

□海域観測データを活用した沈み込みプレート 固着状況モニタリング：海溝型巨大地震に備える

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 有吉慶介

1. はじめに

近年、地震や地殻変動を高感度かつ広域にわたる観測技術の進展によって、通常の地震に比べて時間をかけて断層が滑るために人間では揺れを感じない「ゆっくり地震」の発生が、日本周辺や世界中のプレート沈み込み帯で知られるようになってきました^[1]。この「ゆっくり地震」は、通常の地震に比べて小さい外力によって活動が変化することが知られており^[2]、海溝型巨大地震の震源域近傍に分布していることから、南海トラフ沿いの固着状況を把握する上で、重要な監視ツールの一つとなっています。

「ゆっくり地震」は、規模の大きなものからスロースリップイベント（※地震計では揺れないので、地震ではなく「イベント」と呼びます）・超低周波地震・低周波微動などに大別されており、規模の大きなスロースリップイベントは超低周波地震および低周波微動を活性化させる場合があることが知られています^[3]。スロースリップイベントは歪計^[4,5]、超低周波地震・低周波微動は広帯域地震計でそれぞれ捉えられています^[6]。

南海トラフについて着目すると、東南海地震・南海地震の震源域をカバーするかたちで DONET と呼ばれる海底観測網が設置されています（図1）。DONET は、海域で発生する地震・津波を

常時観測監視し、緊急地震速報への活用などを目的としたもので、文部科学省の委託事業として JAMSTEC が開発し、南海トラフ周辺の深海底に設置したデータをリアルタイムで伝送するシステムです。紀伊半島沖熊野灘の水深1,900～4,400m の海底に設置された DONET1 および、潮岬沖から室戸岬沖の水深1,100～3,600m の海底に設置された DONET2 から構成されています^[7]。各観測点には強震計、広帯域地震計、水晶水圧計（海底水圧計）、微差圧計、ハイドロフォン、精密温度計が設置されています。DONET は、DONET2 の完成をもって2016年4月に国立研究開発法人防災科学技術研究所へ移管され、その後の運用も行われています。DONET で取得したデータは、気象庁等にリアルタイムで配信され、津波警報にも活用されています^[8]。

孔内観測装置は、海底下の地震・地殻変動の高感度な観測等を目的として、JAMSTEC 他によって開発された掘削孔内の観測システムです。DONET へ接続することによって、長期連続リアルタイム観測が可能となりました^[9]。

本稿では、それらの観測事例を通じて、近い将来に発生すると指摘されている南海トラフ沿いの海溝型巨大地震に向けての現状と課題を紹介します。

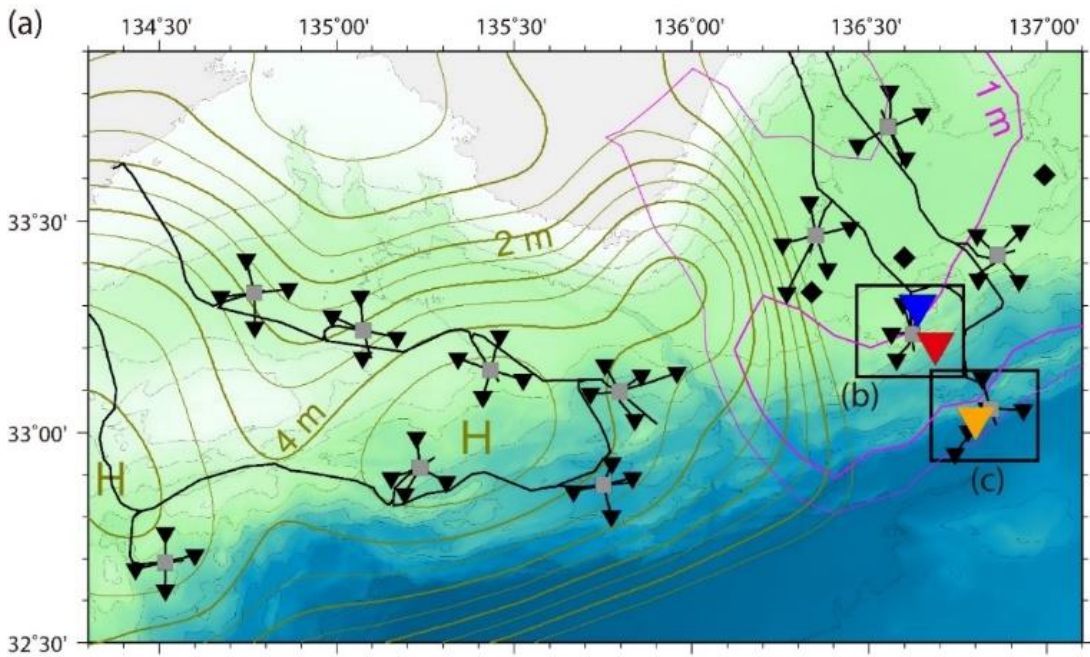
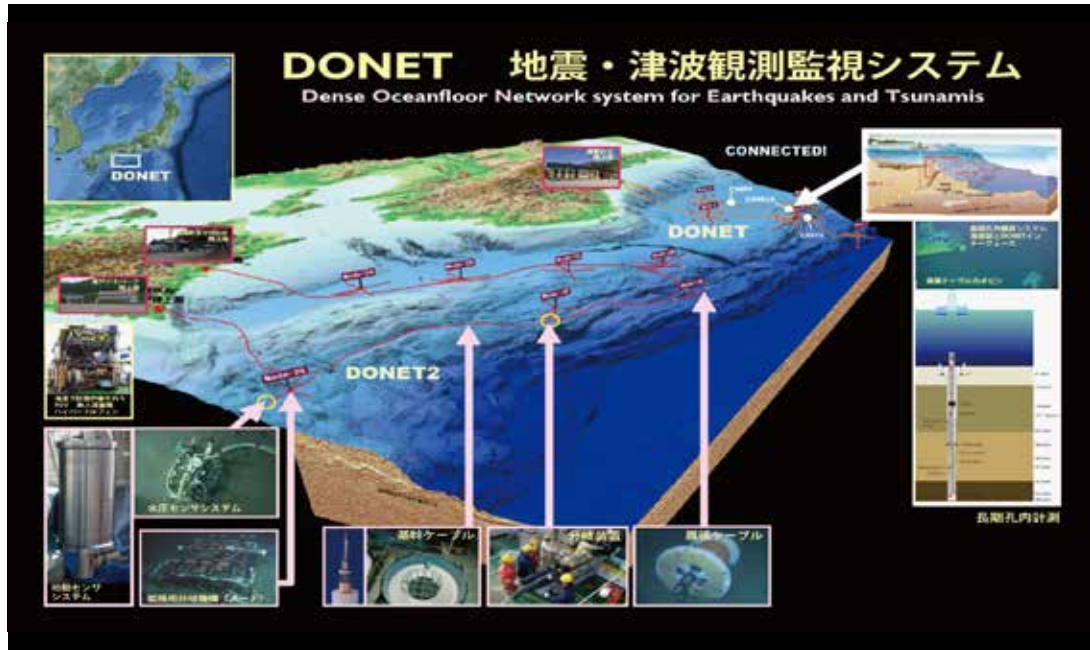


図1. DONET (地震・津波観測監視システム) の概要 (上) と DONET (▼)・孔内 (▼▲▼) 観測点。コンターは1944年東南海地震・1946年南海地震のすべり量分布^[10]。

2. スロースリップの活動履歴から紐解く南海トラフにおけるプレート間すべり過程

スロースリップイベントは、陸と海のプレート間で固着していたものが一部剥がれた過程をみていると考えられています^[11]。一方で、海溝型

巨大地震が発生する直前には、周辺で固着が剥がれ始めることが予想されています^[3]。私たちが知りたいのは、南海トラフにおいてスロースリップがどこでどれくらいの量で起きたのか、ということに帰着します。そこで、間隙水圧を体積歪に換算することで、各孔内観測点における収縮・膨張の変化量に基づいて、断層モデル (位置・面の形

状・すべり量など)の絞り込みを行いました。その結果、Mw(モーメントマグニチュード)5程度で数cm程度のすべりが1年に1回程度で繰り返し起きていることが分かりました。この領域周辺では、プレート運動速度が6cm/year程度であるため、そのうちの30-50%程度の歪がスロースリップイベントによって解放されていると考えられています^[12]。

一方で、超低周波地震は、DONET観測点の広帯域地震計記録にバンドパスフィルタを適用し、整合するように断層メカニズム解を推定することができます。その結果、プレートの沈み込み方向に沿った低角逆断層すべりとして、スロースリップイベントの断層モデル上で起きていることが分かりました(図2)。これらの結果より、スロースリップイベントが超低周波地震を誘発するかどうかは、スロースリップイベントの断層すべり域が超低周波地震の震源域を通過するかどうかで決まることになります。

2020年3月および2023年3月のスロースリップイベントでは、この手法を用いて発生開始から2020年3月では数日、2023年3月では1日後に間隙圧のデータ自動解析システムから検知し、その変化のパターンから断層すべり域が超低周波地震の震源域と重なる条件だったことから、超低周波

地震が起きる見通しを立てました。そしてその数日後、実際に超低周波地震が発生したことをDONET広帯域地震計から検知しました。これら一連の結果は、海底下の地殻変動および地震活動に関する推移予測に向けた、小さいながらも着実に前進してきた成果であったといえるでしょう。

3. 間隙圧とDONET海底圧力計を併用した体積歪変化の超精密観測

しかしながら、間隙水圧を計測する孔内観測機器および海底に設置されたDONETの海底水圧計では、気象・海象擾乱によって影響を受けたりすると、その圧力変化がスロースリップイベントの発生を示すものかどうかを短時間で正しく判断するのが困難な状況となる、という問題を抱えていました。

現状では、「ゆっくり地震」が発生したと客観的に判断できる根拠として、複数の間隙水圧計で同時に変化した場合や、スロースリップイベント発生期間中に超低周波地震・低周波微動が複合的に起きた場合などに限られていました。一方で、スロースリップイベントが発生しても超低周波地震を伴わない場合や、観測点配置の関係で間隙水圧計や地震計で捉え切れない場合もあります。そ

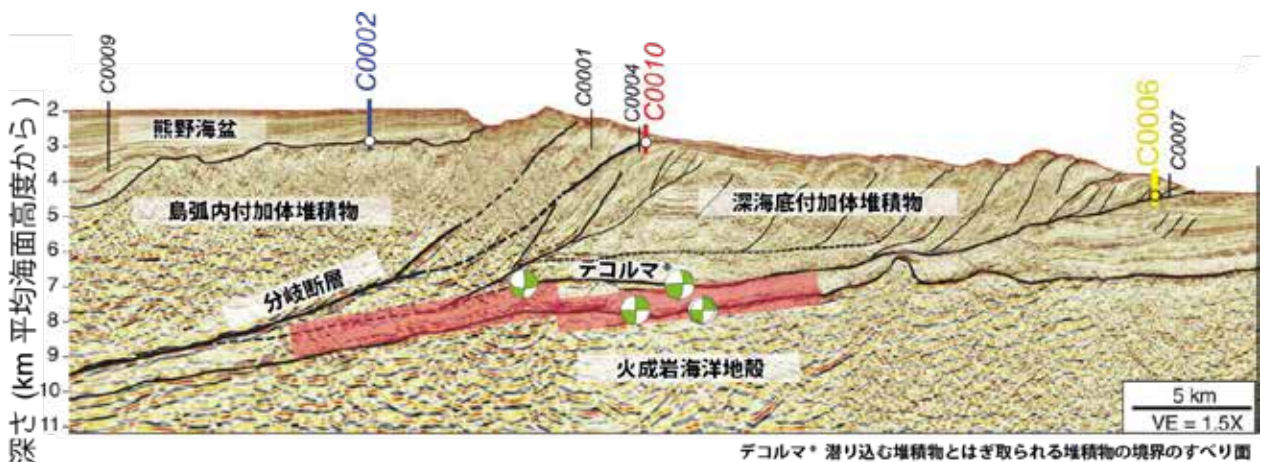


図2. 2020年3月に発生したスロースリップイベントの断層モデル(赤色)と超低周波地震の断層メカニズム解(ビーチボール)

のため、南海トラフ沿いのプレート間固着の状況についてモニタリング検知能力をさらに向上させる解析手法の開発が求められていました。

海底地殻変動成分の抽出手法として、これまでには孔内の間隙水圧記録に含まれる潮汐成分を除去するために孔口に設置された海底水圧計の記録を用いてきました。近年、その手法を改良し、孔口の海底水圧計だけでなく、周辺の DONET 海底水圧計も活用することで、これまでの手法と比較して潮汐によるノイズを1/4~1/2以下に軽減させることに成功しました(図3)。これにより、2020年3月のスロースリップイベント発生に伴う、ナノスケール(10の9乗分の1)の体積歪変化を検出することにも成功しました。ここまで微小な体積歪変化を南海トラフ沿いで検知できたのは、今回の事例が初めてです。これらの結果は、検知したスロースリップイベントは、南海トラフ近傍までは達していないこと、収縮の体積歪が僅かに増加したことが確かめられたことを意味します。

4. 黒潮蛇行とスロースリップとの関連性

上記のスロースリップイベントについて、体積歪変化に基づく海底地殻変動の時空空間スケール

を見積もると、1~2週間の継続時間と C0002~C0006(約50km)程度のもとなります。これらのスケールは海洋変動では中規模渦に相当すると考えられます。中規模渦は黒潮蛇行によって励起される現象であることから、ここでは、中規模渦が再現可能な海洋モデル(海中天気予報)の適用を試みました^[14]。

所属機関である海洋研究開発機構では、独自に海洋モデル(JCOPE)を開発しています^[15]。現在ではそのうち、最新版である JCOPE-T DA を活用して、気象・海象擾乱による海底圧力変化を解析しています。スロースリップイベントが起きた期間において、黒潮蛇行に起因する海底圧力変化を計算した結果、陸側では増加し、海溝側では減少する傾向が続いていたことがわかりました。海底圧力が減少すると摩擦力が低下するため断層面は滑りやすくなると考えられます。

2020年3月のスロースリップイベントは、海溝付近まですべりが到達していることが超低周波地震の活動などから確かめられており、スロースリップイベントの発生領域の拡大を黒潮蛇行が誘発した可能性を示唆します。また、5日程度の短い周期で変動する海洋擾乱成分について調べると、スロースリップイベントが終息したタイミングで

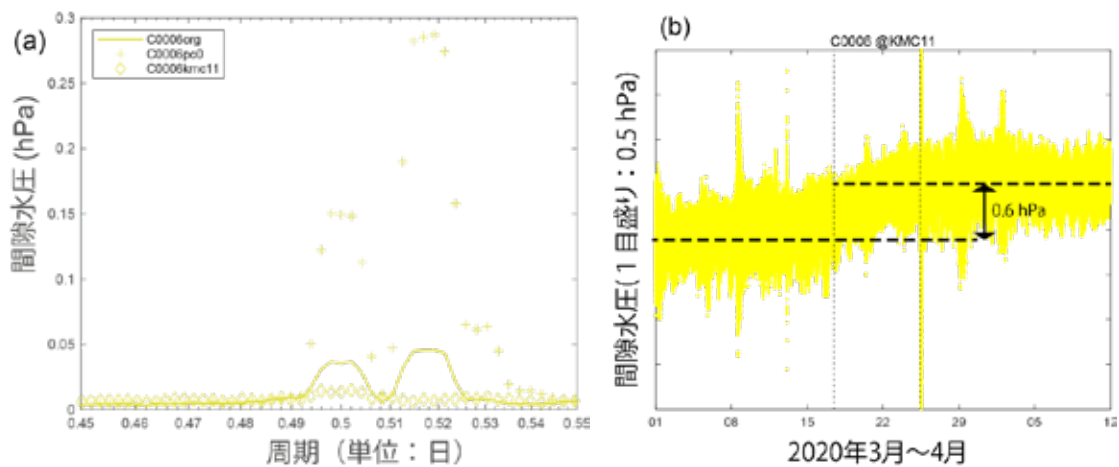


図3. (a) 間隙水圧の振幅スペクトラムの比較。実線はこれまでの手法、◇は今回の手法の結果。0.5日、0.52日付近の主要な潮汐成分によるノイズが大きく軽減されている。(b) 今回の手法で検知に成功した間隙水圧変化。0.6hPaは、10ナノ・ストレインに相当^[13]。

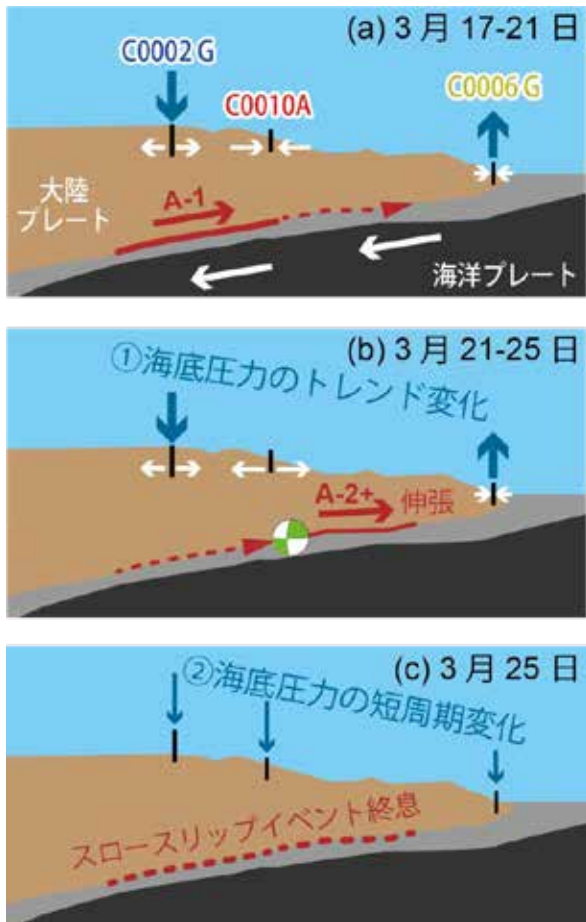


図4. 2020年3月のスロースリップイベントの発生～終息過程

海底圧力が増加していました（図4）。

同程度の大きさの圧力変化を伴う海洋変動とスロースリップイベントが終息するタイミングとに相関があることは、ニュージーランド北島沖のヒ克蘭ギ沈み込み帯でも統計的に確かめられており、これらの結果は、黒潮がスロースリップイベントの領域拡大および終息に影響を及ぼしている可能性を示唆します。

5. 今後の課題

間隙水圧を用いた海底地殻変動のモニタリングは、陸域観測網では検知することが困難な南海トラフ近傍での「ゆっくり地震」を捉える上で、有力な観測手段となっています。そのため、間隙水

圧の時系列データは、政府の地震調査委員会^[16]・気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」^[17]において月例資料としてJAMSTECから報告されており、南海トラフ沿いのプレート間固着の状況を把握するための参考資料として活用されています。

一方で、陸域および海底下の体積歪変化は「ゆっくり地震」の他にも、台風や爆弾低気圧などの気象擾乱などにも影響を受けます。また、黒潮蛇行の発生による潮流変化が海底圧力をはじめとする海底地殻変動に及ぼす影響についても調査を進める必要がありました。今回紹介した研究事例は、最新の海中天気予報モデルに基づき気象・海象擾乱の定量的評価を行うことにより、気象・海象擾乱の起源のシグナルをプレート境界でのすべり現象によるものと誤認するリスクを軽減するとともに、「ゆっくり地震」の終息時期の推定精度向上などにもつながるものと期待されます。

対象領域について考察してみますと、海洋モデルJCOPEは日本近海全域をカバーしている一方で、DONETは東南海・南海地震震源域、孔内観測点はDONET-1の中の熊野灘に限られています（図1）。近い将来に南海トラフで発生する海溝型巨大地震の発生前に、東海・東南海・南海のどこから固着が剥がれ始めるのかを予測するのが難しい現状を鑑みますと、本解析手法の適用によるモニタリングの範囲を拡張するために、DONETをはじめとする海底ケーブル式観測網や孔内観測点が南海トラフの広域でカバーされることが望ましいと考えられます。海底ケーブル式観測網については、日向灘をカバーするN-netへの拡張が進められています^[18]。孔内観測もそれに応じて、DONET-1に接続されている熊野灘と同様に、今後はDONET-2、N-netへの拡張接続が期待されます。

これらの観測展開を今後のスロースリップイベントのモニタリングに活用し、南海トラフで半割れ・一部割れが起きた場合において体積歪変化を

スロースリップイベントと比較することで、リスク評価の参考指標となることが期待されます。そのためにも、過去のスロースリップイベントについても本研究手法の適用によるデータ再解析を行い、南海トラフに沿った広域に渡って体積歪の蓄積過程を時系列として長期間の推移を把握することで、科学的な観点から海溝型巨大地震に対する防災の貢献を果たしていきたいと考えております。

【参考文献】

- [1] 小原 一成 (2009) フィリピン海プレート沈み込みに伴う西南日本のスロー地震群の発見, 地震 第2輯, 第61巻特集号, S315-S327.
- [2] 井出 哲 (2009) 地震発生過程のスケール依存性, 地震 第2輯, 第61巻特集号, S329-S338.
- [3] 有吉 慶介・永野 憲・松本 浩幸・長谷川 拓也 (2015) 巨大地震震源域の特定に向けた海底観測網の新たな活用, 海洋理工学会誌 21(1) 7-15
- [4] 小林 昭夫・山本 剛靖・中村 浩二・木村 一洋 (2006) 歪計により観測された東海地域の短期的スロースリップ (1984~2005年), 地震 第2輯, 第59巻, 19-27
- [5] 宮岡 一樹・横田 崇 (2012) 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発 -東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用- 地震 第2輯, 第65巻, 205-218
- [6] 汐見 勝彦・小原 一成・針生 義勝・松村 稔 (2009) 地震 第2輯, 第61巻特集号, S1-S7
- [7] 金田 義行 (2010) 海溝型巨大地震のリアルタイムモニタリング, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN (咸臨), 33巻, 37-40.
- [8] 石橋 正信・馬場 敏孝・高橋 成実・今井 健太郎 (2019) DONET 観測情報を活用した津波予測システムの社会実装 -和歌山県の事例-, 自然災害科学, 37巻1号, 125-142.
- [9] 難波 康広・許 正憲 (2018) 「ちきゅう」南海掘削における長期孔内システム設置状況, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第23号, 101-102
- [10] Ariyoshi, K., Iinuma, T., Nakano, M., Kimura, T., Araki, E., Machida, Y., et al. (2021). Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 Revealed from Borehole and DONET Observatories. *Front. Earth Sci.* 8, 600793. doi:10.3389/feart.2020.600793
- [11] 木村 学・木下 正高・金川 久一・金松 敏也・芦寿一郎・斎藤 実篤・廣瀬 丈洋・山田 泰広・荒木 栄一郎・江口 暢久・Sean Toczko (2018) 南海トラフ地震発生帯掘削がもたらした沈み込み帯の新しい描像, 地質学雑誌, 第124巻第1号, 47-65
- [12] 海洋研究開発機構・東京大学地震研究所 (2017) 南海トラフ巨大地震発生帯の海溝軸近傍で誘発・繰り返す「ゆっくり滑り」を観測 -地球深部探査船「ちきゅう」によるIODP 第365次研究航海の成果より-, 海洋研究開発機構プレスリリース・謎解き解説 https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/quest/20170616/
- [13] Ariyoshi K, Kimura T, Miyazawa Y, Varlamov S, Iinuma T, Nagano A, Gomberg J, Araki E, Miyama T, Sueki K, Yada S, Hori T, Takahashi N and Kodaira S (2021) Precise Monitoring of Pore Pressure at Boreholes Around Nankai Trough Toward Early Detecting Crustal Deformation. *Front. Earth Sci.* 9:717696. doi: 10.3389/feart.2021.717696
- [13] 藤井 陽介・他 (2017) 日本の海洋データ同化研究 -20年間の功績と今後の展望-, 海の研究, 26(2), 15-43
- [14] 宮澤 泰正・美山 透・郭 新宇・Sergey M. Varlamov (2015) 外洋から沿岸に向けたモデリングの取り組み, 沿岸海洋研究 第52巻, 第2号, 131-137
- [15] 地震調査研究推進本部 https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismicity_monthly/
- [16] 気象庁 <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/nteq/assessment.html>
- [17] 防災科学技術研究所 (2020) 南海トラフ海底地震津波観測網 (N-net) の開発・整備, 防災科研ニュース, 第4期209号, <https://www.bosai.go.jp/information/news/list4.html>