

東尋坊千丈敷における柱状節理と板状節理と溶岩の流動痕

吉澤 康暢*

Columnar joints, platy joints and lava flow marks in Tojinbo Senjojiki Mikuni-cho, Fukui Prefecture, Central Japan

Yasunobu YOSHIZAWA*

(要旨) 東尋坊千丈敷は、明治11年～15年の三国港突堤工事の際、石材を採掘した跡の一つである。千丈敷の平坦面に現れている並列する巨大な柱状節理の横断面をはじめ、板状節理面に現れた溶岩の流動痕やその覆瓦状の構造、柱状節理縦断面に現れたレイヤリングなど、東尋坊貫入岩体が示す諸現象の調査を行った。その結果、東尋坊貫入岩体の高温時の板状節理の形成をはじめ、溶岩の流動方向や柱状節理形成時の長軸方向の割れ目との関係が明らかになった。

流動痕の走向はN62°Eで、これに交わる方向のN33°Wは溶岩の流動方向と考えられ、柱状節理の横断面の長軸方向や大規模な縦の割れ目構造の方向と一致することがわかった。また、東尋坊でドローン映像を撮影している上野浩幸氏から譲り受けた画像には、千丈敷のNW方向への延長部に、柱状節理の大規模な縦の割れ目構造の集合体が見られた。さらに、海底に続く柱状節理の延長部を確認できるなど、東尋坊貫入岩体に関する新しい事実が明らかになってきた。

キーワード：千丈敷、溶岩の畝状の流動痕、覆瓦状の構造、レイヤリング、ドローン

1. はじめに

東尋坊の千丈敷は、大池や観光船の船着場を過ぎた南方にある。千丈敷は海面レベルにある広い平坦面で、巨大な柱状節理が林立する東尋坊とは不釣り合いな広場である。観光客は、打ち寄せる波や潮溜まりの動物に触れるために急な階段を降りて千丈敷にやってくる。しかし、この平坦面が三国港突堤（エッセル堤）築港（吉澤，2018）の石材採掘の結果あらわれた平坦面であることを知る者は少ない。

千丈敷に降り立って最初に気づくことは、足元に広がる柱状節理の横断面の大きさである。東尋坊の中では最大の大きさで、長軸方向が極端に長い楕円形である。この平坦面は石材を破壊してできた面ではなく、板状節理の剥離面に沿って柱状の岩体を採石したときできたものである。そのため、平坦面には機械や工具等による岩石の破壊痕はなく、ほぼ自然に近い状態の面が保たれている。節理面が破壊されていない証拠は、貫入岩体が高温状態にあった時の、溶岩流の流動痕（痕の走向はN62°E）が、多くの面にはっきり残されていることである。この流動痕は、柱状節理の横断面の長軸に直交する向きで、畝状で明瞭な覆瓦状の構造を持っている。

東尋坊の貫入岩体の形成年代は12.7Ma（東野ほか，1987）で、地下深くから上昇してきたマグマがお供

え餅状に貫入し、冷却固結した火山岩である（吉澤，2005）。その後の隆起と侵食によって海面上に露出し、現在その内部を直接見ることができる。火山岩に発達する節理のうち、代表的なものに柱状節理と板状節理がある。今回、千丈敷の柱状節理・板状節理について調査研究を進めた。また、2020年9月、東尋坊で上野浩幸氏が所有するドローンで撮影した東尋坊の岩場の空中写真を見せていただいた。この写真からは、千丈敷周辺の柱状節理の規則正しい縦の特徴的な割れ目群（図9）を発見した。これは、地上からでは気がつかない柱状節理の大規模構造であった。また、波が穏やかで、海底の透明度が良い日に上空から撮影した、大池、船着場、ライオン岩、千丈敷付近の海底に続く柱状節理の写真（図11、図12、2020年8月23日撮影）にも注目した。今回、貫入岩体の多くの現象を詳細に観察・調査することにより、千丈敷の柱状節理・板状節理の特徴や形成の順序などについて明らかにすることができた。

2. 調査結果と考察

千丈敷の柱状節理と板状節理と溶岩の流動痕について詳細な調査と考察をした結果、次のようなことが明らかとなった。

*福井市自然史博物館協力員 〒918-8006 福井県福井市足羽上町147

*Expert adviser of Fukui City Museum of Natural History, 147 Asuwakami-cho, Fukui-shi, Fukui 918-8006, Japan

(1) 千丈敷への遊歩道沿いで、柱状節理、板状節理の上部から最下部まで観察可能 (図1)

大池から千丈敷に向かう遊歩道沿いを進み、千丈敷に向かって階段を降りていくと、海岸侵食が進んだ岩壁に柱状節理や板状節理の縦断面、横断面を観察することができる。海面に近づくにしたが、柱状節理の太さが増大する。また、板状節理と石材採掘跡に残された畝状の溶岩の流動痕や覆瓦状の構造なども観察できる。その他、三国港突堤工事に伴う、板状節理の境界で剥離する採石方法や、ダイナマイト使用の痕跡も観察できる。

(2) 千丈敷には柱状節理の巨大な横断面が連続する (図3, 図4)

三国港突堤を建設するための石材は、海底に沈めるため、ある程度の大きさが必要で、当時発明されたばかりのダイナマイトが使用された。また、剥離面である板状節理面も適度な間隔で存在し、採掘した跡には板状節理面である広い平坦面が残されている。柱状節理の横断面の長軸の長さは約440cmにも達し、直交する短軸の長さは約200cmの細長い楕円体で、千丈敷において最大の石材を採石できる。断面が扁平な楕円体であるため、堤防をつくる際、海底に積み上げるためにも積みやすい形態で都合良かったのである。

仮説であるが、千丈敷で横断面の長軸が最大径になった理由は、貫入岩体の最下部であること以外に、柱状節理が形成される前に、内部の高温状態での溶岩の流動があり、板状節理が形成されている。その後も流動が継続し、長軸方向の溶岩の流動が強く働くと同時に、縦方向に大きな張力が働いて、横断面の伸びと縦の平行する割れ目群がNW方向に発達したものと考えられる。

(3) 千丈敷柱状節理の横断面の長軸がNW方向に長く伸びている (図3, 図4, 図6)

千丈敷の柱状節理の横断面の長軸の大きさは最大約440cmを超え、短軸は約200cmである。その方向性はN33°W方向を向き、並列し連続している。その延長方向には大きな岩体があり、上空からのドローン映像では、長い大規模割れ目が幾本も並列して集合している。この方向に直交する短い割れ目は後の時期に形成されたものと考えられる。柱状節理の六角の柱は、冷却面に直角に発達する (水口, 2017)。板状節理の板の方向は流理面を代表し、溶岩の流動方向を表し、必ずしも冷却面と一致しない。板状節理は、応力場の高温状態における流動剪断応力の結果形成 (石渡, 2020) されたものと考えられる。

(4) 千丈敷板状節理面の畝状流動痕の測定と覆瓦状構造の測定 (図4, 図5, 図8)

千丈敷は三国港突堤 (エッセル堤) 築港のための採石跡で、明治時代初期に採掘が行われた平坦面である。約140年余りは経過しているが、その後の波浪の侵食による変形等はほとんど見られない。この平坦面上には、柱状節理の横断面の割れ目の他、横断面の長軸方向と直交する畝状に突出した痕跡が明瞭に残されている。この痕跡は、平坦面上でNE方向に長く (約10m以上) 連続して追跡できる。この方向性は、千丈敷付近では全て同一方向で約N62°Eである。これは溶岩流の走向を示していると考えられる。この痕跡は、この面だけでなく、上下の他の層でも確認できる。また、この痕跡は連続した覆瓦状構造を持っている。その構造は、波状で進行方向である前面が盛り上がり、後面はなだらかな斜面となっている。流動痕を含む面を柱状節理の縦の断面で確認すると、その断面には明らかな急冷周縁相が認められ (図5)、一時冷却が進んだことがわかる。これらの構造は、溶岩の流動の痕跡と考えられる。溶岩流がどの方向に向かって流れたかは、痕跡の覆瓦状構造から推定することができる。図8の場合、溶岩の流動方向は、左から右方向と考えられる。千丈敷の平坦面の柱状節理の割れ目同士の境界には、急冷周縁相は認められない。したがって、柱状節理は急冷ではなく、板状節理よりも後にゆっくり冷却して形成されたものと考えられる (石渡, 2020)。

(5) 千丈敷の柱状節理の横断面の長軸方向と溶岩の流動方向との関係 (図4)

千丈敷の柱状節理の横断面の長軸方向は、N33°Wで、長く伸びているが、この方向は、溶岩の流動痕の覆瓦状構造から求めた流動方向と一致している。流動痕が示す畝状の痕跡は、N62°Eで溶岩流の走向をあらわしており、溶岩の流動方向は、これと直角をなす方向で、N33°Wとなり、横断面の伸びの方向、つまり柱状節理の長軸方向とほぼ一致する。

(6) 千丈敷の柱状節理横断面の長軸方向とNW延長方向の大規模節理群 (図6, 図9)

千丈敷の柱状節理の横断面の長軸方向が、そろって同一方向に向かって長く伸びているが、畝状の流動痕とはほぼ直交している。畝状の流動痕が、貫入岩体の内部の溶岩の流動の方向を現していると考え、まだ溶岩が固結する前の段階で、粘性の高い高温の溶岩が流動により剪断され、何層にも重なって固結したのものと考えることができる。柱状節理の横断面の長軸方向が見事にそろっている場所は、千丈敷のNW方向の

大きな岩体である。その特異さはNW方向上空から眺めたドローン画像で明瞭にわかる。

(7) 千丈敷南方の七ツ岩付近の柱状節理の長軸方向と溶岩流動痕の方向 (図10)

千丈敷に見られる溶岩の流動痕は、別の場所の採石跡の平坦面でも認められる。その方向性はNEで千丈敷の痕跡と同じ方向である。また、千丈敷のごく近くでも、優勢な縦の大規模割れ目がなく、等間隔の普通の等面積の多角形の横断面になっている場所もある。千丈敷南方の七ツ岩付近の平坦面においては、柱状節理の横断面の長軸方向と直交する畝状の溶岩の流動痕が認められる。この流動痕の走向はN63°Wで、千丈敷とは異なる方向を示している。これは、板状節理面の層準が異なるためと考えられる。以上のことから、東尋坊の柱状節理は、場所によって差があるが、千丈敷のN33°Wの節理方向は、東尋坊貫入岩体の主たる構造に起因していると考えられる。

(8) 雄島で見られる、雄島流紋岩の板状節理、柱状節理、流理構造

雄島流紋岩の板状節理、柱状節理、流理構造、柱状節理の横断面の伸びの方向などは、千丈敷で見られる現象とはほぼ同じである。場所・岩質等が異なるが、板状節理面に現れた流理構造の走向、その走向に垂直方向の溶岩の流動方向、流動方向に平行な柱状節理の大規模割れ目など、良く似た現象となっている。

(9) 千丈敷柱状節理縦断面のレイヤリング (図2, 図7)

千丈敷、大池、ピョウブ、三段岩など各所の柱状節理の縦断面では“レイヤリング”と呼ばれる厚さ15~20cmで、規則正しく上下に積み重なった“層状構造”が見られる(石渡, 2020)。これは東尋坊の貫入岩体内部の溶岩が流動し、地下で層構造をなして堆積した結果、層状に見えるものである。似ているが板状節理ではない。千丈敷の柱状節理の縦断面では普通に見ることができるが、これは千丈敷の岩体表面が季節風や波浪で風蝕・波蝕を強く受けた結果、現れたものと考えられる。

(10) ドローン画像から海底の柱状節理の延長や地形を見る (図11, 図12)

上野浩幸氏と氏が所有するドローンで撮影した写真で注目したのは、千丈敷周辺の上空から見た、海側に発達する柱状節理の規則正しい縦の大規模な割れ目群である。上空からは千丈敷の巨大横断面の延長線上に節理構造が見事に連続している。また、波が穏やかで、海底の透明度が良い日に上空から撮影した、大池、船

着場、ライオン岩、千丈敷付近の海底に続く柱状節理の写真(2020年8月23日撮影)にも注目した。また、新たに千丈敷周辺の上空からの写真も撮影した。これらの写真から、千丈敷周辺の柱状節理について、多くの知見を得ることができた。大池から船着場の出口付近の海底地形、千丈敷の北西延長部やライオン岩付近の海底にも柱状節理の延長部が確認できる。実際の測定データではないが、柱状節理の垂直方向の海底への延長は約10m~20mはあるものと考えられる。侵食による谷地形も海底へ深く続いてえぐられているのが確認できる。ライオン岩やピョウブ岩も海底で陸の岩体とつながっている。この他、ドローン画像からは海底の平坦面や、波浪の影響による海底の侵食地形などが分かる。

東尋坊の海底地形で特徴的なことは、岬状に突出している先端部の海底への延長部や谷沿いの両岸には、はっきり柱状節理と分かる地形が続いている。また、柱の横断面形が多角形であることもわかる。これらの観察結果から、東尋坊貫入岩体の侵食される前の溶岩ドームの地形を推定すると、ドームの底辺の規模や柱状節理の柱の高さの規模は、当初考えていたものよりかなり大きなものになると考えられる。大池の柱状節理の高さは約25m、海底に約10m、全体で約35mは優に超えることになる。

気になる柱状節理の海底地形として、大池と船着場間の先端部に見える海底の柱状節理が、N80°E方向に断層のように斜めに直線状に切れ落ちていることである。この地形の成因については、今後の研究に待たなければならない。

(11) 千丈敷の板状節理は柱状節理の前に形成された (図4, 図5, 図8)

板状節理は柱状節理よりも早い時点で、溶岩がまだ流動できるような高温の状態では形成されないと考えられている。また、板状節理は、主にマグマの流動による剪断が原因で形成され、単純な冷却節理ではないと考えられている(石渡, 2020)。

千丈敷でも高温状態の溶岩流がほぼ水平方向に幾層にもわたって流出した後、その流動痕を残したまま冷え固まり板状節理が形成された。柱状節理は流理とは無関係に、それを切って鉛直方向に発達している。柱状節理の面の方向性については、溶岩の流動方向の痕跡と考えられる波状の流動痕や、横断面の長軸方向の伸びの方向等からN30°W方向の東になった縦の割れ目が先行し、長軸方向の流動が強く働くと同時に、縦方向に大きな張力が働いて、横断面の伸びと縦の平行する割れ目群が発達した。その後、これに直交する割れ目が形成されたと考えられる。

3. まとめ

東尋坊の千丈敷の柱状節理と板状節理と溶岩の流動痕について、現地調査とドローンによる写真で研究を進めた。その結果、千丈敷の柱状節理の横断面の長軸方向の大きさが、東尋坊最大で、約440cmに達すること。また、その長軸が約N33°W方向に伸び、この方向は千丈敷に特徴的な大規模な縦の割れ目構造形成の基になっていることなどがわかった。また、明瞭な板状節理が存在し、この面が形成された時の急冷周縁相や、溶岩が流動した畝状の痕跡（走向N62°E）が残っている。この痕跡に記録された覆瓦状の構造により、溶岩の流れの向き（約N33°W）を推定することができた。千丈敷は東尋坊では海面レベルの高さにあり、柱状節理の最下部にあたり、横断面の大きさが最大である。また、東尋坊貫入岩体が高温状態のときの流動方向や流動量、規則的な大規模割れ目構造が顕著に残されている。以上のことから、千丈敷は東尋坊貫入岩体の地質的・地形的分布のほぼ中心部に位置し、最後にゆっくり冷え固まった部分と考えることができる。

柱状節理・板状節理など、節理構造の形成順序については、貫入岩体内部で最初に高温状態の流動剪断により板状節理面が形成されたと考えられる。その後、冷却が進み柱状節理が形成されたと考えられる。柱状節理については、NW方向の大規模節理が先行して形成され、後に横方向の小さな節理が形成された。柱状節理面の縦断面に水平に表れた溶岩流の積み重なりを現すと考えられるレイヤリング（層状構造）については、大池、船着場、千丈敷、三段岩など、東尋坊の海食の進んだ柱状節理の縦断面で観察することができる。

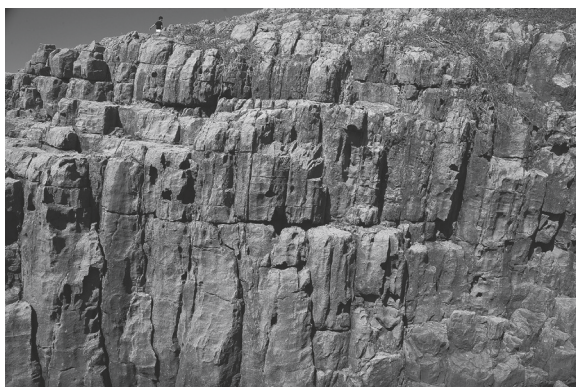


図1. 千丈敷付近の柱状節理を海面付近から最上部（貫入岩体の表面に近い）まで垂直に見ると、柱の太さは上部にいくにしたがって、細くなっている。水平方向の大きな割れ目は板状節理。板状節理は柱状節理よりも先に形成されたと考えられる。

謝辞

2020年9月、上野浩幸氏が所有するドローンで撮影した東尋坊の岩場の写真に出会った。千丈敷の上空から見た海側に発達する柱状節理の規則正しい縦の大規模な割れ目群の写真である。また、海底深くに続く柱状節理の写真にも注目した。上野氏からこれらの写真を譲り受けた。また、新たにドローンを飛ばしていたら、千丈敷の上空からの写真を提供していただいた。これらの写真により、千丈敷周辺の柱状節理について、多くの知見を得ることができた。上野氏にお礼を申し上げます。

引用文献

- 東野外志男・清水 智, 1987, 福井県三国海岸に産出する火山岩類のK-Ar年代, 石川県白山自然保護センター研究報告, no.14, 25-30.
- 石渡 明, 2020, 日本地質学会ホームページ, コラム 柱状節理・板状節理.
- 水口 毅, 2017, 地形現象のモデリング, 第9章柱状節理～火成岩の亀裂とそのモデル実験～.
- 吉澤康暢, 2005, 東尋坊安山岩質貫入岩体の産状と構造, 福井市自然史博物館研究報告, no.52, 13-27.
- 吉澤康暢, 2018, 東尋坊と雄島に残る“エッセル堤”に使用された石材採掘跡, 福井市自然史博物館研究報告, no.65, 11-20.



図2. 三段岩付近の岩壁の柱状節理の縦断面では、“レイヤリング”と呼ばれる厚さ15～20cmで、規則正しく上下に積み重なった溶岩の“層状構造”が見られる。板状節理ではない。



図3. 千丈敷の長柱状に伸びた柱状節理の巨大な横断面。長軸の伸びの方向はNW方向に連続して追跡できる。左右の2本の縦の大規模割れ目は、長軸方向とほぼ平行になっている。

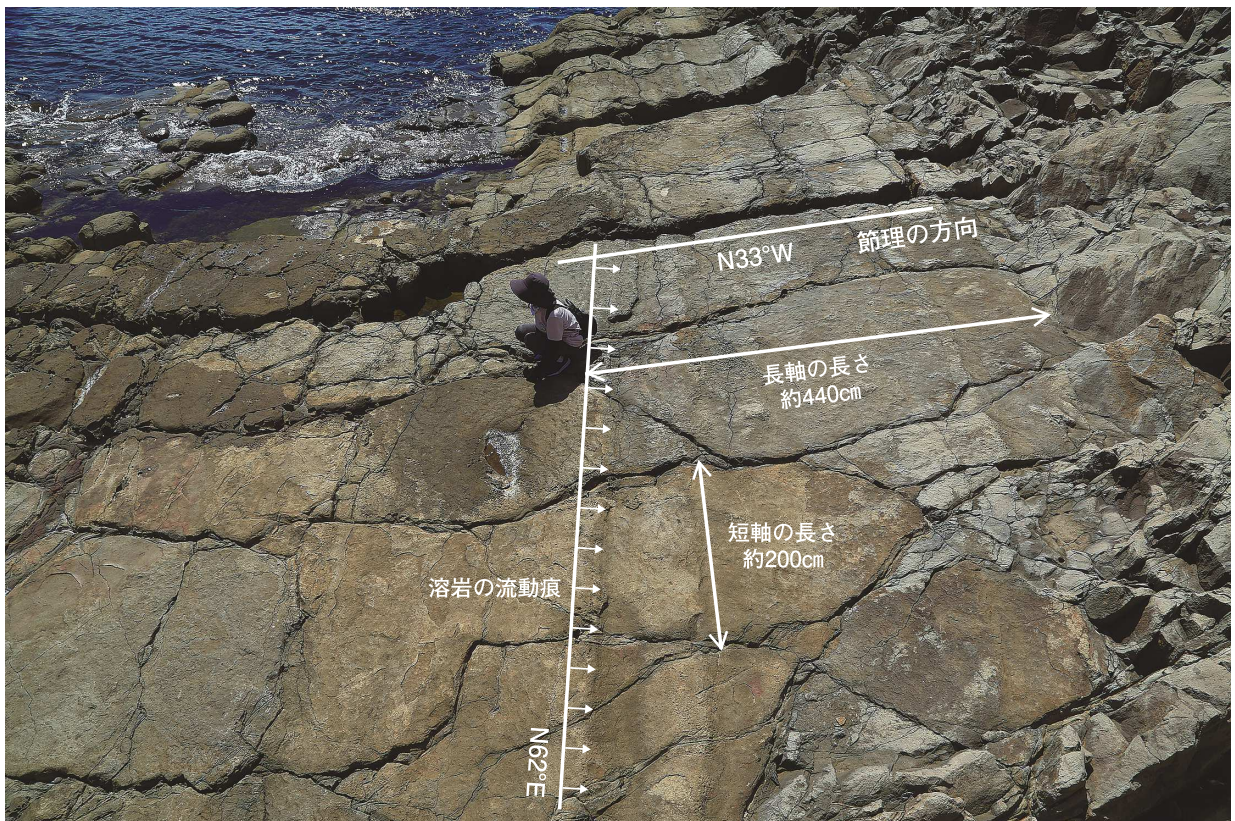


図4. 千丈敷の海面レベルで見られる柱状節理の長柱状に伸びた並列する巨大な横断面。長軸方向の長さは約440cm、短軸方向の長さは約200cmで、東尋坊では最大の大きさ。



図5. 千丈敷の柱状節理を水平に横切る板状節理。この板状節理は明瞭な剥離面となっていて、その上下には溶岩の流動痕の畝状の構造が連続している。また、板状節理面の上下には、リム状の急冷周縁相が見られる。板状節理面の間隔は等間隔ではない。



図6. 千丈敷付近で見られる柱状節理の連続した大規模な縦の割れ目構造。横の割れ目は連続性から推定すると、縦の割れ目の後に形成されたものと考えられる。



図7. 柱状節理の縦断面に水平に現れた溶岩の積み重なりを現すと考えられる“レイヤリング”。厚さ15~20cmで、規則正しく上下に積み重なった“層状構造”。板状節理ではない。



図8. 千丈敷の板状節理面に現れた、巨大な柱状節理の横断面を横切る溶岩の畝状の流動痕。この流動痕には覆瓦状構造が見られる。覆瓦状構造から推定すると、溶岩の流動方向は左から右方向と考えられる。流動痕は柱状節理より先に形成された。



図9. 千丈敷に現れた、柱状節理横断面の連続した縦の割れ目構造。これらは、NW方向（図の上方）の並列した割れ目構造に続く。割れ目構造はゆるい逆S字形。各断面の面の高さは、全て同じではなく段差がある。（2020年9月上野浩幸氏ドローンによる撮影）

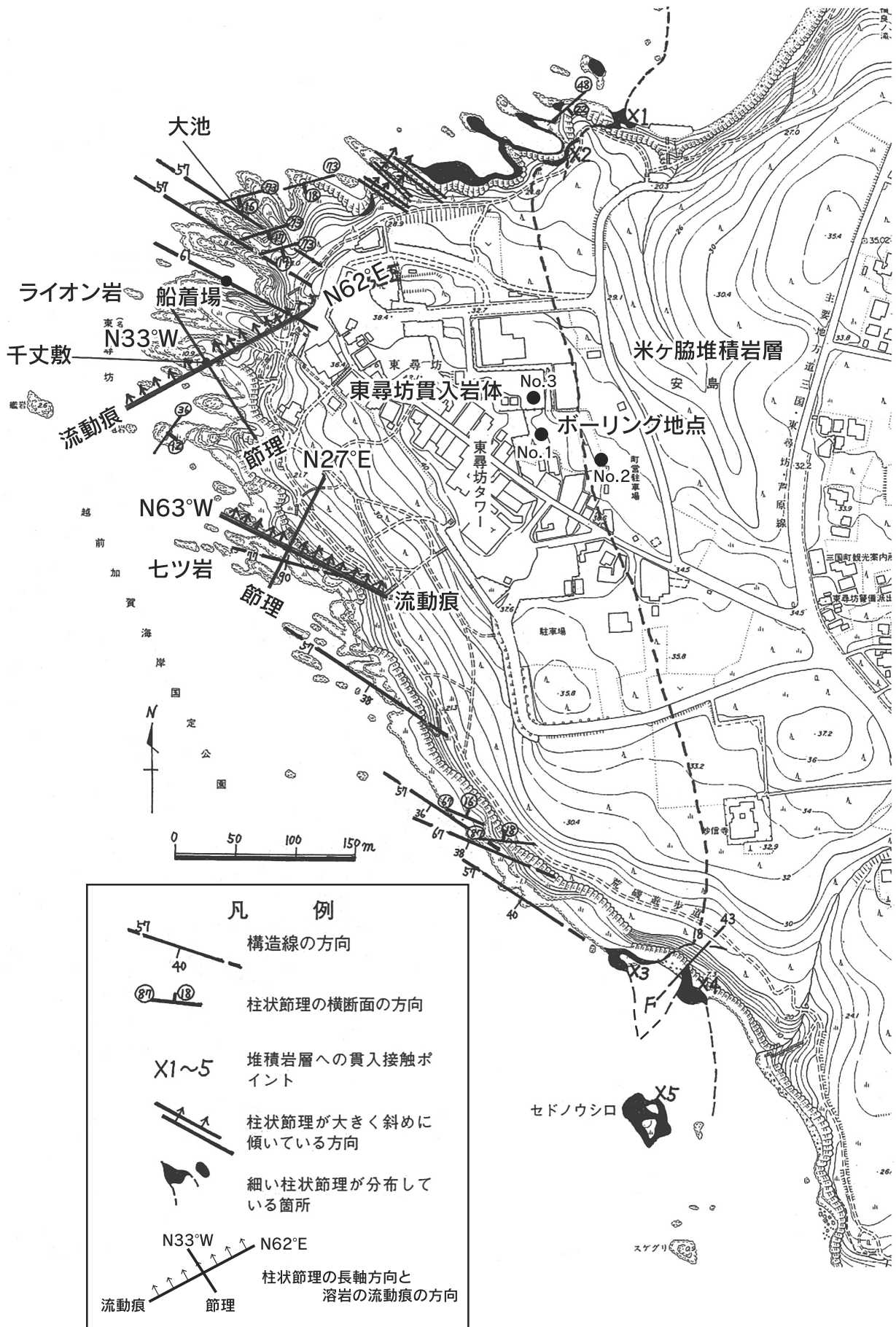


図10. 東尋坊千丈敷付近の構造線，柱状節理の横断面の長軸方向，溶岩の畝状の流動痕の方向（吉澤2005に加筆）。

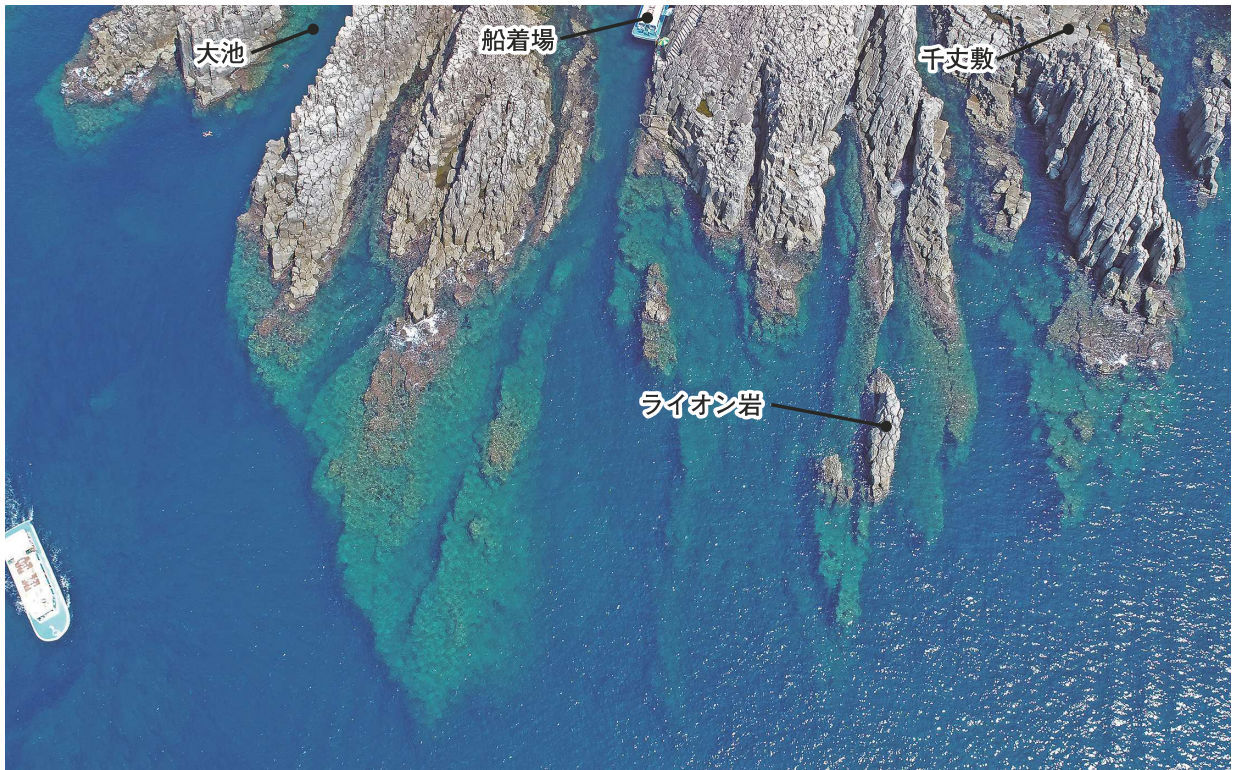


図11. 波が穏やかで、海底の透明度が良い日に上空から望む、大池、船着場、ライオン岩、千丈敷付近の海底に続く柱状節理。大池と船着場間の海底の柱状節理が、N80°E方向に断層のように直線状に切れ落ちている。(2020年8月23日上野浩幸氏ドローンによる撮影)

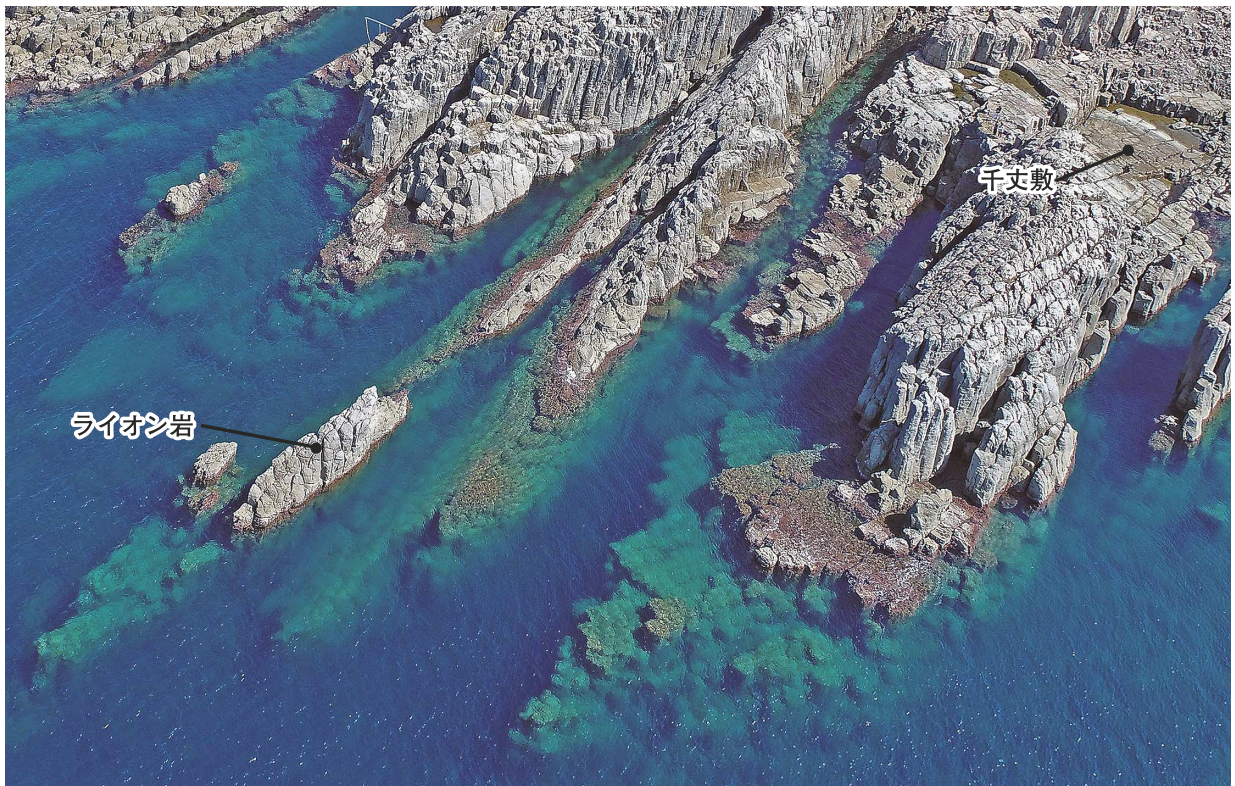


図12. 波が穏やかで、海底の透明度が良い日に上空から望む、ライオン岩、千丈敷付近の海底に続く柱状節理 (2020年8月23日上野浩幸氏ドローンによる撮影)。