

1. 緒言

地殻の応力状態に関する情報は様々な分野で必要不可欠なものとなっており、地震のような大きな応力擾乱の履歴によって地殻応力場がどのような変化を受けるのかというメカニズムを明らかにすることは、工学的分野への寄与も期待できる。本研究では、東北地方太平洋沖地震前後の浅所地殻応力の原位置測定結果に基づき、地震による浅所地殻応力場の影響の有無、および傾向の再評価を行うとともに、応力のつり合い方程式や3D-FEM解析によるモデル計算から、東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）直後の鉛直応力上昇理由について理論的説明の可能性を検討した。

2. 東北地方太平洋沖地震前後の釜石鉾山における地殻応力再評価

Sakaguchi et al. (2017)¹²⁾は、本研究に先駆けて、東北沖地震前後の地殻応力場の経年履歴を明らかにすることを目的に、岩手県釜石鉾山(被り300 m, 標高550 m)において、円錐孔底ひずみ法による地圧計測を行ってきた。測定結果から、地震前まではほぼ被り圧相当と測定されていた鉛直応力が、地震1年後には約2.4倍になり、その後次第に被り圧相当に復元していることが報告された(図1)。1年後に鉛直応力が倍以上になった原因は、測定地点の直上から半径2 km程度の位置する3つの山(標高約1,300 m)が一時的に影響したとされているが(図2)、以前からある山の影響を一時的に受けたとする説明は不十分である。そこで、本研究では、地震前後の鉛直応力成分の上昇理由について、報告されている測定結果の再評価を行うとともに、理論的説明の可能性について検討した。今回は、既報では注目されていない6応力成分のボーリング軸方向の深度変化および経年変化に着目し、応力のつり合い条件の観点から、せん断応力のボーリング軸方向の変動が鉛直応力増加の要因になっていた可能性を示した。

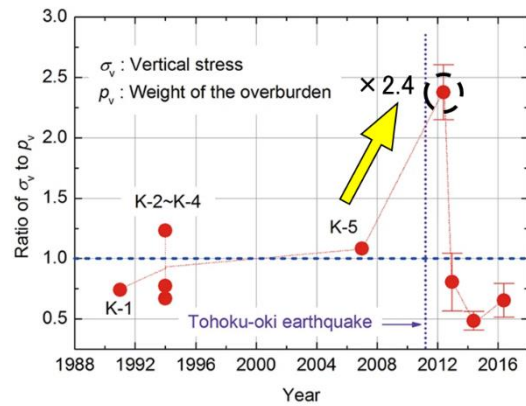


図1 鉛直応力の深度分布¹²⁾

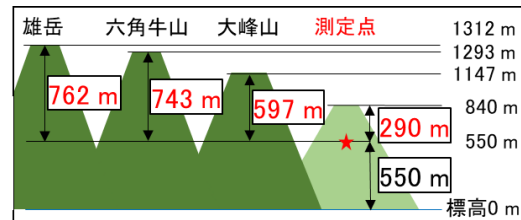


図2 測定点と周囲の山々の断面図

3. せん断応力の影響

3.1 応力のつり合い方程式

平行六面体の各面に作用する応力には、式(1)~式(3)の関係がある³⁾。ここに、 X , Y , Z は物体力である。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + X = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0 \quad (3)$$

鉛直応力 σ_z に注目すると、式(3)を深度 Z に関して積分すると、地殻応力における鉛直成分の一般式(4)³⁾が得られる。ここに、 ρ は地殻密度、 g は重力加速度である。

$$\sigma_z = \rho g Z - \int_0^Z \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dz - \int_0^Z \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dz \quad (4)$$

鉛直応力 σ_z は、 $\rho g Z$ で表される被り圧からせん断成分を含んだ2つの項を引くことによって算出することができるが、一般的には鉛直応力 σ_z と被り圧は等しい値を示すと考えられている。Howard (1966)⁴⁾は、鉛直応力と被り圧の不一致が起こるような場合については、これらのせん断成分を含んだ2つの項が影響していると説明している。そこで、釜石鉱山での応力場についてもこのことが関係しているのではないかと考えた。

そこで本研究では、釜石鉱山でボーリング深度の異なる複数点で応力の測定を行っていたことから、式(4)の計算が可能だと考え、応力6成分の観点から検討を行った。今回はボーリング軸方向を y 軸と設定した座標系で考え、常に $x = 0$ 、すなわち $\Delta x = 0$ として扱ったため、式(4)の x の変位を含んだ項は常に0として考えた(図3)。したがって、せん断応力 τ_{yz} を含んだ積分値が負の値であり、かつボーリング深度による変化量が大きければ、鉛直応力が推定被り圧よりも大きくなり、せん断応力が鉛直応力に影響を与えているという仮説を証明できると考えた。

ここで、釜石鉱山での鉛直応力 σ_z とせん断応力 τ_{yz} の測定結果および各測定地点での標準偏差をまとめて表1に示す。表から、鉛直応力 σ_z 、せん断応力 τ_{yz} の応力値が経年とともに減少していることに加えて、せん断応力 τ_{yz} の標準偏差も経年とともに小さくなっていることがわかる。図4は東北沖地震後の結果に加えて、1991年の測定結果も併せたせん断応力 τ_{yz} のボーリング深度分布を表している。この図から、大きな地震のなかった1991年と比較して、東北沖地震1年後の2012年3月はボーリング深度によってせん断応力が大きく変化していることがわかる。また、標準偏差で見ると、地震後2年目には1991年と同程度の値になっており、それ以降はさらに小さくなっていることから、地震によって擾乱された地殻応力状態が時間とともに緩和していったと考えられる。したがって、せん断応力のボーリング深度による変化量の増減は鉛直応力 σ_z に影響を及ぼしていると考えられることができる。

3.2 3D-FEMによる数値解析

実際にせん断応力の変化量 $\Delta \tau_{yz}$ が鉛直応力 σ_z にどれほどの影響を与えているのか、さらに、鉛直応力 σ_z に直接の影響を与えると考えられるせん断応力 τ_{yz} を载荷した場合、どれほどの鉛直応力 σ_z の増加が見込めるか検証するため、3次元モデルを用いた数値解析を行った。使用した3D-FEMモデルを図5に示す。単純な応力変動を見るための直方体の山なしモデル(左)と、山の影響を定量化して比較するために計測地点である釜石鉱山の地形を模擬した山付きモデル(右)を用いて解析を行った。今回は、単純な応力変動を見るための直方体の山なしモデルと、山の影響を定量化して比較するために計測地点である釜石鉱山

の地形を模擬した山付きモデルを用いて解析を行った。本解析では、釜石鉱山を模擬して、ヤング率 50 GPa, ポアソン比 0.25, 単位体積重量 27 MPa/km とし, X軸+方向を北, Y軸+方向を西とした。

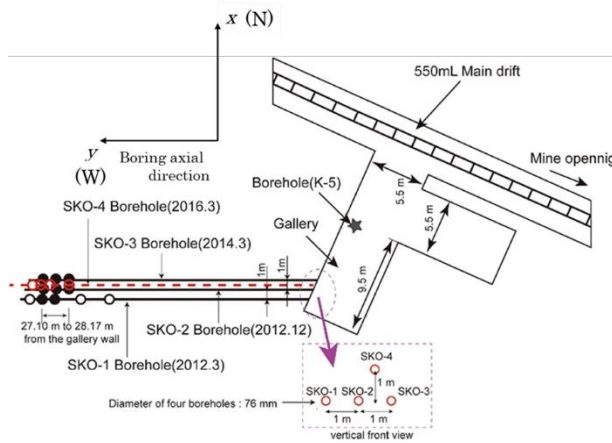


図3 測定地点の平面図²⁾

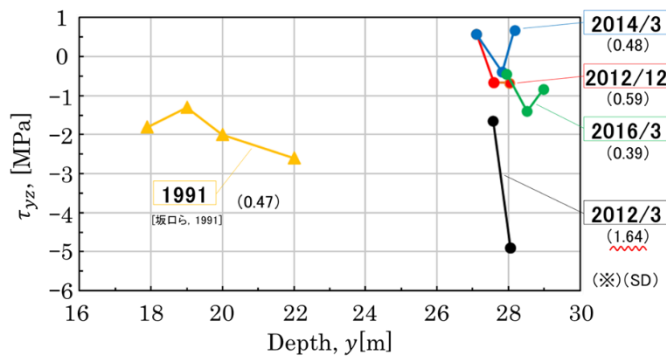


図4 せん断応力 τ_{yz} の各年比較

表1 鉛直応力 σ_z , せん断応力 τ_{yz} と各標準偏差

Measurement year	Depth [m]	σ_z [MPa]	τ_{yz} [MPa]
2012/3	27.57	17.2	-1.6
SKO-1	28.06	19.4	-4.9
Mean±SD		18.29 ±1.07	-3.28 ±1.64
2012/12	27.10	7.8	0.6
SKO-2	27.60	6.8	-0.7
	28.03	4.0	-0.7
Mean±SD		6.19 ±1.64	-0.25 ±0.59
2014/3	27.10	3.1	0.6
SKO-3	27.82	3.9	-0.4
	28.17	4.2	0.7
Mean±SD		3.73 ±0.43	0.29 ±0.48
2016/3	27.95	5.9	-0.4
SKO-4	28.52	5.4	-1.4
	28.98	3.8	-0.8
Mean±SD		5.04 ±0.89	-0.89 ±0.39

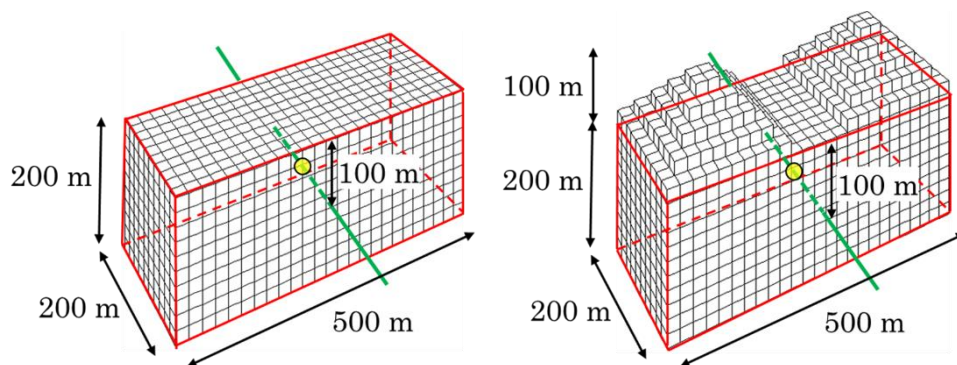


図5 3D-FEMで使用したモデル

左: 山なしモデル, 右: 山付きモデル

結果を表 2 に示す。東側の面にせん断応力 $\tau_{yz} = 5.0$ MPa をかけた結果、山なしモデルの鉛直応力 σ_z は自重のみの 1.8 倍だったが、山付きモデルの鉛直応力 σ_z は自重のみの 2.3 倍と東北沖地震後に釜石鉱山で確認された 2.4 倍に近い鉛直応力 σ_z の増加が確認できた。このことから、山の被り圧のみで 2.4 倍の鉛直応力 σ_z の増加は見込めないが、山が存在することで地震の地殻変動による応力変化がより大きくなっていることがわかる。また、せん断応力の変化量 $\Delta\tau_{yz}$ に関しては、山付きの方が大きいことから、山の存在は場所による応力値の変化に影響している。しかし、鉛直応力 σ_z 以外に注目すると、主に水平応力 σ_x に関しては、1991 年に対する 2012 年の実測結果ほど増加していなかった。また、载荷したせん断応力 τ_{yz} の効果は、地震による、沈降の影響を模擬しているとも考えられる。

表 2 せん断応力 $\tau_{yz} = 5.0$ MPa をかけた際の解析結果

	Mountain	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_z [MPa]	τ_{yz} [MPa]	τ_{zx} [MPa]	τ_{xy} [MPa]
Own weight	×	0.9	0.9	2.7	-9.0E-9	2.2E-14	3.1E-16
	○	1.4	1.1	3.2	-6.5E-9	1.3E-10	-5.2E-11
$\tau_{yz} = 5.0$ [MPa]	×	1.7	2.0	4.8	-1.2	-3.9E-10	-4.4E-9
	○	2.3	2.6	7.2	-0.5	4.6E-2	0.1
1991 K-1		21.7	8.9	10.3	-2.5	-5.0	-2.1
2012/3 SKO-1		45.7	28.9	18.3	-3.3	-2.9	-0.8

4. 水平応力の影響

そこで、本章では、どのような地殻変動が起きたら東北沖地震前後で得られた 6 応力成分の増減が生じるか検討するため、せん断応力以外の応力を载荷してシミュレーションを行った。結果を表 3 に示す。実測結果を参考にして予備的解析をした結果、せん断応力 $\tau_{yz} = 2.4$ MPa、水平応力 $\sigma_x = 9.0$ MPa、 $\sigma_y = 1.7$ MPa の条件が実測結果と同程度の応力増加を計測することができた。これは、南北方向に大きな圧縮応力が発生していたことを表している。図 6 は、地震前および地震後の主応力方向を下半球ステレオ投影で示したものである^{1),2)}。この図から、釜石鉱山はもとより南北圧縮が強い地域であることがわかる。地震後にやや東よりに回転しているが、南北圧縮の傾向は変わっていない。

表 3 せん断応力 $\tau_{yz} = 2.4$ MPa、水平応力 $\sigma_x = 9.0$ MPa、 $\sigma_y = 1.7$ MPa をかけた際の解析結果

	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_z [MPa]	τ_{yz} [MPa]	τ_{zx} [MPa]	τ_{xy} [MPa]
$\tau_{yz} = 2.4$ [MPa] $\sigma_x = 9.0$ [MPa] $\sigma_y = 1.7$ [MPa]	4.3	2.0	6.0	-0.3	1.4	0.1

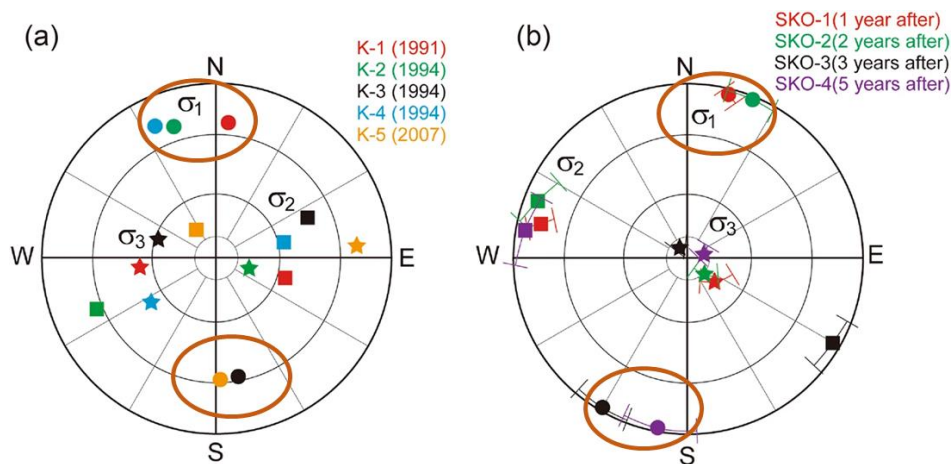


図6 東北沖地震前および地震後の主応力方向下半球ステレオ投影²⁾

5. 考察

釜石鉾山はもとより南北圧縮が強い地域であるが、東北沖地震によってさらに南北圧縮の応力がさらに大きくなっていることに関しては何らかの原因が存在するものと考えられる。そこで、本章では、釜石鉾山における東北沖地震による南北圧縮応力上昇理由について考察を行った。

表4は東北沖地震前の主応力の測定結果である。吉田ら(2020)⁵⁾によると、東北日本地殻内の応力場は、プレート相対運動だけでなく、地形や過去の地震活動などの様々な影響を受け空間変化しており、大地震震源域においては、差応力が20 MPa程度以下であった場合に本震時の静的応力変化の影響により説明することが可能であるとしている。東北沖地震前の釜石鉾山の実測値を見ると、差応力が20 MPa程度だったことから、今回の南北圧縮応力上昇理由についてもこの静的応力変化が影響していると考えた。

表4 東北沖地震前の釜石鉾山での主応力測定結果

測定年	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	$\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa]
1991 (K-1)	22.3	14.2	4.4	17.9
1994 (K-2)	29.3	7.6	2.9	26.4
1994頃 (K-3)	27.0	7.6	6.2	20.8
1994頃 (K-4)	25.0	8.0	6.6	18.4
2007 (K-5)	10.8	7.5	2.7	8.1

6. 結言

3D-FEMによる数値解析から、山が存在することで地震の地殻変動による応力変化がより大きくなっていることがわかった。また、せん断応力の変化量 $\Delta\tau_{yz}$ から、山の存在は場所による応力値の変化に影響していることがわかった。載荷応力の増減と同方向の水平応力は比例していることから、釜石鉾山の地殻には南北と東西の両圧縮応力が働いており、南北方向の圧縮が強かったことがわかった。また、釜石鉾山はもとより南北圧縮が強い地域であるが、東北沖地震によってさらに南北圧縮が強くなったことがわかった。

た。東北日本地殻内の差応力は小さく、20 MPa 程度以下であったことから、本震時の静的応力変化の影響により、もともと存在していた応力場が強められたと考えられた。

参考文献

- 1) Sakaguchi, K., Yokoyama, T.: Changes in In-Situ Rock Stress Before and After the Major 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *ScienceDirect*, 191, pp.768-775, 2017.
- 2) Sakaguchi, K., Yokoyama, T., Lin, W., Watanabe, N.: Stress buildup and drop in inland shallow crust caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake events, *Scientific Reports*, 7, 10242, 2017.
- 3) Timoshenko, S. P., Goodier, J. N.: *Theory of elasticity*, New York, McGraw-Hill Book Co., Inc., 506 p.228, 1951.
- 4) Howard, J. H.: Vertical normal stress in the earth and the weight of the overburden, *GSA Bulletin*, 77, 6, pp.657-660, 1966.
- 5) 吉田圭佑, 松澤暢: 近年の地震観測により得られた東北日本の応力場の不均質性と断層強度および地震発生機構の関係, *Journal of Geography*, Vol.129, pp.451-471, 2020.