

## 技術報告

# モバイル端末上での3次元震源分布表示： 「地震3D」の開発

東北大学大学院理学研究科\* 江本賢太郎

国立研究開発法人防災科学技術研究所\*\* 汐見勝彦

地震予知総合研究振興会 つくば観測技術センター\*\*\* 那須健一

## 3D Visualization of the Seismicity on the Mobile Device: Development of the “3D Quakes”

Kentaro EMOTO

Graduate School of Science, Tohoku University  
Aramaki-Aza-Aoba 6-3, Aoba, Sendai, Miyagi, 980-8578, Japan  
E-mail: kentaro.emoto@tohoku.ac.jp

Katsuhiko SHIOMI

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience  
3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

Kenichi NASU

Association for the Development of Earthquake Prediction  
3-21-8 Hanabatake, Tsukuba, Ibaraki 300-3261, Japan

(Received March 1, 2019; Accepted May 19, 2019; published online on June 5, 2019)

Spatial distribution of seismicity has hitherto been visualized on two-dimensional maps and vertical cross-sections along certain lines so far. Owing to the advances in technology, we have developed a mobile application for iPhone and iPad devices, which can display the seismicity of Japan in three-dimensional (3D) view. Each hypocenter is plotted as a 3D spherical object whose color and size represented its depth and magnitude, respectively. The geometry of the Philippine Sea Plate and the Pacific Plate can be plotted as 3D polygons with the hypocenters, simultaneously. In addition to those plate boundaries, the topography of Japan and the ocean bathymetry around it are also plotted as a 3D polygon. The 3D image of the hypocenters and plate geometries helps users to perceive intuitively the spatial distribution of earthquakes such as that many earthquakes occur along the subducting plates. Moreover, the spatiotemporal distribution of seismicity can be seen by the time-lapse animation of hypocenters. The hypocenter catalog can be downloaded through the Internet by using the account of NIED MOWLAS. More than one month's earthquakes (18,000 events) can be displayed smoothly.

Key words: Mobile application, 3D visualization, Seismicity

### §1. はじめに

震源位置、マグニチュード、地震発生時刻といった地震の情報は、地震学における重要なデータの一つであ

\* 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

\*\* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1

\*\*\* 〒300-3261 茨城県つくば市花畑 3-21-8

り、このような情報をまとめた震源カタログは気象庁をはじめとする様々な機関から公表されている。震源カタログに登録された震源の位置を地図上に表示したり、適当な測線に沿った鉛直断面図を作成したりすることで、定常的な地震活動の特徴や巨大地震の発生及びそれに伴う一連の活動の様子を震源の深さ分布も含めて視覚的に把握することができる。このような震源分布図は、例えば SEIS-PC [石川・他 (1985)] のような地震活動解析のためのソフトウェアを使えば、簡単に作成することが可能である。研究分野では、より自由度が高い作図が可能な GMT [Wessel *et al.* (2013)] がよく用いられているが、震源カタログをソフトウェアに読み込ませるためのデータ加工や複雑なコマンドの入力といった、やや手間がかかる作業が必要になることが多い。

より高度な表現方法として、震源分布を3次元的に表示することもある。例えば、Webブラウザ上で3次元的な表示や操作ができる 3DV [Welti *et al.* (2012)] や Shingen4D [庄司・他 (2018)] といったツールが構築され、既に公開されている。また、防災科学技術研究所 (防災科研) の高感度地震観測網 Hi-net や地震予知総合研究振興会のウェブサイト [防災科学技術研究所 (2019), 地震予知総合研究振興会 (2019)] でも日本全国で発生した地震の震源分布を3次元表示することが可能である。ただ、3次元表示を実現するためには大量の計算処理を行う必要があるため、その表示性能はユーザーが使用するパーソナルコンピュータ (PC) の処理性能に強く依存する。

近年、スマートフォンやタブレットといったモバイル端末が広く普及しており、2017年にはスマートフォンの世帯保有率がPCを上回った [総務省 (2018)]。モバイル端末では、指による操作で画面の拡大や縮小を行うことが通常であり、同様の操作は多くのユーザーにとって身近なものとなっている。デバイスの性能も急速に向上しており、以前は高性能なPC上でしか行えなかった高度な処理もモバイル端末上で行えるようになりつつある。特に、Apple社のiPhoneやiPadでは、同社が開発した専用グラフィックスAPI (Metal) が動作する。Metalは、Apple社の製品に最適化されているだけでなく、CPUとGPUでメモリを共有することで、開発するアプリケーション (アプリ) の高速化を実現している点が大きな特徴である。Metalを用いることにより、従来使用されていたOpenGLより描画命令の処理速度が最大10倍速くなる [Sandmel (2014)]。最近では、より発展させたMetalも登場し、さらに処理速度を上げることが可能となった [Valient and Schreyer (2017)]。すなわち、Metalを用いることで、3次元表示においてGPUを効率

的に使用した高いパフォーマンスを出すアプリを開発することが可能となる。

日本では、平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震や平成28年 (2016年) 熊本地震、平成30年北海道胆振東部地震など、大きな被害をもたらす地震が近年相次いで発生しているほか、毎日のように国内のどこかで有感地震が発生している。世代を問わず多くの人がテレビや新聞などで地震の情報に触れる機会があり、地震防災への関心が高いと思われる。一方、日本列島周辺では、人が揺れを感じない程度の小さい地震が日々たくさん発生しているが、このことはほとんど知られていない。普段から、「どのような場所で地震が多く発生しているのか」といった地震活動に関する知識を身につけることで、地震現象に対する理解を深めることができる。個々人が住み働く地域に影響を及ぼす地震活動を知ることは、普段からの地震災害への備えにつながると期待できる。そこで、我々は、iPhoneやiPad上で動作し、日本列島周辺で発生する地震の震源分布を3次元表示するアプリ「地震3D」を開発した。本稿に、その開発環境やアプリの仕様等についてまとめる。

開発にあたっては、特定の端末に最適化されたAPIを活用することで、快適な表示性能を得ることを重視した。また、多くのユーザーがマニュアル無しで使用できるよう、指を用いた簡便な画面操作が可能なモバイル端末での利用を想定した。iPhoneやiPadは、国内外で広く普及しているモバイル端末の一つであり、これらの端末向けのアプリを取り扱うApp Storeの毎週の訪問者数は5億人とされている [Cook (2018)]。App Store上での無償公開を通じ、地震に興味を持つ幅広いユーザーが各自の端末に本アプリをインストールすることによって、専門家以外でも気軽に震源分布の3次元表示に触れる機会が増加することに期待している。また、近年、中学校や高等学校では、iPadを導入した授業を行なっているところもある。震源を表示する期間や領域を変えたり、視点を変えたりしながら表示画面を自由に操作することにより、地震の非一様な分布について各自が考え、プレートテクトニクスや地形と地震活動の関係についての理解が進むことを期待する。

## §2. アプリケーションの開発

開発した「地震3D」の画面例をFig. 1に示す。本アプリは、2019年4月現在、App Storeから無料でダウンロード可能である。本章では、アプリの開発環境やその特徴、表示するデータの管理方法についてまとめる。

### 2.1 開発環境

アプリの開発は、Apple社が配布する総合開発環境

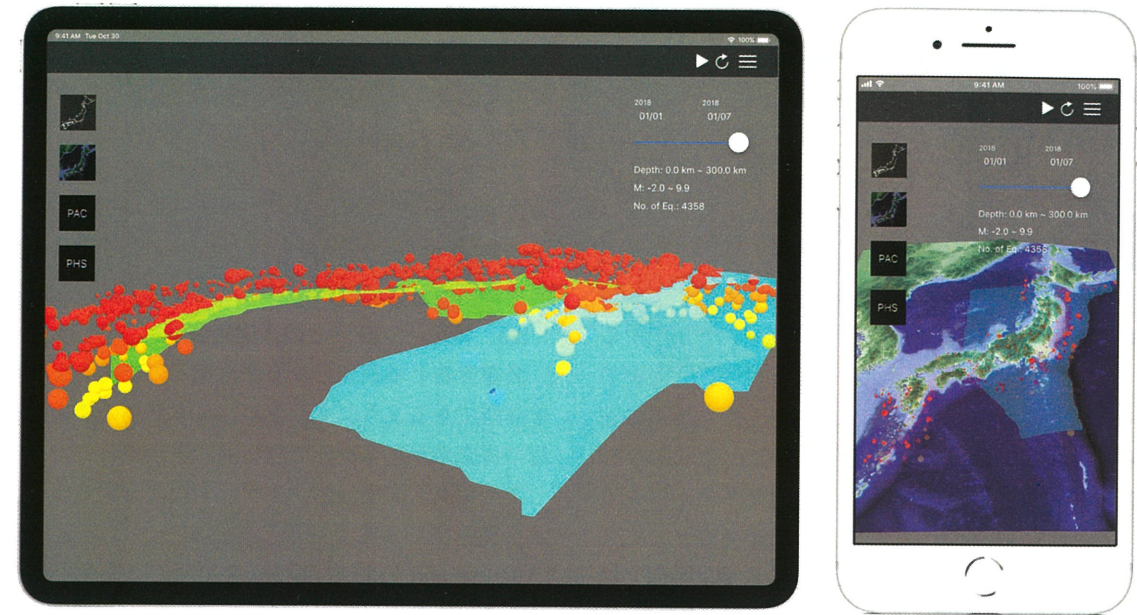


Fig. 1. Screenshots of the application running on the iPad (left) and iPhone (right). Seismicity during 1 to 7 January 2018 is plotted. Spherical object indicates each earthquake. Curved surfaces represent the Philippine Sea Plate (green) and the Pacific Plate (blue).

Xcode上で行った。プログラミングコードにはApple社が開発したSwift言語を採用した。ユーザーインターフェース (UI) のレイアウトの設定は、XcodeのInterface Builder機能を利用して行い、ラベルやボタン等の詳細な設定はプログラミングコード中で実施した。また、Instruments機能を用いてアプリの性能解析を行い、CPUやメモリの使用状況を調べた。コーディングには、Apple社が提供する高レベルな3Dグラフィックス用フレームワークSceneKitを利用した。SceneKitを採用することで、iOSアプリで標準的に使われているUIをそのまま使用できるほか、内部でMetalを呼び出しGPUによる効率的な描画を行うことができるという利点がある。

### 2.2 アプリの特徴

「地震3D」の開発にあたって、生徒・学生をはじめとする一般のユーザーの使用を念頭に、シンプルでわかりやすく、操作が容易なアプリを目指した。具体的には、次のような特徴を持たせることとした。

- 指による操作 (スワイプ・ピンチ) での震源分布の回転や拡大・縮小
- 日本列島の標高や海底地形の立体表示
- 沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートの立体表示
- 地震発生時刻に基づいた、アニメーションによる地震活動推移の表示
- 震源カタログの追加ダウンロード

プレートや地形の表示・非表示は、ユーザーの操作による選択を可能とした。オプションとして、震源を表す球のカラーパレットや大きさ、表示する期間・深さ・マグニチュードの範囲は変更できるが、鉛直断面図の作成やメカニズム解の表示といった高度な機能は本アプリでは対象としない。画面は日本語と英語に対応させるが、マニュアルを読まずに使用できるように、基本的な操作方法やUIは、スマートフォンの標準的なそれに準ずることとした。

### 2.3 震源情報

アプリで表示する震源情報には、防災科研により決定された震源カタログを使用する。アプリ内にはあらかじめサンプルとして2週間分 (約8,000個) の震源情報を保存した。防災科研MOWLASのアカウントを所有しているユーザーは、前日から過去10年間分のカタログをダウンロード可能である。震源カタログのダウンロードを実現するため、防災科研Hi-netのサーバに本アプリ専用のAPIを作成し、アカウント認証やダウンロードに関わる処理を行う方式を採用した。アカウント名やパスワード自体はアプリ内に保存せず、ハッシュ化して通信を行い、ログイン成功後はトークンを用いる。一定時間経過後にトークンを削除することで、接続の安全性を確保する。地震発生時刻、緯度・経度、深さ、マグニチュードの情報が含まれるカタログは1日ごとにまとめられ、JSON形式でダウンロードされる。カタログダウンロード用としてアプリ内にカレンダーを作成し、カレ

ンダーの日付を選択することで、その日のカタログをダウンロードできるようにした。ダウンロードした震源カタログは、NSKeyedArchiver クラスを使用し、シリアライズしてアプリ内に保存することとした。NSKeyedArchiver は、オブジェクトを端末内で永続化するためのクラスである。つまり、保存した震源カタログはアプリを終了しても消えることはない。

#### 2.4 震源の3次元表示とアニメーション

まず、震源の緯度・経度・深さをアプリ内で使用する  $x, y, z$  座標に変換する。SceneKit では  $y$  軸の正方向がアプリ内における空間の鉛直上向きに対応した右手系の座標が採用されている。座標原点を東経 136 度、北緯 36 度、深さ 10km とし、原点から  $y$  軸の負方向を深さ方向、 $x$  軸の正方向を東方、 $z$  軸の正方向を南方として変換する。深さも含めて変換するため、地表面は平面ではなく球面状になる。デフォルトのカメラ(視点)位置は、 $z$  軸上の離れた点から原点を見るように設置した。つまり、アプリ起動時は、日本列島の鉛直断面を南側から見るように、ディスプレイ上に表示される。個々の震源は SceneKit の SCNSphere クラスのジオメトリを持たせた SCNNode のオブジェクトとして球体で表示することとした。SCNSphere は、SceneKit で提供される 3次元モデルであり、球体を 625 個の頂点座標で表現する。SCNNode は、3次元空間でのオブジェクトであり、物体の基本的な情報(位置や変形など)を保持する。視点や光源も SCNNode として表される。一般的な 2次元表現と同様に、深さに応じて各震源を表すシンボルを色付けするとともに、マグニチュードに応じてサイズを変えた。描画の負荷を抑えるために、深さのカラーパレットは 10 段階の離散的な配色とした。つまり、10 個の異なるジオメトリを持つ SCNNode オブジェクトを用意し、個々の地震はこれらのオブジェクトのコピーとして作成したのち、サイズを変えることで表現した。これにより、描画命令(draw call)の数を減らすことができ、CPU の負荷も抑えることができる。個々のオブジェクトには、地震発生時刻やマグニチュードの震源情報を持たせており、ユーザーがオブジェクトをタップすることでこれらの情報を画面上に表示することが出来るほか、選択している期間内で地震発生の時系列をアニメーションで表示することが可能である。なお、Metal API に対応していない古い端末でも軽快な動作をさせるために、球より描画コストの少ない平面(SCNPlane)で震源を表現するライトモードも用意した。SCNPlane も SCNSphere と同様に、SceneKit で提供される 3次元モデルであり、平面が 4 つの頂点座標で表現されている。

上述の通り、表示させる震源の条件は、ユーザーによ

り設定できる。ただし、快適な動作を実現するため、アプリに読み込むことが可能な地震数は最大 20,000 個に制限し、これを超える地震数が選択された場合には、マグニチュードの下限を強制的に引き上げて地震数を調整することとした。日本列島周辺のすべての領域で 20,000 個以下になるように調整するため、表示されている領域内の震源数が 20,000 個以下であっても、マグニチュードの下限は引き上げられる。

#### 2.5 地形・プレートの3次元表示

震源分布と地表地形や海底地形との空間的な相対位置を確認できるようにするため、日本列島の標高やその周辺の海底地形も 3次元で立体的に表示することを可能とした。標高・海底地形データは米国海洋大気庁(NOAA)が公開している 1 分間隔の地形データである ETOPO1 [Amante and Eakins (2009)] を用いた。まず、地形データを GMT の triangulate コマンドにより、Delaunay 三角形に分割した。分割された各三角形を三角形ポリゴンとして、COLLADA 形式に変換した。COLLADA は、xml で記述される 3次元コンピューターグラフィックス間のデータ交換用フォーマットのひとつである。COLLADA 形式のファイルを読み込み、バイナリ形式の scn ファイルに変換したのち、アプリ内に保存した。三角形の各頂点に、その頂点を共有する面の法線ベクトルを平均化したベクトルを法線ベクトルとして指定することで、見かけ上滑らかな立体となるように調整した [Gouraud (1971)]。用意した地形データは、東経 124 度から 148 度、北緯 24 度から 48 度の範囲であり、この範囲の地形を構成する三角形は 115,200 個である。同じ領域において標高により色付けした画像を用意し、テクスチャとして 3次元モデルに貼り付けることで、色付けされた立体地形となる (Fig. 2a)。なお、震源の深さ分布の範囲と比較して、地形の高低差は小さいため、標高を 30 倍に誇張して表現するオプションも用意した。

日本列島下に沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートも、地形と同様のデータ変換を行うことで、3次元表示可能とした。プレート形状は、Baba *et al.* (2002), Nakajima and Hasegawa (2006, 2007), 弘瀬・他 (2007, 2008), Hirose *et al.* (2008), Nakajima *et al.* (2009), Kita *et al.* (2010) の成果をまとめたデータを用いた。太平洋プレートは 7,233 個、フィリピン海プレートは 2,356 個、の三角形で作られるポリゴンである (Fig. 2b, c)。

#### §3. 動作性能

Apple 社の iPhone 7 と iPad Air を用いてアプリの動作確認を行った。Table 1 に動作確認に用いた両者の基本的な性能をまとめる。iPhone 7 の方が後発の製品であ

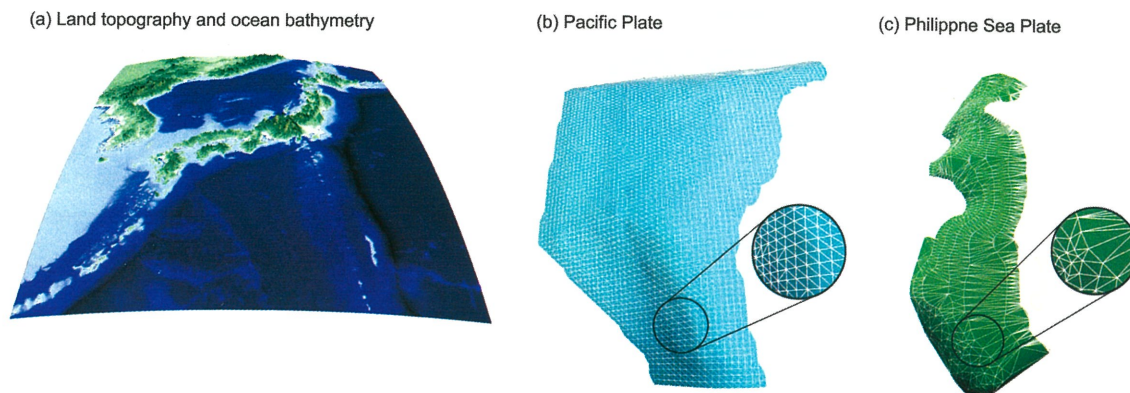


Fig. 2. (a) 3D model of the topography and the ocean bathymetry around Japan. The model consists of 11,520 triangles. 3D models of (b) the Pacific Plate and (c) the Philippine Sea Plate, which consist of 7,233 and 2,356 triangles, respectively. We explicitly show the border of triangles by white line.

Table 1. Specifications of iPhone 7 and iPad Air.

	iPhone 7	iPad Air
CPU	2 Cores (high performance 2.34 GHz) + 2 Cores (low power) <sup>1</sup>	2 Cores (1.4 GHz) <sup>2</sup>
Memory	2 GB	1 GB
GPU	PowerVR GT7600 <sup>3,4</sup>	PowerVR G6430 <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Cunningham (2016)

<sup>2</sup>Cunningham (2013)

<sup>3</sup>Imagination Technologies 社の製品

<sup>4</sup>Shah (2016)

り、CPU や GPU の性能、メモリ容量において iPad Air を上回る。ここでは、表示させる震源を 2018 年 1 月 1 日から 31 日まで 1 日ずつ増やし、動作の軽快さを調べた。地震は深さ 300 km 以浅ものを対象とした。期間内にまとまった地震活動は発生しておらず、1 日ごとの地震数に大きな変化はない。したがって、Fig. 3 の黒破線で示すように、累積地震数はほぼ一定で増加する。性能評価のための指標には 1 秒間に何回描画を更新できるかを表すフレームレート (frames per second: FPS) を用いた。FPS の数値が大きいほど動作が軽快であることを示す。日本列島全体が表示されるスケールで、指による操作(スワイプ)で全体を回転させた時のフレームレートを Fig. 3 に示す。iPhone や iPad でのフレームレートの最大値は 60 である。iPhone 7 では、地震数が 10,000 個 (18 日分) を超えるとフレームレートの低下が見られ、1ヶ月分の 17,191 個を表示させると 31 fps まで低下する。震源を球ではなく平面で表示するライトモードでは、60 fps から低下は見られない。一方、iPad Air の場合、1 月 1 日のみの 568 個の震源表示ではフレームレー

トが 60 fps であるものの、表示期間を増やすと急激にフレームレートが低下する。地震数が 9,000 個 (16 日分) を超えると、動作が不安定になるため、それ以降の動作確認は行わなかった。ライトモードを使用すると、地震数が 10,000 個まで 60 fps で描画され、1ヶ月分の表示では 28 fps となる。一般に、テレビのフレームレートは 30 fps、映画は 24 fps であり、15 fps を下回ると動作がカクカクした印象を与える。つまり、ライトモードを使用すれば、iPad Air で 1ヶ月分の地震を表示しても、ストレスなく操作することが可能であった。

#### §4. 課題ならびに発展性

震源や地形の 3次元モデルの回転や拡大・縮小は、SceneKit を画面上に表示させる大元のクラスである SCNView の allowsCameraControl オプションで実装している。このオプションにより、カメラの視点移動のコードを書かなくても、スワイプによる回転や、ピンチによる拡大・縮小といった指による操作が実装される。ただし、仕様上、移動や拡大・縮小を行っても、回転

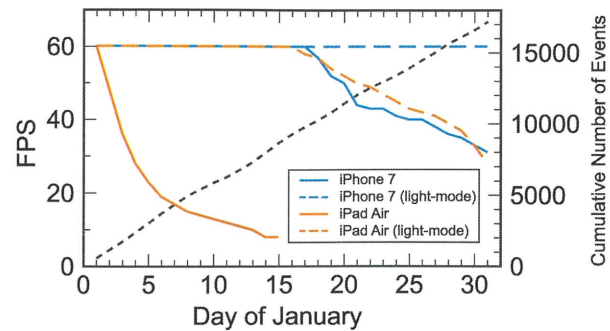


Fig. 3. Performance of the drawing on the iPhone 7 (blue) and iPad Air (orange). We measure the FPS by increasing the number of earthquakes displayed on the screen. The solid and dashed lines indicate the normal and light modes, respectively. In the light mode, the earthquake is represented by the plane. Black dashed line indicates the cumulative number of earthquakes (right axis).

の中心は変わらない。そのため、例えば、九州地方をズームで表示している場合でも、回転の中心は原点として設定した日本列島の中心付近（東経 136 度，北緯 36 度）にあるため，細かい回転が難しいという問題が生じる。今後，表示している領域でのローカル座標での回転を行うように，独自の挙動を実装する必要がある。

今回作成したアプリでは，日本列島付近で発生する地震のみを表示しているが，同様の方法で，地球全体で発生する地震を表示させることも可能である。ただし，広い領域の標高や海底地形の 3 次元モデルファイルのサイズが大きくなり，ポリゴン数も増えるため，ズームレベルに応じて解像度の異なるファイルを読み込む必要があるであろう。また，同様にして，地震波トモグラフィーや活断層といった地震学で得られる様々な構造データの 3 次元的可視化や震源情報との重ね合わせの実現が可能になることが期待される。

現在のアプリは，ユーザー自らがデータをダウンロードし，表示条件を設定して閲覧するなど，ユーザーにとって能動的な利用方法を想定している。将来的には，例えば，大きな地震が発生した際に，サーバ側からプッシュ通知を行い，どこで起きた地震であったのか，周辺の地震活動はどうだったのかわかるような機能を追加することで，さらなる地震現象の的確な理解や適切な防災行動につながることを期待される。

## §5. まとめ

日本列島周辺で発生している地震の分布を視覚的に把握するために，震源分布を 3 次元表示するモバイル端末アプリ「地震 3D」を開発した。生徒や学生など震源カ

タログの取り扱いに馴染みのないユーザーでも，マニュアルなしで気軽に使用できるように，機能は最小限にとどめ，シンプルでわかりやすいアプリとした。震源のみでなく，太平洋プレート・フィリピン海プレートも 3 次元表示することで，プレートに沿って地震が多く発生している様子も一目で理解できる。中学校や高等学校の教育現場で，生徒がそれぞれの視点で震源分布について考える教材となることが期待される。アプリは Apple 社の iPhone や iPad で動作し，指による簡易な操作で回転や拡大・縮小を行う。震源は球体だけでなく，描画コストの少ない平面で表現することで，最新の端末でなくても 1 ヶ月分の震源を軽快に表示させることを可能にした。また，防災科研 MOWLAS のユーザーアカウントを使用することで，過去 10 年分の震源カタログをダウンロード可能とする機能を加えた。本アプリで開発した 3 次元表示方法は，グローバル地震カタログにも対応することが可能である。このアプリを通して，無感地震も含めた日々の地震活動を知ることで，地震に対する興味と知識を深めることにより，地震災害への備えにもつながることを期待している。

## 謝 辞

匿名査読者および石瀬素子編集担当委員から貴重なコメントを頂き，原稿を改善することができました。フィリピン海プレート・太平洋プレート形状は弘瀬冬樹氏がまとめて公開している数値データ (<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2ken/fhirose/ja/PlateData.html>，参照 2019-02-26) を使用致しました。日本列島の地形と周辺の海底地形は，米国海洋大気庁 (NOAA) が公開している ETOPO1 を使用致しました。ポリゴン作成の際には GMT を使用致しました。iPhone・iPad の製品画像は，Apple 社が提供している画像を使用致しました。記して感謝いたします。

## 文 献

- Amante, C. and B. W. Eakins, 2009, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, NOAA Technical Memorandum NESDIS, NGDC-24, doi: 10.1594/PANGAEA.769615.
- Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uehira, 2002, The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **132**, 59–73, doi:10.1016/S0031-9201(02)00044-4.
- 防災科学技術研究所, 2019, ウェブブラウザによる三次元震源分布表示, <<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/ThreeJS/>>, (参照 2019-02-26).
- Cook, T. D., 2018, Keynote, WWDC, Session 101.

- Cunningham, A., 2013, iPad Air's A7 chip is identical to the iPhone's, just faster, <<https://arstechnica.com/gadgets/2013/10/ipad-airs-a7-chip-is-identical-to-the-iphones-just-faster/>>, (参照 2019-02-26).
- Cunningham, A., 2016, iPhone 7 and 7 Plus review: Great annual upgrades with one major catch, <<https://arstechnica.com/gadgets/2016/09/iphone-7-and-7-plus-review-great-annual-upgrades-with-one-major-catch/>>, (参照 2019-02-26).
- Gouraud, H., 1971, Continuous shading of curved surfaces, *IEEE trans. comput.*, C-20, 623–629, doi: 10.1109/T-C.1971.223313.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭, 2007, Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震* **2**, 60, 1–20, doi: 10.4294/zisin.60.1.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭, 2008, Double-Difference Tomography 法による関東地方の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震* **2**, 60, 123–138, doi:10.4294/zisin.60.123.
- Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa, 2008, Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- 石川有三・村松一男・横山博文・松本英照, 1985, SEIS-PC の開発—概要—, *情報地質*, **10**, 19–34, doi:10.6010/geoinformatics1975.1985.10\_19.
- Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa, 2010, Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **290**, 415–426, doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.038.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2006, Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along

- it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L16309, doi: 10.1029/2006GL026773.
- Nakajima, J. and A. Hasegawa, 2007, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, **112**, B08306, doi: 10.1029/2006JB004770.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa, 2009, Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, **114**, B08309, doi: 10.1029/2008JB006101.
- Sandmel, J., 2014, Working with Metal—Overview, WWDC, Session 603.
- Shah, A., 2016, The mysteries of the GPU in Apple's iPhone 7 are unlocked, <<https://www.pcworld.com/article/3146630/mobile/the-mysteries-of-the-gpu-in-apples-iphone-7-are-unlocked.html>>, (参照 2019-02-26).
- 総務省, 2018, 平成 30 年版情報通信白書, <<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/h30.html>>, (参照 2019-04-08).
- 庄司真史・小林佑介・河合研志, 2018, 震源の 4 次元可視化ツール開発～熊本地震の理解を深める教材として～, 日本地球惑星科学連合大会, O05-03.
- Valient, M. and R. Schreyer, 2017, Introducing Metal 2, WWDC, Session 601.
- Walti, R., P. J. McQuillan, and B. R. Weertman, 2012, Visualizing Earthquakes in '3D' using the IRIS Earthquake Browser (IEB) Website, AGU Fall Meeting IN43-1500.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe, 2013, Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS Trans. AGU*, **95**, 409–410, doi: 10.1002/2013EO450001.
- 地震予知総合研究振興会, 2019, 3D 震源分布図, <<http://www.adep.or.jp/kanren/singen.html>>, (参照 2019-02-26).