

地震の発生メカニズムと千島海溝巨大地震

富田史章

- 1: 東北大学災害科学国際研究所
- 2: 東北大学・海洋研究開発機構 変動海洋エコシステム高等研究所 (WPI-AIMEC)
- 3: 東北大学大学院理学研究科

今日のメインテーマ：千島海溝沿いでの巨大地震



TBS NEWS DIG: <https://newsdig.tbs.co.jp/articles/-/2497755?display=1>

千島海溝沿いでの超巨大地震 (M8後半~M9)

2017年から津波堆積物調査の結果をもとに長期評価の対象に (それまでは本当に起こりそうな地震が分からず、対象外だった)

今日の話：「人間が分かっている範囲」がどう広がってきているか

正確な地震予知の困難さ

正確な地震の予知は現状できない

地震予知の3要素の全てを事前 (短期的に) に把握すること

1. 時期 (いつ) : 地震がいつ発生するか
2. 場所 (どこで) : 震源・断層の場所
3. 規模 (大きさ) : 地震のエネルギーの大きさ (マグニチュード)

※ 1週間以内に三陸沖でM7.5の地震が起きる...など

ただし、「何も分かっていないこと」ではない

- ・ 経験則や地震の統計的な性質 → 地震の「長期評価」
- ・ 地震の発生メカニズムの理解
- ・ 地震を起こすエネルギーの蓄積などの地球の変動の理解

人間が分かっている範囲で、災害に備えなくてはならない

「正しく恐れる」ための知識

東京大学 平田直 名誉教授 (元・地震調査委員会 委員長)
地震に対して「正しく恐れる (Fear Logically)」ことが重要

地震がなぜ起きるか (予測情報の「根拠」) を理解すること

- 地震災害に備えることへの動機 (インセンティブ)
- 具体的にどのような備えをすれば良いかの理解

予測情報の限界 (不確実性) を理解すること

- 起きるか・起きないかの2択ではなく、「起きうる」という不確実性 (人間が分かっている範囲 & 自然のゆらぎ) の元で対策を講じる必要性 (リスク管理)

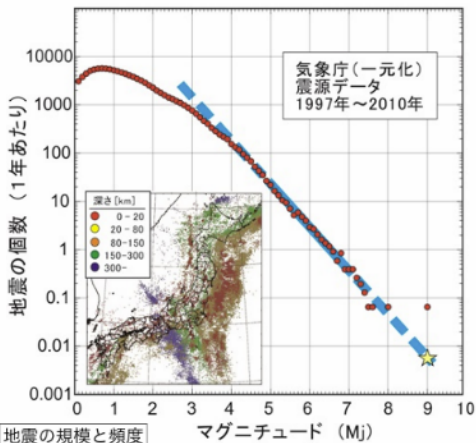


<https://www.youtube.com/watch?v=gytodhJX5rg>

地震の経験則

グーテンベルク・リヒター則

規模の大きい地震ほど発生頻度が低い
(べき乗則: $y=x^{-a}$)



1年間での地震数 (気象庁)

地震の規模	世界 (1990-2021)	日本 (2014-2023)	
M5	1524回	134回	1/10
M6	136回	17回	1/10
M7	14回	1回	1/10
M8	1回	~0.1回	1/10
M9	~0.1回	<0.01回	1/10

- ✓ 世界の地震の約1/10は日本で発生 (地震大国)
- ✓ 日本ではM7地震は毎年起こりうる (多い・少ない時期あり)

「極端事象」の影響が大きいことが多い

- ✓ 災害の大きさ (雪崩・隕石の規模など)
- ✓ 金融関係 (富の偏り・株価の変動など)
- ✓ 労働災害・事故の規模

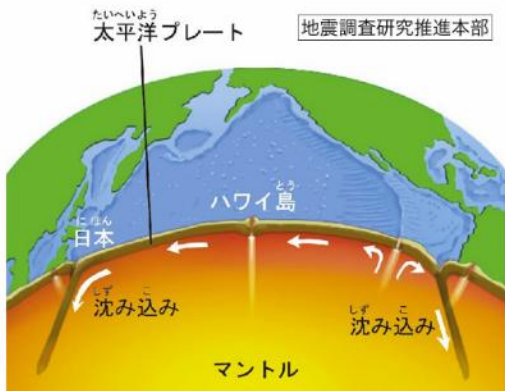


土砂災害防止広報センター



- ✓ 低頻度事象は必ず発生し、その滅多に起きない事象が大きな影響を与える
- ✓ 事故はヒヤリハットを潰すことで、大きい事故を少なからず未然に防げるが...
- ✓ 自然災害は止められないので、被害が最小限になるように小さい災害も教訓にしなが、普段から災害に対して強靱な社会にしていける必要がある

プレートテクトニクスと地震



私達の立っているプレートは、常に動いている (プレート運動)



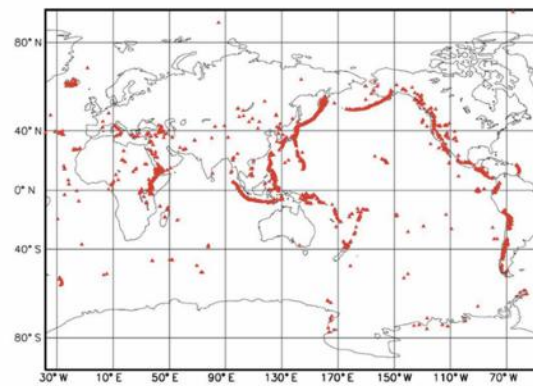
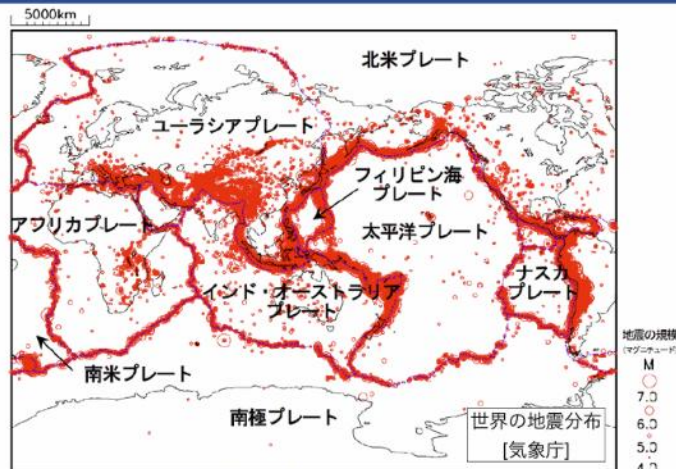
プレートは互いに押し合っ、常にプレートの内部に力が働いている

地震を起こす原動力

プレートテクトニクス plate tectonics

- ✓ 「プレート (地表から100 km程度までの岩石圏)」によって地球の運動を説明する理論
- ✓ 地震・火山・造山運動を含む地球表層での様々な現象を統一的に説明
- ✓ 1960年代後半に理論が完成 (後年に地磁気・宇宙測地によるプレートの変動の裏付け)

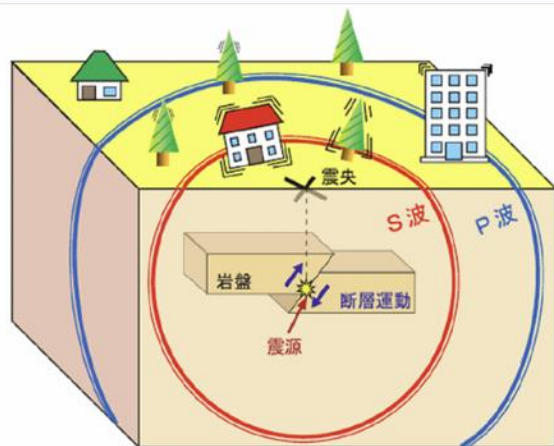
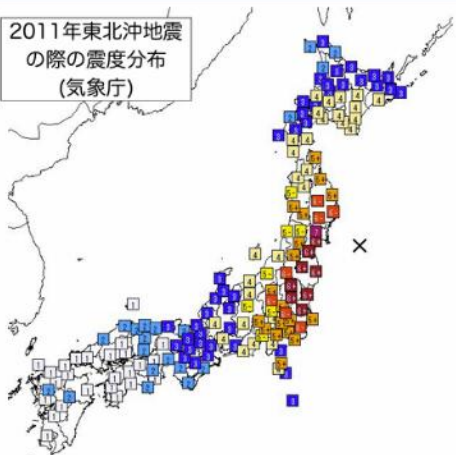
プレートテクトニクスと地震



※2014年から2023年の期間に発生した地震の震央分布。点線は主要なプレート境界。震源データは、米国地質調査所による。

- ✓ 地震の多くはプレート境界とその周辺 (プレート端のプレート内部) で発生
- ✓ 日本列島とその周辺では、世界の約10分の1の地震が発生

地震とは？

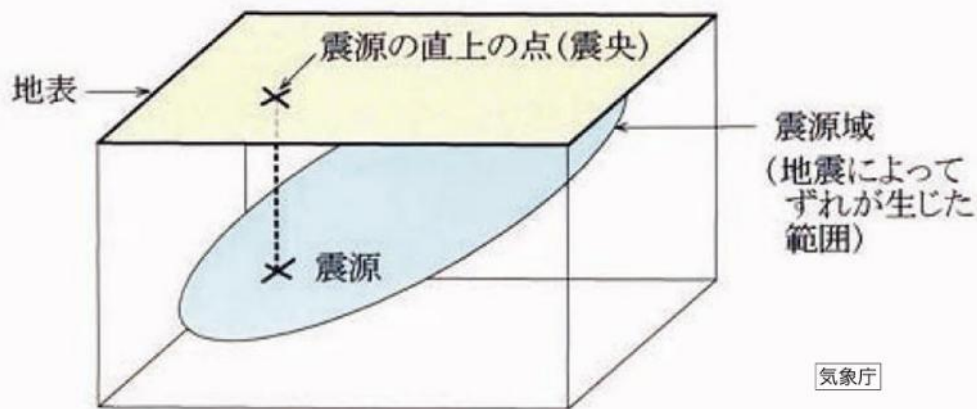


気象庁

- ✓ 地震：地下で発生した**急激な「断層運動（断層がずれ動くこと）」**
 - 点ではなく、面的な破壊現象
 - 地震の揺れ（地震波：岩石の弾性波）は断層運動の副次的な効果

13

地震とは？



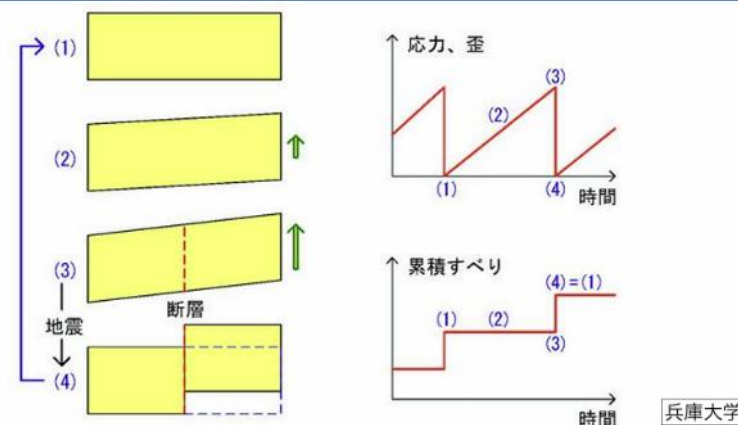
気象庁

- ✓ 震源：地震の破壊の開始点
- ✓ 震央：震源を地表面に投影した点
- ✓ 震源域：破壊が広がった領域

地震は点ではなく、
(基本的に) 面での破壊

15

地震とは？

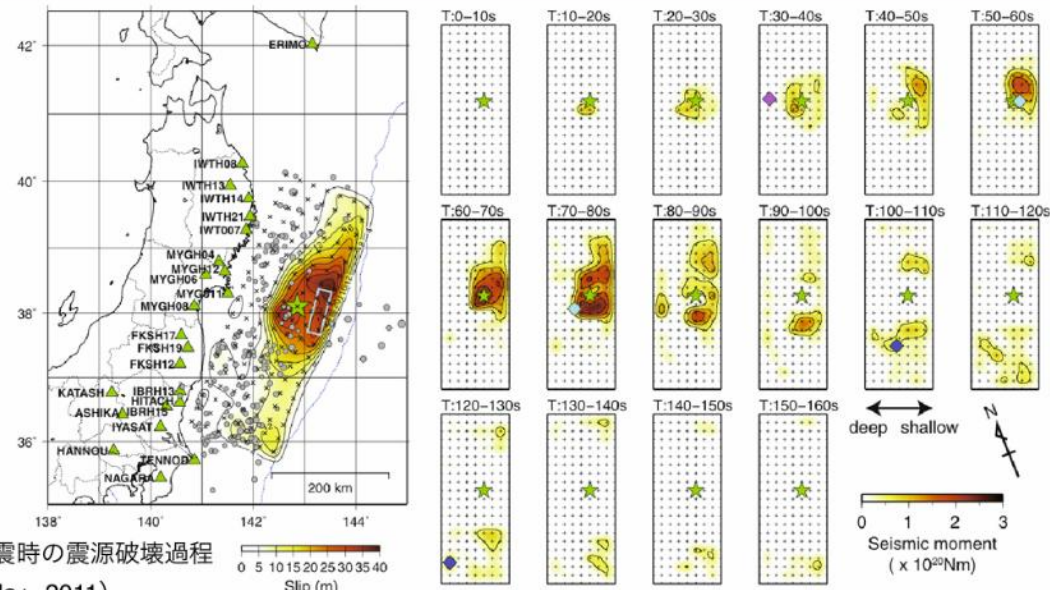


兵庫大学

- ✓ 地下の岩石はプレート運動によって徐々に変形する
- ✓ 変形していく(歪みが蓄積する)と岩石の内部にかかる力(応力)も増加する
- ✓ 岩石内部の弱面(断層)の強度を応力が上回ると断層がずれる(地震の発生)
- ✓ 岩石内部の弱面という同じ場所で繰り返し地震が起きることが多い

14

地震とは？



2011年東北沖地震時の震源破壊過程 (Yoshida+, 2011)

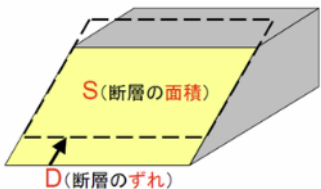
16

地震とは？

$$M_w = (\log M_o - 9.1) / 1.5$$

$$M_o \text{ (地震モーメント)} = \mu \text{ (剛性率)} \times D \times S$$

Mwは断層運動の大きさの指標



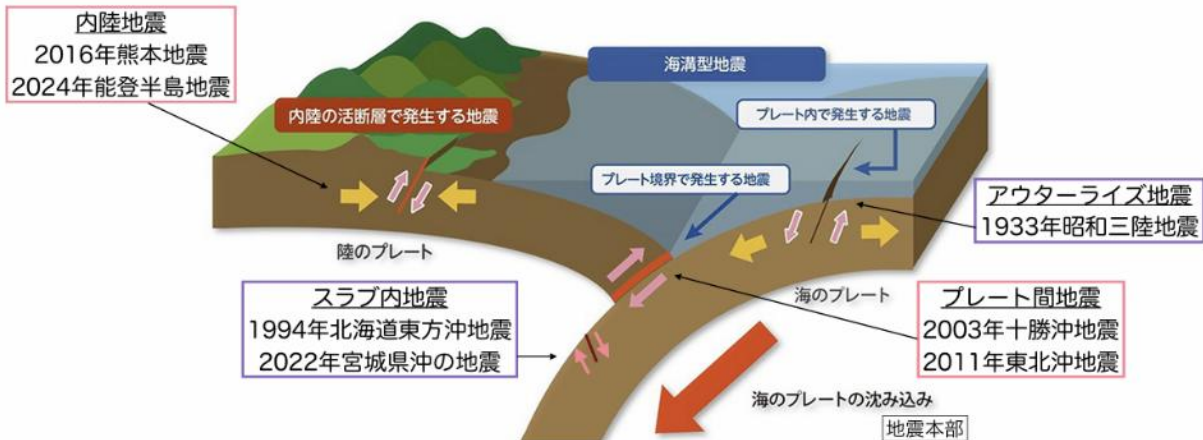
基本的にマグニチュードが大きくなると、面積もすべり量も両方大きくなる

(面積が大きいと、大きな歪みの蓄積を許容しやすい)

M	滑り量	断層の長さ	断層面積	例えば...
9	10m	500km	100,000km ²	東北地方くらい
8	3m	150km	10,000km ²	宮城県や岩手県くらい
7	1m	50km	1,000km ²	佐渡島くらい
6	30cm	15km	100km ²	猪苗代湖くらい
5	10cm	5km	10km ²	金華山くらい
4	3cm	1.5km	1km ²	皇居くらい
3	1cm	500m	0.1km ²	東京ドーム2個くらい
2	3mm	150m	10,000m ²	グラウンドくらい
1	1mm	50m	1,000m ²	体育館くらい

すべりと面積の目安：松澤 (2011)

地震の種類



- 温度や岩石の組成として「脆性」破壊が可能なプレートの境界・内部で基本的に地震は発生する
- 発生メカニズムによって分類分け
- 過去に地震が発生した場所は、地下の弱面であり、再び地震が発生しやすい

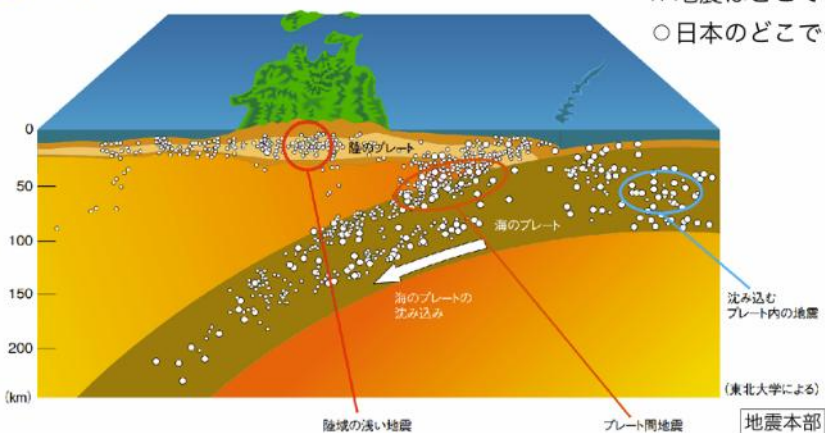
断層の大きさ(面積)の比較



気象庁

地震の種類

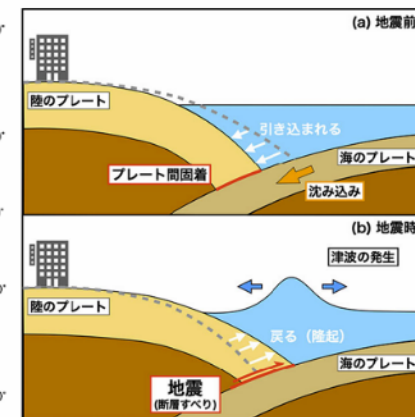
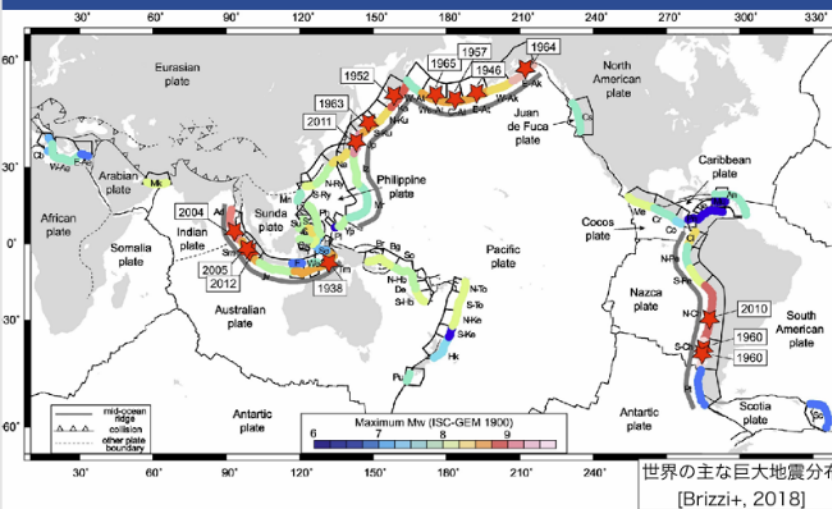
東北日本の東西断面で見る地震の分布



- × 地震はどこでも起きる
- 日本のどこでも地震の被害は起こりうる

- 温度や岩石の組成として「脆性」破壊が可能なプレートの境界・内部で基本的に地震は発生する
- 発生メカニズムによって分類分け
- 過去に地震が発生した場所は、地下の弱面であり、再び地震が発生しやすい

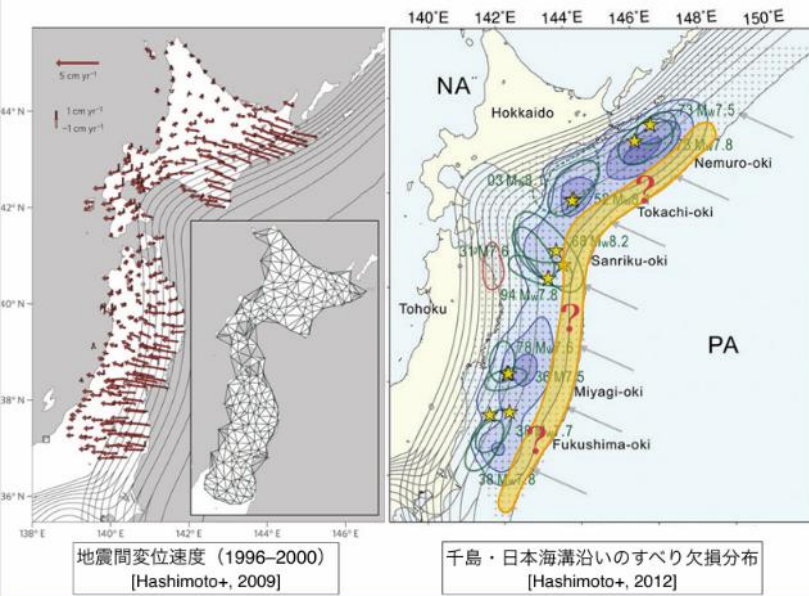
プレート間地震



沈み込み帯プレート間地震の発生メカニズム [JAMSTEC]

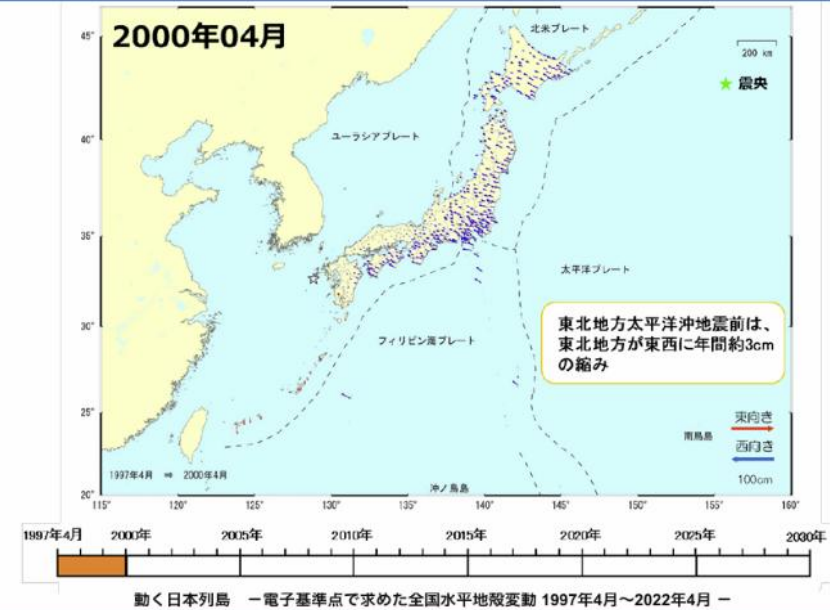
- ✓ 世界の巨大地震の多くは海溝型プレート間地震(プレート境界面の「広さ」によって巨大化しやすい)
- ✓ 地震前にプレートの先端でプレート間「固着」によって歪みを蓄積し、地震時にすべることで解放する

プレート間固着と大地震

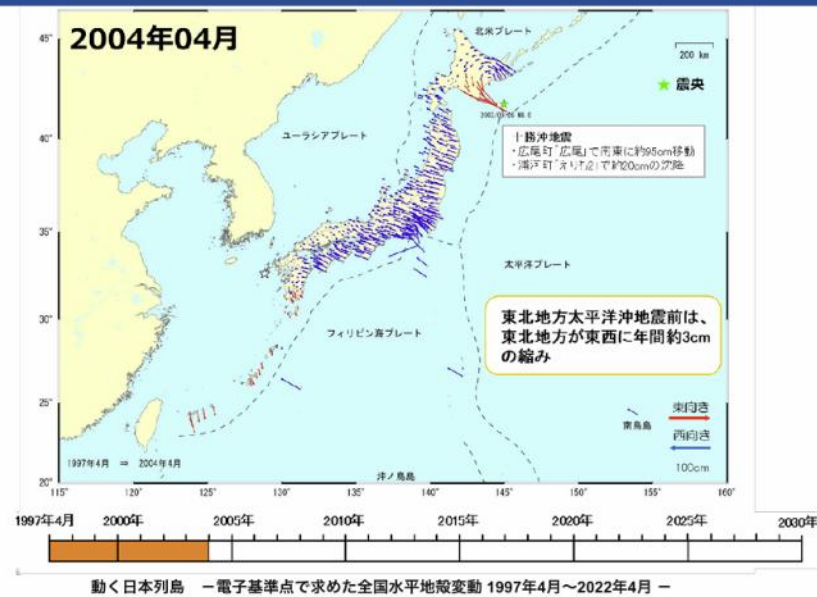


- ✓ 温度や流体、プレート境界面の形状などによってプレート境界の一部が固着し、歪みを蓄積する
- ✓ 地殻変動から推定された固着域と過去の巨大地震は概ね対応
- ✓ ただし、陸上の測地観測では、陸から離れた海溝近傍の固着は検出できない

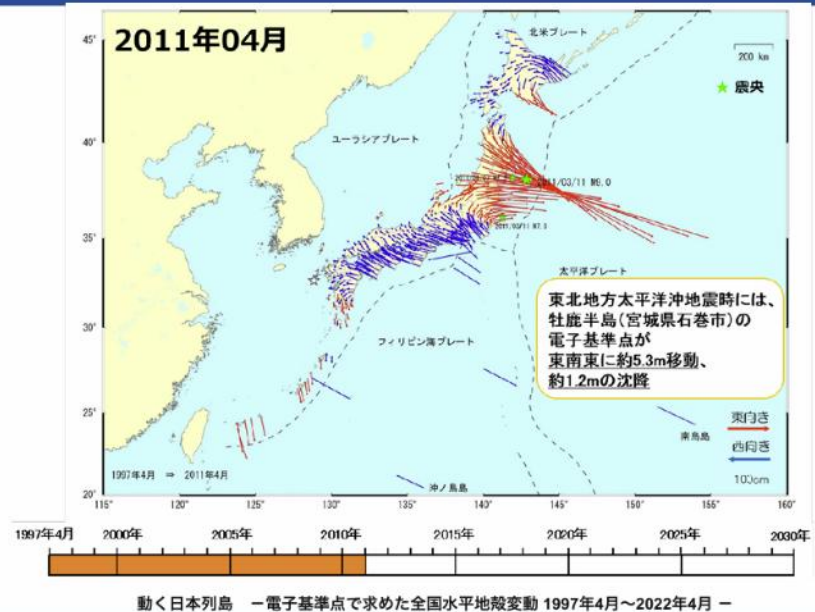
日本における地殻変動



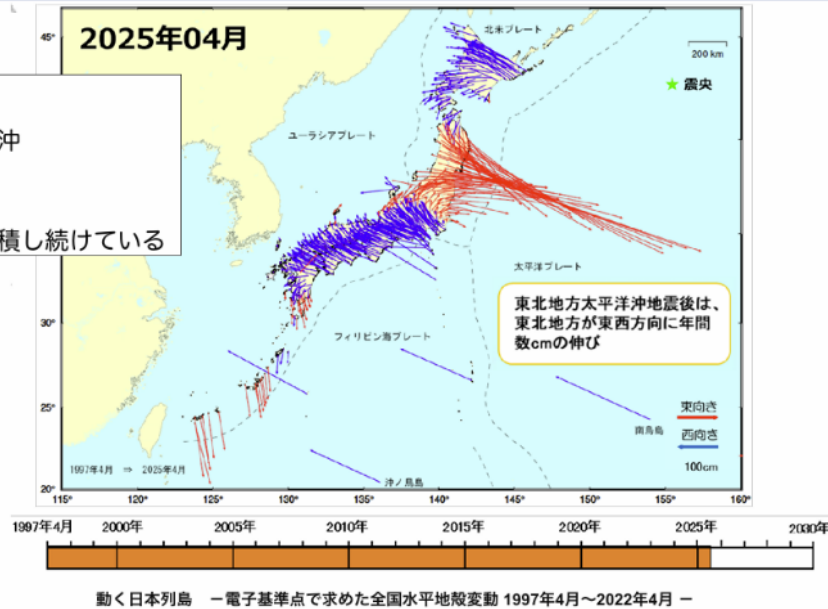
日本における地殻変動



日本における地殻変動

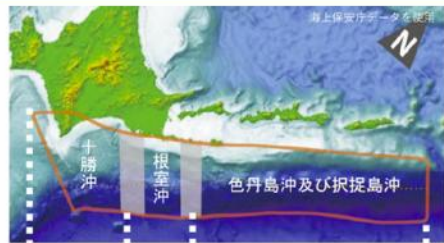


日本における地殻変動

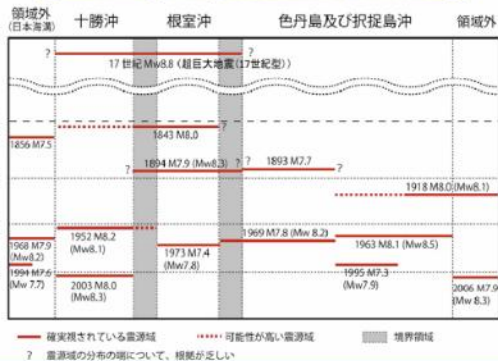


27

千島海溝沿い北海道沖での巨大地震ハザード

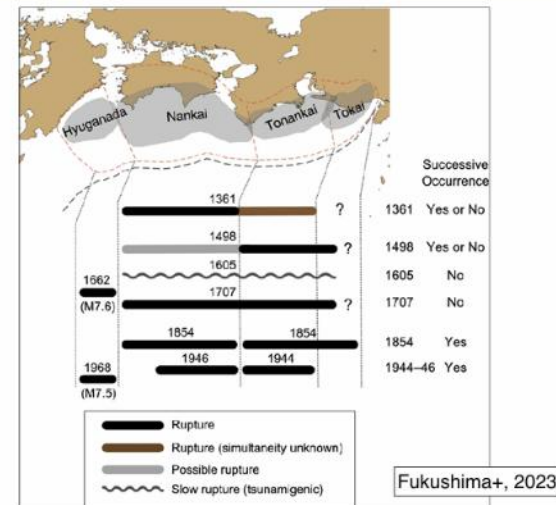
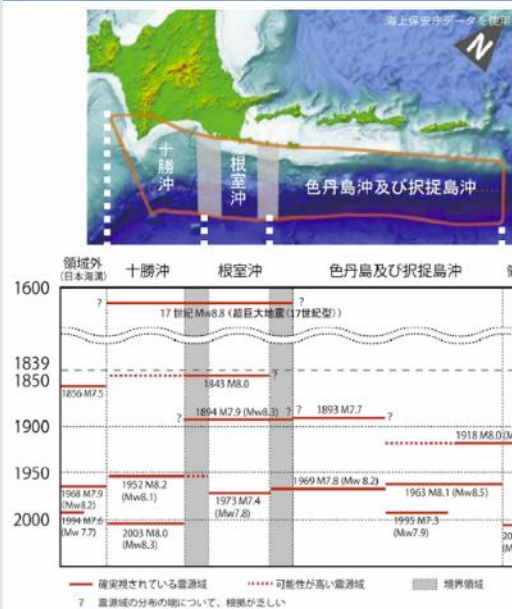


- ✓ 1839年以前の発生履歴はよく分かっていない
- ✓ M7-8クラス地震
 - ・プレート境界深部で繰り返し発生
 - ・2003年十勝沖地震など
- ✓ 超巨大地震 (M8後半~9)
 - ・十勝~根室沖を跨いだ広い震源域
 - ・平均約400年間隔で発生している可能性
 - ・直近では17世紀に発生 (正確な年は不明)



30

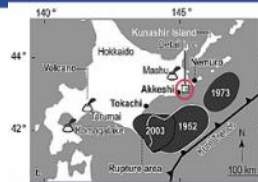
千島海溝沿い北海道沖での巨大地震ハザード



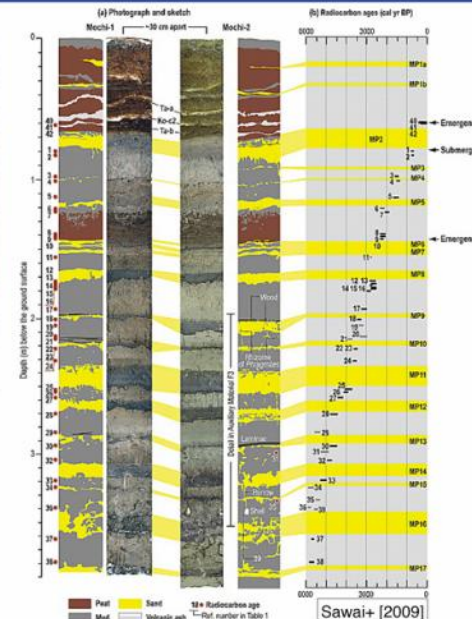
南海トラフ沿いの巨大地震と違って古文書による信頼できる記録がない

29

過去の超巨大地震の発生履歴



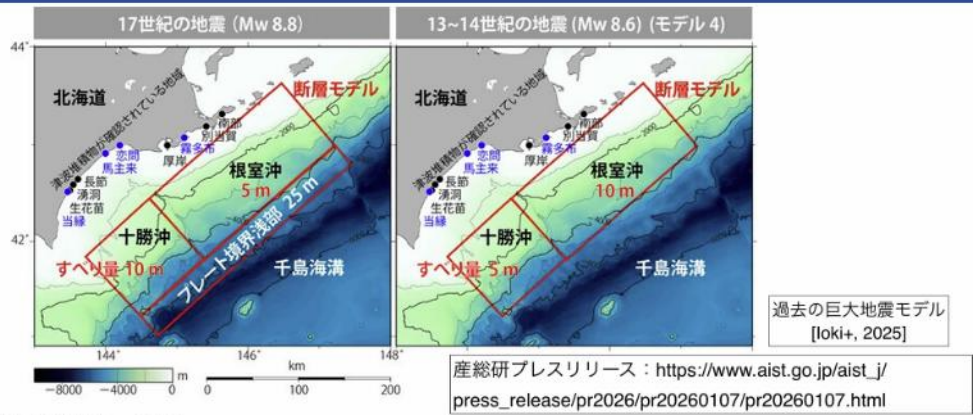
産総研: https://unit.aist.go.jp/evg/group/subducteq/tsunami_map/chishima/index.html



- ✓ 沿岸湿原域での津波堆積物調査により過去約6000年の間に15回の津波イベントを発見
- ✓ 100-800年間隔 (平均400年間隔)

31

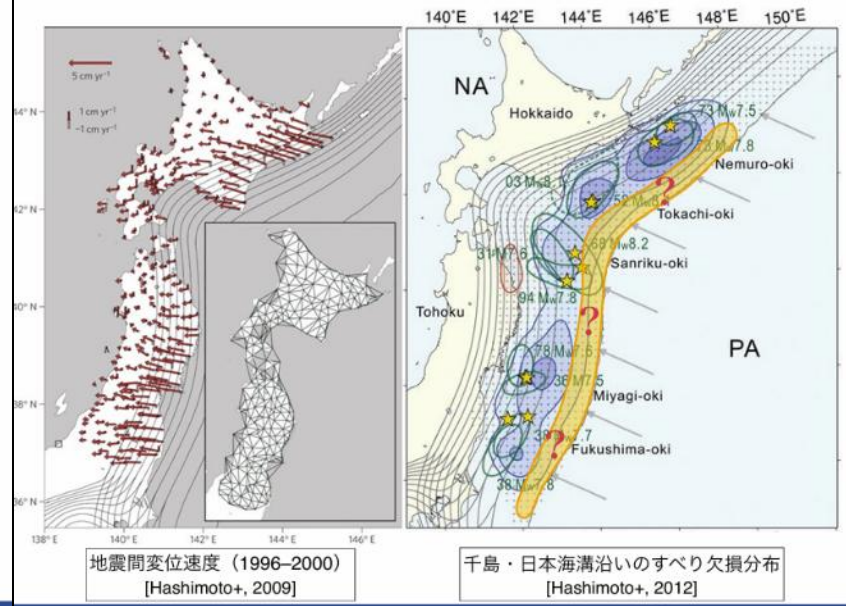
千島海溝沿いでの過去の超巨大地震モデル



- ✓ 超巨大地震 (M8後半~M9)
 - 17世紀の超巨大地震: 海溝近傍で大きなすべり (~25 m)
 - 13~14世紀の超巨大地震: 根室沖で大きなすべり (~10 m), 海溝近傍ですべりがあったかは不明
- ✓ 超巨大地震は, 発生間隔 (100~800年) も規模にもバリエーションがある
- ✓ 本当に海溝近傍で地震を起こす歪みは蓄積されているのか?

32

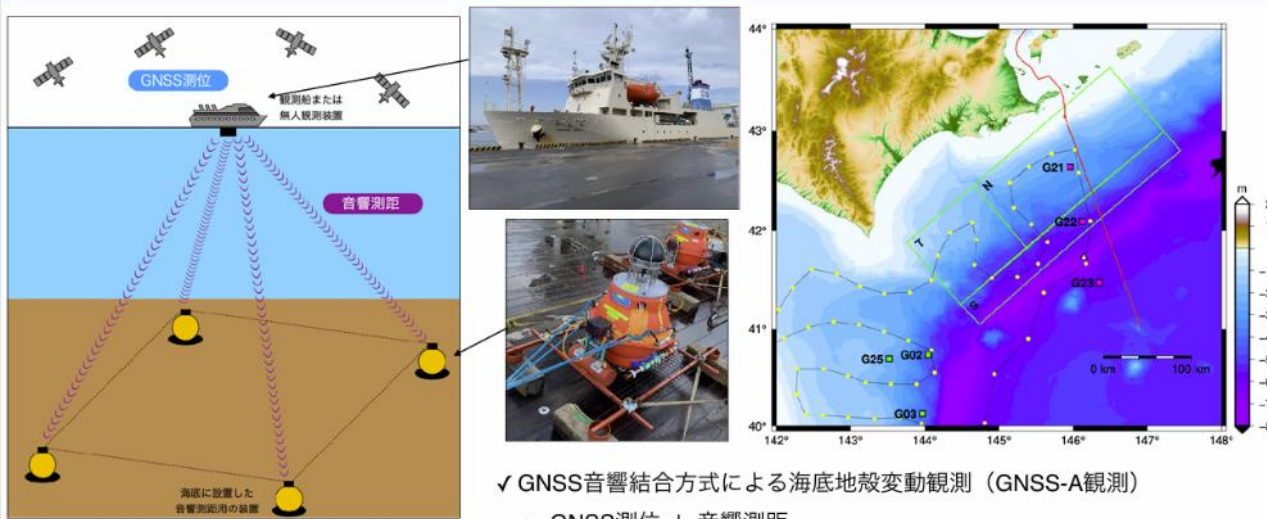
プレート間固着と大地震



- ✓ 陸上の測地観測では, 陸から離れた海溝近傍の固着は検出できない
- ✓ 海溝近傍で大きな地震が発生した場合, 津波が巨大化する恐れ
(2011年東北地方太平洋沖地震と同じ)

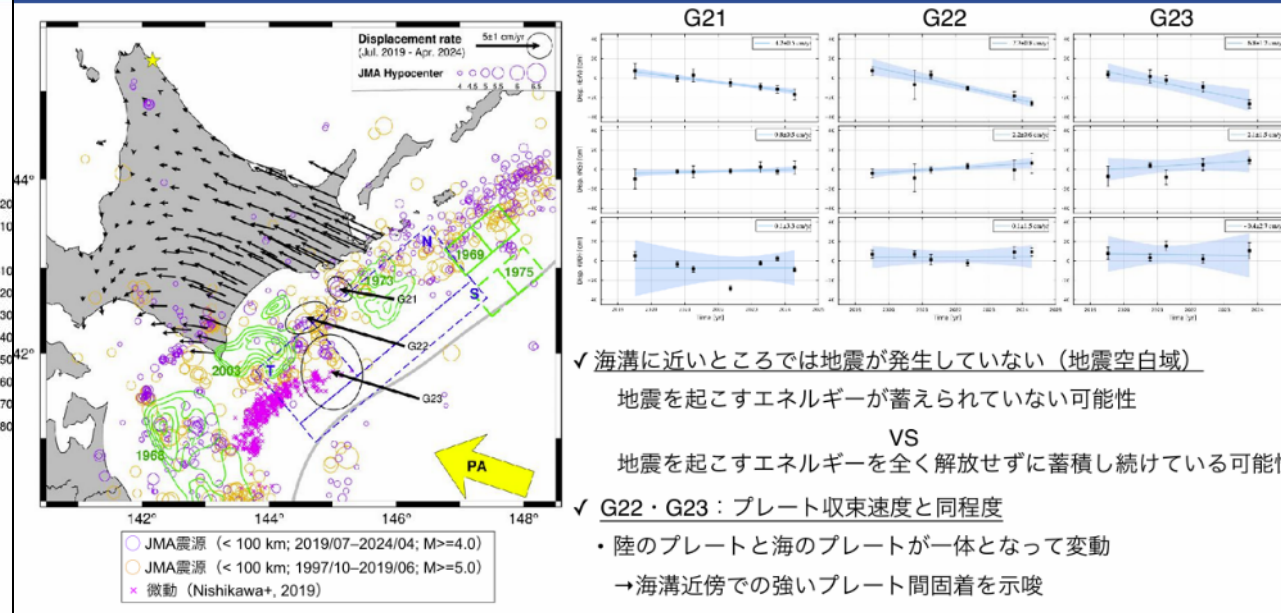
33

根室沖でのGNSS音響海底測地観測点の設置



34

根室沖でのGNSS音響海底測地観測



35

千島海溝近傍で蓄えられている歪み



もし仮に前回の巨大地震（17世紀型巨大地震）から約400年間に渡って、現在と同じ速度で歪みを蓄積した場合

20.5~30.0 m

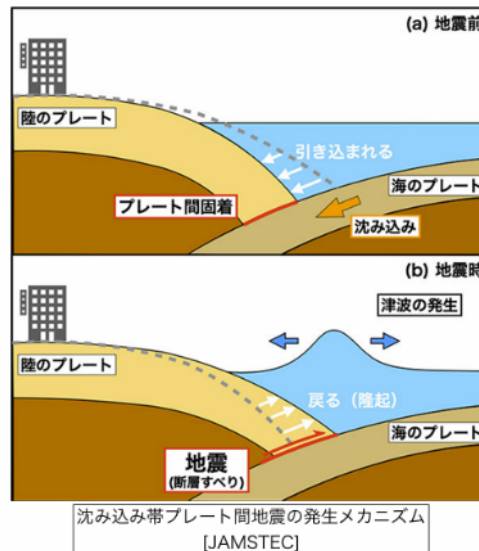
のすべりを起こすだけのエネルギーが蓄積している可能性がある

- 17世紀の地震では、最大で25 mすべったと考えられている
- 少なくとも過去100年程度では、歪みが解放される地震が起こった記録はない

- 2011年東北沖地震と同様に海溝まですべる巨大地震（津波を伴う）が発生する可能性が高い
- 17世紀型巨大地震と同程度のすべりを引き起こすだけのエネルギーを既に蓄積していると可能性がある

千島海溝近傍で蓄えられている歪み

まだ分からないこと... 「いつ巨大地震が発生するのか」



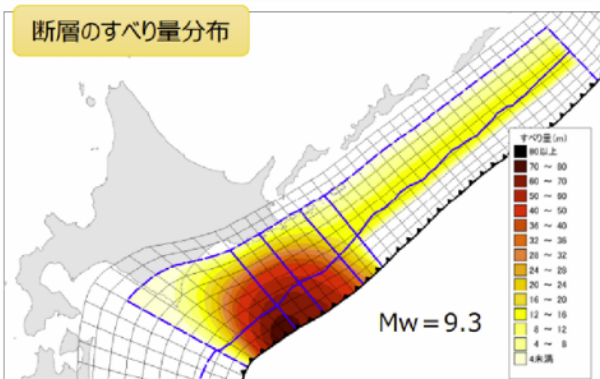
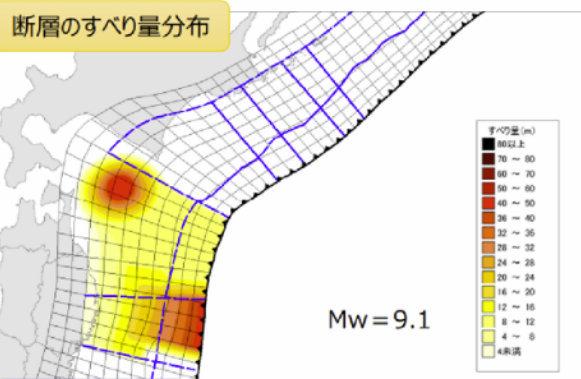
- 現在、地震を起こす歪みが蓄積されている
- 過去にどれだけ歪みが蓄積されてきたかは分からない
- 断層（プレート境界）がどの程度までの歪みに耐えられる状態か分からない
 - 断層の強度は常に同じとは限らない

- 現状は経験則に基づく確率評価に頼るしかない
- 再来間隔は多様性（100-800年）がある
- いつ発生するかわからないが、再来間隔の不確実性を受け入れて対策する必要がある

最大規模の地震想定

【①日本海溝（三陸・日高沖）モデル】

【②千島海溝（十勝・根室沖）モデル】

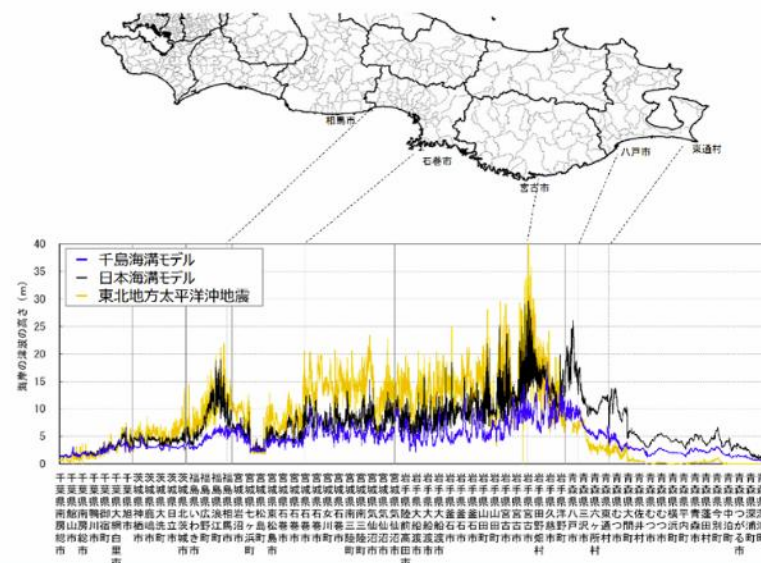


内閣府・日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデル検討会

中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」報告を踏まえ、最大クラスの地震・津波を想定した対策の見直しを行った結果

最大規模の地震想定

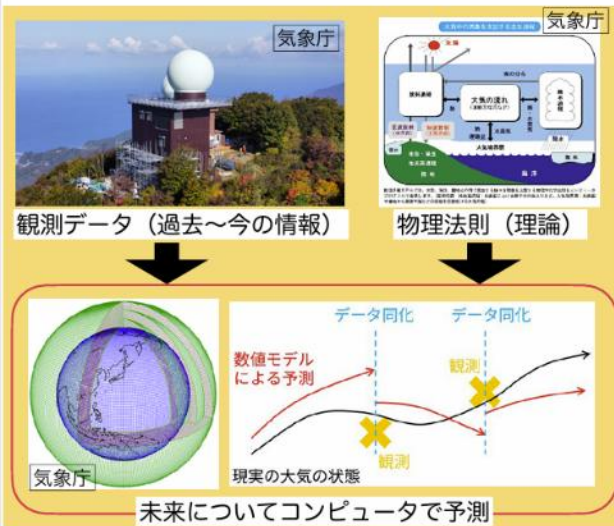
○検討した津波断層モデルをもとに、津波シミュレーションを実施し、沿岸での津波の高さや浸水範囲を推計



未来の現象の「数値予報」と「確率評価」

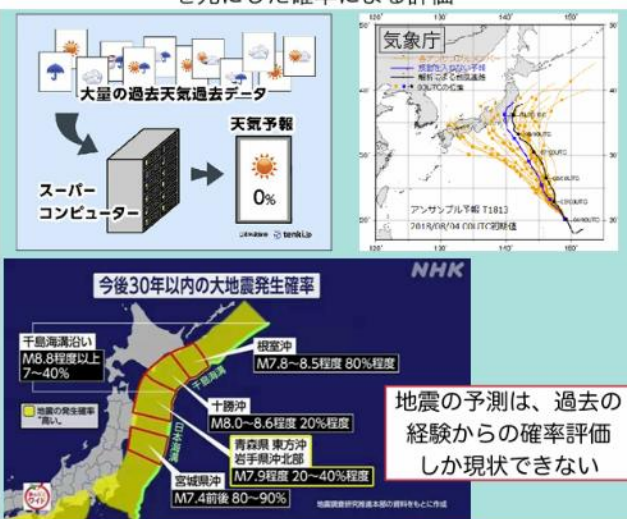
数値予報（決定論）

観測データ + 物理法則に基づいたシミュレーション



確率評価（確率論）

過去の統計や条件の違いを考慮した数値予報を元にした確率による評価



どうして地震の発生予測は難しいのか？

1. 地震現象の複雑性

前兆現象が少なく、高い複雑性を持つ
・簡単なモデル・理論で表現できない

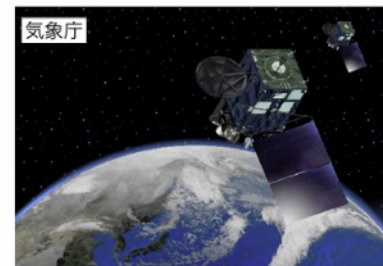
2. 観測・データの制約

巨大地震は発生間隔が長く、データが蓄積できていない
・頻繁に発生する小規模地震などからも理解を進めている
・測地・地震観測網は広がりつつある

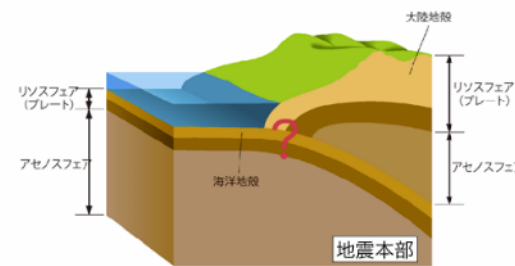
3. 地下構造（理論）の理解の困難性

地下のことを知る術が少ない
・岩石実験などから理論を知ろうとはしている

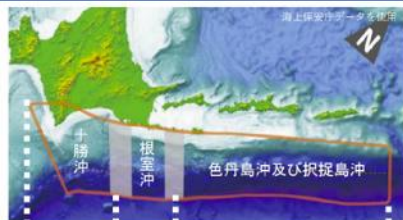
頭の上は分かるけど...



足の下は...



千島海溝沿い北海道沖での巨大地震ハザード



- ✓ 2017年以降、超巨大地震の発生確率が評価されるように
- ✓ 発生確率: 7~40%

今後30年以内の地震発生確率

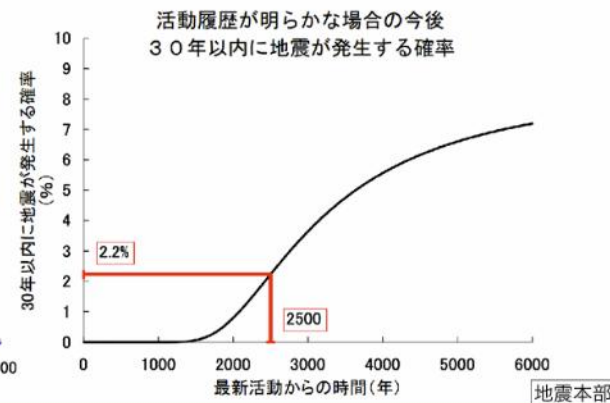
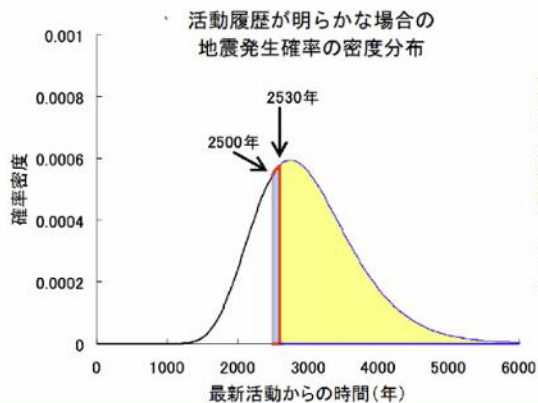
評価対象地震	発生領域	規模	確率	計算に使用した地震	第二版の評価	地震後経過率
超巨大地震 (17世紀型)	十勝沖から択捉島沖 (根室沖を含む可能性高)	M8.8程度以上	7~40%*	津波堆積物から計算	— (確率未計算)	1.00~1.18
	十勝沖	M8.0~8.6程度	7%	1843, 1952, 2003の3回	2~7%	0.17
プレート間巨大地震	根室沖	M7.8~8.5程度	70%程度*	1843, 1894, 1973の3回	60%程度	0.67
	色丹島沖及び択捉島沖	M7.7~8.5前後	60%程度	1839年以降に5回	60%程度, 70%程度	
ひとまわり小さいプレート間地震	十勝沖・根室沖	M7.0~7.5程度	80%程度	1976年以降に2回	80%程度	
	色丹島沖及び択捉島沖	M7.5程度	90%程度	1976年以降に3回	90%程度	

地震本部 (2017)

現在の長期評価による地震の発生確率

① BPT (Brownian Passage Time)分布を仮定した評価

- ・主要活断層や海溝型プレート間地震など「周期性」と「最新の活動時期」が明確な場合
- ・今後〇〇年の発生確率: (水色の面積) / (水色+黄色の面積)
- ・内陸活断層は周期が長いので、確率は低くなりやすい (数%程度)

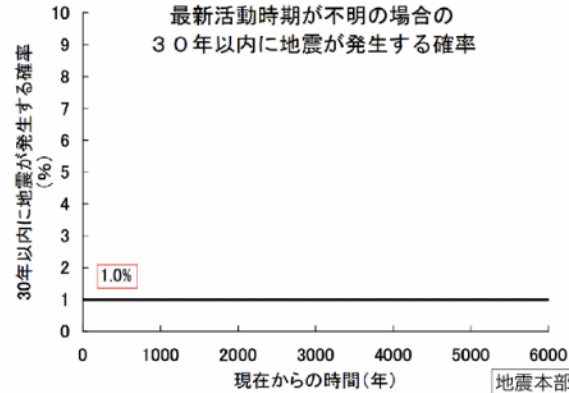
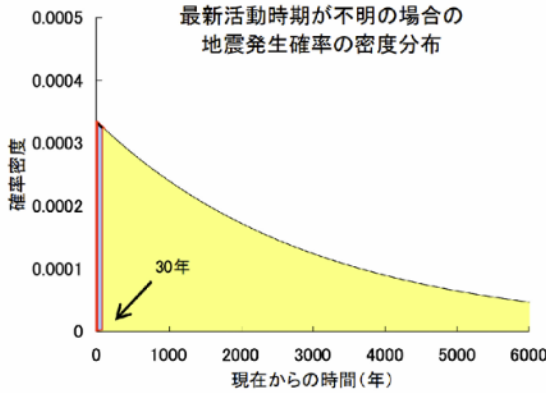


地震本部

現在の長期評価による地震の発生確率

② ポアソン分布を仮定した評価

- ・「最新の活動時期」が不明な場合（特に内陸地震）
- ・「平均的には何年間隔で地震が発生するか」という周期性情報のみで評価
- ・今後〇〇年の発生確率：（水色の面積） / （水色+黄色の面積）



地震本部

千島海溝沿い超巨大地震の発生確率

霧多布湿原、藻散布沼で行われた津波堆積物調査結果
超巨大地震と推測される堆積物がそれぞれ5層、7層発見
炭素年代測定等から、発生年代が推定されている



霧多布湿原の計算例

① 5層の堆積物から各発生年代を推定

② 各地震の発生年を確率密度関数に基づきランダムに発生させ、平均発生間隔とばらつきを推定
これを数十万回繰り返す

③ 得られた発生間隔とばらつきの値から、30年以内の地震発生確率を計算し、0.1%毎に集積し頻度の分布を作成。95%信頼区間をその地域の確率とした

結果
霧多布湿原: 約 7~37% (中央値13%)
藻散布沼: 約 7~17% (中央値10%)
→ 7~40%と評価

発生確率: 7-40%
中央値: 約10%

過去の地震の発生した履歴が詳しく分かっていないため不確実性が大きい
実際に地震を起こすエネルギーは蓄えられているので、数値に囚われすぎないように事前対策をする必要がある

地震本部 (2017)

「正しく恐れる」ための知識 (再掲)

東京大学 平田直 名誉教授 (元・地震調査委員会 委員長)

地震に対して「正しく恐れる (Fear Logically)」ことが重要

地震がなぜ起きるか (予測情報の「根拠」) を理解すること

- 地震災害に備えることへの動機 (インセンティブ)
- 具体的にどのような備えをすれば良いかの理解

予測情報の限界 (不確実性) を理解すること

- 起きるか・起きないかの2択ではなく、「起きうる」という不確実性 (人間が分かっている範囲 & 自然のゆらぎ) の元で対策を講じる必要性 (リスク管理)



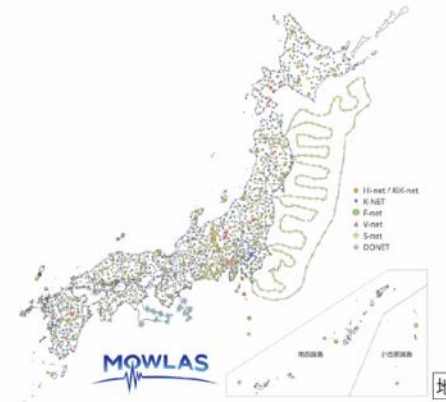
巨大地震ハザードの特定の試み

巨大地震の正確な予測 (特に時間的に) は困難...

→ どの程度の規模の地震が起こりうるかというハザードを正しく特定する試みへ

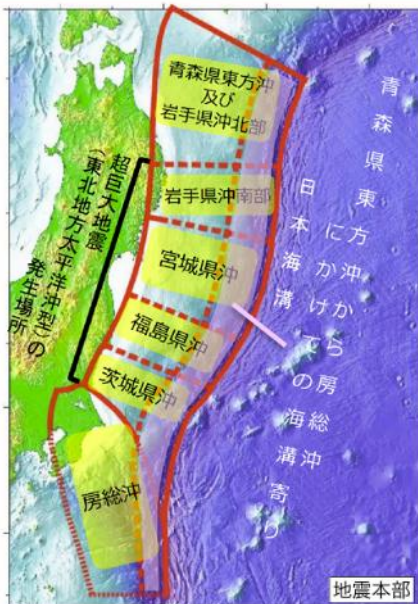
過去の地震履歴の調査 (文献・地質調査)

歪みの蓄積・解放状態の調査 (地震・測地観測網の強化)



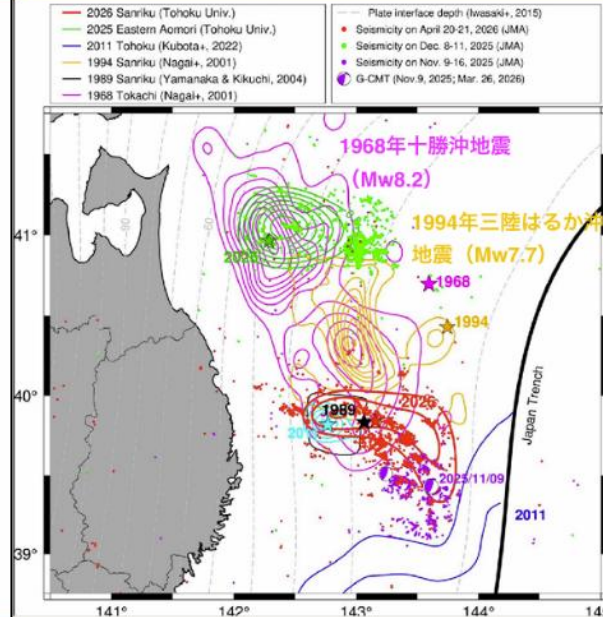
地震本部

地震の経験則による確率評価



評価対象地震	発生領域	規模	地震発生確率
超巨大地震 (東北地方太平洋沖型)	岩手県沖南部～茨城県沖	M9.0程度	ほぼ0%
プレート間 巨大地震	青森県東方沖及び 岩手県沖北部	M7.9程度	5～30%
	宮城県沖	M7.9程度	20%程度 ^{注4}
ひとまわり小さい プレート間地震	青森県東方沖及び 岩手県沖北部	M7.0～7.5程度	90%程度以上
	岩手県沖南部	M7.0～7.5程度	30%程度
	宮城県沖	M7.0～7.5程度	90%程度 ^{注4}
	宮城県沖の陸寄り (宮城県沖地震)	M7.4前後	50%程度
	福島県沖	M7.0～7.5程度	50%程度
	茨城県沖	M7.0～7.5程度	80%程度 ^{注4}
海溝寄りのプレート間 地震(津波地震等)	青森県東方沖から房総 沖にかけての海溝寄り	Mt8.6～9.0 ^{注3}	30%程度 ^{注4}
沈み込んだプレート内 の地震	青森県東方沖及び岩手 県沖北部～茨城県沖	M7.0～7.5程度	60～70% ^{注4}
海溝軸外側の地震	日本海溝の海溝軸外側	M8.2前後	7% ^{注4}

青森県東方沖～岩手県北部



評価対象地震	発生領域	規模	地震発生確率
超巨大地震 (東北地方太平洋沖型)	岩手県沖南部～茨城県沖	M9.0程度	ほぼ0%
プレート間 巨大地震	青森県東方沖及び 岩手県沖北部	M7.9程度	5～30%
	宮城県沖	M7.9程度	20%程度 ^{注4}
	青森県東方沖及び 岩手県沖北部	M7.0～7.5程度	90%程度以上

✓1968年十勝沖地震の南部が1994年三陸はるか沖地震で再び破壊

- 1994年イベントは、26年で再来
- 1994年から既に30年以上経過
- 1677, 1763, 1856年にもM8程度のイベント?

✓1968年型・1994年型のイベントの可能性、あるいはそれよりも大きいイベントの可能性もあるが、どちらにせよ歪みは数十年以上蓄積し続けている

日本海溝近傍

評価対象地震	発生領域	規模	地震発生確率
海溝寄りのプレート間 地震(津波地震等)	青森県東方沖から房総 沖にかけての海溝寄り	Mt8.6～9.0 ^{注3}	30%程度 ^{注4}

- ✓ 日本海溝沿い海溝近傍イベントをまとめて扱っている
- ✓ 1611年慶長(三陸?)地震, 1677年延宝房総津波地震, 1896年明治三陸地震, 2011年東北沖地震
- ✓ 津波地震(揺れは小さいが大きな津波を励起)が多い
- ✓ 海溝近傍での歪みの蓄積過程・津波地震のメカニズムは分かっていないことが多く、いつどの領域で再来してもおかしくない
- ・海底測地観測点を増設して、現在どこで歪みが蓄積しているかを調査する見込み

長町・利府断層帯

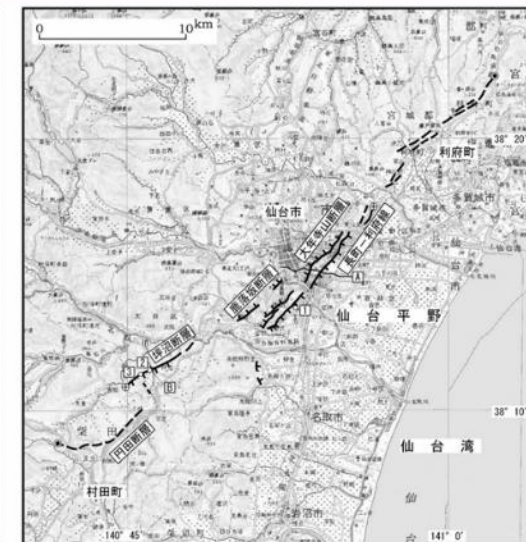
○将来の地震発生の可能性 [上に戻る]

地震の規模 : M7.0～7.5程度

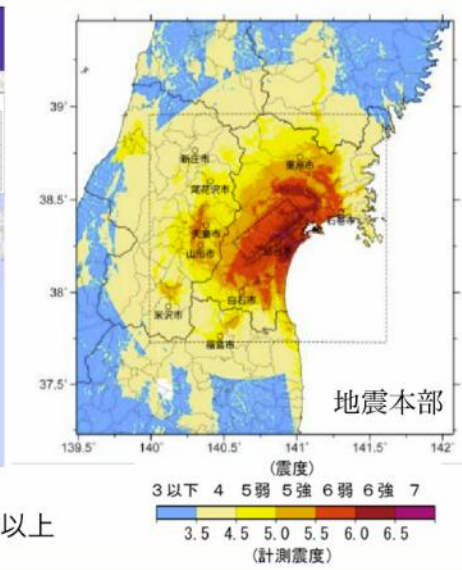
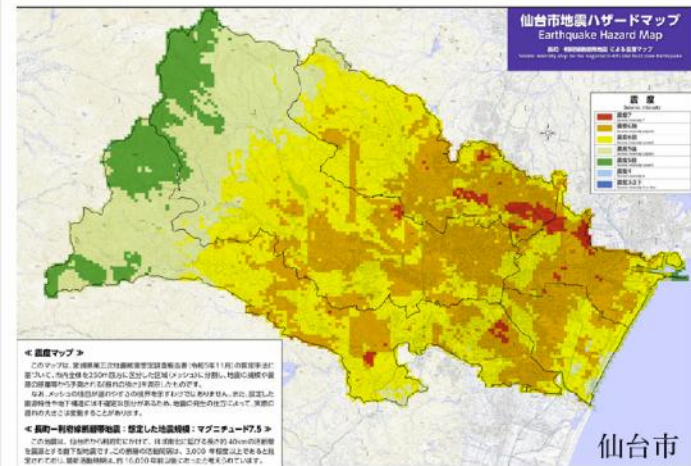
地震発生確率 : 30年以内に、1%以下 (地震発生確率値の留意点)

平均活動間隔 : 3000年程度以上

最新活動時期 : 約1600年前以後 (十分特定できない)



- ✓ 仙台の中心地を横切る断層帯(発生した場合の予想規模:M7.0～7.5程度)
- ✓ Aランク(1%以下)と発生確率は低い、最新の活動時期がわからないため油断してはならない



✓ 仙台市の市街地を含む仙台市のほとんどが震度6弱以上

- ✓ 地震は、プレート運動を原動力として発生する「断層運動」
- ✓ 地震の予測：周期性に基づく簡単なモデルを仮定した統計的な確率評価しか現状できない
 - ・ 地殻変動や近年の地震データをもとに不確実性を減らす試みを進めている
 - ・ **いつかは必ず起きる** (日本でM7は年に1回, M8は10年に1回は起きる)
- ✓ 北海道沖での超巨大地震は平均で約400年に1回発生
 - ・ 過去の巨大津波の発生間隔は、100-800年であり、不確実性が大きい
 - ・ 東北大・北大・海洋研究開発機構による海底地殻変動観測
 - ・ 巨大地震を引き起こす「歪み」は確実に蓄積している
 - ・ 既に17世紀と同じM8後半程度の歪みが蓄積している可能性がある
- ✓ 不確実性が大きいですが、いつか必ず起こる：「正しく恐れる」必要性
 - ・ いつ発生しても冷静に対処できるように、事前に対策することが重要