

最新知見のスクリーニング状況の概要（自然ハザードに関するもの）（案）

令和5年3月30日 長官官房 技術基盤グループ

（期間：令和4年12月24日から令和5年3月10日まで）

最新知見等 情報シート番号	件名	スクリーニング結果 (対応の方向性(案))	資料ページ
22 地津-(D)-0020	「内陸地殻内地震の3ステージモデルに適合した短周期レベルのスケーリング則の提案」 について	iv)	2~4
23 地津-(D)-0001	下北半島北部における津波堆積物について	vi)	5~6

対応の方向性（案）： i）直ちに規制部等関係部署に連絡・調整し、規制庁幹部に報告する。 ii）対応方針を検討し、技術情報検討会へ諮問する。 iii）技術情報検討会に情報提供・共有する。 iv）情報収集活動を行い、十分な情報が得られてから再度判断する（必要な場合には安全研究を実施する）。 v）安全研究企画プロセスに反映する。 vi）終了案件とする。以下同じ。

※フラジリティ分野の知見については「自然ハザード以外に関するもの」に分類する。

最新知見のスクリーニング状況（自然ハザードに関するもの）（案）

令和5年3月30日 長官官房 技術基盤グループ

（期間：令和4年12月24日から令和5年3月10日まで）

最新知見等情報シート番号	件名	情報の概要	受理日	1次スクリーニング		2次スクリーニング		
				対応の方向性	理由	対応の方向性	理由	対応方針
22 地 - (D) - 0020	「内陸地殻内地震の3ステージモデルに適合した短周期レベルのスケーリング則の提案」について	<p>掲載日：令和4年11月30日 掲載誌：日本地震工学会論文集 題目：内陸地殻内地震の3ステージモデルに適合した短周期レベルのスケーリング則の提案 著者：藤堂 正喜, 新井 健介, 宮腰 淳一, 佐藤 俊明, 藤原 広行, 森川 信之</p> <p>地震調査研究推進本部による「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」は、強震動予測のための震源断層モデルの設定の際に重要な役割を果たしている。レシピで最も重要なのは、震源断層面積と地震モーメントとの関係式及び地震モーメントと短周期レベル*との関係式と考えられる。特に、内陸地殻内地震の場合は、震源断層面積 S と地震モーメント M_0 とのスケーリング則「3ステージモデル」の関係から、第1、第2、第3の各ステージの断層面積 S は $M_0^{2/3}$、$M_0^{1/2}$、M_0 と比例するが、短周期レベル A の経験式は傾きが一定であり、その値 A は $M_0^{1/3}$ に比例している。レシピの方法に記載されているこの2つの経験式からアスペリティの面積割合と応力降下量を算出した場合、第1ステージでは地震モーメントに依存しない一定値となり、第2ステージ以降では地震モーメントに依存する一方で、地震観測記録の分析結果では、これらの依存性が認められない。特に第2ステージでは地震モーメントが大きくなるほど、アスペリティの面積割合も大きくなり、面積が一定値を超える長大断層では、その面積割合が0.5を超えて断層モデルが組めなくなる(アスペリティ以外の領域ではすべり量が負の値になる)ため、レシピでは、暫定的な手法として、静的応力降下量を3.1MPa、アスペリティ面積比を22%に設定するとしている。</p> <p>本論文では、短周期レベル A の地震モーメント M_0 に関するスケーリング則について再考し、アスペリティの面積比と応力降下量が M_0-S 関</p>	2023/2/10	iv)	<ul style="list-style-type: none"> 当該論文は、内陸地殻内地震の地震動を評価する際に、特性化震源モデルの設定に用いられている短周期レベルのスケーリング則の新たな経験式を提案したものである。 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」(以下、審査ガイドという。)では、断層モデルを用いた手法に基づき地震動評価を行う際に、「震源断層のパラメータは、活断層調査結果等に基づき、地震調査研究推進本部による「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」(以下「レシピ」という。)等の最新の研究成果を考慮し設定されていることに留意する必要がある」としている。 当該論文は、アスペリティの面積比として3ステージで一定の値を与えてからアスペリティの応力降下量を算定することを例示している。 			

最新知見等情報シート番号	件名	情報の概要	受理日	1次スクリーニング		2次スクリーニング		
				対応の方向性	理由	対応の方向性	理由	対応方針
		<p>係の 3 ステージモデルの各ステージでM_0に関わらず一定となるように、各ステージに応じて短周期レベル A が$M_0^{1/3}$、$M_0^{1/4}$、$M_0^{1/2}$と比例する新たなM_0-A 関係式を提案している。さらに、同論文では、提案式を地震観測記録による強震動生成領域(SMGA)の面積と応力降下量のデータとを比較して、提案の経験式が SMGA データによる短周期レベルを説明できること、経験式から算出できる応力降下量が SMGA データの応力降下量の地震規模に依存しない特徴に整合することを確認している。</p> <p>ただし、同論文では、提案式を検討した上で以下のような2つの課題を挙げている。</p> <p>1) 提案式の定数項を回帰する際に用いられたデータの内、長大な断層の地震データが少なく、今後、これらを蓄積して経験式との関係を検討する必要がある。</p> <p>2) アスペリティの面積比を一定となることを前提条件としており、レシピで暫定的に設定した22%の値は、長周期帯域の震源インバージョンによって求められた不均質すべり分布から推定されたものであるため確定的ではなく限定的であり、今後、より短周期側地震動解析のための SMGA モデルとの整合性を検討する必要がある。</p> <p>*「短周期レベル」とは、短周期領域における加速度震源スペクトルのレベルを意味しており、設計上必要な周期帯域の振幅レベルを決める重要なパラメータである。</p>			<p>この点は現行のレシピと異なる設定手法であるが、当該論文の提案式は、レシピに取り入れることを前提に検討されているものと考えられることから、地震調査研究推進本部の動向等を注視していく。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・審査ではレシピを一体の知見として扱っていることも踏まえ、当該論文の知見のみを審査の過程に取り入れることは適切ではない。また、当該論文の提案式に対して、長大な断層の地震データを蓄積し、経験式との関係を検討する必要性が課題として挙げられており、今後、地震データの蓄積によって経験式は再検討されることが考えられる。以上より、適合性審査への影響については、当該論文の知見がレシピに取り入れられることが判明した時点で検討すべき課題であると考ええる。 ・当該論文は、特性化震源モデルの設定における課題を解決するためのレシピの短周期レベルの経験式に対する一つの提案式であるが、従来の 			

最新知見等情報シート番号	件名	情報の概要	受理日	1次スクリーニング		2次スクリーニング		
				対応の方向性	理由	対応の方向性	理由	対応方針
					<p>レシピで用いられている式と比較して、短周期レベルのレベル観自体を変える式ではないことが確認できた。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地震・津波研究部門では、短周期レベルのスケールリング則を含めて、特性化震源モデルに関する安全研究を実施中であり、今後、当該論文の提案式を含めて各経験式の適用性を検討していく。 ・以上より、当該論文は現行規制に影響を及ぼすものではないと考えられるものの、当該論文の提案式がデータの蓄積によって再検討される可能性がある。今後、地震調査研究推進本部の動向等を注視し、十分な情報が得られてから再度判断する。 	/		

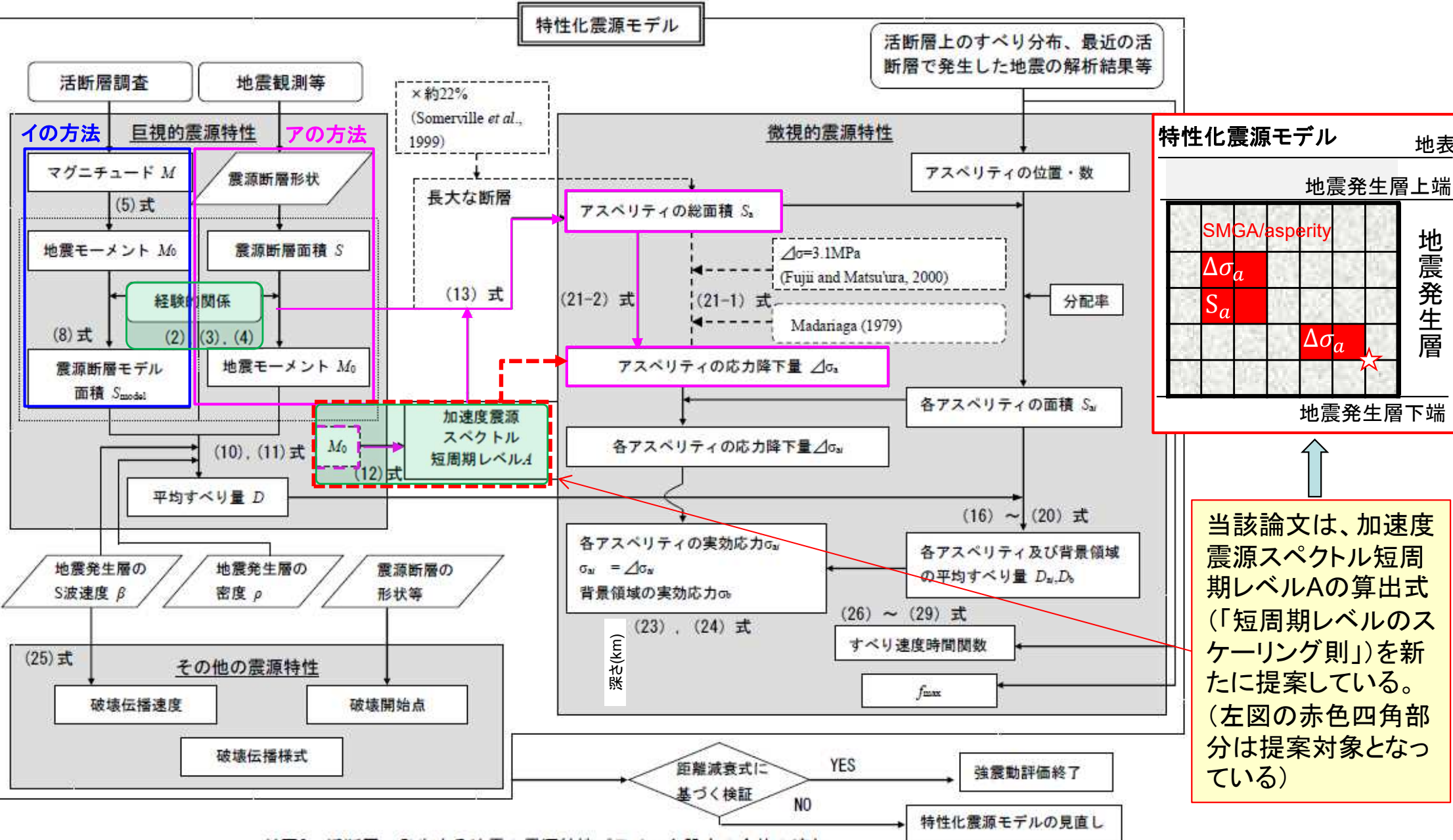
最新知見等情報シート番号	件名	情報の概要	受理日	1次スクリーニング		2次スクリーニング		
				対応の方向性	理由	対応の方向性	理由	対応方針
23 地 - (D) - 0001	下北半島北部における津波堆積物について	<p>掲載日:令和4年12月13日 掲載誌:Progress in Earth and Planetary Science 題目:Washover deposits related to tsunami and storm surge along the north coast of the Shimokita Peninsula in northern Japan 著者: Daisuke Ishimura(東京都立大学)、Takashi Ishizawa(東北大学)、Masaki Yamada(信州大学)、Kaori Aoki(東京都立大学)、Kai Sato(東京大学)</p> <p>著者らは、津波堆積物情報の空白地域である青森県下北半島北部の関根浜で津波堆積物調査を実施した。その結果、過去6000年間に5つの津波堆積物を認定したと述べている。特定した津波堆積物の最も高い位置は標高7m強であった。当該論文の概要は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> 著者らは、関根浜沿岸2地点での露頭調査及び美付川支流の谷沿い9地点での掘削調査を実施した。露頭ではそれぞれ12、及び17回のイベントを示す砂質の堆積物を認定した。また、掘削調査でも、複数のイベントを示す砂質の堆積物を認定した。 これらのイベントを示す砂質の堆積物について、著者らは非破壊分析(X線CTスキャン、マイクロ蛍光X線分析)、粒径分析、テフラ分析、放射性炭素年代測定を行い、堆積構造等を踏まえた上で、過去6000年の間に堆積した5つのイベント堆積物(TD1~TD5)が津波由来(津波堆積物)であると認定したと述べている。 加えて、露頭のイベント堆積物に関して、堆積構造等を踏まえ高潮等によるものを判別している。なお、これらは内陸部の掘削コアには認められないとした。 	2023/3/3	vi)	<ul style="list-style-type: none"> 関根浜では、著者らの既報¹⁾により標高5m程度の微高地において、イベント堆積物の存在が知られている。当該論文は、関根浜で、5つの津波堆積物を認定し、最も高い津波堆積物の標高が7m強であることが示されている。 当該知見と審査ガイドの関係として、基準津波の審査ガイド²⁾では、基準津波の選定結果の検証として、敷地周辺における地質学的証拠等から推定される津波の規模を超えていることを確認することとし、津波堆積物の情報が利用されている。当該知見は、下北半島北部で認定された津波堆積物に関する情報であり、その認定に当たっては、適切な分析や堆積構造等の観察がなされていると考えられる。そのため、基準津波の選定結果の検証のための一情報と考えられる。 当該知見は、東北地方北部に立地する原子力発電所等の基準津波の選定結果の検証における新たな情報である。ただし、既許可の施設については当該知見を上回る津波が想定されており、審査結果への影響はないと考える。また、審査中の施設においては、今後の審査の中で当該知見を含めて確認する必要があるため、審査部門に提供・共有した。 以上より、終了案件(vi)とする。 			

最新知見等情報シート番号	件名	情報の概要	受理日	1次スクリーニング		2次スクリーニング		
				対応の方向性	理由	対応の方向性	理由	対応方針
		<ul style="list-style-type: none"> 最も新しい津波堆積物(TD1)の年代は、1450～1650年であったとし1611年慶長津波や17世紀津波等との関連性を指摘している。TD2～TD5の津波堆積物は、紀元前2,000年以前であったことが示されている。また、TD1の津波堆積物は認定された津波堆積物の内、最も高い標高7m強で確認されている。 			<p>・なお、地震・津波研究部門では、1611年慶長津波の具体的な波源モデルを推定する安全研究を実施中であり、当該論文で示されている津波堆積物は1611年慶長津波や17世紀津波等との関連性が指摘されていることから有益な情報である。今後実施する波源モデル推定の参照データとして活用する。</p> <p>【参考文献】 1) 石村大輔、青木かおり:青森県むつ市関根浜におけるイベント堆積物の特徴とその給源、日本地球惑星科学連合2019年大会予稿原稿、2019年。 2) 原子力規制委員会:基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド、2021年6月改正。</p>			

1. 強震動予測手法(「レシピ」)

資料58-1-1
(参考)

地震調査研究推進本部: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)



付図2 活断層で発生する地震の震源特性パラメータ設定の全体の流れ

「短周期レベルA」: 短周期領域における加速度震源スペクトルのレベルを意味しており、設計上必要な周期帯域の振幅レベルを決める重要なパラメータである。

2. 特性化震源モデル設定の課題

主要パラメータの設定

活断層調査結果等により、断層長さ L 、幅 W を推定
 \Rightarrow 断層面積 $S=LW=\pi R^2$

スケールリング則の経験式

(1)断層面積と地震モーメントとのスケールリング則 M_0 レシピ(2~4)式

Irikura & Miyake, 2001; Murotani et al., 2015

(2)短周期レベルと地震モーメントとのスケールリング則 A レシピ(12)式

Dan et al., 2001

三つの関係式により、 $\Delta\sigma, S_a, \Delta\sigma_a$ が決まる

レシピ(22-2)式

$$M_0 = \frac{16}{7} \Delta\sigma R^3 \Rightarrow \text{平均応力降下量 } \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma \quad \text{レシピ(21-1)式}$$

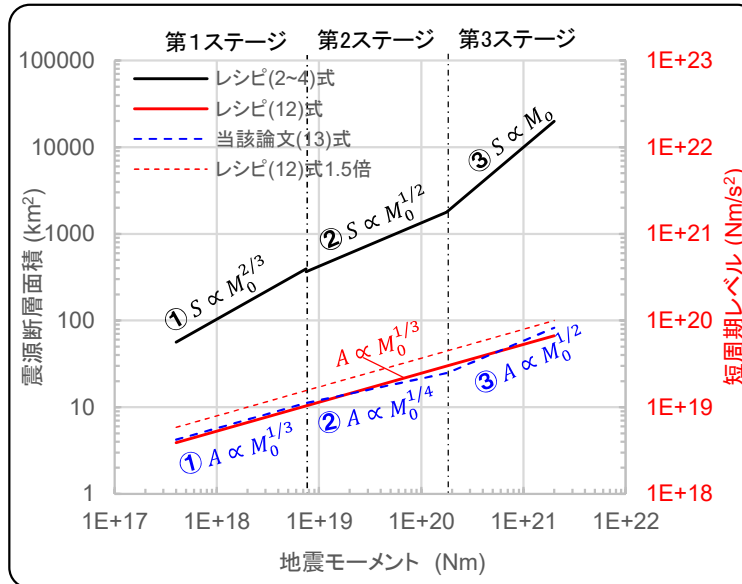
$$A = 4\pi \cdot r \cdot \Delta\sigma_a \cdot \beta^2 \quad \text{レシピ(15)式}$$

\Rightarrow アスペリティの面積 $S_a = \pi r^2$

\Rightarrow アスペリティの応力降下量 $\Delta\sigma_a$

「短周期レベル」：短周期領域における加速度震源スペクトルのレベルを意味しており、設計上必要な周期帯域の振幅レベルを決める重要なパラメータである。

各スケールリング則(経験式)の比較



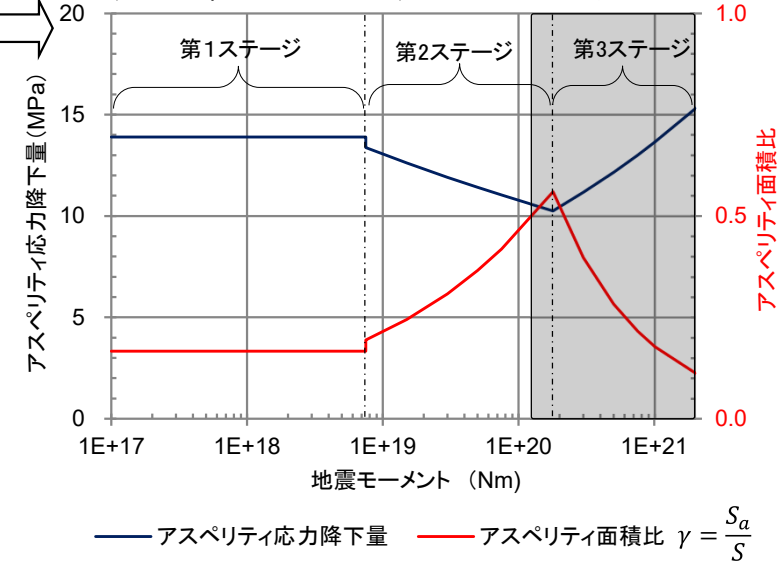
本資料の記号一覧

S 震源断層面積	R 震源断層の等価半径
M_0 地震モーメント	$\Delta\sigma$ 平均応力降下量
A 短周期レベル	r アスペリティの等価半径
β S波速度	$\Delta\sigma_a$ アスペリティの応力降下量
S_a アスペリティの面積	
γ アスペリティと断層との面積比	

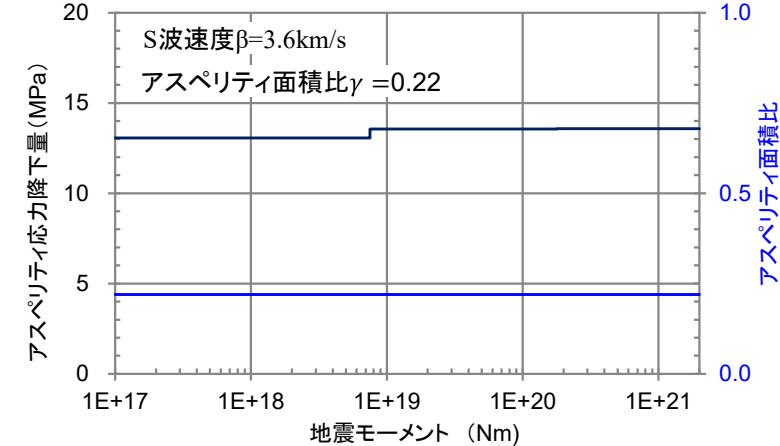
レシピの経験式を適用した場合

(S波速度 $\beta=3.6\text{km/s}$ の場合)

適用外



当該論文の(13)式を適用した場合



- レシピの3ステージモデルの M_0-S 経験式及び M_0-A の経験式をそのままに適用すると、第2ステージでは、地震モーメントが大きくなるほど、アスペリティの応力降下量が小さく、面積比が大きくなる。
- レシピでは、第3ステージ又は第2ステージの一部では、暫定的な取り扱いとして、アスペリティ面積比を22%、平均応力降下量を3.1MPaする。
- 当該論文は、アスペリティの面積比と応力降下量が M_0-S 関係式の3ステージモデルの各ステージで M_0 に関わらず一定となるように、短周期レベル A が各ステージに応じて $M_0^{1/3}$ 、 $M_0^{1/4}$ 、 $M_0^{1/2}$ と比例する新たな M_0-A 関係式を提案している。

北海道山越郡長万部町で確認された水柱について

令和5年3月30日

地震・津波研究部門

1. 経緯

2022年8月8日夕方から同年9月26日未明までの約50日間、北海道山越郡長万部町長万部の飯生神社敷地内（以下「当地」という。）の旧天然ガス坑井から、高さ30mに達する大規模な湧水及びメタンガスの噴出事象（以下「本事象」という。）が発生した。

この状況を踏まえ、令和4年度第44回原子力規制委員会（2022年10月12日）において、本事象の原因、地震活動との関係等を調査するよう原子力規制庁に指示があり、当該調査・整理結果を以下のとおり取りまとめた。

2. 本事象の詳細について

本事象に関する報道発表等の概要は以下のとおりである。

- ・2022年8月8日、当地において水が噴出し、その高さは30mに達した。
- ・同年9月26日、水の噴出が停止した^{参1)}。
- ・水の噴出停止後もメタンガスの噴出は継続している^{参2,3)}。
- ・町による水質分析の結果、噴出水は水温21.5℃の温泉水とされた^{参4)}。
- ・町による調査の結果、水の噴出源は1958～1959年の試掘井と判明した^{参5,6)}。
- ・当地では1961年にも数時間以上にわたってガス等が噴出した記録がある^{参7)}。

当地は黒松内低地断層帯^{参8)}の近傍に位置するほか、付近には活構造として長万部背斜^{参9)}及び旭浜付近の断層^{参10)}が分布する（図1）。本事象はこれらの活構造の運動に伴って生じた可能性があると考えられることから、同断層帯を含む当地付近の最近の地震活動及び地殻変動を確認した。その結果、当地付近の地震の発生時期及び地震規模に本事象の発生時期との関連性が見られないこと、電子基準点「長万部」の変動傾向についても同様であることから、最近の地震活動及び地殻変動と本事象との間に有意な因果関係は認められなかった（図2～5）。

また、水質について周辺の温泉との比較を行った結果、本事象の湧水は近傍の活火山のマグマ活動及び当地付近の断層活動に影響を受けたものではなく、長万部温泉に代表される化石海水由来の高濃度塩水がアルカリ炭酸塩型の地下水によって一定程度希釈されたものと考えられる（図6）。なお、本事象の湧水は我が国の水溶性天然ガス田の多くで見られるかん水¹⁾と同様の化学的特徴を有することから、当地付近に分布する天然ガス田との関連性が示唆される。

3. 油田・ガス田開発に伴う水の噴出について

本事象は1950年代に天然ガス開発を目的として掘削された試掘孔^{参23)}におい

¹⁾ 天然ガスが溶解している地層水を指す。

て発生したため、直接的な原因としては当該坑井の廃坑措置が不十分であった可能性が考えられる。このため、国内及び石油・天然ガス産出国である米国における類似事例を調査した結果、今回のような事象は国内ではごくまれに発生しているのに対し、米国では少なくとも数年に 1 回の頻度で発生していることが判明した（表 1）。また、国内・米国ともに、これらの試掘孔が設けられた年代は古く、現在ではその位置が不明な場合が多い。

特に米国には、現在の管理者がおらず廃坑措置が不十分な可能性のある旧石油・ガス坑井である「孤児の井戸（Orphan Well）」が多数存在し、その総数は全米で約 90 万孔と推定されている²⁴⁾。これらの Orphan Well では石油・天然ガスの漏えいによる土壌汚染及び引火事故が発生しており、原子力分野においても、使用済燃料及び GTCC²廃棄物中間貯蔵施設の建設・運転に係る近年の許認可の過程（パブリックコメント等）で、サイト内の潜在的な Orphan Well の存在による施設の安全性への影響が議論された²⁵⁻²⁷⁾。しかしながら、現時点で Orphan Well に対する NRC、DOE 等の統一的な見解（審査ガイド等）は示されていない。

4. まとめ

以上の調査結果を総合すると、本事象は天然ガスを含む地下水が脱ガスによる圧力上昇を受けて湧昇・噴出したものであり、直接的には天然ガス田開発当時の廃坑措置に関する技術的問題に起因した事象である可能性が高く、当地周辺の地震活動や地殻変動に由来したものではないと考えられる。

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則第 6 条第 3 項は、「発電用原子炉施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）」として、同規則の解釈において、飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突又は電磁的障害等の事象を規定している。本事象は外的ハザードとしての潜在的懸案事項となりうるものの、本調査で判明したように国内での発生はごくまれであり、解釈に追加すべき事象ではないと考える。また、これまでに、原子力施設において、安全機能に影響を及ぼし得る事象として本事象と同様の事象が発生したとは承知していない。

しかし、国内には、油田・ガス田地帯に立地する原子力施設が存在することを踏まえ、原子力事業者等に対して被規制者向け情報通知文書 NRA Information Notice を発出することとしたい。

² 「クラス C を超える（Greater Than Class C）」の略。米国における低レベル放射性廃棄物のうち放射能濃度がクラス C の上限値を超えるものであり、放射化した原子炉構成材料、医療用密封線源等が含まれる。

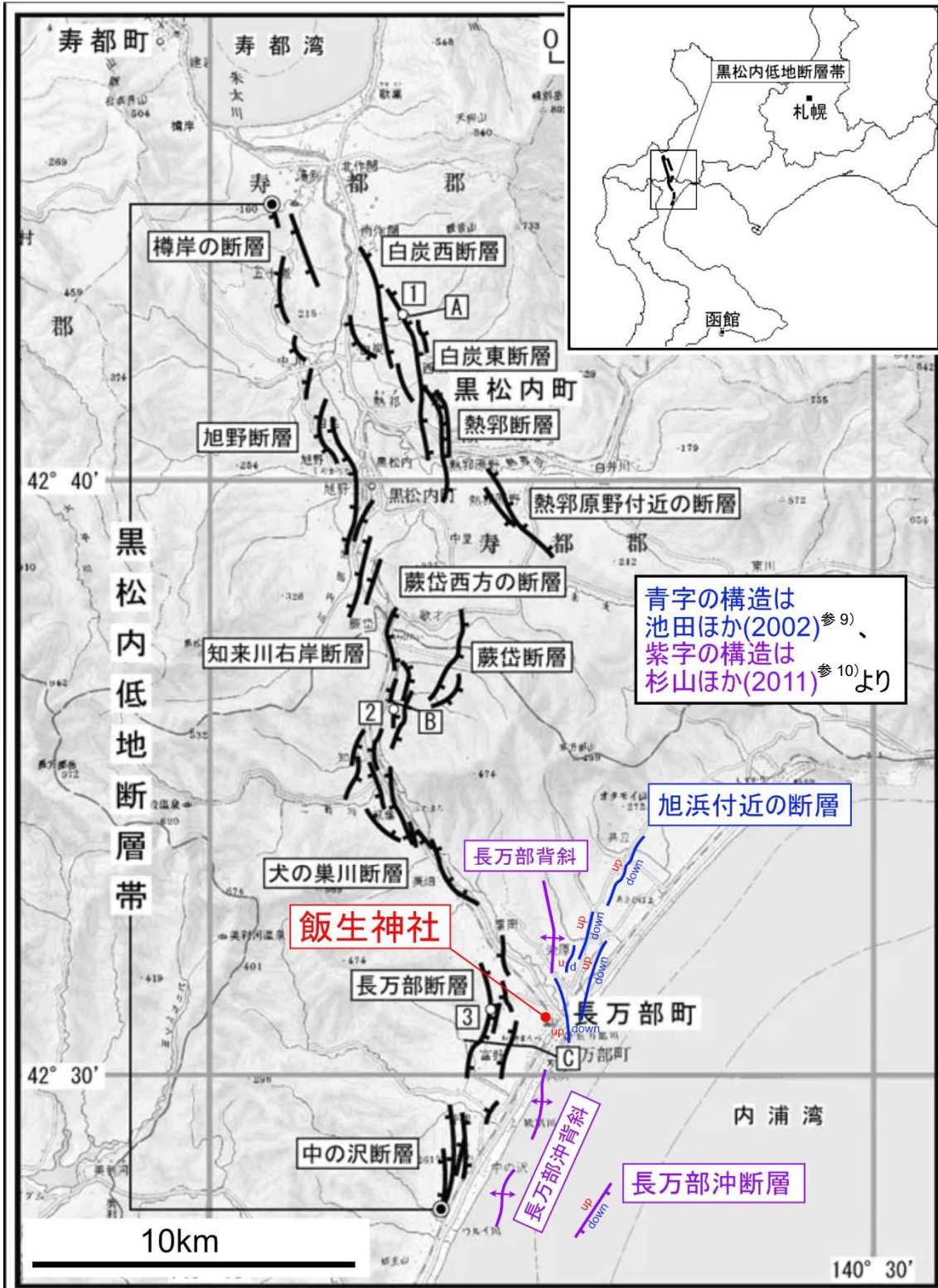
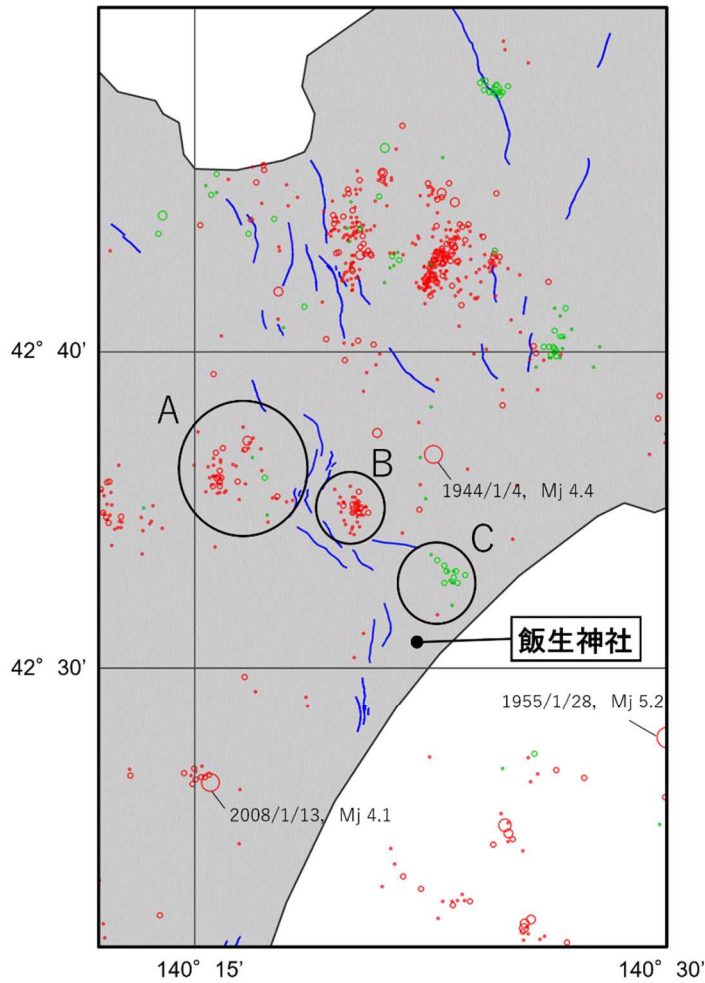


図1 黒松内低地断層帯と当地の位置関係
(地震調査研究推進本部, 2005^{参8)} に加筆)



— 活断層線分データ
 (活断層詳細デジタルマップ、中田・今泉編, 2002) 参 11)

● 0.0 ≦ Mj < 1.0
 ○ 1.0 ≦ Mj < 2.0
 ○ 2.0 ≦ Mj < 3.0
 ○ 3.0 ≦ Mj < 4.0
 ○ 4.0 ≦ Mj < 5.0
 ○ 5.0 ≦ Mj < 6.0

気象庁地震カタログ ※検測済みの震源データ 参 12)
 ($M_{JMA} \geq 0.0$ & 震源深さ $D \leq 25$ km)
 (1919/01/01 ~ 2020/08/31)

● 0.0 ≦ Mj < 1.0
 ● 1.0 ≦ Mj < 2.0
 ● 2.0 ≦ Mj < 3.0

(国研) 防災科学技術研究所 Hi-netデータ 参 13)
 ($M \geq 0.0$ & 震源深さ $D \leq 25$ km)
 (2020/09/01 ~ 2022/10/18)

図 2 当地周辺の震央分布^{参 11-13)}

(中田・今泉編(2002) ^{参 11} に加筆)

震源クラスタ A~C の地震発生時期と地震規模の関係は図 3 を参照

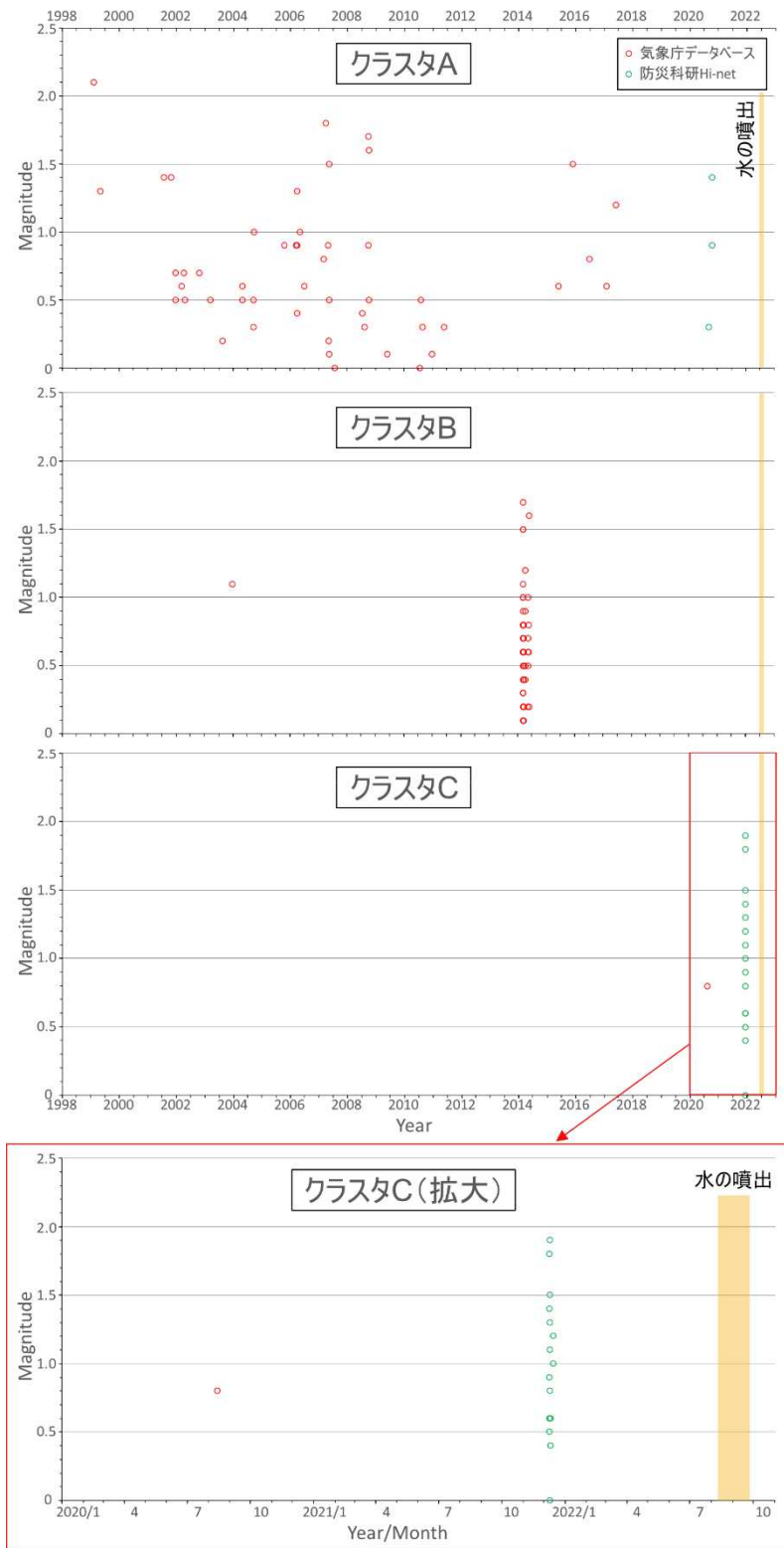


図3 震源クラスタ A~C の地震発生時期と地震規模の関係^{参 12,13)}

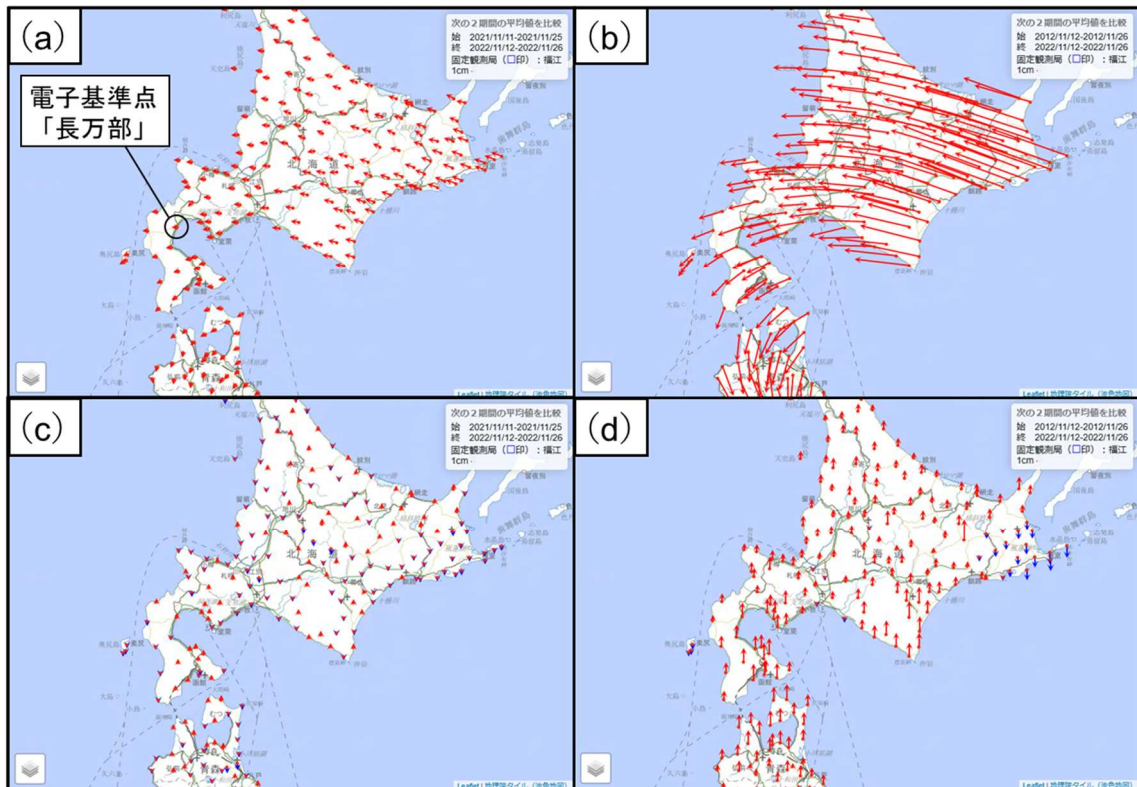


図4 当地周辺の最近の地殻変動
 (国土地理院地殻変動情報表示サイト^{参14)}に加筆
 (a) 最近1年間の電子基準点の変動(水平)
 (b) 最近10年間の電子基準点の変動(水平)
 (c) 最近1年間の電子基準点の変動(垂直)
 (d) 最近10年間の電子基準点の変動(垂直)
 【データ期間】始期: 2021/11/11~2021/11/25 (最近1年間)
 2012/11/12~2012/11/26 (最近10年間)
 終期: 2022/11/12~2022/11/26

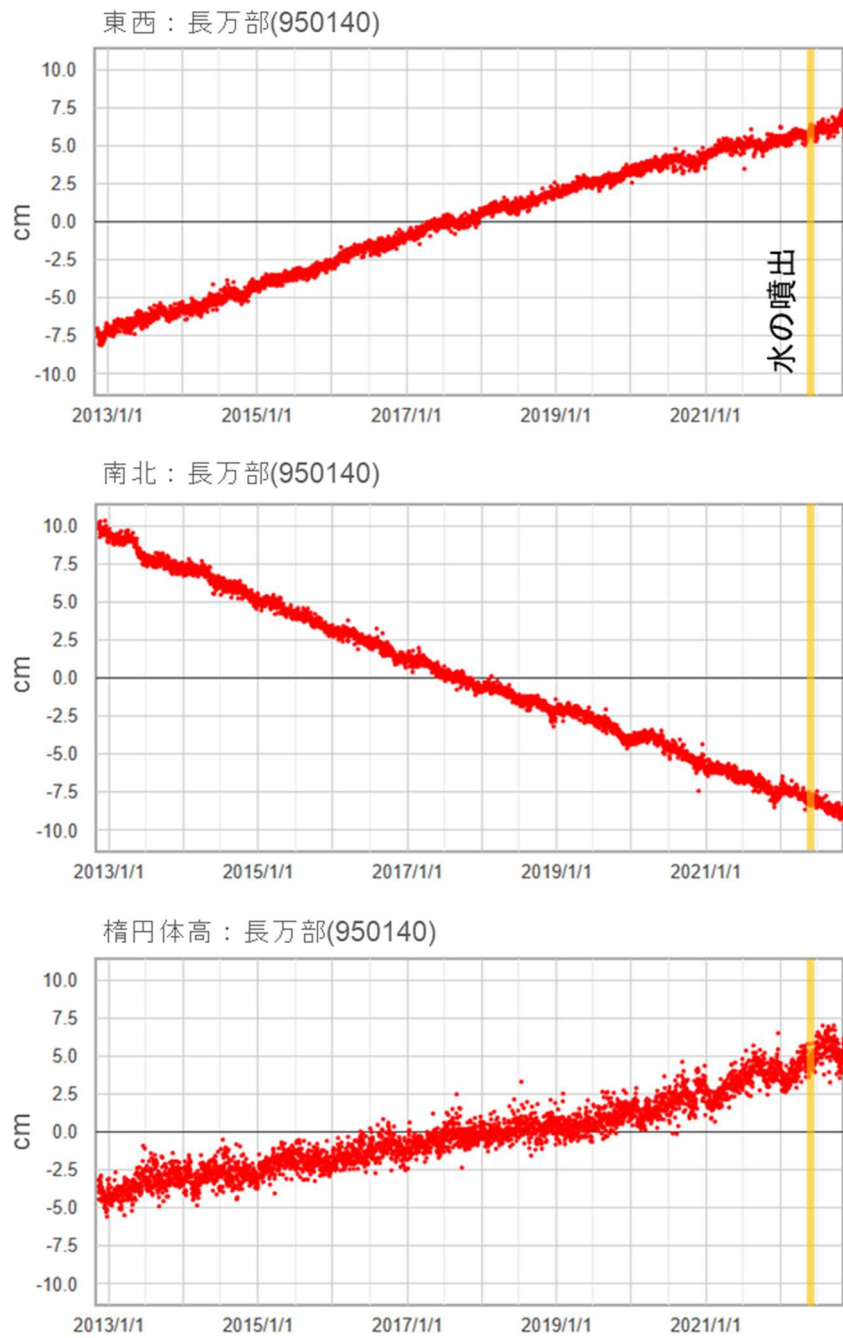


図5 長万部（950140）の最近の座標変化
 （国土地理院地殻変動情報表示サイト^{参14}）に加筆
 データ期間：2012/11/1~2022/10/31

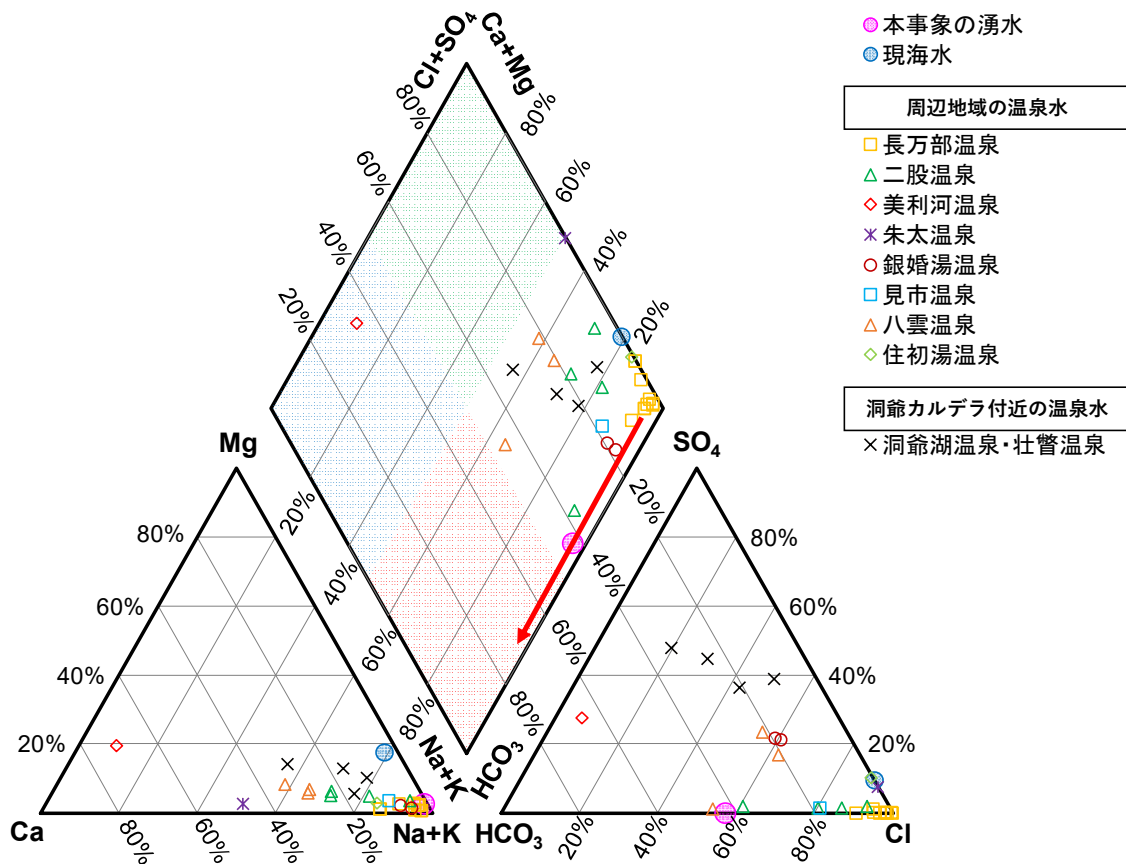


図 6 本事業の湧水、周辺地域の温泉水及び洞爺カルデラ付近の温泉水のトリリニアダイアグラム

* トリリニアダイアグラムは水試料の主要溶存成分を図示する方法の一つであり、中央の菱形の座標図（キーダイアグラム）を四つに区分することで、以下の大まかな泉質に分類することができる。

- ① アルカリ土類炭酸塩型 （左、浅層地下水由来）
- ② アルカリ炭酸塩型 （下、深層地下水由来）
- ③ アルカリ土類非炭酸塩型 （上、熱水・化石水由来）
- ④ アルカリ非炭酸塩型 （右、海水・温泉由来）

* 本事業の湧水の水質は長万部町から提供いただいた非公開文献^{参15)}による。

* 図中の温泉水及び現海水の水質データは文献^{参16-22)}による。

表 1 国内及び米国における類似事象

発生時期 (年/月)	発生場所	噴出水の高さ	噴出継続期間
2004/10	新潟県新津市滝谷町 (現 新潟市秋葉区)	不明	数時間
2012/10	米国ペンシルベニア州 Tioga 郡 Union Township	30 フィート (約 9.1m)	1 週間
2019	米国カリフォルニア州 Los Angeles, Marina Del Ray	100 フィート (約 30.5m)	不明 (短期間)
2022/1	米国テキサス州 Crane 郡 Monahans 近郊	75~100 フィート (約 22.9~30.5m)	不明 (12 日間以上)

<参考文献>

- 参1) 朝日新聞 2022/9/27 10:45 「突然噴き出た水柱、50 日目でびたり止まる 「久々に静か」 住民安堵」
<https://www.asahi.com/articles/ASQ9V7S15Q9VIPE007.html> (2022/10/12 確認)
- 参2) 北海道ニュース UHB 2022/9/26 15:15 「工事関係者が撮影 "水の止まった" 水柱の噴出口 「静か、静か...よかった」 住民は安堵 北海道」
<https://www.uhb.jp/news/single.html?id=30819> (2022/10/12 確認)
- 参3) ABEMA TIMES 2022/9/27 20:30 「巨大“水柱”の噴出突然止まる 住民安堵「安心して寝られる」 北海道・長万部」
<https://times.abema.tv/articles/-/10041276> (2022/10/12 確認)
- 参4) 長万部町, 2022, 「水柱」の水質検査結果について.
<https://www.town.oshamambe.lg.jp/site/mizubashira/5133.html> (2022/11/30 確認)
- 参5) 令和 4 年第 3 回長万部町議会定例会(第 2 日目)会議録. 令和 4 年 9 月 13 日.
<https://www.town.oshamambe.lg.jp/uploaded/attachment/6581.pdf>
- 参6) The Hokkaido Shimbun Press, 26 Aug. 2022, 30-m-high column of water suddenly appears in front of shrine.
<https://h2w.hokkaido-np.co.jp/topics/p16357/> (2022/11/30 確認)
- 参7) 長万部町史編集室, 長万部町史. 長万部町, 776p, 1977.
- 参8) 地震調査研究推進本部, 黒松内低地断層帯の長期評価について. 平成 17 年 4 月 13 日.
- 参9) 池田安隆, 今泉俊文, 東郷正美, 平川一臣, 宮内崇裕, 佐藤比呂志, 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 254p, 2002.
- 参10) 杉山雄一, 内田康人, 村上文敏, 津久井朗太, 黒松内低地断層帯南方延長部(内浦湾)の地質構造と活動性. 活断層・古地震研究報告, 11, 21-53, 2011.
- 参11) 中田高, 今泉俊文, 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 68p, 2002.
- 参12) 気象庁, 地震月報(カタログ編).
<https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html>
- 参13) 国立研究開発法人防災科学技術研究所, Hi-net 高感度地震観測網.
<https://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>
- 参14) 国土地理院, 地殻変動情報表示サイト.
<https://mekira.gsi.go.jp/index.html>
- 参15) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構, 技術指導報告書 長万部町に出現した水柱の現地調査報告(噴出水の主要溶存成分分析結果). 4p, 2022.

- 参16) 太秦康光, 那須義和, 瀬尾淑子, 温泉の化学的研究(第41~44報)(第41報)北海道諸温泉の化学成分とその起源についての問題点. 日本化学雑誌, 80, 8, 856-859, 1959.
- 参17) 太秦康光, 那須義和, 瀬尾淑子, 温泉の化学的研究(第41~44報)(第42報)北海道西南部の諸温泉(その1). 日本化学雑誌, 80, 8, 859-862, 1959.
- 参18) 松波武雄, 北海道の海岸地域に分布する高濃度塩水について. 地下資源調査所報告, 67, 41-58, 1995.
- 参19) 島田忠夫, 矢崎清貴, 狛武, 北海道長万部町における天然ガス試掘井(長万部 R-1号)のコア試験およびリフト試験について. 石油技術協会誌, 20, 5, 28-35, 1955.
- 参20) 福田理, 日本のホウ素資源と水溶性ホウ素鉱床—その2. 地質ニュース, 371, 40-55, 1985.
- 参21) 松尾禎士, 日下部実, 千葉仁, 牛木久雄, 小坂文予, 平林順一, 安孫子勤, 野津憲治, 小沢竹二郎, 荒牧重雄, 佐藤和郎, 林保, 佐藤純, 藤井直之, 1977年有珠山噴火直後の地下水, 温泉水および火山灰の地球化学的研究. 火山, 22, 4, 201-220, 1977.
- 参22) 桑本融, 海水の無機成分—溶存化学種を中心に. 化学と生物, 22, 7, 439-445, 1984.
- 参23) 長尾捨一, 北海道の構造的天然ガスについて. 地下資源調査所報告, 40, 1-59, 1969.
- 参24) Interstate Oil & Gas Compact Commission, Idle and Orphan Oil and Gas Wells: State and Provincial Regulatory Strategies 2021. 78p.
https://iogcc.ok.gov/sites/g/files/gmc836/f/documents/2022/iogcc_idle_and_orphan_wells_2021_final_web_0.pdf (2022/11/30 確認)
- 参25) U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC Staff's Answer in Opposition to the Appeal of Fasken Land and Minerals, Ltd. and the Permian Basin Land and Royalty Owners of LBP-19-7. Docket No. 72-1050, 2019/10/15.
<https://www.nrc.gov/docs/ML1928/ML19288A224.pdf>
- 参26) New Mexico Energy, Minerals and Natural Resources Department (EMNRD), Comments Regarding the May 2020 Draft Environmental Impact Statement (EIS) for the Interim Storage Partners License Application for a Consolidated Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste in Andrews County, Texas. 2020/11/3.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2030/ML20309B052.pdf>
- 参27) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Environmental Impact Statement for Interim Storage Partners LLC's License Application for a Consolidated Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel in Andrews County, Texas, Final Report. NUREG-2239, 684p, 2021.
<https://www.nrc.gov/docs/ML2120/ML21209A955.pdf>

<謝辞>

本稿の執筆に当たり、北海道長万部町水道ガス課からは水の分析結果に関する文献を提供いただいた。石油技術協会からは国内における旧石油・ガス坑井の状況及び米国の Orphan Well の状況について大変有用な情報を提供いただいた。以上の方に記して感謝申し上げます。

2021年12月に米国で発生した竜巻の調査結果

令和5年3月30日

原子力規制庁

地震・津波研究部門

1. 経緯

2021年12月10～11日、米国中部・南部において非常に大きな竜巻が多数発生し、多くの死傷者や建物等に被害が生じた。竜巻の最大風速が¹190mph(85m/s)である、改良藤田スケール¹(以下「EF」という。)4に相当する。

令和3年度第54回原子力規制委員会(2021年12月22日)において、本事象の被害情報等について収集・分析を行うように原子力規制庁に指示があり、米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration)等の公開情報を収集するとともに、被害状況についても調査を行い、当該調査・整理結果を以下のとおり取りまとめた。

2. 調査の内容

2.1 調査範囲

この竜巻については、米国海洋大気庁の国立気象局(National Weather Service、以下「NWS」という。)がいくつかの資料を発表している。ここでは、同機関が公表した資料を調査し、整理した。

なお、米国風工学会(The American Association for Wind Engineering)、米国土木学会(American Society of Civil Engineering)等についても調査を実施したが、これまでに調査した範囲において、当該竜巻に関連する報告は見つからなかった。

2.2 竜巻の発生状況・特徴

今回の天候の特徴としては、竜巻による雷雨が長い時間続いたことがあげられる。特に2つのスーパーセルが、100mile(161km)以上の長距離を移動しながら竜巻を発生させた。

NWSの嵐予報センター(Storm Prediction Center)によると、2021年12月10日の夕刻にEF4の強烈な竜巻がテネシー州の北西で発生し、ケンタッキー州西部まで横断し、約400件の被害報告があった。

NWSは、12月21日迄に、12月10～11日に米国中部・南部を移動した巨大な嵐について66件の竜巻を認定した²。図-1に12月10日5:20pm～12月11日1:00am(CST)のレーダー画像によるスーパーセルの発生状況を示す。アーカンソー州、テネシー州、ミズーリ州及びケンタッキー州において帯状に発生していることが分かる。このスーパーセルに沿って竜巻が発生している。また、図-2に12月10日の竜巻の発生状況の時系列を示す。図-3に嵐の軌跡を示す。これによると250mile(402km)に渡って竜巻が移動したように見えるが、その後の調査で、これは図-4に示すように、3件の竜巻であったことが判明した。北側の165.7mile(266.6km)と80.3mile(129.2km)の2

¹ The Enhanced Fujita Scale(EF Scale) <<https://www.weather.gov/oun/efscale>>
(参照2022年11月29日)

² NWS Storm Damage Summaries <<https://www.weather.gov/crh/dec112021>>(参照2022年11月29日)

件の竜巻は、EF 4 と判定されており、今回の最大のものである。また、南側の 122.7mile(197.4km)の竜巻は EF 3 であった。なお、米国における過去に最も長い距離を移動した竜巻は、1925 年 3 月にミズーリ州を襲ったもので、約 352 キロを移動している³。

表-1 に全 66 件の竜巻のうち、風速の大きい方から 23 件の竜巻について示す。また、表-2 に 66 件の竜巻について改良藤田スケールのスケール毎に整理して示す。

今回の最大規模である EF 4 の竜巻は風速 190mph(85m/s) 及び 170mph(76m/s) であった。また、EF 3 の竜巻については 6 件あった。

図-5 に年毎の竜巻発生件数のグラフを示す。1991 年～2020 年の年間の平均竜巻発生数は 1225.1 件であるのに対し、2021 年は年間 1314 件であり、平均よりもやや多い程度であった。また、12 月の平均竜巻発生数は 24 件とのことであるが、2021 年 12 月の竜巻発生数は 193 件であり、近年の平均の 8 倍程度の竜巻が発生していた。なお、それ以前の 12 月の最大発生件数は、2002 年の 97 件であった。参考として、図-6 及び図-7 に竜巻の発生地点の概要を示す。

上述のように、短時間に複数の竜巻が発生したという気象上の特徴があったが、最大風速は EF 4 であり、原子力施設との関連から特筆する情報はなかった。過去に EF 5 の竜巻は、ミズーリ州を襲った 1953 年のフロント-ビーチャー竜巻と 1899 年 6 月 12 日ウィスコンシン州ニューリッチモンド竜巻の 2 件がある⁴。

2. 3 被害の概要

今回の竜巻による被害前後の比較を写真-1～4 に示す。

写真-1 にケンタッキー州メイフィールドの一般住宅の被害例を示す。EF 4 の竜巻によって多くの住宅が壊されて街並みが一変している。

写真-2 に同じくメイフィールドの Health and Rehabilitation Center の被害例を、写真-3 にアーカンソー州モネットの老人ホームの被害例を示す。いずれも EF 4 の竜巻により屋根部分は吹き飛ばされているが、コンクリートブロック造の壁部分は残存している。写真-4 にイリノイ州エドワーズビル近郊のアマゾンの倉庫の EF 3 での竜巻被害例を示す。鉄骨造であり、竜巻が通過した範囲が鉄骨部分を含め崩壊しているように見える。なお、各種情報を見る限り、鉄筋コンクリート構造物の被害は確認出来なかった。

上述のように、一般産業施設の被害例は多数報告されているが、原子力施設の直接的な被害はなかったこと、また、鉄筋コンクリート造の被害報告は見当たらなかったことから、原子力施設の参考となるような竜巻に対する情報は確認できなかった。

大きな被害を受けたケンタッキー州では、13 日午前時点で同州の約 2 万 7000 の世帯・企業で停電が発生していた⁵。また、wiki⁶によると停電が 74 万件あったという報告があった。

³ 米ケンタッキー州などで猛烈な竜巻 死者 100 人超か <https://www.bbc.com/japanese/59632967> (参照 2022 年 12 月 9 日)

⁴ 米国で最も致命的な竜巻トップ 10 (greelane.com) <https://www.greelane.com/ja/%E7%A7%91%E5%AD%A6%E6%8A%80%E8%A1%93%E6%95%B0%E5%AD%A6/%E7%A7%91%E5%AD%A6/deadliest-us-tornadoes-3444291/> (参照 2022 年 12 月 9 日)

⁵ 日経新聞：米竜巻の死者、88 人確認 バイデン氏が大規模災害宣言 <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGN13D5G0T11C21A2000000/> (参照 2022 年 12 月 9 日)

⁶ Tornado outbreak of December 10-11, 2021 <Tornado outbreak of December 10-11, 2021 - Wikipedia> (参照 2022 年 12 月 9 日)

3. まとめ

2021年12月10～11日、米国中部・南部にて発生した竜巻に関して公開情報を基に調査を行った。今回の竜巻の特徴としては、複数の竜巻が短時間に特定の領域で発生したこと、竜巻の移動距離が大きかったことがあげられる。また、木造家屋やコンクリートブロック造の建物などでは大きな被害が広範囲に及んだものの、今回の竜巻の最大風速はEF4（85m/s程度）であり米国の既往最大EF5に達しておらず、鉄筋コンクリート造の構造物の被害報告は見当たらなかった。

一方、日本国内の原子炉施設のうち安全上重要な施設の竜巻による影響評価において参照されている「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」（以下「竜巻ガイド」という。）では、設計上考慮する竜巻やその作用荷重の設定の考え方を例示^{※1}しているが、米国で今回観測された竜巻の最大風速（85m/s程度）は、竜巻ガイドに示される国内過去最大の風速（藤田スケールF3の上限値92m/s）に包含されるものであった。

これより、2022年12月現在において公開されている竜巻被害に関する情報を調査した範囲においては、国内の原子力関連施設の竜巻に対する構造設計や研究に反映する事項はない。

※1 竜巻ガイドの抜粋（「3. 基準竜巻・設計竜巻の設定」解説3.3.1）

解説3.3.1 過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})の設定

本文に記載のとおり、日本で過去に発生した竜巻による最大風速を V_{B1} として設定することを原則とする。

また、過去に発生した竜巻による最大風速は、竜巻による被害状況等に基づく既往のデータベース、研究成果等について十分に調査・検討した上で設定する必要がある。

日本における過去最大級の竜巻としては、例えば、1990年12月に千葉県茂原市で発生した竜巻、2012年5月に茨城県常総市からつくば市で発生した竜巻等があげられる。竜巻検討地域の観測記録等に基づいて V_{B1} を設定する場合において、これら過去最大級の竜巻を考慮しない場合には、その明確な根拠を提示する必要がある。

竜巻による被害状況から推定された最大風速を参照して設定された藤田スケールを用いて基準竜巻の最大風速を設定する場合^(注3.3)は、藤田スケールの各階級（F0～F5）の最大風速を用いる。解説表3.1に藤田スケールと風速の関係を示す。なお、風速計等によって観測された風速記録がある場合には、その風速記録を用いてもよい。

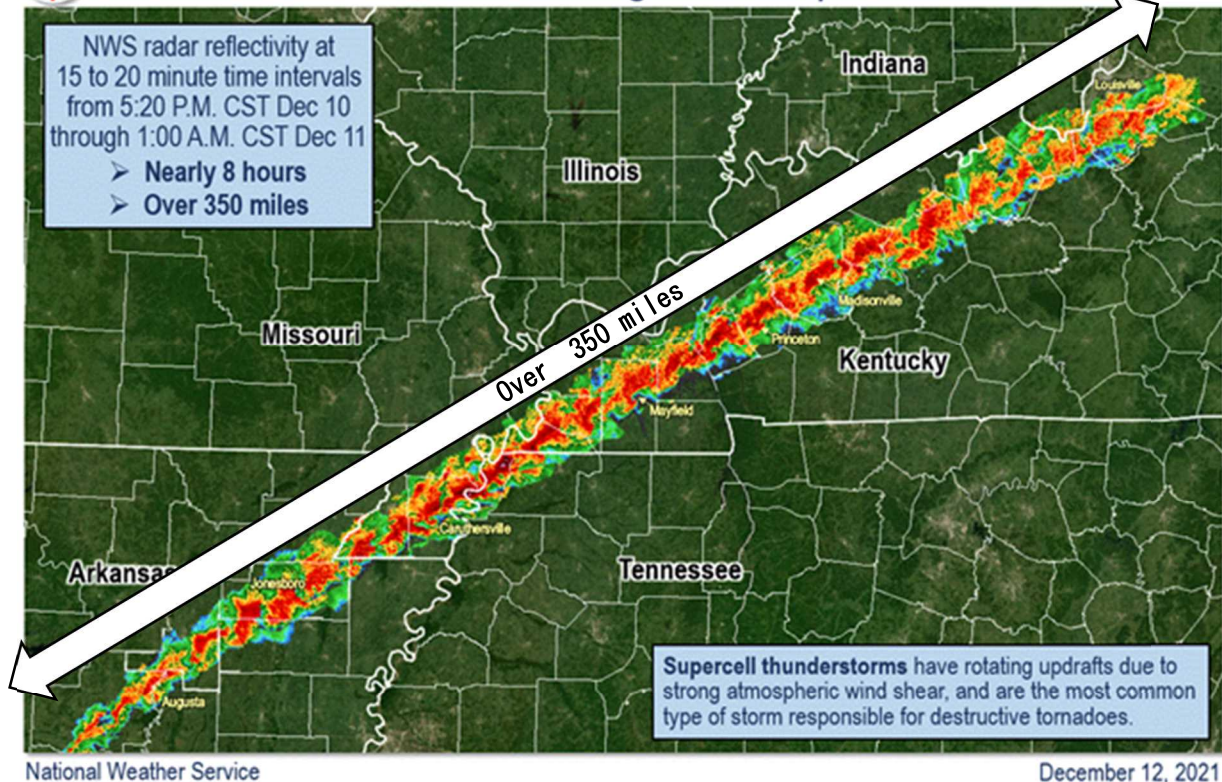
解説表 3.1 藤田スケールと風速の関係^(参5)

スケール	風速
F0	17～32m/s (約15秒間の平均)
F1	33～49m/s (約10秒間の平均)
F2	50～69m/s (約7秒間の平均)
F3	70～92m/s (約5秒間の平均)
F4	93～116m/s (約4秒間の平均)
F5	117～142m/s (約3秒間の平均)

国内過去最大



December 10-11, 2021: Long-lived Supercell Thunderstorm



National Weather Service

December 12, 2021

図-1 レーダー画像 (2021年12月10日5:20pm~12月11日1:00am(CST))⁷



National Weather Service
Paducah, Kentucky

Graphic created
12/14/2021 1:16 PM CT

Building a Weather-Ready Nation
weather.gov/pah

図-2 竜巻の発生状況 (2021年12月10日)⁸

⁷ NWS Storm Damage Summaries <<https://www.weather.gov/crh/dec112021>>(参照 2022年11月29日)

⁸ The Violent Tornado Outbreak of December 10-11, 2021

<<https://www.weather.gov/pah/December-10th-11th-2021-Tornado>> (参照 2022年11月29日)

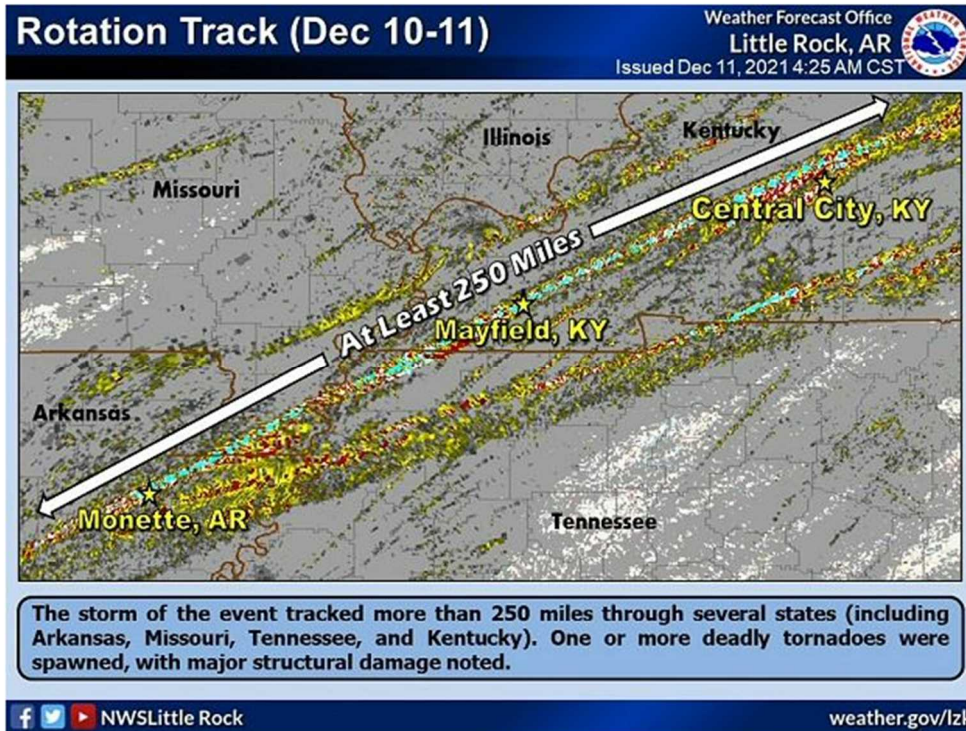


図-3 嵐の軌跡 (2021/12/10~11) ⁹

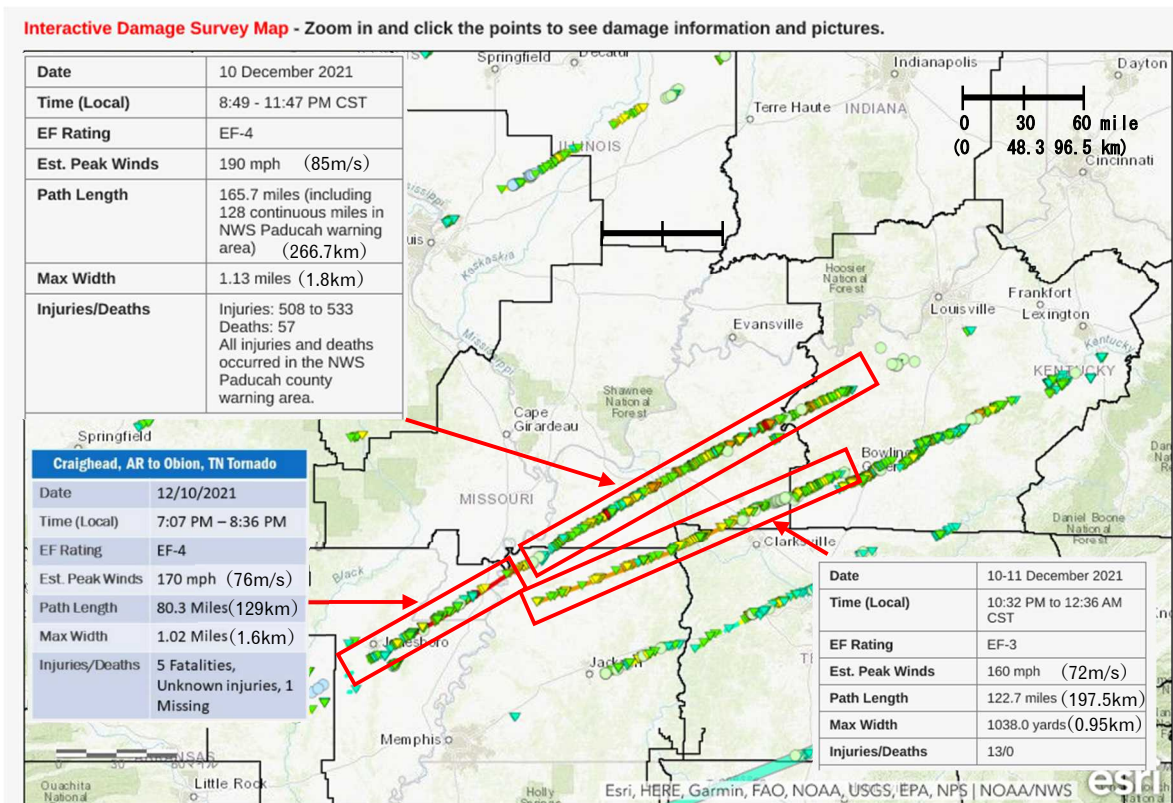


図-4 今回の最大規模のEF4の竜巻 ^{3, 10}に加筆

⁹ NWS Little Rock, AR - Severe Storms on December 10-11, 2021
<<https://www.weather.gov/lzk/svr1221.htm>> (参照 2022年11月29日)

¹⁰ NWS Memphis, TN - December 10-11, 2021 Tornado Outbreak
<<https://www.weather.gov/meg/dec102021tor>> (参照 2022年11月29日)

表-1 2021年12月10~11日に発生した竜巻²
 (認定された66の竜巻の内EF2以上の23について示す、—:記載無し)

City	County	State*	EF Rating	Est Wind Speed Mph (m/s)	Path Length Miles (km)
Mayfield & Dawson Springs	Fulton to Breckinridge	KY	EF 4	190 (85)	165.7 (266.6)
Bay to Samburg	Craighead to Obion	AR, TN	EF 4	170 (76)	80.3 (129.2)
Bowling Green	Warren to Edmonson	KY	EF 3	165 (74)	—
Gordonsville, Hadley	Logan, Warren	KY	EF 3	140 (63)	28 (45.1)
Saloma, Bradfordville	Marion, Taylor	KY	EF 3	145 (65)	14.7 (23.7)
Defiance	Saint Charles	MO	EF 3	165 (74)	21 (33.8)
Edwardsville	Madison	IL	EF 3	150 (67)	3.65 (5.9)
Newbern to Elkton	Dyer, TN to Todd, KY	TN, KY	EF 3	160 (72)	122.7 (197.4)
Rock Hill, Horse Cave	Edmonson, Barren, Hart	KY	EF 2	130 (58)	16.6 (26.7)
Horse Cave, Summersville	Hart, Green	KY	EF 2	125 (56)	24 (38.6)
Junction City	Boyle	KY	EF 2	135 (60)	0.63 (1.0)
South Bowling Green	Warren	KY	EF 2	115 (51)	—
Ellington	Reynolds	MO	EF 2	130 (58)	6.3 (10.1)
Ramsey, Herrick	Fayette, Shelby	IL	EF 2	118 (53)	41.4 (66.6)
Virginia	Cass	IL	EF 2	125 (56)	12.8 (20.6)
Windsor, Gays, Mattoon	Shelby, Moultrie, Coles	IL	EF 2	125 (56)	15.8 (25.4)
Atterberry	Menard	IL	EF 2	120 (54)	4.6 (7.4)
Chrisman	Edgar	IL	EF 2	115 (51)	—
Trumann	Poinsett	AR	EF 2	130 (58)	—
Augusta to Overcup	Woodruff to Conway	AR	EF 2	135 (60)	—
Dickson to Burns	Dickson	TN	EF 2	135 (60)	—
White Bluff to Pegram	Dickson to Cheatham	TN	EF 2	125 (56)	—
Lexington	Henderson	TN	EF 2	135 (60)	—

* KY:ケンタッキー州、AR:アーカンソー州、TN:テネシー州、MO:ミズーリ州、IL:イリノイ州

表-2 2021年12月10～11日に発生した竜巻の改良藤田スケールによる整理²

改良藤田スケール	EF 0	EF 1	EF 2	EF 3	EF 4	EF 5	不明	合計
mph (m/s)	65-85 (29-37)	86-110 (38-49)	111-135 (50-61)	136-165 (62-74)	166-200 (75-89)	200+ (89+)		
件数	16	26	15	6	2	0	1	66

U.S. Tornadoes

January-December

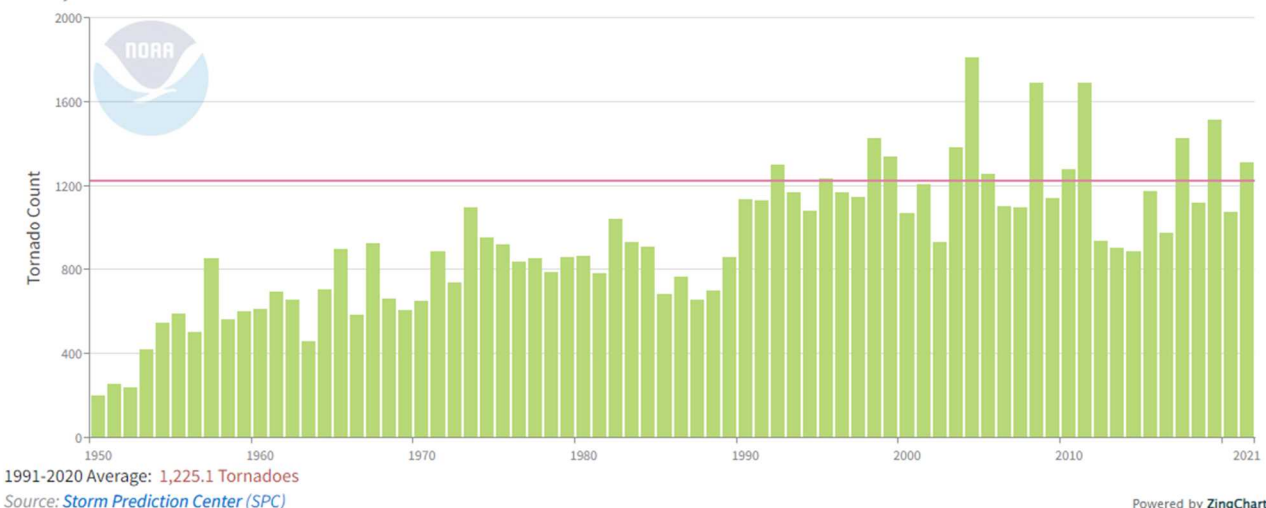


図-5 米国における年毎の竜巻発生件数（1950～2021年）¹¹

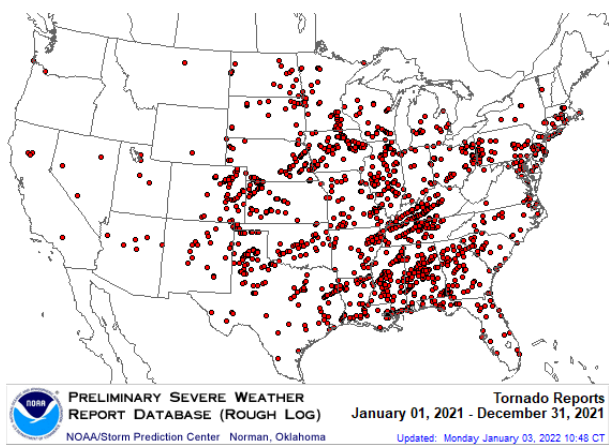


図-6 2021年1～12月の竜巻の発生地点¹²

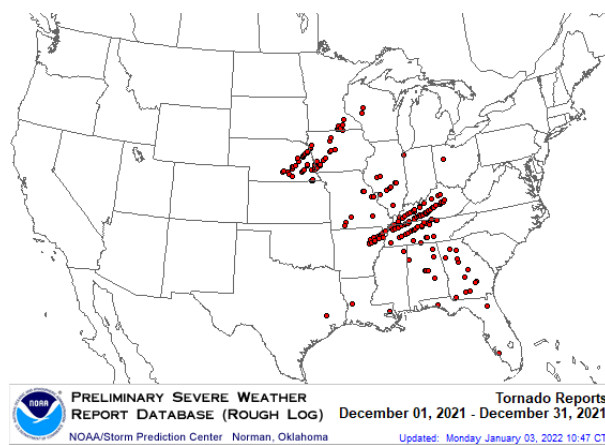


図-7 2021年12月の竜巻の発生地点¹³

¹¹ U.S. Tornadoes | National Centers for Environmental Information (NCEI)
<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/tornadoes/time-series/ytd/12?mean=true>
(参照 2022年11月29日)

¹² Annual 2021 Tornadoes Report | National Centers for Environmental Information (NCEI)
<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/tornadoes/202113>
(参照 2022年11月29日)

¹³ December 2021 Tornadoes Report | National Centers for Environmental Information (NCEI)
<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/tornadoes/202112>
(参照 2022年11月29日)



2017年1月28日の衛星画像



12月11日の衛星画像

写真-1 ケンタッキー州メイフィールドの住宅街 (EF4)¹⁴に加筆

(©2021 Maxar Technologies・ロイター)

Health and Rehabilitation Centerの被害は、写真-5参照

¹⁴ 日本経済新聞：史上最大級の米竜巻 衛星データが示す爪痕
 <<https://vdata.nikkei.com/newsgraphics/quad-state-tornado/>> (参照 2022年11月29日)

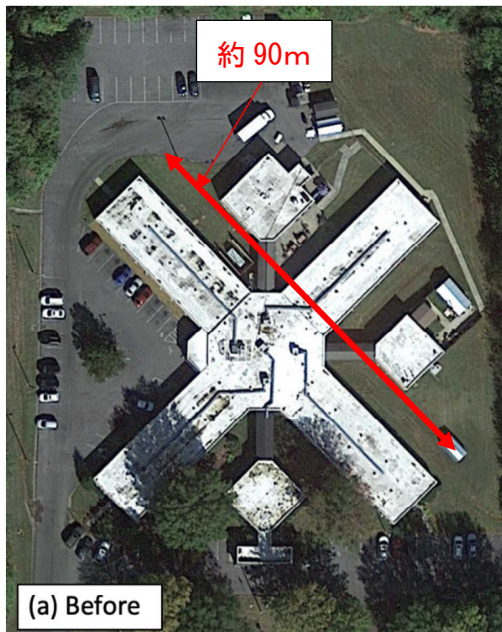


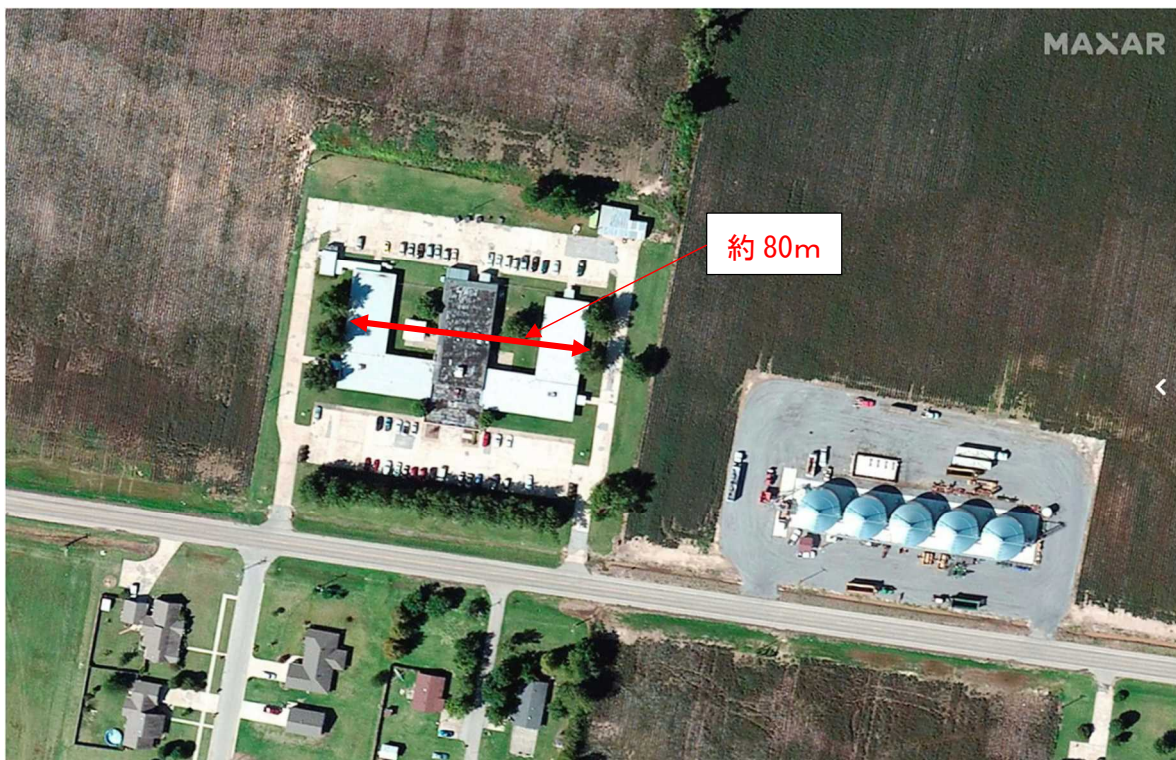
Figure 6.4.5. Damage to the Mayfield Health and Rehabilitation Center (Lat: 36.7459, - 88.6309) in Mayfield, KY. (Shared by Manny Perotin from the GIC Grey Skies platform).



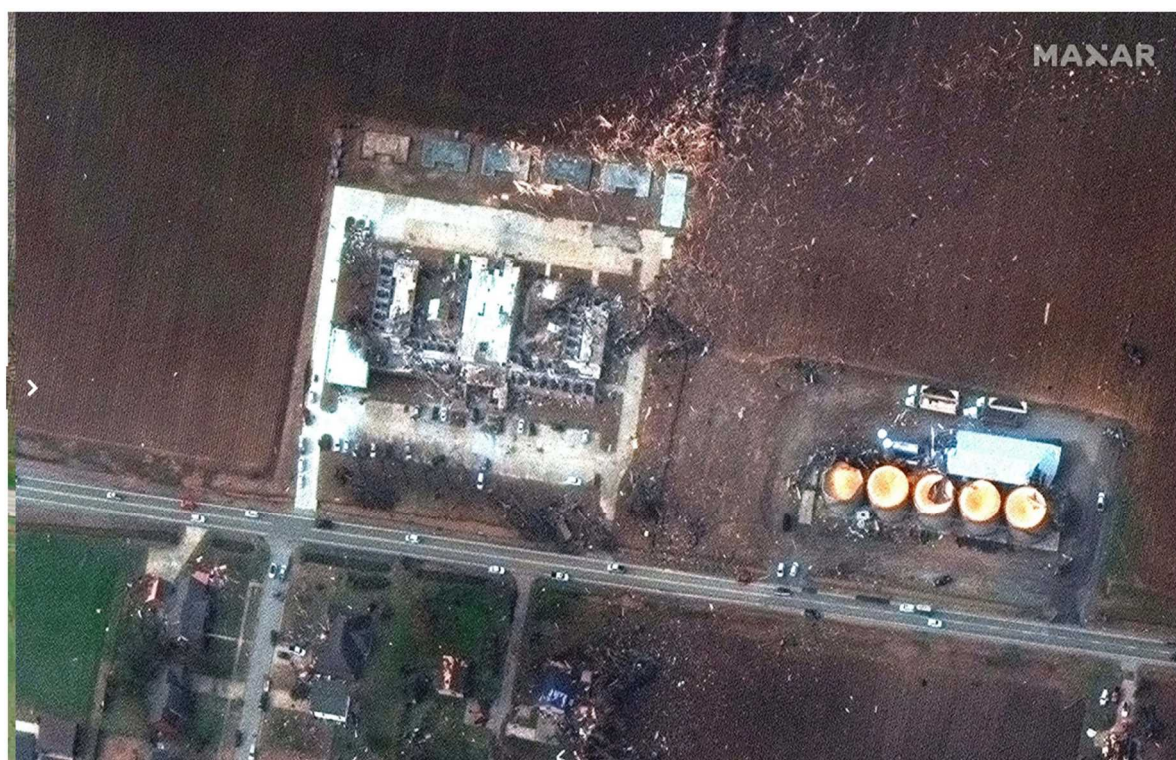
Figure 6.4.6. Damage to one wing of the Mayfield Health and Rehabilitation Center (Image acquired by the FAST).

写真-2 ケンタッキー州メイフィールドの Health and Rehabilitation Center (EF 4) ^{15)に加筆}
 <コンクリートブロック造> 写真-1 の右端の建物

¹⁵ StEER : JOINT PRELIMINARY VIRTUAL RECONNAISSANCE REPORT AND EARLY ACCESS RECONNAISSANCE REPORT (PVRR-EARR), 29 December 2021

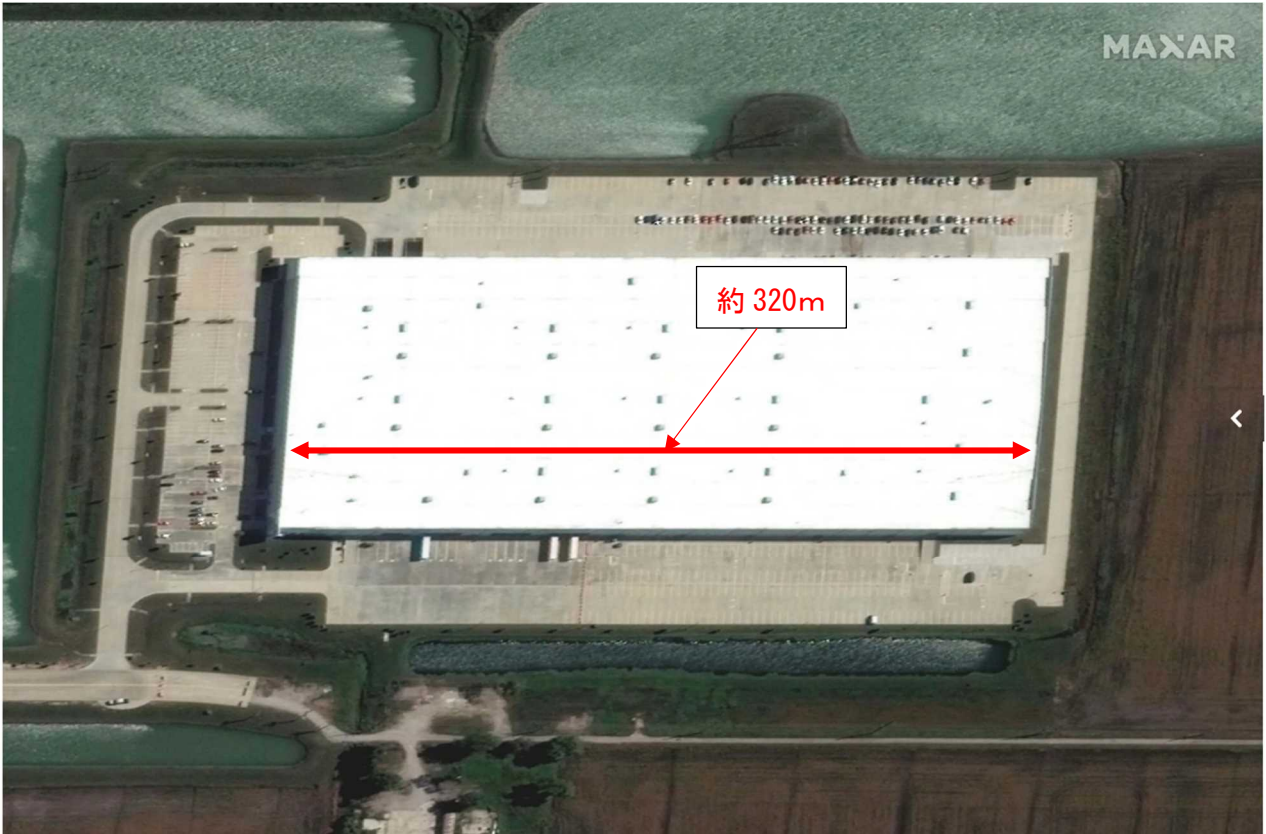


2月22日の衛星画像



12月11日の衛星画像

写真-3 アーカンソー州モネットの老人ホーム（EF4）＜コンクリートブロック造（CMU）＞¹⁴に加筆
（©2021 Maxar Technologies・ロイター）



9月24日の衛星画像



12月11日に撮影された衛星画像

写真-4 イリノイ州エドワーズビルのアマゾンの倉庫（EF3）〈鉄骨造〉¹⁴に加筆
（©2021 Maxar Technologies・ロイター）