

衛星リモートセンシングによる2017年10月の台風21号と 福井県鯖江市の水害の解析*

加藤 芳信^{*1}

Analyses of Typhoon No. 21 in October 2017 and Flood Disaster in Sabae City, Fukui Prefecture by using Satellite Remote Sensing

Yoshinobu KATO^{*1}

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering

Typhoon No. 21 in October 2017 was super-large and moved along the eastern coast of Japan with a strong force, causing wind and flood damages in various places from Shikoku to Tohoku region. In Sabae City, Fukui Prefecture, there were many damages caused by flooding, such as the collapse of the Jinzuu River embankment in the early morning of October 23. Cloud top altitudes of the typhoon are calculated by using MODIS temperature images to estimate its strength. Using ASTER satellite data (15m resolution) and Sentinel-2 satellite data (10m resolution), the NDVI difference image is created to detect the location of damage caused by flooding in Sabae City.

Key Words : Typhoon No.21 in 2017, Flood disaster, Sabae City, MODIS, Cloud top altitude, ASTER, Sentinel-2, NDVI difference image

1. 緒 言

2017年10月の台風21号は超大型で強い勢力を持って日本の東側海岸沿いを移動したため、四国から東北地方までの各地で種々の風水害を与えた^{(1),(2),(3)}。台風が福井県に最接近したのは静岡県に上陸した10月23日3時ごろであるが、福井県ではそれ以前の10月21日朝から前線の影響で雨が降り始め、23日夜まで雨が続いた。福井県の人的被害は重傷1人、軽傷4人であり、住家被害は全壊1棟、半壊6棟、一部破損421棟、床上浸水5棟、床下浸水57棟であり、非住家被害5棟であった⁽²⁾。福井県鯖江市では、10月23日早朝に神通川の堤防が決壊して田畑や道路を冠水させたりするなど、浸水害の被害が多くあった⁽⁴⁾。

本論文では、衛星リモートセンシングによる鯖江市の水害解析を最終目標として、まず、第2章では台風21号の気象概況説明と、福井工業大学あわらキャンパスで受信したMODIS衛星データを使って、台風の位置や雲頂高度を求める。第3章では、鯖江市報告書「平成29年10月22日、23日台風第21号に関する災害の記録」⁽⁴⁾に載っている2017年10月23日の写真と、筆者の2017年、2018年、2021年の現地調査により、台風21号による水害の状況を説明する。第4章では、ASTER衛星データ(15m解像)とSentinel-2衛星データ(10m解像)を用いて、被害前と被害後のNDVI差画像を作成し、水害による被害場所の検出を行う。

2. 2017年10月台風21号

2.1 気象概況

本節では、福井地方気象台2017年10月25日発行の「平成29年台風第21号に関する福井県気象速報」⁽¹⁾および気象庁2018年3月30日発行の「災害時気象報告 平成29年台風第21号及び前線による10月20日から10

* 原稿受付 2021年5月13日

^{*1} 工学部 電気電子工学科

E-mail: 2093@edu.fukui-ut.ac.jp

月23日にかけての大雨及び暴風等」⁽²⁾に基づき、気象概況を説明する。この速報および報告書は出所を明示することにより引用、転載、複製を行っても良いことが記載されている。

台風21号は、10月16日3時にカロリン諸島で発生し、フィリピンの東海上を発達しながら北上し、21日に超大型で非常に強い勢力となり、22日にかけて次第に速度を上げて日本の南を北上し、22日夜遅くに東海道沖を北北東に進んだ。台風は、23日3時頃に超大型で強い勢力のまま静岡県御前崎市付近に上陸した後、暴風域を伴ったまま東海地方及び関東地方を北東に進み、23日9時に福島県沖に抜け、23日15時に北海道の東で温帯低気圧に変わった。

福井県では、台風の接近する前から日本の南岸に停滞する前線の影響で10月21日朝から雨が降りはじめ、23日夜まで続いた。アメダスでは、22日から23日24時にかけての総降水量は、大飯で304.0mm、小浜で279.0mm、今庄で253.0mmを観測し、小浜では22日21時20分までの1時間に38.0mmの激しい雨を観測した。また、台風が最も接近した22日夜遅くから23日未明の最大風速は、春江で23.1m/s(23日1時47分、北)、今庄で22.5m/s(23日2時43分、北)、最大瞬間風速は、小浜で38.8m/s(23日2時7分、北)、今庄で36.8m/s(23日2時37分、北)を観測した。

(参考) 2004年7月18日発生の「福井豪雨」^{(5),(6)}では福井県嶺北地方を中心に、足羽川などの河川の堤防決壊、土石流の発生、がけ崩れ、床上浸水などの大きな被害があった。当時の1時間降水量の最大値は美山町朝谷島の96mmであり、日降水量の最大値は福井市城戸ノ内町の338mmであった。この福井豪雨に比べると、今回の2017年台風21号による降水量は多くはなく、また、被害も少ない。

2.2 天気図とMODIS衛星画像による台風21号の様子

衛星画像として、福井工業大学あわらキャンパスの衛星受信システムで受信したTerra/Aqua衛星MODISデータを、MODISデータ処理ソフトウェアHDF-EOS(VTT社製、フィンランド)、衛星画像処理ソフトウェアERDAS ER Mapper 2015(HEXAGON GEOSPATIAL社製、米国)、地理情報システムソフトウェアArcGIS 10.6.1(ESRI社製、米国)を用いて、Band31温度画像とカラー画像を作成した(Fig.1~Fig.6参照)。表示範囲は東経110~160度、北緯10~60度であり、国境と海岸線を赤色線、川を水色線、10度ごとの緯度経度線を灰色線で表示してある。温度の単位はケルビン(K)である(補足説明1参照)。温度画像のカラーバー(200~330K)はFig.1~Fig.6で共通である。

(補足説明1) 絶対温度(K) = ケルビン温度(K) = 摂氏温度(°C) + 273.15 (1)

Fig.1は10月20日昼の衛星画像で、中心気圧965hPaの台風がフィリピンの東海上にあり、福井県には薄い雲がかかっているが、雨は降っていない。

Fig.2は10月21日昼の衛星画像で、超大型で非常に強い勢力となった台風(中心気圧925hPa)が沖縄の南海上にあり、福井県には台風から伸びる雲がかかっており、雨が少し降り始めようとしていた。

Fig.3は10月22日昼の衛星画像で、超大型で非常に強い勢力の台風(中心気圧930hPa)が沖縄の東、四国の南の海上にあり、福井県には台風から伸びる雲がかかっており、雨が強く降っていた。

Fig.4は10月23日未明の衛星画像で、超大型で強い勢力の台風が静岡県に上陸した時の画像である。福井県に最も接近した時間帯であるので、福井県では強い風が吹いていた。福井県には台風から伸びる雲がかかっており、雨が強く降っていた。

Fig.5は10月23日昼の衛星画像で、台風は少し勢力を弱めたもののまだ強い勢力と言える中心気圧970hPaで福島県の海上に抜けたところの画像である。福井県では台風による雲の範囲から外れようとしており、雨が弱まりつつあった。

Fig.6は10月23日夜の衛星画像で、台風は温帯低気圧に変わっており、台風の目も消えている。福井県には薄い雲がかかっているが、雨は降っていない。

Fig.7に10月20日12時から23日21時までの台風21号の雲頂高度と中心気圧のグラフを示す。中心気圧は天気図に記載された台風の気圧を採用した。雲頂高度は、Band31(熱赤外バンド、観測波長=10.780~11.280μm)の温度画像よりER Mapperの温度計測機能を使って、台風雲の最低温度と台風の近くの地上(海表面)の温度を計測し、標準的な大気が1km高くなるごとに約6.5°C下がるという性質⁽⁷⁾を利用して、

雲頂高度(km)を求める簡易式=(台風近くの海表面温度-台風雲の最低温度)/6.5 (2)

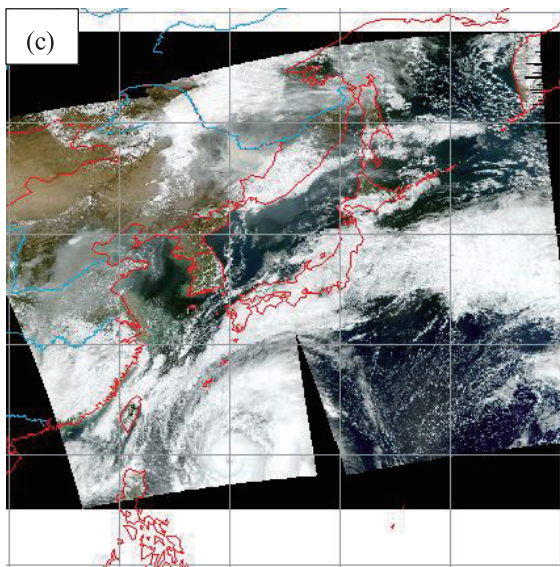
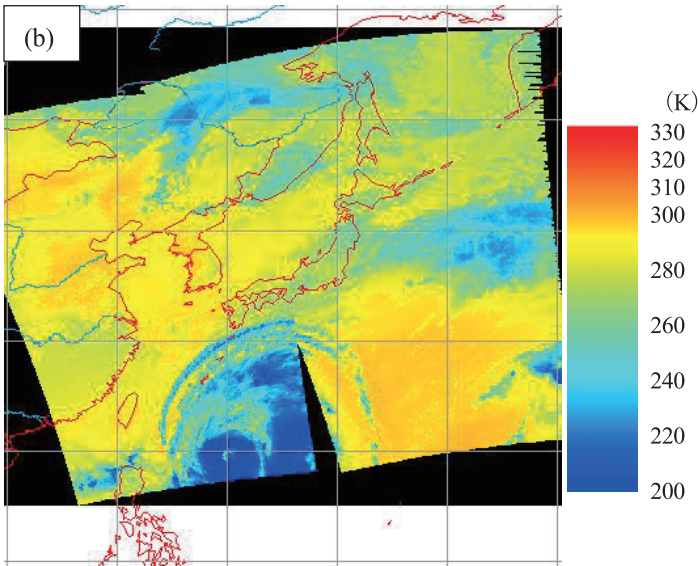
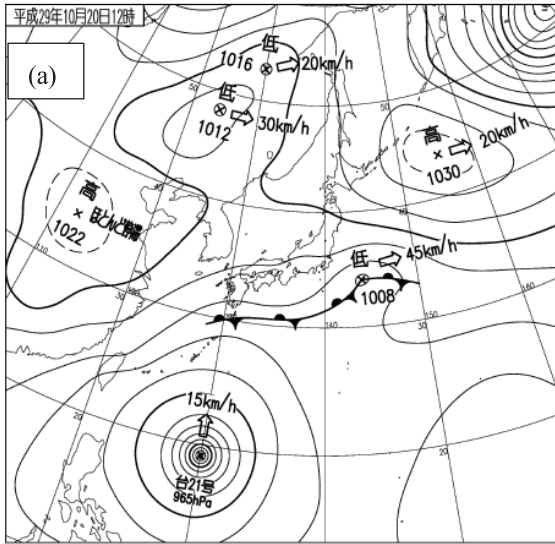


Fig.1 (a) Weather map of 12:00 on Oct. 20, (b)Temperature image and (c)True-color image of Aqua-MODIS at 12:18 and 13:56 on Oct. 20.

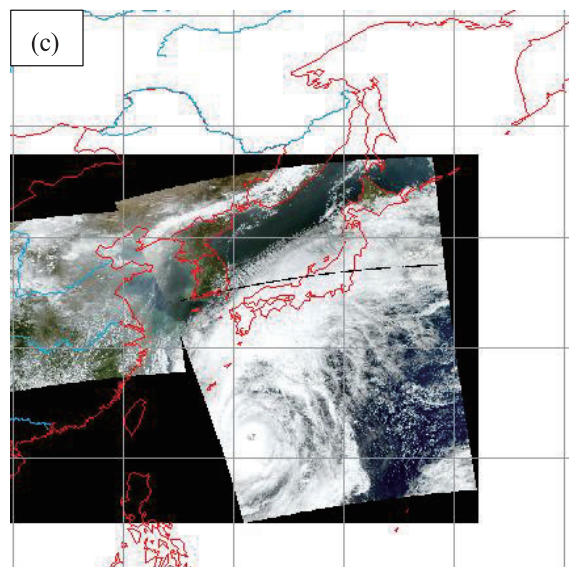
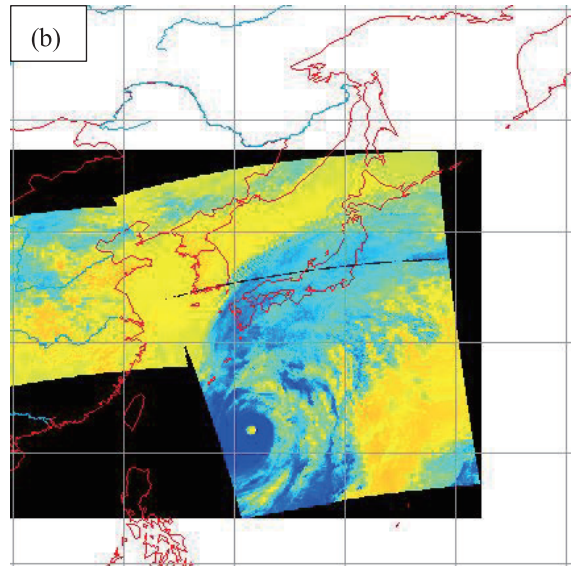
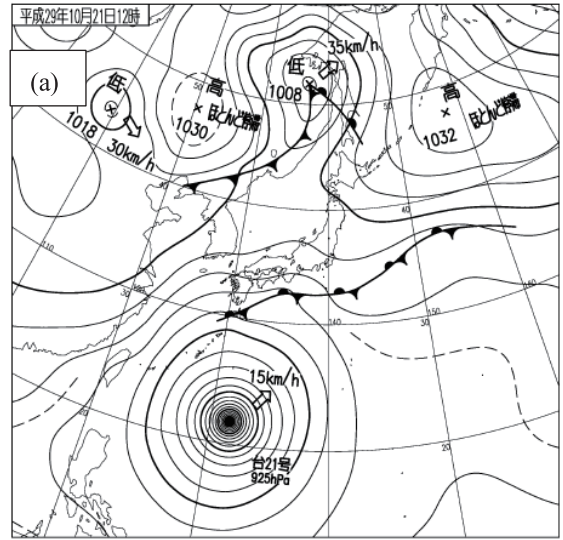


Fig.2 (a) Weather map of 12:00 on Oct. 21, (b)Temperature image and (c)True-color image of Aqua-MODIS at 13:01 and 14:42 on Oct. 21.

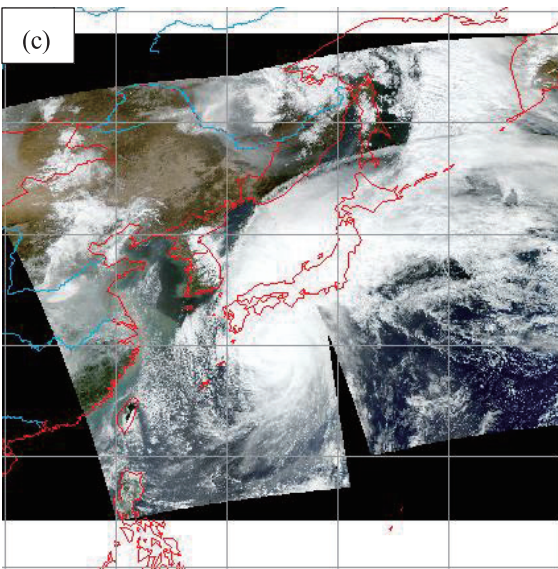
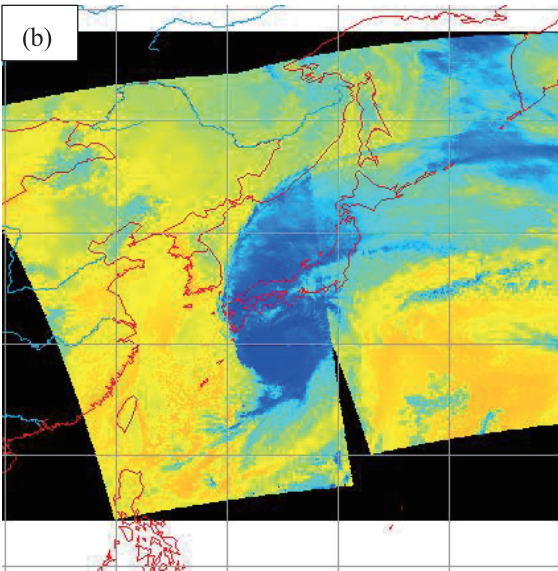
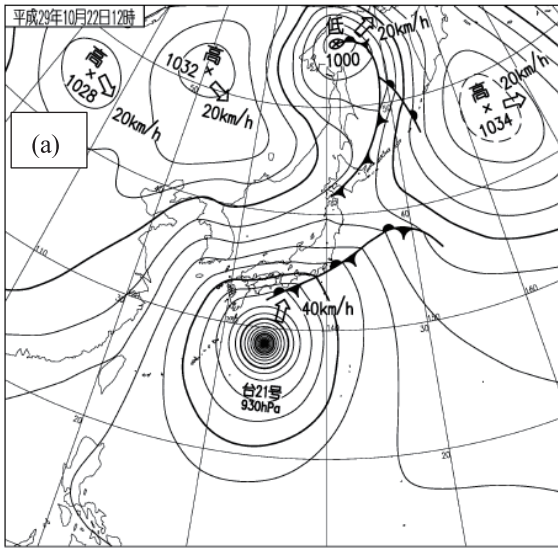


Fig.3 (a) Weather map of 12:00 on Oct. 22, (b) Temperature image and (c) True-color image of Aqua-MODIS at 12:07 and 13:42 on Oct. 22.

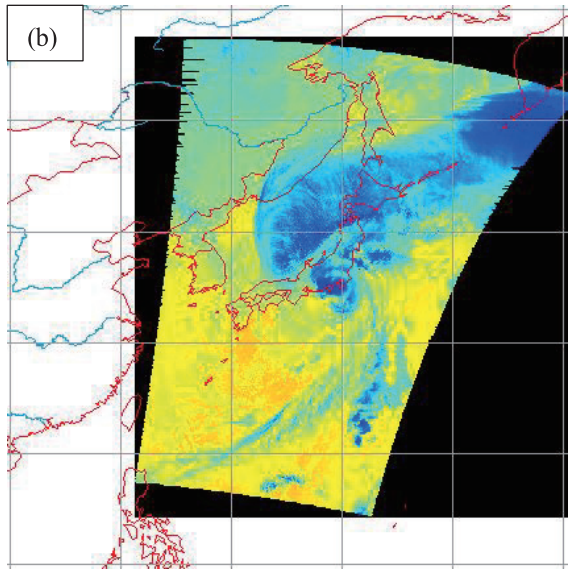
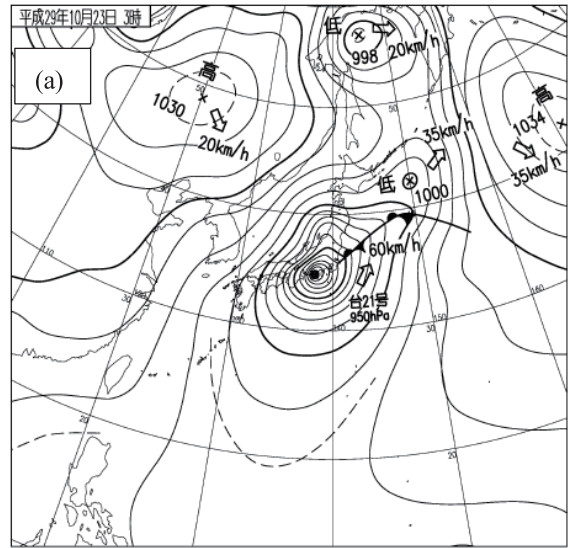


Fig.4 (a) Weather map of 03:00 on Oct. 23, and (b) Temperature image of Aqua-MODIS at 01:45 on Oct. 23.

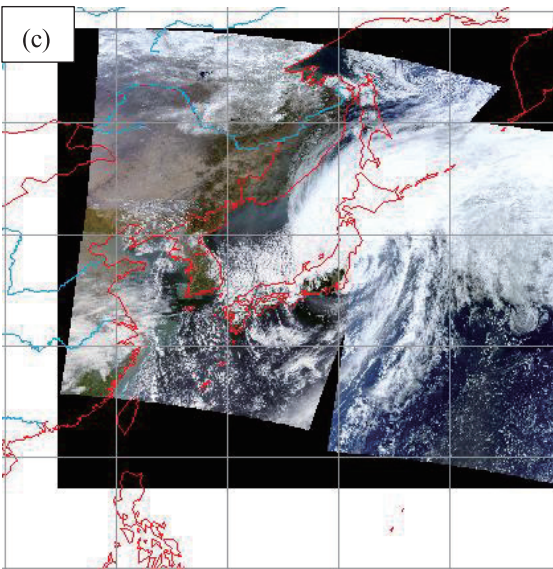
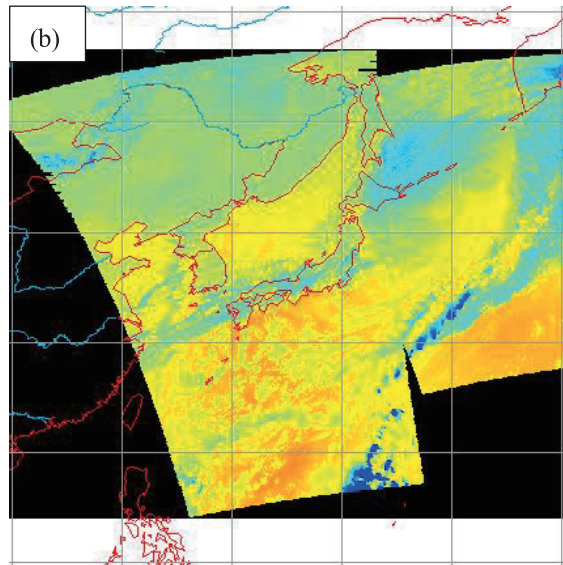
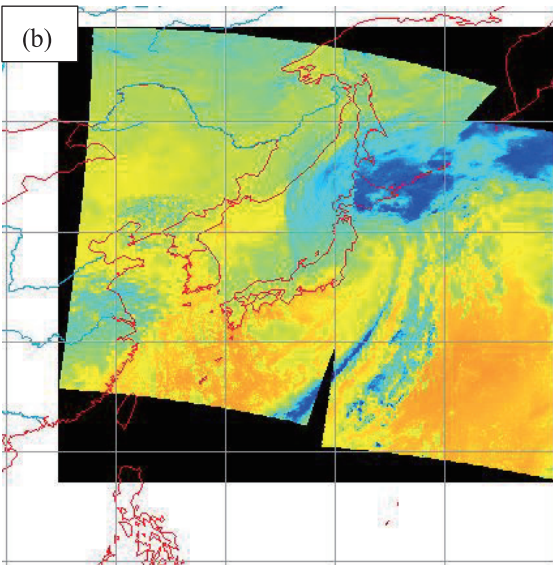
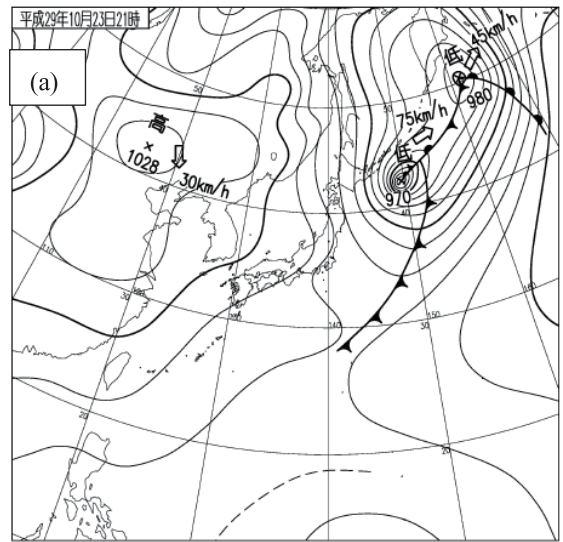
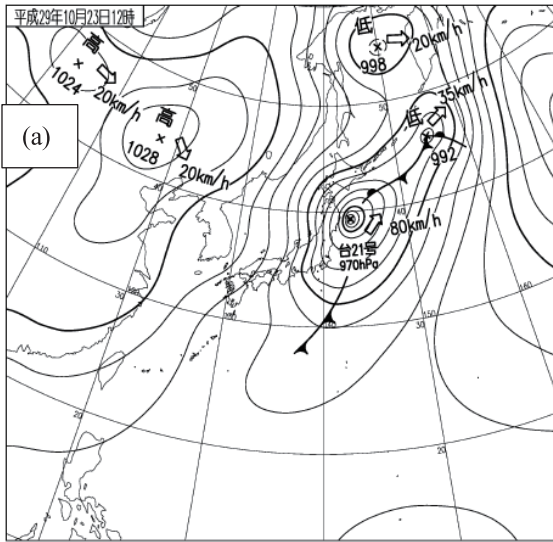


Fig.6 (a) Weather map of 21:00 on Oct. 23, and (b) Temperature image of Terra-MODIS at 20:38 and 22:13 on Oct. 23.

Fig.5 (a) Weather map of 12:00 on Oct. 23, (b) Temperature image and (c) True-color image of Terra-MODIS at 09:34 and 11:15 on Oct. 23.

Table 1. Minimum temperature of typhoon cloud and its coordinates, and Sea surface temperature of the sea near the typhoon and its coordinates, and Cloud top altitude of typhoon based on equation (2).

Figure	Date and time	Measurement of typhoon cloud			Measurement of the sea near the typhoon			Cloud top altitude of typhoon
		East longitude	North latitude	Minimum temperature	East longitude	North latitude	Sea surface temperature	
Fig. 1(b)	12:00, Oct. 20	129.33°	19.25°	191.0K=-82.15°C	151.81°	20.77°	298.6K=25.45°C	16.5km
Fig. 2(b)	13:00, Oct. 21	131.76°	21.38°	190.8K=-82.35°C	142.23°	23.23°	297.0K=23.85°C	16.3km
Fig. 3(b)	12:00, Oct. 22	133.20°	30.20°	190.5K=-82.65°C	145.03°	30.18°	295.3K=22.15°C	16.1km
Fig. 4(b)	02:00, Oct. 23	138.13°	35.55°	195.4K=-77.75°C	146.58°	34.83°	292.4K=19.25°C	14.9km
Fig. 5(b)	11:00, Oct. 23	142.42°	42.24°	217.4K=-55.75°C	152.58°	41.13°	290.0K=16.85°C	11.2km
Fig. 6(b)	21:00, Oct. 23	144.73°	45.83°	231.9K=-41.25°C	154.62°	44.82°	289.4K=16.25°C	8.8km

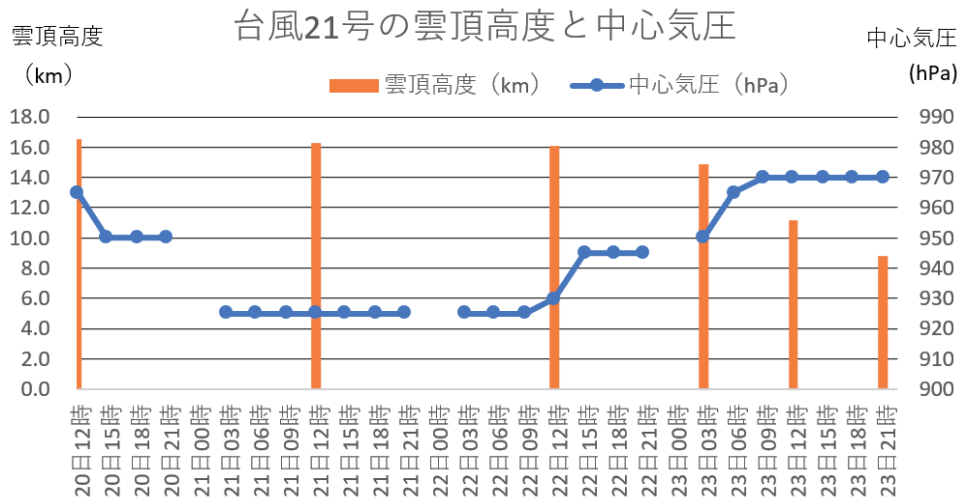


Fig.7 Cloud top altitude and central pressure of Typhoon No.21 in October 2017.

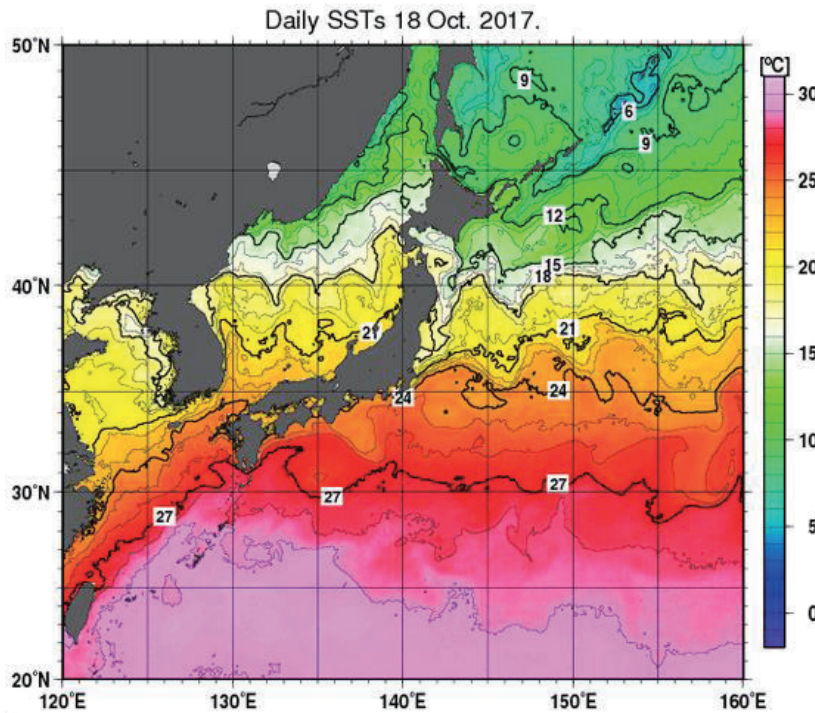


Fig.8 Sea surface temperature (SST) analysis map on 18 Oct. 2017 by Japan Meteorological Agency (JMA)⁽⁸⁾.

で求めた。Table 1 に、温度を計測した位置と温度、式 (2) による雲頂高度を示す。Fig.7 より、台風が最も勢力が強いのは 21 日 3 時から 22 日 9 時までであり、この時の台風の位置は北緯 20 度から 28 度までであるので、この範囲の海域の海水温が高かったことが推測される。実際、Fig.8 に示す気象庁の 10 月 18 日の海面水温解析図⁽⁸⁾によれば 29~27°C と海水温は高いので、台風が強い勢力を持っていたことも当然である。また、静岡県近くの海水温は 24~25°C であるので、10 月 23 日 3 時頃に超大型で強い勢力のまま静岡県に上陸したことも当然である。(補足説明 2 参照)

(補足説明 2) 気象庁による Fig.8 は人工衛星とブイ・船舶による観測値から解析された海面水温図である⁽⁸⁾。台風は一般に、海面温度 26~27°C 以上で発生・発達するといわれており^{(7),(9)}、日本近くへの移動では海面温度約 25°C までは勢力をほぼ維持するといわれている。Table 1 に記した海面温度の計測場所で {Table 1 での温度, Fig.8 での温度} を比較すると、Fig.1(b) : {25.45°C, 29°C}, Fig.2(b) : {23.85°C, 28°C}, Fig.3(b) : {22.15°C, 27°C}, Fig.4(b) : {19.25°C, 24°C}, Fig.5(b) : {16.85°C, 16°C}, Fig.6(b) : {16.25°C, 11°C} となり、両者で 0.85~5.25°C 違う。両者で日時が違う (Fig.8 は台風通過前の海面温度) のと、Table 1 はピンポイント位置での MODIS の Band 31 の計測温度、Fig.8 は実測値も考慮したある範囲の位置で平均した温度であるので、2~4°C くらいの違いは当然と思われるが、それ以上の違いも含むので、MODIS でのより正確な温度計測には文献⁽¹⁰⁾記載のアルゴリズムを採用するのが良い。

2.3 福井県における雨と風の状況

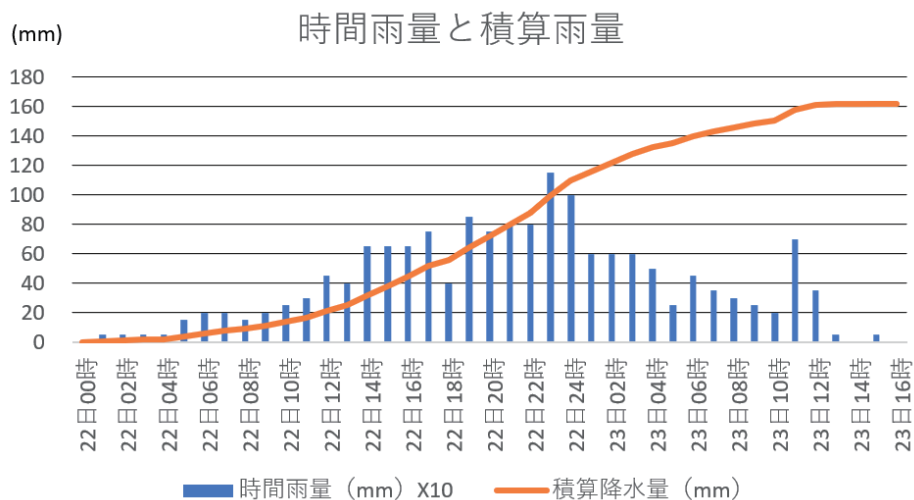


Fig.9 Hourly rainfall and cumulative rainfall in October 2017 at Fukui Local Meteorological Observatory.

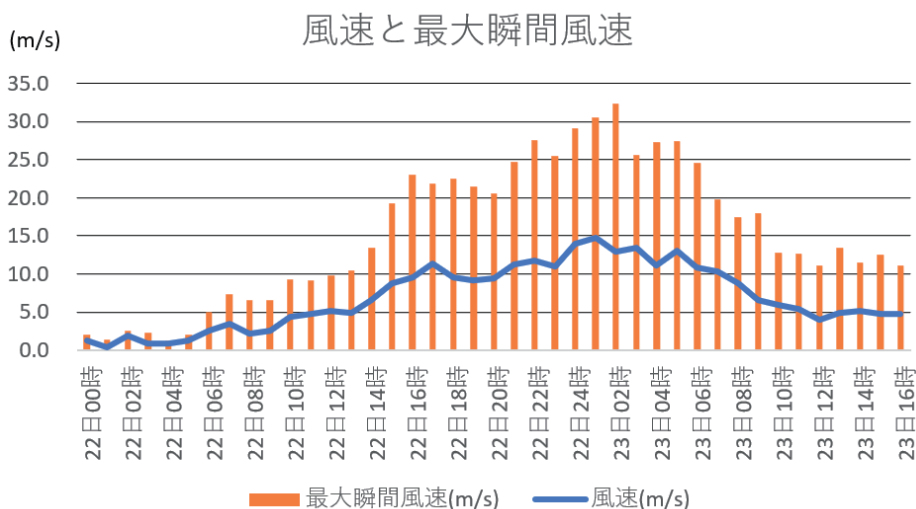


Fig.10 Wind speed and maximum instantaneous wind speed in October 2017 at Fukui Local Meteorological Observatory.

気象庁の「過去の気象データ検索」Web ページ⁽¹¹⁾で、福井県福井（福井地方気象台のこと）の2017年10月22日、23日の1時間ごとの値と10分ごとの値をダウンロードし、Excelで「時間雨量と積算雨量」のグラフ（Fig.9）と「風速と最大瞬間風速」のグラフ（Fig.10）を作成した。鯖江市西山町には鯖江・丹生消防組合気象観測設備があるが、福井地方気象台のデータの方がオーソライズされているためこちらを採用した。

台風21号が福井県に最接近したのは23日3時頃であるが、Fig.9の時間雨量の最大値は22日23時の11.5mmであり、Fig.10の最大瞬間風速の最大値は23日2時の32.4m/sである。両者とも台風の距離的な最接近の時刻23日3時よりも早い。これは当時の気象状況を考えると、次のように説明できる。

台風21号は海水温の高いエリアを進んできたため、21日には超大型で強い勢力となっていた。Fig.2（21日12時）、Fig.3（22日12時）、Fig.4（23日3時）の天気図を見ると、ロシア極東部に強い高気圧（1030～1032hPa）があり、台風21号の強い低気圧（925～950hPa）が北進するにつれ、高気圧と台風間の気圧勾配が大きくなった。温度画像およびトルカラー画像を見ればわかるように、日本の南岸に停滞する前線の影響により台風の北側400～1000kmに発生した先駆降雨帯⁽⁷⁾の雲と、台風周囲の200～600kmにある外側降雨帯⁽⁷⁾の雲の北側部分がより活性化し、その部分で風と雨が強くなった。福井県は、22日23時から23日3時頃の台風の進行方向（北東方向）に対し左側にあるため、半径約200kmの台風雲よりも先駆降雨帯の雲と外側降雨帯の雲の影響で、台風の距離的な最接近の時刻23日3時よりも早く、雨の最大の時刻（22日23時）と風の最大の時刻（23日2時）を迎えたのである。

3. 鯖江市報告書などによる鯖江市水害の内容と現地調査の関係

本章では、鯖江市報告書「平成29年10月22日、23日台風第21号に関する災害の記録」⁽⁴⁾記載の浸水被害の図と堤防決壊などの写真を基に、筆者による2017年、2018年、2021年の現地調査の写真を加えて、水害の状況を説明する。なお、2018年に報告書記載の図や写真の使用許可を鯖江市に問い合わせたところ、インターネット上に公開してある文書やデータ等は自由に使ってよいとのことであった。



Fig.11 Inundation damage area in the northwestern part of Sabae City which is displayed in light blue⁽⁴⁾.

Table 2. River width.

Name	(Japanese)	Width of normal running water	Width between the tops of embankment
Hino river	(日野川)	About 20 - 30 m	About 170 m
Ten-nou river	(天王川)	About 7.5 - 12.5 m	About 50 - 60 m
Wada river	(和田川)	About 10 m	About 30 - 38 m
Jinzuu river	(神通川)	About 3.5 m	About 16 m
Ronde river	(論手川)	About 2.5 m	About 8.5 m
Ishida river	(石田川)	About 2 - 3.5 m	About 10 m



Fig.12 Flooding of rice fields due to precipitation and overflow of the Wada and Ishida rivers (Oct. 23, 2017)⁽¹²⁾.

台風 21 号による鯖江市の被害は、死傷者 0 人、床上浸水 6 棟、床下浸水 4 棟、地下坑道浸水 2 ヶ所、住家一部損壊 126 棟であった⁽⁴⁾。

Fig.11 は、鯖江市報告書⁽⁴⁾に記載されている鯖江市北西部の地図で浸水被害エリアが水色で表示されている。表示範囲は約 4km×4km である。神通川の破堤場所の位置座標は東経 136.14 度、北緯 35.97 度である。鯖江市西部の浸水被害エリア面積=105.7ha (=立待地区 73.1ha+吉川地区 27.7ha+豊地区 4.9ha) である⁽⁴⁾。Fig.11 の図中の①は主に和田川と石田川の越水による浸水被害エリア、②は主に論手川の越水による浸水被害エリア、③は主に神通川の破堤による濁流の流れ込みによる浸水被害エリアである。但し、水色の浸水被害エリアは冠水エリアの一部である。冠水エリアは、福井新聞動画ニュース⁽¹²⁾を見ても分かるように、Fig.11 で言うと、南北では日野川の吉川橋（よしかわばし）あたりから北側の範囲で、西側の和田川と東側の日野川で囲まれた範囲の田畑のほとんどと道路の一部である。鯖江市報告書⁽⁴⁾では、冠水したが、水が引いた後に被害が残らなかった場所は、浸水被害エリアと認識していない。なお、日野川には、浅水川、天王川、和田川、石田川が合流する。和田川には、神通川と論手川が合流する。

Table 2 に、Fig.13～Fig.15 の写真の説明に必要な川の川幅（通常時の流水の幅、越水時の川幅となる堤防上端の間の幅）を示す。

Fig.12 は、Fig.11 の①の場所の浸水状況を示している。これは「YouTube 福井新聞動画ニュース—台風 21 号堤防決壊、住宅全壊も (2017/10/23)」⁽¹²⁾をキャプチャしたもので、ドローンにより北方向を見て、天王川、和田川、石田川が日野川へ合流する場所付近の鯖江市石田下町の田の冠水の様子を撮影したものである。全ての川が増水しているため、降水および和田川と石田川の越水により田畑にたまった泥水は排水しにくくなっている。また、Fig.12 の上側（北側）には、越前町乙坂付近の田の冠水や福井市坪谷町付近の田の冠水も写っている。

Fig.13 は、Fig.11 の②の場所の浸水状況を示している。Fig.13(c)は 2021 年 5 月 8 日に論手川の下流方向（北方向）を撮影したもので、Fig.13(a),(b)に示すように 2017 年 10 月 23 日には、この橋から 150 m 下流の和田川合流地点近くまで、兩岸で泥水が越水した。Fig.13(a)は橋から北西方向（川去町）を撮影したもので、論手川左岸の越

水の様子（濁流が西側に激しい勢いで流れ出ている）を示している。Fig.13(b)は橋から北東方向（石田下町）を撮影したもので、右岸からの越水により冠水した田に、稲刈取り後のわらくず（褐色）が浮いている。

なお、10月23日6時30分頃に、この橋から北東280m地点の道路を北進中の鯖江市のコミュニティバスが越水による泥水の流れに押されて道路の右側（東側）に脱輪した。バスは始発の神明駅に向かう途中で乗客はおらず、男性運転手にけがはなかったとのことである。脱輪の様子の写真は10月24日の中日新聞福井版⁽¹³⁾に掲載されている。



Fig.13 (a),(b) Flooding of Ronde river (Oct.23, 2017)⁽⁴⁾, and (c) Ronde river at normal times (May 8, 2021).

Fig.14は、Fig.11の③の場所の浸水状況を示している。鯖江市川去町の神通川の右岸堤防（田からの高さ約3m）が10月23日5時30分頃に長さ約15mにわたり破堤（決壊）した。Fig.14(a)の撮影時刻は報告書⁽⁴⁾には記載されていないが、7時頃と推定される。破堤部より、濁流が東方向（川去町）に激しい勢いで流れ出ている。10時30分頃より建設業者が決壊部に土嚢を積み仮復旧作業を行った。Fig.14(b)は破堤から約1年後の2018年11月24日に現地調査を行った時の写真で、東方向を撮影している。復旧された堤防の川側の下部はコンクリートブロックで覆われ、上部および田側は土で構成されている。Fig.14(c)は堤防の上から北方向を撮影したもので、堤防の上部の幅は約1mで下部の幅は約10mであった。



Fig.14 (a) Breach of Jinzuu river (Oct. 23, 2017)⁽⁴⁾, and (b),(c) the restored embankment of Jinzuu river (Nov. 24, 2018).

Fig.15は、Fig.11の③の場所の浸水状況を示している。Fig.15(a)は2017年10月23日の神通川の八幡社橋（はちまんやしろばし）より北方向を撮影しており、増水した神通川の水面の高さと右側の田の冠水面の高さがほぼ同じである。破堤場所はこの橋から約100m下流（北）の地点であるので、田の泥水のほとんどは破堤箇所からの神通川の川水の流れ込みによるものである。Fig.15(b)は(a)とほぼ同じ位置から2018年11月25日に撮影したもので、神通川の流水の幅は約3.5mとなっており、穏やかな流れである。

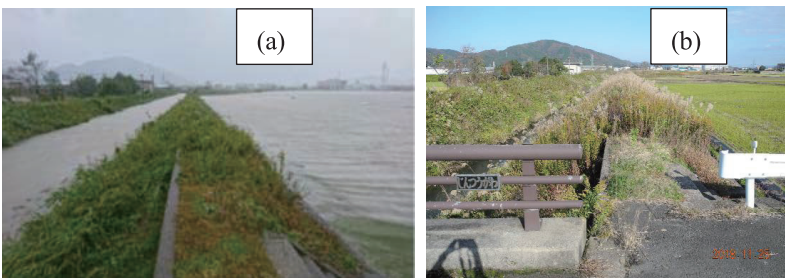


Fig.15 (a) Jinzuu river and flooding of rice fields (Oct. 23, 2017)⁽⁴⁾, and (b) Jinzuu river at normal times (Nov. 25, 2018).

Fig.16の写真は、10月23日の論手川越水から3日後の写真で、Fig.13の越水場所から東へ180mの地点（石田下町）で、車内より北北西方向（石田下町）を撮影したものである。手前側には、10月23日の論手川越水の泥水が、ハナエチゼンとコシヒカリの刈取り後にひこばえが生えていた田に流れ込み、稲刈取りのわらくず（黄色）

（Fig.13(b)参照）が流されてたまっている。奥側には、ひこばえ（黄緑色）が残っている。ひこばえの所はNDVI値が高いが、わらくずの所はNDVI値が低い。なお、ハナエチゼンは8月20日頃に刈取り、コシヒカ리는9月2日頃に刈取るので、10月20日頃にはひこばえが生えていたのである。



Fig.16 Straw wastes were accumulated on the front side of rice field and rice shoots grew on the back side (Oct. 26, 2017).

4. ASTER と Sentinel-2 衛星画像を用いた 2017 年 10 月鯖江市水害の解析

水害のあった10月23日にできるだけ近く、また無料で解像度の高い水害前と水害後の衛星データを捜した。水害前では2017年10月11日のASTERデータ、水害後では2017年11月2日のSentinel-2データがあった。ASTERのデータは、産業技術総合研究所の衛星画像検索サイト「LandBrowser」⁽¹⁴⁾から検索およびダウンロードした。Sentinel-2のデータは、「Copernicus Open Access Hub」という衛星画像検索サイト⁽¹⁵⁾から検索およびダウンロードした。ほかに2017年7月20日のSentinel-2データ、2018年6月24日のAsterデータも入手した。

前章で述べたように、10月20日頃には、稲はすべて刈取られているが、田には稲のひこばえが生えているのでNDVI値がある程度高いことが期待でき、水害後の被害場所では、わらくずのかぶさり（実例としてFig.13(b), Fig.16参照）、植物（ひこばえや雑草）への泥の付着、流水による植物の流れ去りなどにより、NDVI値が下がることを期待できる。従って、NDVI差画像を使えば被害検出ができる。

$$\text{NDVI 差} = \text{水害前 NDVI} - \text{水害後 NDVI} \quad (3)$$

とすれば、NDVI差の値がプラスの場所が被害場所と判定できる。

（注意）水害のあった10月23日より1ヶ月以上前の衛星データだと稲刈り前の田が存在したり、1ヶ月以上後の衛星データだと田に生えているひこばえや雑草が成長してしまうので、NDVI差画像での被害検出には使えない。

ところで、Sentinel-2の青バンド（B2）、緑バンド（B3）、赤バンド（B4）、近赤外バンド（B8）は解像度10mであり、ASTERには青バンドがなく、緑バンド（B1）、赤バンド（B2）、近赤外バンド（B3）は解像度15mである。ASTERだけの画像処理やSentinel-2だけの画像処理では何も問題なく処理できるのであるが、ASTERとSentinel-2の画像を組み合わせる場合には、ピクセルの大きさを合わせてから画像処理する必要がある。そこで、10mと15mの最大公約数である5mを1ピクセルとするASTERおよびSentinel-2のGeoTif画像をER Mapperの機能を用いて作成してから、ER Mapperで

$$\text{NDVI 差} = \text{ASTER の 2017 年 10 月 11 日の NDVI} - \text{Sentinel-2 の 2017 年 11 月 2 日の NDVI} \quad (4)$$

の画像を作成した。

但し、10月11日のASTER画像では、Fig.17の黒の曲線より上側に相当する所に薄い雲が存在するため、薄い雲がある場所のNDVI値は、雲がない場合に比べNDVI値が下がる。（補足説明3参照）

（補足説明3）NDVI（Normalized Difference Vegetation Index, 正規化植生指数）は、IRを近赤外域バンドの反射率、Rを可視域赤バンドの反射率として、 $\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})$ で定義されている。雲がない時、生きた植物ではIR大、R小でNDVIは0~+1、枯れた植物ではIR小、R大で-1~0の値を取る。植物でないコンクリートなどではNDVIは0付近の値となる。薄い雲がある時、生きた植物では雲がない時に比べ、IRが少し小さくなり（薄い雲で地上からの近赤外線が弱まるため）、Rが少し大きくなる（薄い雲は色が白っぽいため；白=R,G,Bの合成）ため、NDVIが0~+1の間で小さくなる。枯れた植物でも雲がない時に比べ、IRがより小さくなり、Rが

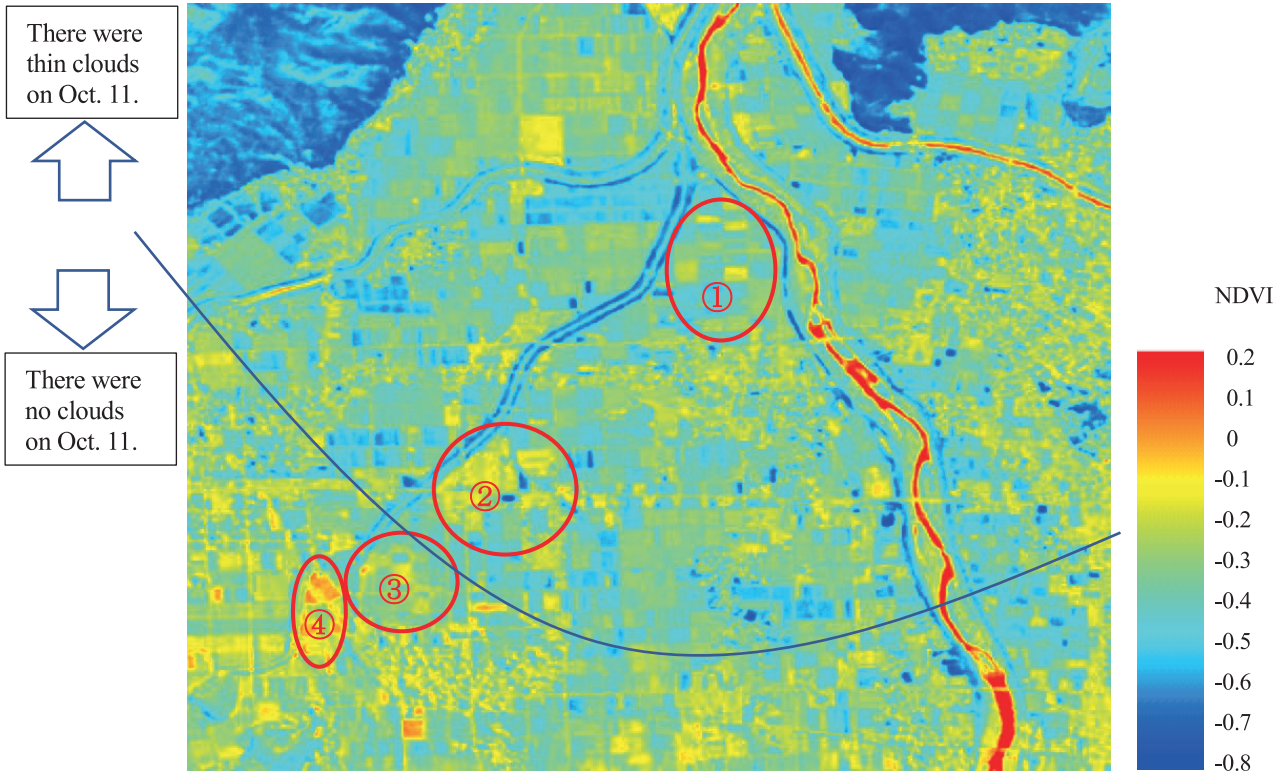


Fig.17 NDVI-difference image (NDVI of ASTER on Oct. 11 — NDVI of Sentinel-2 on Nov. 2).

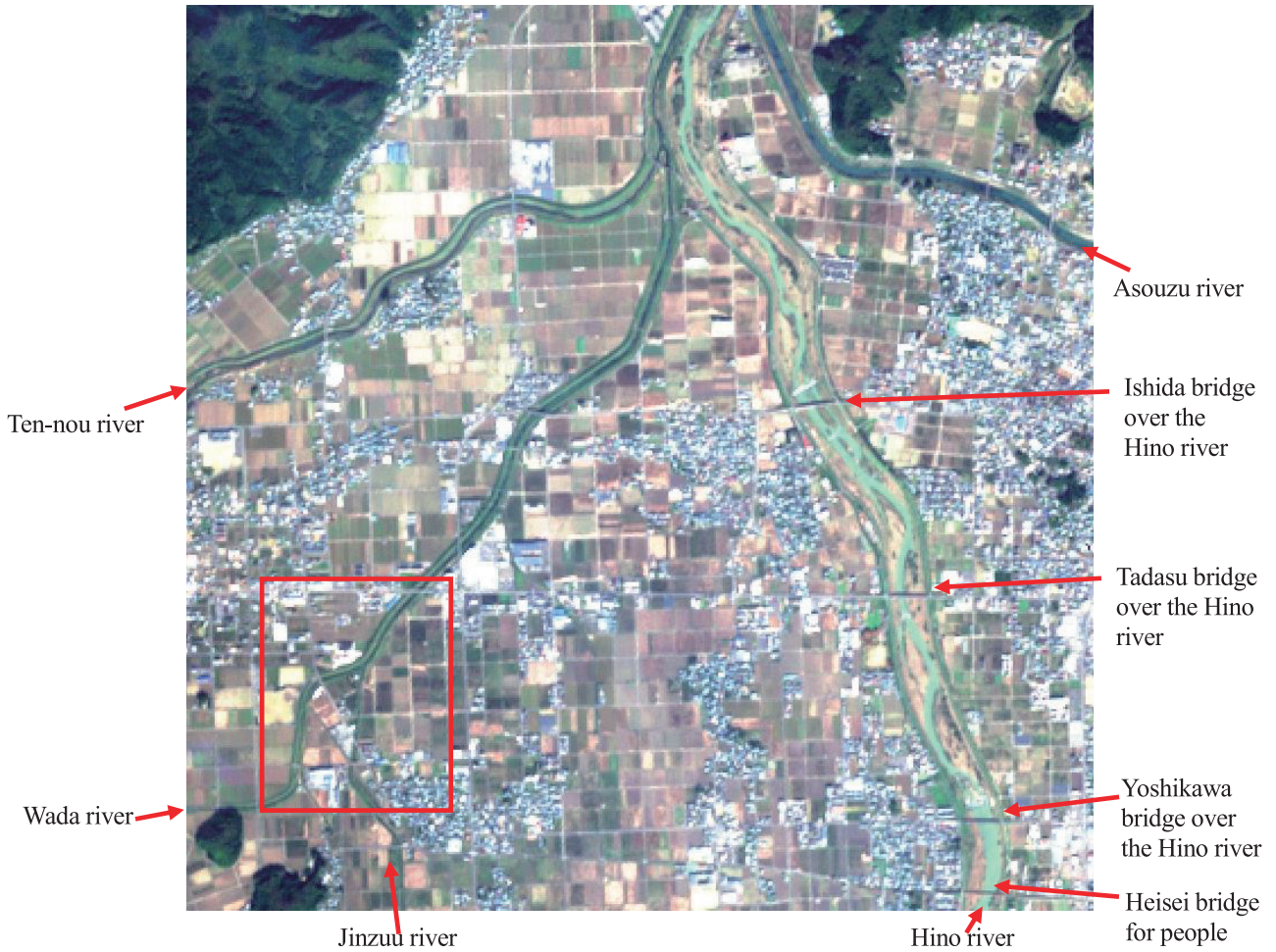


Fig.18 True-color image of Sentinel-2 at 10:38 on Nov. 2, 2017 (4km×4km).

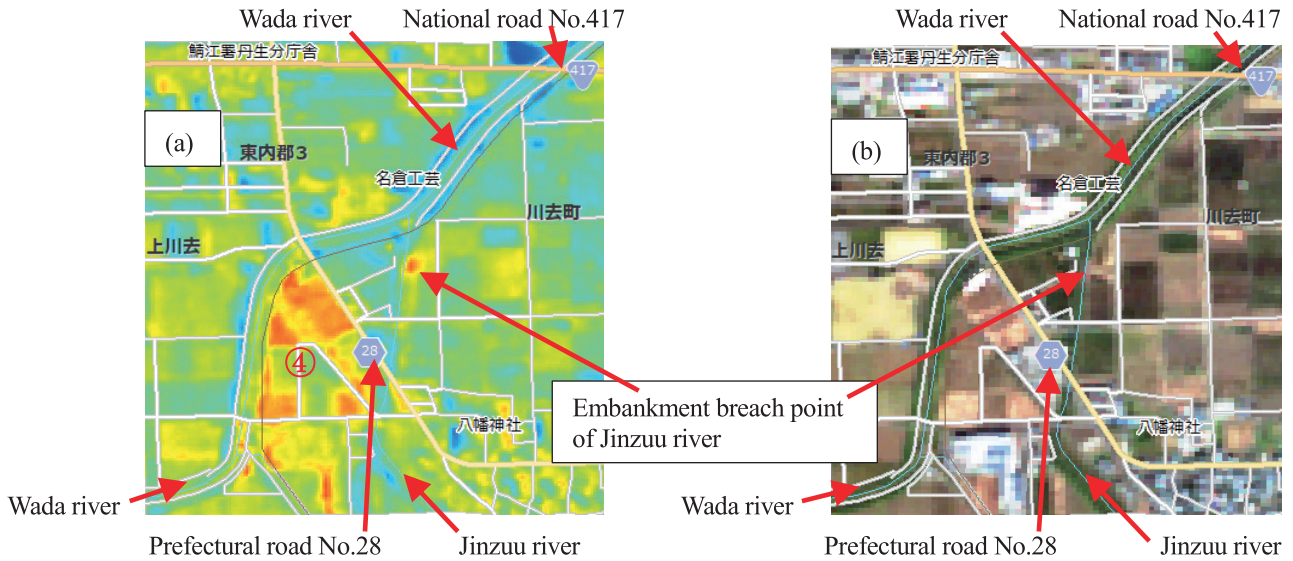


Fig.19 (a) Enlarged image of Fig.17, and (b) Enlarged image of Fig.18 with map using ArcGIS (Width 800 m, Height 1000 m). The embankment breach point is located at 136.14°E, 35.97°N.

より大きくなるため、NDVIが-1~0の間で、よりマイナス側になる。10月11日の薄い雲がある所では雲がない所に比べNDVIが少しマイナス側に動くので、11月2日（雲がない）のNDVIで引き算すると、式(4)のNDVI差では、10月11日の薄い雲があった所は、雲がない所に比べ、少しマイナス側に動くのである。

従って Fig.17（表示範囲は Fig.11 に合わせてある）の NDVI 差画像では、カラーバーを通常の 0 を中心とした範囲ではなく、-0.3 を中心とした -0.8 から +0.2 の範囲に設定した。被害のあった場所は、10月11日の薄い雲があった所では黄色～赤色（NDVI 差 > -0.2）の所であり、雲がなかった所では橙色～赤色（NDVI 差 > 0）の所である。赤丸の①，②，③の所が、Fig.11 の水害の場所①，②，③にほぼ一致している。従って、NDVI 差画像は水害の場所の検出に有用であると言える。

参考のために、災害後の雲のない 2017 年 11 月 2 日の Sentinel-2 の トルーカラー画像を Fig.18 に示す。 トルーカラー画像と NDVI 差画像を比較して見ると被害場所がより分かり易い。 Fig.18 の赤線四角の所が神通川の破堤した所であるので、この部分を拡大した NDVI 差画像と トルーカラー画像を Fig.19 (a), (b) に示す。 Fig.19(b) の トルーカラー画像では神通川右岸の破堤した堤防部分を土囊で仮復旧してあるので、その所は草がなく茶色になっている。それに続く右側の田には仮復旧工事のための道路部が黄色～茶色になっている。 Fig.19(a) の NDVI 差画像では、破堤部は土囊の仮復旧で草がなく、赤から橙色で表示され、その周りの堤防も草はあるが越水の影響で雑草がダメージを受けたらしく、黄色で表示されている。また、その右側の田も橙色～黄色で表示されている。 Fig.19(a) の④の場所（県道 28 号線と和田川にはさまれた田が橙～赤色になっているので、水害の時にわらくずが大量にかぶさったか、泥が稲のひこばえに強く付着したのだらうと推定できる。但し、鯖江市報告書⁴⁾では浸水被害エリアとは見なしていない。

Fig.17, 18, 19 で和田川より左側は越前町であり鯖江市でないので、本章では被害場所の検討対象外とした。

5. 結 論

第 2 章では、Terra/Aqua 衛星 MODIS データを使い、Band31 温度画像を作成し、台風雲の最低温度（台風雲の最高高度の場所に対応する）と台風の近くの地上（海）の表面温度を計測し、それらの温度差を 6.5 で割ることにより、簡易的に雲頂高度を求め、台風を中心気圧と合わせてグラフ化した。雲頂高度が高いほど台風の勢力が強い傾向があるため、台風の盛衰が分かる。

第 3 章では、鯖江市報告書⁴⁾の 2017 年 10 月 23 日の水害時の写真と、筆者の 2017 年、2018 年、2021 年の現地調査により、10 月 23 日に起きていた水害の状況を説明した。これにより、次章の衛星画像による被害検出場所の実際の様子が分かる。

第4章では、水害の被害場所の検出をNDVI差画像を用いて行った。使った衛星画像がASTER（解像度15m）とSentinel-2（解像度10m）であるため、一度、共通の1ピクセル5mのGeoTifデータに直してから、NDVI差の処理を行う必要があることを述べた。Fig.17で被害のあった場所は、10月11日の薄い雲があった所では黄色～赤色（NDVI差 >-0.2 ）の所であり、雲がなかった所では橙色～赤色（NDVI差 >0 ）の所であることを述べた。NDVI差画像により、鯖江市報告書に記載されていた被害場所とほぼ同じ場所を検出できた。

謝 辞

鯖江市報告書⁽⁴⁾に載っている図および写真の使用をご許可いただいた鯖江市に感謝する。また、ASTERの衛星データを無償ダウンロードさせていただいた産業総合研究所⁽¹⁴⁾、Sentinel-2の衛星データを無償ダウンロードさせていただいたESA⁽¹⁵⁾に感謝する。

ASTER imagery courtesy: NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan ASTER Science Team.

The Copernicus Open Access Hub provides complete, free and open access to Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 and Sentinel-5P user products.

参考文献

- (1) 福井地方気象台，“平成29年台風第21号に関する福井県気象速報”，（2017年10月25日発行），http://www.jma-net.go.jp/fukui/shosai/PDF_news/sokuhou/typhoon2017No21.pdf（参照日2021年4月5日）。
- (2) 気象庁，“災害時気象報告 平成29年台風第21号及び前線による10月20日から10月23日にかけての大雨及び暴風等”，（2018年3月30日発行），https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2017/saigaiji_201803.pdf（参照日2021年4月5日）。
- (3) 国土交通省 近畿地方整備局 河川部，“台風21号と前線による大雨の概要 [平成29年10月20日～23日] <第6報>”，（2018年1月29日発行），<https://www.kkr.mlit.go.jp/river/bousai/ol9a8v000000ehgw-att/a1517272445083.pdf>（参照日2021年4月5日）。
- (4) 鯖江市，“平成29年10月22日、23日 台風21号に関する災害の記録”（2018年5月28日公開），https://www.city.sabae.fukui.jp/anzen_anshin/bosai/oshirase/saigainokiroku_taihu.files/taihu21.pdf（参照日2021年4月5日）。
- (5) 加藤芳信，“リモートセンシングによる福井豪雨とその災害状況把握の可能性 一初期検討結果一”，福井工業大学研究紀要，Vol.36,(2006), pp.229-236.
- (6) Y. Kato, “Possibility of descriptions of Fukui heavy rainfall and resulted disasters by using remote sensing”, Proc. of SPIE, Vol.6412, (2007), pp.641212-1-641212-10.
- (7) NHK 放送文化研究所, NHK 気象・災害ハンドブック, (2005), p.173, p.74, p.70, 日本放送出版協会.
- (8) 気象庁，“日別海面水温（日本近海）”，https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/sst_HQ.html（参照日2017年11月1日）。
- (9) 藤井健, 光田寧, “北西太平洋における海面水温と台風の発達の間関係”, 京都大学防災研究所年報, Vol.36 B-1, (1993), pp.27-36, <https://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no36/36b1/a36b1p03.pdf>（参照日2021年4月5日）。
- (10) 松井隆, 森山雅雄, “AIRS データに基づいた MODIS 地表面温度・放射率”, 写真測量とリモートセンシング, Vol.48, No.3, (2009), pp.195-208, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsprs/48/3/48_3_195/_pdf（参照日2021年4月5日）。
- (11) 気象庁，“過去の気象データ検索”，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>（参照日2021年4月5日）。
- (12) YouTube 福井新聞動画ニュース, “【台風21号】堤防決壊, 住宅全壊も (2017/10/23)”, <https://www.youtube.com/watch?v=ids-UVFfJPc>（参照日2021年4月5日）。
- (13) 中日新聞（2017年10月24日, 福井版）, “北陸線運転見合わせ 台風被害, 湯尾では線路に土砂”, <http://www.chunichi.co.jp/article/fukui/20171024/CK2017102402000021.html>（参照日2017年11月1日）。
- (14) 産業技術総合研究所, “LandBrowser”, <https://landbrowser.airc.aist.go.jp/landbrowser/>（参照日2021年4月5日）。
- (15) ESA (European Space Agency), “Copernicus Open Access Hub”, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>（参照日2021年4月5日）。

(2021年9月13日受理)