



たとえられます。しかし、過去に 1707 年宝永地震津波よりも大きな津波が来襲したか否かという問題に関して、定量的な検討の例はありませんでした。

### 3. 研究の経緯

産業技術総合研究所ではこれまで地質学的な調査を実施し数値シミュレーションと組み合わせて過去に発生した地震を推定する研究を行ってきました(例えば, Pilarczyk *et al.*, 2021; Sawai *et al.*, 2012)。過去に発生した地震は将来も発生する可能性がある, このような考え方から過去に発生した地震, すなわち古地震の実態解明を進めています。本研究もその一環です。巨礫の分布と津波の数値計算とを組み合わせて地震を推定した研究は過去にも報告例がありますが(例えば, Imamura *et al.*, 2008; Goto *et al.*, 2010), 本研究は巨礫を形成した母体の岩石の位置が判明している, 非常に珍しい調査地を対象としています。

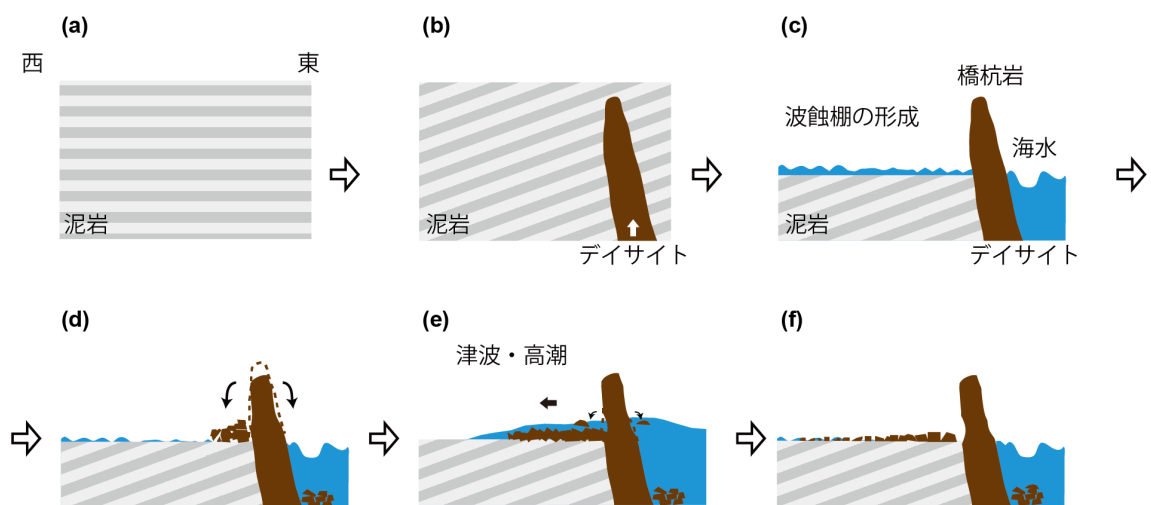
### 4. 研究の内容

橋杭岩とは和歌山県串本町東岸に位置する, 南北に直線的に並ぶ巨岩列です(第 1 図)。第 2 図のようにこの巨岩列はマグマの貫入に由来したデイサイトの岩脈が, 侵食されずに突出したものであり, その西側には泥岩でできた平坦な波蝕棚が広がります。その波蝕棚の上に橋杭岩と同じデイサイトからなる巨礫が千個以上分布しており, 橋杭岩

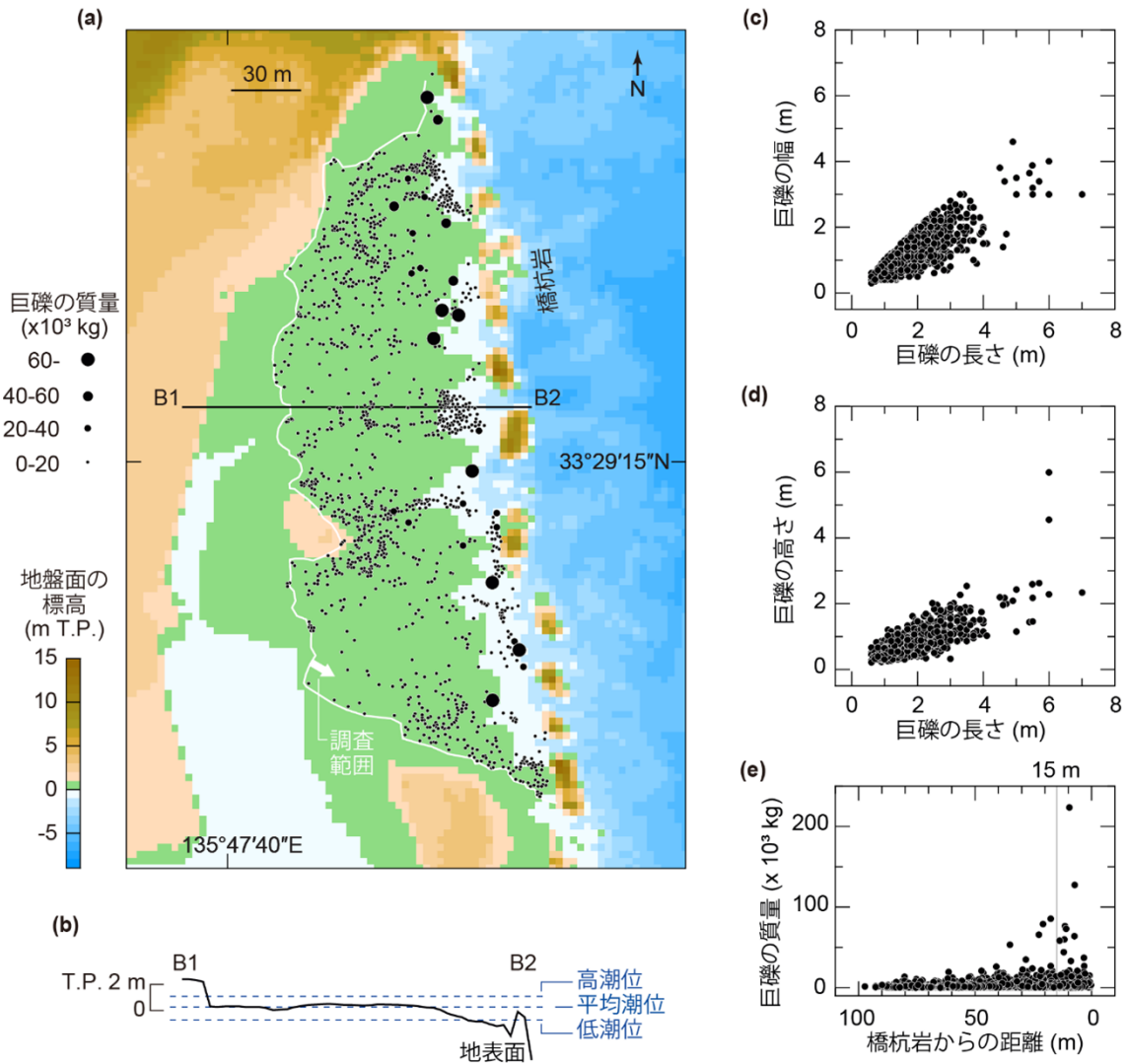
から分離したものと考えられます(豊島, 1968)。波蝕棚はほぼ平坦であるため, 橋杭岩から分離して落下しただけでは, 巨礫は橋杭岩周辺にあるはずですが, 実際には波蝕棚上に広く分布しています。このことから, 巨礫は大波によって(前空・坪野, 1990), とくに津波や高潮などの波の作用によって現在の位置まで運ばれたと推定しました。

本研究では, まず分布する 1,311 個の巨礫の位置や大きさを現地で調査しました(第 3 図)。最も大きなものと長径は 7 m に及ぶものがありました。最も重いものは 220 トンを超えます。調査地域内では, 巨礫はランダムに分布しているように見え, 密集している部分と全くない部分が観察されます。比較的軽い巨礫は橋杭岩からの距離に関係なく均一に分布していますが, 重い巨礫は橋杭岩周辺に分布していることがわかります(第 3 図 e)。

では, これらの巨礫は津波により動くのでしょうか。これを明らかにするために, これらの巨礫が 1707 年宝永地震津波で動くかを数値計算で検討しました。計算の条件として, 橋杭岩から水平距離で 15 m の範囲にある巨礫は単に橋杭岩から自由落下しただけで過去に津波や高潮で移動していないとみなし, それ以外の合計 1,103 個の巨礫を対象としました。また, 1707 年宝永地震では地盤が隆起したと考えられており, 当時の海面の位置を示す生物化石が現在の海面より 1.3 m 高い位置にある(穴倉ほか, 2008)ので, 地盤高を現在の地形から 1.3 m 低く設定して計算しています。1707 年宝永地震以後には 1854 年安政地震や 1944 年・1946 年昭和地震が発生しており, 地震時あるい



第 2 図 橋杭岩および巨礫形成の概略図。(a) はるか昔の中新世前期頃に泥岩が堆積。(b) 中新世中期頃に地下からマグマが貫入。(c) 第四紀後期頃に海水の存在により橋杭岩周辺の比較的柔らかい泥岩が削られ橋杭岩が露出し, その西側では波蝕棚と呼ばれる平らな地面が形成。(d) 風化やひびが入るなどして橋杭岩の一部が分離し巨礫が形成。(e) 巨礫が津波や高潮といった海の波の作用により橋杭岩西側の波蝕棚上へ運搬。(f) 現在の巨礫の分布。(a)-(d) は豊島(1968)に基づいて作成。Namegaya *et al.* (2022) の Fig. 2 を改変。



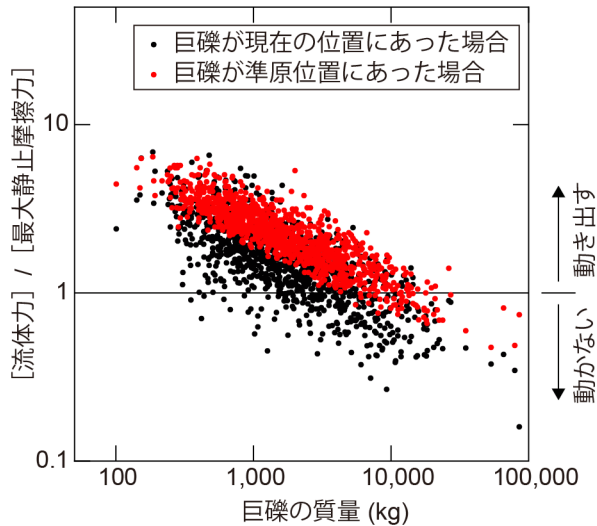
第3図 橋杭岩周辺の巨礫の現地調査結果。(a) 巨礫の分布図。(b) 図(a)のB1-B2測線の地形断面図。(c) 巨礫の長さに対する幅。(d) 巨礫の長さに対する高さ。(e) 橋杭岩からの距離に対する巨礫の質量。Namegaya *et al.* (2022) の Fig. 3 を改変。

は地震と地震との間において地盤面の高さは変動していると考えられますが、この1.3 mというのはそれらも含めてトータルで1707年宝永地震の直前の地盤面が現在よりも1.3 m低かったことを意味しています。

1707年宝永地震の断層モデルとして既存の研究成果である安中ほか(2003), 相田(1981a, 1981b), およびFurumura *et al.* (2011)を用い、コンピューター上で模擬的に津波を発生させ、津波の高さや流速を計算しました。さらに巨礫に働く海水からの流体力と、巨礫と地面との間の最大静止摩擦力を計算し、流体力が最大静止摩擦力を越える場合に巨礫が動き出すという判定を行いました。なお、計算の初期条件として、本来であれば1707年宝永地震の直前における巨礫の位置の状態を復元して計算を実施すべきですが、同地震直前の巨礫の位置を把握することは困難です。そこで巨礫が現在の位置に存在するとして計算した

場合と、巨礫が橋杭岩のすぐそばに位置していたと仮定して計算した場合(準原位置)との2種類を計算しました。この結果、いずれの条件とも全てのモデルにおいて多くの巨礫が動くことがわかりました(例えば、第4図)。しかしながら、特に大きな巨礫など一部で動かない巨礫も存在することがわかりました。このことは1707年宝永地震津波よりも大きな津波が過去にこの地を襲ったことを示しています。

それではどのような津波であれば全ての巨礫が動くのでしょうか。この一つの案として紀伊半島南東沖合にあるプレート境界の分岐断層(Park *et al.*, 2002; Moore *et al.*, 2007)の活動を考えました。1707年宝永地震の津波波源モデルに加え、同時にこの分岐断層も動いた例を考えると、準原位置において全ての巨礫が動く結果となりました。また別の案として、1707年宝永地震の津波波源モデルのす



第4図 1707年宝永地震の断層モデル(安中ほか, 2003)により計算された津波により巨礫が受ける流体力と最大静止摩擦力との比。黒点は巨礫が現在の位置に存在した場合の結果。赤点は巨礫が準原位置に存在した場合の結果。縦軸の流体力と最大静止摩擦力との比が1を超えた場合にその巨礫は動き出すと判定。原位置および準原位置においても、1707年宝永地震の津波では動かない巨礫が存在することがわかる。Namegaya et al. (2022) の Fig. 5c を改変。

べり量を2倍にして計算を行ったところ、より多くの巨礫が動く結果となりましたが動かない巨礫もまだ存在する結果となりました。このほか、本研究では定量的な解析をしていませんが、紀伊半島南東沖合での海底地滑りも巨礫を動かす原因かもしれません。ただし、ここで検討した例はあくまで可能性の一つとして挙げたに過ぎず、当然のことながらほかの要因もありえると考えられます。いずれにせよここで重要なことは、橋杭岩周辺において、歴史上最大と言われる1707年宝永地震による津波よりも大きい津波が過去にあったということでしょう。

一方、台風等による高潮の影響についても検討しました。2012年9月に台風17号がこの地を来襲し、当地における1951年以降の観測統計の中で最大級の潮位の上昇がありました。この台風来襲の前後の期間において橋杭岩周辺の巨礫も含めた地形をレーザースキャンにより測定し、両期間の地形を比較することで巨礫が動いたか否かを調べました。この結果、動いたのは巨礫の中でも小さいもののみで、ほとんどの巨礫は動いていませんでした。さらに、1976年と2007年に撮影された空中写真から巨礫の移動を調べた結果でも、判読可能な範囲では大きな巨礫の移動は確認できませんでした。もちろん未知の巨大な高潮が過去に存在した可能性は排除できません。しかしながら、巨礫の中には第5図のように台座状の泥岩の上に乗ったものも散見されました。これらは巨礫周辺の岩盤面が風化や



第5図 台座に乗った巨礫の例。周辺の地面に比べ一段高く位置する。立てかけてあるのは標尺で下側の黄色部分が1m。

波の侵食作用で削られ、高度を下げたのに対し、巨礫の直下の岩盤面がそういった侵食作用から免れた結果と考えられます。これは巨礫が比較的長期間その場所にとどまった証拠であると考えられます。どの程度の期間その場所にとどまったかは不明ですが、おそらく数十年、数百年といった長いスケールでその場所にとどまっていると推定されます。したがって台座の存在からも、毎年来る台風の高潮で大きな巨礫は動かず、巨礫が現在の分布をしているのは津波によるものと考えるのが合理的だと思われます。

### 5. 今後の予定

今後は、この巨礫がいつ移動したのか、すなわち巨大津波がいつ襲ったのかについても地質試料の年代測定等を通じて解明することを目指します。また橋杭岩周辺以外にも南海トラフ沿いで宝永地震を超える規模の津波の証拠を探し、検証していく予定です。

**謝辞:** 和歌山県庁、串本町役場、南紀熊野ジオパークのみなさまから現地調査の便宜を図っていただきました。現地調査においては永井亜沙香氏にご協力いただきました。本研究の一部はJSPS 科研費(JP18500779, JP20500895, JP24300319, JP16K01223)の援助を受けて実施しました。本稿の第1図の挿絵、第3図、および第4図はGeneric Mapping Tools (GMT) (Wessel et al., 2013)により作成しました。記して感謝いたします。

### 文献

相田 勇 (1981a) 東海道沖におこった歴史津波の数値実

- 験. 地震研究所彙報, **56**, 367-390.
- 相田 勇 (1981b) 南海道沖の津波の数値実験. 地震研究所彙報, **56**, 713-730.
- 安中 正・稲垣和男・田中寛好・柳沢 賢 (2003) 数値シミュレーションに基づく南海トラフ沿いの大地震の特徴. 土木学会地震工学論文集, <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00578/2003/27-0307.pdf>.
- Furumura, T., Imai, K. and Maeda, T. (2011) A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B02308. doi:10.1029/2010JB007918
- Goto, K., Kawana, T. and Imamura, F. (2010) Historical and geological evidence of boulders deposited by tsunamis, southern Ryukyu Islands, Japan. *Earth-Science Reviews*, **102**, 77-79.
- Imamura, F., Goto, K. and Ohkubo, S. (2008) A numerical model for the transport of a boulder by tsunami. *Journal of Geophysical Research*, **113**, C01008. doi: 10.1029/2007JC004170
- 石橋克彦 (2014) 叢書 震災と社会 南海トラフ巨大地震 歴史・科学・社会. 岩波書店, 260p.
- 地震調査研究推進本部 (2013) 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版). 平成 25 年 5 月 24 日発表. 94p.
- 前杵英明・坪野賢一郎 (1990) 紀伊半島南部の完新世地殻変動. 地学雑誌, **99**, 349-369.
- Moore, G. F., Bangs, N. L., Taira, A., Kuramoto, S., Pangborn, E. and Tobin, H. J. (2007) Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation. *Science*, **318**, 1128-1131.
- Namegaya, Y., Maemoku, H., Shishikura, M. and Echigo, T. (2022) Evidence from boulders for extraordinary tsunamis along Nankai Trough, Japan. *Tectonophysics*, **842**, 229487. doi: 10.1016/j.tecto.2022.229487
- Park, J. -O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins, P. R. and Kaneda, Y. (2002) Splay Fault Branching along the Nankai Subduction Zone. *Science*, **297**, 1157-1160.
- Pilarczyk, J. E., Sawai, Y., Namegaya, Y., Tamura, T., Tanigawa, T., Matsumoto, D., Shinozaki, T., Fujiwara, O., Shishikura, M., Shimada, Y., Dura, T., Horton, B. P., Parnell, A. C. and Vane, C. H. (2021) A further source of Tokyo earthquakes and Pacific Ocean tsunamis. *Nature Geoscience*, **14**, 796-800. doi: s41561-021-00812-2
- Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M. (2012) Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology. *Geophysical Research Letters*, **39**, L21309.
- 穴倉正展・越後智雄・前杵英明・石山達也・永井垂沙香 (2008) 南海トラフ沿いに起きた歴史地震に伴う隆起を記録した紀伊半島南部沿岸の生物遺骸群集. 歴史地震. **23**, 21-26.
- 豊島吉則 (1968) 和歌山県串本町付近の海蝕台と波蝕棚. 鳥取大学教育学部研究報告. 自然科学, 鳥取大学教育学部紀要. **19**, 41-48.
- Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. and Wobbe, F. (2013) Generic Mapping Tools: improved version released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **94**, 409-410.

---

NAMEGAYA Yuichi, MAEMOKU Hideaki, SHISHIKURA Masanobu and ECHIGO Tomoo (2023) Evidence of extraordinary tsunamis around the Hashigui-iwa dacite intrusion, south of the Kii Peninsula, Japan.

(受付: 2022 年 11 月 24 日)