

第 53 回自然災害科学総合シンポジウム
(平成 28 年度防災研究所 重点推進型共同研究)

講演論文集

平成 28 年 9 月 22 日 (木) ～23 日 (金)

於：静岡県地震防災センター

主催： 京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

後援： 静岡県

第 53 回自然災害科学総合シンポジウム

「－ 新技術が拓く防災研究の新たな地平 －」

主 催 : 京都大学防災研究所自然災害研究協議会
後 援 : 静岡県
日 程 : 平成 28 年 9 月 22 日 (木) ～23 日 (金)
場 所 : 静岡県地震防災センター 大会議室
〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9 番 6 号
参加費 : 無料

プログラム

〔9 月 22 日 : ないふるホール〕

12 : 30～ 受付

13 : 30

開会挨拶 自然災害研究協議会 橋本 学 (京都大学防災研究所)

13 : 40～14:30

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 27 年度報告】

「2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」

研究代表者 矢田部龍一 (愛媛大学大学院理工学研究科)

14 : 30～15 : 20

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 27 年度報告】

「2015 年口永良部島噴火に関する総合調査」

研究代表者 井口正人 (京都大学防災研究所)

15 : 20～15 : 40 休憩

15 : 40～16 : 30

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 27 年度報告】

「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による災害の総合研究」

研究代表者 田中茂信 (京都大学防災研究所)

16 : 30～17 : 10

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 28 年度報告】

「平成 28 年熊本地震災害に関する総合調査」

研究代表者 清水 洋 (九州大学大学院理学研究院)

17 : 10～17 : 30 総合討論

18 : 00 交流会

〔9月23日： 大会議室〕

【平成26年度京都大学防災研究所重点推進型共同研究「自然災害科学に関わる研究者・ステークホルダーとの協働による総合防災学の活用に関する研究」】

9：10～9：50

都市防災における「ビッグ」データ利用の実態と可能性

加藤 孝明（東京大学生産技術研究所）

9：50～10：30

災害対応を支える地理空間情報の新技術

宇根 寛（国土交通省国土地理院）

10：30～11：10

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）について

植平 賢司（防災科学技術研究所）

11：10～11：50

先端技術と歴史的治水の融合で豪雨災害から身を守る

大石 哲（神戸大学都市安全研究センター）

11：50～12：00 総合討論

12：00 閉 会

目次

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究平成 27 年度報告】

■「2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」..... 1

矢田部龍一（愛媛大学大学院理工学研究科）

■「2015 年口永良部島噴火に関する総合調査」..... 16

井口正人（京都大学防災研究所）

■「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による災害の総合研究」..... 24

田中茂信（京都大学防災研究所）

■「平成 28 年熊本地震災害に関する総合調査」..... 73

清水 洋（九州大学大学院理学研究院）

【平成 26 年度京都大学防災研究所重点推進型共同研究「自然災害科学に関わる研究者・ステークホルダーとの協働による総合防災学の活用に関する研究」】

■都市防災における「ビッグ」データ利用の実態と可能性..... 別途配布

加藤 孝明（東京大学生産技術研究所）

■災害対応を支える地理空間情報の新技術..... 91

宇根 寛（国土交通省国土地理院）

■日本海溝海底地震津波観測網（S-net）について..... 96

植平 賢司（防災科学技術研究所）

■先端技術と歴史的治水の融合で豪雨災害から身を守る..... 102

大石 哲（神戸大学都市安全研究センター）

2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査

矢田部龍一，ネトラ・バンダリ

愛媛大学大学院理工学研究科

要 旨

2015 年 4 月 25 日にネパールのゴルカ地域を震源とするマグニチュード 7.8 の地震が発生し、1 万人近い犠牲者が出るなど甚大な被害をもたらされた。この地震の総合的な調査のために、文部科学省科学研究費補助金（特別研究促進費）の助成を受けて、「2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」を実施してきた。調査分野は、「土砂災害」、「雪崩災害」、「地震・強震動」、「活断層・変動地形学」、「災害対応における国際協力、文化財保全及び社会的影響」の 5 分野である。本文では、調査結果について簡単に述べる。

キーワード:2015 ネパール・ゴルカ地震，土砂災害，雪崩災害，地震・強震動，活断層，文化財保全，医療支援，国際援助

1. まえがき

2015 年 4 月 25 日，ネパールのゴルカ地方を震源とする M7.8 の地震が発生し，8964 人が犠牲になるとともに 50 億米ドルにも上る被害がでた。また，世界文化遺産に登録されている多くの歴史的建造物が倒壊した。

京都大学防災研究所自然災害研究協議会では，2015 ネパール・ゴルカ地震の発生を受けて地震と地震災害に関する総合的な調査に取り組むこととした。そして，5 月 22 日には，以下に示す内容で文部科学省科学研究費補助金(特別研究促進費)の交付を受け，地震災害調査に精力的に取り組んできた。この間，2015 年 9 月 30 日には中間報告会を，そして，2016 年 3 月 7 日には最終報告会を，いずれも東京大学本郷キャンパス・情報学環・福武ホールにおいて開催した。

本報告では，調査班が 10 か月に渡って取り組んだネパール・ゴルカ地震の被害調査の内容を取りまとめて刊行した報告書の結論の部分を示す。10 か月という期間では，調査，実験，解析などに十分な時間とは言えない。そのため，研究分担者ならびに連携研究員は，今後とも 2015 ネパール・ゴルカ地震の地震と地震災害の総合調査に取り組んでいくことは言うまでもない。

2. 研究計画の概要，報告会プログラム

以下に文科省による科研費の報道発表と研究計画の概要、ならびに中間報告会と最終報告会のプログラムを示す。

(文部科学省平成 27 年度報道発表)

「2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」への科学研究費補助金(特別研究促進費)の交付について

平成 27 年 5 月 22 日

文部科学省では，平成27年4月25日にネパールで発生した地震について，地震の発生機構の解明，断層活動や地震動による山間部での斜面災害の発生機構の解明，建築物・土木構造物の被害の実態解明，地震・雪氷複合災害の実態解明とリスク評価などの観点から総合的な調査を実施し，ネパールにおける二次災害の軽減と復興計画策定に貢献することを目的として，愛媛大学等の研究者に下記のとおり科学研究費補助金（特別研究促進費）を交付することといたしましたので，お知らせいたします。

研究課題名

2015年ネパール地震と地震災害に関する
総合調査

研究代表者

矢田部龍一

(愛媛大学大学院理工学研究科 教授)

研究組織

愛媛大学, 新潟大学, 弘前大学, 山形大学,
香川大学, 防災科学技術研究所, 東京大学,
北海道大学, 広島大学, 岡山大学, 信州大
学, 国立民族学博物館, ひょうご震災記念
21世紀研究機構, 東北工業大学, 立命館大
学, 大阪大学, 山口大学 (計 29 名)

研究経費

20,600 千円(科学研究費補助金(特別研究促
進費))

研究計画の概要

研究課題 2015 年ネパール地震と地震
災害に関する総合調査

研究代表者 矢田部龍一 愛媛大学大学
院理工学研究科 教授

研究目的 2015 年 4 月 25 日にネパール
国カトマンズ近郊を震源とするマグニチ
ュード (M) 7.8 (USGS) の地震が発生し,
強震動による建物の倒壊などにより,死者
7,000 人を越えると推定される甚大な被害
がもたらされた。この地震は,北上するイ
ンドプレートとユーラシアプレートとの
衝突境界で発生しており,北北東-南南東
方向の圧縮力によって発生した逆断層型
の大地震であった。この地震は,プレート
境界のヒマラヤ前縁断層帯 (HFM) あるい
はヒマラヤ主境界断層帯 (MBT) が活動し
たことによって発生したと考えられるが,
詳細はまだ明らかになっていない。この地
震は内陸部で発生した地震としては最大
級に次ぐ規模の地震であり,震源域の直上
に首都カトマンズが位置していたことか
ら,人口密集地に於いて多くの建物が崩壊
し,甚大な被害がもたらされた。また,山
間地において斜面崩壊や地すべりが発生
している。現在,医療,人命救助について
国際的な支援が行われているが,地盤災害
の影響により救助・救援活動に支障を生じ
る事態となっている。

地震の発生機構の解明,断層活動や地
震動による山間部での斜面災害の発生機
構の解明,建築物・土木構造物の被害の実
態解明,地震・雪氷複合災害の実態解明と
リスク評価などの観点から総合的な調査
を実施することで,ネパール国における二
次災害の軽減と復興計画策定に貢献する。

開発途上国の災害対応,復旧・復興におい
ては国際協力が重要な役割を果たすため,
その支援・調整の実態や地震災害による社
会への影響について,災害直後から継続的
に調査を行うことにより,開発途上国の災
害対応,防災教育,復旧・復興における我
が国の国際協力の方策策定に貢献する。

我が国においては,この地震と同様な,
プレート境界における地震が都市の直下
で発生するケースとして,首都圏直下地震
が想定されており,また,南海トラフ巨大地
震や内陸巨大地震においては大規模な
斜面崩壊・深層崩壊の発生が懸念されてい
る。将来,我が国で発生し得る首都圏直下
地震,南海トラフ巨大地震や内陸巨大地震
の地震災害の軽減と,合理的な復興戦略策
定のための重要な知見を得ることも目的
である。

調査内容

1. 土砂災害調査・解析

現地調査と資料収集を実施し,斜面災害
の実態と,被害の特徴と要因を明らかにす
る。山地における地震動と地すべり発生箇
所,発生機構,地すべりの規模に関する基
礎的なデータを取得するとともに被害の
特徴と要因を検討する。また,氷河崩壊や
氷河湖決壊による大規模洪水などのリス
ク評価を踏まえ,合理的な復旧戦略と今後
の耐震設計への科学的資料を提供する。具
体的には以下の研究を行う。

首都カトマンズ市内の道路等の盛土地盤
の崩壊,宅地地盤の崩壊の状況を調べ,他
の開発途上国も含む都市の直下型地震で
の土砂災害の評価にとり重要な資料を得
る。首都周辺および中間山地・高ヒマラヤ
における中山間地における斜面崩壊,地す
べりの発生分布とメカニズムについて調
査を実施する。人工衛星画像でもある程度
の調査は可能であるが,ヘリ等をチャータ
ーして詳細な空撮を行い,斜面災害の実態
および小規模な崩壊をとらえる。現地で土
砂を採取して日本に持ち帰り,本震の地震
波形を用いて地震時地すべり再現試験を
実施し,地震波形や周波数特性と地すべり
移動距離の関係を支配するメカニズムを
明らかにする。また,高山で地すべり,岩
屑流,氷河崩壊が発生している可能性があ
り,今後の氷河湖決壊による大規模洪水

(GLOF)の危険性について衛星画像およびInSAR解析を元に調べる。また、6月初旬から始まる雨期に入ってから崩落や土石流など、大規模地震後の土砂災害の時間発展について貴重な事例研究を行うことが可能である。

2. 雪崩災害調査・解析

地震に伴いヒマラヤ山脈では多数の雪崩が発生し、多大な人的被害が出たとされるが、雪崩の規模・流動特性や被害実態等については正確な情報が得られていない。そこで、山岳氷河地域における地震・雪氷複合災害のリスク評価や今後の雪崩対策に資する知見を得ることを目的として、雪崩災害の現地調査と情報収集・解析を行う。雪崩災害調査は、被害が最も大きいと考えられるランタンヒマラヤ（カトマンズの北側）を主な対象地域として実施する。現地調査及び利用可能な各種資料（画像・映像、衛星写真など）の収集・解析から、雪崩の発生位置・流下経路、人的被害・物的被害など明らかにするとともに、崩壊・崩落した氷河の状況を把握し、氷河崩壊から雪崩の始動・流下までの発生プロセスやメカニズムを推定する。また、将来的な雪崩ハザードマップ作成を念頭において、地震動に対して不安定な氷河の分布の解明と、雪崩運動解析による流下速度や停止位置の再現を試みる。

3. 地震・強震動調査・解析

インドユーラシアのプレート衝突境界のテクトニクスを理解するためには、震源断層の位置と形状を明らかにすることが極めて重要である。現在、余震の震源決定はグローバルな地震ネットワークの記録によって行われているが、正確かつ詳細な震源分布を決定することは困難であり、余震観測を通じて震源断層面の位置や形状を精度よく明らかにすることが必要である。そこで、カトマンズを中心とした震源域に30点程度の余震観測点を展開し、正確な余震の分布や発生機構を明らかにするとともに、余震活動の推移を評価する。現在、ネパール DMG (Department of Mining and Geology)、シンガポール EOS と連絡をとりつつ観測の打ち合わせに入っており、基本的には各

国の地震観測計画と協力し、国際合同観測チームとして余震観測を実施する予定である。カトマンズ盆地において、強震動観測を実施し、観測記録に基づいた地下構造モデルの構築と強震動評価・予測を実施する。現在、カトマンズ盆地内に4点の強震観測点が設置されており、新たに2点を追加して強震観測を実施する。

4. 変動地形学・地震断層調査

今回の震源域はインドユーラシアプレート衝突境界の典型的な断面が描かれている場所であり、震源断層と地表変形の間関係を理解することは衝突境界の構造・成長過程自体を理解する上で非常に重要である。また、比較研究により南海トラフなど他の収束境界の地震発生様式を理解する一助となる。今回の地震に伴い地表地震断層が出現したことが想定されるヒマラヤ前縁断層帯 (HFM) およびヒマラヤ主境界断層帯 (MBT) において地形・地質調査を行い、地表地震断層の分布範囲・規模や HFM/MBT など既存の地質構造との関係を調べる。

5. 災害対応における国際協力、文化財保存及び社会的影響調査

ネパール地震では、医療、人命救助について現在、国際的な支援が行われており、今後の応急・復旧対応において世界的な規模での支援が行われると考えられる。開発途上国の災害対応、復旧・復興においては国際協力が重要な役割を果たしており、災害直後から継続的にどのような支援・調整が行われているのかについて直後から継続的な調査が必要である。また、歴史的市街地が大きな被害を受けているが、今後の修復を行う上で、災害直後からの保存に向けた対応が重要になり、歴史的建造物・市街地の保存の対応についても発災直後からの調査が必要である。また、地震災害においては、建造物の被害に加えて、社会がどのような影響を受けたのかについて検討することも重要な課題である。災害前から実施されていた防災教育についての国際協力の効果の検証も重要な課題であり、災害対応における国際協力、歴史的市街地の再建に向けた直後対応、社会に対する影響調査、防災教育の効果についての基礎情報

の入手を目的とした現地調査を実施する。

研究経費

20,600 千円

研究組織

(研究代表者)

矢田部龍一 愛媛大学大学院理工学研究科 教授 (防災政策・対策) 研究総括

(研究分担者*及び連携研究者)

氏名

所属・職名

専門分野

役割分担

1. 土砂災害調査・解析			
福岡 浩*	新潟大学災害・復興科学研究所・教授	土砂災害	強震動と地すべりのメカニズム
檜垣 大助*	弘前大学農学生命科学部・教授	山地環境計画学	土石流, 岩屑流分布, 応急対策
八木 浩司	山形大学地域教育文化学部・教授	地盤災害科学	地すべり分布調査
バンドリ・ネトラ・プラカシュ*	愛媛大学理工学研究科・准教授	地盤防災学	土砂災害危険度評価
長谷川 修一*	香川大学工学部・教授	地質工学, 地盤災害	土砂災害危険度評価
野々村 敦子	香川大学工学部・准教授	空間情報科学	リモートセンシング, GIS解析
2. 雪崩災害調査・解析			
上石 勲*	防災科学技術研究所雪氷防災研究センター・総括主任研究員	雪氷防災学	雪崩・雪氷災害調査
山口 悟	防災科学技術研究所雪氷防災研究センター・主任研究員	氷河学, 雪氷学	雪崩・雪氷災害調査
和泉 薫*	新潟大学災害・復興科学研究所・教授	雪氷防災学	雪崩・雪氷災害調査
河島 克久	新潟大学災害・復興科学研究所・准教授	雪氷防災学	雪崩・雪氷災害調査
3. 地震・強震動調査・解析			
佐藤 比呂志*	東京大学地震研究所・教授	構造地質学	余震観測・構造地質学的検討
平田 直	東京大学地震研究所・教授	観測地震学	余震観測・解析
酒井 慎一	東京大学地震研究所・准教授	観測地震学	余震観測
蔵下 英司	東京大学地震研究所・助教	地震学	余震観測・解析
高井 伸雄*	北海道大学工学研究科・准教授	地震工学	強震観測・評価
額 一起	東京大学地震研究所・教授	地震学	強震観測・評価
重藤 柚子	北海道大学理学院・博士研究員	地震工学	強震観測・評価
4. 変動地形学・地震断層調査			
熊原 康博*	広島大学教育学研究科・准教授	自然地理学	変動地形・地震断層調査
石山 達也	東京大学地震研究所・助教	変動地形学	変動地形・地震断層調査
松多 信尚	岡山大学教育学研究科・准教授	変動地形学	変動地形・地震断層調査
廣内 大助	信州大学教育学部・教授	変動地形学	変動地形・地震断層調査
5. 災害対応における国際協力, 文化財保存及び社会的影響調査			
三尾 稔*	国立民族学博物館研究戦略センター・准教授	文化人類学・南アジア研究	国際援助 (NGO, 国)
高田 洋介*	人と防災未来センター・主任研究員	災害医療, 国際緊急援助	国際援助 (医療)

竹内 泰*	東北工業大学工学部・准教授	都市計画・建築計画	文化財保存（歴史的市街地）
大窪 健之*	立命館大学理工学部・教授	環境防災設計学	文化財保存（歴史的建造物）
南 真木人*	国立民族学博物館研究戦略センター・准教授	生態人類学・南アジア研究	社会被害・影響調査
渥美 公秀*	大阪大学人間科学研究科・教授	減災人間科学	防災教育調査
村上 ひとみ*	山口大学理工学研究科・准教授	都市防災学	人的被害の分布と救援活動調査

なお、本研究計画は、自然災害研究協議会を通じて、全国の研究者が連携して実施するものである。

以下に、中間報告会、最終報告会の内容を示す。

文部科学省科研費（特別研究促進費）「2015年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」
中間報告会

主 催 文部科学省科研費「2015年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」研究班

日 時 平成27年9月30日（水）、13:10～17:00

場 所 東京大学本郷キャンパス・情報学環・福武ホール

「プログラム」

13:10～13:20 調査方針と活動概要の説明（研究代表：矢田部龍一）

13:20～13:50 基調講演1 「ネパール地震復興計画 ～ネパール政府の取り組み～」

駐日ネパール大使 バッタライ・マダン・クマル博士

13:50～14:20 基調講演2 「ネパール地震復興への JICA の取り組み～Build Back Better の実現に向けて～」

JICA 社会基盤・平和構築部都市・地域開発グループ

第一チーム課長 譲尾 進

14:30～16:00 5部門からの研究報告

2015年ネパール・ゴルカ地震による地すべり災害および斜面変動

福岡浩(新潟大学), ネットラ・プラカシュ・バンドリ(愛媛大学), バサント・ラジ・アディカリ(ネパール・トリブバン大学), デオ・ラジ・グルング(ネパール・国際統合山地開発センター)

2015年グルカ地震におけるカトマンズ盆地の強震動

高井伸雄(北海道大学), 重藤迪子, ビジュクッチェン・スベグ, 一柳昌義, 笹谷努

2015年ネパール地震の震源域の活断層調査

熊原康博(広島大学), Deepak Chamlagain (トリブバン大学), Bishal Nath Upreti(ネパール科学技術院)

ランタン谷における移転候補地の雪崩災害のリスク評価と雪崩ハザードマップ作成に向けた現地調査計画

山口悟(防災科学技術研究所), 上石勲(防災科学技術研究所), 和泉薫(新潟大学), 河島克久(新潟大学)

ネパール地震における海外医療チームの実態

高田洋介(ひょうご震災記念21世紀研究機構 人と防災未来センター)

16:10～16:50 一般研究発表

衛星画像判読を主としたゴルカ地震によるランドスライド発生状況の把握

檜垣大助(弘前大学), 八木浩司(山形大学)

ネパール地震により崩壊した道路沿い代表斜面の特徴

ネトラ P. バンダリー(愛媛大学), 矢田部龍一 (愛媛大学)

2015 年ネパール・ゴルカ地震の稠密アレイによる余震観測

佐藤比呂志(東京大学地震研究所), 酒井慎一, 蔵下英司, 平田 直, 八木浩司(山形大学), Bishal Nath Upreti (ネパール科学技術院), Krishna Subedi, Ananta Prasad Gajurel (トリブバン大学), Danda Pani Adhikari

2015 年ゴルカ・ネパール地震におけるアンケート震度調査の枠組みと試行結果について

村上ひとみ(山口大学), 森伸一郎, Ramesh Guragain, Bharat Pradhan (NSET-Nepal)

17:00 閉会

文部科学省科研費 (特別研究促進費)「2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」
最終報告会

主 催 文部科学省科研費「2015 年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」研究班

日 時 2016 年 3 月 7 日 (月), 13:05~17:00

場 所 東京大学本郷キャンパス・情報学環・福武ホール
「プログラム」

13:05~13:10 調査方針と活動概要の説明 (研究代表: 矢田部龍一)

13:10~13:35 基調講演 「2015 ネパール・ゴルカ地震の被害概要とネパール政府の復興への取り組み」

ネトラ・プラカッシュ・バンダリ(愛媛大学大学院理工学研究科)

13:35~17:00 5 部門からの研究報告

1. 2015 年ネパール・ゴルカ地震震源域のミッドランドではなぜ斜面崩壊が少なかったのか?
長谷川修一(香川大学工学部), 野々村敦子(香川大学工学部),

Ranjan Kumar Dahal(Tribhuvan Univ.)

2. 2015 ネパール・ゴルカ地震による道路沿いの斜面災害の特徴

矢田部龍一(愛媛大学大学院理工学研究科),

ネトラ・プラカッシュ・バンダリ(愛媛大学大学院理工学研究科)

3. 2015 年ネパール・ゴルカ地震の稠密アレイによる余震観測

佐藤比呂志(東京大学地震研究所), 蔵下英司(東京大学地震研究所),

酒井慎一(東京大学地震研究所), 平田 直(東京大学地震研究所),

八木浩司(山形大学),

Ananta Prasad Gajurel(トリブバン大学), Danda Pani Adhikari(トリブバン大学),

Krishna Subedi(ネパール科学技術院), Bishal Nath Upreti(ネパール科学技術院)

4. ギルカ地震系列のカトマンズ盆地の強震記録

高井伸雄(北海道大学), 重藤迪子(北海道大学), 他

5. 2015 年ネパール・ゴルカ地震の震源地域の活断層調査

熊原康博(広島大学大学院教育学研究科), Deepak Chamlagain (Tribhuvan University),

Ishiyama Tetsuya (Tokyo University), Daisuke Hirouchi (Shinshu University),

Nobuhisa Matta (Okayama University), Bishal Nath Upreti (Nepal Academy of Science and Technology)

6. 2015 ネパール・ゴルカ地震によるランタン谷の雪・土砂なだれ調査

山口 悟(防災科学技術研究所), 西村浩一(名古屋大学),

藤田耕史(名古屋大学),

和泉薫(新潟大学), 河島克久(新潟大学), 伊藤陽一(防災科学技術研究所),

上石 勲(防災科学技術研究所)

7. 2015 年ネパール・ゴルカ地震による都市景観の変容予測

竹内 泰(東北工業大学工学部建築学科)

8. 2015 年ネパール地震における国際医療支援の実態

高田洋介(人と防災未来センター)

9. 2015 年ネパール・ゴルカ地震における人的被害の分布と影響要因
村上ひとみ(山口大学), 安藤尚一(政策研究大学院大学)
10. ネパール地震被災地の災害対応に学ぶ防災の可能性
渥美公秀 (大阪大学),
研究協力者: 河村信治 (八戸高専), 稲場圭信 (大阪大学), 乾陽亮 (大阪大学)
11. 2015 ネパール・ゴルカ地震における伝統的中庭空間の避難時の利用実態
ー世界遺産カトマンズ・パタン地区を対象としてー
大窪健之 (立命館大学・歴史都市防災研究所), サキヤ・ラタ (東京大学),
金 度源 (立命館大学), 高杉三四郎 (立命館大学)
12. ネパール地震の社会的影響ー社会再編かコミュニティ的高揚か
南 真木人 (国立民族学博物館)
- 17:00 閉会

3. 調査の結論

報告書に記された各研究者の結論部分を列記しておく。

ネトラ¹⁾の調査結果は次のようである。

From the preliminary visual survey of the damage extended by the 2015 Gorkha Nepal Earthquake, the main points of concluding remarks can be listed as follows.

- ◆ As it was a weekend day and exactly noon, a large number of school children and office workers remained unharmed. In addition, due to a holiday time many people must have had outdoor time, which has led to extremely less human casualty than previously expected in a similar magnitude earthquake.
- ◆ The damage to newly built building structures, particularly in the Kathmandu valley, was concentrated at particular pocket areas, and more specifically in newly developed suburban areas of the Kathmandu city core.
- ◆ Most old brick masonry buildings were heavily damaged throughout the Kathmandu valley, and the destruction was particularly found to be concentrated in Bhaktapur city core and Sankhu area of Kathmandu.
- ◆ One typical characteristic of the damage pattern in urban areas, especially in the Kathmandu valley, noticed in this earthquake disaster is that hospital buildings and lifeline infrastructures

including power line, water pipes, communication network, and roads sustained comparatively little damage. Moreover, the only international airport in Nepal was reported to be totally undamaged.

- ◆ In rural and mountainous areas, damage to houses and settlements can be attributed to poor construction material and technology. More than 80% of the stone-mud mortar-made houses in the affected areas have been completely destroyed, which indicates that these materials need to be replaced by earthquake-resistant materials and construction technique in reconstruction process.
- ◆ Reconstruction and retrofitting measures to be adopted considering acceleration amplification in future earthquakes.
- ◆ In the Kathmandu valley, it is very important to take into the account the effect of soil stratum (surface and lower layers) and the velocity distribution profiles based on geotechnical database.
- ◆ Rebuilding the historical monuments with the same appearance is probably one of the difficult tasks. In the retrofitting of the historical monuments in the Kathmandu valley, it is very important to collect information regarding the foundations of those structures. That is definitely going to be a challenging task for all concerned in the rebuilding process as well as in the days

ahead.

福岡²⁾の調査結果は次のようである。

地震時地すべりの状況について以下のような結論を得ている。

カトマンズ市内の盛土地すべり

カトマンズ市内では谷をわたる高速道路盛土中のすべりも見られた。この場所はカトマンズ市内から東部の観光地に向かう重要な幹線道路で日本の ODA により日本企業が建設した。当初、断層破壊面が地表に現れた影響という指摘もあったが、谷埋め盛土部分の底部で土砂が流出していたことから液状化、あるいは流動化が発生して 2 m 程度沈下したと考えるのが妥当である。すぐに対策工が講じられた。しかし段差や亀裂は広範囲に発生しており、人工盛土だけに留まらないことから谷に面する斜面での側方流動の可能性も指摘された。さらに、高速道路沿いには多くの盛土地盤が存在しその上のコンクリート住居構造物で崩壊がしばしば認められた。崩壊直後の杭と梁の状況を観察すると十分な鉄筋が入っていた場合も多く、盛土内の過度な変位により倒壊した可能性も現地では指摘された。大規模地すべり

地震発生直後に ICIMOD がインド、米国、日本他が提供した衛星画像による衛星写真解析によると、ヒマラヤ山岳地域の Langtang において雪氷崩落-岩屑流が集落を壊滅させ、幅 1.2km にわたって地すべりダムが形成されているが現時点で詳細な写真撮影も調査も行われていない、Prok における地すべりダムの形成、Prok 下流で大規模地すべりブロックが形成された、等の報告があった。

ランタン村の雪氷土砂複合災害

今回発生した中で最も被害が甚大であったのはヒマラヤのランタン村の災害である。この災害発生機構は複雑で土砂災害としてはこれまで注目されたことがない。本震の震動ではエベレストのベースキャンプで雪崩が発生して多くの犠牲者が出たことは広く報道されたが、ランタン谷でも多くの雪崩が発生した。標高 7,245 m のランタンリルの山頂直下の壁で懸垂氷河(hanging glacier)が崩落し、氷塊が急斜面を下り、テラス状の地形に堆積していた土砂を巻き込んで流動し、直下に落差 800 m の崖を落下し標高 3,300 m のランタン村に到達し、さらに高速長距離流動し、河川

を長さ 1.5km にわたって閉塞した。周辺の集落では暴風により多くの家屋が倒壊し、対岸の樹木は大半が山側に倒木した。河道閉塞による湛水が懸念されたが、八木・檜垣らの地震発生約 1 ヶ月後のヘリによる調査時にはダム湖は形成されなかったことが確認されている。福岡、山崎、Adhikari らによる同年 11 月の調査時にもダムの存在は確認できたが湛水は一切無く、地すべりダム内に天然のトンネルが形成されたことを確認した。十分な排水能力が地すべりダム形成直後から確保されていることがわかった。一方、地すべりダムの上に複数箇所沈下が認められた。今後、地すべりダム内部のトンネル内浸食に伴い崩落が多発してダム自体が消滅に向かうであろうが、ランタン村の堆積土砂内に多くのクラックが見られたことから、徐々にクリープして長期間ダムは存在する可能性もある。

ランタン村の堆積物は表層の断面を観察しただけでも多くの雪氷も含まれていたが、土砂を採取し日本に持ち帰った。高速長距離流動を示した運動機構を調べるための土質試験、リングせん断試験を実施中である。

落石

今回、調査中最も多く見たのは落石である。本震中に撮影された動画では山全体が落石で砂雲が発生し、斜面崩壊が滝のように流下する様子が示された例もある。今回は乾期の末期に発生した地震であることから、「すべり」は少なかったと考えられる。しかし、山岳地でも卓越周期が長かった場合、クラック等が入っていて 6 月～8 月の雨期に多発する恐れがある。ゴルカ地方だけでなく、断層破壊域の東端の最大規模余震が観測された地域でも落石だけでなく、小規模すべりも観察された。再活動地すべり

ゴルカ地方の震央距離 15km の地点で地すべりの末端の動きが見られた。押し出しと付随する落石により、この周辺の数件の家屋が破壊された。ネパール山岳地には無数の地すべり地形があり、再活動による災害が懸念される。

檜垣³⁾による調査結果は次のようである。

プレート境界で上昇を続けてきたヒマラヤ山脈の中央部でゴルカ地震は発生した。ネパールでは、山岳部の多数の集落やトレッキング施設などが壊滅的被害を受け、表層崩壊や

落石を主に斜面変動が多数発生し、亀裂の発生している斜面も認められた。乾季末に中間山地最北部からハイヒマラヤにかけての高起伏地域で起こった主なランドスライドは表層崩壊であり、高起伏・急斜面のため、崩壊地からの河川への土砂供給増大が生じている。最近開発の進んでいる水力発電施設や道路などへの崩壊・地すべりや土石流災害、さらに既に報告されている以外にも新たな河道閉塞発生による災害危険性が高まっている。この地震災害について最近日本国内での報道は最近ほとんど無いが、山岳部は、いまだ土砂災害の大きな脅威に直面したままと言って良い。今後、被災地の復旧・復興と地震災害軽減のための調査・研究や技術支援が急務である。

矢田部⁴⁾による調査結果は次のようである。
地震による斜面変動の特徴

カトマンズから中国に繋がる通称チャイナ道路沿いの斜面変動は、層理面（片理面）とそれに直交する節理面といった地質構造に支配されている。すなわち、低角度の層理面をすべり面とし大規模な地すべりが形成され、高角度の節理面を使って岩盤崩壊が発生している。地すべりの末端部では、活発な河川浸食により小規模な地すべりブロックが不安定化している。今回の地震動では、節理面を使ったブロック崩壊、ブロックトップリング崩壊、岩盤の緩み部やクリープゾーンの崩壊、くさび崩壊などの岩盤崩壊が多発したものの、調査地周辺では震度が 5 強程度と特に大きくなかったことから大規模地すべりは活動しなかったものと推定される。また、地震による岩盤崩壊や表層崩壊については、斜面での平面形状は尾根上の凸地形に多く、断面形状でも崖上部や法肩の凸形状で多く発生しており、従来からの地震斜面災害の考え方と同じであった。

また、この岩盤崩壊の分布密度が、パラビセよりも北方で顕著に高くなる理由として、以下の理由が推定される。パラビセよりも北方は背斜軸の高標高域となり、多くの引張系の不連続面が発達している岩盤が分布し、それが著しい浸食作用を受けて岩盤斜面が不安定化しやすい地形地質的な環境下にあった。さらに伏在地震逆断層（MCT と同一方向のスラスト）が存在しその上盤に位置することである。

なお、コダリ付近の調査地北方での岩盤崩壊の移動距離が長い要因として、残雪の影響があった可能性があるが、その詳細については崩壊発生時の積雪状況や気象条件の調査が必要である。

長谷川⁵⁾による調査結果は次のようである。

高ヒマラヤと南部のミッドランドにおいて崩壊密度が大きく違う原因について、DEM（数値地形モデル）データを用いて対象地域の地形量と崩壊との関係性を分析し考察した。最大加速度 200gal, 300gal, 400gal を設定して算定した F 値の分布と崩壊源の分布を比較すると、F 値が高いところに崩壊源が分布する傾向がある。その傾向は高ヒマラヤでは顕著であるが、ミッドランドでは崩壊箇所数が少ないため、明瞭ではない。

最大加速度 200gal, 300gal, 400gal で解析した結果、北部の高ヒマラヤでは南部のミッドランドに比べて崩壊の発生確率が高い傾向があることが分かった。

これらをマハバーラト山脈、ミッドランド、高ヒマラヤに分けてみると、岩盤が著しく緩んだミッドランドでは地表に到達する揺れが小さく、マハバーラト山脈および高ヒマラヤではミッドランドほど減衰せず揺れが地表に到達していたため斜面崩壊が多数発生したと推定される。

なお、ミッドランドに著しく緩んだ岩盤が厚く分布しているのは、大規模な地すべり地形が発達している⁵⁾だけでなく、形成年代が 100 万年前より古いため、地すべり地形が完全に開析された大規模古期地すべり移動体が丘陵を形成している可能性が考えられる。

山口⁶⁾による調査結果は次のようである。

今回の現地調査によりランタン村を襲った雪・土砂なだれに関して

- ・最初に大規模な雪崩が起こった
- ・その雪崩の大部分は氷河氷ではなく、積雪起原である可能性が高いこと
- ・その雪崩には単位重量当たり 5-11% の石・土砂が含まれていたこと
- ・雪崩の後に土砂雪なだれ(または土砂崩れ)が起こり、最初の雪崩の表面を覆ったこと
- ・地震の後 1 分くらいでなだれにおそわれたこと

- ・ なだれ堆積物でおおわれている範囲以外の広い範囲まで爆風が到達していたこと

がわかった。また今回の調査結果を基に、住民に最低限必要な情報を“移転候補地に関するリスク評価レポート”という形で提供を行った。今後はそれらの情報を基に今回の災害のより詳しいメカニズムに関して研究を進めるとともに、雪崩運動モデルの計算結果を取り入れたより詳細なハザードマップを作成する予定である。

ランタン谷では、80年前ほど前にも大規模ななだれによって村が壊滅状態になった。しかしそれに関する情報は、村人にはほとんど継承されていなかった。本災害の体験や得られた教訓をきちんと継承するためには、住民の記憶が薄れないうち（今後1,2年以内）にできるだけ多くの人から当時の様子をヒアリングし、記録を残す必要がある。またハザードマップを提供して終わりではなく、それに基づく村の移転先の決定や土地利用、外国人のトレッカーを呼び込むための雪崩等の危険性に関する説明等（村の収入の大部分は、外国人のトレッカーの食事や宿泊代）を含めて、今後数年間は村の復興に向けたサイエンス的なサポートが必要であると思われる。

佐藤⁷⁾による調査結果は次のようである。

震源域における地殻構造や震源断層の形状の解明を目的として、震源域において35点の稠密アレイによる余震観測を行った。本観測のような稠密アレイによる余震観測は実施されておらず、今後の詳細な震源分布・地震波トモグラフィによる速度構造の解明は、2015年ゴルカ地震と今後の地震活動についても重要な資料を提供するものとなる。

高井⁸⁾による調査結果は次のようである。

本地震群のカトマンズ盆地における強震記録の特徴を示した。これまでに断層近傍の強震動として取り上げられることの多い既往の強震記録の応答スペクトルを本地震に併せて比較した。比較する記録は、指向性パルスが建物の破壊力として指摘される長周期パルスタイプの1995年兵庫県南部地震のJR鷹取（TKT）の記録と、大変位タイプの1999年台湾・集集地震の石岡（TCU068）における記録である。本地震の現地観測点周辺の被害状況

を確認しても10%程度の被害率と低く、1~2秒における加速度応答値とTKTとの比較から見て整合性があると思われるが、3~5秒における応答ではTHMとKATNPではTCU068の応答値を超えている。地表断層の極近傍のTCU068におけるパルス性地震動では付近の建物の被害率が最大速度に対して非常に小さい事が指摘されている一方で、高層建物が存在すれば被害が発生しているであろうことも指摘されている。このカトマンズ盆地内での3~5秒における応答は、KATNPの記録を入力地震動として超高層免震建物の応答解析を実施した事例において、甚大な被害の発生を示唆している。プレート境界直上の堆積盆地であるカトマンズ盆地での強震記録の特徴を述べたが、構造物によっては非常に深刻な記録も一部含まれ、日本の都市においても考慮すべきか否かはその生成要因の解明が必要であり、それらを明らかにする必要がある。

熊原⁹⁾による調査結果は次のようである。

We show geological and geomorphological evidences of the late Quaternary activity of the active faults around the Kathmandu Valley, and no faults played any parts in triggering this large earthquake. Angster et al. (2015) claimed that no surface rupture along the trace of the HFT, the pattern of InSAR interferograms, focal mechanism and aftershock distribution of the event indicated that it was a low-angle thrust event on the MHT and the southern tip of the rupture ended below the mountain over 30 km north of the Gangetic plain. Our results also supported this idea. The existence of an active fault reflects a potential seismic hazard for a shallow-depth earthquake around the fault. For example, the 2005 Kashmir earthquake (Mw=7.6) in Pakistan occurred on a previously mapped active fault (Nakata et al. 2001; Kumahara and Nakata 2006) and the fault produced an average event interval of ~2 k.y. for the 2005 earthquake type events (Kondo et al. 2008). In the present situation it is difficult to evaluate the potential seismic hazard due to lack of paleoseismological data of those faults, however it is needed to carry this study forward for assessments of the Kathmandu Valley. Jhiku Khola fault, which shows a right-lateral

strike-slip movement, may play an important role in the active tectonics of the Himalayan range. Nakata (1989) claimed that an en-echeloned active right-lateral strike-slip fault system from Northwest Nepal to Eastern Nepal cuts obliquely across the Himalayan range due to slip-partitioning, such that the block lying to the southwestern side of the fault moves northwestwards with respect to the block lying to the northeastern parts. It is possible that Jhiku Khola fault constitutes one of the members of this fault system.

三尾¹⁰⁾による調査結果は次のようである。

ネパールの震災は、ネパールが内政上の長期にわたる混乱を乗り越えてようやく新憲法制定の最終段階に入ろうという、新しい国家づくりの最中に発生した点が、不運の拡大を招く要因になったと思われる。今回調査の対象とした2つの団体は、それぞれ、Goonj の場合は衣服のリサイクルを梃子とした持続可能なコミュニティ開発支援の実績とこれに基づくインド国内のネットワーク、DJJS の場合は信者のネットワークを生かしつつ師の教えを具現化する形でのコミュニティ間の相互支援の仲介といったように、団体としての特性に基づいた復旧・復興支援を行おうとしていた。しかし、ネパールの不安定な政治情勢によって、これらの団体の支援活動は十分にその特性を生かしきれないまま撤退ないし中断を余儀なくされている。

カッチや東日本大震災においては、国内外の多様な支援機関・団体間のコーディネーション機能を担う NGO 的な組織がそれなりの役割を果たし、被災者のニーズと支援機関・団体のキャパシティのマッチングやこれら諸機関・団体への情報提供が行われる体制が出来ていた。しかし、ネパール大震災においては、少なくとも今回の調査の限りでは、このようなコーディネーションが行われた形跡がみられない。2 団体への聞き取り調査によれば、ネパール政府自体が介入し、コーディネートを行おうとしていた。だが、2 つの団体ともが一致して、政府の情報や指示の混乱を指摘している。内政上の混乱を乗り越えたばかりの行政体制では、被災の態様もさまざまな被災地が各地に生じる一方、大量に殺到した国内外の支援機関・団体を調整することに

は困難があったと思われる。一方、政府が曲がりなりにも調整機能を果たすべく支援の現場に介入した結果、カッチ大震災の際に見られたような現場の NGO による調整ネットワークの自発的発生も抑制されてしまったようである。この結果、各団体はそれぞれが手探りで支援活動を行わざるを得ない状態になっていた。

調査した各団体はおおむね2015年6月頃まで活動が続けているが、その後一方は撤退し、一方は事実上支援を中断せざるを得なくなっている。ネパール政府による支援物資への関税徴収、また雨期に入ってもともと脆弱であった交通インフラがより困難な状況に陥ってしまうような支援が行えなくなったことが、その直接の原因として挙げられている。自然条件と交通インフラの未整備は、6月以降の支援活動の停滞の大きな要因となったことは間違いないが、これとは別にネパール新憲法制定の大詰め段階でさまざまな政党間の駆け引きや対立が激しくなり、政治的社会的関心がそちらに大きく移ってしまったことも支援活動停滞の要因と思われる。政治や行政のさまざまなリソースが憲法の制定と公布事業に振り向けられた結果、復旧や復興という課題は大きく後景に退くこととなり、そのための行政的な指導や支援も滞ってしまった。DJJS への調査で指摘されているように、家屋の再建のためのガイドラインの認可は2016年1月になってようやく行われている。復旧のための基本的ガイドラインの設定がここまでずれ込んだ背景には、2015年の雨期以降の行政の停滞を考えざるを得ない。

インド・ネパール間の関係悪化とそれに伴って生じた両国間の国境封鎖も、その引き金となったのは新憲法制定をめぐる混乱である。新憲法の下では自分たちの利害が政治に正当に反映されなくなるとの危惧をインド国境付近に多数居住するインド系市民が抱くようになり、反政府運動を展開、これをインド政府が陰日向となって支援したことがこの問題の背景にある。国境封鎖そのものは、インド政府が行ったというよりも、ネパール国内のインド系市民が反政府運動の一環として実力行使したというのが実態のようであるが、いずれにしても内陸国家で、物資の輸入が可能なルートの大半がインド国境沿いにあるネパールとしてはこの国境封鎖の結果、産業や生活

に必要な物資の入手の道が断たれることとなったのである。これは、DJJS の事例にみられるように、支援活動に不可欠な輸送用ガソリンの不足を引き起こし、支援活動の停滞期間をさらに長引かせる要因となった。また、復旧・復興に必要な物資そのものも国内への輸送が困難になったため、支援のいかにかわらず、復旧・復興のプロセスそのものを阻害することになってしまっている。この結果、第3章でも略述したように、被災地では未だに多数の住民が仮設テントなどで厳しい物質条件のもと生活を送らざるを得ない状況が続いている。

この国境封鎖問題は、2016年2月末のインドでのネパール・インド両国首脳会談を経て一応解決したが、国境付近の混乱はいまだに続いている。復旧・復興を本格化させるためには、まず何よりも一日も早く国境封鎖をめぐる混乱を解決する必要があるのは明らかである。これには、ネパールの政治的状況やネパール・インド関係の正常化など内政・外交上の問題が絡んでおり、NGO等の努力ではいかんともしい部分がある。今後も両国の政府の努力はもちろん、両国の対話や関係改善を促すような国際政治の支援が必要であろう。

その上で、国内外のさまざまな特性や能力を持ったNGO等の息長い復旧・復興支援が再開、継続されなければならない。その際には再三指摘しているように、行政または諸NGO自体のコーディネートによって、諸機関や団体、また被災地のニーズとの間で効果的なマッチングが行われることが望ましい。

今回の震災の場合、特に村落部では復旧したいがまだ緒についたばかりの段階である。諸団体の活動に関する民族誌的な調査もまた初歩的な段階にある。今後も継続的に調査を続け、復旧・復興のプロセスへのNGO等の団体の関わりのあり方についてさらなる解明を行っていききたい。

高田¹¹⁾による調査結果は次のようである。

初めて、地震災害に対してFMTのガイドラインに基づくClassificationが適用され、また初めてFMTCCが活動し、150に上る大小の海外医療チームの登録と活動サイトの付与が迅速に行われた事例である。FMTの調整はフィリピンやバヌアツでの事例を元に事前登録フォームが作成・運用され、FMTの全体

把握および迅速かつ適切な活動調査に貢献した。しかし、現場の正確なニーズをFMTCCで把握するためには、FMTCCの人員の増強や郡部の責任者との緊密な情報共有が今後の課題である。

竹内¹²⁾による調査結果は次のようである。

2015年ネパール・ゴルカ地震の被害により、カトマンドゥ盆地の歴史的な都市景観の変容において、土地所有の課題がどのように解決されるかが重要な要素となることが分かった。土地所有の解決方法によっては、細分化された敷地での再建が散発的に行われ、不連続な都市景観を呈することが予想される。また、再建構法においては、伝統的構法ではなくRC造(+外装装飾)による再建がすすみ、表層的な装飾を施された住宅の混在が一層進んだ都市景観へと変容する可能性が高い。また、その際には、平面計画においては、伝統的な住まい方の継承がどこまで住民の理解を得られつつ平面的な変化を加えていくか、さらには断面計画においても、どこまで町並みとして連続性や歴史的プロポーシオンを継承できるかについても問われることになる。

一方で、面的再開発の可能性もあり、事業計画により全く異なる空間が出現しつつあり、歴史的な都市景観を大きく変容させる可能性がある。観光産業のインパクトにより投機的に文化的背景を考慮しない再開発が起こる可能性もある。土地所有の整理方法、伝統的空間の再現および生業、生活、コミュニティ維持などどのように継承していけるかについて、住民参加を前提として検討されなければならない。

ネパールの歴史的都市空間にある都市組織をどう継承し変容を受け入れるか、プロジェクトの大小を問わず、文化的価値の共有ができた多様な専門家の介入が求められる。

大窪¹³⁾による調査結果は次のようである。

研究対象地域内の世界文化遺産に含まれるナグバハルとイラナニの中庭では、テント生活が営まれ、コミュニティが主体となり炊き出しや掃除、寄付などのボランティア活動が行われていた。都市化や人口流入による人間関係の希薄化が進もうとしている現代においても、伝統的な中庭空間を中心としたコミュニティの活動によって避難生活が支え

られていたものと考えられる。ナグバハルとクティバハルのコミュニティでは一体となって炊き出しなどの活動を行っており、特に非常時には別のコミュニティとの積極的な連携が実践されていたことが明らかになった。

イラナニの中庭では普段の生活ではあまり利用されてない中心付近の緑地が避難場所として利用されたが、イラナニには多数の外部コミュニティからの住民も避難していたと考えられ、十分なスペースがないことが問題として挙げられていた。また、対象地域の内部から地域の外にある Nakabahil や Akibahal といった中庭や Tapahiti (ヒティ) に避難した住民も確認された。これらのことから、今後は広域的なコミュニティとの連携を考慮した防災・避難計画が必要と考えられる。

クティバハルは他の中庭に比べると避難者数が少なかった。クティバハルの中庭は細長い形状であるため、住民は余震の続く中そこで避難生活をするに不安を抱いていた可能性がある。今後はこのような中庭の耐震安全性を優先的に高める施策を実施するなど、空間を有効活用できるよう避難場所としての安全性を向上させることが求められる。

また、個別ヒアリングの回答者の半数以上が住居の修理を問題として挙げており、拙速な修理を求めるあまり、歴史や伝統に配慮のない改築や補修が横行し、対象地区の歴史的街並みが損なわれてしまうことが懸念される。

今後は、イラナニやクティバハルの住民にも個別ヒアリング調査を行う必要がある。さらに、それぞれの避難行動に至った理由についても詳しく把握する必要がある。

南¹⁴⁾による調査結果は次のようである。

現地調査の概要を記述してきたが、注目したいのはカトマンドゥの人々がボランティアをしていたという事実である。ひび割れ程度の建物被害で済んだ多くのカトマンドゥ中間層の人々は、地震直後には数週間、近隣住民とのキャンプ生活を強いられたが、特に若者を中心に瓦礫撤去の手伝いや被災地に救援物資を届けたりするなどのボランティア活動を行った。それは、その実質が見えにくかったネパールの「市民社会」が誰の目にも見えるような形で立ち現れたといえる現象である。

この経験は市民レベルの連帯や社会再編に繋がって長期的な傾向に接続されていくのか、あるいは一過性の災害ユートピアやコミュニティ的高揚で終わるのか。「カーストや民族を超えた平等な助け合いが見られたのは震災後1週間だけだった」とは調査助手ラム氏の発言だが、その正否と今後の動向は継続して見て行く必要がある。

現時点でいえるようなことは、地震の発生によって包摂と排除の境界が少なくとも揺らぎ、再編成されながら、被災の苦境に共感するネパール人であること (Nepaliness) が意識化されたといえる状況が見てとれることだ。それは海外で暮らす在外ネパール人の共感や連帯、支援をも巻き込んだ大きな潮流であり、その意味ではグローバルなレベルでもネパール人社会の再編が進み始めていると推測される。

一方、国政レベルでは、地震という国家の危機的状況を機に制憲議会に対する世論の関心や期待が急落したことで、2015年9月20日、ついに7年越しの憲法制定が実現した。さらに、共産党 UML の K.P.オリ首相が就任し(10月11日)、ビドゥヤ・デヴィ・バンダリが第二代大統領に選出された(11月29日)。憲法制定は民族名を冠した連邦州を採用するかの是非や線引き等により政党間で対立し膠着状態にあった。だが、マオイストが民族自治州を断念する形で譲歩し、新憲法が公布されたのである。新憲法では第1〜第7と番号が州名となる7つの連邦州が規定され、インドと国境を接する南の低地帯(マデシ)は東西に複数に分断された。つまり、マデシ勢力が要求してきた「エク・マデシュ・エク・プラデシュ(一つのマデシュに一つの自治州)」は実現されなかった。これを機に、新憲法に反対するマデシ勢力の抗議運動が過熱化し、インドとネパールの実質的な国境封鎖とそれによる深刻な燃料不足という現在の状況を誘発した。

こうして見ると今回のネパール地震は、村やコミュニティから市民、国政あるいは国民までの様々なレベルで、社会秩序を文字通り揺さぶり、それを再編させる契機となったことが見て取れる。これらの社会再編において通奏低音のように何れのレベルにも流れているのは、新憲法にも掲げられた理念としての「包摂」であり、その顕現や実態のあり方が詳らかにされなければならない。ダリットや

女性、先住の民族、障害者等のいわゆる排除されてきたとされる人々が、復旧・復興における資源の分配や意思決定の過程でどのような働きをするのか、ないしできるのか、彼ら／彼女らの包摂が進展するか否かは、地震の社会的影響を考察する上で中心的な課題になろう。そのためには「ネパール地震は社会の平等性（あるいは包摂の程度）を高める方向に作用した」という理論仮説を立て、その実証（当然のことながら反証も含む）に多様な側面から取り組むことが有効であると考えられる。

渥美¹⁵⁾による調査結果は次のようである。
以下の二つの考察が導かれた。

1「防災どころでない人々」の存在

生活環境の全く異なる山岳地域より、避難してきた人々にとって、都会での避難生活は困難を極める。それゆえに、彼らの防災知識は十分ではないものの、彼らにとって不確定要素の大きい災害への備えは、必ずしも即効性のある活動ではない。そういう意味では、日常的な課題に苦闘する彼らを「防災どころでない人」と定義することができる。

2「何気ない生活」という第三の軸

ボダナート、ビドゥールテント村の住民が困窮しているのに対して、ハリシディ村の住民たちは既に日常生活を営んでいた。レジリエンスやヴァルネラビリティの一般的な解釈に従えば、ヒビの入った住居に住み続ける住民の姿はヴァルネラビリティとして認識される。しかし、ハリシディ村の住民は震災後も脆弱とされる地域に住み続けることで、「何気ない生活(生業や宗教行事、語らい等)を過ごし、レジリエントなコミュニティを築いていた。この事実を逆説的に捉えれば、「何気ない生活」の生成こそが現地の復興延いては防災・減災活動に要となる。

このように、今回の調査では、ネパールの人々をヴァルネラブルな存在とみなし、「防災知識を教える」といったいわゆる一般的な防災教育が適切でないことが明らかになった。一見しただけでは、脆弱にしか見えない彼らの生活には、我々先進国の人間が持ち合わせていない強靱さが潜在している。つまり、これからネパールの防災・減災活動に取り組む際には、レジリエンスやヴァルネラビリティといった多義性に富む概念を多用するのでは

なく、彼らの「何気ない生活」に注目する必要があるだろう。

村上¹⁶⁾による調査結果は次のようである。

本研究では2015年ネパール・ゴルカ地震におけるアンケート震度調査試行結果を報告するとともに、人的被害の地理的分布や年齢性別分布など、影響要因を統計資料等から分析した。震度はカトマンズ盆地と Sindhupalchok 郡 Chautara の10か所で調査し、MM-MSKに基づく12階級で平均震度が5.8~6.7となり、被害程度と適合し相対値として信頼できると判断されたが、絶対値の判定にはさらに検討を要する。

国勢調査による住宅壁材料のセメント・モルタル率がカトマンズ盆地の都市部で高く、地震動強さが小さいことと併せて住宅全壊率低減に影響したことが明らかになった。ネパール警察の死者リストを基に年齢性別死亡率を分析したところ、郡部で乳幼児と高齢者、女性の死亡率が高く在宅率の影響がみられ、都市部で20代の死者数が多く、子どもや高齢者の死亡率が郡部に比べて低く、歴史建物や商業建物による人的被害が背景にあることを示した。今後の課題として、アンケート震度調査の拡充により地震動強さの分布を明らかにすること、市町村別の住宅被害率・人的被害率の地理的分析や要因分析を行うことが望まれる。

4. 参考文献

参考文献はいずれも、文部省科学研究費補助金(特別研究促進費)「2015年ネパール地震と地震災害に関する総合調査」報告書(pp.1-165, 2016)に掲載されている。以下に著者名と論文題目、ならびに掲載ページを記載する。

1.Netra Prakash Bhandary, Ryuichi Yatabe, and Gangalal Tuladhar: The 2015 Nepal Gorkha Earthquake: Damage Scenario and the Government Plan for Reconstruction and Restoration, pp.11-24

2.福岡浩, ネトラ・プラカシュ・バンドリ, バサンタ・ラジ・アディカリ, デオ・ラジ・グルング, 山崎新太郎: 2015年ネパール・ゴルカ地震による地すべり災害初動調査, pp.25-28

3.檜垣大助, 八木浩司, 若井明彦: 2015年ネ

パール地震におけるランドスライドの発生状況, pp.29-36

4. 矢田部 龍一、ネトラ P. バンダリ、稲垣秀輝、西川 徹:2015 ネパール・ゴルカ地震による道路沿いの斜面災害の特徴, pp.37-44

5. 長谷川 修一、野々村 敦子、Ranjan Kumar Dahal, Manita Timilsina:2015 年ネパール・ゴルカ地震震源域のミッドランドではなぜ斜面崩壊が少なかったのか?, pp.45-61

6. 山口 悟、西村 浩一、藤田 耕史、和泉 薫、河島 克久、陽一 伊藤 陽一、上石 勲:2015 ネパール・ゴルカ地震によるランタン谷の雪・土砂なだれ調査報告, pp.63-70

7. 佐藤比呂志、蔵下英司、酒井 慎一、平田直、八木 浩司、Ananta Prasad Gajurel, Danda Pani Adhikari, Krishna Subedi, Bishal Nath Upreti:2015 年ネパール・ゴルカ地震の稠密アレイによる余震観測, pp.71-75

8. 高井 伸雄、重藤 迪子、Bijukchhen Subeg, 一柳 昌義, 笹谷 努:2015 年ネパール・ゴルカ地震におけるカトマンズ盆地の強震動特性, pp.77-88

9. Y.Kumahara, T.Ishiyama, D.Hirouchi, N.Matta, D.Chamlagain, B.N.Upreti: Field reconnaissance of active faults in the

epicentral area of the 2015Gorkha Nepal earthquake, pp.89-96

10. 三尾 稔:2015 年ネパール震災後のインド系 NGO 団体による活動に関する民族誌的調査報告, pp.97-110

11. 高田 洋介:2015 年ネパール地震における国際医療支援の実態, pp.111-116

12. 竹内 泰:2015 年ネパール・ゴルカ地震による都市景観の変容予測, pp.117-124

13. 大窪 健之、サキヤ・ラタ、金度源、高杉三四郎:2015 ネパール・ゴルカ地震における伝統的中庭空間の避難時の利用実態—世界遺産カトマンズ・パタン地区を対象として—, pp.125-133

14. 南 真木人:ネパール地震の社会的影響—社会再編かコミュニティ的高揚か, pp.135-140

15. 渥美 公秀、河村 信治、稲場 圭信、乾 陽亮:ネパール地震被災地の災害対応に学ぶ防災の可能性, pp.141-146

16. 村上ひとみ、ラメッシュ・グラガイン、スジャン・アドヒカリ、バラット・プラダン、ゴピ・バスマル:2015 年ネパール・ゴルカ地震のアンケート震度と人的被害調査結果, pp.147-164

2015年口永良部島噴火に関する総合調査（2）

井口正人*・2015年口永良部島火山噴火総合研究グループ

* 京都大学防災研究所

要 旨

2015年5月29日に口永良部島の新岳火口において火山噴火が発生し、我が国の火山において初めての特別警報（噴火警戒レベル5）が発表され、島外への避難が行われた。2014年8月3日にも噴火が発生しており、それ以降、火山噴火発生の前兆過程である火山ガス放出量の増加、地盤変動、火山性地震活動の活発化は段階的に進行した。2015年5月の火山噴火では噴煙高度は火口上9km以上に達し、火砕流も2km超離れた海岸線あたりまで到達した。噴火に伴う爆発地震は2014年噴火が大きい、火山灰放出量や空気振動の大きさを考慮した噴火の規模は2015年噴火が大きい。火山灰の大気中の拡散は移流・拡散モデルで再現できる。また、火砕流についてもシミュレーションを行った。火砕流の堆積後、土石流が発生している。現地調査によって、浸透能などの特性を調査した。島外への脱出を含む避難計画および避難の実施に2014年噴火の経験が極めて重要な役割を果たした。2015年5月29日の噴火の6日前に発生した有感地震後に、国および自治体は必要な措置を講じたが、住民の避難についての意識との乖離が大きい。噴火後に、火山性地震の活動は低下し、火山ガスの放出量は低下した。2015年10月には警戒区域を新岳火口からおおよそ2.5kmとする決定がなされ、多くの島民の帰島が実現した。さらに、2016年2月ごろから火口周辺の地盤の収縮傾向が検知されたので、警戒区域が2kmに縮小され（噴火警戒レベル3に引き下げ）、避難が解除された。

1. はじめに

口永良部島は屋久島の西14kmにある火山島である。噴火に関する古い記録は残っていないが、1841年の噴火以降、新岳の山頂あるいはその東の割れ目火口において頻繁に噴火が繰り返されてきた。1841年、1933年の噴火では集落において犠牲者が出るような噴火が発生している。1841年の噴火では現在の本村に集落が移転され、1933年の噴火では落下した岩塊により七釜集落が焼滅した。岩塊の飛散距離は大きく、1966年の噴火では北東方向の3km以上の距離に達した。1966年以降1980年まで、1～2年の間隔で頻繁に小規模な噴火が繰り返されたが、1980年9月の噴火以降、2014年8月の噴火までは噴火が発生しない状態が続いていた。

一方、地下の火山活動については1999年以降、次の噴火の準備過程にあることを示す観測データが得られていた。1999年7月に火山性地震の発生回数が急激に増加し、その後も、1～2年の間隔で火山性地震が群発的に発生した。また、新岳火口を中心とする

地盤の隆起・膨張も1999年ごろから始まり、2014年までに20cmを超える変位が観測された。2003年ごろからは火口内および周辺に熱異常が現れるようになり、それと同時に地下の蓄熱を示す全磁力変化が観測された。さらに、2008年10月には新岳火口南壁に噴気が現れて徐々に活動的となり、二酸化硫黄ガスもDOASにより検知できるレベルまで増大した。

様々な観測量の緩やかな変化を示す15年間の準備過程を経てついに2014年に噴火は発生した。噴火開始時刻は8月3日12時24分ごろである。噴火発生としては1980年から34年ぶりある。噴煙高度は800m程度と低かったものの火砕流が発生し、それに伴う熱風は約2kmの距離まで達した。噴火発生後に、気象庁は警戒レベルを1から3へ引き上げ、立ち入り規制区域を新岳火口から2kmの範囲に設定した。住民91名は新岳から4.7km離れた番屋ヶ峰に避難した。レベル3は居住区には影響のない噴火活動への警戒を意味するが、台風が接近していたために、61名がさらに島外へ自主避難し、台風通過後に帰島した。

2015年5月29日の噴火は、2014年噴火以降も、火山

活動が高まった状態で発生した。噴火は9時59分に新岳火口において始まり、噴煙高度は9000mを超え、火砕流は全方位へ流下、特に北西側の向江浜集落方向では海岸付近まで達した。噴火後に、気象庁は噴火警戒レベル運用開始後初めてレベル5を発表し、ただちに始まった住民の避難は、当日夕方には屋久島への全島避難で完了した。

2015年噴火は、2014年8月3日の噴火後、火山ガス放出量の急増など様々な観測量の急速な変化が認められる中で発生しており、噴火に至るまでの過程を解明しておく必要がある。また、前回噴火の経験を活かし全島避難がスムーズに進んだものの、6月18日にもレキが8kmの距離に達するような噴火が発生するなど現在も火砕流を伴う噴火の危険性が高い状態が続き、帰島に向けての判断に関する研究が求められた。

本研究計画では、2015年5月29日噴火に至る前駆過程と噴火そのものの実態、噴火により発生した火砕流による土砂災害、避難、さらに火山活動の推移と帰島に向けての判断に関する調査・研究を総合的に行った。2015年の自然災害シンポジウムにおいて10月までの研究成果を暫定的に取りまとめ、報告したが、本稿では、その後の調査結果と2015年10月以降の火山活動の推移と帰島について報告する。

2. 5月29日噴火に至る前駆過程の解明

2014年8月3日の噴火直後の二酸化硫黄ガスの放出

量は300トン/日に増加した（図1）。それ以降も徐々に増加していたが、劇的に増えたのは2014年11月末である。以降、1000～3000トン/日の状態が続いた。このレベルの二酸化硫黄放出量はマグマ性噴火が発生している桜島や阿蘇山と同等の噴出率であり、噴火が発生していないとされる火山では極めて異常な値である。

2014年11月末の二酸化硫黄放出量の増加と同期して屋久島と口永良部島とのGNSS観測による基線長の短縮が始まった（国土地理院、気象庁の連続観測）。2015年3月に行った島内山麓のGNSSキャンペーン観測では、新岳を中心とする放射状の変位ベクトルが得られており、屋久島と口永良部島との基線長の短縮は口永良部島の新岳を中心とする膨張と解釈できる。また、2015年3月に行った新岳西山麓の水準測量では、2014年8月に比べ火口側隆起の上下変動が検出されたことも口永良部島の山体の隆起・膨張を裏付ける。2014年以前の地盤変動は新岳山頂において極めて大きい、山麓には顕著な変動はなかった。山麓において地盤変動が検出されたのは、1996年に地盤変動観測を開始して初めてのことである。

地盤変動と同期して、徐々に火山性地震発生回数も増加し、2015年1月24日には、最初の有感地震（震度1）が新岳西山麓の深さ5kmで発生した。口永良部島において発生する火山性地震は、新岳直下の深さ500m以浅を震源とする極浅部火山構造性地震である。火山活動が高まった時期には低周波地震やモノクロマティック地震が発生することもある。1月24

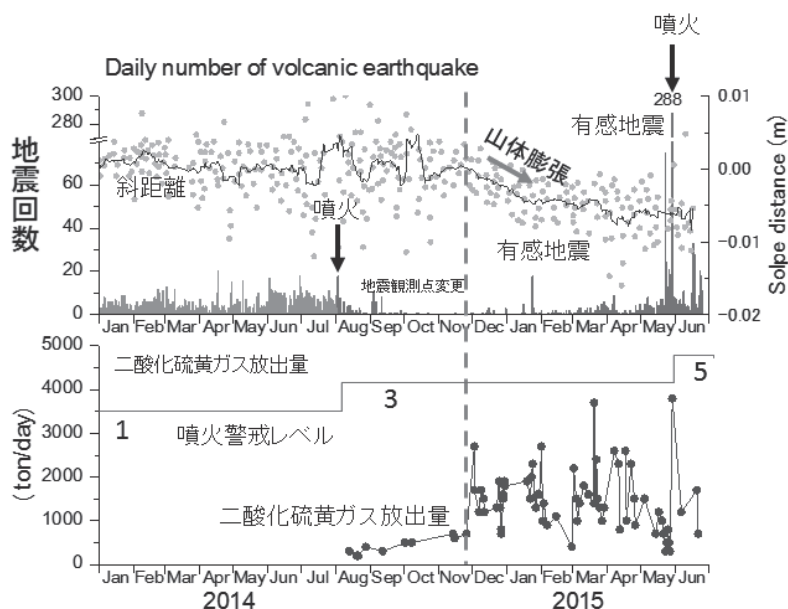


図-1 2014年8月噴火から2015年5月噴火までの火山活動のまとめ。上段:地震回数および地盤変動。2014年8月3日以前の日別地震回数は京都大学、それ以降は気象庁。斜距離は国土地理院の屋久島永田と気象庁口永良部島七釜観測点のGNSS観測による斜距離。下段:東大・京大及び気象庁による二酸化硫黄放出量。

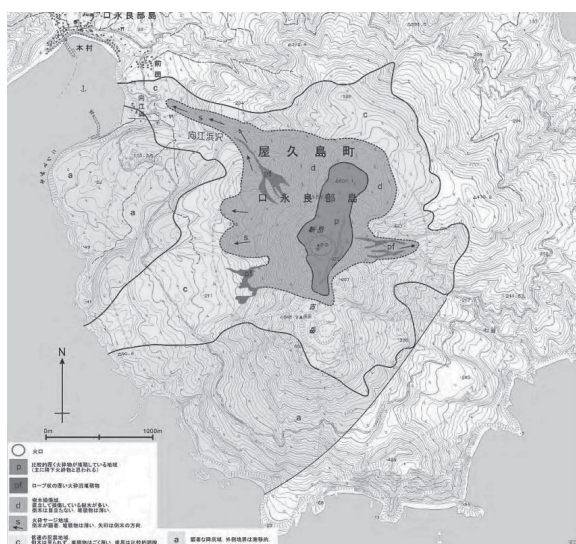


図-2 火砕流及び火砕サージの分布範囲（産業技術総合研究所）

日の地震の震源位置は大多数の火山性地震の震源からはずれるが、山頂以外の場所で地震が発生する場所として以前から注目されてきた場所である。さらに、3月24日には気象庁の監視カメラで新岳火口に火映が観測されるようになっており、火口周辺での熱活動が活発化していた。

5月19日ごろからは、UAVを用いて新岳火口近傍に設置した地震計に観測されるような極微小地震が増加していたが、5月23日には新岳西山腹浅部を震源とする有感地震（震度3、M2.3）が発生した。5月23日の地震は1月24日の地震と同様に新岳西山麓に震央をもつが、深度が1kmと浅くなっている。

5月23日の有感地震発生以降も地震活動は高い状態が続いた。注目すべきは、火山構造性地震の多発から低周波地震やモノクロマティック地震への地震活動の推移が見られたことである。また、二酸化硫黄放出量は300～700トン/日に減少し、明らかに2014年12月以降とは異なる状況を示した。二酸化硫黄放出量の減少は火道上端部の閉塞を意味していたのかもしれない。

2015年5月23日に口永良部島で発生した有感地震は、1回だけであり、他の火山における有感地震に比べて地震エネルギーの放出量ははるかに小さい。しかしながら、5月23日の有感地震は単なる偶発的な地震発生ではなく、様々な観測項目で検出できる活発化を示す現象が段階的に進行した上で発生した火山体浅部の破壊現象である。さらにこれら前駆現象は2014年噴火の先行する15年間の現象よりもはるかに強いものである。2014年噴火以前では、火山性地震に有感規模のものではなく、地盤変動は火口周辺にと

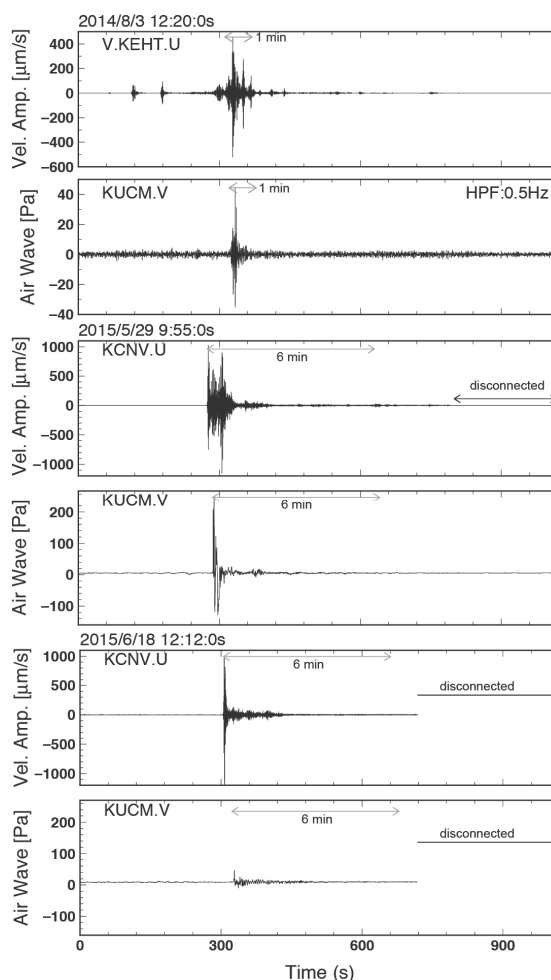


図-3 2014年及び2015年に発生した噴火に伴う地震動及び空気振動

どまっていた。二酸化硫黄放出量は最大で200～300トン/日にしか達しておらず、地熱活動の活発化を示す火映は見えたことはない。

口永良部島の過去に災害を伴った噴火では有感地震が直前に発生している。1931年4月2日の19時半頃に発生した噴火では、午前7時、12時、午後3時に山上で、さらに午後4時40分と6時40分には、山麓にても有感となる地震が発生した。1966年11月22日11時の噴火では、噴煙高度5000m、噴石は北東側の3km超まで達したが、その直前の地震は、爆発約10分前に前田で、さらに、2〜3分前には新岳8合目西斜面でも有感であった。いずれも複数回の有感地震が発生しているが、1931年及び1966年噴火とも20年程度の休止期のあとに発生した噴火であり、わずか10か月前の2014年8月に先行噴火のあった2015年噴火に比べて地震は発生しやすい状態にあったと考えられる。

3. 5月29日噴火の実態の解明

噴火発生後、口永良部島全島に対して立ち入り規制されたので、島内において噴出物の分布範囲やサンプリングは十分できていない。5月30日から7月7日に撮影された空中写真から火砕流の分布範囲や影響について評価した。高密度の火砕流分布範囲やその周辺の火砕サージ分布範囲を図2に示す。火砕流は全方位に流下したが、特に、北西側の向江浜に向かう火砕流の流下距離が大きく海岸付近まで到達した。

5月29日および6月18日に発生した噴火の噴出物の微細組織解析を行ったが、結晶化が進行しほぼ固結したマグマが噴出していることが明らかとなった。

2014年8月3日、2015年5月29日および6月18日に発生した噴火に伴う地震動及び空気振動記録を比較して図3に示す。2014年8月噴火の地震波形は複雑である。2015年5月噴火に伴う地震波形は最初にパルス状の波が立ち上がり、その後、それよりもやや小さい振幅の微動が1分程度続いた。微動は火砕流を含む多量の火山灰の急速な噴出に関連している可能性がある。図3に示した波形は異なる観測点における地震波形を示しているため、防災科学技術研究所の広帯域地震計F-net屋久島永田（KYKF）観測点（新岳から東南東方向約20km）で観測された速度と変位波形の両方で比較した。2014年8月3日の噴火時の方が、2015年5月29日より振幅は倍近く大きいようである。一方、空気振動は2014年8月噴火では40Pa程度であるのに対し、2015年5月噴火では200Paを超えている。2014年噴火では、爆発のエネルギーが火口の破壊に使われて新岳火口の地形が大きく変わったのに対し、2015年噴火では、火口の地形はそれほど変わっておらず、地表面への爆発にエネルギーが使われた。一方、2015年6月8日噴火の地震動は、強いパルスが最初に見られるだけで、典型的なブルカノ式噴火に伴う爆発地震に類似している。

4. 火砕流堆積後の土砂災害及び火山灰拡散に関する調査・研究

火口上9000m以上に達した火山灰は南東方向に流れた。PUFFモデルを用いて2015年5月29日噴火により放出された火山灰の遠距離輸送の数値実験を行なった。ひまわり8号の高解像度動画と比較した結果、上層の南東への輸送と下層の西への輸送は的確に再現されていた。

土石流の発生は降雨と明確な関係がある。2015年6月2日の7:00に時間雨量15mm、6月3日の14:00と15:00に各々、14mm、33mmの強い雨があったことから、これらの日時に土石流が発生したものと考えられる。向江浜に氾濫・堆積した土石流の堆積物は、

逆級化現象が顕著であることが大きな特徴であり、石礫型土石流の流れ状態で氾濫・堆積したと考えられる。土石流の相対水深(h/d)は約10、流速係数(v/u^*)は5程度の値と考えられる。相対水深と流速係数の組み合わせから石礫型土石流に近いといえる。土石流堆積物のマトリックスは、いずれも砂成分が多く、土石流の氾濫・堆積のプロセスにおいて、構成材料のマトリックス成分は、流れ方向に細粒化している。火砕流本体部、熱風部の堆積範囲、その後のガリ侵食の発達状況から、土石流の構成材料は細粒の火砕流堆積物を主体としたものではなく、侵食により旧地盤を多く取り込んだものと考えられる。浸透能の低い火砕流堆積物によって発生した表面流により旧地盤が侵食された。

2016年1月～2月に立ち入ることができたので、散水型浸透能試験を実施した。前田地区のスギ林においては火砕流発生直後には火山灰が数cm堆積していたと思われるが、その後の降雨により火山灰は流出し、調査時は1cm程度の厚さで、まばらに分布していた。浸透能は176mm/hrまで回復し、表面流による侵食は発生しない状態であった。遠望調査によると、浸透能の低下による表面流発生、リル・ガリ侵食による土砂移動現象が確認されるので、今後も降雨による土砂流出は継続する状況にある。

5. 避難に関する調査

2015年5月噴火時の避難行動を明らかにするために、6月及び7月にヒアリング調査を実施した。

5-1 過去の噴火による避難

昭和6年での噴火では、過去に噴火を経験した島民がいなかったこともあり、1097名に大規模な島外避難が行なわれた。実際の被害は島外資本の硫黄採掘会社関係者や施設に集中しており、古くからの集落（前田地区や本村地区）での被害は小さかったと聞いている。

昭和41年の噴火では、昭和6年に比べて規模が大きかったものの、大規模な島外避難はなかった。

5-2 2014年8月噴火以前の意識

2014年噴火以前にも、住民は避難体制の不備を認識しており、行政に対して申し入れを行っていたが、具体的に現実化することはなかった。

地域の消防団のメンバーは、民宿の運営やガイド、火山観測機器を含む各種インフラ整備の作業等にかかわっており、そのような作業や交流を通じて、インフラ維持や火山噴火に関する新しい知識を得られる環境にあった。

2001年に地震活動の活発化（100～200回／日程度：記憶として）があったものの、島内での危機意識は高くなかった印象で、実際、火口周辺への登山も行なわれていた。

消防団員が小中学生だった昭和50年代頃は小中学校での噴火避難訓練があったが、その後のことは島を離れていたこともあり詳細は不明。ただし、20～30年に一度程度は噴火があるという認識を持っていた記憶がある。

5-3 2014年8月噴火以降の問題意識

2014年以降は、消防団員で顔を合わせる機会も自然と増えており、情報交換をするとともに、噴煙の様子を観察する習慣もできた。

2014年前にも避難行動指針があったが、2014年の経験から、番屋ヶ峰の施設を避難所として整備とすることに予算措置があり、具体的な避難行動指針も作成し直され、各家庭にも伝えられていた。

2014年8月3日の噴火後に、噴火の経験をふまえて、学校・住民が防災体制の見直し・拡充を図った。避難所は、それまでの指定避難所（本村公民館など）から、番屋ヶ峰に移すよう住民が町と交渉し、整備が進められていた。避難所に向かう緊急避難道路も整備された。また、11月には、突発的な噴火に備えた実践的な避難訓練へと内容を変更して実施された。学校も、火砕流・噴石などのさまざまなケースに備えた避難体制を詳細に検討・訓練していた。

一方、本村地区に多い年配者は昭和41年の噴火では大きな被害がなかったことから、2014年および2015年とも相対的に危機感が小さかった印象がある。

5-4 2015年5月噴火前後の災害対応と問題意識

災害対応と避難についての主なヒアリング先は、鹿児島県庁、屋久島町役場（宮之浦支所、口永良部支所）、口永良部消防団長、口永良部本村区長、金ヶ岳小学校長、京都大学である。

2015年5月23日の有感地震後に、鹿児島県は火山防災連絡会を開催した。火山防災連絡会には、コアグループのメンバー（鹿児島県危機管理局・屋久島町・鹿児島地方気象台・海上保安庁・京都大学など）が集まり、火山の活動状況を共有するとともに、噴火時の避難体制の確認を行った。同連絡会を受けて各機関は噴火に備え避難体制を整備した。海上保安庁は巡視船を同海域に配置した。屋久島町営船フェリー「太陽」は、噴火時に島民全員を避難させられるよう乗船人数変更のための手続きを行った。また、気象庁は23日に島内で住民に火山の活動状況に関する説明会を実施した。

事前に住民に対して火山活動が活発化しているとは情報は伝えられてはいたものの、2015年5月29日の噴火は突然であった。住民は噴煙を見る、音を聞くなどの直接の知覚情報から避難を開始し、事前に定められた避難先に避難した。本村地区の住民は、昨年の噴火後に避難場所に新たに指定された番屋ヶ峰に避難し、避難先にて災害対策本部（屋久島町支所職員、区長、消防団長から構成）を設置し、そこで昼過ぎまで待機した。

2015年の避難については、2014年の経験をもとにした具体策、直前に有感地震もあったことから実質的な避難準備、消防団らの早急な対応があつて、迅速に避難を行なうことが出来た。

一方、以下のような問題が浮かび上がった。

1) 2014年噴火の経験が「全島避難をしても消防団は残るはず」「全島避難は長くとも1週間ほどで終わるはず」という問題を発生させた。

2) 全島避難は1週間ほどで解除されるという認識は、長期間にわたり島を離れるための準備ではなく、当面の避難生活を凌ぐだけの準備で構わないという判断へとつながった。

3) 避難後に全島避難が長期にわたることが明らかとなった段階で、作物や家畜に十分な対応が出来ていない、自宅の台風対策を行っていない、貴重品類の持ちだしが出来ていないといった状況が発生した。

6. 火山活動推移予測と帰島にむけての判断に関する研究

火山活動の推移を把握するために以下の観測を実施した。

京都大学防災研究所では、1996年に水準測量路線を島の西山麓に設置し、測量を繰り返してきたが、2015年7月29日および30日に、この路線の北部において水準測量の繰返し観測を実施した（路線南部については立ち入り禁止のため測量不可）。その結果、2015年5月29日の噴火を含む、2015年3月4日・5日～7月29日・30日の期間には明瞭な地盤上下変動がないことがわかった。すなわち、2014年以降に起こった新岳方向の地盤隆起は保持されている状態である。

5月29日の噴火後の二酸化硫黄放出率の推移をとらえるため、トラバース測定を繰り返し実施した。簡易型トラバース装置は電源を入れるだけで自動的に上空の二酸化硫黄量を測定できる装置であり、この装置を漁船に取り付けてもらい、口永良部島の周囲を航行してもらうことで、トラバース測定を実施した。5月29日噴火の直後は、4000トン/日と非常に高い放出率を示した。この高い値は継続しなかったようで、噴火後1週間～1か月は800～1700トン/日の

レベルで推移したが、噴火後50日以降は500トン/日のレベルに低下、さらに8月末現在では200トン/日レベルになっている。二酸化硫黄放出率は、噴火後着実に減少しており、2014年8月3日噴火前のレベル(数十トン/日)には戻っていないものの、8月3日噴火直後のレベルまで下がっており、現在の状況は、2014年12月から2015年5月の噴火前の火山ガス放出状況とは大きく異なる。

7月7日に、セスナ機を用いた火山ガス組成観測を実施した。その結果、噴火直後の6月1日と比較して火山ガスの $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ には変動が生じていないことが示された。また、火山ガス組成の定量化とその変動の把握を目的として、8月19日に本村地区に、火山ガス組成測定用の観測装置を設置し、連続観測を開始した。

鹿児島大学は、九州大学、長崎大学、神戸大学と共同で、口永良部島の周辺海域下や、やや深部(深さ数km～10km)で生じる火山構造成地震活動の検出と解析を目的として、長崎大学水産学部附属練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づき、4台の自己浮上・短期収録型海底地震計(SOBS:鹿児島大学2台、九州大学2台)を口永良部島の新岳火口から半径3.5海里(約6.5km)の円付近の4地点へ7月3日に投入し、10月30日に回収した。観測期間中の口永良部島周辺の地震活動は活発化せず、深さは5～7kmに深いVT地震が決定できた。震央は島の東～北東部および西部に決まった。

東京大学地震研究所は、9月にUAVを用いて新岳火口周辺に5台の地震計を設置した。4月にも同様の計画で設置したが、5月29日の噴火で全点が被災した状態であった。完全なリアルタイムではないものの、携帯電話によりデータが10分以内に取得できる。5月29日噴火の直前の地震活動と9月以降の地震活動と比較して図4に示す。火山構造成地震、低周波地震とも5月29日噴火の直前に比べて、9月の地震発生回数は減少しており、10月以降は発生回数の現象が著しい。

UAVにより、地熱活動の低下も確認された。空中赤外線熱映像では、新岳火口西縁の温度は噴火直前の4月には368℃であったが、9月には70℃まで低下した。また、空中磁気測定によると、4月には新岳火口の北で全磁力の増加、南で低下を示しており、新岳下で消磁が進んでいたことが明らかとなったが、9月の測定では帯磁していることがわかった。これは新岳火口下の帯磁に加え、噴出物が堆積したことによる磁化の獲得という複合的な効果があったものと考えられる。さらに、UAVにより火山ガスのサンプリングも行った。硫化水素と二酸化硫黄ガスの組成比からみかけ平衡温度を算出したところ、4月の測定では

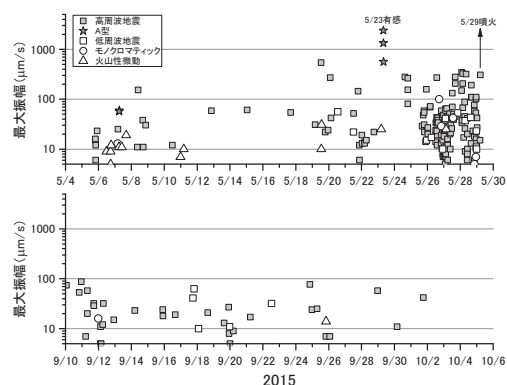


図-4 2015年5月29日噴火前の地震活動と2015年9月の地震活動の比較

550℃であったものが、9月には450℃まで低下していることがわかった。

5月29日の噴火後、それよりもやや小さい規模の噴火が6月18日に発生したものの火山活動にはさらに大規模な噴火に発展する兆候はない。GNSS観測や水準測量による地盤変動に大きな変化はなく、有感となるような火山構造成地震は発生していない。また、新岳火口内の地熱活動は明らかに低下している。現在の火山活動状況を2014年12月から2015年5月29日の噴火が発生する直前1週間の状況と比較すると地盤変動はほぼ停止、火山ガスの放出量は著しく減少した状態にある。また、火山性地震の活動度は明らかに低い。噴火警戒レベルが5に上げられた直後の状態と比較すると、火山性地震は時々多発するものの、地盤変動と火山ガス放出量には変化がない。地盤変動がないことは5月29日以前に貫入したマグマの大半は依然として火山体内にあることを意味するが、それがすぐに噴火に結び付く段階にない。

7. 帰島の判断

2015年9月の段階では、地震活動、火山ガス放出量、地熱活動に明瞭な低下が認められ、地盤変動は停止していたので、警戒区域の縮小をもって、帰島を議論できた。屋久島町の要請を受け、鹿児島県は10月7日に警戒区域について議論するため、口永良部島火山防災連絡会を開催した。先に述べた火山活動の低下については、共通の理解があったが、警戒区域の縮小については、鹿児島地方気象台は10月21日に予定されている火山噴火予知連絡会で決めるとして、口永良部島火山防災連絡会で規制区域の縮小について決めることに同意しなかった。本来、火山噴火予知連絡会は活火山の活動について評価するのが任務であり、規制区域については議論する場ではない。

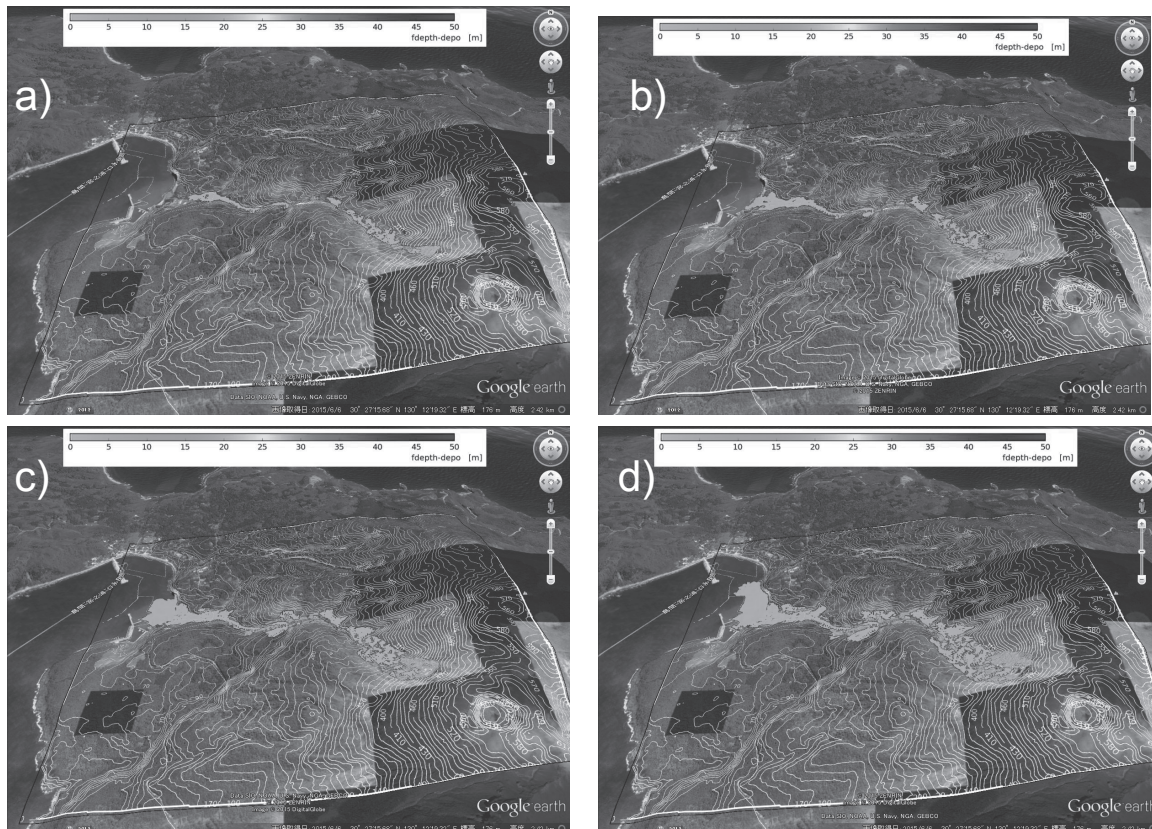


図-5 火砕流シミュレーションの結果。流動深で示す。火砕流の総体積を10万 (a) , 20万 (b) , 50万 (c) , 100万 (d) m^3 とした場合

むしろ、活火山を有する自治体に対して鹿児島県を始め、関係機関が規制区域について助言を行うのが目的である防災連絡会で決めるべきことである。10月7日の防災連絡会の鹿児島地方気象台の対応は適切さを著しく欠くものである。

10月21日の火山噴火予知連絡会の検討を受け、気象庁は始めて、2.5kmという規制区域の明確化を行い、その後帰島が実現することになったが、5月29日の噴火発生直後からそれまでは、火砕流の危険が及ぶ口永良部島の居住地域としているだけで、それがどこであるかについては一切触れていない。火山活動状況が集落に影響を及ぼすような噴火の可能性があるかどうかを評価することがより必要がある。そこで集落への危険性が最も懸念される口永良部島新岳北西斜面から向江浜を対象としてシミュレーションを行い、火砕流の危険性を評価した。使用した火砕流モデルはYamashita and Miyamoto (1993)であり、2003年7月26日に作成された鹿児島県の地形データを用いた。火砕流の体積は10万、20万、30万、50万、100万 m^3 とし、継続時間を30秒及び60秒とする矩形もしくは三角形のハイドログラフを仮定した。粒子間摩擦係数は0.5、0.7とした。継続時間を30秒、ハイドログラフを矩形、粒子間摩擦係数 μ を0.5として、

火砕流の総体積を10万、20万、50万、100万 m^3 とした場合の流下域を図5に示す。火砕流は、総体積を20万 m^3 とした場合、海岸まで達することから、5月29日噴火の火砕流に伴う向江浜への流入体積は10～20万 m^3 と推定される。50万、100万 m^3 とした場合でも海まで達するが、向江浜への谷をあふれることはない。したがって、5月29日と同等規模の噴火が発生したとしても本村集落への影響はないと考えられる。一方、このシミュレーションはサージを考慮していないので、5月29日と同等規模の噴火であれば、前田集落へのサージの影響が残る。

8. 2015年10月以降の火山活動

図6に2015年以降の火山性地震の日別の発生回数と二酸化硫黄放出量を示す。2015年10月以降の地震回数は少なく、2016年3月は6回の火山性地震しか発生しなかった。また、二酸化硫黄の放出量も少なく100トン/日以下で推移した。新岳火口を跨ぐ七釜観測点とヘリポート観測点の間の基線長に2016年1月以降、収縮が継続して見られたので、気象庁は2016年6月14日に噴火警戒レベルを3に引き下げ、すべての島民が帰宅することが可能となった。レベルの引

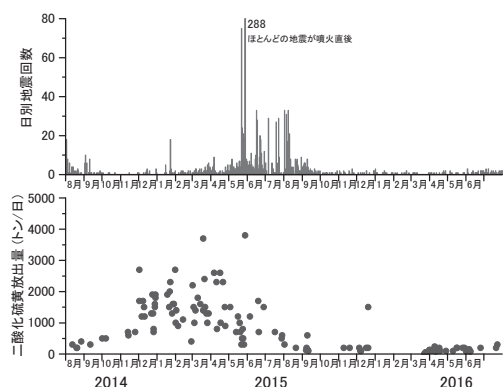


図-6 2014年8月の噴火以降の地震活動と二酸化硫黄放出量の推移

き下げにより、居住区域での復旧・復興が加速されることになる。

一方、地震活動や二酸化硫黄放出量の5月29日噴火後の低下は一連の火山活動がこのまま終息に向かうことを意味しない。2016年6月に水準測量を実施したが、新岳火口方向の隆起が検出された。また、発生回数は依然として少ないが、地震活動は2016年4月以降、増加の傾向が見られる。二酸化硫黄の放出量も2014年噴火以前の100トン/日を下回るレベルに戻っていない。1933年には4月、5月、6月と立て続けに噴火し、静穏期を経たのち、1933年12月～1934年1月にかけて噴火活動が激化した。噴火警戒レベル3は噴火

発生の可能性を意味するものである。

謝 辞

本研究計画は、自然災害協議会で立案され、平成27年度科学研究費特別研究促進費の配当を受けて実施されたものである。研究代表者を井口正人、研究分担者を神田径（東京工業大学）、大湊隆雄、森俊哉、関谷直也（以上東京大学）、下司信夫（産業技術総合研究所）、田中博（筑波大学）、久利美和（東北大学）、阪本真由美（名古屋大学）、橋本学、牧紀男（以上京都大学）、中尾茂、地頭蘭隆（以上鹿児島大学）市古太郎（首都大学）、山田孝（三重大学）の各氏とする研究組織により構成されている。また、連携研究者は以下の通りである。中道治久、味喜大介、山本圭吾、為栗健、大倉隆敬（以上京都大学）、中田節也、鈴木雄治郎、小山崇夫（以上東京大学）、野上健治（東京工業大学）、小林哲夫（鹿児島大学）、篠原宏志、宝田晋治（以上産業技術総合研究所）、棚田俊収、小澤拓、三輪学央、長井雅史（以上防災科学研究所）。

SATREPSプロジェクト「火山噴出物の放出に伴う災害の軽減に関する総合的研究」で開発したシミュレータを使用した。

平成27年9月関東・東北豪雨による災害の総合研究

研究代表者
京都大学防災研究所
田中 茂信

本研究「平成27年9月関東・東北豪雨による災害の総合研究」は、研究代表者・研究分担者25名、および連携研究者5名の計31名で組織し、記録的豪雨によって鬼怒川流域にもたらされた洪水流出とそれによって沿川で発生した洪水氾濫災害について現象面と行政組織の防災体制や個人の避難行動の関係に焦点を当て、大都市圏で発生する洪水氾濫災害時の防災対策について、今後のあるべき姿を提案する。

調査は「①降雨実態の解明と気象情報発信のあり方(気象グループ)、②越流・破堤・浸水域の地形・地質特性と堤防の安定性(地質・地盤グループ)、③鬼怒川流域の水理水文状況(水文グループ)、④河道内状況と洪水流況(河川グループ)、⑤破堤氾濫による浸水・一般被害の調査(氾濫グループ)、⑥氾濫による農業被害の調査(農業被害グループ)、⑦防災・避難情報の伝達に関する調査(防災・避難情報グループ)」の7つの課題を設定、全国の気象学、水文学、地形・地質学、地盤工学、河川工学、農学、災害情報・防災社会学など多様な分野の研究者を集めて学際的に実施し、総合的な観点で分析する。

さらに、実際の現象と発表・報道されたことを時系列的に組み合わせ一連の現象をわかりやすく整理した資料を作成し、成果の普及・還元を努める。

研究組織

(研究代表者)

氏名	所属・職名	(専門分野)	役割分担
田中茂信	京都大学・防災研究所・教授	水文学・水災害リスクマネジメント	総括、極値解析

(研究分担者・及び連携研究者)

氏名	所属・職名	(専門分野)	役割分担
研究分担者			
加藤隆之	気象庁気象研究所・室長	(メソ気象学)	大雨の発生要因の解明
三隅良平	防災科学技術研究所・総括主任研究員	(雲物理学)	レーダ解析
岩崎俊樹	東北大学大学院理学研究科・教授	(気象学・大気科学)	現象解析・予測可能性・地域への情報提供
田中規夫	埼玉大学・大学院理工学研究科・教授	(河川工学)	堤防の安定性
村上 哲	茨城大学・工学部・准教授	(地盤工学)	浸水域の地盤沈下の関係
佐藤 浩	日本大学・文理学部・准教授	(地形学)	氾濫原堆積物の調査
長田昌彦	埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授	(応用地質学)	地下地質の影響評価
竹村貴人	日本大学・文理学部・准教授	(応用地質学)	流路地質の影響評価
清水隆文	宇都宮大学・大学院理工学研究科・准教授	(地盤工学)	土石流の調査
清水義彦	群馬大学・大学院理工学府・教授	(河川工学)	砂州、河床低下、樹林化と洪水流況の関係
池田裕一	宇都宮大学・大学院理工学研究科・教授	(河川工学)	河道内構造物と洪水流況の関係
戸田祐嗣	名古屋大学・大学院理工学研究科・教授	(河川工学)	河道横断面および利根川合流部の影響
川池健司	京都大学・防災研究所・准教授	(都市水害・防災工学)	家屋被害の調査と検証計算
小林健一郎	神戸大学都市安全研究センター・准教授	(河川工学)	氾濫波の再現計算
佐山敬洋	京都大学・防災研究所・准教授	(水文学・洪水災害)	浸水痕の調査・氾濫量の推定
山本晴彦	山口大学・農学部・教授	(気象防災学)	農業被害の実態解明
高山 成	大阪工業大学・工学部・准教授	(農業環境学)	リモートセンシングによる農業被害の解析
皆川裕樹	農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究所・水利工学研究領域・研究員	(農業水利工学)	低平農地の冠水被害評価
梅本通孝	筑波大学・システム情報系・准教授	(都市・地域リスク管理)	行政の災害対応
牛山泰行	静岡大学防災総合センター・教授	(災害情報学)	人的被害の発生状況
田中 淳	東京大学大学院情報学環・総合防災情報研究センター・教授	(災害情報学)	情報伝達
田口 仁	防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域・主任研究員	(災害情報・空間情報科学)	災害時の情報処理
宮川祥子	慶応義塾大学・看護医療学部・准教授	(健康情報学・災害情報学)	情報支援・情報システム
角 哲也	京都大学防災研究所・教授	(ダム工学)	ダム操作の影響
本間基寛	日本気象協会、事業本部、専任主任技師	(災害情報学)	降雨情報・災害情報
連携研究者			
新野 宏	東京大学大気海洋研究所・教授	(気象学・大気科学)	大雨発生環境場の解析
小司慎教	気象庁気象研究所・室長	(GPS/GNSS気象学)	GNSS等を用いた水蒸気解析
坪木和久	名古屋大学地球水循環研究センター・教授	(気象学)	大雨のシミュレーション
田代 喬	名古屋大学防災連携研究センター・准教授	(河川工学)	河床地形・河床材料の変化、支川合流の影響
山元孝広	産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門・総括研究主幹	(火山地質学)	鬼怒川上流地質に関する調査と情報提供

1. 豪雨の概要と気象庁の対応

栃木北部で最大600mm以上/48h ➡ 鬼怒川の堤防が決壊

気象庁は特別警報を初め、気象・土砂・河川情報を適切に発信

期間中に3150個の積乱雲群が発生し、その63%は山地で出現

2. 豪雨の発生要因

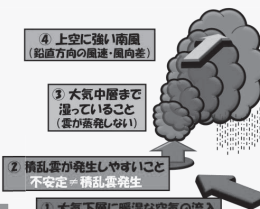
・南東海上から暖湿な空気が継続的に流入

・上空に強い南風、上空が湿潤

巨大な

➡ 複数の線状降水帯が発生 ➡ 帯状の降水域

地形は降水を強化するが、線状降水帯発生には寄与せず



3. 豪雨の24時間降水量予測結果と予測可能性

メソモデル: 8日21時初期値(39h前)から300~500mmを予想

初期値によって予測場所・雨量にバラつきあり

全球モデル: 7日9時初期値(3日前)から100mm以上を予想

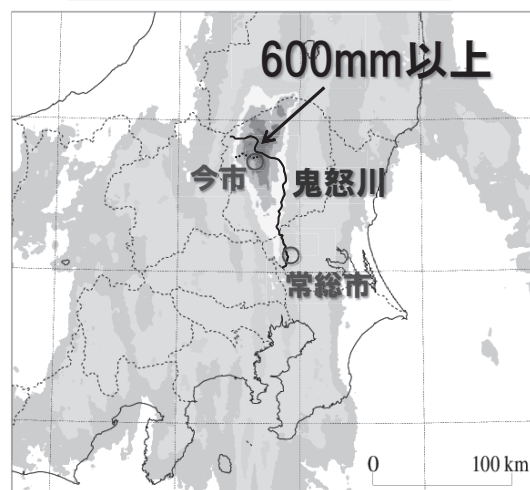
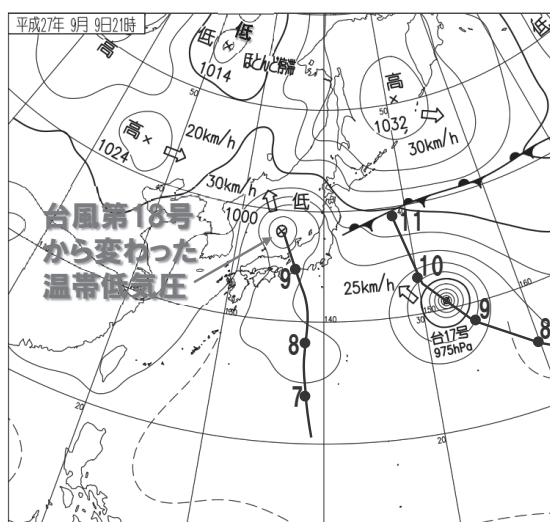
量的予測はできないが、線状降水帯の発生の可能性を示唆

関東での豪雨

48時間積算降水量(解析雨量)

速報地上天気図: 9月9日21時

9月8日21時~10日21時



50 100 200 300 400 500 600 (mm/2day)

鬼怒川水系に降水が集中し、上流部では500mm以上、
下流部でも300mm以上の降水量になっている

茨城県常総市の警報等発表状況

指定河川洪水予報(鬼怒川)

23:00

00:15

06:30

13:20

20:40

はん濫
危険情報

はん濫発生情報

はん濫注意情報

はん濫警戒情報

04:15

土砂災害警戒情報

8日13:29

注意報

16:36

警報

07:45

特別警報

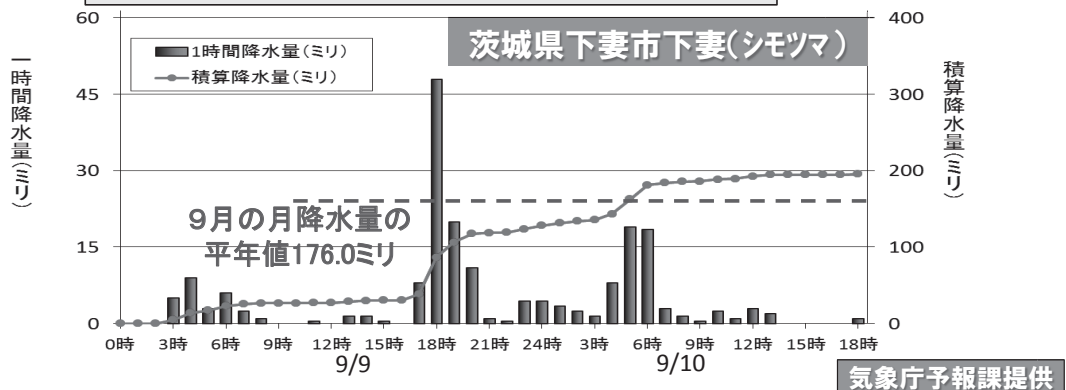
府県気象情報 ② ④ ⑥ ⑦ ① ② ③ ④

台風第18号に関する茨城県気象情報

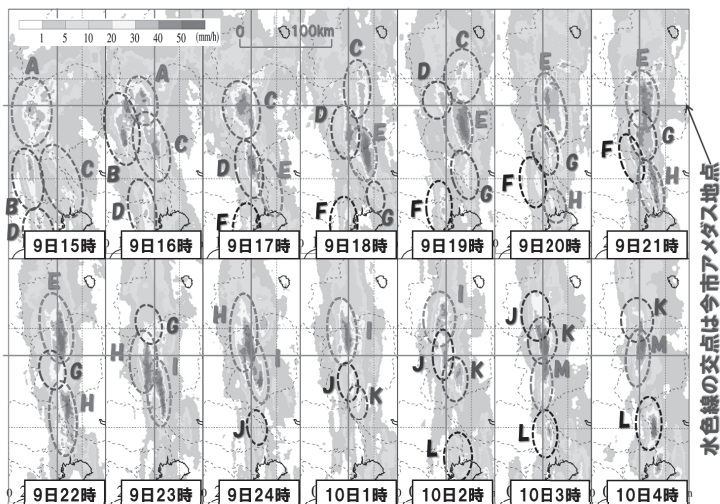
大雨と雷及び突風に関する

茨城県気象情報

県西地域を中心に、これまでに経験したことのないような大雨

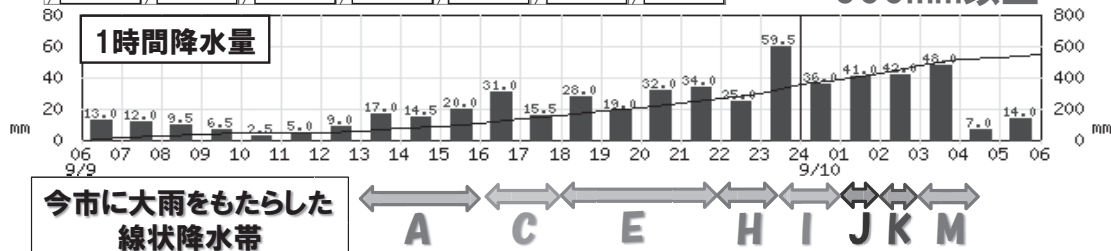


今市に大雨をもたらした複数の線状降水帯

関東南部の
異なる地点で発生

8つの線状降水帯が
通過することで、
今市アメダス地点で
は12時間以上強雨
が持続

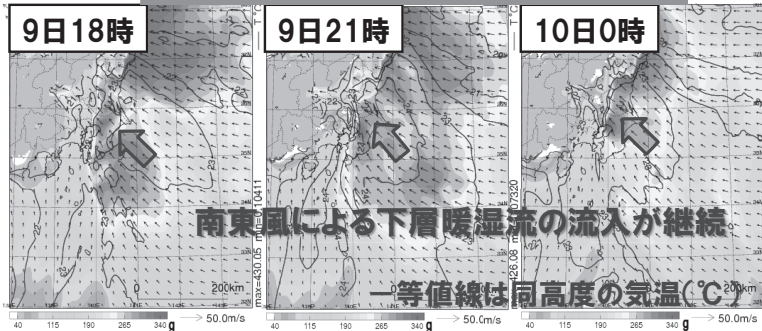
24時間降水量が
500mm以上



大気下層と上空の大気状態

気象庁メソ解析から作成

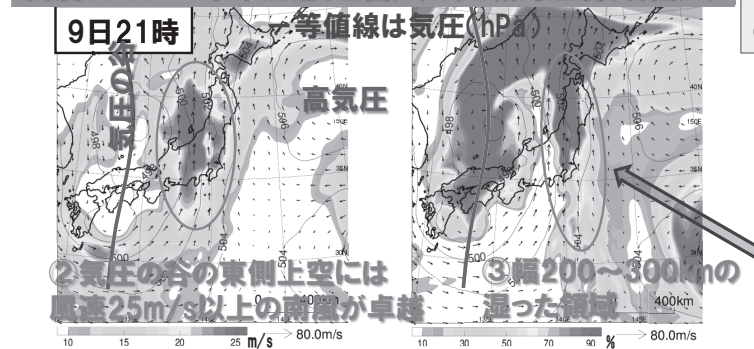
高度500mの水蒸気の流入量($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)



下層暖湿流は関東地方に、かなり幅を持って面的に流入

関東南部の異なる地点で線状降水帯を発生させた

高度5800mの水平風速(左図, m/s)と相対湿度(右図, %)



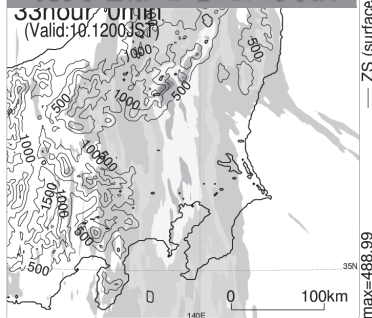
①南東風による下層暖湿流の流入+②+③

関東地方で、線状降水帯が発生しやすい条件を満たす

気圧の谷の東側の強風域に対応して存在していた上昇気流場

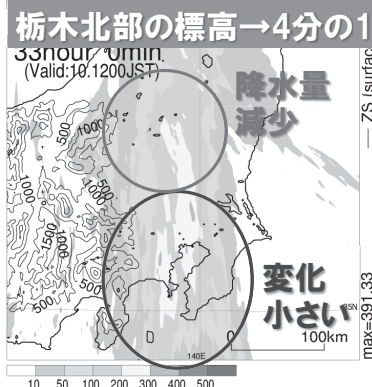
地形・日本列島の影響(数値シミュレーション)

現実地形を与えた実験



地形は局所的な降水を強化

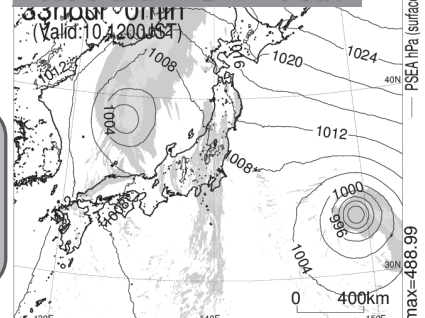
- ・栃木北部の降水量がかなり減少
- ・関東南部の降水の変化は小さい



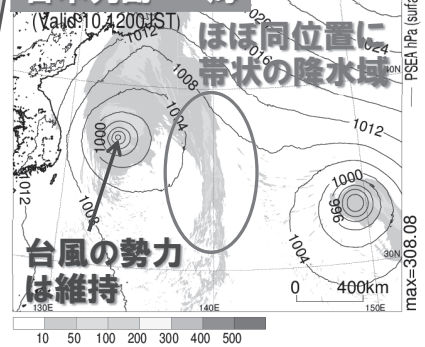
豪雨をもたらした“带状の降水域”をほぼ同じ位置に再現

“带状の降水域”の形成・維持は大規模な大気場が決定
地形の影響は小さい

現実地形を与えた実験



日本列島 → 海

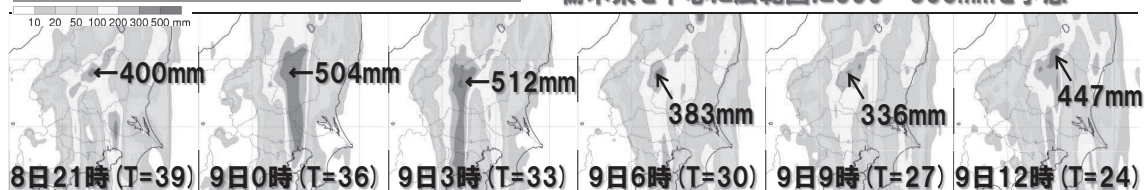


ほぼ同位置に带状の降水域

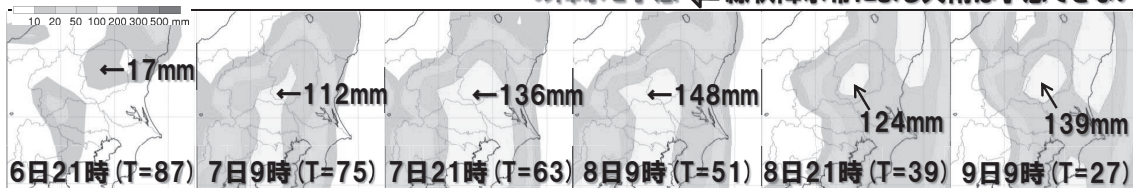
台風の勢力は維持

24時間積算降水量予測と線状降水帯発生条件

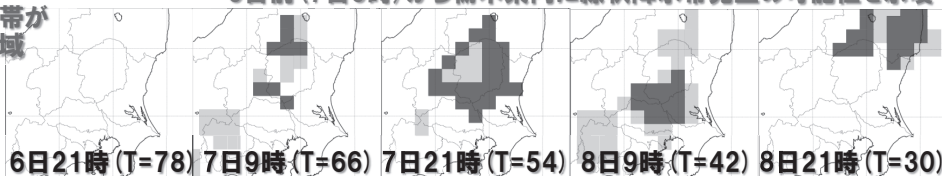
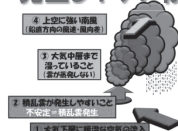
気象庁メソモデル(9日12時~10日12時)

9日12時以前の初期値でも、ばらつきがあるものの、
栃木県を中心に広範囲に300~500mmを予想

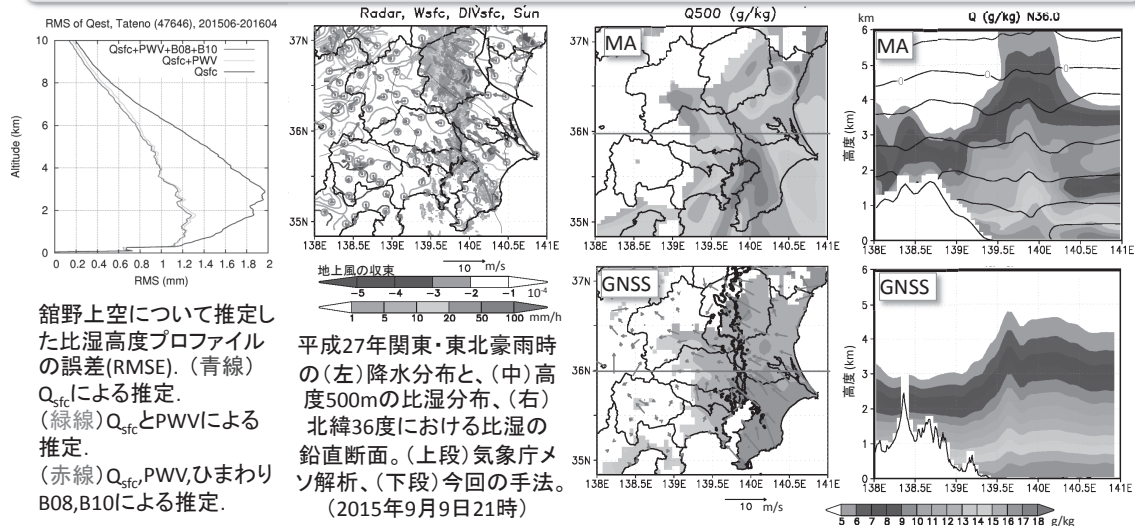
気象庁全球モデル(9日12時~10日12時)

7日9時(3日前)の初期値から、栃木県内に100mm以上の
降水を予想 ← 線状降水帯による大雨は予想できない

気象庁全球モデル(10日0時)

降水の量的予測はできないものの、
3日前(7日9時)から栃木県内に線状降水帯発生の可能性を示唆紫色:線状降水帯が
発生しやすい領域ひまわり8号水蒸気バンド、可降水量と地上比湿を用いた
水蒸気3次元分布の推定

- ▶ ひまわり8号に搭載された3つの水蒸気バンドは対流圏中・上層、可降水量は高度3-5km付近、地上比湿は対流圏最下層の比湿と相関が高い特徴を利用し、2015年6月~2016年5月の高層観測データとひまわり8号水蒸気バンドの輝度温度を用い、50m間隔各層の比湿を推定する重回帰式を作成した。
- ▶ 従属データの検証の結果、高度10kmまで、RMSで1.2g/kg未満の一致度を示すことがわかった。
- ▶ 回帰式を国土地理院のGNSS観測網に適用し、関東・東北豪雨の水蒸気解析を行ったところ、南北に連なった降水域の東側で水蒸気が厚く、西側で薄いなど、気象庁メソ解析と共通する特徴が見られた。



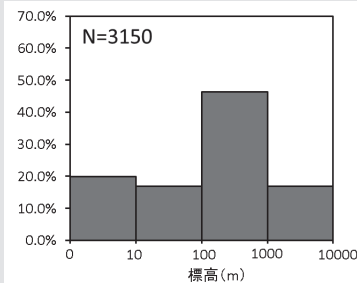
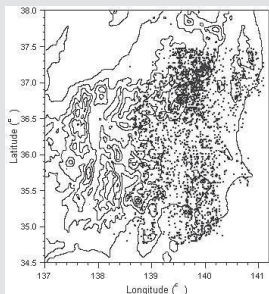
館野上空について推定した比湿高度プロファイルの誤差(RMSE)。(青線) Q_{sfc} による推定。(緑線) Q_{sfc} とPWVによる推定。(赤線) Q_{sfc} 、PWV、ひまわりB08,B10による推定。

平成27年関東・東北豪雨時の(左)降水分布と、(中)高度500mの比湿分布、(右)北緯36度における比湿の鉛直断面。(上段)気象庁メソ解析、(下段)今回の手法。(2015年9月9日21時)

メソ対流系の統計的な特徴

目的: 国土交通省XバンドMPLレーダネットワークのデータを活用し、平成27年9月関東・東北豪雨をもたらしたメソ対流系の特徴を記述する。

解析期間: 2015/9/8 21JST~9/10 15JST

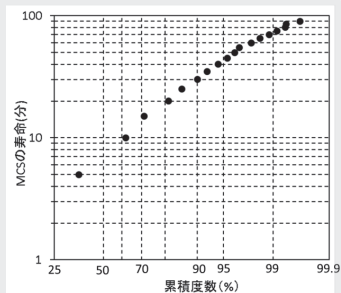
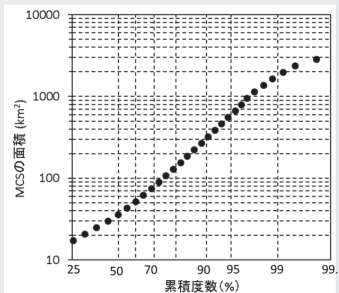


メソ対流系の出現特性

- 期間中に3150個のメソ対流系が発生
- 63%は標高100m以上の山地で出現

面積と寿命の統計

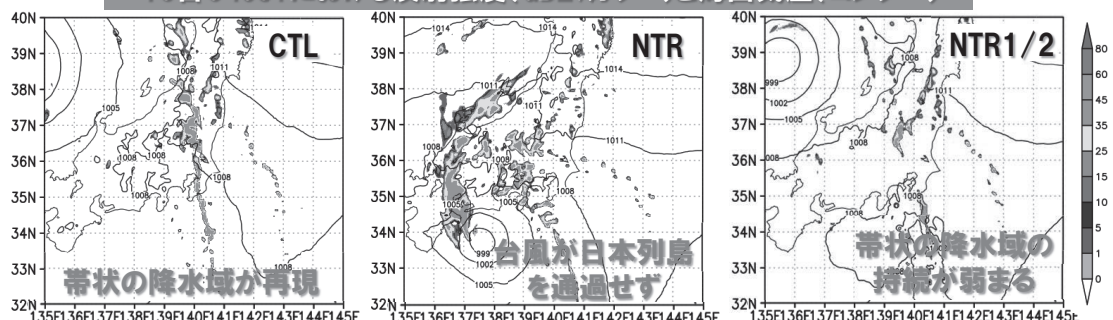
- メソ対流系の面積・寿命とも概ね対数正規分布に従う。
- 50パーセンタイルの面積は約30km²、50パーセンタイルの寿命は約8分である。



平成27年9月関東・東北豪雨における上層トラフの影響

- ✓ 豪雨域の西に存在した上層トラフの豪雨への影響を調べるために、メソ数値モデル(WRF)を用いた数値シミュレーションと感度実験を行った。
- ✓ 標準実験(CTL)は豪雨を生じた線状降水系をある程度現実的に再現した。
- ✓ PV-inversionにより上層トラフを除いた感度実験(NTR)と上層トラフの強度を1/2にした実験(NTR1/2)を行い、標準実験(CTL)の結果と比較した(下図)。
- ✓ NTRでは、台風18号が日本列島を縦断せず、関東での大雨は起こらなかった。
→上層トラフは台風18号の北進に重要な役割を演じていた。
- ✓ NTR1/2では、台風18号は日本列島を通過したが、降水量は少なくなった。
→台風18号が弱まり、下層水蒸気の流入も弱まることが原因と思われる。

10日04JSTにおける反射強度(dBZ:カラー)と海面気圧(コンター)

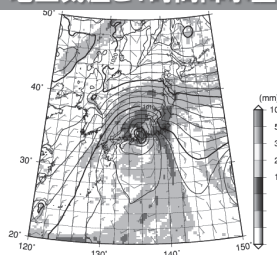


平成27年9月関東・東北豪雨の総観場の特徴

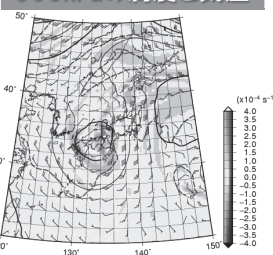
9日12時

- 西から移動してきた総観規模のトラフの南縁を回り込む南～南西風(右上図)
- 水蒸気帯の東側、台風17号との間に形成されリッジに伴う南東～南風(右下図)
- 大規模な南北にのびる降水帯とそのなかに形成される複数のメソスケールの線状降水帯
- 台風18号の東側から南側に延びる帯状の水蒸気帯

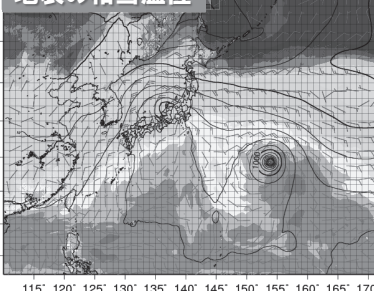
地上気圧と1時間降水量



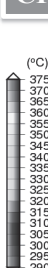
500hPaの渦度と気温



地表の相当温位



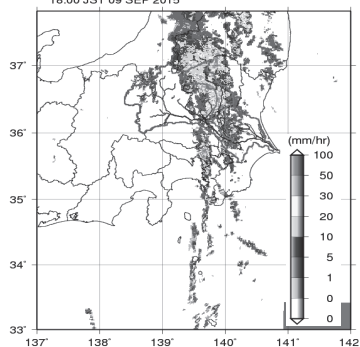
CReSS



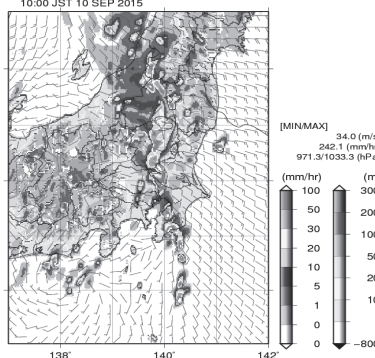
雲解像モデルCReSSを用いた再現実験

CReSS

JMA RADAR
18:00 JST 09 SEP 2015

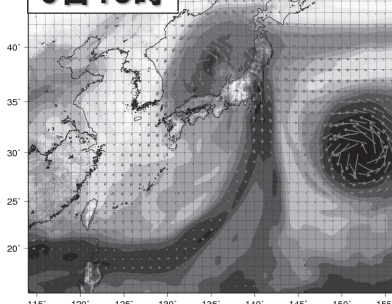


SEA LEVEL PRESSURE, SURFACE WIND, AND RAINFALL(R+G+S)
10:00 JST 10 SEP 2015

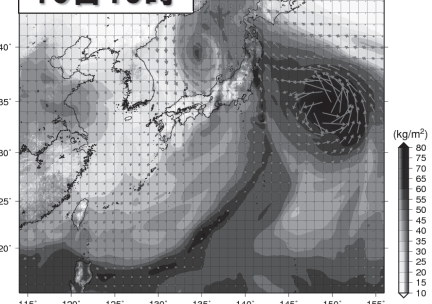


線状降水システムはよく再現され、その降水強度は観測されたものに対応。一方で鬼怒川流域に停滞する時間が観測に比べて短い。

9日18時



10日19時



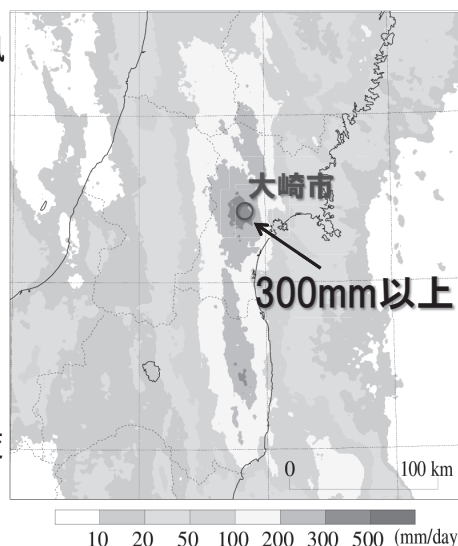
台風18号の東側から南側に延びる帯状の水蒸気帯(鉛直積算水蒸気量)

東北地方での豪雨の発生要因

1. 宮城の中央部に帯状の強い降水、成瀬川支流で堤防が決壊し大きな災害となった。
2. 宮城の場合も線状降水帯発現の要件はおよそ満足していた。
 - ✓ 大気中層には、台風18号に向かう地強い南風が吹いていた。
 - ✓ 台風18号の影響で強い湿潤不安定の状態にあった。
 - ✓ 相対的に下層風が弱く鉛直シア認められた。
3. 次のような特殊な要件が加わっていた。
 - ✓ 非対称な構造を持つ台風17号が効果的に水蒸気を輸送した。
 - ✓ 台風17号は線状降水帯の側面(東側)から水蒸気を供給した。
 - ✓ 台風の北上が降水帯に非定常な効果(時間変動)をもたらした。
 - ✓ 基本場の傾圧性が降水帯に与えた影響も無視できない。

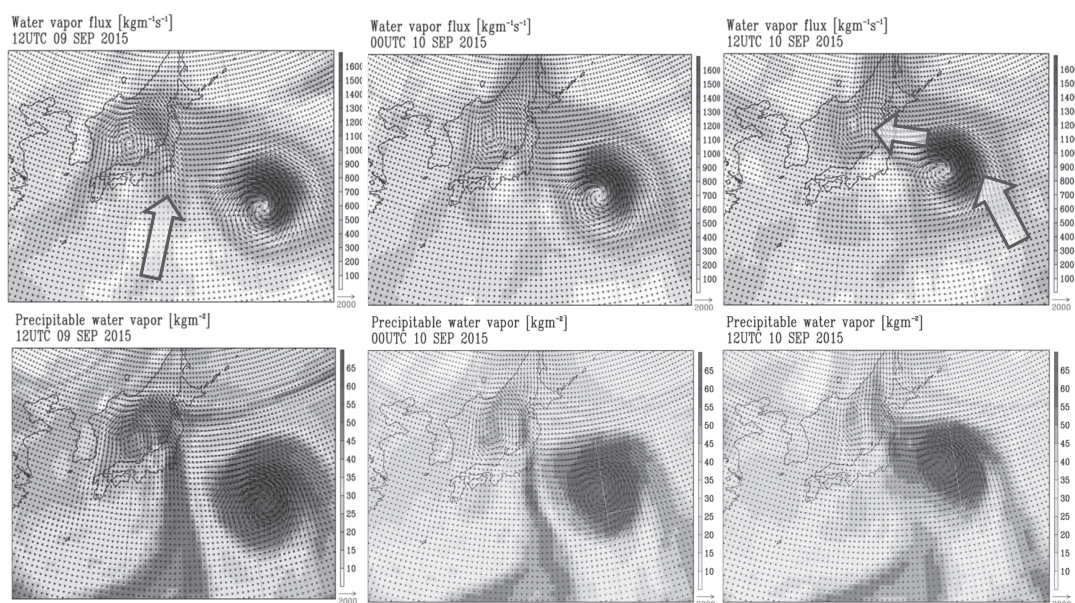
24時間積算降水量(解析雨量)

9月10日9時～11日9時



台風17号、18号の連携によって形成された降水帯

鉛直積算水蒸気輸送量(上)と鉛直積算水蒸気量(下)



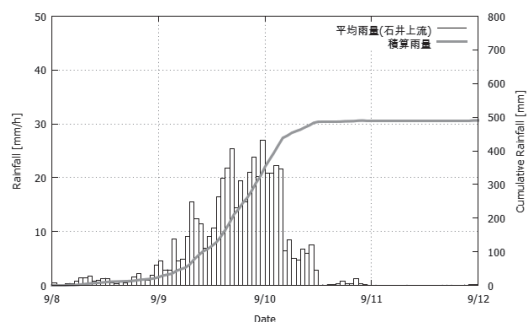
9月9日21JST

9月10日09JST

9月10日21JST

水文グループ

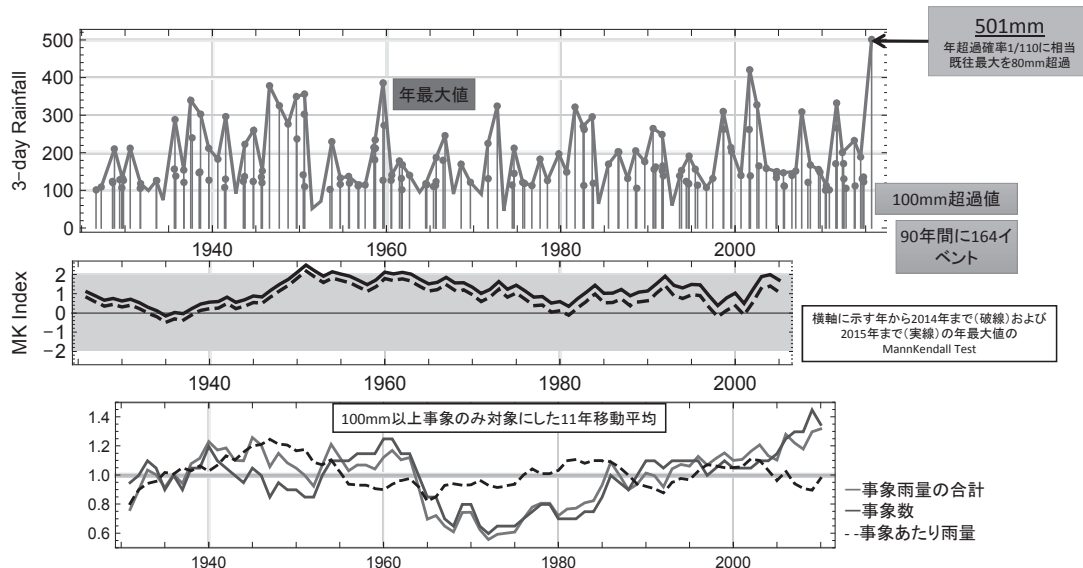
京都大学防災研究所 田中茂信
角 哲也
日本気象協会 佐山敬洋
本間基寛



石井上流域の積算雨量と平均雨量の時系列

- 1) 鬼怒川石井上流流域平均雨量の時系列・極値解析
大雨の頻度，降雨継続時間と確率分布の関係など
- 2) 解析雨量の総雨量分布と国交省・気象庁アメダス資料によるDD解析
総雨量分布とDD解析結果の関係
- 3) 鬼怒川上流域における降雨流出現象の解析
降雨特性と流出特性の関係
- 4) ダムの効果
上流ダムがない場合の下流ダムへの影響は？石井地点の推定ピーク流量はいかほどか？

石井上流流域平均3日降雨量の時系列



年最大値は1930年代後半から1940年代まで比較的大きい時期がある。
1926年から全体を見ると，有意な増加傾向にはない。
100mm超過事象の合計は1970年過ぎから増えているが，これは主に事象数が増えていることによることがわかる。

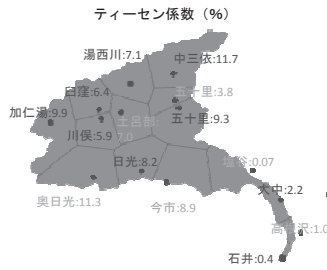
年最大値と閾値超過資料による確率評価の比較(1979-2015)

用いた雨量計

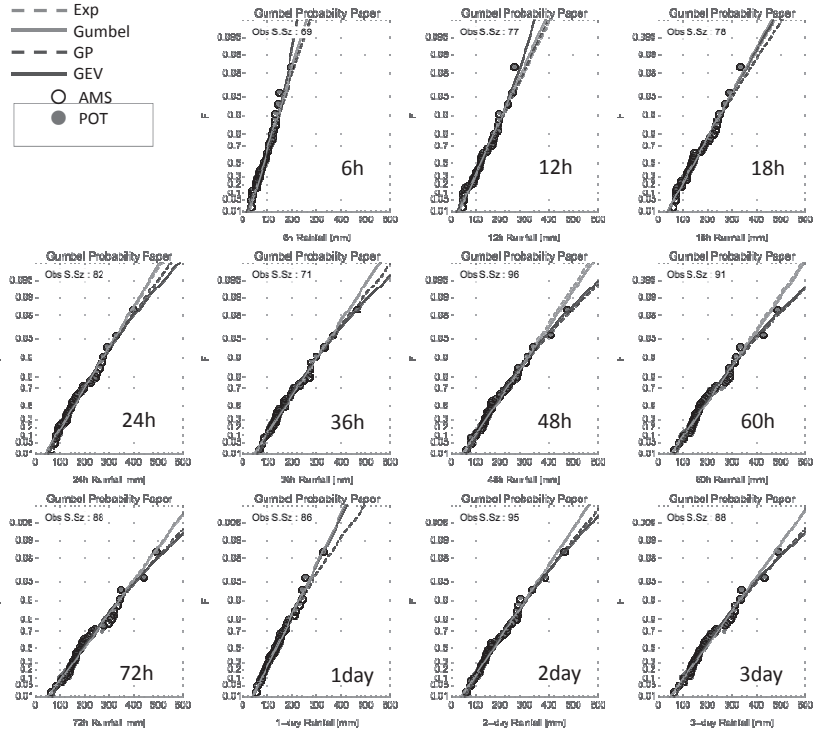
国土交通省 9

気象庁 6

資料収集期間：1979～2015



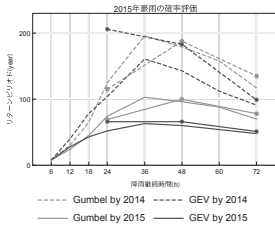
1. 6hと12hのGPは上限がないが、GEVは上限がある。
2. 18hと1dayについてはExp, Gumbel, GEVはほぼ一致、GPは上限のないタイプ。
3. これらより長い継続時間ではGpとGEVは上限のないよりTailの厚い分布になっている



年最大値(1979-2014)と年最大値(1979-2015)の比較

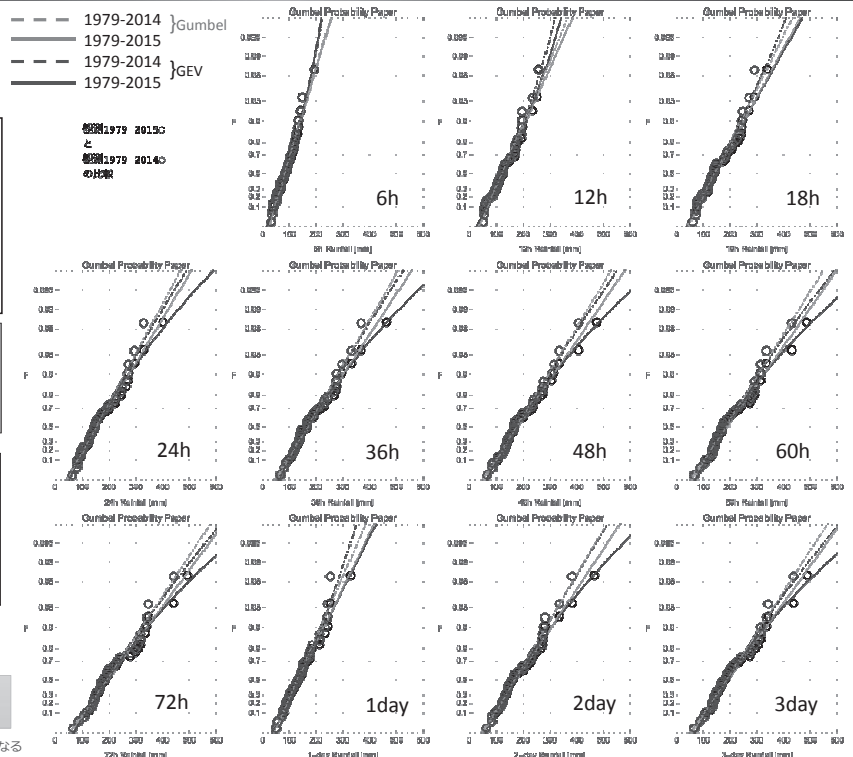
- 1) 6hと12hのGEVは上限がある
- 2) 18hと1dayは2014年までは上限があるタイプだが2015年資料が加わると上限のないタイプに変わる。
- 3) これらより長い継続時間ではGEVの上限はないが、よりTailの厚い分布になっている

長い降雨継続時間で既往最大値を大きく更新したため、長い降雨継続時間の確率分布のTailが厚くなった。

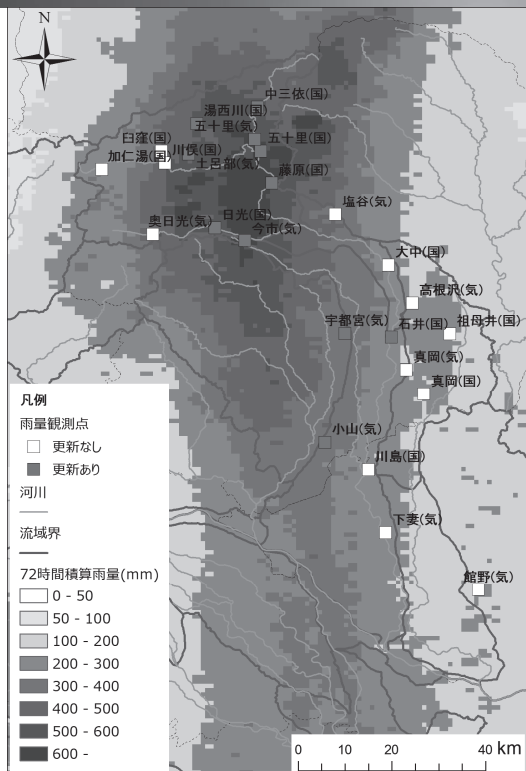


2014年までの資料では36hの記録が顕著に更新されたと言える

注) 国土省の確率評価とは資料や対象期間が異なる



72時間（9/8 0:00～）積算雨量分布図



(解析雨量)

DD解析対象24地点

(国交省13地点)

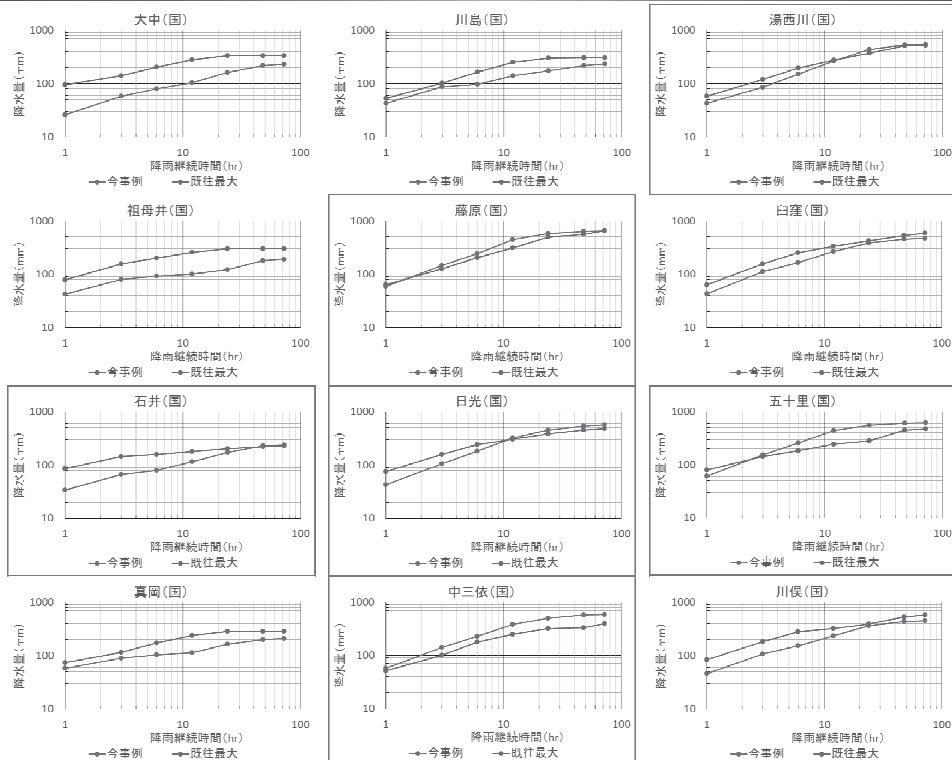
大中, 川島, 湯西川, 祖母井, 藤原, 臼窪, 石井, 日光, 五十里, 真岡, 中三依, 川俣, 加仁湯

(気象庁11地点)

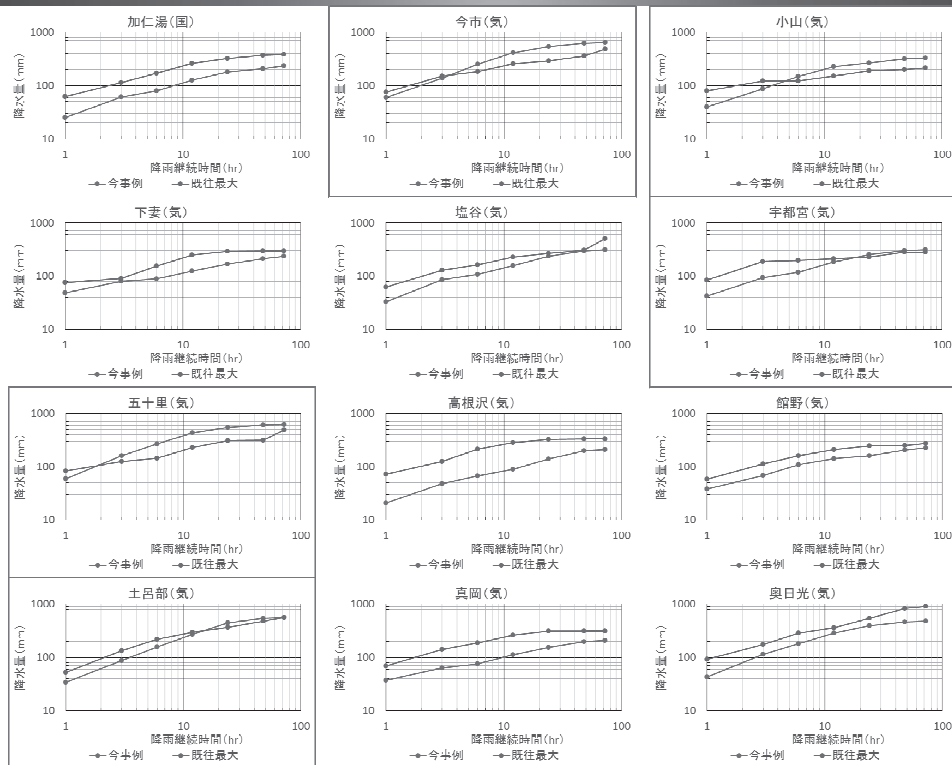
今市, 小山, 下妻, 塩谷, 宇都宮, 五十里, 高根沢, 館野, 土呂部, 真岡, 奥日光

雨量観測点の「■ 更新あり」はDD解析で既往最大雨量を超過した地点を示す

DD解析結果(1)



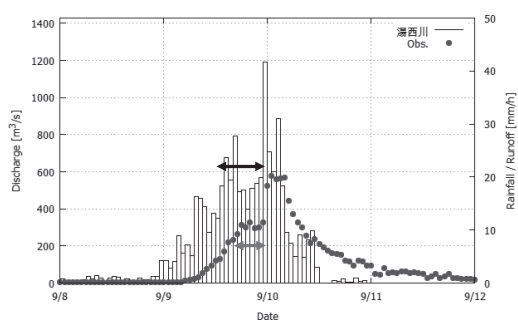
DD解析結果(2)



上流ダム流域における降雨時系列と流出高

流出高 (= 流量 / 流域面積)

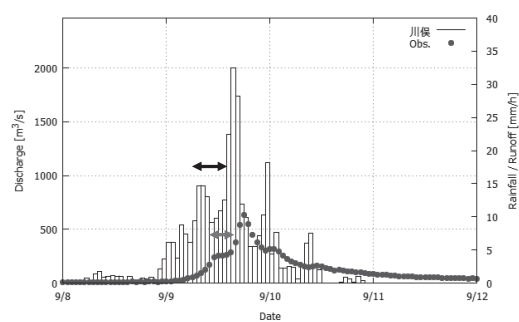
湯西川ダム流入量



降雨: 9/9 13時までに140mmの総雨量, 13時から23時まで約20 mm/hの降雨が10時間継続する

流出(ダム流入): 9/9 18時頃に約300 m³/s (流出高: 10 mm/h)に達し、6時間ほぼ一定

川俣ダム流入量



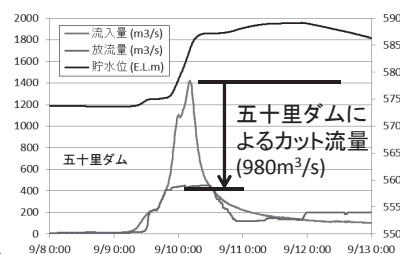
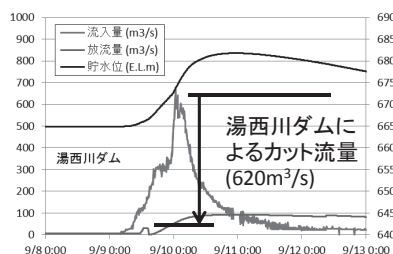
降雨: 9/9 6時から14時まで約10 mm/hの降雨が8時間継続する

流出(ダム流入): 9/9 11時に約250 m³/s (流出高: 5 mm/h)に達し、4時間ほぼ一定

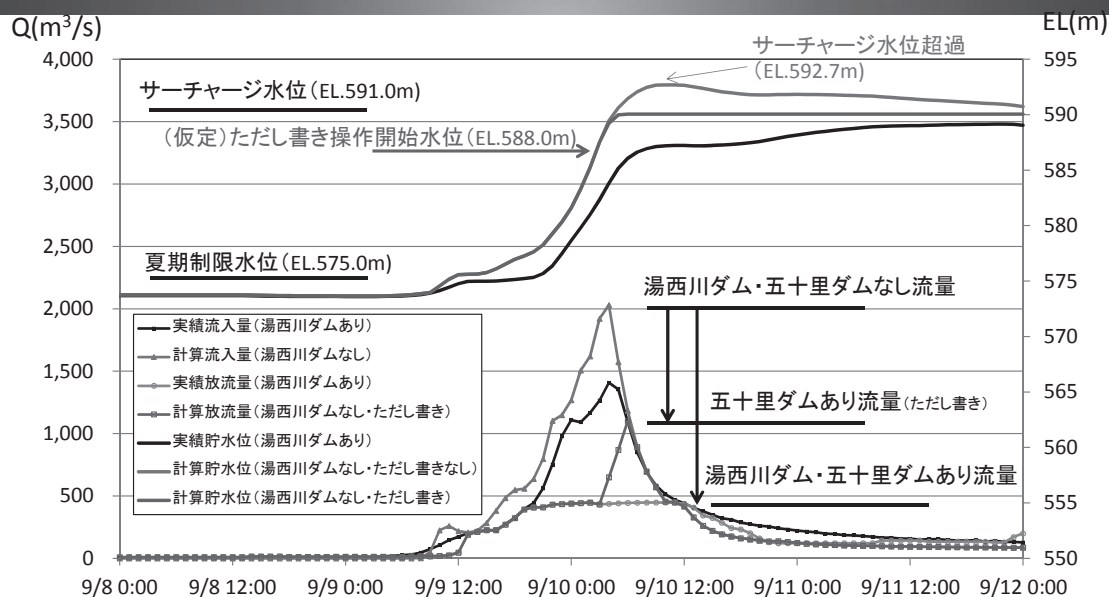
ダムの効果について

4ダム連携の効果と課題(特に、上流ダム(湯西川ダム、川俣ダム)が下流ダム(五十里ダム、川治ダム)へ与えた影響検証)

もし、湯西川ダム(2012年完成)が無かったら、五十里ダムの洪水調節操作はどう影響を受けたか？



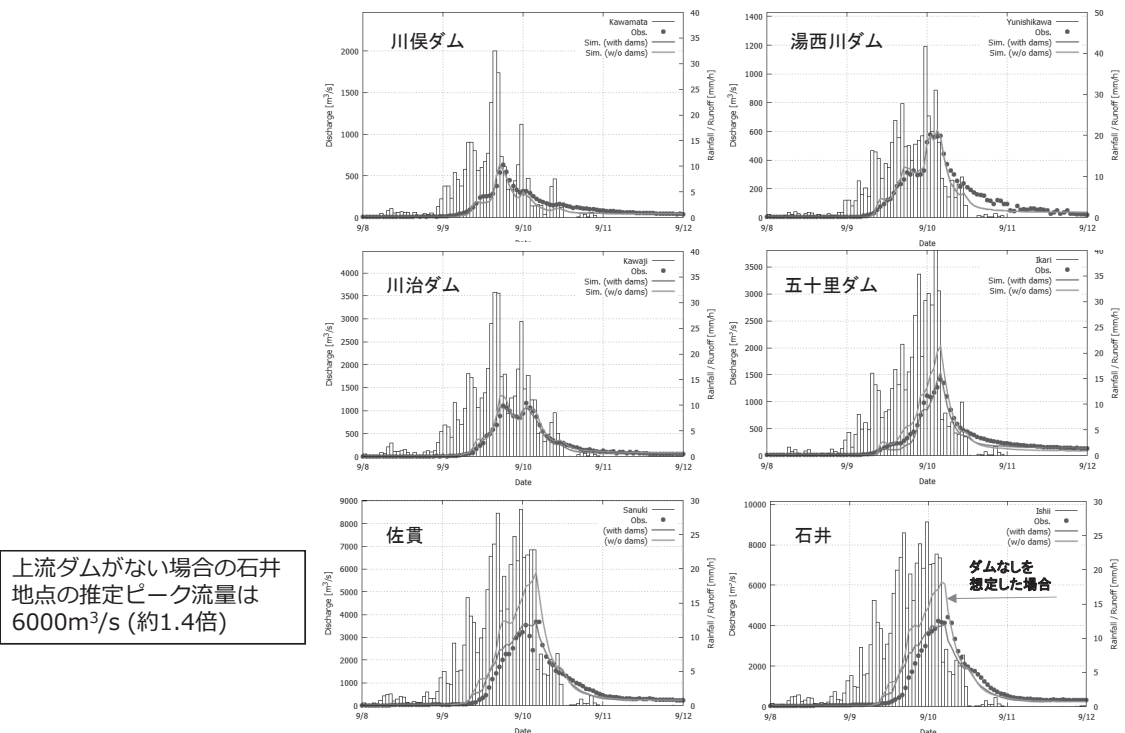
五十里ダムに対する湯西川ダムの効果



湯西川ダムの洪水調節が無ければ

- 五十里ダムへの最大流入量が増大(約1,400m³/s → 約2,000m³/s)
- ただし書き操作(異常洪水時防災操作)に移行することにより、五十里ダムの最大放流量が増大(約450m³/s → 約1,100m³/sに倍増)

2015洪水の再現とダムがなかった場合の計算



まとめ

- 1) 鬼怒川石井上流流域平均雨量の時系列・極値解析
大雨の頻度が1970年台以降増加。長い降雨継続時間で既往最大値を大きく更新したため、長い降雨継続時間の確率分布のTailが厚くなっている。
降雨継続時間36hでの記録更新が顕著である。
- 2) 解析雨量の総雨量分布と国交省・気象庁アメダス資料によるDD解析
24カ所中11カ所で、何らかの降雨継続時間で既往最大雨量を超過した。これらの地点は積算雨量が多い上流域に集中している。
- 3) 鬼怒川上流域における降雨流出現象の解析
鬼怒川上流域（石井地点上流）では、9月9日14時から10日4時にかけて、約20 mm/hの強い雨が14時間にわたって続いた。
長時間一定の降雨に伴い、流出高は降雨強度の約半分という定常の状態に達していた。基岩への浸透を反映し、側方流の透水係数を大きくとることでこの状況を再現できた。
- 4) ダムの効果
上流ダムがない場合の石井地点の推定ピーク流量は6000m³/s (ダムがある場合の約1.4倍)と推定された。

地質・地盤グループ

【研究分担者】

田中 規夫 埼玉大学・教授
村上 哲 福岡大学・教授
佐藤 浩 日本大学・准教授
竹村 貴人 日本大学・准教授
清木 隆文 宇都宮大学・准教授
長田 昌彦 埼玉大学・准教授(G取り纏め)

【目的】

- 1) 地形・地質的な観点から、破堤が生じた箇所の特徴を捉え、今後の洪水対策に資するデータを提供すること。
- 2) 地盤沈下の大きさを定量的に評価し、浸水域との関係を検討すること。
- 3) 大規模出水時において、堤防の破堤に至る過程とその機構を把握し、今後の洪水対策に資するデータを提供すること。

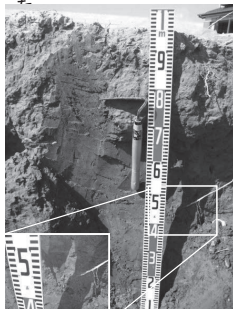
流域の地形調査のまとめ 佐藤浩(日本大学)

破堤した上三坂と越水した若宮戸の地形的特徴

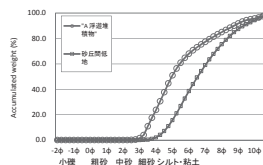
1. 上三坂は、過去の洪水流により運ばれて堆積した自然堤防からなる。
2. 若宮戸は、寄洲から北西の季節風により吹き上げられた砂で形成された河畔砂丘が載る(「治水地形分類図を参照」)。
3. いずれの地区も、自然堤防が河道に沿って分布しているのではなく、河道に直交して扇状に広がる。これは、かなり古い時代から度重なる洪水によって自然堤防や河畔砂丘が破堤して、河道からの氾濫堆積物が河道から直交する向きに扇状に堆積してきたことを示唆する。
4. 今回の調査からは確認できなかったが、後背低地からの一般的な自然堤防の高さよりも、上三坂の自然堤防の高さが比較的高いことから、上三坂でも自然堤防の上に河畔砂丘が載ることが想定される。

今回の洪水の氾濫堆積物の粒度分析

1. 上三坂では、破堤地点から数100m遠ざかると中砂が卓越するが、破堤地点の落堀に近い地点では中砂に細砂が混じり、自然堤防堆積物の洗掘土砂が影響していることが示唆された。
2. 若宮戸では、氾濫水の流入の直撃を受けている地点では浮遊砂堆積物に細砂が混じるが受けていない場所では混じり具合が少ないことが判った。



年代測定した自然堤防の堆積物(上三坂地区)

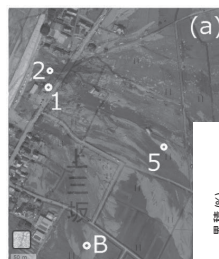


自然堤防堆積物の年代測定の結果

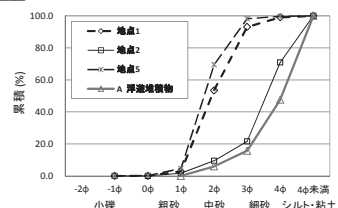
1. 上三坂の自然堤防堆積物中に、420～537ADの年代試料を得た。その上に河畔砂丘が載るのなら、河畔砂丘の形成の資料にもなる。河畔砂丘の形成後に、度重なる洪水で破堤したとすれば、かなり体積が大きいことが想定される。扇状に広がる自然堤防の給砂源も河畔砂丘に求められる可能性がある。



治水地形分類図(国土交通省)左:若宮戸地区、右:上三坂地区
×印が破堤あるいは越流地点。黄色が自然堤防、黄色に茶色の半円が河畔砂丘。自然堤防の東側の薄緑色が後背低地。



今回の洪水の氾濫堆積物の分析結果と、その採取地点

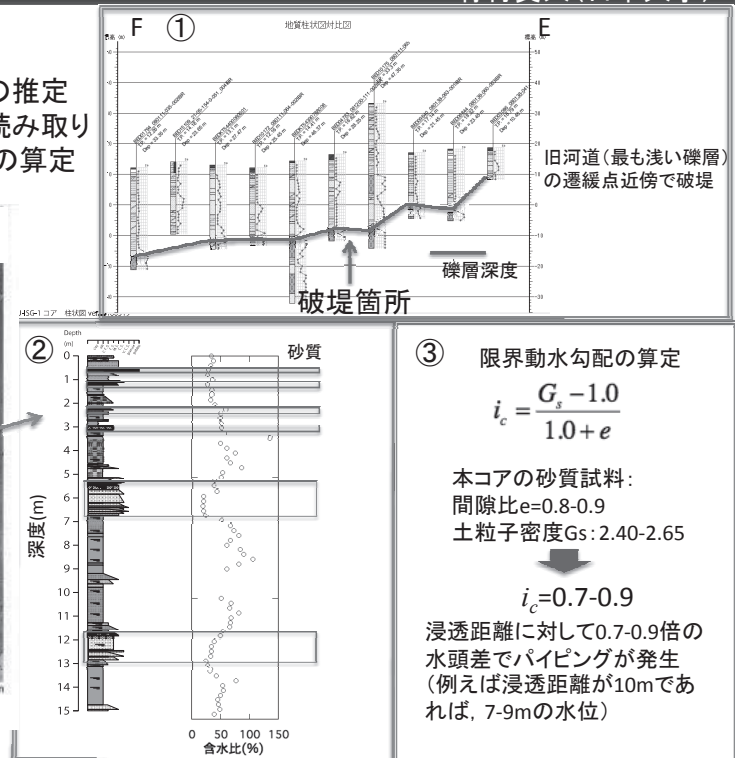
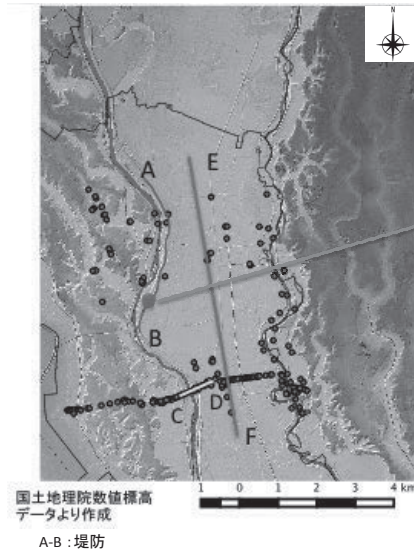


鬼怒川沿岸域の地質および環境変遷

竹村貴人(日本大学)

目的

- ①ボーリングデータからの旧河道の推定
- ②ボーリングコアから洪水履歴の読み取り
- ③物理量からみたパイピング条件の算定

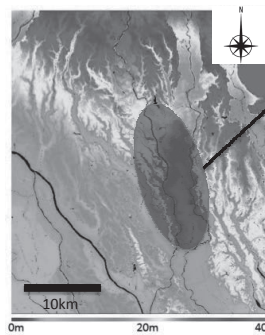
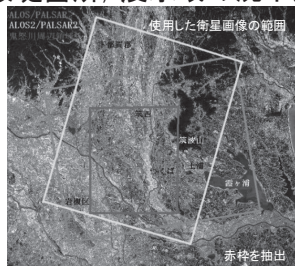


鬼怒川沿岸域の地質および環境変遷

竹村貴人(日本大学)

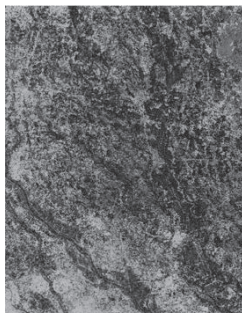
目的

干渉SAR(合成開口レーダー)による
破堤箇所, 浸水域の沈下履歴の解明



主な沈下エリア
(4-6cm/年)

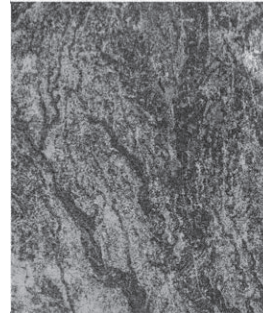
- ・砂層を多く挟んでいるため, 圧密は早いと考えられる
- ・沈下は限られた地域(水海道付近から下妻付近)で定常的に進行しているものと考えられる。



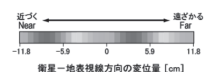
2006 Sep. 23-2007 May 11
(230 日間): 3-4cm沈下



2011 Jan. 4 - Apr. 6
(92日間) 2-3cmの沈下 (東側)



2014 Sep. 13 - 2015 Feb. 14
(154 日間): 4cm沈下

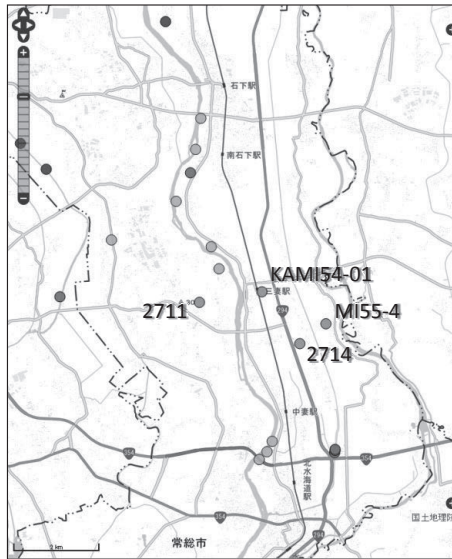


ここでの沈下は地盤が衛星から遠ざかった距離を意味している。

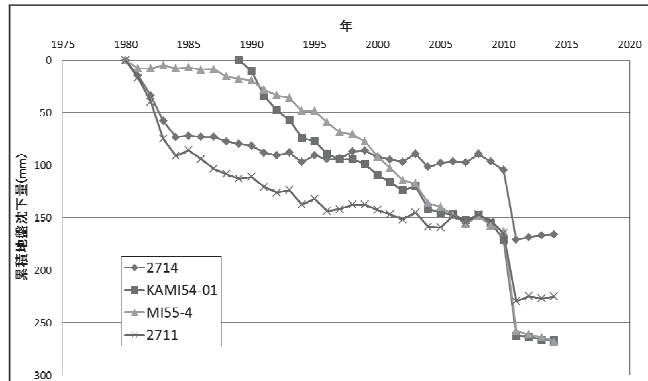
(注:衛星軌道のずれによる補正は作業途中)

■ 調査概要：鬼怒川沿岸域の地盤特性と地盤沈下

村上 哲(福岡大学)



※地理院タイル(標準地図)を加工して作成



※沈下量データは茨城県地盤沈下調査報告書(茨城県生活環境部環境対策課)を利用

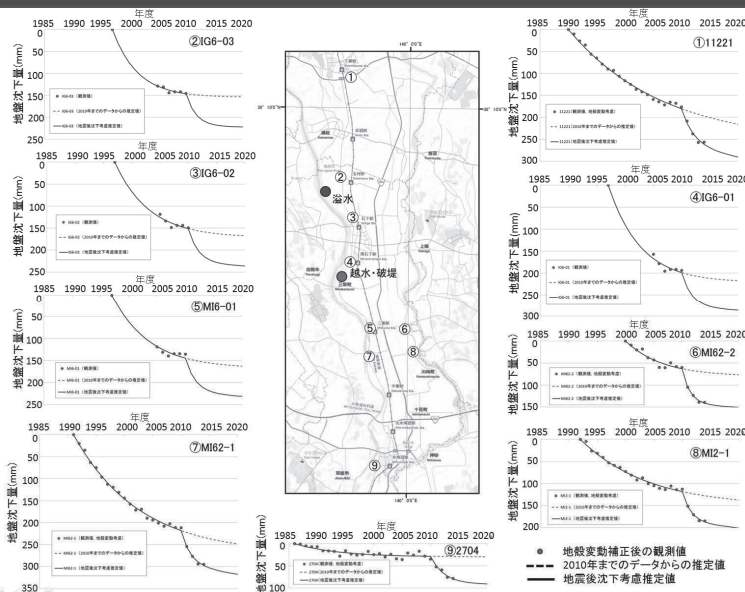
累積沈下量は最大で267mm。

地盤沈下の主たる要因は地下水位の低下と季節的変動。2011年に大きく沈下しているのは東北地方太平洋沖地震による地盤沈降と地震による地盤沈下が付加されたためと考える。

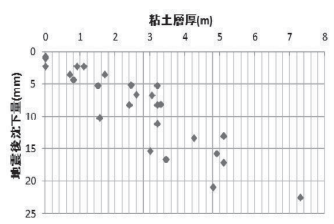
鬼怒川沿岸域の地盤沈下観測記録のデータ収集・データベース化を行い、対象地域の地盤沈下特性を把握する。さらに地盤情報データベースを利用し、対象地域の地盤特性と地盤沈下との関係性を明らかにし、洪水氾濫時における地盤沈下量の影響を示す。

■ 要点：東北地方太平洋沖地震後加速化した地盤沈下

村上 哲(福岡大学)



東北地方太平洋沖地震によって付加的に後の地盤沈下量はここ5年間で5～10cm程度大きくなっている。その大きさには、粘土層層厚と正の相関がみられることから、粘性土層の圧縮による沈下が原因で生じていると考える。



地盤沈下観測結果に基づいて、村上らが提案している観測的地盤沈下予測式を用いて推定した結果、地盤沈下の主たる要因は地下水の利用であるが、これに付加して平成23年東北地方太平洋沖地震により東日本で生じた広域な地殻変動による地表面の沈降とその後の隆起と、粘性土層が地震のような繰返し荷重が作用することより発生した過剰間隙水圧の消散による沈下が生じていることが分かった。

■ まとめ:

村上 哲(福岡大学)

- ・洪水氾濫における浸水域と浸水深は、地盤高さの影響を受けることが知られている。
- ・当該地域は地盤沈下地域であり、これまでは地下水の汲み上げに伴う地盤沈下が継続的に生じていた。
- ・東北地方太平洋沖以降、地下水汲み上げに伴う地盤沈下のトレンドよりも大きな沈下量が生じているが、地震による粘土層の圧縮によるものと推測し、地震後の沈下量と粘土層の層厚は正の相関がみられたことから、粘土層が地震により影響を受け、付加的な沈下が生じたと思われる。
- ・地震後およそ5年間で10cm程度の付加的な沈下が生じたことから、鬼怒川水害における浸水域と浸水深は、地盤高さの影響を受けたと推測される。

地震により加速する沈下量は粘性土層が存在する場合は注意を要する。熊本平野は常総市のような内陸部の軟弱地盤と異なりより層の厚い粘土層が堆積していることから、平成28年熊本地震における地盤沈下の加速化には注意を要すると考えられる。

落堀特性・堤防周辺におけるエネルギー減勢効果

埼玉大・田中規夫

目的1) 大規模出水時において、堤防の破堤に至る過程とその機構を把握することは、今後の防災・減災対策上、非常に重要

- ・平成27年9月関東・東北豪雨の鬼怒川

破堤地点付近では、複雑な洗掘形状

- ・茨城県内の宮戸川・西仁連川・八間堀

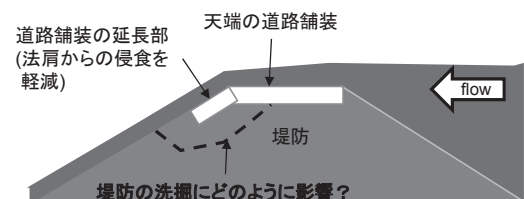
川の破堤事例も含め、破堤現象のメカニズム、落堀の個数、破堤幅や破堤部の洗掘領域の長さなどの基礎データを水理量と関連付ける



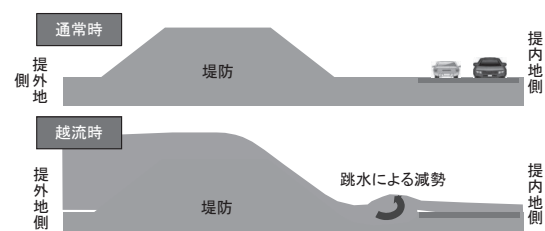
目的2) 堤防天端のアスファルト舗装道路が

裏法面の侵食に及ぼす影響

- ・堤防天端のアスファルト舗装道路は最終的に流失したが、越流直前の浸潤線の進行および越流時の浸透流の状況を模型実験により把握
- ・裏法面からの侵食軽減のためアスファルト舗装道路を裏法面まで伸ばすことが有効。その際の堤防の侵食過程に及ぼす影響を模型実験より把握。



目的3) 堤内側道路は最終的には破壊されたが、エネルギー減衰にどのように寄与したのかを基礎実験により、明らかにする。→本研究では将来的な拡張も含めて二線堤の効果として把握した。



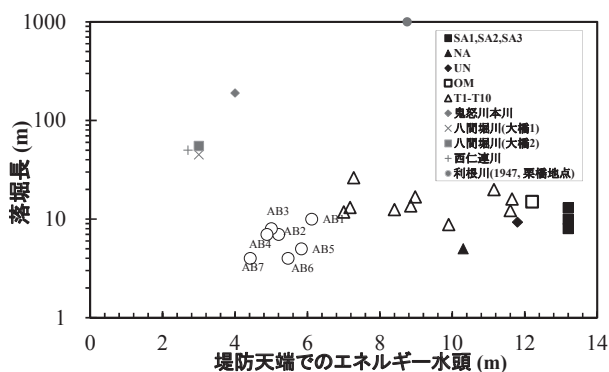
目的1) 落堀特性に関する現地調査と水理実験

1) 現地調査

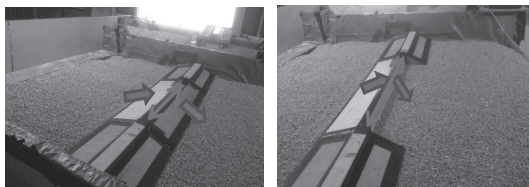
・宮戸川、西仁連川、八間堀川、鬼怒川ともに越流が二股に分かれる現象が確認された。流速が遅くよどんだ状態での決壊の共通した現象として注目される。鬼怒川の初期決壊幅も類似した値であった。

・破堤幅は鬼怒川を除いて、小さめの値となった。鬼怒川は越流・決壊の過程で間の島状地形は消滅したこと、河川からの氾濫水の供給が続いたため、破堤幅は他地点と比べて大きめの傾向であった。

・決壊で生じた洗掘領域の長さは、非決壊のおっぼりより1オーダー長い

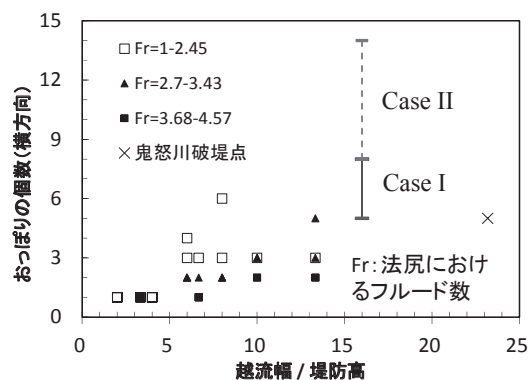


2) 水理実験: 横断方向の落堀形成メカニズム
越流幅／堤防高で整理した。現地における複雑なおっぼり形状との比較を行った。



Case I (越流初期の洗掘以前を仮定)

Case II (裏法面が天端中央付近まで洗掘された形状を仮定)



目的2) 堤防天端のアスファルト舗装道路が裏法面の侵食に及ぼす影響

1) 水理模型実験条件

【堤防条件】

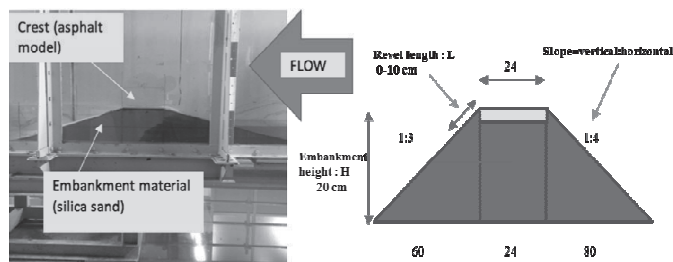
堤防高: 20 cm, 法勾配: 1:4 (表), 1:3 (裏)
天端幅: 24cm, 堤防材料: 珪砂6号 ($d_{50}=0.3\text{mm}$)
(※10cm層ごとに10kgの鉄板で締め固め)

【水理条件】

・表側の水位上昇速度 1cm/min
・最大越流水深: 0.5 cm

【舗装道路延長長さL】

0cm (現状), 2cm, 4cm の3ケース

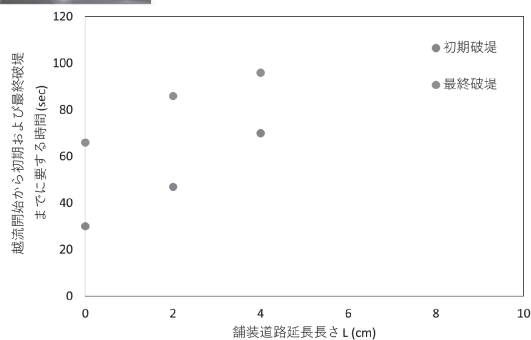
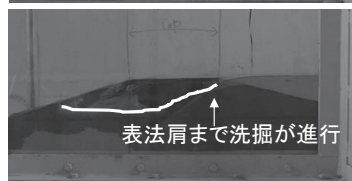


2) 裏法肩部の舗装道路延長による堤防侵食の遅延効果

L=2cmのケースにおける
初期破堤時(上: 裏法肩
まで洗掘が進行)の状況



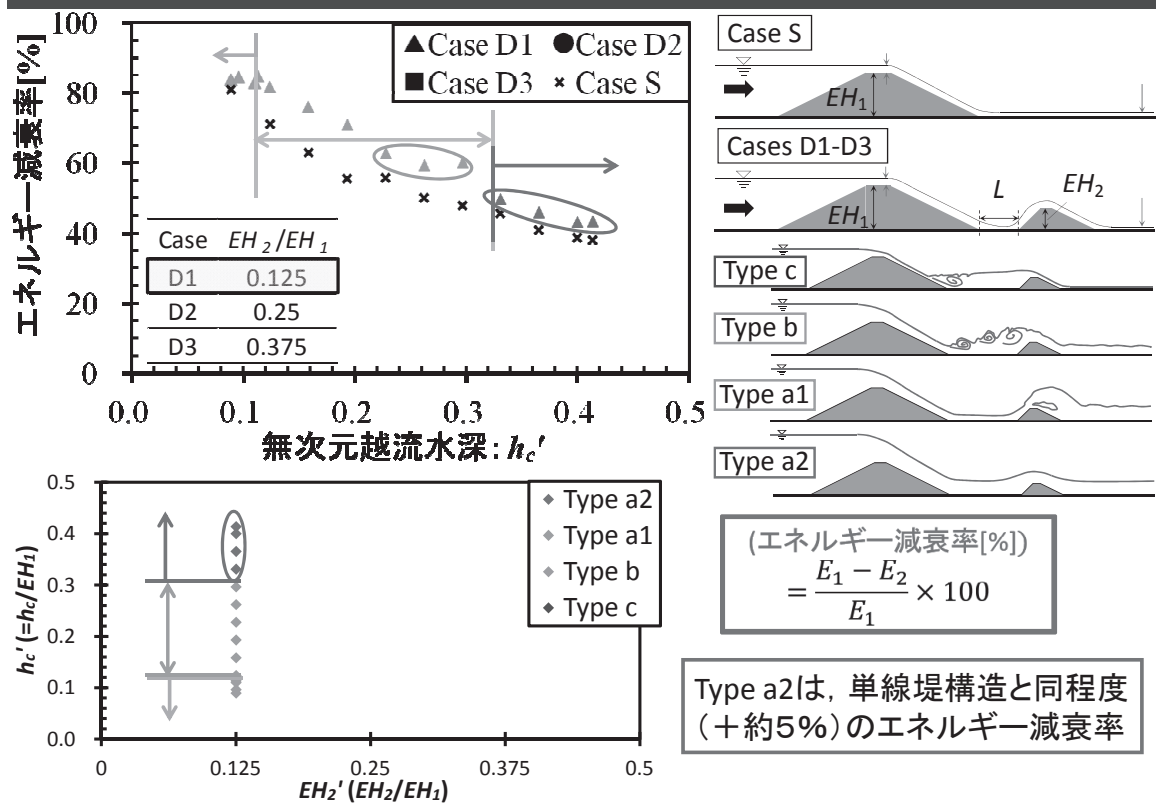
最終破堤時(下: 表法肩
まで洗掘が進行)の状況



・L=0 cm (現状の舗装道路)と比較して、Lを伸ばしていくと洗掘の進行を遅らせることができる

・今後の実験で、Lをさらに大きくした場合、表法側の水位上昇速度を大きくした場合など、異なる状況を追加した実験を実施し、粘り強い堤防の構築に資する舗装道路の延長長さに関する知見を得る。

目的3) 堤防周辺におけるエネルギー減勢効果



地質・地盤グループのまとめ

1) 地形・地質的な観点から、破堤が生じた箇所の特徴を捉え、今後の洪水対策に資するデータを提供すること。

- 破堤・越流が生じた若宮戸や上三坂地区には、鬼怒川流域の中では大きめの自然堤防(河畔砂丘を含む)が分布している。
- これらの自然堤防が旧河道(鬼怒川のつくった低地)の遷緩点近傍であることが示されたことから、流速が小さくなることによって砂質堆積物が多く堆積しやすい場となり、自然堤防を大きく成長させていった可能性が推定された。
- (ただし、今回の破堤箇所はこのような地形・地質の影響というよりは鬼怒川堤防調査委員会報告書(参考資料参照)に示された決壊前縦断面図によれば、現況堤防高が計画高水位(痕跡水位)に最も近い箇所が生じたと考えるのが妥当である。)
- 掘削したボーリングデータから、約1000年前までの地層の中に4枚の砂層が観察されたことから、平均して250年に1回の割合で洪水イベントが生じた可能性がある。ただし、得られたデータ間にはばらつきがあるため、年代についてはさらに検討が必要である。
- ボーリング試料を用いて測定した物理量から破堤箇所近傍の砂質試料のパイピングは浸透距離に対して0.7-0.9倍の水頭差で発生しうることがわかった(限界動水勾配)

2) 地盤沈下の大きさを定量的に評価し、浸水域との関係を検討すること。

- 浸水域における地盤沈下は定常的に進行していることが、ボーリングデータならびに干涉SARによる解析結果から明らかとなった。
- その大きさは年数cm程度のオーダーであるが、2011年の東北地方太平洋沖地震による影響も見られ、累積量では地盤高、ひいては浸水域に大きな影響を与える程度に蓄積していたと考えられる。
- 地盤沈下は今後も継続して進行することが想定されるため、鬼怒川流域をはじめ、他の流域においても堤防管理上留意しておく必要がある。

3) 大規模出水時において、堤防の破堤に至る過程とその機構を把握し、今後の洪水対策に資するデータを提供すること。

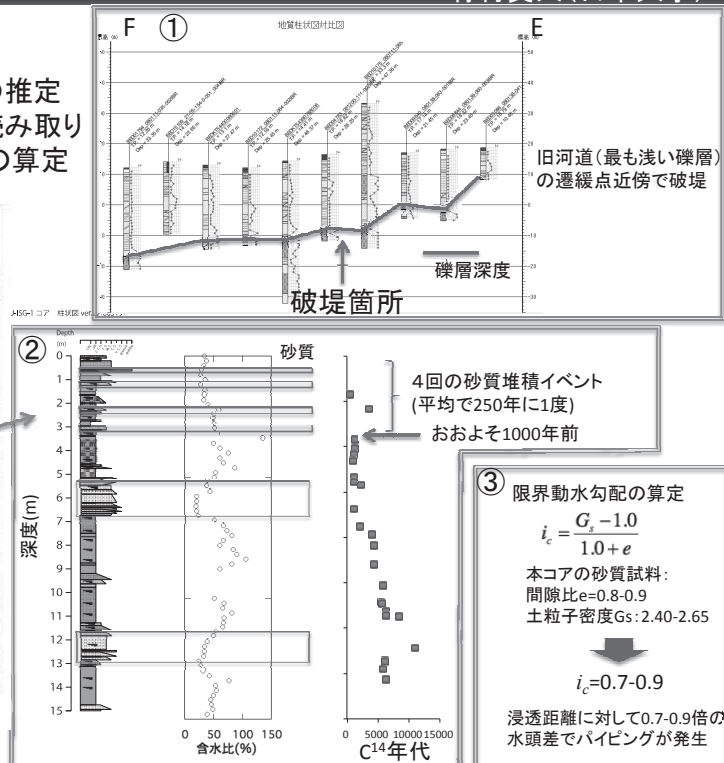
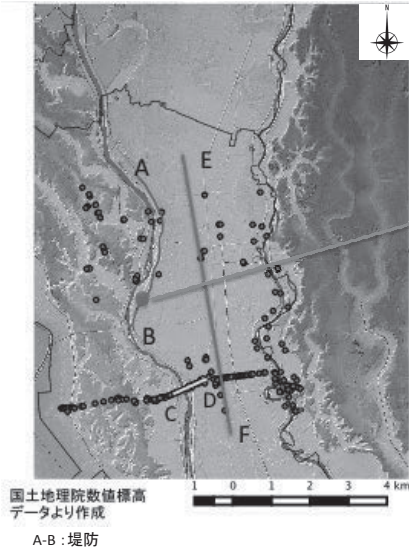
- 破堤現象のメカニズム、落堀の個数、破堤幅や破堤部の洗掘領域の長さなどの基礎データを水理量と関連付けるとともに、堤防天端のアスファルト舗装道路の効果や堤防周辺におけるエネルギー減勢効果について実験的に検討し定量的に評価した。

鬼怒川沿岸域の地質および環境変遷

竹村貴人(日本大学)

目的

- ①ボーリングデータからの旧河道の推定
- ②ボーリングコアから洪水履歴の読み取り
- ③物理量からみたパイピング条件の算定



河川グループ

研究分担者

群馬大学 清水 義彦

宇都宮大学 池田 裕一

名古屋大学 戸田 祐嗣

連携研究者

名古屋大学 田代 喬

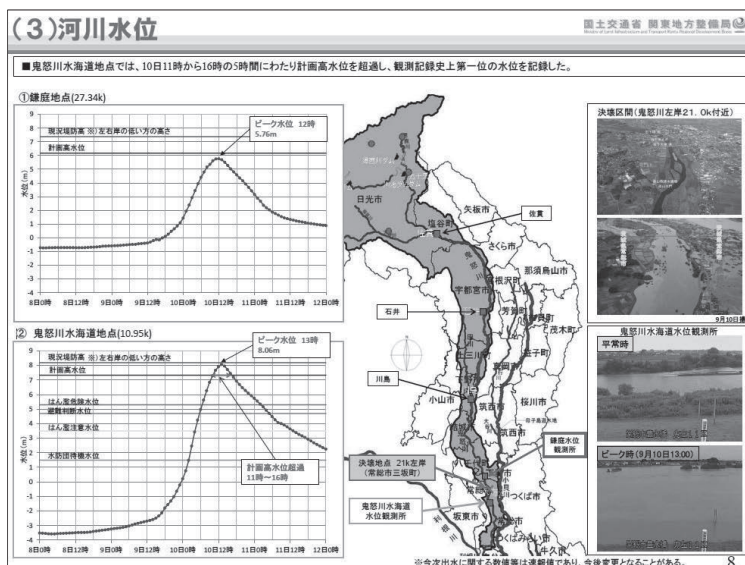
報告内容

- 1) 調査対象範囲, 河道特性, 被害概要
国土交通省・堤防調査委員会資料より
- 2) 河道内流量の変化
- 3) 洪水伝播特性
河道内貯留
- 4) 河道水位上昇特性
避難のリードタイム

方針: 既存調査を極力活用。
国土交通省・関東地方整備局, 下館河川事務所
土木学会水害調査団
応用生態工学会水害調査団など

調査対象範囲

第1回鬼怒川堤防調査委員会資料より



【直轄区間】

佐貫(107)から鬼怒川水海道(11)を対象

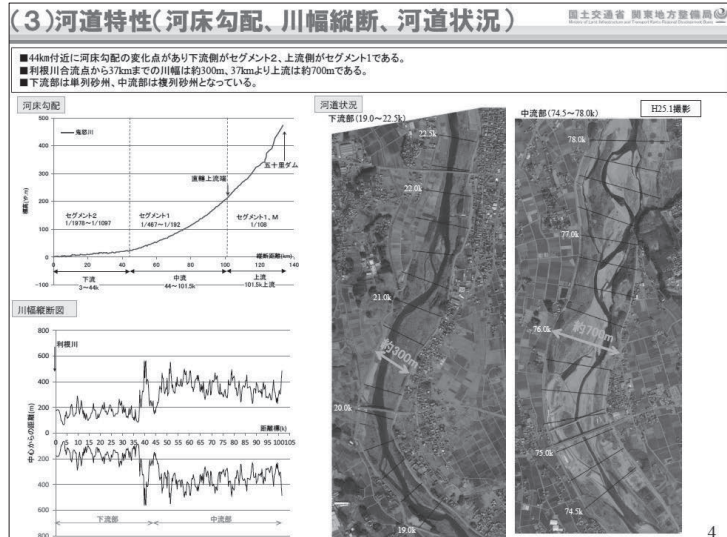
特に石井(基準地点, 75)から鬼怒川水海道に着目

観測所

佐貫(107)
宝積寺(83)
石井(75)
川島(46)
平方(37)
鎌庭(27)
鬼怒川水海道(11)

河道特性

第1回鬼怒川堤防調査委員会資料より



44kmを境に河道特性が変化

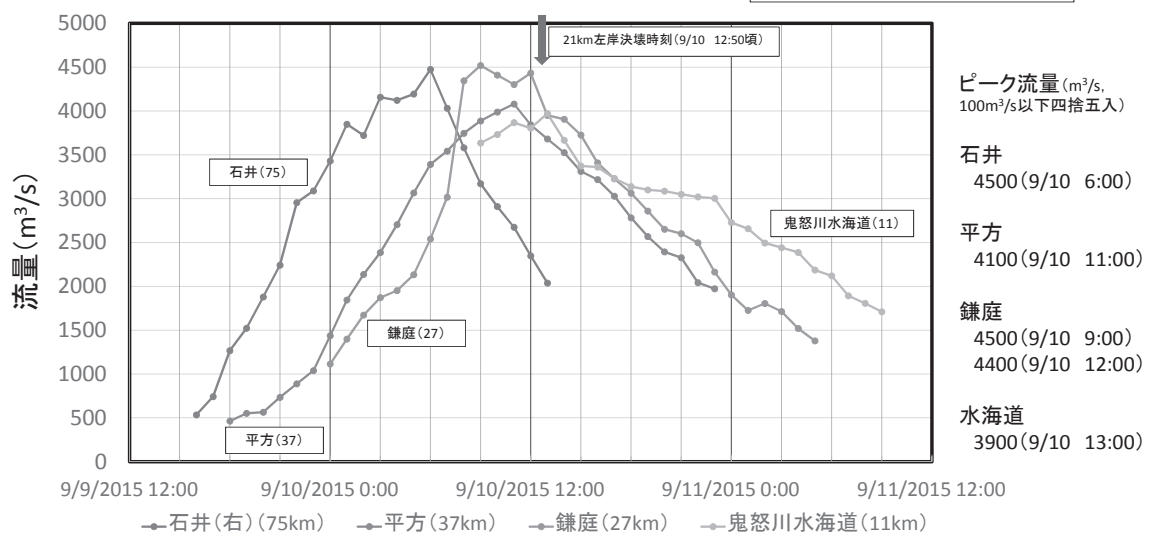
セグメント1：44kmより上流
 セグメント2：44kmより下流

セグメント1では広い川幅。
 → 河道貯留

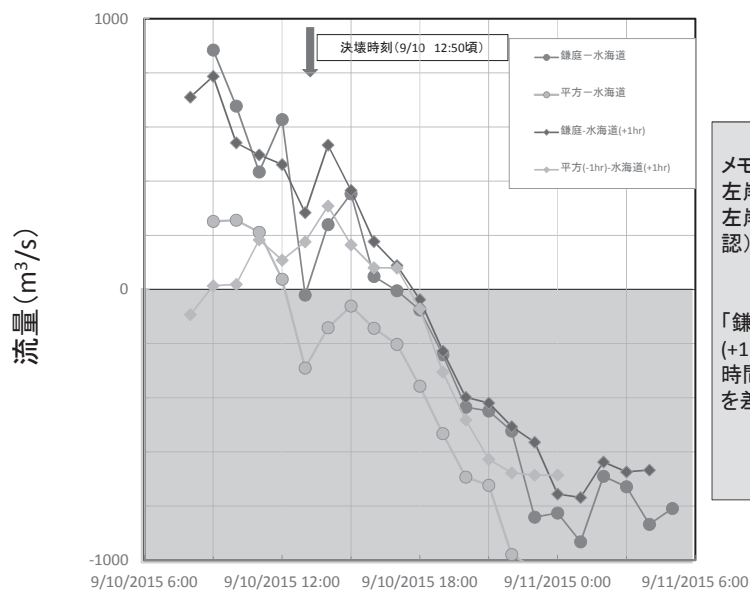
流観流量

流量観測データ

速報値のため、今後修正される場合があります。



流量差：平方(37)，鎌庭(27)－水海道(11)



速報値のため、今後修正される場合があります。

メモ

左岸決壊箇所 (21km, 9/10 12:50頃)
左岸溢水箇所 (25km, 9/10 6:00過ぎから確認)

「鎌庭-水海道(+1hr)」, 「平方(-1hr)-水海道(+1hr)」, は鎌庭の時間を基準に平方では1時間前, 水海道では1時間後の流量測定値を差し引きしたもの。

洪水伝播特性 ～河道貯留～

河道貯留を見込んだ流量低下

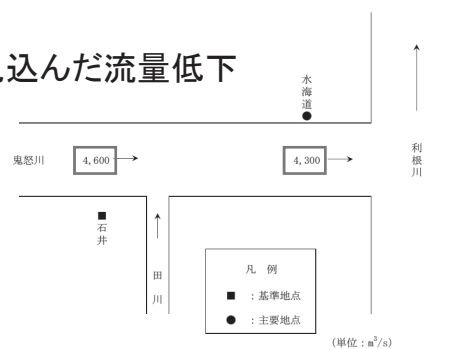
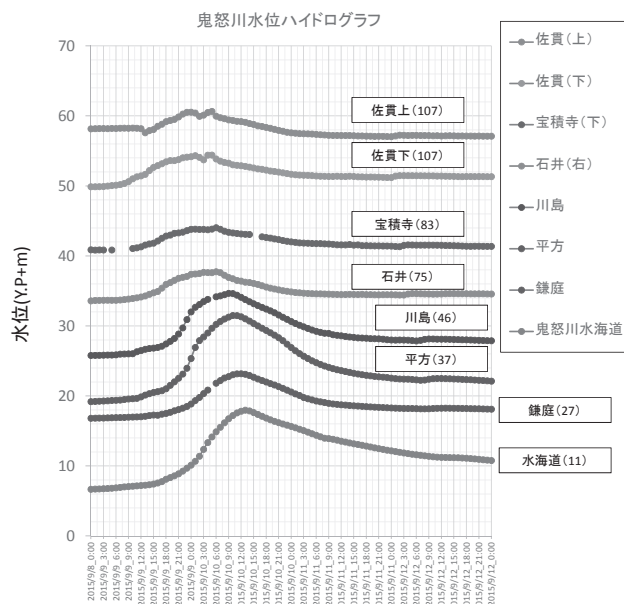


図 4-1 鬼怒川流量配分図

利根川水系鬼怒川河川整備計画【大臣管理区間】(H28.2月)より



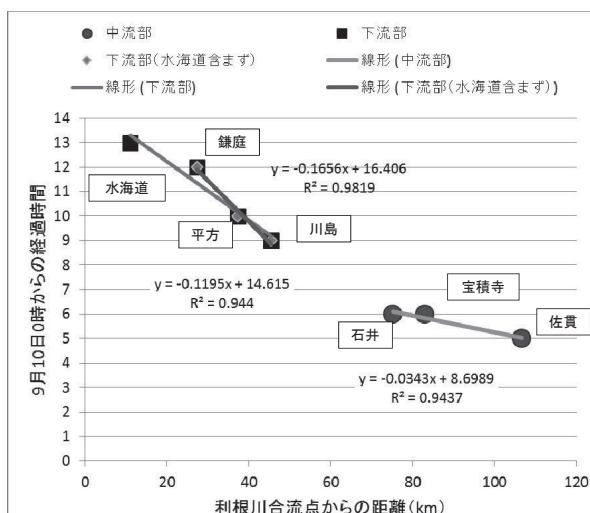
国土交通省・水文水質データベースより
<http://www1.river.go.jp/>

注) 佐貫(上)～石井(右)までは
 標高補正值を使用

水位波形振幅: セグメント1とセグメント2で異なる

鎌庭は下流域の中で水位上昇が相対的に小さい

水位ピークの伝播



セグメント1(中流部)とセグメント2(下流部)で伝播速度の違い

中流部の伝播速度
 $29.1(\text{km/h}) = 8.10(\text{m/s})$

下流部の伝播速度
 $6.04 \sim 8.37(\text{km/h}) = 1.68 \sim 2.32(\text{m/s})$

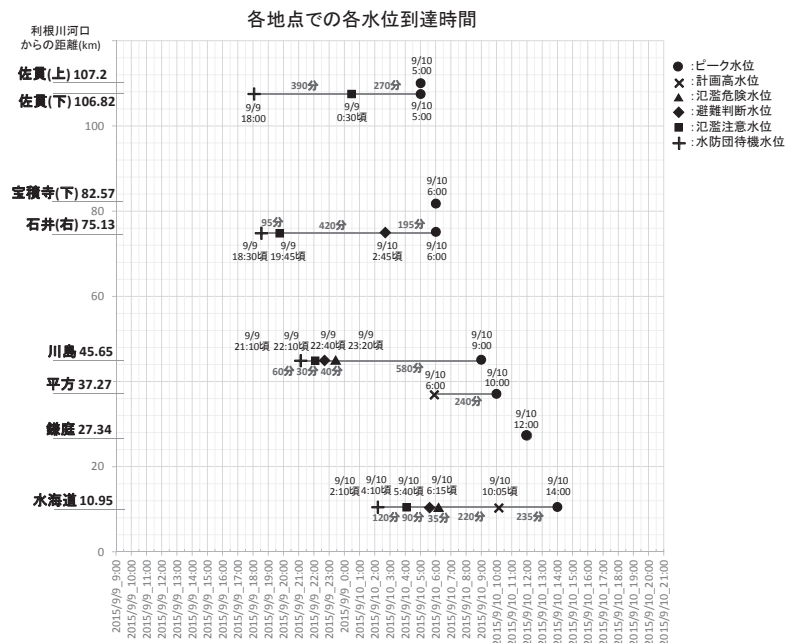
21km地点(決壊地点)とのタイムラグ
 石井 約6時間
 川島 約3時間
 平方 約2時間

各種水位との関係

平方, 水海道
HWL超過から水位ピークまで3~4時間

川島
早期に氾濫危険水位を超えたが, HWLはギリギリ越えなかった.

セグメント変化点付近の川島の避難判断水位をトリガーとするならば, HWLを越えるまでには6時間以上, 21k左岸の決壊までは12時間以上あった.



まとめ

- 利根川合流地点より44km付近を境に河道特性が異なる.
44kmより上流:セグメント1
44kmより下流:セグメント2
 - セグメント1とセグメント2で洪水水位波形の振幅, 洪水伝播速度ともに異なる.
セグメント1, 2の洪水波の伝播速度はそれぞれ約8.1m/s, 約1.7~2.3m/s.
 - 各水位観測所での洪水ピーク時刻と21km地点の堤防決壊時刻を比較すると, 石井地点で約6時間前, 平方地点で約2時間前である. また, 決壊地点の下流に位置する水海道においても決壊時刻の2時間以上前には計画高水位に達している.
- 上流側での水位観測所, 決壊地点近傍の水位観測所のどちらの水位を避難判断の基準として用いたとしても, 避難のためのリードタイムは少なくとも2時間以上は存在した.

氾濫グループ

佐山 敬洋(京都大学 防災研究所)

浸水深の空間分布推定
浸水深分布の時系列推定

小林 健一郎(神戸大学 都市安全研究センター)

5mDEMを用いた氾濫状況の再現計算

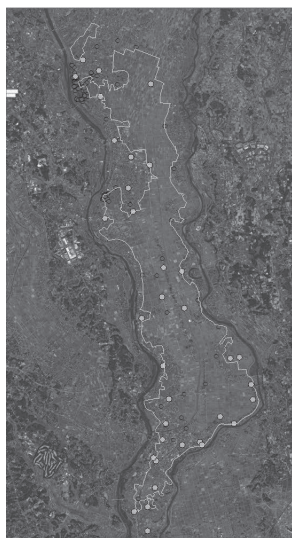
川池 健司(京都大学 防災研究所)

非構造格子による氾濫状況の再現計算

浸水状況の調査 1 : RTK-GPS計測による最大浸水深の空間分布推定



多地点の浸水痕跡をネットワーク型RTK-GPSで計測することにより、最大浸水位の空間分布を推定し、詳細地形情報(LP-DEM)を差し引くことによって、最大浸水深の空間分布を推定した。



佐山・寶, 土木学会論文集(水工学), 2016

調査方法 : GPSで地盤標高を計測し、浸水痕跡までの比高を巻尺で計測

京大防災研

9/15, 16 浸水域周囲を中心: 35地点

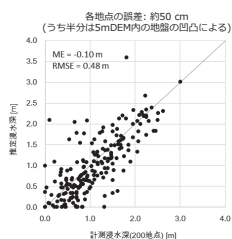
10/15 追加調査(浸水域北限の確認)

東京理科大(二瓶教授グループ)

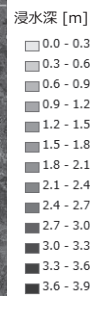
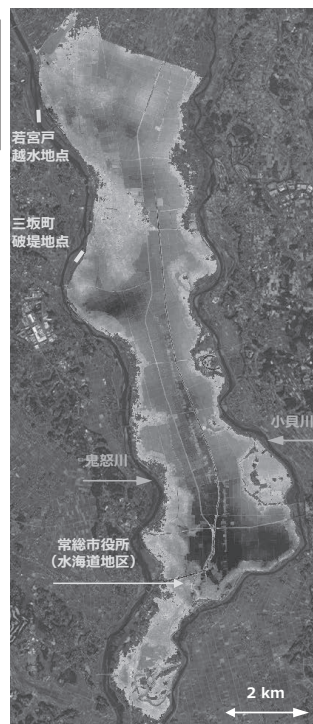
9/15, 16 常総全域: 26地点

10/14 若宮戸越水周辺: 54地点

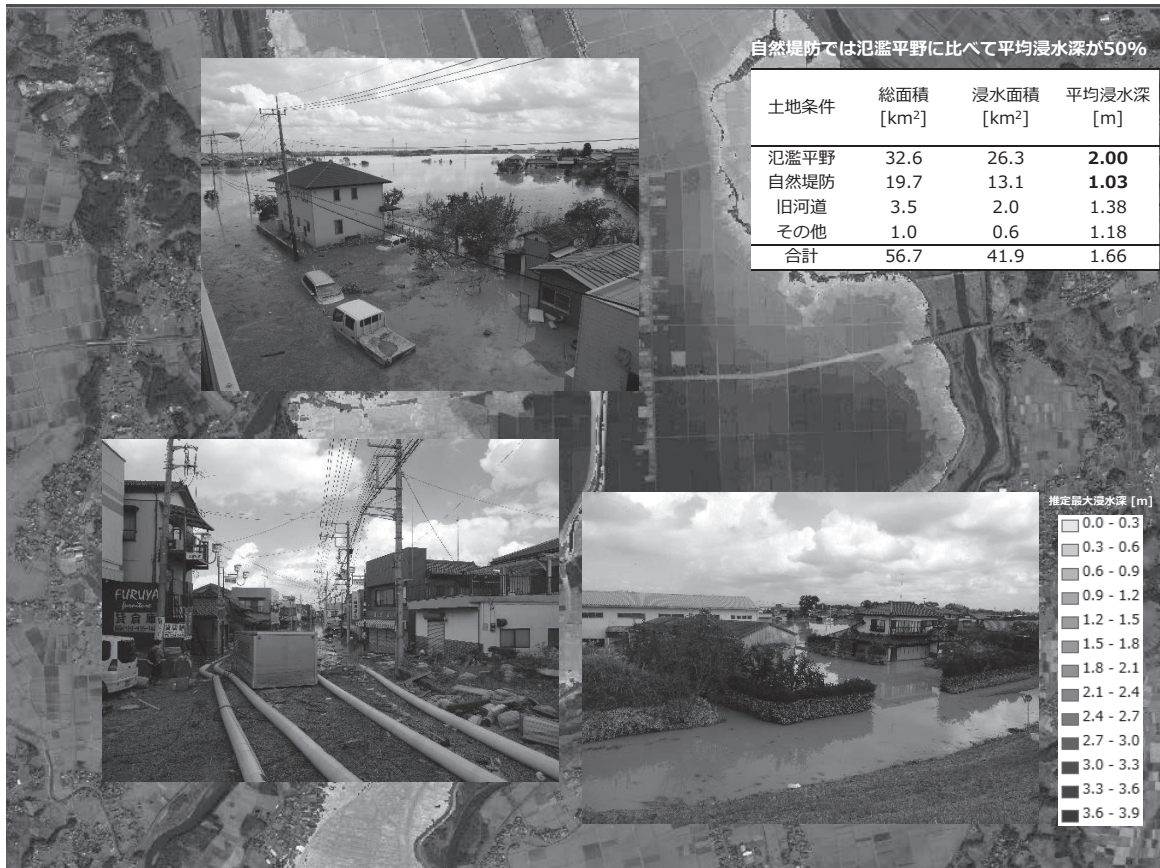
10/14 三坂町破堤周辺: 18地点



計測と推定との比較
(理科大浸水深計測200地点)



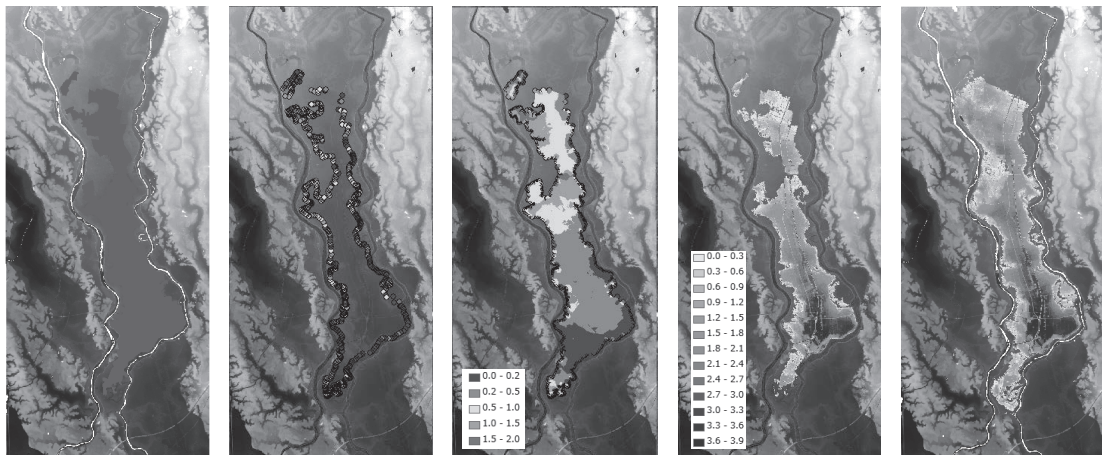
最大浸水深分布の推定結果



浸水状況の調査2：国土地理院による推定浸水範囲情報



9/11 10時の浸水域 → 9/11 10時の浸水深 (参考) 最大浸水深

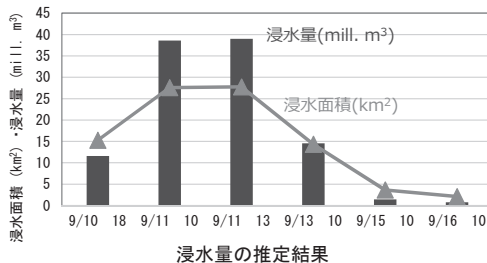
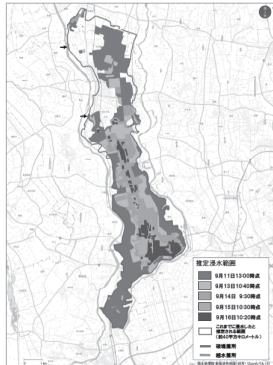


推定浸水範囲情報と最大浸水位の調査に基づく浸水深分布の時系列推定

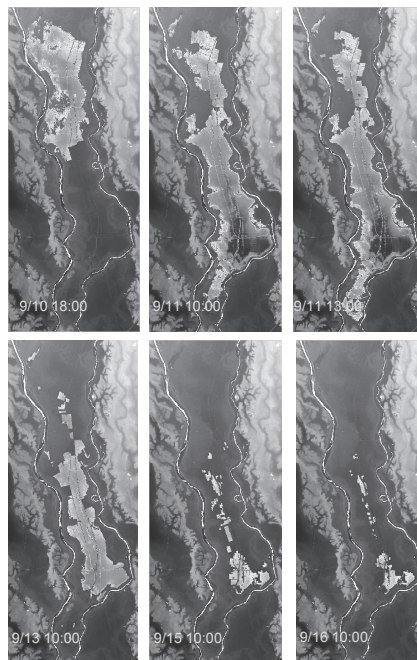


ヘリコプターからの空撮画像による推定浸水範囲の時系列

平成27年9月10日、鬼怒川氾濫による茨城県常陸地区の推定浸水範囲の変化
(9月11日13:00時点、13日10:40時点、14日9:30時点、15日10:30時点、16日10:20時点)



浸水想定範囲から浸水深空間分布の変化を推定

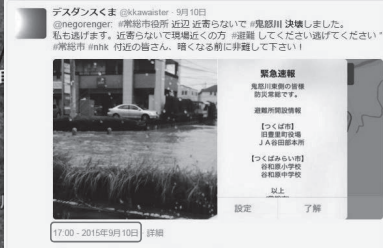


ピーク時の浸水量推定結果: 約3,800万m³

(佐山ら、土木学会合同調査団関東グループ調査報告書、2016)

5

(参考)ソーシャルメディア(Twitter)の情報について



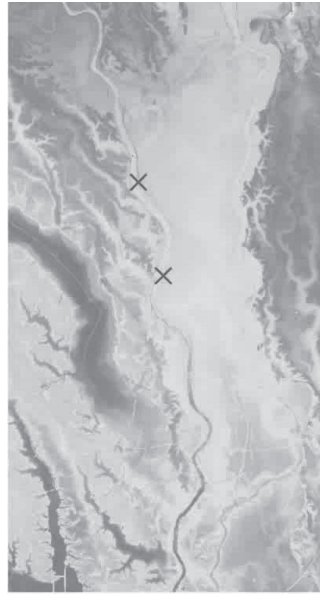
鬼怒川洪水に関するツイッター情報を解析し、被災地から発信された情報が浸水域の実績とよく対応していることを確認した。

また、10日夕方の八軒堀川周辺の浸水など、国土地理院による空撮では捉え切れていない浸水がTwitterに発信されていたことを確認した(現地調査の結果とも対応する)。

石咏雪: 京大大学修士論文 (2016)

氾濫状況の再現計算結果1

Time_00.hr
<セル値>
0 < H ≤ 0.01
0.01 < H ≤ 0.1
0.1 < H ≤ 0.5
0.5 < H ≤ 1.0
1.0 < H ≤ 2.0
2.0 < H ≤ 3.0
3.0 < H ≤ 4.0
4.0 < H ≤ 5.0
5.0 < H ≤ 6.0
H > 6.0



問題点

国土地理院から取得できる
5m標高データによる河道断面と、
水文水質データベースで見ることができる
河道断面は異なっているようである。
一般に地理院の標高データの方が高い。

したがって、左の計算は、越流・
破堤(越流の意味)が数時間早く起こる。

河道断面データの入手が必要である。

ただし、越水地点の標高は周りより低い。
こうした点を今後具に調査して補強するべきである。

解析条件

- ・国土地理院の標高データメッシュ(5m)をそのまま解析に用いる。
- ・鬼怒川河道の鎌庭地点で観測水位を、下流端で等流水深を与える。
- ・三坂町(破堤地点)200m区間の堤防高を、破堤時刻より徐々に下げる。

計算時間について

総計算節点数 $2566 \times 5715 = 14664690$

[Open MPのみ]

研究室ワークステーション

16コア、Xeon CPU E5-2670 (2.6GHz)(市販最速)

48時間シミュレーションに約93時間かかる

京コンピュータ 960 CPUs (30×32領域分割),

SPARC64VIIIx (2.0 GHz), 8 cores/CPU/node),

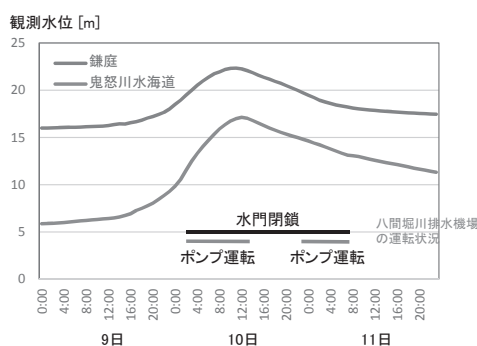
48時間シミュレーションに約0.96 時間かかる

つまりこれにより計算時間が飛躍的に改善された。

氾濫状況の再現計算2

解析条件

- ・一辺100m程度の三角形非構造格子を使用
- ・鬼怒川の鎌庭と鬼怒川水海道の観測水位を与える。
- ・初期降雨と水田地形(畦と水路)の影響を考慮
- ・八間堀川排水機場の運転を考慮
- ・三坂町での破堤プロセスのモデル化



氾濫状況の再現計算2

浸水地域の大部分は水田

畦 → 高さ0.5mの直立壁

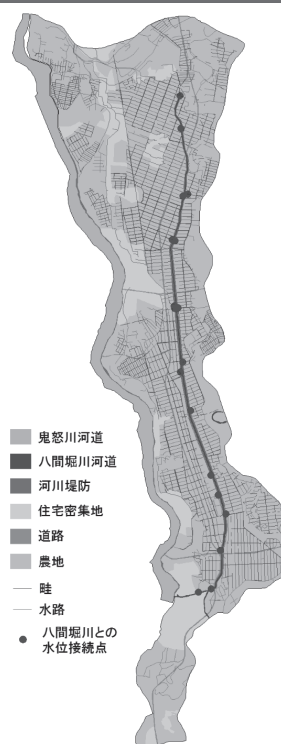
浸水深が畦の高さを越えると、
越流公式により流量を計算

水路 → 一次元水路のネットワーク

幅5m 深さ2.5m

幅2m 深さ1.0m

約20mごとの区間に分割
地上メッシュと水位を比較して、
越流公式により交換流量を計算
20ヶ所で八間堀川と接続



氾濫状況の再現計算2

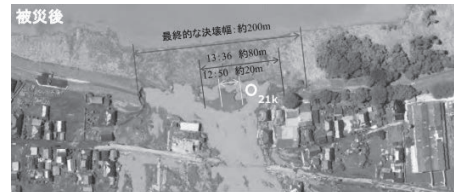
三坂町での破堤点のモデル化

破堤幅 12:50に20m、13:36に80m、その間の時刻では一次関数的に拡幅。
(まずはメッシュA, A'が、その後メッシュB, B'が破堤する)

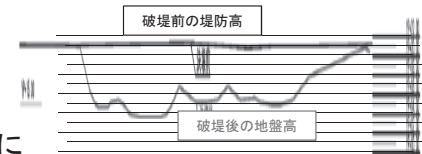
13:36以降は、上記と同じ速さで拡幅し、200mに達した時刻で拡幅を止める。
(上流側にメッシュC, C'、下流側にD, D'とE, E'に等速で破堤する)

破堤敷高 破堤が始まったメッシュの標高を、瞬間的に破堤後の標高まで下げる。

計算方法 各時刻において、上記の破堤敷高を用いて平面2次元解析を行う。得られた流量と水深を、破堤幅に応じて補正しながら計算を進める。



※今次出水に関する数値等は通報値であり、今後変更となることがある。



氾濫状況の再現計算2



- 水路によって初期降雨が八間堀川に集められている。
- 初期降雨による浸水域が過大評価されている。
- 八間堀川と水路を流下した氾濫水が、下流で氾濫域を拡大している。
- 10日17時ごろ、水海道地区に上流からの氾濫水が到達し、八間堀川の洪水と一体となって氾濫域が拡大する。
- 最大浸水位は、佐山らの計測結果と良好に一致した。
- 氾濫水の伝播が、(水路を考慮していない場合でも)実測よりかなり速い。

平成27年9月関東・東北豪雨による災害の総合研究 ー農業被害グループー

1. 農業被害の実態解明 (山口大学・創成科学研究科・教授 山本晴彦)

常総市における
農業被害に関する状況
(被害額合計:75.5億円)

茨城県の被害総額112億円の
2/3を常総市が占める

水稲13億円:1,400ha
「常総コシヒカリ」のブランド化

災害発生時点で「40%」を収穫済み



カントリーエレベーター、低温倉庫、精米センターの浸水 5億円
収穫後保管米2.3億円の被害

	被害金額	被害面積
農作物等 (水稲, きゅうり等)	1,380,335千円	1,402.4ha

	被害金額	被害数量	被害戸数
収穫後保管米	232,647千円	1,092t	540戸

	被害金額	被害台数	被害戸数
農業用機械 (トラクター, コンバイン等)	2,849,192千円	1,092台	406戸

	被害金額
家畜・畜産物 (にわとり等)	323千円

	被害金額	被害件数
共同利用施設 (カントリーエレベーター, 低温倉庫, 精米センター等)	522,000千円	9件

	金額	箇所
農地	805,100千円	11箇所
農業用施設 (カントリーエレベーター, 排水機場, 農道等)	1,525,400千円	77箇所
農業集落排水	200,000千円	2箇所
合計	2,530,500千円	90箇所

資料:
常総市提供

泥水による水田被害(常総コシヒカリの収穫適期:9月上旬～中旬)
水は田面まで引いているが、ぬかるんでいるため収穫はできない。
収穫適期から遅れて収穫しても、過乾燥による胴割れ米が発生する。

9 SEPTEMBER 2015 平成 27 年						
月	火	水	木	金	土	日
31	1 日曜	2 月曜	3 火曜	4 水曜	5 木曜	6 金曜
7 土曜	8 日曜	9 月曜	10 火曜 洪水災害	11 水曜	12 木曜	13 金曜
14 土曜	15 日曜	16 月曜	17 火曜	18 水曜	19 木曜	20 金曜

コシヒカリの収穫適期
出穂期から積算気温で900～1,000℃

JA常総ひかり
カントリーエレベーター



9/16

堤防の決壊により、自然堤防上の道路が濁流により押し流されて損傷

①



9/15

転換畑ダイズの冠水被害

②



9/16

①



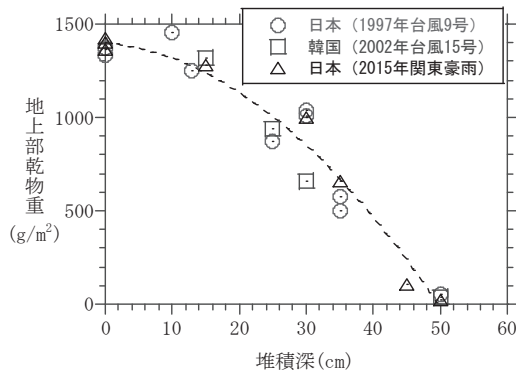
9/16

後背地の水田は15日現在も水が引いていない箇所が多く見受けられる。泥流が堆積し、復旧に時間を要する。

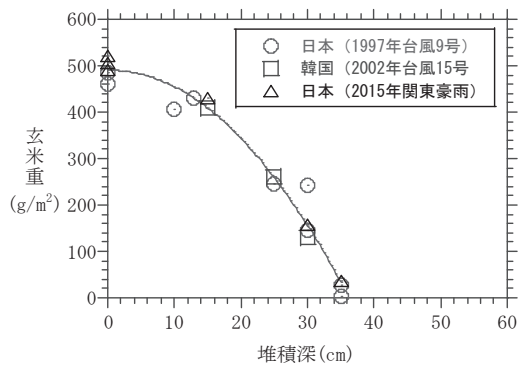
①



9/15



土砂堆積深と地上部乾物重量との関係



土砂堆積深と玄米収量との関係

土砂の堆積が水稻の地上部乾物重量および玄米収量に及ぼす影響

日本データ

○1997年台風9号豪雨(山口県むつみ村)



山本晴彦他:1997年台風9号による山口県北部の豪雨特性と溜池決壊に伴う土砂堆積による水稻被害の実態、日本作物學會紀事 67(2), 226-232, 1998.

△2015年関東豪雨(茨城県常総市)

韓国データ

□2002年台風15号豪雨(江原道江陵市)



山本晴彦他:台風0215号(RUSA)の気象的特徴と韓国の農業被害について、自然災害研究協議会西部地区部会報:研究論文集 27, 29-32, 2003.



八間堀川の両岸に
大規模水田を営む
農家が連なる。

堤防の決壊箇所や
破堤箇所から離れ
ているが、洪水によ
る浸水は約2mに達
し、最も被害を受け
た地域

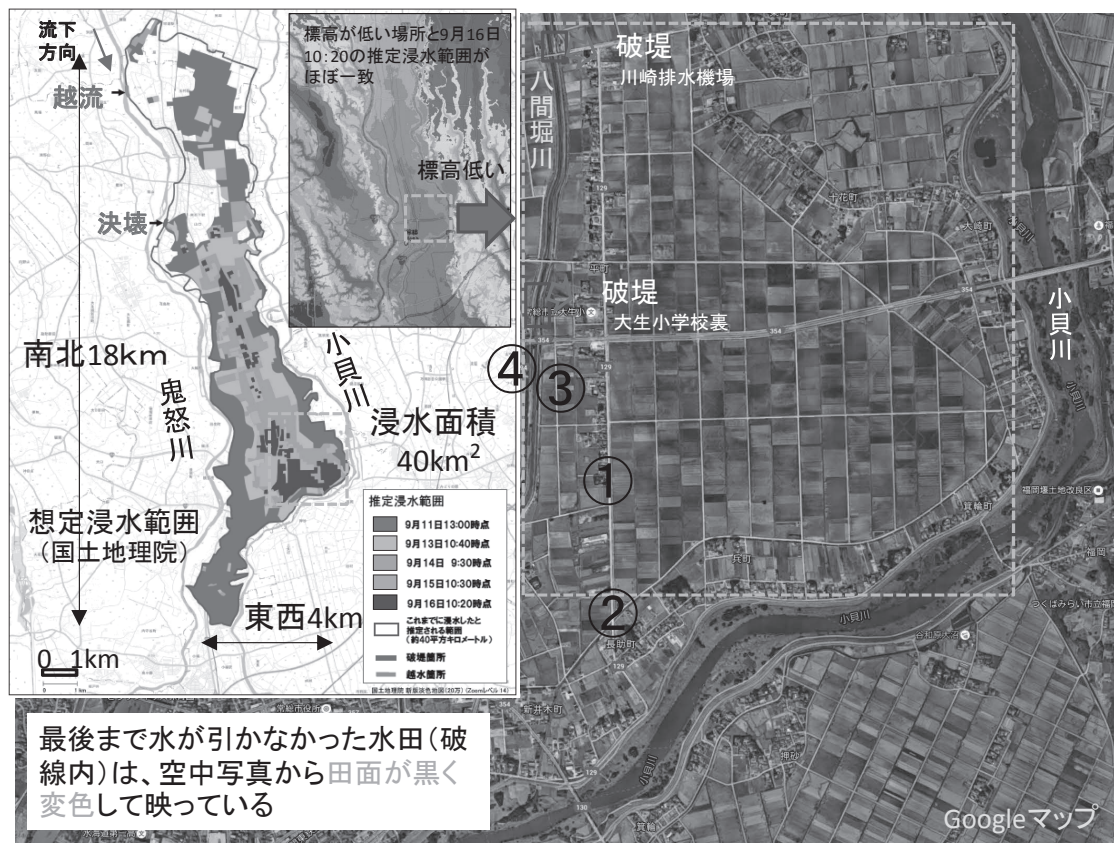
低平地での洪水リスク
の欠如(農機具水没)

屋敷林に残る浸水痕跡

210cm

9/16

⑤ 八間堀川沿岸土地改良区
川崎排水機場(破堤)



2. リモートセンシングによる農業被害の解析

1. 目的

大阪工業大学・工学部・准教授 高山 成

- 人工衛星リモートセンシング（衛星リモセン）技術を活用して、今回の氾濫により水稻が損害を受けた水田の範囲を明らかにする。
- 水稻の被害程度を衛星リモセンから評価する方法を検討する。
- 1986年以降今回まで鬼怒川と小貝川流域では、水害が計5回（1986, 1999, 2002, 2004）発生している。過去に発生した水害の事例についても、アーカイブ画像を活用した水稻の被害程度の評価を試みる。

2. 進捗状況

基本データの収集（主なもの）

人工衛星画像；**RapidEye**；Band1(青), Band2(緑), Band3(赤), Band4(レッドエッジ), Band5(近赤外)
観測日；2015年5月31日, 8月1日, 10月19日観測 分解能 5m
(株)ビジョンテックより購入

GISデータ；**基盤地図情報** {5mDEM, 道路, 建物, 水域等} 国土交通省サイトより入手
地図画像 (地図画像25000) 日本地図センターより購入
圃場データ (耕区図データ) {水田一筆情報を含むポリゴン情報(シェープファイル)}
茨城県土地改良事業団体連合会より購入

水稻被害状況；**圃場ごと現地調査データ**

茨城県西農業共済組合よりご提供いただいた。被害額を査定するために“刈り残された水田”を、災害発生後16日程度かけて調査した結果を地図上に記入したもの。

データに収集に関するヒアリング調査；

2016年1月14日にJA常総ひかり，茨城県西農業共済組合，水土里ネット江連八間，堤体決壊箇所を訪問し，提供可能データのヒアリングを行った。

3. 結果

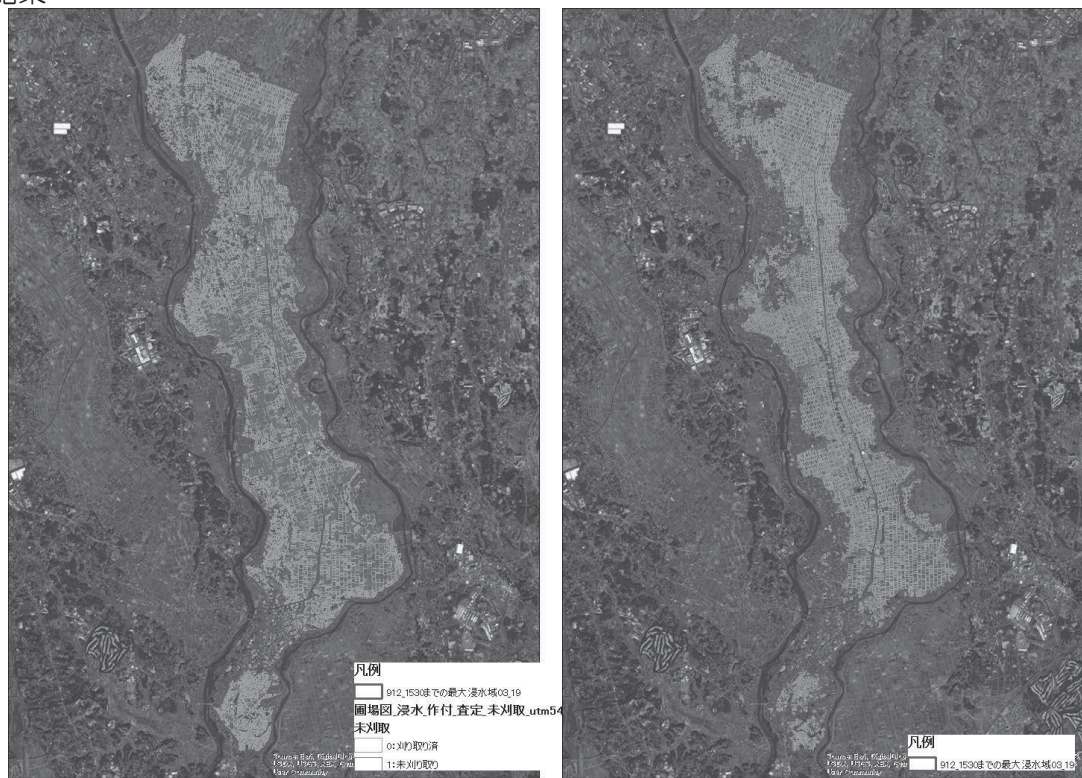


図 農業共済組合の調査による被害水田(左)と人工衛星による判読(右) NDVI閾値0.20

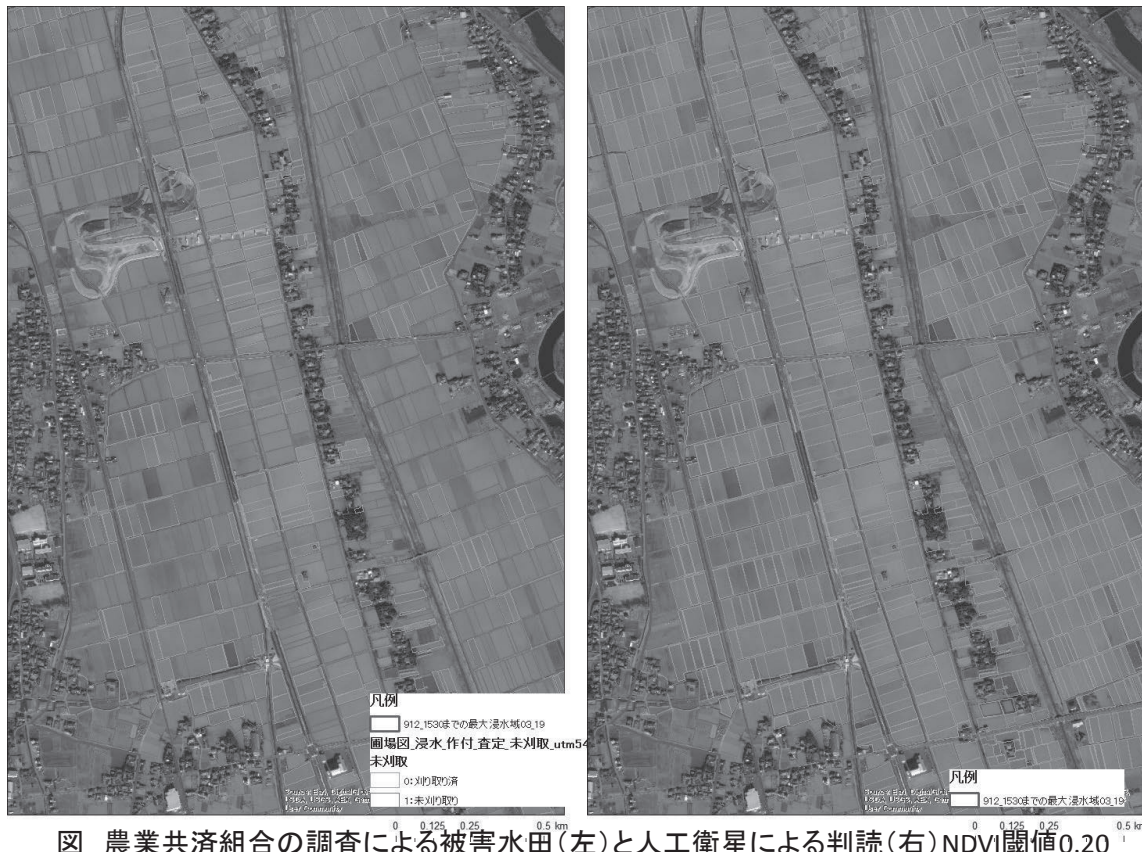


図 農業共済組合の調査による被害水田(左)と人工衛星による判読(右) NDVI閾値0.20

4.結論

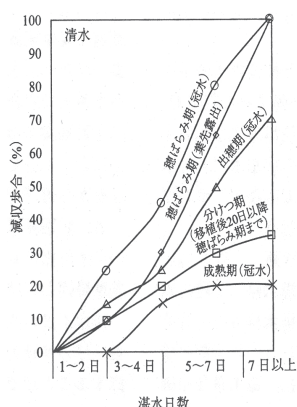
- ・ 水稻の被害程度については、農業共済が使用していた地図情報と水土里ネットによる一筆情報が異なり、現地調査結果をGISに取り込むことが困難であった。衛星リモセンから評価する方法などさらなる検討を要する。
- ・ 人工衛星による正規化植生指数に基づいて、浸水被害水田の判別を試みた。しかし、農業共済による現地調査結果との一致が良好でない。原因として未刈取り水田であっても泥や枯死等により、必ずしもNDVIが高くなかった、逆に刈取り済み水田であっても畔の植生などを拾ってNDVIが高かった、などが考えられる。
- ・ 被害水田の判別に10月19日の人工衛星画像を用いた。判別の閾値と的中率との関連を解析した結果、今回の事例ではNDVIの閾値を0.15～0.20とするのが適切だった。しかし、判別の的中率は0.36、全体はずれ率は0.57と良好でなかった。

本調査については(株)ビジョンテックにご協力いただいた。

3. 低平農地の冠水被害評価

農研機構・農村工学研究所・研究員 皆川裕樹

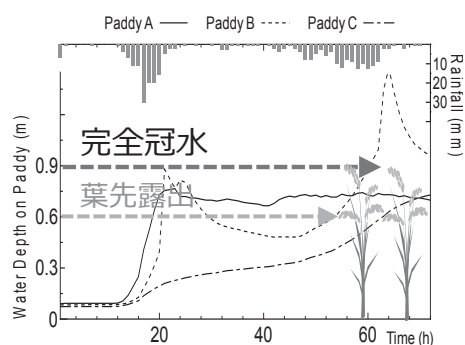
目的： H27年9.10に発生した鬼怒川決壊（外水氾濫）がもたらした水田被害を、収量調査や水稻減収尺度の活用により評価する他、堆積土壌分析、聞き取り調査等により被害実態を明らかにする。さらに、内水氾濫も含めた過去の被害履歴より、対象地域の農業排水システムの抱える課題を調査する。将来的には、豪雨時の氾濫／排水解析によってより確度の高い水稻被害推定手法確立に必要な情報を提示することを目的とする。



水稻減収尺度のイメージ
(農業農村工学ハンドブック
p196より)

水稻減収尺度：
冠水の発生時期や継続期間によって大きく異なる水稻減収量を評価するために有効な尺度

氾濫解析結果への活用：
水田水深とその継続期間の解析結果に尺度を適用し、広域に渡る農地帯の水田被害を推定するための手法や留意点等を提示



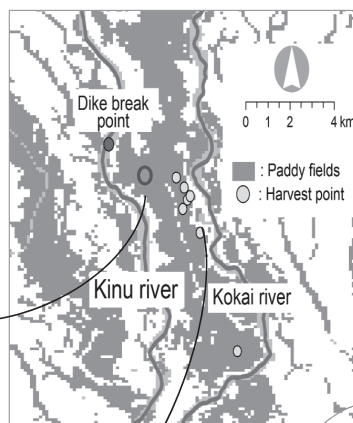
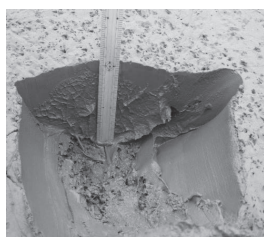
解析で得た水田水深の推移と水稻草丈の関係の評価例

低平農地の冠水被害評価

○ 研究内容イメージ



② 農地堆積土砂の分析による
氾濫影響範囲の評価



③ 土地改良区、農家、共済組合等への聞き取りによる農業への氾濫被害実態の把握

- ・ 2015年台風18号による被害実態
- ・ 内水氾濫も含めた過去の被害履歴による豪雨と農業排水リスクの評価 etc.



① 収量・品質調査からみる氾濫
が水稻に与えた影響の評価

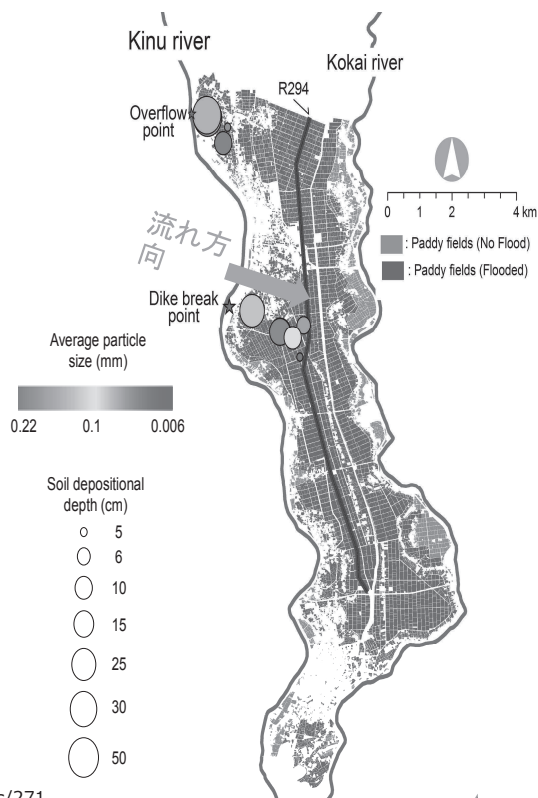


氾濫に伴う農地内への土砂流入状況

- 堤防決壊地点から国道294号に向かって土砂が運搬され農地内に堆積
- 堆積深は決壊地点からの距離が離れるに従い低下し、294号より東側では大きな堆積は見られなかった
- 土砂流入による農地被害額は、約12,000百万と見積もられている*

* 平成27年9月関東・東北豪雨による被害状況について（第6報）より

<http://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/nokeiei/shomu/documents/271015.pdf>



土地改良施設への被害状況

- 冠水等による農業用施設への被害も大きい（約3,642百万円）*

施設	被害地点数
頭首工	4
水路	79
用排水機場	189
農道	6
農集排施設	8

- 今年の作付に間に合うよう復旧予定

* 平成27年9月関東・東北豪雨による被害状況について（第6報）より

<http://www.pref.ibaraki.jp/nourinsuisan/nokeiei/shomu/documents/271015.pdf>



水田冠水による水稻玄米品質への影響

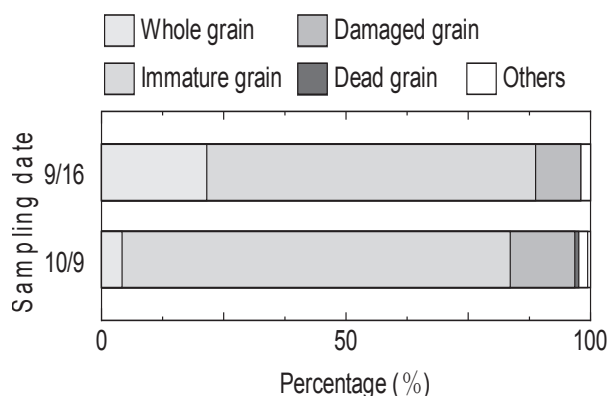


Fig. 穀粒判別による玄米の品質測定結果



- 冠水被害水田より水稻サンプルを採取し品質を測定
- 冠水被害後に収穫したとしても、品質の低い米しか収穫できない可能性が高い

まとめ(農業被害グループ)

1. 農業被害の実態解明

- ・常総市における農業被害額は75.5億円
- ・コシヒカリは、収穫後40%(保管米も被害)、収穫前60%
- ・収穫適期から遅れて収穫しても、過乾燥による胴割れ米が発生
- ・土砂堆積深35cmで収穫が皆無、50cmで稲体が埋没
- ・六間堀川の農家における低平地での洪水リスクの欠如(農機具水没)

2. リモートセンシングによる農業被害の解析

- ・人工衛星による正規化植生指数から、浸水被害水田の判別を試みる
- ・農業共済による現地調査結果との一致が良好でない
- ・未刈取り水田であっても泥や枯死等で必ずしもNDVIが高くなかった
- ・刈取り済み水田であっても、畔の植生などでNDVIが高かった

3. 低平農地の冠水被害評価

- ・堤防決壊地点から国道294号に向かって土砂が運搬され農地内に堆積
- ・堆積深は決壊地点からの距離が離れるに従い低下し、294号より東側では大きな堆積は見られなかった
- ・土砂流入による農地被害額は、約12,000百万と見積もられた

「防災・避難情報の伝達」

防災・避難情報グループ

筑波大学

静岡大学

東京大学

防災科学技術研究所

慶應義塾大学

梅本 通孝：行政の災害対応の調査

牛山 素行：人的被害の発生状況の調査

田中 淳：情報伝達に関する調査

田口 仁：災害時の情報処理に関する調査

宮川 祥子：情報支援・情報システムに関する調査

行政の災害対応の調査

筑波大学 梅本通孝

□常総市災害対策本部の動向の時系列整理

- 氾らん情報、水防警報の受信状況.
- 災害対策本部内のホワイトボード板書メモ.
- 防災行政無線の放送原稿・放送記録.
- 常総市Webページ掲載情報の更新履歴.



時系列
による
一覧化

□常総市の災害対応に関するヒアリング

- 常総市災害対策本部、安全安心課の初動期（概ね9/10-11）の対応状況について関係者にヒアリング：
 - ➡ 災対本部・事務局要員、関係機関（河川事務所、消防本部、消防団）
- 常総市災害対策本部を一つの“システム”として捉え、インプット、アウトプット、処理プロセスを把握し、課題点を抽出.

常総市の災害対応の課題

□地域防災計画

- ・ 内容的不備:前年度の組織改編後の改訂時に不備.
- ・ 職員への不徹底.

□災害対策本部運営

- ・ 環境面:スペース的な狭さ / 安全安心課との物理的隔離.
- ・ 情報面:情報ツールの貧弱さ / 情報集約・分析担当の不在.
- ・ 運営面:庁議の延長上で対応 / 機能分担ないまま「全員対応」.
- ・ 部外者の過剰介入と阻害 / 関係機関のリエゾンが参加できず.

□安全安心課

- ・ 電話対応・情報の過集中による忙殺, 重要情報の埋没.
- ・ 災害対策本部の事務局・参謀機能を果たせず.

□「避難」の考え方

- ・ 「避難＝避難所へ行くこと」との認識 → 避難所開設を優先.
- ・ 広域避難:市外の選択肢を初めから除外.

3

平成27年9月関東・東北豪雨による犠牲者の特徴

静岡大学 牛山素行



人的被害の特徴

- 平成27年9月関東・東北豪雨, 死者8人(宮城2, 栃木3, 茨城3)
 - 年数回発生する規模. 特筆するほど多くはない.
- 本事例の犠牲者の特徴
 - a)「洪水」の比率が高い
 - b)非高齢者の比率がやや高い
 - これが本事例に固有の特徴である可能性
 - c)屋外で遭難した比率がやや高い
 - 2004-2014の「洪水」でも見られる傾向, 「洪水」犠牲者が多いことから特異な事でない.
 - d)昼間に遭難した比率がやや高い
 - 激しい洪水が発生した時間帯が主に昼間だったことから説明可能.
 - e)避難行動が認められない
 - 2004-2014の傾向と大差は無い
- 鬼怒川の破堤氾濫に起因する犠牲者は最大2人
 - 破堤箇所付近では9世帯が流失し, 破堤時に少なくとも10人前後の住民がいた. 状況によっては犠牲者が多かった可能性.
 - 破堤氾濫による浸水でも, 家屋流失に至るほどではない浸水が生じた範囲では犠牲者はほとんど生じていない

牛山素行:平成27年9月関東・東北豪雨による犠牲者の特徴,土木学会論文集B1(水工学),Vol.72,No.4,pp.1_1297-1_1302,2016.

Shizuoka University

情報伝達: 主な研究項目と概要

(東京大学情報学環 田中 淳)

(1) 行政機関への聞き取り調査

国、2県、3市町及びNPO法人に対して聞き取り調査を行った。

- 1)河川管理者のホットラインが意思決定に有効に機能していた。
- 2)越水の氾濫水拡散予測が活用された。
- 3)大河川と中小河川とを合わせた総合的な判断が求められる。
- 4)そのためには、中小河川の水位等実況や予測についての把握並びに共有の高度化が求められる。
- 4)特別警報は体制整備に効果を持っていた。
- 5)県・市町村の情報収集・伝達要員の充実を図る必要がある。

(2) 外国人の情報受容過程と課題

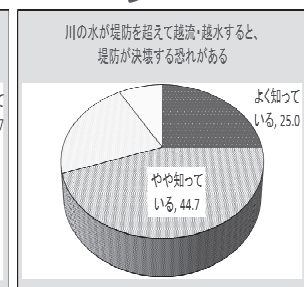
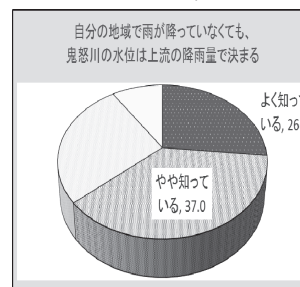
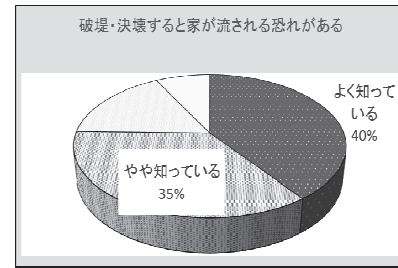
- 1)茨城県では外国人支援の立ち上げに、3.11の体験が活かされていた。
- 2)水害保険等生活再建に関する情報提供の強化が求められる。

情報伝達：研究目的と概要

(3)沿川調査

1) 同種の災害と比べて、常総市民の避難率は極めて高いことが他の調査から分かっている。

2) 本グループが実施した鬼怒川沿岸市町村在住者を対象としたWeb調査の結果からみると、
a.越流から破堤への発展
b.上流の降雨に規定される
といった災害の進展過程に関する知識形成を図っていくことが求められる。



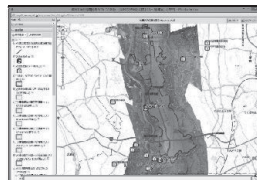
災害時の情報処理に関する調査

防災科学技術研究所 田口仁

- 研究分担者らは常総市役所及び災害ボランティアセンターに対して、地理情報の活用した災害対応支援を実施。

常総市役所

状況認識の統一を支援するための地図作成を支援

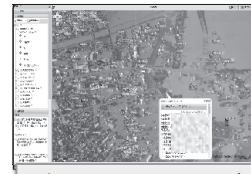


災害情報マップ



災害ボランティアセンター

災害ボランティアおよび住民ニーズの管理を支援



ボランティアニーズ管理マップ



- 地理情報を中心とした情報の処理(地図作成、共有、出力等)について当時のログやヒアリング等を実施して情報の処理状況を調査・分析。

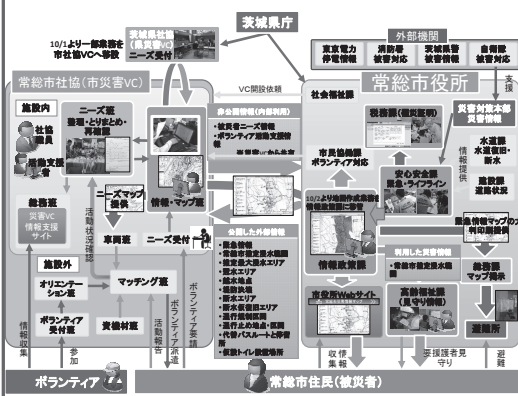
災害時の情報処理に関する調査

防災科学技術研究所 田口仁

- H27年10月末までの地図作成、市役所と災害VCの情報共有、活用状況を線表やフロー図を作成することで情報処理状況を整理。

作成した地図レイヤと利活用した時間フェーズの線表(例)

常総市役所と災害VCの地図の作成、共有、出力状況のフロー図(例)



<研究成果の発表>

田口仁, 李泰榮, 水井良暢, 佐野浩彬, 臼田裕一郎, (2016)「災害ボランティアセンターにおける地理空間情報の利活用方法の提案:被災地支援事例を通じて」, 災害情報(日本災害情報学会誌), No. 14, pp.116-127 (※査読あり)

9

情報支援・情報システムに関する調査:民間支援団体の情報マネジメント(宮川祥子)

- ・ リサーチクエスション:平成27年関東・東北水害での民間支援者(社会福祉協議会、NPO等)による復旧支援活動においてどのような情報課題があったのか、それは何に起因するものであるか
- ・ 手法:平成27年関東・東北水害において災害支援を行った9団体へのヒアリング(支援内容、支援において課題になったこと、情報活用の方法)
 - － 横田能洋氏(茨城NPOセンター・コモンズ)
 - － 前原土武氏(災害NGO 結)
 - － 明城徹也氏(JVOAD準備会)
 - － 高山弘毅氏(前橋市社会福祉協議会)
 - － 千川原公彦氏(ウェザーハート災害福祉事務所)
 - － 柴田貴史氏(鹿沼市社会福祉協議会)
 - － Torishin氏(茨城県守谷市在住・ブロガー)
 - － 柴田哲史氏(災害IT支援ネットワーク)
 - － 佐藤大氏(情報支援レスキュー隊)

明らかになった課題:「情報マネジメント」を意識した災害ボランティアセンター運営の必要性

- 災害ボランティアセンター運営のための情報マネジメント
 - 手順書の作り込み不足
 - 複数のフォームがあり混乱
- 災害ボランティアセンターからの情報発信
 - 被災情報の発信と被災者のプラバシーの兼ね合い
 - 支援者に情報を届けるための、ホームページとSNSの使い分け
- 行政との情報連携
 - 行政と災害ボランティアセンターの情報連携が不十分
 - 行政内部の情報統制の混乱
- 被災者の支援ニーズの獲得
 - 災害ボランティアセンターが住民の支援ニーズを拾いきれていない
 - 支援ニーズとボランティアのマッチングが不十分
- 情報システム・情報インフラ
 - 普段使っていない情報システムは災害時には使えない
 - 避難所の固定電話に発信制限がかかっており使えない
 - ボランティア登録やオリエンテーションなどに情報システム・SNSなどが十分に活用できていない
 - 支援スタッフが頻繁に入れ替わる状況では情報システムの導入コストが大きい

まとめ

- 常総市地域防災計画には内容的不備があったほか、職員に十分に周知徹底されていなかった。
- 同市災害対策本部は、環境面、情報面、運営面等の課題が重なったことにより効率的に機能しなかった。
- 同市安全安心課は、情報や電話対応の過集中により、災害対策本部の事務局機能を果たせなかった。
- 関東・東北豪雨の死者数(8人)は、特筆するほど多くはなく、鬼怒川の破堤氾濫に起因する犠牲者は最大2人。
- 非高齢者の比率がやや高く、本事例に固有の特徴である可能性あり。
- 氾濫破堤による浸水でも、家屋流出に至るほどでない浸水範囲では、犠牲者はほとんど生じていない。
- 特別警報は行政の体制整備に効果を持ち、河川管理者のホットラインは意思決定に有効に機能していた。
- 大河川と中小河川とを合わせた総合的な判断が求められ、水位の実況・予測に関して高度な共有が必要。
- 沿岸市民に対しては、災害の進展過程に関する知識形成を図っていくことが求められる。
- 災害ボランティアセンターが住民の支援ニーズを拾いきれていない。
- ボランティア登録やオリエンテーションなどに情報システムやSNS等が十分に活用されていない。
- 災害ボランティアセンター運営に当たっては「情報マネジメント」を意識する必要がある。

平成27年9月関東・東北豪雨の災害タイムライン統合閲覧システムの開発

メニュー

- 気象
- ダム
- 河川
- 氾濫
- 行政
- まとめ

サブメニュー

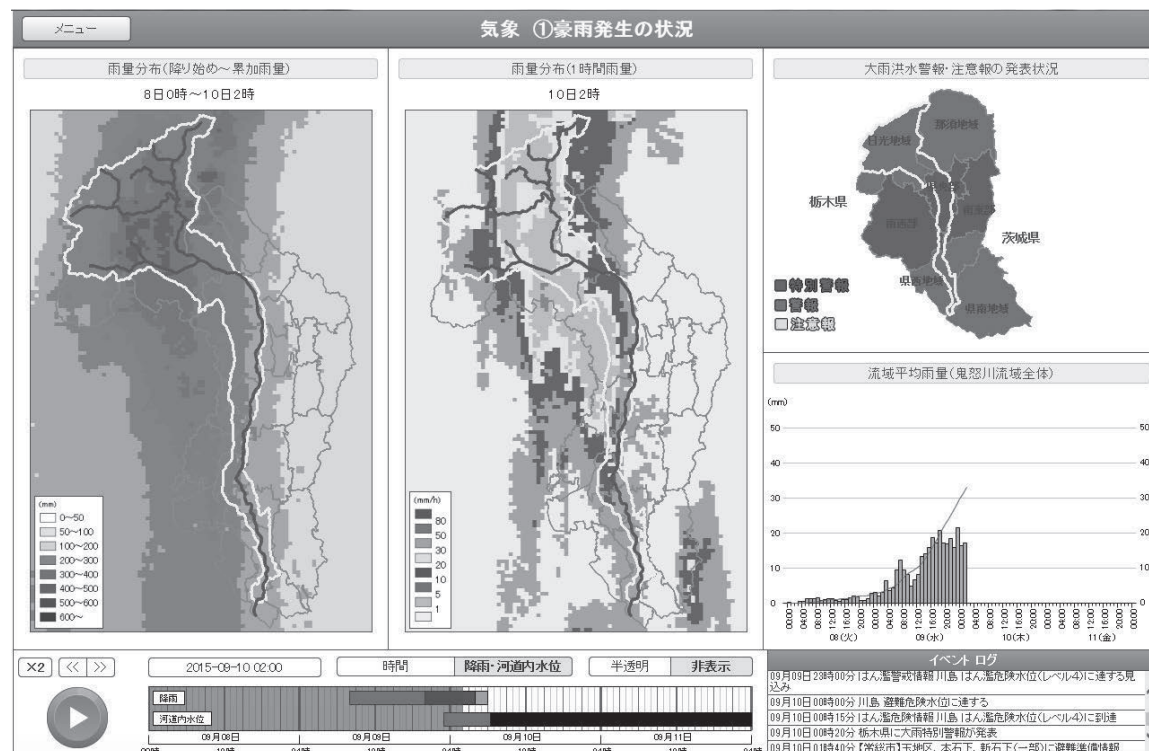
- ①豪雨発生状況
- ②降雨の予測（雨量分布）
- ③降雨の予測（アメダス雨量）
- ④上流4ダムの操作状況
- ⑤洪水規模
- ⑥観測所水位の状況
- ⑦氾濫解析シミュレーション
- ⑧避難情報

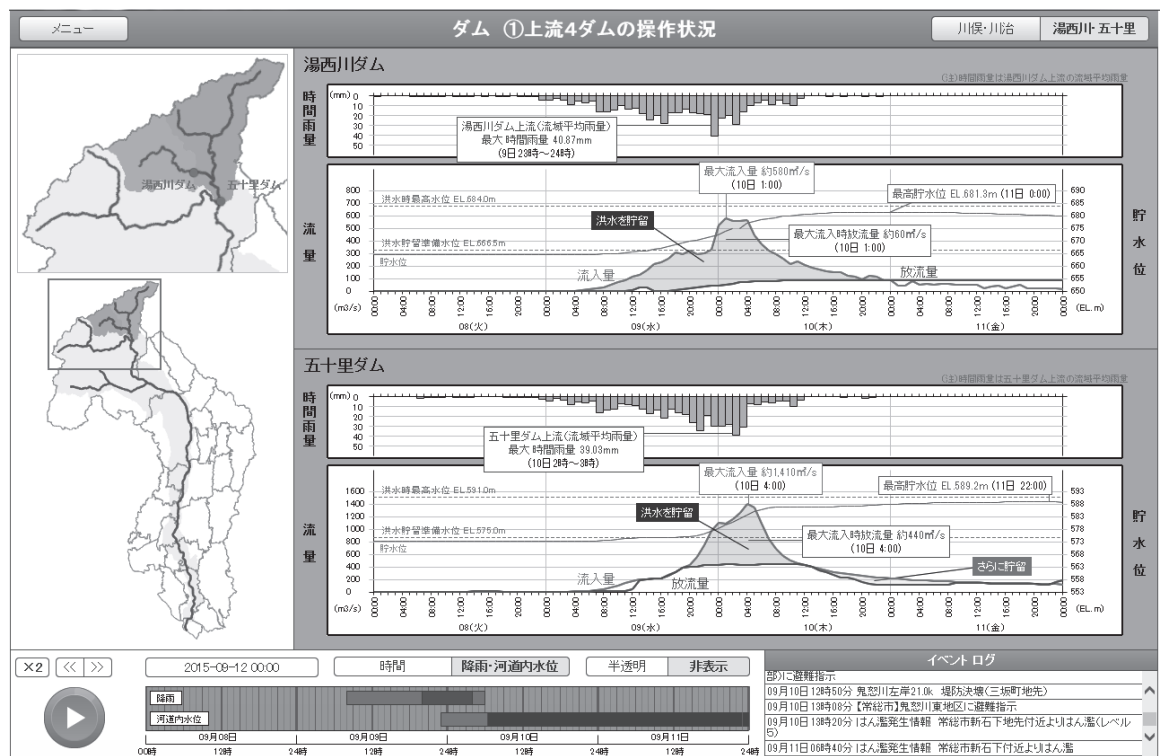
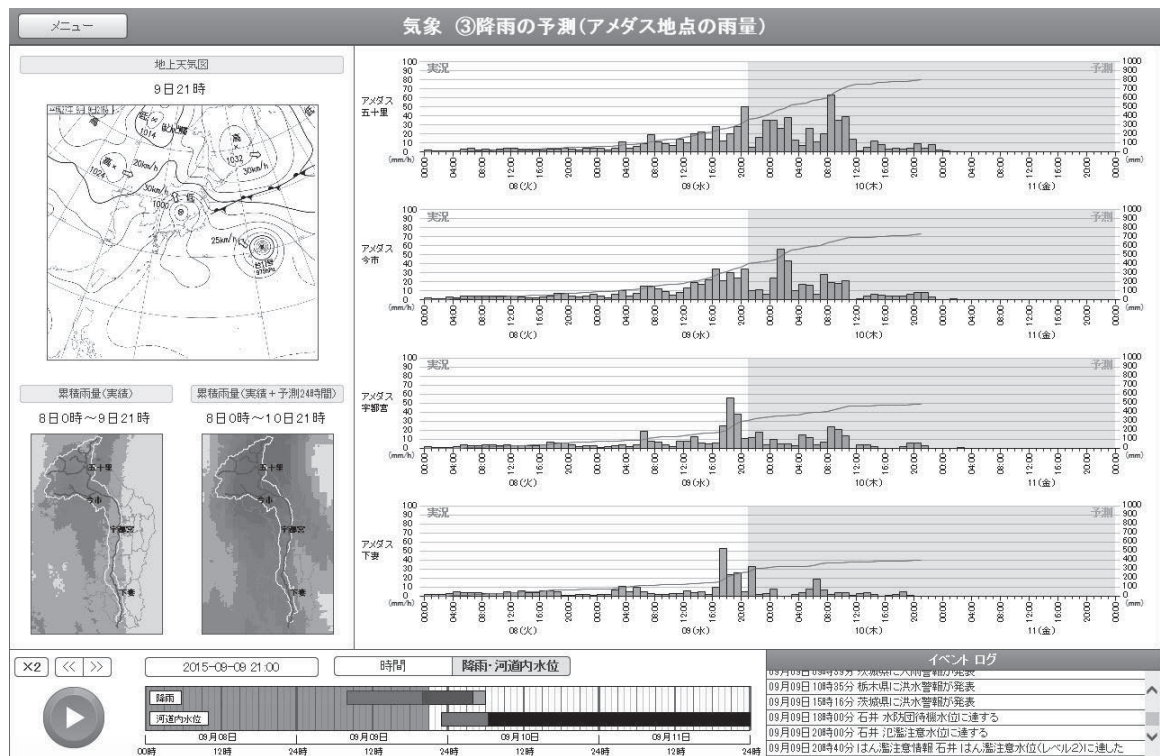
平成27年9月関東・東北豪雨

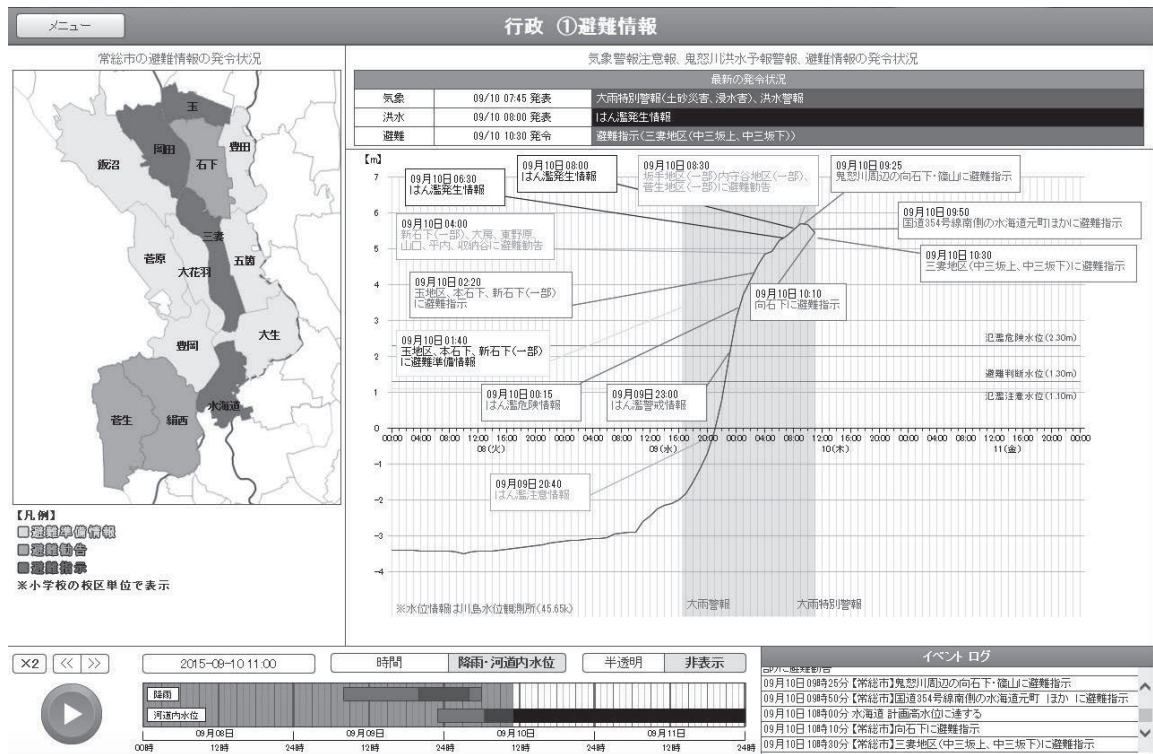
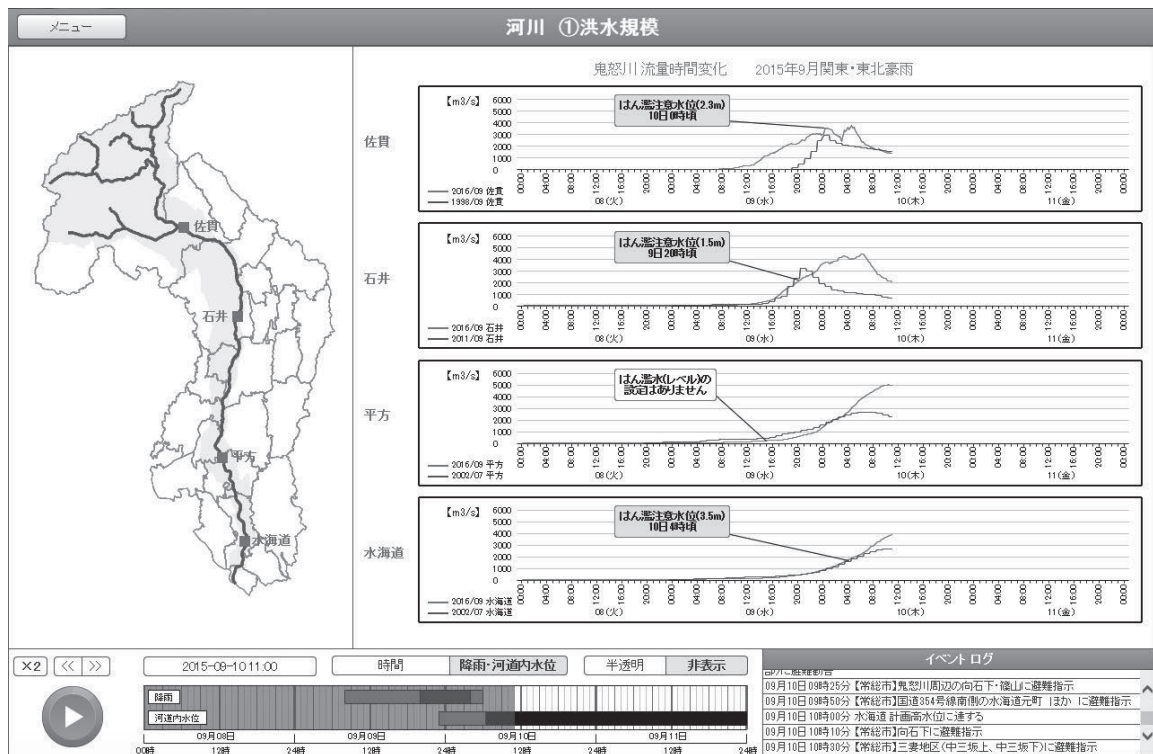
- ①（気象）豪雨の発生要因
- ②（気象）豪雨の予測可能性
- ③（ダム）ダムの洪水調節効果
- ④（氾濫）溢水・決壊の位置
- ⑤（氾濫）堤防決壊のプロセス
- ⑥（氾濫）推定浸水の範囲
- ⑦（被害）氾濫地点空撮写真
- ⑧（被害）堤防決壊動画

提供：国土交通省関東地方整備局

降雨によって、着々と進んでいく、「災害を引き起こす自然の仕組み」と情報の関係をわかりやすく示す







2016 年熊本地震と関連する活動に関する総合調査

清水洋¹・松本聡¹・酒井慎一²・岡田知己³・渡辺俊樹⁴・飯尾能久⁵・
相澤広記¹・松島健¹・高橋浩晃⁵・中尾茂⁶・鈴木康弘⁴・後藤秀昭⁷・
大倉敬宏⁸・山本希³・中道治久⁵・山中浩明³・神野達雄⁹・三宅弘恵¹⁰・
瀬戸一起²・浅野公之⁵・松島信一⁵・福岡浩¹¹・若井明彦¹²・大井昌弘¹³・
田村圭子¹⁴・木村玲欧¹⁵・井ノ口宗成¹⁶・前原喜彦¹⁷・赤星朋比古¹⁷

1. 九州大学大学院理学研究院 地震火山観測研究センター

2. 東京大学地震研究所

3. 東北大学大学院 理学研究科

4. 名古屋大学大学院 環境学研究科

5. 京都大学防災研究所

6. 鹿児島大学大学院 理工学研究科

7. 広島大学大学院 文学研究科

8. 京都大学大学院 理学研究科

9. 九州大学大学院 人間環境学研究科

10. 東京大学大学院 情報学環

11. 新潟大学 災害復興科学研究所

12. 群馬大学大学院 理工学府

13. 防災科学技術研究所

14. 新潟大学 危機管理室

15. 兵庫県立大学 環境人間学部

16. 静岡大学 情報学部

17. 九州大学大学院 医学研究院

要 旨

2016 年熊本地震に関して、地震・地殻変動観測や変動地形学的調査に加え、強震動、土砂災害、災害情報、災害過程、災害医療などの総合的調査を実施した。熊本地震は、布田川・日奈久断層帯の右横ずれ運動によって発生したが、走向・傾斜などの断層形状が異なる複数の断層面が活動したと考えられる。被害の大きさと余震の加速度振幅の空間分布には強い相関が認められた。地すべりについては、せん断時に発生する過剰間隙水圧が発生要因の一つであることを明らかにした。熊本地震災害は、都市型災害と中山間地域の災害が同時に発生した広域複合災害であることを示し、エコノミークラス症候群などの災害医療も含め、それらの教訓と対策を考察した。

キーワード：熊本地震，布田川断層帯，日奈久断層帯，活断層，強震動，地すべり，広域複合災害，エコノミークラス症候群

1. はじめに

2016 年 4 月 14 日、熊本県熊本地方でマグニチュード 6.5 の地震が発生した。この地震により、熊本県益城町で最大震度 7 を観測し、大きな被害をもたらした。さらに、16 日には M7.3 の地震が発生し、建物の倒壊、土砂災害により 40 人以上の生命が失われた。この 2 つの地震は、それぞれ南北方向、北西―南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で、この地域を北東―南西方向に走る布田川断層帯と日奈久断層帯が活動したものと考えられる。今回の地震災害は、最初の M6.5 の地震で傷んだ家屋が、それに続いて発生した M7.3 の地震で倒壊した可能性も大きく、内陸地震の続発という現象は学術的に見て重要な現象であると同時に、今後発生する内陸地震による災害の軽減に、学術的に貢献できる重要な知見がもたらされると思われる。

本研究では、今後の活断層評価や防災対策に資することを目的として、陸上臨時地震観測等による余震活動・地殻構造調査、GNSS 及び変動地形学的手法を用いた地殻変動調査、阿蘇山における地震・火山活動の変化と大きな地震の発生に伴う火山活動への影響調査、災害調査・強震観測による強震動発生特性調査、土砂災害及び地すべり発生機構調査、社会素因による被災救援、地域社会に係る影響調査、深部静脈血栓症（エコノミークラス症候群）の発生状況と医療活動の調査を実施した。これらの調査研究は 2016 年 8 月現在も継続中であるが、ここではこれまでに得られている研究成果を報告する。

2. 陸上臨時地震観測等による余震活動・地殻構造調査

(1) はじめに

2016 年熊本地震は 4 月 14 日 M6.5（最大震度 7）からはじまり、最大地震 4 月 16 日の M7.3（最大震度 7）、さらに多くの規模の大きな地震が発生した。この地域は、従来から微小地震活動が活発な地域であると同時に、活断層として布田川―日奈久断層帯が中央部に位置する地域である。この地域では一連の地震発生前に大学、防災科研、気象庁による定常的な地震観測網のほかに約 40 点の臨時観

測点が展開されていた。地震発生後、大学および産総研、防災科研などが協力し、熊本から大分にかけての広範囲に稠密臨時地震観測点を展開し、現在（2016 年 7 月時点）も継続中である。この臨時地震観測ではオンライン観測点 9 点およびオフライン観測点 59 点が展開されている。さらに、日奈久断層帯の北部から日奈久断層帯・布田川断層帯の接合部を経て阿蘇山北側に至る約 65km の区間においては稠密地震観測を行った。また、地震活動と比抵抗構造との特徴を従来のデータをコンパイルすることによって把握する。

(2) 震源分布の特徴

臨時地震観測網による観測データから震源分布の特徴が得られた（九州大学・ほか、2016）。収録されている地震波形から手動検測によって決定された震央分布を図 1 に示す。震源は Saiga et al. (2010) による 3 次元速度構造を用いて、Double Difference 法によって決定された。図中の震央は地震前（1996 年～）[期間 1]、4 月 14 日 M6.5 以降～4 月 16 日 M7.3 前[期間 2]、それ以降[期間 3]に区分している。また、M5 以上の震央は星印で示している。発震機構については初動極性によるものと、気象庁による CMT 解を示している。図中には活断層の地表トレースもプロットしている。

この地域の通常発生している地震活動は図 1 の分布から見て取れるように、断層およびその周辺の広範囲に分布している。このうち 1999 年から 2000 年においては日奈久断層沿いに最大マグニチュード 5 の地震が発生している。M6.5 の地震はこの震源域よりやや西に位置し、発生後は日奈久断層のトレースよりやや西側で震央が分布していることがわかる（期間 2 の震央分布）。M7.3 発生後は日奈久断層、布田川断層沿いだけではなく広範に活発な地震活動が起こっている。発震機構解を見ると、M6.5 の初動解は東落ちの高角な横ずれ断層である。走向は日奈久断層のよりやや時計周りに回転している。一方、CMT 解はほぼ日奈久断層走向と一致している。また、M7.3 についてはその走向が初動解と CMT 解でかなり異なることがわかる。このように、熊本地震は複雑な断層形状を持つ活動であることが明らかになった。布田川断層、日奈久断層にそれぞれ直交する断面における震源分

布を見ると、布田川断層近傍は多くのクラスターが見られ、明瞭な断層面が震源からは見られない。

一方、日奈久断層に対応する断面においては比較的明瞭な断層面と考えられる震源分布が見られる。特に、布田川断層との接合部付近は高角の断層面が複数確認できる。熊本地震の活動だけでなく、従来の活動においても異なった断層面を認識することができる。このように、日奈久断層周辺においては断層が複数存在する特徴が見られる。

(3) 熊本地震の発生場

この地域においては地震以前の発震機構解を用いて応力テンソルインバージョン解析がなされている。九州全体においては南北もしくは北北西―南南東の方向を向く主張力軸が大きな特徴として挙げられる。熊本地震の発震機構解もこの特徴を持っている。応力比の解析から、別府―島原地溝帯および震源域においては最大主圧縮応力と中間主応力が近い値を取ることが明らかになっている。これは、地震発生メカニズムとして横ずれ断層、正断層のどちらでも起こりうる応力場であることを示している。この応力場の状態が横ずれ断層や正断層成分を持つ地震が混在し、複雑な活動様式を示す 2016 年熊本地震に影響していると考えられる。

(4) 稠密地震観測

稠密地震観測測線は、日奈久断層帯の北部から日奈久断層帯・布田川断層帯の接合部を経て阿蘇山北側に至る約 65km の区間に設定し、観測点を 250m-500m 間隔で 225 箇所に設置した。また、測線周辺の 25 箇所にも面的に配置した。観測は、2016 年 4 月 30 日～5 月 29 日まで実施し、各観測点では、固有周波数 4.5 Hz の地震計によって上下動及び水平動の 3 成分観測を行った。収録は、Geospace 社製の独立型レコーダである GSX-3 を用い、サンプリング周波数は、測線上の 225 観測点では 500Hz、測線周辺の 25 観測点では 250Hz に設定して連続収録を行なった。

気象庁一元化震源リストによると、観測期間中に余震域を含む研究対象地域（緯度 32.6°-33.2°N: 経度 130.5°-131.3°E）では Mj1.0 以上の地震の震源が 920 個決定されている。

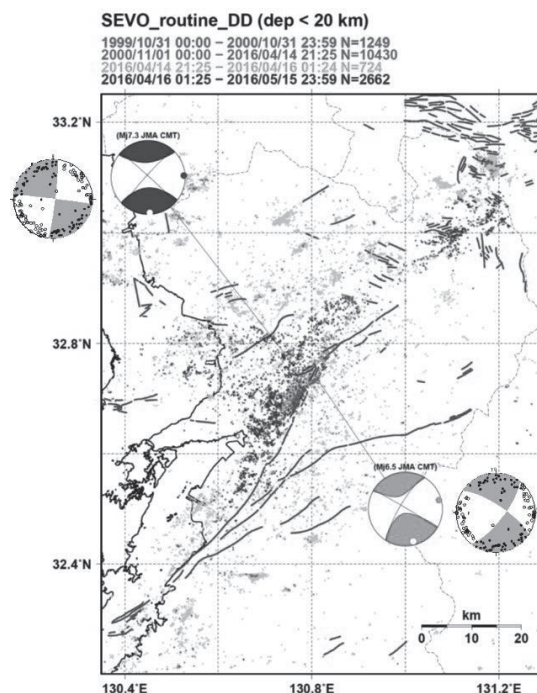


図 1 再決定された震源分布

稠密余震観測で得た連続記録から、これら地震の震源時刻に従って、イベント毎へのデータ編集を実施した。観測波形の一例を図 2 に示す。得られた記録は良好で、初動が明瞭に観測されている。

(5) 比抵抗構造

従来までに別府―熊本にかけて行われている、比抵抗構造調査のデータを総合的に解析し、比抵抗構造を得た (Aizawa et al., 2016)。247 点での広帯域 MT 観測 (0.005-3000 秒) のデータを解析からの結果を図 3 に示す。これによると、2016 年熊本地震は低比抵抗と高比抵抗の境界部分に発生する結果が得られた。これに対して、低比抵抗の領域においては地震活動が極めて低いことが明らかになった。これらのことから、今回の地震は局所的な応力蓄積と低比抵抗領域からの流体供給によって発生したと考えられる。これらは、他の内陸地震発生域で得られてきた知見と整合的である。

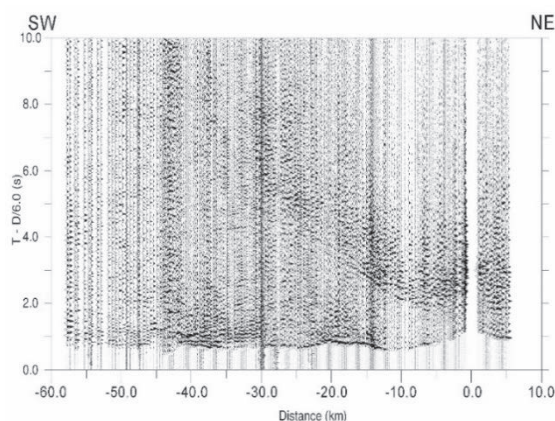


図2 観測波形例（上下動成分）（震源時：2016/5/5 3:17:10.23, Latitude: 33.0335 °N Longitude: 131.1548 °E 8.8 km deep, $M_{JMA}=3.4$ ）。横軸は震央距離，縦軸の時間は原点が震源時に対応する。振幅はトレースごとに最大振幅値で規格化して示してある。波形記録にはフィルター処理を施していない。

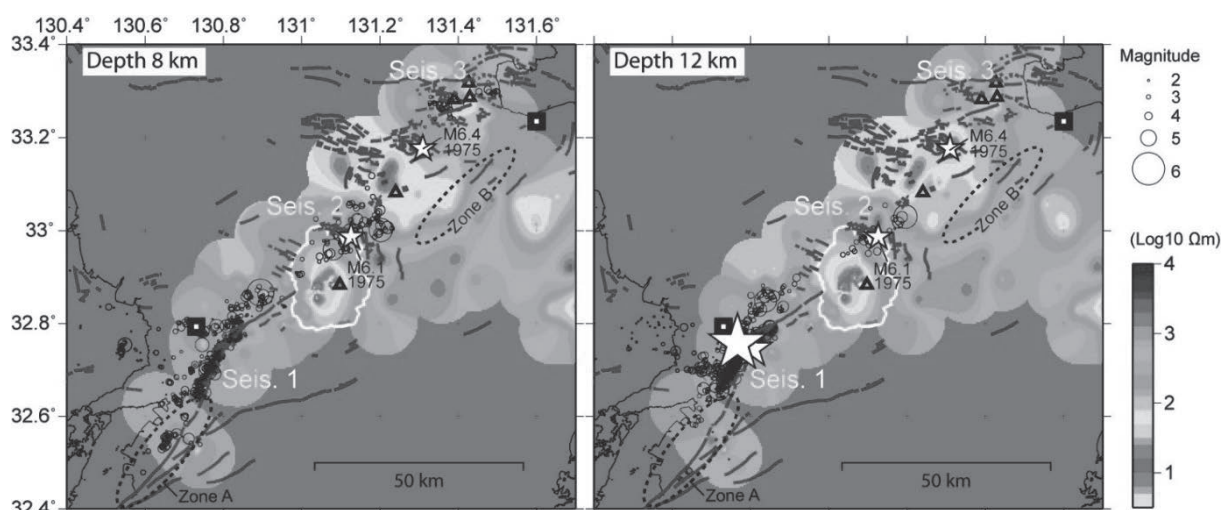


図3 広帯域MT観測データから得られた比抵抗構造分布

3. GNSSおよび変動地形学的手法を用いた地殻変動調査

3.1 GNSSによる地殻変動観測

2016年4月14日にM6.5の地震が熊本地方に発生し、震度7を記録した。翌4月15日午後に余効変動を観測する目的でGNSS連観測点を1点設置した。4月16日未明にM7.3の熊本地震が発生し、それとともに大分地方でも地震活動が活発化した。そのため、8大学が共同し、余効変動と大分地方での地震活動と地殻変動の観測を目的としてGNSS連続観測点をさらに20点設置し、観測を継続している。本震発生後4月17日から設置を開始し、4月28日に21点目の設置を終え、観測を開始した。GNSSのデータは数ヶ月に一度現地に行き、回収し、

鹿児島大学に送られている。鹿児島大学では、国土地理院からGEONETのデータを、気象庁から常時観測されている火山に設置されたGNSSデータの提供を受け、さらに、地震発生前より九州大学、京都大学、鹿児島大学で行っていたGNSS共同観測のデータとあわせて、解析を行っている。図4に解析を行っている観測点を本研究で設置した21観測点とともに示す。

解析はBernese GNSS Software V5.2を使用し、CODE精密暦、CODE地球回転パラメタを用い、各観測点の座標値を1日ごとに推定している。大気伝播遅延量はVMF1マッピング関数を用いて2時間ごとに、その勾配は1日ごとに推定している。解析された観測点の時系列を図5に示す。余効変動が観測されていることがわかる。しかし、その変動には観測点により違いが

見られ、地震断層北西の観測点では、大きな余効変動は地震後半月ほど継続し、その間最大で約 1cm の変動量であったのに対し、南東側の観測点は、1 月半後もまだ余効変動は継続しており、その量は最大で約 6cm である。つまり、断層をはさんで余効変動の変位が対象になっていないことを意味し、横ずれ断層のアフタースリップのみで説明するのは難しいと考えられる。

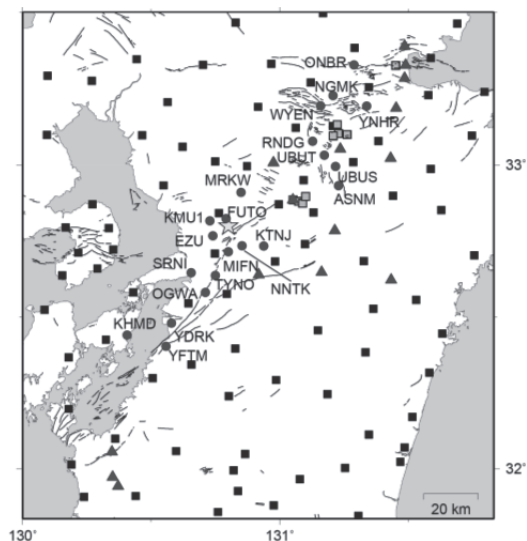


図 4 本研究で設置した GNSS 連続観測点（丸）、九大・京大・鹿大（三角）、GEONET（黒四角）と気象庁（灰色四角）の GNSS 連続観測点の配置を示す。星印は本震の震央位置を示す。

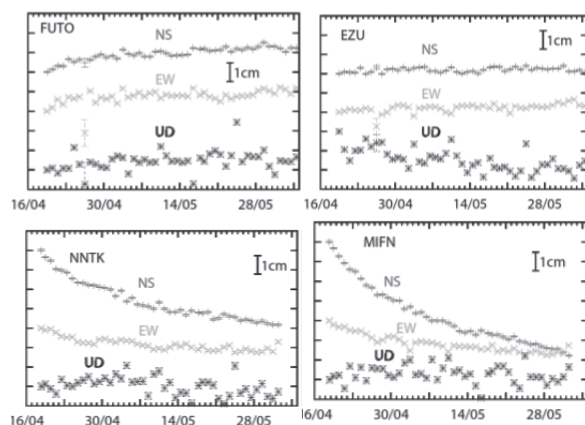


図 5 本震後の観測点位置の変化。上段（FUTO, EZU）は地震断層北西側に設置された観測点であり、下段（NNTK, MIFN）は南東側に設置された観測点である。

本調査研究は、以下のメンバーによって実施された：中尾茂¹、松島健²、田部井隆雄³、大久保慎人³、山品匡史³、大倉敬宏⁴、西村卓也⁵、澁谷拓郎⁵、寺石真弘⁵、伊藤武男⁶、鷺谷威⁷、松廣健二郎⁶、加藤照之⁸、福田淳一⁸、渡邊篤志⁸、三浦哲⁹、太田雄策⁹、出町知嗣⁹、高橋浩晃¹⁰、大園真子¹⁰、山口照寛¹⁰、岡田和見¹⁰（1. 鹿児島大学、2. 九州大学、3. 高知大学、4. 京都大学、5. 京都大学防災研究所、6. 名古屋大学、7. 名古屋大学減災連携研究センター、8. 東京大学地震研究所、9. 東北大学、10. 北海道大学）

3.2 熊本地震に伴う地表地震断層のトレースと変位量分布

大学合同地震断層調査グループは、2016 年 4 月 14 日 $M_j=6.5$ の地震発生の翌日 15 日から調査を開始し、14 の大学・機関、23 名の合同により、一連の熊本地震の地表地震断層全体の分布、変位量を明らかにした。その結果の概要は以下の通りである。

- (1) 地表地震断層の長さは少なくとも 31km であり、阿蘇カルデラ北部の異常変形までを含めると、長さ 40km に達する。
- (2) 今回の活動は、これまで知られていた布田川一日奈久断層帯北東部と出ノ口（いでのくち）断層に概ね沿って生じており、これらの断層の再活動であると思なせる。いくつかの地域では、従来知られていない範囲にトレースが延びる。また、いくつかの地点では、一般走向に対して共役な $N60^\circ-70^\circ W$ の走向のトレースも認められる（図 6）。
- (3) 布田川断層沿いの地表地震断層の変位は、全体として右横ずれ変位が卓越する（図 7）。本震の震央から約 8km 北東に離れた付近から大きくなる。並走する断層の変位量を累積した変位量の合計は概ね 100cm 以上となり、最大変位量は 250cm に達する。上下変位は、西原村より南部では南西側上がり、西原村より北部では北東側上がりとなる。上下変位は概ね 100cm 以下である。
- (4) 出ノ口断層は、南西側上がりの上変位が卓越し、一部で左横ずれ変位が認められる。上下変位は平均 100cm 程度で最大

200cm に達する。

(5) 14日の地震では日奈久-布田川断層帯の一部で地表地震断層が生じ、16日の地震に伴い、同じ線上で14日の地震後の変位より大きい変位が生じた。

大学合同地震断層調査グループ: 後藤秀昭, 中田 高, 石黒聡士, 石村大輔, 石山達也, 岡 田真介, 楮原京子, 柏原真太郎, 金田平太郎, 杉戸信彦, 鈴木康弘, 竹竝大士, 田中 圭, 田中知季, 堤 浩之, 遠田晋次, 廣内大助, 松多信尚, 箕田友和, 森木ひかる, 吉田春香, 渡辺満久, 津村駿斗

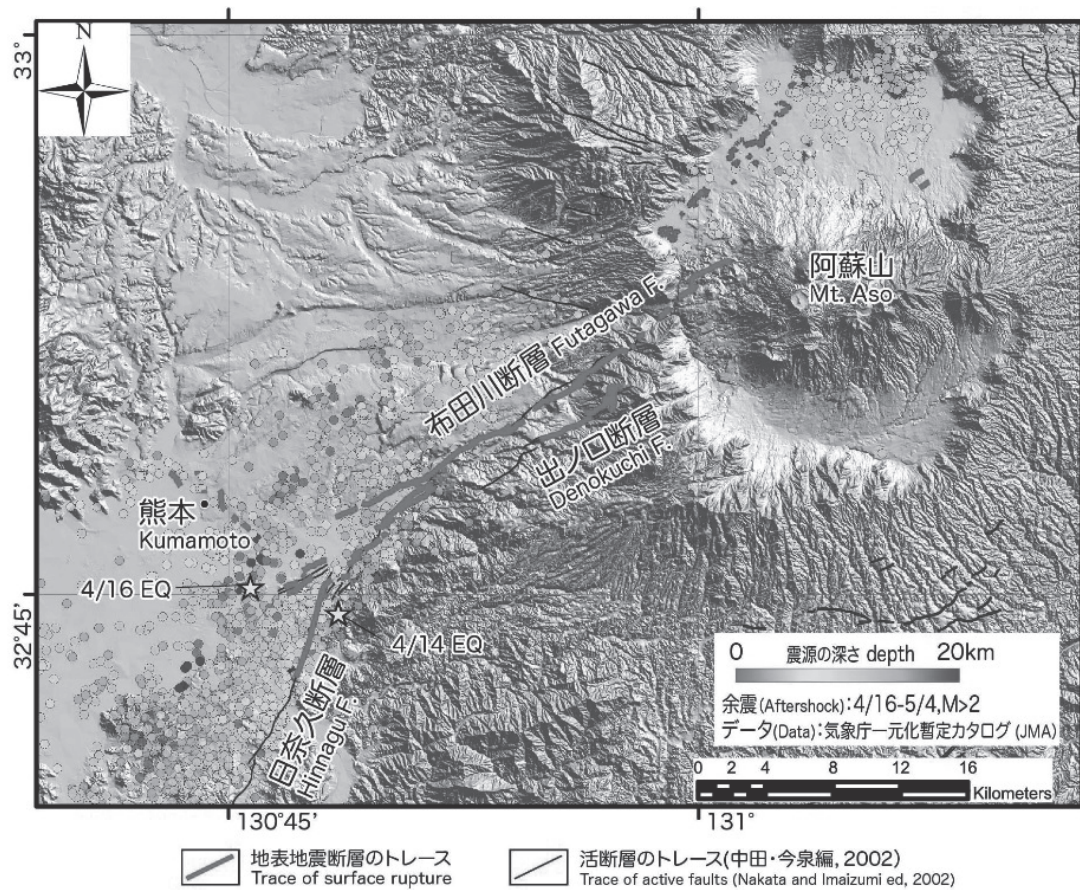


図6 熊本地震に伴う地表地震断層のトレース

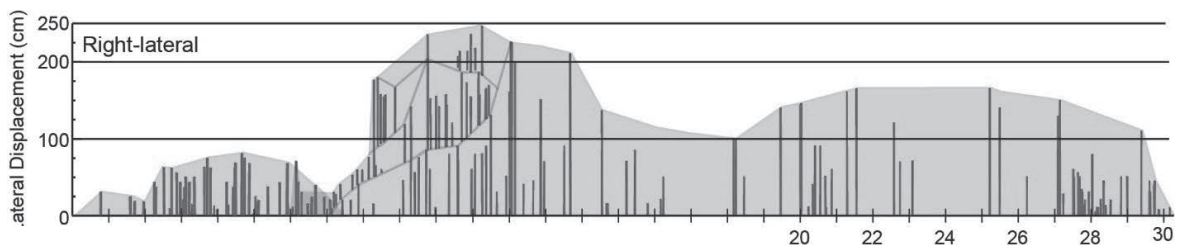


図7 日奈久-布田川断層帯に沿った右横ずれ変位

4. 災害調査・強震動観測による強震動発生特性調査

4.1 強震動から推定した震源破壊過程

東京大学地震研究所のグループは、震源モデルの推定と特定の地域に集中した強震動分布の成因を推定した。2016年4月14日から16日にかけて発生した M_{JMA} 6.5, 6.4 および 7.3 の地震を中心とする熊本地震では、熊本県益城町や熊本県西原村で震度7が複数回観測され、大きな被害をもたらした。こうした震源近傍の強地震動や、それに伴う被害の解釈には震源過程解析を行うことが不可欠であるので、強震、遠地、測地データを用いたジョイントインバージョンを行った。断層モデルの構築にあたっては、地表地震断層位置、余震分布、SAR 解析結果などを考慮に入れると、4月15日の地震を除いて単純な1枚の平面で表現することが難しいため、日奈久・布田川断層帯の接合部および阿蘇カルデラ内で分割して複数のセグメントで表現した。インバージョンの結果によれば、3地震の同じ断層面上のすべり分布はほぼ相補的であった。また、震度7の強震動を起こした4月14日と16日の地震では、どちらも主な断層破壊がやや深い破壊開始点から震度7の地点に向かって、北東方向上向きに伝播していたことがわかった。

また、集中した強震動分布の成因については、以下が考えられる。たとえば4月16日の地震は実質的な断層長さが40~50 km あり、破壊開始点は南西端に近い地点にあるので、横ずれ断層地震のディレクティビティ効果によって兵庫県南部地震並みの長い強震動分布が、断層破壊の進展した北東方向に現れるはずだが、実際の強震動分布は益城町と西原村の周辺に集中したものであった。また、ディレクティビティ効果による速度パルスもこの集中した強震動分布の中にしか現れなかった。この矛盾の原因を上記のインバージョン結果から推定すると、今回の地震の断層破壊では北東方向の横向き伝播だけではなく、やや深い破壊開始点から上向きに伝播する成分が大きいことが影響したと考えられる。その結果、強震動分布は地表面で打ち切れ、破壊開始点からこの打ち切り点までが強震動域となった。4月14日の地震も規模は小さいが同様の現象が起きたと見られる。

一方、京都大学防災研究所のグループは、強震波形記録を用いて4月14日21時26分の地震と4月16日1時25分の地震の震源破壊過程を推定した (Asano and Iwata, 2016)。解析方法はマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法 (Hartzell and Heaton, 1983) を用い、強震波形記録 (K-NET, KiK-net, F-net, 気象庁) に適用した。時空間の平滑化は Sekiguchi *et al.* (2000) に従い、平滑化の強さと第1タイムウィンドウフロントの伝播速度は ABIC 最小規準によって決定した。4月14日21時26分の地震は、地震直後の余震分布及び防災科学技術研究所 F-net のモーメントテンソル解の情報から、日奈久断層帯北端部付近でのほぼ鉛直の断層面 (走向 212 度、傾斜 89 度、長さ 14 km、幅 13 km) を仮定し、13 地点の強震記録から得られた速度波形3成分 (0.05-1 Hz) を解析した。深さ 11.4 km の破壊開始点付近にすべりの大きな領域が見られたほか、北東側のやや浅い部分 (深さ 5 km 程度) にもすべりの大きな領域がみられた (図8)。

2016/4/16 01:25 Mw7.0

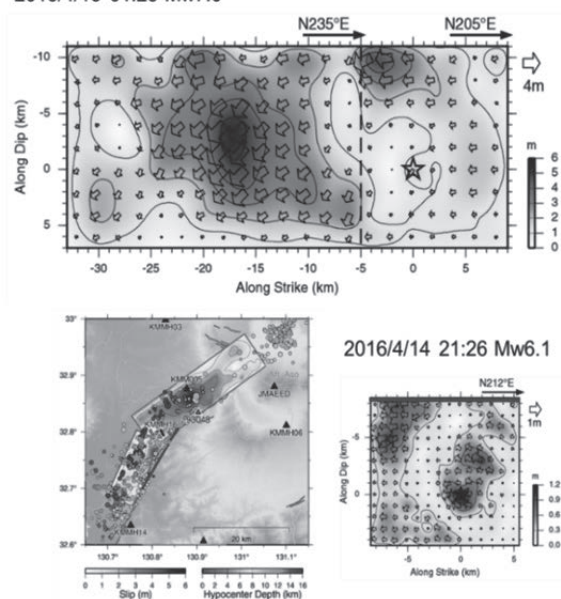


図8 (上)4月16日1時25分の地震(Mw7.0)の最終すべり分布。

(左下)4月14日21時26分の地震(青)と4月16日1時25分の地震(赤)の断層面の位置及び24時間以内の余震の震央。

(右下)4月14日21時26分の地震(Mw6.1)の最終すべり分布。

地震モーメントは 2.04×10^{18} Nm (Mw6.1) , 平均すべり量 0.36 m, 最大すべり量 1.2 m であり、右横ずれのすべりが主であった。最適な第

1 タイムウィンドウフロントの伝播速度は 2.2 km/s と推定された。なお、すべり分布と直後の余震分布の関係は相補的であるとともに、1999 年から 2000 年のまとまった地震活動もすべりの大きな領域の外側に震源が集中している。

4 月 16 日 1 時 25 分の地震については、余震の空間分布や現地調査チームにより報告されている布田川断層帯から日奈久断層帯北部にかけての地表地震断層の情報を考慮し、日奈久断層帯北部（走向 205 度、傾斜 72 度、長さ 14 km、幅 18 km）と布田川断層帯（走向 235 度、傾斜 65 度、長さ 28 km、幅 18 km）に沿った 2 枚の断層面からなるモデルを設定し、15 地点の強震記録から得られた速度波形 3 成分（0.05-0.5 Hz）を解析した。破壊は日奈久断層帯北部の深部から開始し、布田川断層帯に移った破壊は断層深部から北東にユニラテラルに伝播しつつ、浅い方向へ広がっていった。布田川断層帯の延長にある阿蘇カルデラ西部で破壊は停止した。最大すべりを伴うサブ断層の深さは約 8~10 km であり、モーメントテンソル解のセントロイドが深めに決まっていることとも調和的である。地表に最も近いサブ断層のすべり量は 1~3 m 程度である。地震モーメントは 4.50×10^{19} Nm (Mw7.0)、平均すべり量 1.9 m、最大すべり量 5.1 m であった。最適な第 1 タイムウィンドウフロントの伝播速度は 2.4 km/s である。以上のことから、日奈久断層帯北部での前震活動を伴い、Mw7.0 の地震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて、連続的に破壊が伝播した。断層面の傾斜が異なることから明らかなように、4 月 14 日と 16 日の地震は近接した異なる断層面を破壊したものと考えられる。

4.2 余震の強震動観測と微動観測

東京工業大学や東京大学地震研究所などのグループは、2016 年熊本地震の余震による強震動を観測することを目的として、2016 年 4 月 15 日から順次、臨時強震観測点の設置を開始し、図 9 の各点でおよそ 2 週間から 1 か月の余震観測を実施した（一部では観測を継続）。おもに被害が甚大であった地域を中心に観測を行い、益城町には 13 点（図 9 の上図）、西原村では 5 点、阿蘇市と南阿蘇村には 4 点、熊本市から宇土市にかけて 21 点設置した。得

られた強震観測記録には、 M_j が 5 以上の余震、計測震度 4 程度の記録が含まれている。益城町では、図 10 に示すように地震動の空間的な変動が著しく、被害の大きい地点で加速度振幅も大きい。

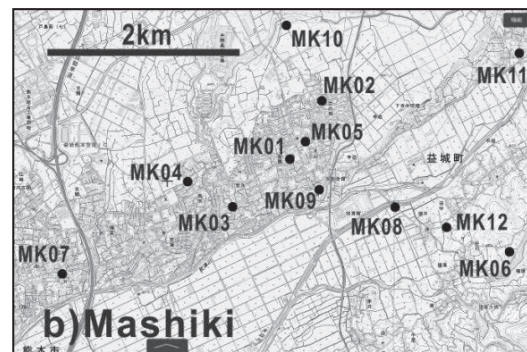
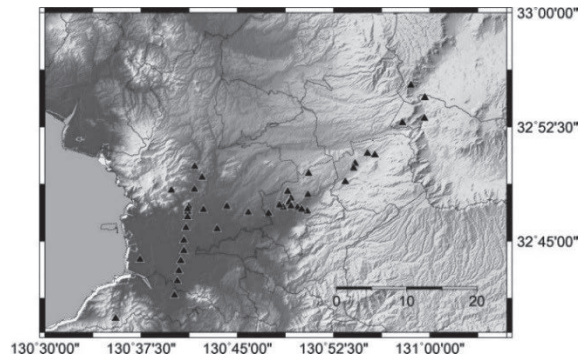


図 9 臨時強震観測点の位置（上の▲，下の●）

図 10 には、MK06（基準点とした）と各点で観測記録から計算された計測震度の差も示されている。被害が大きい地域では、震度差が 0.4~0.8 と大きくなっている。

西原村では、本震を記録した西原村役場、布田地区、大切畑地区や断層の南側にも設置した。それらの記録の変化は大きく、西原村役場では周期 0.5 秒程度で卓越した地震動を観測し、被害が甚大であった大切畑では非常に大きな短周期の地震動が観測された。南阿蘇村では被害が甚大であった河陽地区や立野地区に設置し、河陽地区における余震による地震動が、周辺に比べても大きいことがわかった。

熊本市では、南北と東西方向に観測線を設置した。熊本市の中心部の余震記録は、継続時間が長く長周期地震動が卓越している。臨時強震観測点のほぼすべての地点で微動アレイ探査を実施しており、地盤モデルを推定し

た後に、地盤震動特性について検討する予定である。

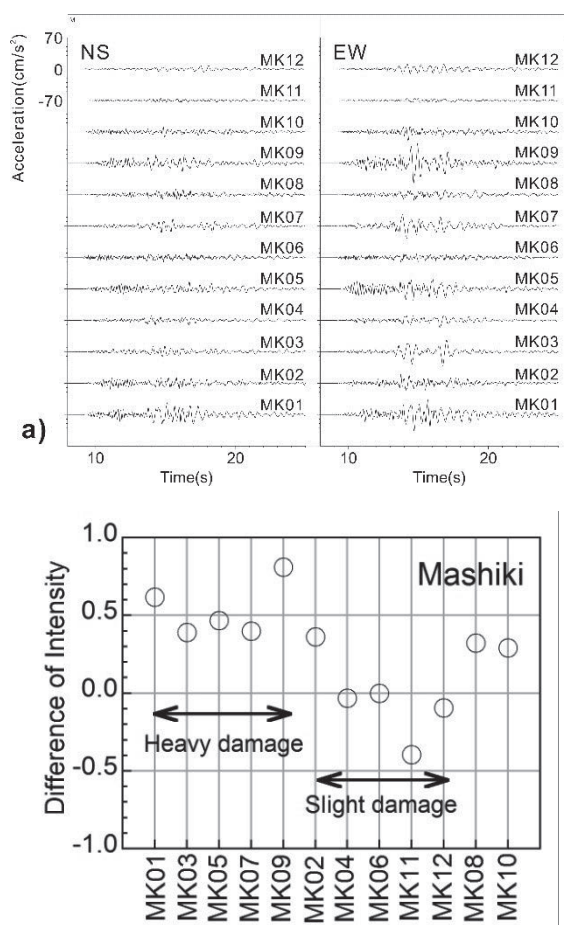


図 10 益城町で観測された地震動記録の例（上：19/APR/2016, M5.0, H11km の地震）と MK06 との計測震度の差（下）

一方、九州大学などのグループは、熊本県上益城郡益城町下陳地区を対象に、2016 年熊本地震により生じた地表地震断層近傍における建物の被害状況を調査するとともに、地表地震断層をまたぐ約 3 km の南北方向の直線上に 5 点の余震観測点を 0.5～1.1 km の間隔で設置し（図 11）、余震記録を用いて被害との関係について考察した。

余震観測は、過減衰型加速計（（株）ミットヨ製, JEP-6A3, 観測点 3 のみ 5V/G, 他は 2V/G）とデータロガー（白山工業（株）製, LS-8800, 分解能 24 bit A/D）を用いて実施した。サンプリング周波数は 100 Hz とし、0.1～40 Hz が平坦となるような総合特性を有する。すべての地点において建物のコンクリート基礎に、磁北を基準として機器を接着剤で固定した。また、GPS の刻時信号を 6 時間毎に受信するこ

とで記録の同期を確保している。電源には小型のバッテリーを使用し、観測期間は 2016 年 4 月 23 日もしくは 24 日からの約 2 週間であり、その間連続観測を行った。観測点周辺の被害状況は以下の通りである。

- ・ 観測点 1 は畑が広がる平坦な地域にあり、標高は観測点 2～4 と比較して高い。周辺には地震計を設置した JA 上益城以外の建物はほとんどないが、その建物に被害はない。
- ・ 観測点 2 はグラウンドの倉庫の脇であり、近傍に住宅はなく、倉庫やトイレなどの建物に被害はない。ただし、観測点 3 との間で、住宅の屋根瓦の落下や外壁の損傷などの被害が見られた。
- ・ 観測点 3 は上陳地区の小学校の体育館の脇であり、地震計を設置した体育館の外壁の一部には損傷が見られ、校内にある石像の損傷、転倒も見られた。また、近傍に全壊した木造住宅も見られ、今回設置した観測点の中では最も被害が大きい。
- ・ 観測点 4 は下陳地区の中心に位置する。観測点近傍の地表断層直上の住宅で、梁の破断や建物の傾斜は見られるが、倒壊に至った住宅はない。
- ・ 観測点 5 の標高は最も高く、周辺に建物は少ない。観測点を設置した非常に古い木造住宅には被害は見られない。

余震観測の結果、観測期間内に発生し、いずれかの余震観測点で地震動が記録された地震の内、KiK-net 益城でも観測された Mj3.5 以上の地震は 26 地震であった（図 12）。観測された記録を用いて KiK-net 益城観測点に対するフーリエスペクトル比、および計測震度差を算定した結果（図 13）、観測点 1 と観測点 3 は KiK-net 益城観測点と同程度で、観測点 2、観測点 4 および観測点 5 は KiK-net 益城よりも小さく、被害の関係と定性的に対応することを確認した。

本震の震源断層面が北に傾斜していることを踏まえると、観測点 3 の方が観測点 4 や観測点 5 よりも震源断層面に近い可能性が考えられる。また、本震時には地盤の非線形化の影響も考えられることから、本震時の揺れの違いの定量的な評価のために、震源の影響の精査ならびに微動アレイ探査や単点微動観測等による地盤震動特性評価を実施する予定である。

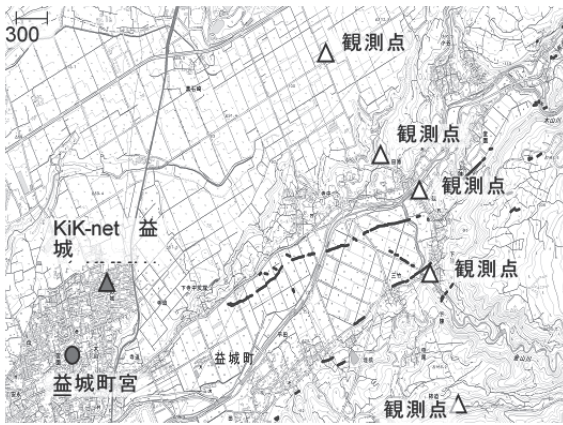


図 11 余震観測点の分布（地理院地図¹⁾に加筆）

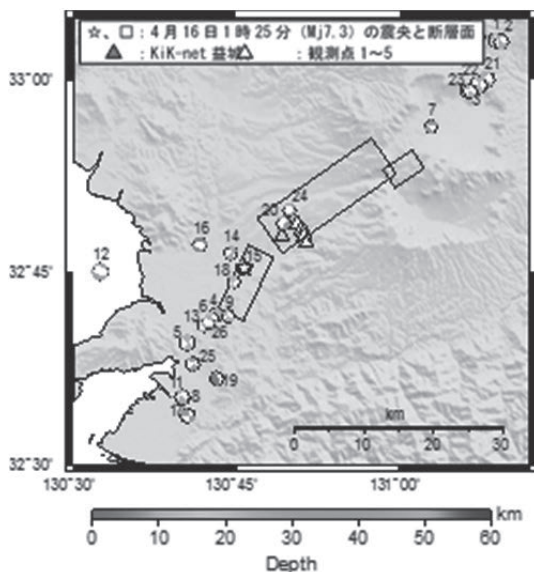


図 12 観測された余震の震央（震源位置は Hi-net²⁾，断層面は国土地理院³⁾による

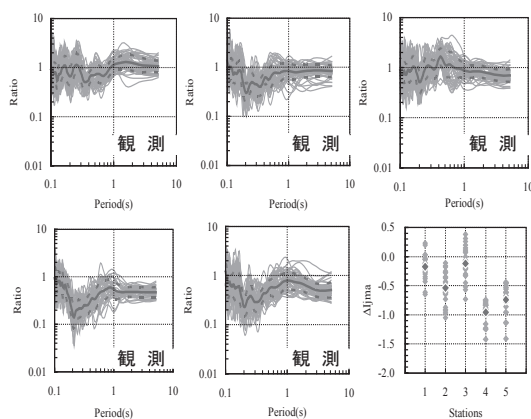


図 13 Kik-net 益城に対するフーリエスペクトル比と計測震度差

5. 土砂災害及び地すべり発生機構調査

5.1 平成 28 年熊本地震による地すべり災害：初動調査と発生機構

(1)はじめに

平成 28 年 4 月 14 日 21:26 に $M_{JMA}=6.5$, 深さ 11 km, 28 時間後の 4 月 16 日早朝 1:25 に $M_{JMA}=7.3$, 深さ 12 km の直下型地震が熊本県益城町付近で発生した。いずれも最大震度 7 を記録し, 最大地表加速度 (PGA) はそれぞれ 1,580 gal, 1,362 gal を記録した。これら前震, 本震の直接被害による死者は 49 名, うち 9 名が地すべりによるものである。(公社) 日本地すべり学会では, この地震による斜面災害の発生状況と被害実態を把握するため, 初動調査を平成 28 年 4 月 17 日から 19 日にかけて実施した。なお, この調査は新潟大学, 防災科学技術研究所および国際斜面災害研究機構の初動調査の一部としても実施した。

(2)地すべり分布図とタイプ

前震直後にアジア航測(株)等が市内及び斜面の写真撮影を行ったが, 地すべりは極めて限定的であった。しかし 4 月 16 日の本震により, 多数の地すべりが群発した。4 月 18 日に朝日新聞社および読売新聞社のヘリにより上空から地すべりの発生状況について観察した。地すべりは 3 種に分類される。(ア) 急崖の尾根付近で多発した地すべり (表層ないし少し深い斜面崩壊): 強震動が地形効果でさらに増幅されたために発生した崩壊が特にカルデラの縁で多数見られる (図 1)。(イ) 緩傾斜斜面で流動性の高い地すべり: 高野台の斜面で複数発生した地すべりが典型で, 10 度未満の緩傾斜で発生し, 長距離流動した (図 2)。(ウ) 崩壊誘起土石流: 地震中も先行降雨も無かったが烏帽子岳西側斜面では崩壊が多発し土石流が多発し大半は斜面上で止まったが, 山王谷川下流では流路を溢れた (図 3)。なお, 益城町の南方に広がる山地, および平成 24 年 (2012 年) 7 月豪雨により流動性崩壊が群発した阿蘇カルデラの北西の縁では今回の地震により誘発された地すべりは見られなかった。

(3) メカニズム

阿蘇大橋地すべりの末端付近の土砂および、高野台地区の流動性地すべりの土砂を採取した。どちらも褐色の火山起源の土砂が卓越している。X線回折(XRD)ではハロイサイトが卓越しているが、高野台試料にはカオリナイト類も含まれていた。また強熱減量解析によると腐植土起源と考えられる有機物をそれぞれ19%、14%含んでいることもわかった。現場一面せん断試験機を用いて12kPa、25kPaの低応力下で飽和定体積一面せん断試験を実施したところ、両試料ともにnegative dilatancyを示し、最小で11度の低い見かけの摩擦角を示した。これは非排水条件下で過剰間隙水圧が発生しうること示す。試験後の含水比はそれぞれ1.4、1.0と異常に大きく乾燥密度も低い。高野台のクロボク試料も含水比は1を超え定体積一面せん断試験では同様の低い見かけの摩擦角を示した。低い密度、高い含水比と保水能力、その結果としてせん断時に発生する過剰間隙水圧が地震時に地すべりを発生させる要因のひとつとなったと考えられる。



写真1 阿蘇大橋の地すべり（朝日新聞社機より福岡が撮影）



写真2 高野台地区の流動性の高い地すべり（読売新聞社機より福岡が撮影）



写真3 烏帽子岳西側溪流の土石流（読売新聞社機より福岡が撮影）

5.2 FEM 解析に基づく斜面変動の発生要因の分析

地形・地質条件を考慮した有限要素法による地震応答解析（若井，2008）を行い，斜面変動の発生要因の分析を試みる。解析対象としたのは，阿蘇大橋周辺の外輪山を含む2～3km四方の領域である。同地域は阿蘇山に由来する火山灰ならびに火山岩類等が堆積した地域であり，これらの材料パラメータの決定にあたっては，既往の類似した地質を対象とした解析事例（北村，2014）などを参考にした。図14は解析対象とした領域の3次元有限要素モデル（20節点アイソパラメトリック要素，減退積分），図15は入力地震動波形（水平2成分のみ）である。地震波形は，防災科学技術研究所の強震観測網kik-netの益城観測所で観測された基盤波形データを使用させていただいた。解析において，土および岩の材料構成則には，せん断強度と動的変形特性を考慮するUWモデル（Wakai, 2004）を採用した。簡単化のため，有限要素モデルにおける地下構造は，深部から表層に向かって徐々に風化が進行して剛性ならびに強度が小さくなるような4層構造からなる地層モデルを仮定した。

地震応答解析の結果の一例として，地震後の地表面の残留変位量（ただし3成分の絶対値ノルム）の分布を図16に示す。同図には，実際に斜面崩壊が発生した箇所も灰色で描いてある。最も大きな崩壊箇所が阿蘇大橋の直上の大規模崩壊である。解析結果において地表面の残留変位が大きな箇所は，地震動による繰返し载荷が斜面内の塑性化をより進行させた部位であると考えられ，斜面内の土のせ

ん断破壊の程度と密接な関わりがあると考えられる。こうした予測される残留変位の大きな箇所と実際に崩壊が発生した斜面の源頭部との相関性の有無について今後検討を進める必要がある。

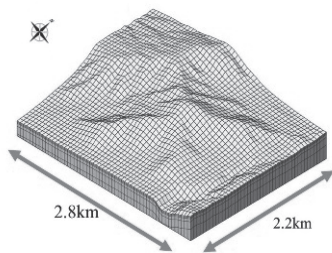


図 14 有限要素メッシュ

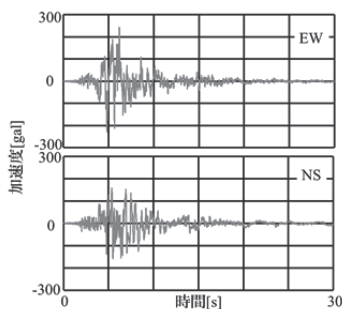


図 15 入力地震動波形

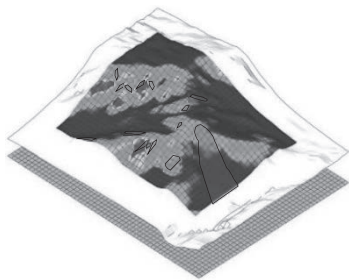


図 16 解析結果（地震後の残留変位）

6. 社会素因による被災救援, 地域社会に係る影響調査

6.1 平成28年熊本地震における特定メッシュの建物悉皆調査

強震計ネットワークを活用したリアルタイム被害推定の効果の実証的検討を行うため、益城町では、熊本地震で計測震度記録が得られている益城町役場周辺2メッシュ（1メッシュは、約250m四方）および辻の城公園周辺1メッシュの計3メッシュを対象とし、当該メッシュに含まれる全建物について被害状況（全壊、半壊、一部損壊、無被害）の調査を行った（図17）。

熊本市内では、リアルタイム地震被害推定システムによる全壊棟数が多く出ている地域を対象に、熊本市内の3地区についてそれぞれ4メッシュの計12メッシュのうち、被害があった建物のみ調査を行った。いずれの調査も、外観目視法によるものである。

今回の調査では、岡田・高井¹⁾²⁾の破壊パターンに基づき、建物被害を評価した。D0からD6までの7段階評価で、D4以上が自治体罹災証明の全壊に相当する。以下に、今回の調査で得られた結果をまとめる。

- ・益城町役場周辺では、新耐震基準（1981年以降の建築）の建物でも、全壊（D4,D5）が出ている。建物構造別では、全壊（D4,D5）の多くは、木造建物である。一方、辻の城公園周辺では、それほど大きな被害は見られなかった。
- ・リアルタイム地震被害推定システムは、益城町においては被害分布をある程度正しく推定できているが、熊本市内を含めた全体では全壊棟数を過大評価している。

本調査研究は、以下のメンバーにより実施された：佐伯琢磨*・中村洋光*・高橋郁夫*・内山庄一郎*・内藤昌平*・はお憲生*・大井昌弘*（* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所）

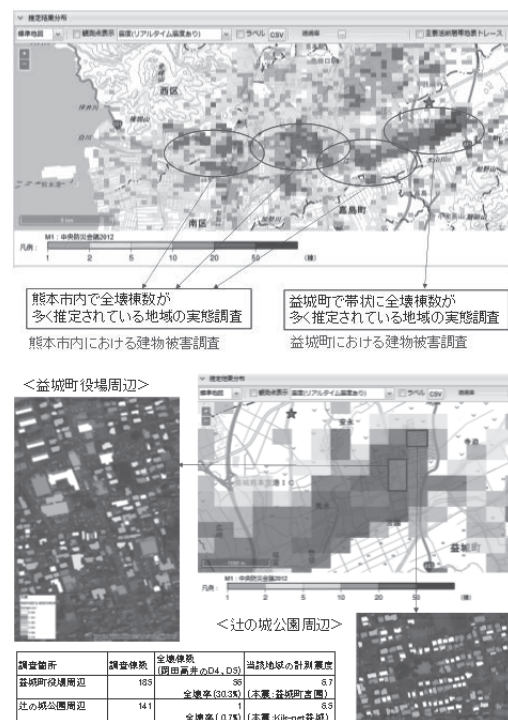


図 17 リアルタイム地震被害推定システムによる本震の全壊棟数推定結果（上）および今回の調査概要（下）

6.2 平成28年熊本地震に複合広域災害の影響を学ぶ

(1) はじめに

熊本地震においては、2度の大きなゆれによって甚大な被害が発生した。特に熊本県においては、30市町村が関わる災害となり、政令市、地方中心都市、中山間地域へと多方面に影響が及んだ。余震の発生回数が多いことが、その後の被災者の行動を特徴づけた。震度1以上の余震回数が、7月26日に発災後はじめて0となり、余震恐怖による避難は落ち着きを見せている。しかし、避難所の避難者数は未だ1800人を超えており、避難所解消の目途は具体的にはなっていない。今後の広域複合災害への教訓と対策を考察することを目的とし、避難行動を中心とした被災者の実態を明らかにする。

(2) 直接被害が地域社会に与えた影響

震度5強以上見舞われた市町村は、4月14日地震では熊本県14市町村、16日地震では熊本県30市町村、大分県では6市町、その他、福岡県、佐賀県、長崎県、宮崎県とその影響は広範囲にわたった。最も被害が甚大であった熊本県において、影響を受けた地域は、政令市（熊本市）、地方中心都市（例：宇城市、菊池市）、中山間地域（例：南阿蘇村）と多方面に及んだ。

熊本市においては、RC造建築物の倒壊を含む建物被害が84,000棟（図18）を超えた。最大で32万戸が断水する等、対応すべき対象被災が圧倒的な数に及んだ。住宅の擁壁被害による交通への影響、大手製造工場被災によるサプライチェーンへの波及、文化財である熊本城への爪痕等、複合的な被害が影響を与える「都市型災害」として位置づけられる。

宇城市においては、7,000棟超、菊池市においては、3,000棟弱の建物が被害を受け、その影響は少なくないものであったが、断層近傍エリアの被災とそれ以外のエリアの差異も大きく、同一市町村界においても、被害の発生はまだらとなった。これらの地域は人口5万人を超える「地方中心都市」と位置付けられる地域である。

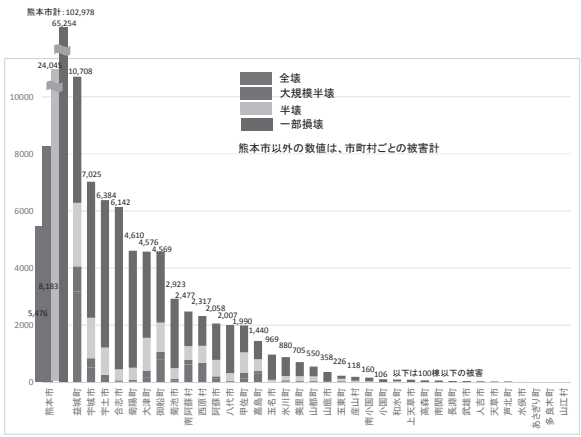


図 18 熊本県市町村における住家被害

（り災証明書交付件数に基づく。8月9日現在）（熊本県、2016）

南阿蘇村においては、大規模な土砂災害が発生した。福岡（2016）によれば、前震では土砂災害の箇所数、規模ともに限定的であったが、本震により震源断層直上に集中して発生した。ゆれによる土砂災害の発生は中山間地域における地震災害の特徴である。

(3) 被災救援に与えた影響

地震や土砂災害等、災害の直接的な影響での死者は49名に上った（表1）（内閣府、2016）。そのうち、家屋倒壊による死者は37名、土砂災害による死者は9名、火災他の要因によるものが3名となった。2度にわたる大きなゆれにより発生した「建物被害による死者発生の実態」を鑑みると、今後の防災対策には、地震発生後の空地（くうち）避難の必要性の認識向上、余震の見通し情報の災害対応活動への活かし方等の検討、の必要性が想定される。

表 1. 直接死の発生と死因

	死者数	内訳		
		家屋倒壊	土砂災害	その他
益城町	20	19		1
南阿蘇村	15	6	9	
西原村	5	5		
熊本市	4	3		1
嘉島町	3	3		
御船町	1	1		
八代市	1			1

熊本県においては、直後には18万超（4月17日183,882人）、1か月後においても1万人

超（5月13日10,477人）が避難生活を送った。避難所避難のみならず、車中泊や軒先避難のような多様な避難形態が見られ、地域特性と余震の多さと大きさが影響を与えていると考えられる。2か月後には6千人（6月13日6,431人）、3か月後には5千人弱（7月13日4,870人）と余震が収まるにつれ、避難者も減少した。しかし、ほぼ4か月たった8月11日現在でも1,803人が避難所で避難生活をおくっている（図19）。なお、本分析における避難者にかかるデータのうち、4月25日から5月14日までは朝夕2回にわたって避難者数が報告されていたことから、図2の作成にあたっては、それぞれの平均値を当該日の避難者数として位置づけている。

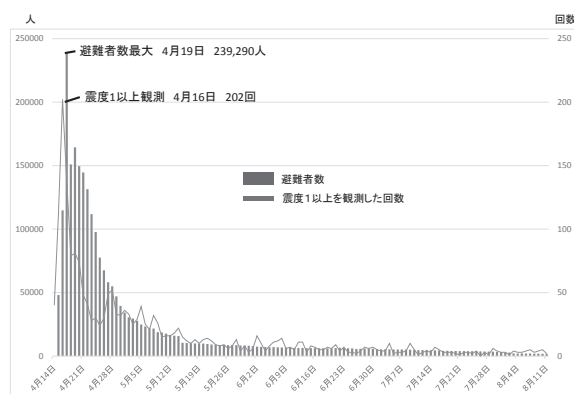


図19 熊本県避難者数の推移と余震発生回数
(熊本県, 2016) (気象庁, 2016)

(4) 避難所における被災者の実態

現在も避難所で生活続ける被災者の実態解明のためのデータ整理ならびに分析を実施した。最も被害の密度が濃く、町全体が被災をした益城町における最大の避難所である「益城町総合体育館」を事例として実施した。なお、本データの整理ならびに分析は、益城町避難所PT（プロジェクトチーム）、福岡県応援職員、生活再建支援連携体が共働で実施したものである。

第5クール（7月1日～7月16日）の食事券配布状況（7月3日現在）から、避難者782名（未整理2人）うち、益城町民である避難者は、752人（337世帯）、それ以外の避難者28人であった。60歳代が全体の23.4%、70歳代が14.2%で、60歳以上で全体の38.4%を占める（図20）。

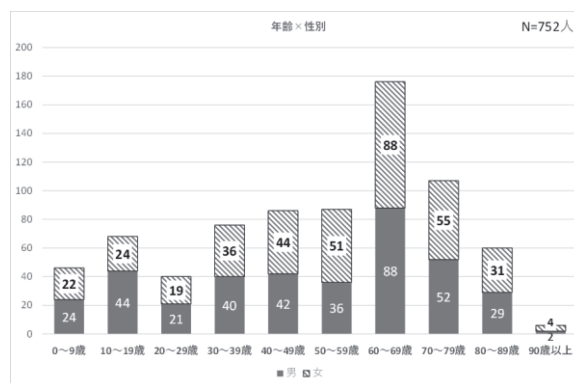


図20. 避難者における年齢分布

避難者における住家の被害割合を見ると、全壊・大規模半壊世帯が60.2%、半壊が10.1%、一部損壊が12.8%、り災証明書未受取りが16.9%であった。全体の6割を全壊・大規模半壊世帯が占めており、居宅の被災程度が重篤な被災者の避難所滞在率が多いことがわかった。一方、一部損壊であっても未だに避難を続けている世帯があり、その理由を知ることが併せて必要であることがわかった。また、そもそもり災証明書を受け取っておらず、居宅の被害程度が確定できていない人が16%超もいることが明らかとなった（図21）。被災者の生活再建の歩を進めるためにも、早い段階での居宅の被災程度の確認ならびにり災証明書発行が必要であることが明らかとなった。

避難している337世帯において、「生活再建支援金」の申込みは、全壊・大規模半壊世帯87.2%が基礎支援金に対し「申込み済み」であり、第一次的な支援が進んでいることがわかった。一方、加算支援金（今後の再建方針決定済み）申し込みは1.0%に留まっており、生活再建目途が立っていない避難者がほとんどであることがわかった（図22）。

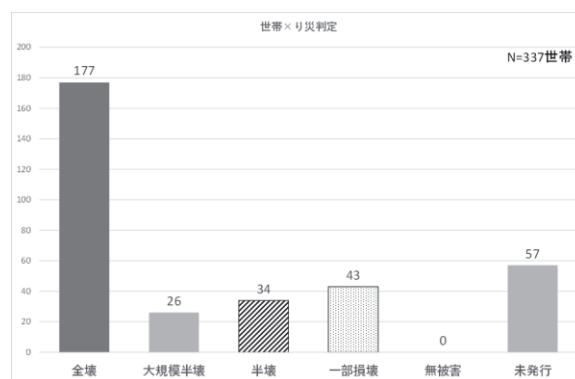


図21 避難世帯における居宅の被害状況

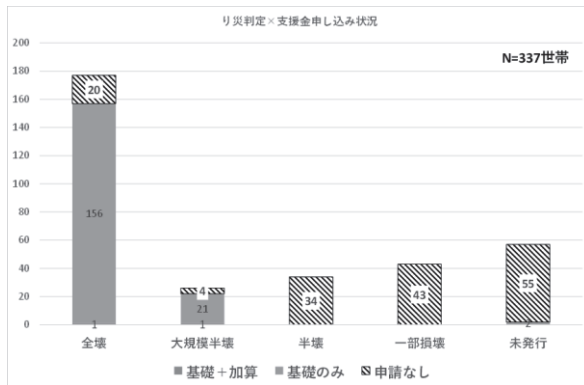


図22 生活再建支援金の申し込み状況

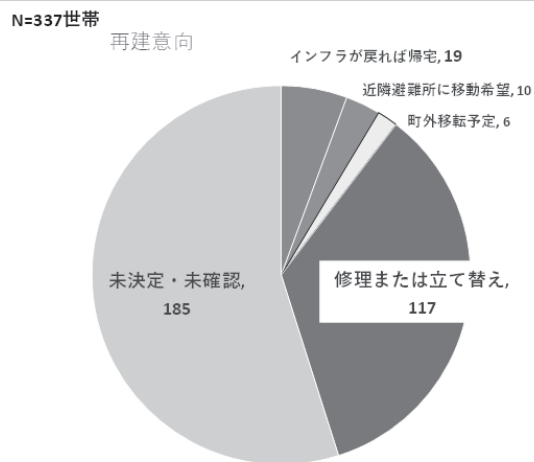


図23 避難世帯における生活再建意向

生活再建のめどは立っているか、直接避難者に尋ねたところ、修理または建て替えを希望している世帯が最も多かった（34.7%）。インフラが戻れば帰宅、町外に移転予定という程度目途を持った被災世帯がいることがわかった。しかし最も多かったのは、再建の意向を未決定または未確認の世帯であり、全体の54.5%を占めた。また、近隣避難所に移動希望を持っている世帯もいることがわかった（図23）。

生活再建支援金の加算支援金の申し込みが少ない現状についてふまえた上で、被災世帯の再建意向の構築への支援を重点的に実施する必要性あることがわかった。同時に「再建目途の構築」に障がいとなっている事項の洗い出しが必要であることが明らかになった。

(5) 今後に向けて

熊本地震は、熊本県において二桁を超える

自治体に対し、被害を発生させた。一方、それらの自治体の地域特性は一樣ではなく、都市部から中山間地域まで、影響が広がっている。南海トラフの巨大地震のように今後広域かつ複合的に被害が発生することが予測されている災害への教訓を大いに学ぶべき災害であると位置づけられる。

現在の継続する避難生活から仮住まい生活への移行、復興の様子等を、社会素因による被災救援、地域社会に係る影響の観点から引き続き、調査・分析し、今後の対応に活かすことが必要である。

本調査研究は、以下のメンバーにより実施された：田村圭子*、木村玲欧**、井ノ口宗成***（* 新潟大学 危機管理本部危機管理室、** 兵庫県立大学 大学院環境人間学研究科、*** 静岡大学 情報学部 行動情報学科）

7. 熊本地震における深部静脈血栓症（エコノミークラス症候群）の発生状況と医療活動の調査

(1) はじめに

車中泊が5万人ともいわれた新潟県中越地震では発災後2週間以内に少なくとも肺塞栓症（PE）が10人（内5人が死亡）と報告されている。家屋の倒壊での直接的な圧死をのぞけば、肺塞栓症（エコノミークラス症候群）による死亡は、震災関連死の死因の内、最多であると思われる。よって車中泊が多いとされる熊本地震においても深部静脈血栓症（DVT）から致命的な肺塞栓症の発生が危惧される。

(2) 目的

熊本地震における深部静脈血栓症に対する医療活動について調査を行い、熊本地震における深部静脈血栓症の発生状況と問題点について明らかにすることを目的として本研究調査を行った。

(3) 方法

熊本地震が発災した平成28年4月14日（M6.5、最大震度7）から平成28年6月13日までに熊本において発生した入院を必要とした「エ

エコノミークラス症候群」の発生数とその継続的発生数,予防,啓発活動の開始時期とその予防効果について検討した。

(4) 結果

発災当初より各避難所ではエコノミークラス症候群の注意喚起,弾性ストッキングの配布等がおこなわれていたとのことであったが,車中泊被災者は避難所に訪れていない場合が多く,その予防活動は限定的であった。実際には発災後,特に 4 月 16 日におきた本震(M7.3,最大震度 7)の地震により車中泊は著増したものと考えられる(図 24)。



図 24

熊本地震においてエコノミークラス症候群の原因となる深部静脈血栓症(DVT)に対する組織的な活動が始まったのは,震災後 5 日目の 4 月 19 日からであった。日本循環器学会等が協力学会となって熊本地震血栓症予防プロジェクト(KEEP project)により,被害の大きかった益城町を中心に第一次スクリーニングで 17 日間,延べ 65 か所で 2023 名,第二次スクリーニングが 23 日間,延べ 38 か所 372 名に下肢超音波エコーがおこなわれた。一次スクリーニングでは 2023 名中 185 名(9.1%)に DVT を認めた。また検診では DVT 予防の啓発活動(図 25),既往症や生活状況のアンケートも行われた。

統計学的解析の結果,地震後眠剤使用,年齢(70 歳以上),下肢腫脹が DVT の危険因子であった。DVT と診断された患者は,地域の病院に受診をするよう勧め,必要であれば抗凝固剤などの内服加療が行われた。熊本県庁のまとめによると入院を必要としたエコノミークラス症候群は 51 名でそのうち車中泊は 42 名であった。そのピークは本震の翌日である

17 日であり,その後,徐々に減少した(図 26)。

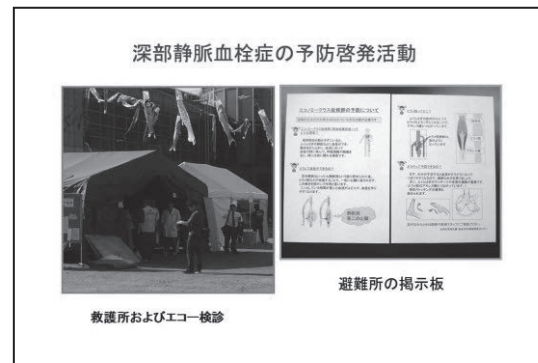


図 25

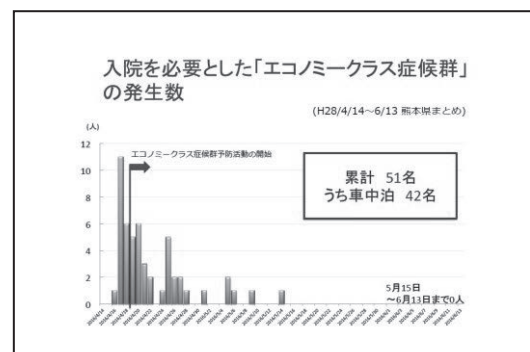


図 26

(5) 考察

図 26 に示すようにエコノミークラス症候群での入院数は K E E P project の活動が開始される前にピークがありより早期に行われることが望まれる。しかしながら 5 月 15 日以降は入院を必要としたエコノミークラス症候群の患者は認めず,血栓予防プロジェクトがその発生を予防したのではないかと考えられた。DVT の危険因子としては高齢,眠剤使用,下肢腫脹であった。眠剤による活動性の低下が DVT の原因となった可能性がある。

(6) 結語

阪神淡路大震災,東北大震災という巨大災害を経験し,震災に対する,DMAT 等の災害支援体制,予想される深部静脈血栓症(エコノミークラス症候群)への対策は以前よりも早期にかつ組織的に行われるようになってきている。得られた教訓をもとにさらなる円滑な防災と医療体制の整備が今後必要である。

本調査は,前原喜彦,赤星朋比古(いずれも

九州大学消化器・総合外科）によって実施された。

8. おわりに

本震発生直後から実施した変動地形学的調査や GNSS 等による地殻変動観測、余震観測、強震動観測などから、2016 年熊本地震を引き起こした地表地震断層および地下の震源断層の特徴が明らかになった。いずれの調査観測結果も熊本地震が布田川・日奈久断層帯の右横ずれ運動によって発生したことを示しているが、詳細に見ると、推定される断層は調査手法によって異なっており、複数の断層面と複雑な断層形状を持つ活動であることが明らかになった。今後は、これらの結果を統合的に説明する震源モデルを考えるとともに、熊本地震の地震学的な全体像を明らかにする必要がある。

地震災害に関しては、建物被害や斜面崩壊の実態が明らかにされ、それらの地盤・地層構造および地震応答等との関係について検討が行われたが、解析をさらに進め、これらの発生要因の詳細を明らかにする必要がある。また、災害情報や災害過程、被災救援などについての調査研究が行われ、広域複合災害について多くの教訓を得たが、引き続き社会素因による被災救援、地域社会に係る影響の観点から調査・分析を進め、今後の復興や将来の地震災害対応に活かすことが必要である。さらに、避難時の車中泊などによるエコノミークラス症候群の調査が実施され、熊本地震血栓症予防プロジェクトの有効性と早期対応の必要性が確認されたことも、今後の対応に活かされるべきである。

謝 辞

調査および観測の実施に際しては、熊本県をはじめ関係の自治体等に多大な協力をいただいた。震源破壊過程の解析には、国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網 K-NET, KiK-net, 広帯域地震観測網 F-net, 気象庁の強震波形記録を使用した。また、地すべり発生機構の現地調査および土質試験には防災科研・酒井直樹氏、新潟大学・Bhoopendra Dabycharun 氏、国際斜面災害研究機構・佐々

恭二氏・Dang Khang 氏の協力を得た。上記機関および関係の皆様記して感謝する。

なお、本調査研究は、科学研究費補助金（特別研究促進費）「2016 年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」（代表：清水 洋）により実施されたが、本研究の一部（リアルタイム地震被害推定システムの研究）については、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理人：JST）を使用した。

参考文献

- 岡田成幸・高井伸雄（1999）：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン、日本建築学会構造計論文集、第524号、pp.65-72.
- 北村和輝（2014）：伊豆大島近海地震(1978)により発生した斜面災害の広域的分布の再現、平成 25 年度群馬大学工学部社会環境デザイン工学科卒業論文、pp.10-11.
- 気象庁(2016)：平成28年熊本地震（8月12日現在）、http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html
- 九州大学大学院理学研究院・京都大学防災研究所・2016 年熊本地震合同地震観測グループ、2016 年熊本地震の活動について（序報）(2016)、地震予知連絡会会報第 96 巻（印刷中）
- 熊本県(2016)：平成28年熊本地震に関する災害対策本部会議資料、
http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_15459.html
- 蔵下英司・酒井慎一・加藤愛太郎・飯高隆・岩崎貴哉・平田 直（東大地震研）・2016 年熊本地震合同地震観測グループ、(2016)、2016 年熊本地震震源域における稠密余震観測、日本地震学会 2016 年秋季大会講演予稿集（印刷中）
- 国土交通省 国土地理院：平成 28 年熊本地震の震源断層モデル（暫定）
- 国土交通省 国土地理院：地理院地図、
<http://maps.gsi.go.jp/>（2016年6月16日確認）
- 小林広明・額額一起・三宅弘恵、2016. 強震、遠地、測地データのジョイントインバージョンによる 2016 年熊本地震の震源過程、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、MIS34-P65.
- 高井伸雄・岡田成幸：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン

分類,日本建築学会構造計論文集,第549号,pp.67-74,2001.11

田中信也・菅原正晴・工藤一嘉・重藤迪子・神野達夫:2016年熊本地震の地表地震断層近傍における建物被害調査と臨時余震観測ー熊本県益城町下陳地区を中心としてー,日本地震工学会2016年年次大会(投稿済み)
福岡浩(2016):平成28年熊本地震による土砂災害の予備現地調査速報(平成28年4月25日),新潟県調査速報会資料
防災科学技術研究所,高感度地震観測網

(Hi-net),<http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>

Aizawa, K. et al. Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan (2016), submitted to Earth, Planets and Space.

Koketsu, K., H. Miyake, H. Kobayashi, S. Yun, 2016. Concentrated Ground Motion Distribution Due to Diagonal Rupture Propagation during the Mw 7.0 Event of the 2016 Kumamoto, Japan, Earthquakes, 2016 AGU Fall Meeting, submitted.

Wakai, A. and Ugai, K. (2004) : A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soils and Foundations, Vol.44, No.4, pp.83-97.

災害対応を支える地理空間情報の新技術

宇根 寛*

* 国土地理院

要 旨

近年の地理空間情報技術のめざましい発達により、地理空間情報は災害対応に不可欠な情報となってきた。本発表では、防災・減災、救助・救援、復旧・復興など災害対応のあらゆるステージにおいて重要な役割を果たしつつある地理空間情報の新技術について、その応用事例をいくつか紹介する。

1. はじめに

「地理空間情報」とは、2007年に制定された地理空間情報活用推進基本法により、「空間上の特定の地点又は区域の位置を示す情報、またはその情報に関連付けられた情報」として新たに定義された用語である。

近年の地理空間情報技術のめざましい発達により、地理空間情報は災害対応に不可欠な情報となってきた。2012年に災害対策基本法が改正され、「災害に関する情報の収集及び伝達にあたっては、地理空間情報の活用に努めなければならない。」との規定が盛り込まれた。さらに、2015年3月に仙台で開催された国連防災世界会議において採択された「仙台防災枠組」においても、地理空間情報技術を活用したリスク情報の整備、更新、提供が重要であることが記載された。

本発表では、防災・減災、救助・救援、復旧・復興など災害対応のあらゆるステージにおいて重要な役割を果たしつつある地理空間情報の新技術について、その応用事例をいくつか紹介する。

2. 災害情報の収集に関する新技術

2.1 干渉SAR

2014年5月に打ち上げられた地球観測技術衛星「だいち2号」に搭載された合成開口レーダPALSAR-2は、高い分解能と干渉性、軌道の安定性、プログラミングの柔軟性などにより、運用開始当初からさまざまな災害に関する情報の収集にいかんなくその能力を

発揮した。地殻変動や地表の変動を高い分解能で迅速に把握することができることから、2015年4月のネパール地震、2014年11月の長野県北部の地震、2016年4月の平成28年熊本地震などの地震のメカニズムの解明や、2015年5月の口永良部島、2015年5月からの箱根山大涌谷周辺の火山活動などに伴う火山噴出物の分布や地殻変動の監視に用いられ、箱根山に関しては警戒レベルの判断に重要な情報を提供するなどの成果を挙げている。地図上で他の情報と重ね合わせて分析できるまで分解能が向上したことで、地表変動の常時監視に活用される段階まで到達したといえる。2.5次元解析やMAI法などの技術開発も急速に進んでいる。

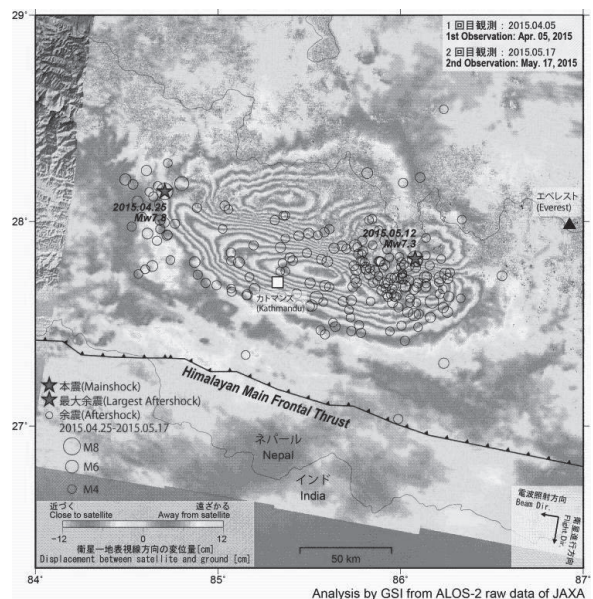


図1 2015年ネパール地震に関する干渉SAR画像。



図2 2014年長野県北部の地震に関する干渉SAR画像。既知の活断層と干渉SAR画像の不連続が一致し地表地震断層の位置とも一致した。

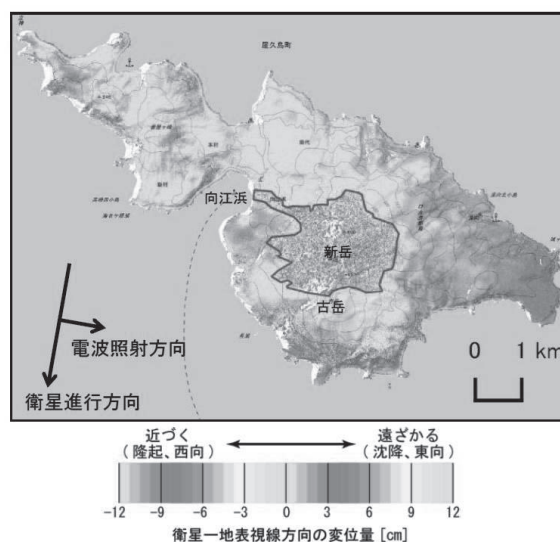


図3 口永良部島の2015年5月の噴火前後の干渉SAR画像。非干渉の範囲が火砕流や火山灰の堆積域と考えられる。

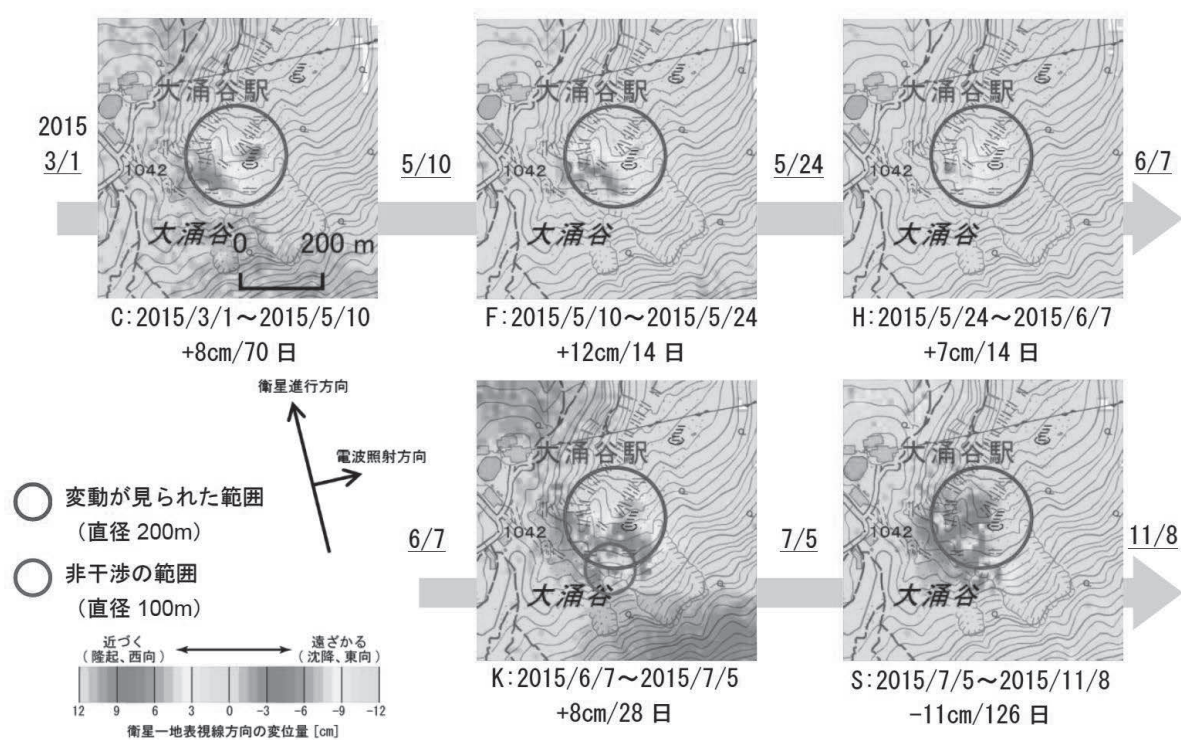


図4 2015年の箱根山大涌谷周辺の干渉SAR画像の変化。活動域が直径200m程度の範囲内であることを明確に示した。

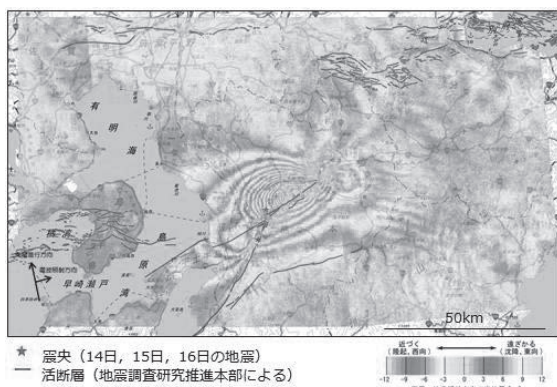


図5 2016年4月の平成28年熊本地震に関する干渉SAR画像。

2.2 航空レーザ測量

航空レーザ測量自体は決して新技術とはいえないが、近年データの整備が進み、国土の7割程度が詳細な標高データでカバーされ、防災、減災のための基盤データとしての有用性が高まると同時に、地震などのイベント前後のデータの差分により3次元の地形変化を求める技術が開発され、実用化されている。航空レーザの標高データを用いたアナグリフなどにより、植生などに惑わされることなく詳細な地形判読ができることから、従来の空中写真判読による活断層地形の認定の補助的手段として用いられつつあるほか、熊本地震に関しては、地震前後の航空レーザデータの比較により地殻変動を詳細かつ面的に明らかにすることが試みられている。

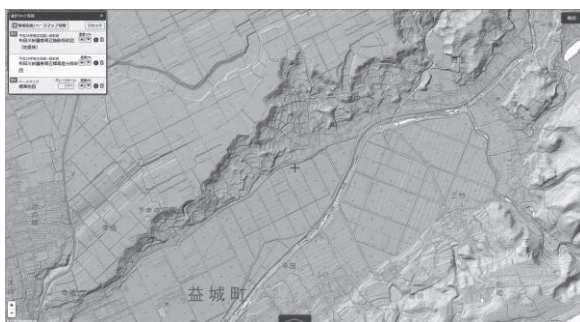


図6 熊本地震後に取得された航空レーザ測量による標高データから作成した陰影図。



図7 熊本地震前後の標高差分図。

2.3 UAV

UAV（無人航空機；別名ドローン）は、離れた場所からの遠隔操作やプログラムによる自動飛行ができる飛行装置である。災害対応分野において、スチールカメラやビデオを搭載して被災状況や地表変動、火山の活動状況などを把握するため、近年急速に利用が広がっている。固定翼型とマルチコプター型があり、長時間、広範囲の撮影を行うためには固定翼型、低高度で高解像度の写真を機動的に撮影するためにはマルチコプター型が用いられる。



写真1 UAVで撮影した熊本地震の地表地震断層。



写真2 UAVで撮影した平成27年9月関東・東北豪雨による破堤地点。

2.4 空中写真撮影

地理空間情報の新技術は、発災直後の空中写真撮影のオペレーションにも変化を与えている。SfM（Structure from Motion）やMVS（Multi View Stereo）を応用した画像処理方法が実用化し、簡易な操作の画像処理ソフトウェアが普及したことで、十分な標定要素の得られない斜め写真からでも容易にある程度の精度を持つ3Dモデルや正射画像が作成できるようになった。例えば、従来は、垂直写真が撮影できるまで天候の回復を待つ必要があった豪雨時の土砂災害や洪水などの被災状況の撮影が、上空にある程度の雲があっても雲の下で低高度から飛行機やヘリコプター、UAVなどで斜め写真の撮影ができれば、地図に重なる正射画像に加工することができるようになり、撮影に要する時間が大幅に短縮された。2014年8月の広島市の土砂災害でこの技術が初めて応用され、発災当日に撮影された斜め空中写真から地図に重ねた正射画像が作成され、現地災害対策本部に

届けられて救助活動に活用された。また、2014年9月の御嶽山の噴火災害に際しては、火山活動が活発で御嶽山上空の飛行ができない状況の中、火口から8kmの水平距離を確保しつつ円形に飛行し、斜め写真の撮影を行い、正射画像に加工して現地で救助活動にあたる隊員に届けられた。



写真3 広島市の土砂災害被災地の斜め写真。



写真4 斜め写真から作成された正射画像。

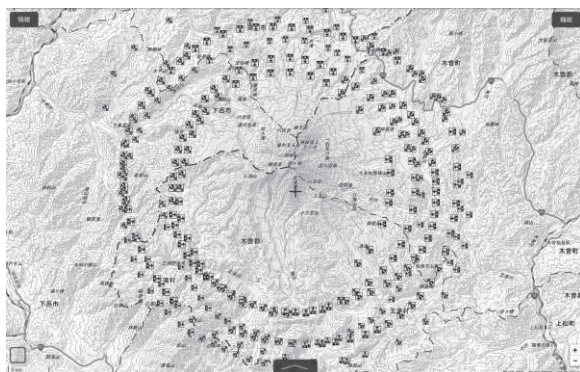


図8 御嶽山噴火災害時の撮影コース。



写真5 御嶽山噴火災害時の斜め写真。

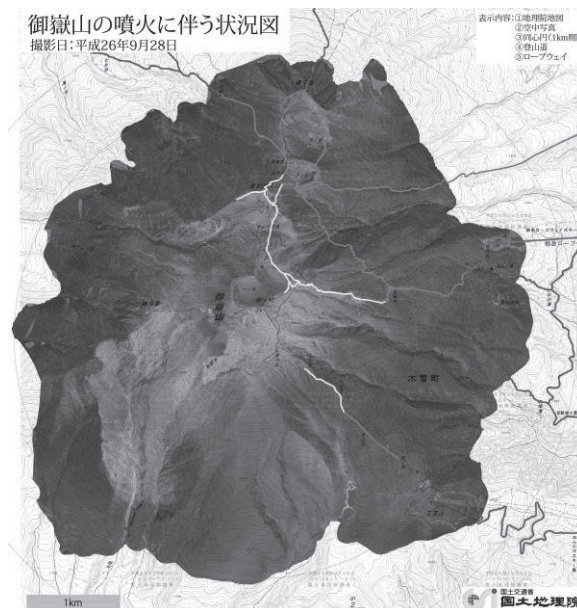


図9 斜め写真から作成された正射画像。

3. 災害情報の提供に関する新技術

3.1 地理院地図

国土地理院では、2013年にウェブマッピング技術を活用したウェブ地図「地理院地図」の提供を開始した。その特徴のひとつは、さまざまな種類の地図を重ね合わせて容易に選択し表示することができる機能である。それ以降、国土地理院では、災害に関する情報をすべて地理院地図上で重ね合わせて表示することができるように提供を行っている。このことで、災害前後の空中写真を比較して変化を把握したり、被災状況図を他の主題図と重ね合わせて災害の背景となった要因を分析したりすることができる。例えば、東北地方太平洋沖地震で著しい液状化が発生した範囲がかつて沼であった範囲と一致するといったことを容易に理解することができる。



図10 広島市の土砂災害に関して土石流発生状況と復旧活動状況，避難所等を地理院地図上で重ね合わせた地図。現地災害対策本部で活用された。



図11 千葉県我孫子市布佐における東北地方太平洋地震に伴う液状化発生状況。



写真6 図11の地域について1947年に撮影された空中写真。液状化が発生した範囲が沼であったことがわかる。

3.2 地理院地図3D

地理院地図のもうひとつの特徴として，容易に地図を立体的に表示する機能が実装されていることがあげられる。クリックひとつで表示されている地図

が三次元表示され，マウスで地形の視点を自由に動かすことができる。通常の地図のほか，空中写真や主題図なども立体表示することができる。また，そのデータを3Dプリンタの出力用に変換することもできる。これにより，地形の特徴を容易に把握することが可能となり，地域の災害特性の理解に資することが期待できる。

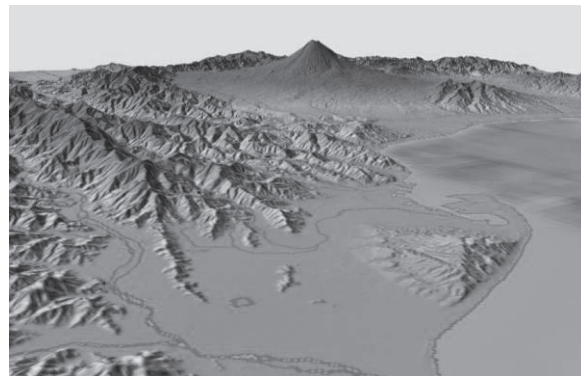


図12 地理院地図3Dで静岡上空からの鳥瞰図を表示。

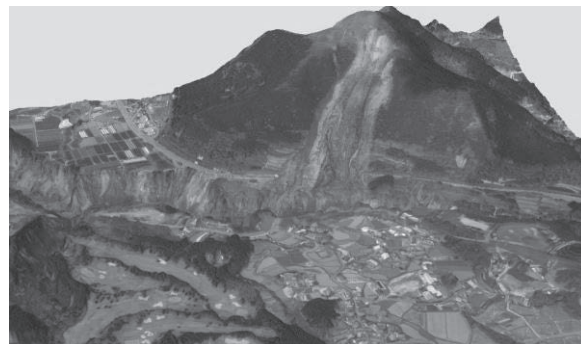


写真7 熊本地震の土砂崩壊地の空中写真を3D表示。

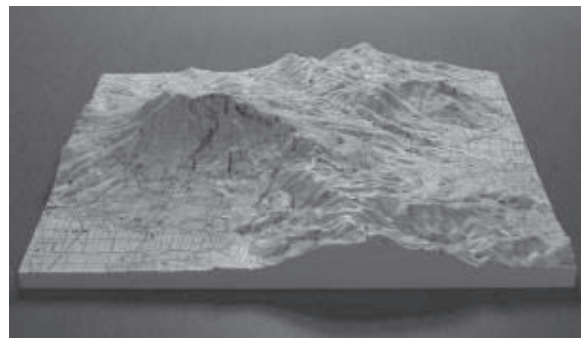


写真8 地理院地図3Dのデータから3Dプリンタで作成した立体模型。

注

1. 本稿に使用した図，写真はすべて国土地理院が作成し，HP等で公開しているものである。
2. だいち2号の観測データは，地震予知連絡会SAR解析ワーキンググループ及び火山噴火予知連絡会衛星解析グループを通して，JAXAから提供されたものである。解析：国土地理院 原初データ所有：JAXA

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）について

植平賢司*

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

要 旨

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）は北海道から千葉県沖の太平洋側の海底に設置される世界でも類を見ない大規模なリアルタイム地震津波観測網である。この観測網の目的は津波即時予測の高度化、緊急地震速報の高度化、地震像の解明であり、災害の軽減に資することが期待されている。

1. はじめに

日本海溝海底地震津波観測網（Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench, 通称S-net）は、東北日本太平洋側の海底に設置される世界に類がない大規模なリアルタイム地震津波観測網である。S-netの整備事業は東日本大震災後の平成23年11月に始まった。北海道沖から千葉県房総半島沖合までにかけて150の観測点を平成28年度末までに敷設する。観測網の目的は災害軽減に資するための津波即時予測の高度化、緊急地震速報の高度化、地震像の解明である。ちなみにこれまでより最大30秒程度早く海域での地震の発生を捉え、またこれまでよりも最大20分程度早く津波を実測できるようになる。地震と津波の波形データは、気象庁をはじめとする関係機関に即時にデータ流通され、監視と地震調査研究のために活用される。本稿では防災科学技術研究所が文部科学省の補助金により進めているこのプロジェクトの概要、進捗状況等を紹介する。

2. 背景と目的

2011年3月11日14時46分に平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）が発生した。この地震は日本周辺で観測された歴史上最大のマグニチュード9.0であり、この地震により宮城県栗原市で最大震度7を記録したのを筆頭に北海道

から九州にかけて有感となった（気象庁、2011）。更にこの地震により発生した巨大津波が日本の海岸に押し寄せ、2万人超の死者・行方不明者を出し、また、広範囲にわたって甚大な物的被害も発生した。この東北沖地震により様々な分野で様々な課題が浮き彫りになったが、その一つとして、陸域に展開されている地震観測網のデータからのみでは地震・津波に関する的確で正確な情報を提供出来なかった事が挙げられる。

東北沖地震発生当時の地震観測点の状況は、24時間365日連続でリアルタイム観測しているものについて、陸上では防災科学技術研究所、気象庁、大学等の各機関を併せて1500点弱があったが、海域については55観測点、しかも北海道から千葉県沖合に限定すると16点のみであった（図-1）。地震の発生をより早く検知するためには地震計が震源に近い位置にあればある程良い。東北沖地震であれば、震央付近に観測点があったとすれば陸上のみの観測網データに比べて10数秒程度（P波速度を7km/secと仮定）早く検知出来、その分早く緊急地震速報のような情報発信が可能となる。また、震源域を取り囲むように観測点が配置することにより、震源の位置や発震機構等の情報が正確となる。例えば陸域の観測網データのみで東北沖地震のような海域の震源位置を求めた場合、その位置の誤差が数10km（特に震源の深さ）になることは珍しくない。地震発生直後に津波情報を予測する時には、地震のマグニチュード・震源の深さ・発震機構等の情報を基にしているので、

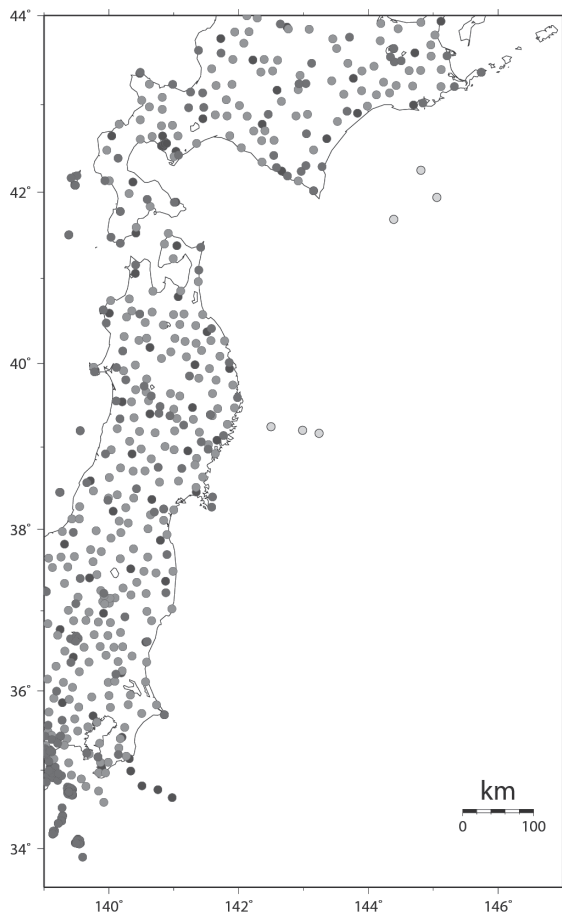


図-1 東北沖地震発生当時の東日本におけるリアルタイム地震観測点の分布
陸域と比べ、海域には北海道沖に3点、釜石沖に3点、房総沖に4点、相模湾に6点あるのみであった。

これらの情報が正確であればある程、より精度の良い津波情報の発信が可能となる。

また、東北沖地震の時点、東北沖のリアルタイムで津波を計測可能な観測点についても、震源域付近では、海岸部にある驗潮記録、海岸から約20km付近の場所に設置されていたGPS波浪計（国土交通省港湾局が全国15カ所に設置）、東京大学地震研究所による釜石沖の海底ケーブルに接続されていた2つの津波計と、数も少なかった。

このような背景のもと、また東北地方太平洋沖では引き続き規模の大きな海溝型地震が発生し、今後も強い揺れや高い津波に見舞われるおそれがあること等（地震調査研究推進本部，2011）から、S-netの整備が始まった。整備の目的は津波即時予測の高度化と緊急地震速報の高度化である。またS-netによる地殻活動のリアルタイムモニタリングは千島海溝・日本海溝周辺海陸境界域で発生する地震の姿を解明し将来の地震発生の予測に貢献することが期待されており、このような地震像の解明が第三の目的で

ある。S-netは現在SIPで研究開発を進めている津波遡上の即時予測においても基盤となる観測網である。

3. S-netの概要

S-netは北海道から千葉県沖にかけて合計150の観測装置（地震計・津波計）を全長約5,700kmの光海底ケーブルで結び、観測データを陸上局経由で24時間・356日リアルタイムで送信するものである。陸上局からは地上の通信回線網を通じて防災科学技術研究所のデータセンター、東京大学地震研究所バック

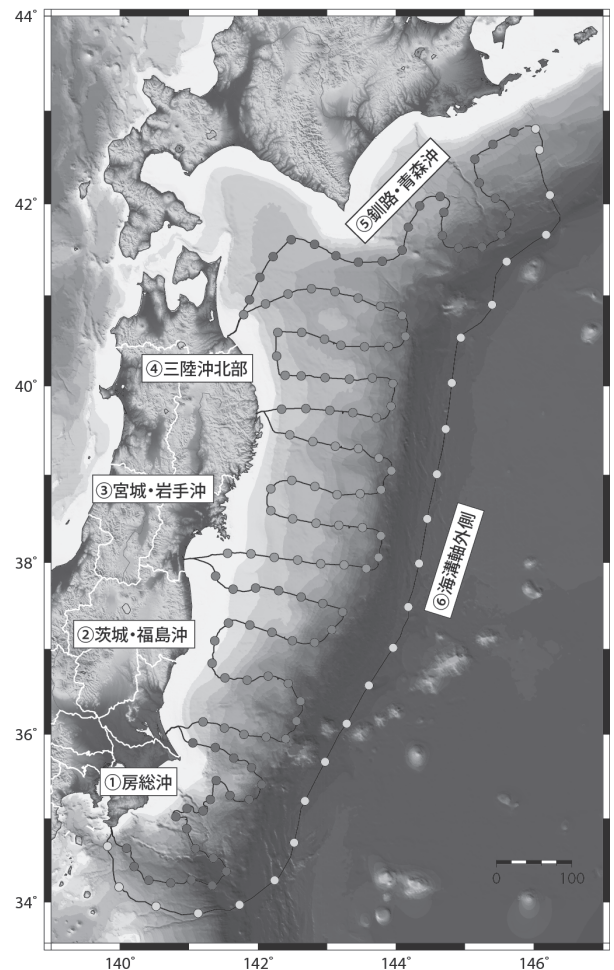


図-2 日本海溝海底地震津波観測網の観測装置とケーブルの配置図。①から⑥までの6サブシステムで構成される。

アップセンター、気象庁、大学等の研究機関、その他関係機関にリアルタイムで配信される。

150の観測装置は海溝軸直交方向に約30km間隔、海溝軸に平行な方向に50～60km間隔の格子状になるように配置している（図-2）。これは、津波を励起するM7.0からM7.5以上規模の地震の震源域の中に少なくとも1つの観測装置を配置するため、また、

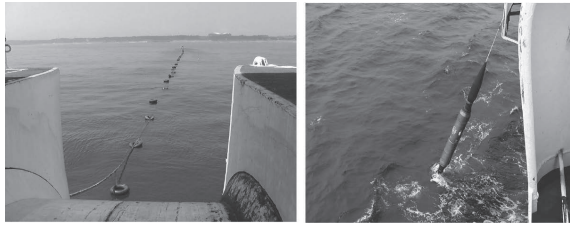


写真-1 ①房総沖システムの設置風景
左)茨城県鹿嶋市側でのケーブル陸揚げ風景 右)
観測装置の設置風景

沖合から陸に向かって進む方向（つまり海溝軸に直交方向）の津波をより多くの観測装置で捉えるためである。また、アウターライズ地震に対応するため、海溝軸外側にも観測点を配置した。津波の伝播速度は水深が大きいほど速いので、水深の深い海溝軸外側に津波計を配置する事は、海溝軸付近で発生した津波やチリ沖など日本の外側で発生した津波の伝播状況になるべく早く把握するためには非常に重要である。

整備の手法としては、房総沖から北海道沖にかけての海域を①房総沖、②茨城・福島沖、③宮城・岩手沖、④三陸沖北部、⑤釧路・青森沖、⑥海溝軸外側の6海域（図-2）に分けて、平均25点の地震津波観測点と海底ケーブル約800 kmからなる観測網を順次それぞれに配置する方法を取った。海溝軸外側については海底ケーブル約1450 kmを使用する。写真-1に①房総沖システムの設置風景を示した。海洋部の工事はNTT-WEM社のケーブル敷設船「すばる」（総トン数9,557トン）や国際ケーブル・シップ社のケーブル敷設船「KDDIパシフィックリンク」（総トン数7,960トン）で行った。これまでに①房総沖から⑤釧路・青森沖に至る5海域で観測システムの海底敷設工事が終了し、また陸上局の整備が終わって、この平成27年度末から、試験運用を開始した。海溝軸外側（アウターライズ）の海域については平成28年度中に整備するよう準備を進めているところである。

4. 観測システムの概要

前節で述べたように全体は6つの海域に分かれたサブシステムから成り、1つのシステムは平均25個の観測装置を光海底ケーブルで数珠つなぎに接続する、インライン型の観測システムである。図-3に1サブシステムの概要を示す。約二十年の観測実績を持つ防災科学技術研究所の相模湾観測システムもインライン型である。南海トラフでの整備が進むDONETのようなシステムの拡張性はないが、気象庁、東京大学地震研究所、海洋研究開発機構の観測

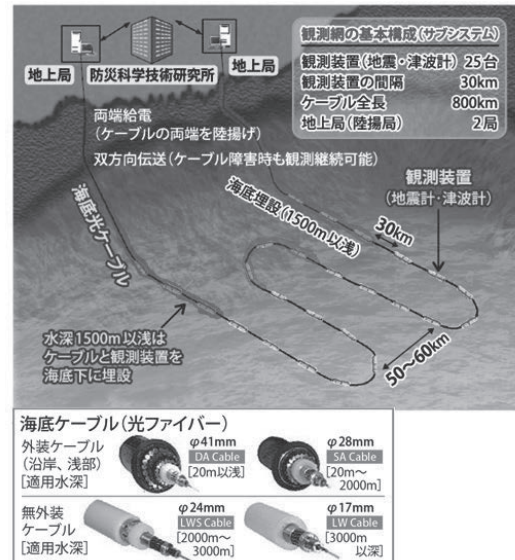


図-3 S-net サブシステムの概要と海底ケーブル

ケーブルでも使われており信頼性が高い。表-1に観測システムの仕様概要をまとめた。

4.1 海底地震津波計の概要

海底部は光海底ケーブルと観測装置から成る。光海底ケーブルと通信方式については、海底通信技術がそのまま使われている。ケーブルは水深によって保護の度合いが異なり、水深の深い場所では無外装ケーブル、浅い所では無外装ケーブルの外側に鉄線を巻き保護を強化した外装ケーブルが使われる（図-3）。光海底ケーブル内には①から⑤のシステムについては12本の光ファイバーすなわち6ファイバペア

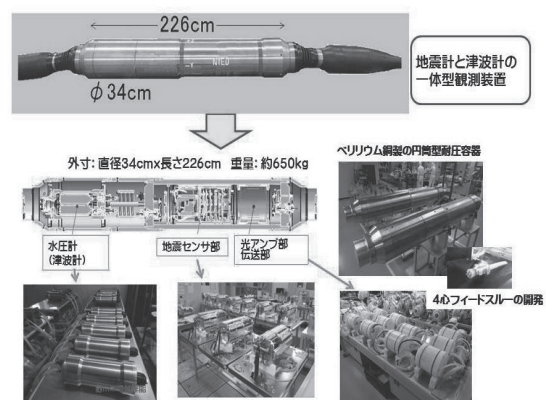


図-4. 海底地震津波計の外観と内部構造
水深 8000 m の海底に設置することができる。

(fp)、⑥のシステムについては10本5fpで構成されている。1fpは観測装置の制御と局間の通信に使用さ

れ、残りの 5fp 乃至 4fp がデータ伝送に使われる。

通信は波長分割多重伝送 (WDM) 方式により行う。観測装置からのデータ通信については、1 波長 1fp で陸上局とは 1 対 1 で対応しており、観測装置の伝送部の障害は他に影響を与えないようになっている。

観測装置は直径 34cm、長さ 226cm のベリリウム銅耐圧容器の中に収容されている (図-4)。観測装置は主電源部、光アンプ部、電源制御部、伝送部、センサー部から成っている。センサーは冗長化 (地震計、津波計)・広帯域化 (地震計) のため計 6 セット搭載されている。地震計は、サーボ型加速度計が 3 成分 2 式で、計測範囲はハードウェア的な設定でそれぞれ $\pm 2G$ と $\pm 5G$ に設定してある。 $\pm 2G$ のものについてはプログラマブル・ゲイン・アンプにより更に $\pm 0.0625G$ の計測レンジの設定もある。この他、水晶振動式加速度計 1 式 (計測範囲は $\pm 2G$)、速度計 (固有周波数 15Hz) 1 式が地震計として格納されている。津波計は水晶振動式高精度水圧計 (周波数出力型) が 2 式セットされている。水深換算で数 mm の分解能を有す。水圧計は水圧を感知するために非耐圧部に格納されているが、データ収録を行う水密部とは新たに開発した 4 芯フィードスルーにより接続されている。

観測データは陸上局からの時刻情報をもとにタイムスタンプが付けられ、両方の陸上局に同じデータが送信される。1 観測装置あたり計 6 セットの 22 チャンネルのデータが送信される。

4.2 陸上局の概要

現在のところ、千葉県南房総陸上局、茨城県鹿島陸上局、宮城県亶理陸上局、岩手県宮古陸上局、青森県八戸陸上局の 5 局を整備した (図-5)。南房総局、鹿島局、宮古局はケーブル陸揚げ地から 1.5 km 程度離れた標高 25 m ～ 30 m の高台にコンテナ型陸上局を整備した。亶理陸上局については亶理町が新築した施設“きずなぼーとわたり”の 3 階に陸上局を整備、八戸局についてはケーブル陸揚げ地の隣接地にコンテナ型陸上局を整備した。

陸上局では海底ケーブルを通じて観測装置に給電を行う給電機能、GPS 時計からの時刻情報の送信機能、また、観測装置からのデータを受信し、光信号を電気信号に変換し、それをデータセンターにデータを送信する機能がある。

海底部への給電は、1.1A の定電流給電である。①～⑤では最大 3,000V、⑥では最大 5,000V の直流電源で供給される。また、長期間の停電に備え、1 週間程度稼働可能な非常用発電機設備も備えている。



図-5. 陸上局の概要

左上：コンテナ型陸上局、右上：亶理陸上局（“きずなぼーとわたり” 3 階）、左下：光伝送装置等の陸上端局装置、右下：高圧給電装置

4.3 観測システムの強靱化のための工夫

災害軽減のための常時監視に使う観測網の目的と、これからの 20～30 年にわたる長期間の運用を考え、想定される故障・事故に対して強靱であるように、観測網の配置・観測装置・伝送方式・電源供給方式に工夫をしている。

まず、ケーブル切断のリスクを回避するよう行っている。例えば、底引き漁・貝桁漁等の漁具及び走錨によるケーブル損傷を避けるため、ケーブル及び観測装置を水深 1,500m 以浅については基本的に海底下 1m 程度に埋設している (図-3)。また、海底地すべりや乱泥流の発生しそうな海底地形の場所を避けるようケーブルルートを選定した。また、東北沖地震時には海底地すべりや乱泥流によりケーブルの障害が発生しているが、過去の通信ケーブル障害情報を入手し、可能な限りそのような場所を迂回するようケーブルルート及び陸揚げ地の選定を行った。また、津波により陸上局が使用不能とならないよう、基本的に標高 20～30m 程度の場所に陸上局の設置場所を選定した。ケーブルの両端陸揚げと双方向伝送による海底ケーブル障害への対応も考慮している

ケーブルの陸揚げ部と局舎を結ぶ陸上管路についても、東北沖地震の通信回線等の管路被害状況を鑑み、十分な深度での埋設を行っている。

観測装置については、高信頼性の装置を使用している。センサーについては地震計 4 セットと津波計

2 式と複数収納することにより、冗長性をもたせている。地震計については、不具合の原因となり易いジンバル機構の必要のないタイプを採用した。その他電源部や光アンプ部などは海底通信用中継器に用いられている高信頼性部品を採用し、製造環境・技術も同様の工程を採用することにより信頼性を確保している。また、ベリリウム銅合金性の耐圧容器を用い、レーザ溶接により水深 8,000m まで耐えられる水密構造を確保している。

伝送方式については、まず、海底部は WDM 方式を採用することで、各観測装置を 1fp の 1 波長に対応させることにより、陸上局とは 1 対 1 の対向接続になるようにしている。このことにより、どの観測装置に発生する障害も他の観測装置のデータ伝送に影響を与えないようになっている。陸上部については、データセンターまでの物理回線を 2 本引き、別々のコントロールセンターに送信する。そして各コントロールセンターからデータセンターへ送信される。防災科学技術研究所のデータセンターの他に、東京大学地震研究所にバックアップセンターも設置する事により、冗長性を確保している。また気象庁、大学等関係機関へのデータ配信は防災科学技術研究所のデータセンターを経由することなく、データ配信網のコントロールセンターから直接配信される仕組みになっているので、データセンターの障害がデータ配信に影響を及ぼさない形となっている。

陸上局の電源のインフラ障害については、1 週間分の燃料を備えた非常用発電機を設置することにより、停電に備えている。

表 1 日本海溝海底地震津波観測網の仕様概要

観測網の設置海域	房総沖から北海道沖までを 6 海域に分けて、観測網を順次整備。全体で 150 観測点の観測網を構築。海域の区分け：房総沖、茨城・福島沖、宮城・岩手沖、三陸沖北部、釧路・青森沖、海溝軸外側。
地震・津波観測点の配置	日本海溝軸に直交する方向（およそ東西）に約 30km 間隔、海溝軸に沿う方向（およそ南北）に 50-60km 間隔に地震・津波観測点を配置。マグニチュード 7.5 クラスの地震の震源域にリアルタイムの地震・津波観測点が少なくとも 1 点は配置するというコンセプト。
観測システム	海溝軸内側の 5 海域に設置する観測網については、約 25 台の地震・津波観測装置と約 800 km の海底ケーブルで構成し観測装置を 30 km 間隔で配置するシ

	ステム。海溝軸外側に設置する観測網については、観測装置を 60 km 間隔で配置し、約 1450 km の海底ケーブルを使用する観測システム。
観測装置	一体型の地震・津波観測装置であり、ベリリウム銅合金製円筒型耐圧容器(外径 34 cm、長さ 226 cm) に地震および津波の観測装置 1 式を収容。重量約 650 kg、最大使用水深 8000 m。
消費電力	約 70 W
地震センサー	方式と特性の異なるセンサー4 式により冗長性の確保、観測の広帯域化、計測範囲の拡大。 計測範囲±5 G の加速度計(日本航空電子(株)製 JA5TYPEⅢA) 3 成分 1 式 計測範囲±2 G の加速度計(日本航空電子(株)製 JA5TYPEⅢA) 3 成分 1 式 計測範囲±2 G の水晶振動式加速度計(Quartz Seismic Sensors 社製周波数出力型) 3 成分 1 式 固有周期 15 Hz の速度計 (OYO-GEOSPACE 社製 OMNI-2400) 3 成分 1 式
津波センサー	水晶振動式高精度水圧計 ((PARO SCIENTIFIC 社製周波数出力型) 2 式で冗長構成。水柱換算 約 1 mm の分解能。
AD 変換	24 ビット分解能のアナログ-デジタル変換器を使用
海底ケーブル	光ファイバー12 芯構成、(株)OCC 社製 SC-500、水深 20m 以浅に 2 重外装ケーブル、水深 2000 m 以浅に 1 重外装ケーブル、水深 2000 m 以深は無外装ケーブル(外径 17 mm)。全長約 5700 km の光ケーブルを海底に敷設。
陸上局	陸上局配置場所：千葉県南房総市、茨城県鹿島市、宮城県亘理町、岩手県宮古市、青森県八戸市。可能な限り高台に設置。停電に対応するため、1 週間分の燃料を備えた非常用発電装置を配備。釧路・青森沖、海溝軸外側の観測網は当面北海道浜中沖で海中接地した状態で運用するため、現状では北海道に陸上局は無い。
ケーブル給電	直流定電流給電 1.1 A。
データ伝送方	光ファイバー2 芯で 1 伝送路とし波長多重(最大 8 波長)により観測装置と陸上

式〈海〉	局を専用波長で対向接続。観測点の電源制御に光ファイバー2 芯 1 組を専用使用。最大で 40 点の観測システムが構築可能。
海底下埋設	水深 1500 m より浅い海域では、海底ケーブルと観測装置を海底下 1 m 程度に埋設。
データ伝送方式〈陸〉	IP-VPN 網を利用して、防災科学技術研究所 Hi-net 観測網の EarthLAN と同様な伝送監視体制。
データの刻時	陸上局から高精度基準信号を送信して海底観測装置内で刻時。高精度基準信号は、水晶振動式水圧計および水晶振動式加速度計の周波数出力を接続するカウンタ回路の基準信号源にも利用。

5. おわりに

平成27年度末から房総沖から北海道沖までの5海域の観測網(S1～S5)について試験運用を開始した。

図-6に観測波形例を示す。現在のところ計125観測点のデータを防災科学技術研究所にリアルタイムで連続伝送して伝送系各部の最適化等を進めている段階であるが、この5月末から受信体制整備のため気象庁にもデータ配信を開始した。残る海溝軸外側への観測網の構築をすすめ、平成28年度末に日本海溝海底地震津波観測網の整備を完了する予定である。いろいろな分野でのデータの利活用をすすめることも重要であり、現時点では災害軽減に関連して自治体、鉄道事業者、電力事業者等と具体的な検討を行っている。

参考文献

気象庁（2011）：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震，
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011_03_11_tohoku/index.html.

地震調査研究推進本部（2011）：東北地方太平洋沖地震関連情報，
<http://www.jishin.go.jp/main/tohoku/kaisetsu.pdf>.

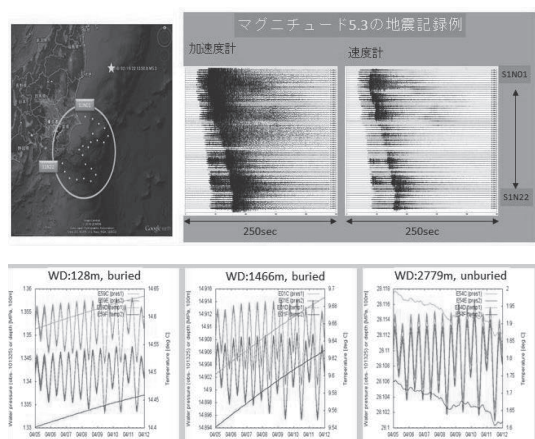


図-6 観測記録例

上：福島県で発生した M5.3 の地震の房総沖観測網による記録例、下：海底水圧計の記録例、水深 128 m（埋設）、水深 1466 m(埋設)、水深 2779 m（海底面設置）におけるフィルター等の処理なしの水圧記録

先端技術と歴史的治水の融合で豪雨災害から身を守る

大石 哲*

* 神戸大学都市安全研究センター

要 旨

気象災害に備えるためには正確な情報の収集が必要である。そこで、電磁波を使ったレーダーと雷探知装置の仕組みを紹介し、さらにインターネットでその情報を通信するサイトを紹介します。その前段としていにしへの洪水災害に適応するための静岡県の知恵の一つである舟形屋敷を紹介し、適応型社会形成の議論を深めたい。

1. はじめに

地球は確実に暑くなっているようだ。気象庁によると日本の平均気温は1898年以降100年あたり1.1℃上昇している（気象庁 2016a）。1976年から2015年の間に短時間強雨の発生回数も増加している（気象庁 2016b）。毎日のようにスクールに襲われると、気候が変わってしまったのではないかという気分にならなくなることがある。

このような大量の雨が懸念されているときに市民の立場からは、実際にどんな気象現象が、どこで、どの程度の強さや大きさで発生しているのかを知ることが災害から身を守るために必要であろう。

しかし、実際に激しい気象現象が起こっているまただ中では、何が起きているのかがさっぱりわからない。

土砂降りの時には、雲が厚く日中でも相当暗くなるし、降りしきる雨が視界を遮る。ましてや夜になれば足下すら見えなくなる。夜間の避難中や堤防・田畑の巡視中に流されて亡くなる事例が後を絶たないのは、誤って滑り落ちるのではなく、一面水の足下が道なのか川なのかかわからずに、踏み出した足を流れにとられるからである。

一方で、我々はテクノロジーの発展によって、もう一つの目を持った。電波である。ここでは電波で雨や雷をとらえる仕組みを説明する。

もちろん、電波は万能ではないし、雨を弱めてくれるわけでもない。したがって災害が懸念されるときにはここで紹介する方法で情報を取得して、早めの準備、早めの避難をすることがいのちを守ること

になると改めて強調しておきたい。

準備、避難の意味では、先人たちの知恵に学ぶことも多い。測量道具もない時代から先人たちは川を治めるために工夫に工夫を重ねてきた。為政者として治水に取り組んだものは古代中国の夏王朝の禹王にはじまり武田信玄などの錚錚たる顔ぶれが並ぶ。しかし、忘れてはならないのが市井の人々が自らの生活の中で水と暮らしてきた実態であろう。本稿では静岡にちなんで大井川流域の人々の生活を守ってきた舟形屋敷を紹介する。

いま、気候変動は避けられないものとしてadaptation, すなわち環境に適応した社会形成が求められている。現実の適応社会では、映画「ウォーターワールド」のようにほぼ文明が滅亡してしまったような暮らしをするわけではなく、ソフトとハードが一体化して「水とともに暮らす」社会を築くことであろうと思う。その中では、リモートセンサーやスマートセンサーによる情報収集、インターネットによる情報伝達などを使って、災害時には命を守る行動をとる危険認識が必要であろう。本稿は気象災害に対する適応型社会形成の議論の一助となる温故知新の資料として、いにしへの水害適応型住居と電波による最先端技術を紹介する。

2. 民俗学的な水害に対する適応技術

大井川は、静岡市から南西に25kmほどの距離にある島田市を流下する、幹川流路延長168km、流域面積1,280km²の一級河川である。大井川は急峻な地形がもたらす高低差を活かした発電ダムが並び、上流

から田代ダム、赤石ダム、畑薙第一ダム、畑薙第二ダム、井川ダム、奥泉ダム、長島ダム、大井川ダム、塩郷堰堤などがあり、支川にも多くのダムがある(国土交通省2006)。そのような川に暮らした人々は川の恩恵を得ながらも洪水から命と生活を守る工夫をしてきた。その一つが舟型屋敷である。以下、民俗学者である野本(1979)を引用して舟型屋敷の説明をする。

ダムが建設される前は暴れ川で、下流域の人々の水との戦いは深刻であったといわれている。その大井川下流域の洪水対策として舟型屋敷があげられる。

舟型屋敷は微高地に作られ、図1に示すように上流部に向かって約50度の三角形をなし、三角の頂点から分かれた二辺に沿って分かれ川がひかれている。舟型屋敷の一般的特徴は先端部に土盛り(ボタ)があり、そこに樹木が茂っていて、そこに墓地がある。また、母屋の川下側に土盛りがあり、藪や樹木を植栽している。さらに母屋と先端部の間に1mほどの石垣を作りそこに倉(水屋)を建てていた例もある。

野本(1979)は指摘していないが、筆者は大井神社の敷地も、上流部に向かった三角形構造、分かれ川、先端部の土盛りなど舟型の特徴を有していると思う。

2016年10月8日から10日に島田大祭という大井神社の祭りがあるので、興味がある方はそのときに大井神社の形を眺めていただきたい。

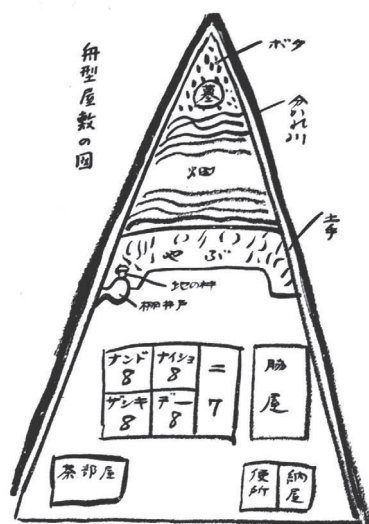


図1：舟型屋敷の概要(野本,1979より)
この図の上の方向に大井川がある

3. 豪雨災害を見るための電波

3.1 概要

時代は変わって大河川では以前のように河川の氾濫が頻発することは少なくなったが、それでもなお、

洪水被害はなくなる。災害を引き起こすような気象状況を知るためには、雨・雷を知ることができる。そこで、どうやってその情報を取得するのかということを説明する。

気象状況を知るには電波の中でもマイクロ波というものを使うことが多い。マイクロ波は周波数が100MHzから100GHzくらいの電波である。波長にすると3mから3mm程度である。電気を使ってマイクロ波を送信してそれを受信するか、自然が発生するマイクロ波を受信するのかの2つの方法がある。前者をアクティブ(能動的)、後者をパッシブ(受動的)とよぶ。普段見ている景色は太陽という自然の電波(光)発生装置から発せられた電波が「もの」にあたって一部の周波数の電波が吸収され、吸収されなかった周波数(すなわち色)の電波が目が受信しているという意味でパッシブである。黒く見えるのはほとんど全ての周波数の光の電波が吸収されてしまっているからであり、白く見えるのはほとんど全ての周波数の電波(色の光)が反射しているためである。スライド投影はプロジェクターから発せられた電波(光)が目が受信しているという意味でアクティブである。

アクティブな電波送受信装置には雨を探知するレーダーがある。雷探知装置は雷が発する電波をアンテナが受け取るパッシブである。

3.2 レーダー

ここではXバンド偏波ドップラーレーダー(別名、XバンドMPレーダー)を紹介する。より勉強するためには深尾・浜津(2009)が詳しい。

レーダーというのはRadio Detection And Rangingの略で、電波(Radio)を使って標的を探知(Detection)し、その位置を測る(Ranging)するための装置である。探知するためにレーダーは電波を出しているのでアクティブである。発した電波が標的にあたってはね返ってくるエコーを受信する。電波は光の速さ($c=3.0 \times 10^8$ m/s)で進むので、発信してあたってはね返って受信するまでの時間を Δt とすると、 $c \times \Delta t / 2$ [m]が、レーダーと標的の間の距離である。光はかなり速いので Δt は小さい。例えば標的が150km離れたところにあると Δt は千分の1秒である。実際にはレーダーのアンテナは3秒から20秒程度かけて回りながら360°監視しているのだが、千分の1秒は3秒に対して十分に短いので、アンテナが止まっていると考えてよい。

気象レーダーに使われているバンドは、Xバンド以外にCバンド(約5GHz)がある。周波数が高くなるとたくさんの情報を運ぶことができるので、Xバンドの方がくっきり、はっきり見える。ただし、周波

数が高いものほど減衰しやすく到達距離は短いので、Cバンドの方が遠くまで見える。

国交省と気象庁ではXバンドMPレーダーを北海道南部、岩手県南部から福島県にいたる東北、関東、北陸（新潟・富山・石川）、静岡、東海、近畿、岡山、広島、九州北部、熊本、桜島周辺に配備して特に都市周辺の豪雨を観測している。また、東京、大阪、神戸などの大きな自治体では独自のXバンドレーダーをもって雨水処理に活用しているし、民間気象会社や大学でもXバンドレーダーを有しているところがある。XバンドMPレーダーではアンテナを中心に半径約60kmの円状の豪雨を観測できる。半径約30kmまでは雨量も精度よく算定でき、それより遠くでは雨の強弱がわかる。このように空間的のどこにどの程度雨が降っているのかという情報を「降雨の空間分布」という。

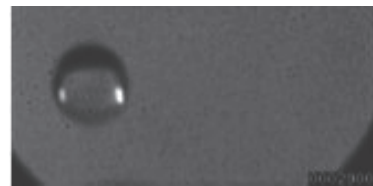
従前では約10km～100kmごとに置かれた転倒ます式雨量計を用いて雨量を測定して、1つずつの転倒ます式雨量計の責任範囲を定めて、その範囲内はすべて一様な雨が降ったと仮定していたが、レーダーの定量的な降雨強度観測精度があがってからは、Cバンドレーダーであれば1kmごと、Xバンドレーダーであれば250mごとの雨量値を得ることができるようになった。

その定量性向上に寄与したのがMP化である。

MPとはマルチパラメータの略である。マルチというのは複数という意味で、パラメータとは受信する信号のことである。すなわちMPとは複数の信号を受信するという意味である。

MPレーダーでは、従来の水平方向の電波に加えて鉛直方向の電波も送受信し、さらに電波が雨滴で散乱することによって少しだけ速度が遅れる影響も、周波数から計測することができる。一般的に雨滴は空気抵抗を受けて図2のように「豚まん形」に扁平しているので、水平波の方が鉛直波よりも散乱されたエネルギーは強く、速度は少し遅れる。逆に言うと、水平波と鉛直波の散乱エネルギーの比や、速度遅れから上空に浮かんでいる雨滴の大きさを推計することができる。強い雨は大きな雨滴からなっているなどの雨滴と降雨強度の関係に関する知見と併せることによって、原理的には地上での観測が不要で正確な降雨強度を推定することができるようになった。

一方、ビルや山のような標的は大きすぎるので電波を反射してしまう。したがって、アンテナと雨の間にビルが入ると雨は探知できない。このことを遮蔽という。遮蔽を避けるためにはアンテナの仰角を上げてビルや山を避ければよい。しかし、仰角をあげると高い高度の雨雲を見ることになり、地上で降



(a)



(b)

図2：落下中の水滴 (a) とその概形(b)

る雨とは性質の異なるものを見ることになる。地上5kmになれば夏でも0℃になり、雨粒は凍ってしまう。凍ると電波の散乱特性が変化するので、上空の雨粒や氷粒から地表の雨量を推定する方法が必要である。

上空の氷粒は、30分後くらいの近い将来の地上にふる雨の源である。したがってこれらの量や大きさを探知できれば、降雨予測の時間を延ばすことができ、定量的な降雨予測精度も向上すると考えている。

この上の2段落で記載した、「雨滴と降雨強度の関係に関する知見」、「氷で散乱する電波の散乱特性」、「上空の氷粒から地表の雨量を推定する方法」などは最先端の研究テーマであって、私たちを含めて現在さかんに取り組んでいる。

2016年7月までは実用的にMP化されたレーダーはXバンドであった。一方で、国交省と気象庁では26基のCバンドレーダーを使って日本全国をくまなく観測してきた。Cバンドではアンテナを中心に半径120kmまでの雨量を算定しているが、これまでは1km四方の平均的な雨がわかるだけでくっきりとは見えなかった。しかし、2016年7月1日から国土交通省はCバンドレーダーをマルチパラメータ化した。すなわちCバンドMPレーダーにバージョンアップした。前述したようにCバンドの方が遠くまで見通すことができるので、都市部から離れた地域でも詳細で正確な降雨強度を知ることができるようになった。たとえば、和歌山県的那智勝浦町や兵庫県豊岡市などはXバンドMPレーダーネットワーク、通称XRAINの範囲外であったのが、CバンドMPレーダーの範囲内となり、XRAINに組み込まれて7月1日から試験運用的にXRAINの範囲内になった。

ここまでレーダーの概要を伝えてきたので、国土交通省や気象庁が持つレーダーデータにアクセスする方法を述べたいと思う。

気象庁は膨大な観測情報をホームページでほぼ即時公開している。そのうちレーダーに関するものは

以下のように検索する．

- ・ 気象庁の解析雨量：「気象庁 解析雨量」で検索

国土交通省は「川の防災情報」としてレーダーのデータをホームページでほぼ即時公開している．それと同時に，地上で測った雨量や河川の水位などの水理量も公開している．

- ・ Cバンド：「川の防災情報 Cバンド」で検索
- ・ Xバンド：「XRAIN：」で検索
- ・ 7月1日よりCバンドMPレーダーも加わった拡大試行版のリンクボタンもある．

きわめて強い降雨強度があった場合には都市域の小河川が増水し，停滞する雨が降った場合にはそれに加えて大河川が増水する．そのときに川の様子を見に行くのではなく，インターネットで「川の防災情報 河川水位」で検索して，河川の水位を見てほしい．ここでは氾濫注意水位とは一般的には市長による避難準備情報の発令の目安であるので，この水位になったらすぐに逃げられるように準備（今していることを終え，ハザードマップや避難所を確認して，持ち物を集める）を始めてほしい．避難判断水位は市長による避難勧告の目安であるが，この水位になったら避難を開始してほしい．氾濫危険水位では市長による避難指示が出されるが，これは「避難完了の確認指示」だと思ってほしい．

レーダーは細かな雨域をよくとらえ，しばらく見ていると，いつぐらいから雨が降り出すのかも分かるようになる．夏の夕立の10分程度の隙間を見つけてそれにあわせて濡れずに帰宅するために，レーダーを見て目を肥やしておきたい．

バックトゥー・ザ・フューチャーという映画の中で，博士は「後5秒で雨がやむ」と言って，未来（2015年）の気象が秒単位で予測可能になることを伝えている．私は次世代のレーダーを担うと期待されているフェーズドアレイレーダーにその期待がかかっていると思う．フェーズドアレイレーダーと現在のレーダーの最大の違いは，現在のレーダーが機械的にアンテナを回すのに対してフェーズドアレイレーダーは電気的にアンテナの向きを変えることである．機械よりも電気の方が圧倒的に早く制御することができるので，圧倒的に高い時間解像度で測定が可能になる．現在，フェーズドアレイレーダーは大阪大学，情報通信研究機構，東芝の三者連合によって開発が進められており，また日本無線も独自に開発している．フェーズドアレイレーダーによって高時間解像度でゲリラ豪雨をとらえたデータからは上空の雨粒群が落下して地上に雨をもたらしている様子が測定されており，ゲリラ豪雨をもたらす雲のメカニ

ズム解明が期待されている．

3.3 雷探知

私たちは経験的に雷が豪雨の前兆と知っている．科学的には，雷は上空の氷粒でできた雲が持つ電気が地面や別の雲に運ばれる際に発生し，「上空の氷粒でできた雲」は落下して融けて豪雨になるというメカニズムで雷は豪雨の前兆である．しかし，雷も大きな雷鳴があるものばかりではないし，山の向こう側の雷は気付きにくいものであるので，電波で雷を探知することができれば，豪雨予測につながるのではないかと考えられる．私たちは，大阪大学の河崎善一郎名誉教授らのグループが開発した雷探知装置を利用して研究を進めている．

雷は枝分かれするときに電波を発する．雷探知装置ではこの電波を受信して雷が起こったことを知る．位置は電波干渉法という方法で求める．電波干渉法とは，図3のように1つの発生源からの電波を2つの受信機で受信したときの時間遅れから，発生源の角度を求める方法である．3つの受信機を東西と南北に並べると，雷発生位置である電波の発生源の東西方向の角度と南北方向の角度が分かる．さらにそれが2セットあると交点が雷発生位置として特定できる．

雷が分岐したり曲がったりしている方向の角度を測定する方法を組み合わせると雷の発生位置が特定できるようになる．

雷について，より勉強するためには河崎(2008)や高橋(2009)が詳しい．

私たちの最新の研究（千原ら 2016）では，レーダーの偏波情報を用いて上空の霰（あられ）の空中における粒子数を算定し，その粒子が氷晶に衝突することで生じる電荷量を推定して，そこから電位・電場を推定する手法を考案した．それを用いて推定される大気中の電場と実際の雷の進展を比較すると強い電場の方向に雷が進展していく様子がとらえられていた．このような研究を続けて雷の予測を行うことが目標である．

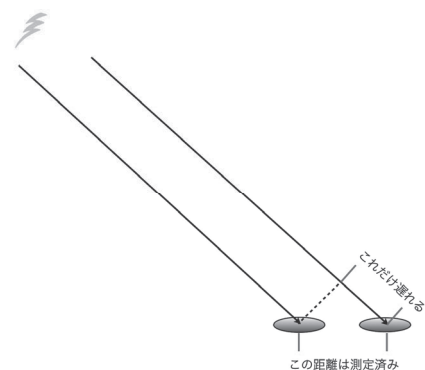


図3：電波干渉法による電波方向の特定のしくみ

4. おわりに

本稿では、最初にいにしへの洪水に対する適応技術として大井川流域における舟形屋敷について述べ、その後レーダー、雷探知装置などの電波を使った豪雨関連の現象を観測するシステムについての説明をした。何の脈絡もないように思われるかもしれないが、筆者としては温故知新のつもりで書いた。すなわち、これからの適応型社会形成にとってレーダーなどのリモートセンサーや小型のスマート環境センサーは必須であろうし、その情報を伝える方法はインターネットが主流であろう。災害の元になるハザードの発生は避けられないが、その先端技術を使って命、資産、社会などを守ることができるような適応型社会について議論したい。

参考文献

河崎善一郎（2008）；雷に魅せられて ～カミナリ博士、その謎を追う，化学同人，200pp.

気象庁（2016a）：ホームページ

http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p08.html 2016年8月アクセス

気象庁（2016b）：ホームページ

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html> 2016年8月アクセス

国土交通省河川局（2006）；大井川水系河川整備基本方針.

高橋 劭（2009）；雷の科学，東京大学出版会，271pp.

千原拓馬・大石哲・小池雄大・小川まり子（2016）；偏波ドップラーレーダーと雷探知装置を用いた雷雲内電荷電場推定手法に関する研究，日本気象学会2016年度春季大会，2016

野本寛一（1979）；大井川 ―その風土と文化―，静岡新聞社，218 pp.

深尾昌一郎・浜津享助（2009）；気象と大気のレーダーリモートセンシング 改訂第2版，京都大学学術出版会.

第 53 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

平成 28 年 9 月 22 日

発行：京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

議長：中川 一（京都大学防災研究所）

橋本 学（京都大学防災研究所・自然災害研究協議会総務）

（お問い合わせ）電話：0774－38－4347

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ndic/contents.html>

印刷：河北印刷株式会社