），2024.
<https://www.data.jma.go.jp/eww/data/nc/katsuyou/reference.pdf> (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 20) 気象庁：震度観測点一覧，
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/data/shindo/code_p.zip (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 21) (国研) 防災科学技術研究所：防災科研の観測点情報データセットについて
https://www.hinet.bosai.go.jp/st_info/detail/dataset.php
- 22) (国研) 防災科学技術研究所：KiK-net 観測点，
<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/db/index.html?all> (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 23) (国研) 防災科学技術研究所：海底地震津波観測網，
<https://www.seafloor.bosai.go.jp/> (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 24) (国研) 防災科学技術研究所：海底地震観測データの緊急地震速報への活用，
https://www.bosai.go.jp/info/press/2019/20190621_02.html (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 25) (国研) 防災科学技術研究所：南海トラフ海底地震津波観測網 (N-net) 沖合システムの整備完了へ，プレス発表資料 (2024 年 6 月 18 日)，
https://www.bosai.go.jp/info/press/2024/pdf/20240618_01_press.pdf (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 26) 青井真，武田哲也，功刀卓，植平賢司，篠原雅尚，棚田俊收，永田茂，三好崇之，高橋成実：南海トラフにおける新たな海底地震津波観測網 N-net，日本地球惑星科学連合大会予稿集，HDS08-01，2020.
<https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2020/subject/HDS08-01/detail?lang=ja> (2024 年 7 月 1 日閲覧)
- 27) 気象庁：津波情報等に活用する観測地点の追加について～「南海トラフ海底地震津波観測網 (N-net)」沖合システムの活用開始～（令和 6 年 11 月 14 日），

https://www.jma.go.jp/jma/press/2411/14a/20241114_N-net.html
(2024年12月2日閲覧)

- 28) 気象庁地震火山部：緊急地震速報の技術的改善について～震源推定手法の改善により揺れの過大予測を低減～（令和5年8月），2023.
<https://www.data.jma.go.jp/suishin/oshirase/pdf/20230829.pdf>（2024年7月1日閲覧）
- 29) Ohno, S., Ohta, T., Ikeura, T. and Takeumura, M.: Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, Vol.218, pp.69-81, 1993.
- 30) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，*日本建築学会構造系論文集*，No.523，pp.63-70，1999.
- 31)（国研）防災科学技術研究所：「全国地震動予測地図」作成手法の検討，*防災科学技術研究所研究資料*．第336号，pp.127-128，2009.11.
- 32) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）強震断層モデル編－強震断層モデルと震度分布について－，2012.
- 33) 壇一男，石井やよい，宮腰淳一，高橋広人，護雅史，福和

伸夫：マグニチュード9クラスのプレート境界地震による強震動予測のための断層モデルの設定方法－南海トラフ巨大地震への適用と東海地方における強震動の試算例－，*日本建築学会構造系論文集*，第78巻第692号，pp.1685-1694，2013.

- 34) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），2020.
- 35) Allen, R. M. and Melgar, D.: Earthquake Early Warning: Advances, scientific challenges, and societal needs, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol.47, pp.361-88, 2019.
- 36) 藤岡正樹，翠川三郎：防犯カメラ映像に基づく大規模集客施設での地震時避難行動シミュレーション，*地域安全学会論文集* No.27，pp.267-273，2015.
- 37) Takahashi, T., Saito, T., Azuhata, T. and Ohtomo, K.: Shaking table test on indoor human response and evacuation action limit in strong ground motion, *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, Paper No.1320, August 2004. (on CD-ROM)

(原稿受付 2024.8.31)
(登載決定 2025.1.25)