

2021年Cyclone Serojaによる東ティモールの豪雨災害について

朝位 孝二*・白水 元**

* 山口大学大学院創成科学研究科

** 東海大学建築都市学部土木工学科

要 旨

2021年4月4日にサイクロン・Serojaが東ティモール襲来し、甚大な氾濫被害、土砂災害が生じた。現地の東ティモール大学スタッフと協力をしてリモート調査を行った。また人工衛星画像を用いて、斜面崩壊位置の把握を行った。本稿ではその結果を示したものである。

ディリ市内の氾濫は主に河川の通水能力の低さに起因するが、とくに橋が通水阻害となっていることが分かってきた。また多くの斜面崩壊が確認された。それらは土砂生産として、河道に残っている。次回のお水ではそれも同時に流れ出し、大きな被害を引き起こす要因となり得る。また河床高の上昇にもつながり通水能力の低下につながる。今後の土砂管理は益々重要となる。

1. はじめに

ティモール島北西のサヴ海で発達した低気圧が2021年4月3日にサイクロンSerojaへと発達した。このサイクロンによりティモール島のインドネシアおよび東ティモールでは河川氾濫、土石流、地すべりなどが発生し、犠牲者も発生した。東ティモールはポルトガルの植民地の後、インドネシアに併合されていたが2002年に独立をはたした若い国である。災害統計資料が充実していないため、過去の災害との比較は難しいが、独立以降では明らかに甚大な災害であった。特に首都であるディリでは多くの氾濫、土砂災害が生じた。

サバナ気候に属する東ティモールでは雨季と乾季があり、これまでも雨季の豪雨による洪水氾濫、土砂災害に見舞われてきたが、サイクロンによる被害は極めてめずらしいものと思われる。発展途上国である東ティモールにおいては、通常であれば被害調査のため海外から多くの調査団が現地を訪れたであろうが、COVID19対策として首都ディリでは都市封鎖が施行されており入国や調査が困難な状況であった。さて、筆頭著者が所属する学科ではJICAプロジェクトを通して東ティモール国立大学工学部土木

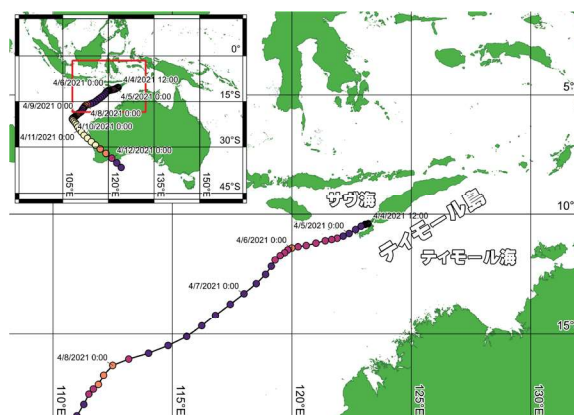


図1 Serojaの軌跡

学科と強いつながりがある。そこで、現地教員による災害調査の支援をオンラインで行い情報を共有した。また著者らは独自に衛星リモートセンシングによる調査も行った。本稿では、これらの活動で得た結果を報告する。

2. サイクロンSeroja

2021年3月29日から4月3日にかけて熱帯低気圧 Tropical Low22U がサヴ海で発達し、ティモール島西岸に滞留し、周辺地域に大量の降雨をもたらした。

表1 東ティモールの過去災害 (2001年以降)

	Year	Disaster Type	Disaster Subtype	Origin	Start(d/m/y)	End(d/m/y)	Total Deaths	Injured	Affected
1	2001	Flood	Riverine flood	Heavy rain	20/6/2001	23/6/2001	1		2,508
2	2003	Flood	Riverine flood	Sudden unseasonal rains, monsoonal rain	16/6/2003	20/6/2003	3		600
3	2003	Flood			?/12/2003	?/1/2003			450
4	2005	Epidemic	Viral disease	Dengue haemorrhagic fever	5/1/2005	28/2/2005	22		336
5	2006	Storm			15/1/2006	?/3/2006			8,730
6	2007	Flood		Intense monsoonal activity	?/12/2007	?/1/2008			
7	2007	Flood	Riverine flood	Heavy rains	?/6/2007	?/7/2007	1		947
8	2007	Drought	Drought		?/2/2007	?/3/2007			
9	2014	Epidemic	Viral disease	Dengue	?/1/2014	?/2/2014	2	197	
10	2015	Earthquake	Ground movement		4/11/2015	4/11/2015		3	2,000
11	2016	Drought	Drought	Lack of rain, El Nino	?/4/2016	?/4/2016			120,000
12	2020	Flood	Riverine flood	Heavy rains	13/3/2020	13/3/2020	3	7	9,131
13	2021	Storm	Tropical cyclone	Tropical cyclone 'Seroja-21'	5/4/2021	6/4/2021	41		143,670



図2 東ティモールの行政区

勢力を強め4日の15時(UTC)の時点でTropical Cyclone 26Sとなり、20時(UTC)にはカテゴリー1の規模に発展してSerojaという名前が与えられた。その後、このサイクロンは西オーストラリア州に向かって南西に移動し、4月6日0時(UTC)時点では、その中心はティモール島の西南西400 km、小スンダ列島のスンバ島の南130 km、西オーストラリア州ダービーの北西730 kmに位置し、最大風速102 km/hの勢力を維持していた。その後、移動速度が増しティモール島近海から離れていく。図1にIBTrACSに基づく¹⁾ 2021年4月4日12:00(UTC)からUTC 2021年4月12日6時(UTC)にかけての3時間毎の位置を示す。

3. 被災状況と降雨状況

3.1 東ティモールの被災状況

表-1は2021年5月7日時点のEM-DAT²⁾に基づく2001年以降の東ティモールで発生した災害をまとめたものである。2002年に独立した東ティモールでは十分な統計データが不足しているため不明な箇所も多いが、表1に従えば今回のサイクロンでは東ティモール全体で少なくとも42人が死亡し、143,670人が被災した。また数値が明らかになっている事例の中では死者数、被災者数ともに今回の災害が最も人数が多いことがわかる。東ティモール独立後最大の災害となった。

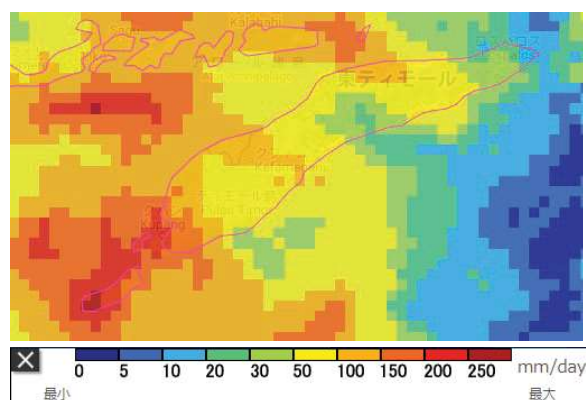


図3 GSMaPによる日降水量

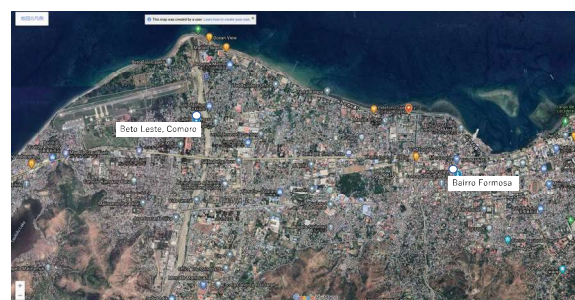
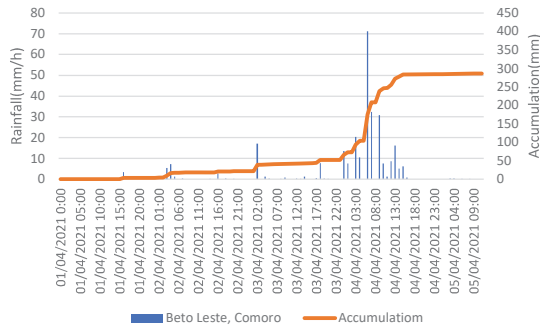


図4 雨量計の設置場所 (デシリ市内)

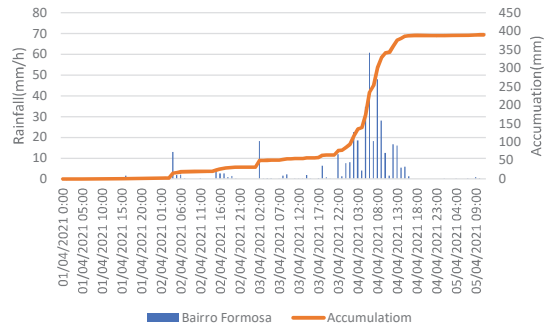
図2に東ティモールの行政区を示す。表1では41名であるが行方不明者を含めて死者42名である。デシリ県で22名、アイレウ県で2名、アイナロ県で10名、マナトゥト県で5名、ビケケ県で3名となっている。多くは土砂災害による被災者であった。

3.2 降雨状況

東ティモールでは十分な降雨観測網が発達していないため、地上雨量計による東ティモール国内での全体的な降雨状況は不可能である。現在、全球降水観測主衛星によって観測された降水量がGSMaPでインターネット公開されている。そこで2021年4月3日(UTC)の日雨量分布をGSMaPから入手した³⁾。それ

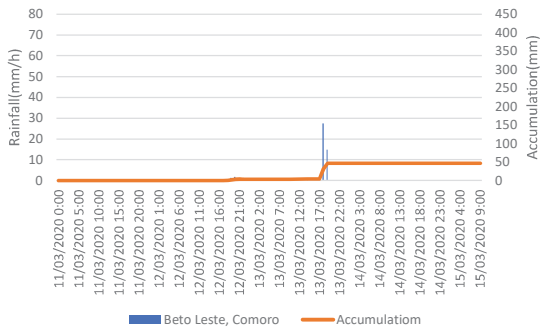


(A) Beto Leste

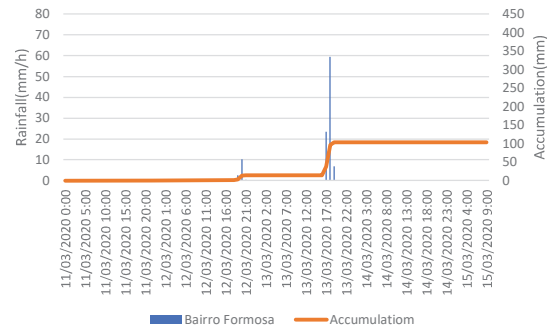


(B) Bairro Formosa

図5 雨量計の設置場所（ディリ市内）



(A) Beto Leste



(B) Bairro Formosa

図6 光学衛星画像による氾濫箇所

を図3に示す。ティモール島の西側で150mmを越える雨量となっている。ディリ県では100mm～150mm程度の降水量となっている。全体的には50～100mmの日雨量となっている。東ティモールの東部のラウテン県では日雨量は少なく20～30mmの範囲となっている。

GSMaPの空間解像度は 0.1° （赤道付近で11km）であるため、大広域の雨量分布の把握には適しているが、狭い局所的な降雨特性の把握には向いていない。幸いにもカウンターパートである東ティモール大学教員がディリ市内に雨量計を2箇所設置していた。その設置場所を図4に示す。Comoro川の左岸側のBeto Lesteと4km程度東に位置するBairro Formosaに雨量計が設置されている。

図5に現地時間（日本時間との時差は無い）で2021年4月1日0:00から2021年4月5日9:00まで（105時間）の時間降雨量を示している。Serojaが接近する前から多少の降雨が、Beto Lesteでは4日0:00頃、Bairro Formosaでは3日22:00頃から雨が降り出している。4日6:00にBeto Lesteで71.2mm/h、Bairro Formosaで60.8mm/hの強い降雨となった。降雨は4日6:00にピークを取りその後減少していく。4日17:00以降は雨が

収まっている。降雨継続時間は17～19時間程度であり、累積雨量はBeto Lesteで285.8mm、Bairro Formosaで390.2mmであった。ピークの降水量はBeto LesteがBairro Formosaよりも大きい、Beto Lesteでは降水量が0mm/hとなる時刻がいくつか存在しているため累積雨量はBairro Formosaの方が大きくなっている。なお、本格的な降雨が始まった4日0:00からの累積雨量ではBeto Lesteで232.4mm、Bairro Formosaで309.8mmであった。

ディリでは前年の2020年3月にも雨季による豪雨災害が発生し、市内各地で浸水が発生した。その時に雨量を示したのが図6である。期間的に図5と比較できるように105時間（2021年3月11日0:00～2021年3月15日9:00）の降雨量を示している。表1から分かるように東ティモールの豪雨災害は台風性よりも非台風性（熱帯収束帯に起因する降雨）の豪雨が多い。3月13日18:00が降雨のピークとなり、Beto Lesteで27.4mm/h、Bairro Formosaで59.4mm/hとなった。継続時間は3時間程度であり、この期間の累積雨量はBeto Lesteで46.8mm/h、Bairro Formosaで103.4mm/hであった。今回の台風性豪雨は東ティモールにおいて、多量の降水量をもたらしたことが分かる。

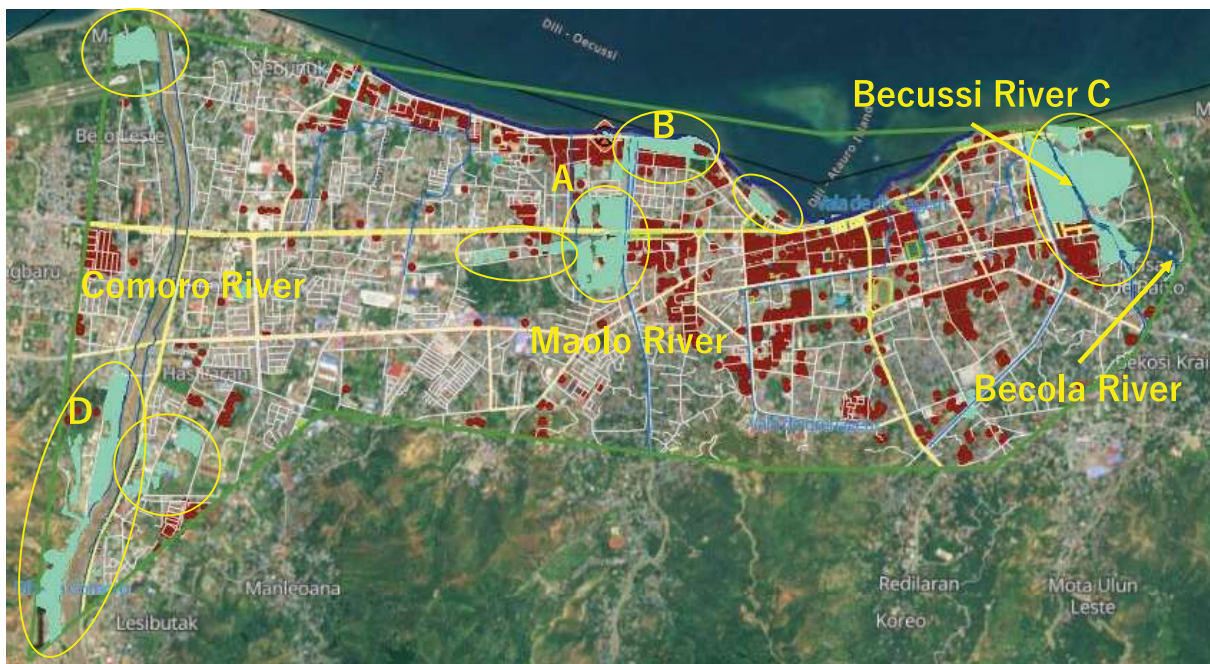


図7 光学衛星画像による氾濫箇所



図8 Maolo川周辺の拡大図

4. ディリにおける浸水域と被災状況

4.1 ディリ市内の浸水域

欧州委員会（European Commission）が運営しているコペルニクスプログラムで観測された光学衛星画像のプロダクトを公開している。図7にそのプロダクトを示している。オリジナルのプロダクトはカラーであり浸水域が緑色のハッチで塗りつぶしているが、それに著者らが○で囲っている。

撮影時刻はUTCで2021年4月4日15:59（LOC4月5日0:59）である。図7から分かるように光学衛星画像で確認できる氾濫域は河川の近傍であり、外水氾濫で

あることが推測できる。

4.2 Maolo川周辺の氾濫

図8にMaolo川周辺の拡大図を示す。Maolo川の氾濫は図7における氾濫域AとBの原因となっている。Maolo川の左岸側には大統領府があり、河口付近の左岸側に日本大使館がある。図8中のA-, B-, C-pointは東ティモール大学教員が調査した箇所である。A-point近傍の写真写真1に示す。撮影日は現地時間で2021年4月8日である。以降キャプションの撮影日は現地時間である。また年は省略する。河床と橋桁の間隔は狭いことが確認できる。橋が洪水流の流下



写真1 氾濫域AのA-point (4月8日撮影)



写真2 大統領府前の通りの状況 (4月7日撮影)

を阻害してバックウォーターが発生し、それに起因して越水が発生し右岸側および左岸側に氾濫していたものと考えられる。

写真2は橋につながる通りに面している大統領府前の写真である。Maolo川からの氾濫水によって運ばれてきた泥が幅広く堆積していることがわかる。

写真1の橋から46m程度上流側にある橋の様子を写真3に示す。トラス状の欄干を持つ長さ13m程度の橋である。流木ゴミが橋上・下流側や欄干に引っかかっており洪水は橋の上を流れて行ったことが示唆される。



写真3 氾濫域AのB-point (4月8日撮影)



写真4 氾濫域AのC-point (4月8日撮影)



写真5 日本大使館前の道路陥没 (4月8日撮影)

B-pointにも橋がありA-pointと同様、橋による通水阻害が発生している。紙面の都合上写真は割愛している。図7および図8では氾濫域AのB-point周辺では氾濫域が確認されていない。浸水域は衛星画像での判断結果であるが、実際には別の写真から土砂が周囲の道路に積もっている様子が見取れた。

C-point近傍の様子を写真4に示す。河口の傍の通り

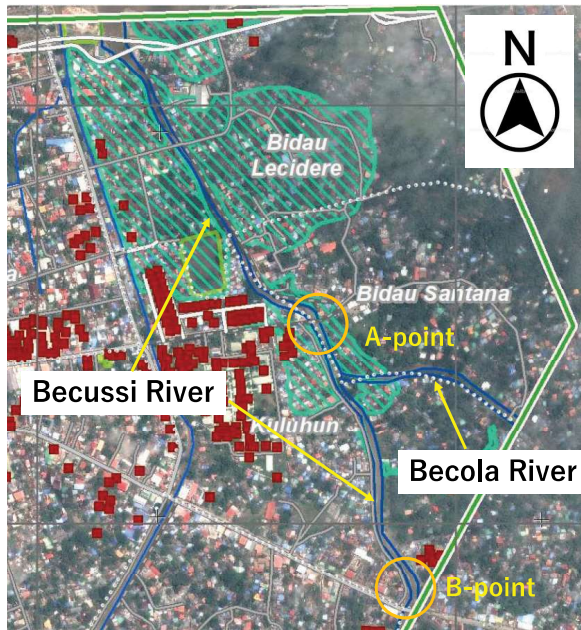


図9 Becussi川と Becola 川周辺の拡大図

に架かっている橋である。この橋も橋桁と河床の高さが低く、通水障害が大きいものと思われる。左岸側の護岸が破壊されており大きな被害が生じた。洪水は橋を乗り越えて、さらに道路に沿って左右に流れていったものと考えられる。図7に示している氾濫域Bの発生要因と考えられる。

この道路の左岸側方向（西側）には日本大使館があり、大使館前面で大きな道路陥没が発生した。その様子を写真5に示す。道路上に流れ込んだ水流がアスファルト舗装の下の砂利等を洗い流し、その結果陥没が発生したものと考えられる。

4.3 Becussi川周辺の氾濫

図7の氾濫域Cの拡大図を図9に示す。図中のA-point, B-pointは東ティモール大学教員による調査箇所である。この氾濫域はBecussi川と Becola川の合流部から下流側で大きな氾濫が発生していることが分



写真6 氾濫域CのA-point（4月8日撮影）

かる。

A-pointの状況を写真6に示す。欄干が破壊されゴミが引かかっている。上段の欄干程度まで水位が上昇していたと推測される。また橋脚上部に亀裂が確認できる。床版にかかる流体力などにより発生したものと考えられる。ここには示していないが別の写真から橋や周辺道路には氾濫でもたらされた砂や土砂に覆われていたことが確認できている、二河川の合点から少し下流に位置するため流量が増大し、この橋が通水障害となったものと考えられる。この橋より下流側においても流下能力不足のため氾濫域が広がったものと考えられる。

B-pointにおいても橋が存在しており、欄干が壊れるなどの破損は確認された。しかしながらA-pointと比較するとその被害は小さいため、詳細な報告は割愛する。

4.3 Comoro川周辺の氾濫

図7の西側にあるComoro川周辺の拡大図を図10に示す。Comoro川はディリ市内で最も大きい河川で川幅は80~90m程度である。A-point, B-pointは東ティモール大学教員による調査箇所である。調査地点は氾濫域Dよりも上流側にある。

写真8にA-pointの被災状況を示す。写真8の左側は

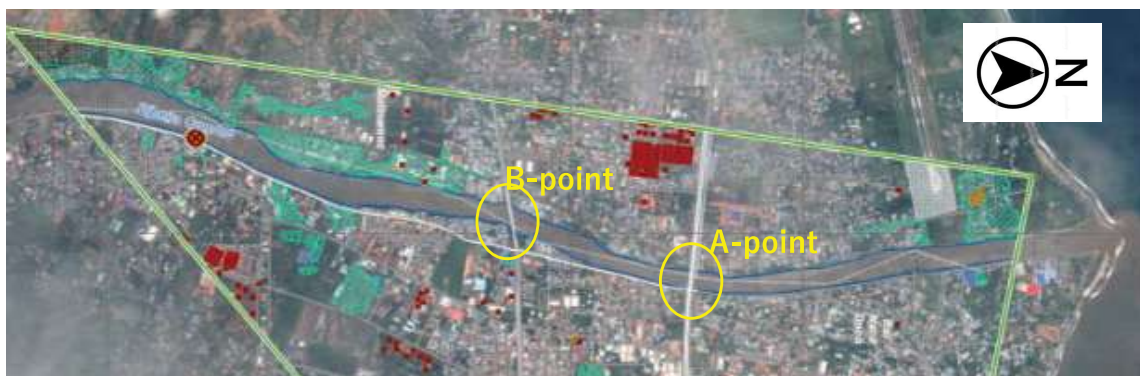


図10 Comoro 川周辺の拡大図



写真8 A-pointの被災状況（Comoro川）（4月12日撮影）



写真9 A-pointの被災状況（Comoro川）（4月8日撮影）



写真10 B-pointの被災状況（Comoro川）（4月4日撮影）

Google Earthの2020年11月19日の状況である。Comoro川に限らず東ティモールの河川は乾季など雨が無い場合には水無川の状態となる。堰から少し下流側の右岸側の○で囲まれた箇所が今回の被災箇所である。周辺には甚大な氾濫は認められていないが、洪水流

により護岸が破壊されている。

写真9には同じ被災箇所を下流側から上流側に向かって撮影したものである。堰の損傷は認められていないことが分かる。しかしながら堰の両端の護岸が浸食されていることが分かる。洪水流が堰の両端

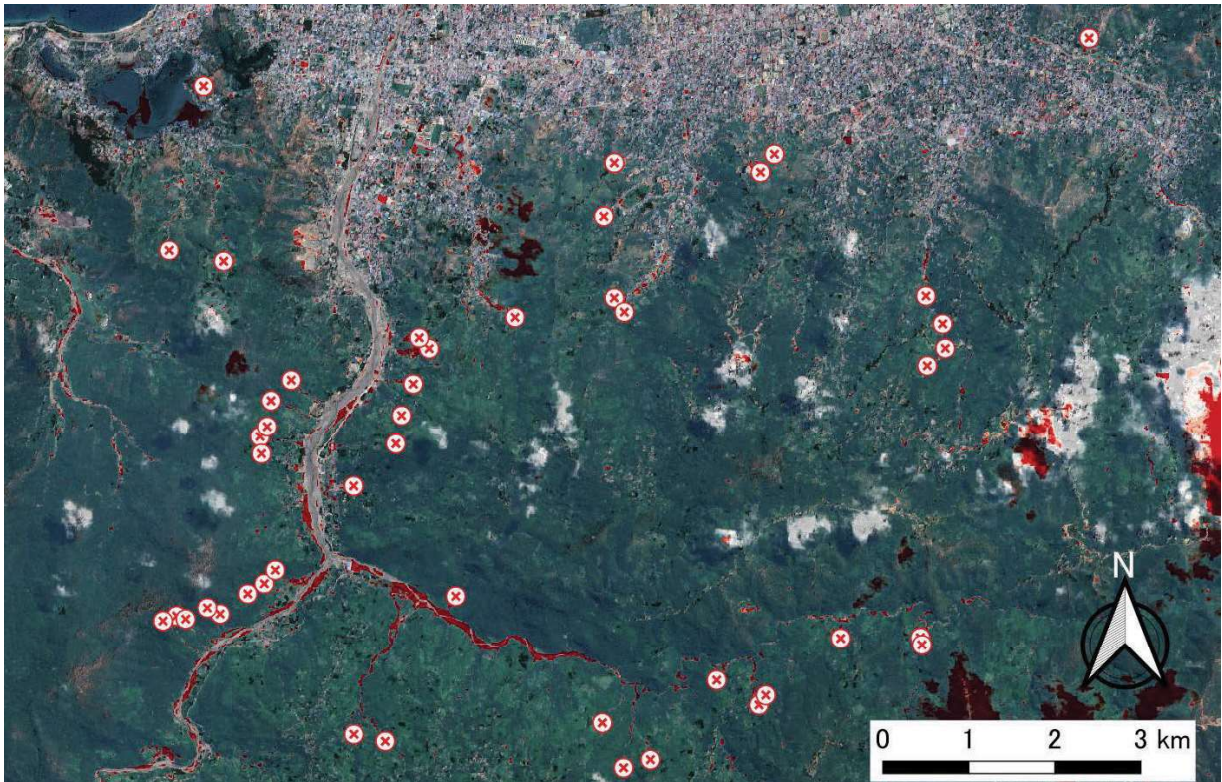


図 11 デイリ近郊の斜面崩壊痕跡の抽出

を迂回し、柔らかい側岸を浸食することは良く知られており、迂回流と呼ばれている。写真9から、今回も迂回流が発生して堰近傍の護岸や道路を破棄したものと考えられる。日本大使館前の洗堀と同様、デイリの道路は比較的軟弱な地盤にアスファルト舗装されている程度であるため強靱さが不足していたのであろう。

写真10にB-pointの被災状況を示す。右側はGoogle Earthの2020年11月19日の状況である。左側に洪水時に撮影された動画のスナップショットを示す。スナップショット(写真9-3)から水位が高い状況となっていることが分かる。右岸側の家屋はかろうじて浸水を免れている状況であるが、左岸側の家屋(写真9-1, 写真9-2)は洪水流に巻き込まれて流されてしまっている。特に写真9-1が示す場所では護岸浸食があり、家屋が流されている。Comoro川では住居のある下流域では左岸側の方が右岸側よりも低いため、このような被害が生じた。

5. 衛星画像解析

5.1 斜面崩壊の抽出

ここまでは氾濫被害について述べてきたが、この章では光学衛星画像を用いた斜面崩壊箇所の探索について述べる。デイリ近郊の土石流痕跡をSentinel-2

マルチバンド衛星の観測データを利用して検出した。発災前後の観測データは欧州連合(EU)の地球観測プログラムであるCopernicusプログラムの枠組みで運用されているCopernicus Open Access Hubを利用して入手した。光学マルチバンドセンサを搭載した衛星群Sentinel-2の観測プロダクトについてデイリを観測したものを検索し、発災前として2020年4月20日、発災後として2021年4月10日及び15日の観測データをダウンロードした。Level-1Cという処理レベルのプロダクトでオルソ補正が行われた大気補正前の各周波数バンドの反射率のデータが含まれる。欧州宇宙機関ESAが公開しているSNAP(Sentinel Application Platform)を利用して特定バンド抽出やNDVI(正規化植生指数)の算出を行った。地理情報システムQGIS上でNDVIデータの発災前後での差分値を求め、可視光バンドデータで構成したトゥルーカラー画像、およびASTER光学衛星による全球3次元地形データASTER-GDEMと照合することで斜面災害の痕跡を検出し、源頭部の位置をマッピングした。その結果を図11に示す。50箇所程度の痕跡が抽出された。

今回の豪雨で大量の土砂生産が発生した。次回の出水でこれらの土砂が下流へ運ばれ、河床を浅くしてしまう可能性があるため、土砂管理は重要な課題である。

Sentinel-2の解像度は波長によって異なるが10～

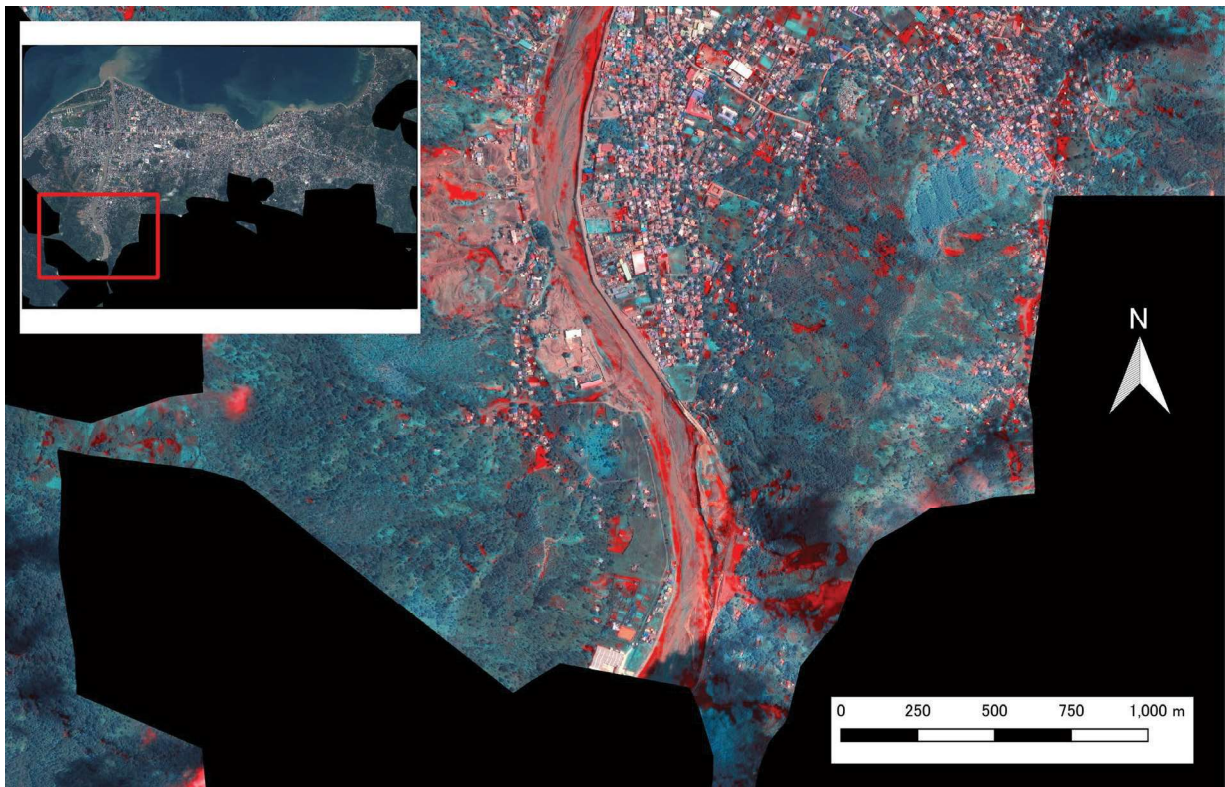


図12 Comorol川の中上流部の土砂災害（植生の減少，土砂の流出を赤色で強調）

60m程度である。市街地などより詳細な被災状況の把握には細かい解像度を持つ衛星画像が必要である。そこで解像度が50cmのPleiades衛星の観測データを利用した。これは図7に示しているプロダクトと同じ衛星データである。発災前後の観測データはディリ市街を中心とした188 km²の範囲で、発災前として2021年1月22日、発災後として2021年4月9日のものをAirbus社の提供するオルソ補正済みパンシャープン50cm解像度プロダクトとして購入した。

図12にComoro川の中上流部の解析結果を示す。Comoro川右岸の集落背後や左岸の採石場における斜面災害の痕跡を示す。植生の減少，砂の堆積で裸地化した箇所を赤色で強調表示している。右岸下側の集落で斜面から川辺一帯が赤色に見える。この集落では8棟が土石流に埋まったものとみられる。左岸の採石場も一部の谷部や植生との境で赤色を帯びており、崩落があったものと考えられる。図12の中央を流れるComoro川河道の高水敷が砂で覆われ赤色を帯びている。

6. おわりに

2021年4月4日にサイクロン・Serojaが東ティモール襲来し、甚大な氾濫被害，土砂災害が生じた。コロナ禍のため現地に入ることができなかったため、現地の東ティモール大学スタッフと協力をしてリモ-

ート調査を行った。また人工衛星画像を用いて、斜面崩壊位置の把握を行った。本稿ではその結果を示したものである。

ディリ市内の氾濫は主に河川の通水能力の低さに起因するが、とくに橋が通水阻害となっていることが分かってきた。また多くの斜面崩壊が確認された。それらは土砂生産として、河道に残っている。次回の出水ではそれも同時に流れ出し、大きな被害を引き起こす要因となり得る。また河床高の上昇にもつながり通水能力の低下につながる。今後の土砂管理は益々重要となる。

謝 辞

Pleiades衛星の観測データの購入において自然災害研究協議会より支援を受けた。東ティモール大学工学部土木工学科のスタッフはコロナ禍にも関わらず現地で貴重な調査を行って頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) IBTrACS: <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>.
- 2) EM-DAT: <https://www.emdat.be/>.
- 3) GSMap: https://sharaku.eorc.jaxa.jp/GSMap/index_j.htm.