

共起クラスタマイニングによる東日本大震災の 地震活動の相互作用の抽出

Extracting Seismic Interactions after the 2011 Tohoku Earthquake by Co-occurring Cluster Mining

岡田 佳之^{*1*2}
Yoshiyuki Okada

稲場 大樹^{*1*2}
Daiki Inaba

福井 健一^{*2}
Ken-ichi Fukui

沼尾 正行^{*2}
Masayuki Numao

^{*1}大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{*2}大阪大学産業科学研究所

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

The March 11th, 2011, earthquake off the Pacific coast of Tohoku, Japan, was a record-breaking natural disaster. After the M9.0 mainshock, numerous aftershocks and induced seismicity occurred throughout Japan. In this study, we extract earthquake co-occurrence patterns for investigating mechanical interactions among the affected areas. To extract seismic patterns, both co-occurrence among seismic events in the event sequence and distance among the hypocenters within each area must be considered. However, most conventional research has considered only one of these aspects. Then, we acquired affected areas and relationships between the co-occurrence patterns and focal mechanisms from the 2011-2012 hypocenter catalog. Some results were consistent with seismological literature. The results include highly affected areas that may indicate asperity, and change of focal mechanisms before and after the Tohoku Earthquake.

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、わが国における未曾有の大災害となった。地震の規模を表すマグニチュード(Mw)は観測史上最大の9.0であり、地震だけでなくその後の津波、原発事故を引き起こし、東北地方太平洋側の地域を中心に多数の死者、行方不明者を出した。震災から3年余り経過した2014年現在でもなお、東北地方太平洋側の地域を中心に、復興への作業が続いている。

地震は他の自然災害と比較しても、特に大きな被害を生じさせる。これまで地震学者を中心として、地震の中長期予測から短期間の予兆発見まで、様々なスケールで数多くの研究がなされている。数十年単位での予測はベイズ統計モデルを用いた方法である程度の成果が得られている[尾形98]。一方、数ヶ月、数週間といった直前の予兆については、研究が本格化して50年経過した今でさえ予兆が見つかったという報告はない。地震発生には様々な要因が考えられ、地殻構造や地震発生に至る物理的なプロセスは非常に複雑であり、また2度と全く同じ地殻構造にはならないためである。それどころか、地震発生の物理についても未知な部分が多く残されている[Geller 97]。そのため、近年では地震の物理現象そのものを解明しようとする、科学的な基礎研究へと回帰しつつある。

地震発生の物理を知ること、自然災害から我々の都市を守り持続可能な社会を築くための基礎知識として重要である。本研究では、その中でも異なる地域の相互作用に着目する。局所的な地殻構造のみならず、別の地域との連動性を探ることで、日本を取り巻く地殻全体を系としてマクロに理解することや、局所的にみているだけでは捉えることの難しい離れた地域での誘発地震の可能性を知ることができると考える。

複数の地域間での地震の連動性、もしくは誘発地震の可能性[Helmstetter 05]について指摘されているものの、これまで地震研究の多くは専門家の持つ経験や知識に基づいて、地域を限定して行われている。したがって、力学的な相互作用を示す

重要な地域や興味深い地震イベントを今まで見落としていた可能性がある。それに対して本研究では、網羅的に地震の連動性の高い地域の自動抽出を試みた。

近年、特に1995年の阪神淡路大震災以降、日本における地震観測網が急速に発達しており、今や世界的に見ても比類なき観測体制が整っている。それに伴い、地震波や地殻変動量などの地震観測データも年々膨大な量が蓄積されている。そのため、これら大量のデータから有用な知識を掘り出すデータマイニングが有効に働くことが期待できる。

AIからのアプローチとしては、地震発生の共起性について、文書群からのキーワード抽出法であるKeyGraphを用いた要注意活断層発見[大澤00]が挙げられる。この研究では、地域を限定せず、数年にわたる期間の地震イベントを対象として、共起性の観点から今後地震を引き起こす可能性の高い危険な活断層を抽出している。しかし、震源を予め近い位置の活断層に割り当てているため、後述する2段階法と同じ問題を含んでおり、また沖合の地震は対象外となる。

以前我々は、燃料電池の損傷の際に生じる波形イベントのデータから損傷パターンを抽出し、構成部材間の力学的な相互作用の抽出に成功した[稲場12a]。その際、共起クラスタマイニング(Co-occurring Cluster Mining; CCM)と呼ばれるクラスタリングと頻出パターン抽出を同時に行う方法を提案した。提案法は、クラスタ内の事象の類似性と共に、時系列上のクラスタ間の共起性も考慮して、共起するクラスタのペアを抽出する方法である。これにより、特徴空間においてクラスタリングを行った後に、時系列上の共起性を抽出する2段階法の問題点も解決できる。

先行研究では、CCMを2011年の地震の震源リストに適用し、一定の有効性を確認した[稲場12b]。本稿ではデータを2011~2012年に拡充し、CCMにより地震発生の共起パターンをさらに精細に抽出することを試みた。その結果、地域間におけるより詳細な地震発生パターンの関係、および発震機構解との関係が得られた。

連絡先：大阪大学産業科学研究所沼尾研究室

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1,

E-mail: okada@ai.sanken.osaka-u.ac.jp

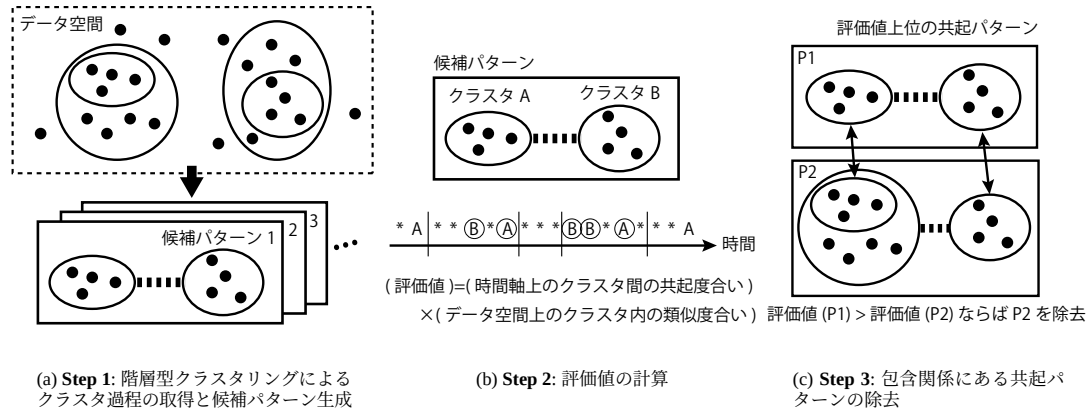


図 1: 共起クラスタマイニングアルゴリズムの模式図

2. 共起クラスタマイニング

本研究で共起パターンとして抽出する事象の集合 **A**, **B** に対して以下の要件を定める。

- **共起性**: 時系列上で **A** と **B** の事象の出現が近接している
- **頻出性**: **A** と **B** の事象が共起する回数が多い
- **類似性**: **A(B)** に含まれる事象は十分類似している

共起性および頻出性は従来の記号データを対象とする頻出パターンの要件に相当し、類似性はクラスタリングに相当する。上記の全ての要件を満たすクラスタを**共起クラスタ**と呼び、共起クラスタのペアを**共起パターン**と呼ぶ。

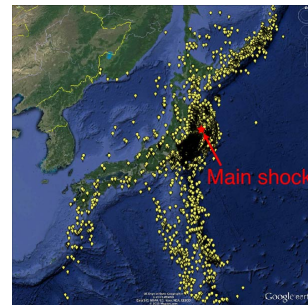
本稿で扱う地震イベントの場合は、震源の緯度・経度の系列に対して、地震間の発生が時間的に近接しており、かつその頻度が一定以上である地域を共起クラスタとして特定し、それら地域のペアを共起パターンとして抽出する。

ここで、率直な方法として、クラスタリングによって記号化し、Apriori などによる頻出パターン抽出を行う 2 段階法が考えられる。しかし、クラスタリングにおいて共起性は考慮されていないため、共起に関係しない事象がクラスタに含まれる、または共起に関係するにも拘わらずクラスタに含まれない可能性がある。

上記の問題に対して、我々の提案する共起クラスタマイニング (CCM) [稲場 12a] は、系列上におけるクラスタ「間」の共起性と、データ空間におけるクラスタ「内」の類似性を同時に考慮して、共起する 2 つのクラスタの範囲 (要素) を自動的に決定する手法である。探索空間の縮小のため階層型クラスタリングによって予めクラスタリング過程 (デンドログラム) を取得し (図 1(a))、取り得るクラスタを探索空間として式 (式 1) に示す評価関数 L を最大化するようなクラスタのペアを探索する (図 1(b))。そして、包含関係にある類似する共起クラスタを除去し、かつ最小支持度以上の頻出性を満たすクラスタのペアを共起パターンとして出力する (図 1(c))。

$$L(A, B) = \mathcal{F}(A, B) \cdot \mathcal{G}(A, B) \quad (1)$$

ここで、 $\mathcal{F}$ は時間軸上のクラスタ間の共起度合い、 $\mathcal{G}$ はデータ空間上のクラスタ内の類似度合いである。本稿では、 $\mathcal{F}$ として Jaccard 係数、 $\mathcal{G}$ として各クラスタ重心からの平均二乗平均誤差をガウス型関数で [0,1] に規格化して用いた。

図 2: 2011～2012 年における地震の震源地の分布 ($M \geq 4.0$)

3. 東日本大震災の震源リストへの適用

3.1 データの前処理

本研究では一元化処理され気象庁より公開されている 2011 年 1 月 1 日から 2012 年 12 月 31 日までの日本における震源リストを*1用いた。データの解析には、地震発生日時、震源の緯度・経度、マグニチュード (M) を用いた。本研究では日本のいずれかの観測点でマグニチュード 4.0 以上を観測した地震を対象とし、5954 事象 (図 2) に対し、解析を行った。

ここで、CCM において共起度合いの計量のため、大澤らの研究 [大澤 00] と同様の考えに基づき、地震イベント系列を $M6.0$ を閾値として区間に分割した。これは、ある一定以上の大きな地震が起こったときに蓄積されたエネルギーが解放されることで、地殻構造が変化して過程が遷移するという考え方に基づいている。なお、この閾値の微小変化に対して、抽出結果は安定していることは確認した。しかしながら、地震発生頻度・マグニチュードは共にべき分布に従うため、東日本大震災本震直後は $M6.0$ 以上の地震が短い時間で頻発している。そのため、一律の閾値では本震直後の区間は非常になくなる傾向になる。そこで、区間長に 1 時間の下限を設けることで極端に短い区間の生成を防いだ。また、大澤らの研究と同様に同じ区間内では事象の前後関係や時間間隔は考慮しない。これは、地震活動は複雑系であるため決まった時間間隔が存在するとは想定しにくく、また時期によっては近い震源の地震が頻発する場合もあり、正確な時間間隔や前後関係を定めることが困難なためである。

*1 2013 年の正確な震源リストは現時点では未公開となっている

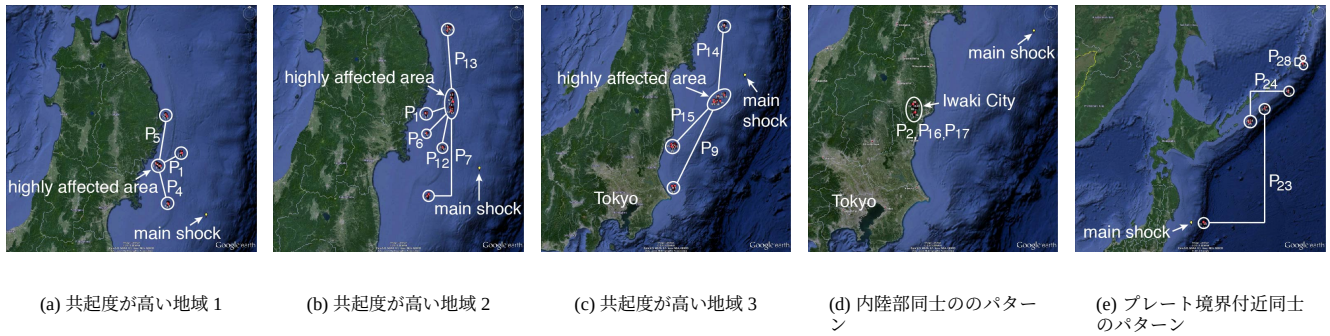


図 3: 2011~2012 年に起きた地震の共起パターン (震災後)



図 4: 2011~2012 年に起きた地震の共起パターン (震災前)

3.2 パラメータ設定

CCM のパラメータとして、最小目的関数値と最小支持度について、 $\mathcal{L}_{min} = 0.70$, $Supp_{min} = 0.05$ (5 回以上共起) を用いた。これらパラメータは線形探索し、共起性が低いパターンや、クラスタが広範囲に及ぶパターンが大量に列举される直前のパラメータを経験的に採用した。なお、これらのパラメータは、共起パターンを列举する下限を指定するものであるため、評価値上位は同じパターンが得られている。これらのパラメータの下、31 パターンを得た。また本実験結果は、先行研究 [稲場 12b] と同様に上位の共起パターンの平均評価値が高かった Ward 法による結果を用いている。

4. 地震発生パターン抽出結果

今回得られた共起パターンの代表例を図 3 に示す。図 3 から、大半のパターンは沖合で形成されていることが分かる (図 3(a), 3(b), 3(c), 3(e))。また、これらの共起パターンは、内陸

の場合 (図 3(d)) と比べ、共起クラスタ間の地理的な距離が離れている。これらの図は、地震発生メカニズムの違いを示していると考えられる。これは、沖合で発生する地震の多くはプレートの沈み込みによるもので、広域の地殻変動に影響すると考えられるのに対し、内陸で発生する地震は活断層型のものが多く、発生が局所的な場合が多いためである。

我々はこれらの結果を踏まえ、次に震災の前後での地震の共起パターンの変化の解析を試みた。震災前の震源データとして気象庁の 1997 年から 2010 年のデータを用い、マグニチュード 4.0 以上の 12062 事象に対し同様に解析を行い、全 28 パターン (図 4) を得た。図 4(a) は 2000 年 6 月 26 日に起きた三宅島の火山噴火の影響を示しており、図 4(b), 4(c) は共起クラスタ同士が同一のプレート境界線上に存在していることに起因すると考えられる。

図 3 と図 4 から震災前後を比較すると、震災後は東北地方で地震が共起発生する割合が格段に高まっていると考えられる。これは、東北地方にこれまで蓄積されていたエネルギーが大地震によって解放されたことが要因であると推測される。

4.1 地震学との比較

今回得られた解析結果の中には、図 4(a)~4(c) に見られるように、他の地域との共起頻度が極めて高い地域が存在している。我々はこれらの地域に潜む地震のメカニズムを調べるべく、地震学の知見との比較を行った。図 5 は、これらの地域に、地震によるプレートの滑り具合を観測した地図 [Miyazaki 11] を照らし合わせたものである。図 5 において、共起度が高い地域は皆、大きな滑りが観測された範囲の中に存在していることが分かる。この結果より、推論の一つとしてこれらの地域にアスピリティが分布していることが考えられる。アスピリティとは、断層面で通常は強く固着しているが、地震時に大きくずれ動く領域のことである。アスピリティについては、プレート境界にてアスピリティ間の相互作用を証明した研究 [Ariyoshi 09] も報告されており、そのメカニズムには未解明な部分も多い。

4.2 発震機構解における共起関係

さらに、地震発生メカニズムと共起パターンとの関係を発震機構解を用いて調べた。発震機構解とは、地震が起きた際の断層の動きや力の方向を解析的に求めたものであり、気象庁により公開されている。解は、2011 年の震源データに対して 1032, 1997~2010 年まででは 1103 事象に対して得られていた。我々は、抽出した地震パターンについて、以下の式に従い、発震機構解に対する共起関係の条件付き確率を求めた。この式は共起パターンにおいて、一方の共起クラスタ内に含まれる地震それぞれの解のタイプ M_b に対し、他方の共起クラスタ内に含まれ

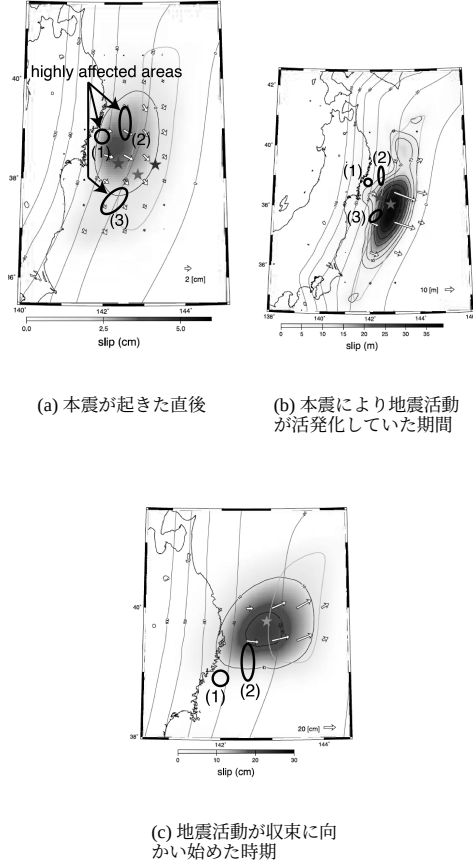


図 5: 共起度の高い地域と震災後の各時刻におけるプレートの滑り分布との関係 [Miyazaki 11]

る地震の解が M_a で条件付けされる確率を導出している。

$$\Pr(M_a|M_b) = \frac{\sum_{\mathcal{P}} \sum_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \in \mathcal{P}} l_{i,j}(a, b)}{\sum_k \sum_{\mathcal{P}} \sum_{\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j \in \mathcal{P}} l_{i,j}(a, k)}, \quad (2)$$

$$l_{i,j}(a, b) = \begin{cases} 1 & \text{if CMT}(\mathbf{x}_i) = M_a \\ & \text{and CMT}(\mathbf{x}_j) = M_b, \text{ where} \\ & \mathbf{x}_i \in \mathbf{A}(\mathbf{B}) \text{ and } \mathbf{x}_j \in \mathbf{B}(\mathbf{A}) \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

表 1, 表 2 は東日本大震災前後の条件付き確率 $\Pr(M_a|M_b)$ の数値を示している。これらより、震災前は R-DS が高い数値を示しているが、震災後は N-DS の数値が高くなっていることが分かる。地震学の方面からは、震災後は逆断層型から正断層型の方向へと地殻における応力場の向きが変化したとの報告 [Yoshida 12] がなされており、我々の解析結果はその変化を示すと共に、発震機構解の相互作用も示している。

5. まとめと展望

我々は共起クラスタマイニング (CCM) を、地震間の相互作用を発見すべく、2011 年の東日本大震災後の地震データに適用した。その中で、高い共起度を示す地域からのアスペリティの存在分布や、震災前後の応力場の変化を捉えることに成功し

表 1: 東日本大震災以前の地震の共起パターンと発震機構解の関係; R: 逆断層, N: 正断層, SS: 横ずれ, DS: 縦ずれ, AM: その他

$M_b \setminus M_a$	R-SS	R-DS	R-AM	N-SS	N-DS	N-AM
R-SS	0.09	0.49	0.22	0.07	0.07	0.06
R-DS	0.18	0.30	0.29	0.10	0.04	0.09
R-AM	0.15	0.54	0.11	0.09	0.06	0.05
N-SS	0.08	0.28	0.14	0.24	0.15	0.10
N-DS	0.15	0.24	0.20	0.33	0.00	0.08
N-AM	0.12	0.48	0.14	0.20	0.07	0.00

表 2: 東日本大震災以降の地震の共起パターンと発震機構解の関係; R: 逆断層, N: 正断層, SS: 横ずれ, DS: 縦ずれ, AM: その他

$M_b \setminus M_a$	R-SS	R-DS	R-AM	N-SS	N-DS	N-AM
R-SS	0.00	0.25	0.25	0.00	0.50	0.00
R-DS	0.02	0.23	0.08	0.29	0.37	0.02
R-AM	0.02	0.08	0.02	0.08	0.71	0.10
N-SS	0.00	0.11	0.03	0.00	0.73	0.13
N-DS	0.01	0.08	0.15	0.40	0.31	0.06
N-AM	0.00	0.03	0.13	0.44	0.39	0.03

た。今後は、地震間の前後関係や時間も考慮した共起関係を取得することで、より詳細に地震間の相互作用を解明する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 24650068 の助成を受けたものです。また、解析には気象庁の一元化震源リストを使用しました。

参考文献

- [Ariyoshi 09] Ariyoshi, K., Hori, T., Ampuero, J.-P., Kaneda, Y., Matsuzawa, T., Hino, R., and Hasegawa, A.: Influence of Interaction between Small Asperities on Various Types of Slow Earthquakes in a 3-D Simulation for a Subduction Plate Boundary, *Gondwana Research*, Vol. 16, pp. 534–544 (2009)
- [Geller 97] Geller, R. J.: Earthquake prediction: a critical review, *Geophysical Journal International*, Vol. 131, No. 3, pp. 425–450 (1997)
- [Helmstetter 05] Helmstetter, A., Kagan, Y. Y., and Jackson, D. D.: Importance of small earthquakes for stress transfers and earthquake triggering, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, pp. 1–13 (2005)
- [Miyazaki 11] Miyazaki, S., McGuire, J. J., and Segall, P.: Seismic and Aseismic Fault Slip Before and during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. 637–642 (2011)
- [Yoshida 12] Yoshida, K., Hasegawa, A., Okada, T., Iinuma, T., Ito, Y., and Asano, Y.: Stress Before and After the 2011 Great Tohoku-oki Earthquake and Induced Earthquakes in Inland Areas of Eastern Japan, *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, p. L03302 (2012)
- [稲場 12a] 稲場 大樹, 福井 健一, 佐藤 一永, 水崎 純一郎, 沼尾 正行: 燃料電池における損傷パターン抽出のための共起クラスタマイニング, 人工知能学会論文誌, Vol. 27, No. 3, pp. 121–132 (2012)
- [稲場 12b] 稲場 大樹, 福井 健一, 沼尾 正行: 共起クラスタマイニングを用いた東日本大震災における地震発生パターンの抽出, 人工知能学会第 3 回データ指向構成マイニングとシミュレーション研究会 (SIG-DOCMA) (2012)
- [大澤 00] 大澤 幸生, 谷内田 正彦: キーワード抽出法 KeyGraph の転用による地震履歴データからの要注意活断層発見支援, 人工知能学会誌 特集「発見科学」, Vol. 15, No. 4, pp. 665–672 (2000)
- [尾形 98] 尾形 良彦: ETAS モデルによる地震活動静穏化現象の解析, 地震, Vol. 50, pp. 115–127 (1998)