

VIIRS 夜間光画像に基づく災害からの復興過程の地域性把握

羽鳥航平*・井上亮**

Understanding the regional characteristics of the recovery process from disasters based on VIIRS nighttime light images

Kohei Hatori*, Ryo Inoue**

To make region-specific reconstruction plans for flood affected regions, it is necessary to understand their regional characteristics that might influence their recovery processes. However, since it is difficult to analyze what have influenced the recovery processes from previous flood damages because of lack of data for the analyses of regional comparison, we do not have enough knowledge about the regional disparities in the recovery processes. We propose a method to grasp the regional characteristics of the recovery processes from flood damages by using “VIIRS night light images”. The dataset is said to be able to observe the monthly changes in human activities at high spatial resolution all over the world. We applied it to the flood damage that had occurred in recent years. The results indicated the possibility of the proposed approach to grasp the reduction of human activity due to the occurrence of flood and the recovery rates of human activity after the occurrence of flood.

Keywords: 夜間光画像 (nighttime light), 水害 (flood damage), 復興過程 (recovery process), 地域間比較 (regional comparison)

1. はじめに

近年、大規模な自然災害やそれに伴う被害が世界各国で多数発生しており、将来的にもさらに増加すると言われている。また、過去 20 年間で発生した自然災害のうち、最も影響を及ぼしている災害は「洪水」であるとする報告もあり (田代, 2017), 地球温暖化に伴う将来的な降水量の増加も想定されることから、特に水害による甚大な被害が懸念されている。

自然災害は避けられないものとして、災害からの回復力の向上や、復興の効率化を目指した取り組みが世界的に進んでいる。2015 年に採択された「仙台防災枠組」では、災害からの復興を契機と捉え、災害に対してより強靱な地域づくりを行うという「より良い復興: Build Back Better」が提言された。災害大国である日本においては、「より良い復興」の考え方が古くから実践されており、フィリピンにおける台風ハイエンからの復興支援など、日本の「より良い復興」を世界に広める取り組みが行われている。

しかし、復興過程や災害からの回復力には地域差が存在することが指摘されており (Fussell et al., 2010), 今後より良い復興を様々な地域で実行するためには、過去の被災事例における復興過程の地域差を把握し、各地域に合わせた復興政策を立案する必要がある。

これまで、被災地域の社会経済活動を記録した統

計データを用いて、復興過程や災害からの回復力を定量化する研究が行われてきており、復興過程における地域差の存在が抽出され、その様々な要因が指摘されてきた (例えば, 近藤, 2009)。この復興過程の把握には、時空間的に詳細なデータが必要となるが、特に被災地域では、人間活動や経済状況を記録した十分なデータが入手できないことが多く、分析には限界がある。また、既往研究の多くは「特定の災害」による被災地域の復興過程に着目した分析であり、研究で得られた復興過程に関する知見はあくまでその地域特有のものである場合も多く、広範囲で共通の一般化された知見の獲得には至っていない。その理由として、広範囲、複数地域にわたり共通して入手できる「地域の社会経済活動を示すデータ」が少ないことが挙げられる。国や地域によりそのデータの種類、時空間の解像度、精度などが異なるため、国を超えた比較が難しい。

ところで、近年、「社会経済活動を示す代理変数」として「夜間光画像」への注目が高まっている。夜間光画像は、人工衛星が夜間帯の地球を撮影した全球で入手できる画像データであり、1992 年から 2013 年においては 1 年ごと、2012 年以降では 1 か月ごとの夜間光画像がインターネット上で無償公開されている。この夜間光画像の光度は地域の社会経済活動と相関を持つことが明らかになっており

* 学生会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 E-mail:kouhei.hatori.s6@dc.tohoku.ac.jp

** 正会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (Tohoku University)

(Henderson et al., 2012), また全球で共通して入手できるという強みを活かし、全世界的な分析や国間比較を行った研究が進んでいる (例えば, Zhou et al., 2019). また, 夜間光画像は被災地域においても入手でき, 災害前後で共通のデータが手に入ることから, 災害からの回復力や災害前後における人間活動が行われる範囲の変化など, 夜間光を用いて災害に関する様々な知見の獲得を目指した研究も進んでいる (例えば, Qiang et al., 2020).

しかしこれらの既往研究は, 光度の感知能力やその数値化に関する問題点が指摘されている DMSP 夜間光画像を用いており, その分析結果には限界があることが指摘されている (Elvidge et al., 2013). 現在は光度感知性能が向上し, 時空間解像度が向上した VIIRS 夜間光画像の公開が進んでいる. 被災地域における VIIRS 画像の被災前後の光度変化を分析し, 複数地域で地域間比較を行うことで, これまで以上に詳細な「復興過程の地域差の把握」が期待できる.

そこで本研究は, 近年発生した水害の被災地域を対象に, VIIRS 画像の夜間光光度の変化を用いて災害からの復興の様子を定量化する分析を行い, 夜間光画像を用いた分析手法の復興過程の特徴把握に対する有効性について考案する.

2. 既往研究と本研究の着眼点

本章では, まず復興過程や災害からの回復力の地域差に着目した既往研究を整理し, 次に夜間光を用いて災害後の地域経済状況の変化などを分析した研究をまとめる. 最後に, これらの既往研究を踏まえ, 本研究の着眼点と特徴を述べる.

2.1 復興過程や回復力の地域差に着目した既往研究

復興過程や災害からのレジリエンスなどの地域差やその原因の把握を目指した研究では, 地域の回復力には地域差が存在し, その原因は多様であることが指摘されている.

Cutter et al. (2014) は, 国税調査等の統計データを用いて, アメリカ国内のすべての郡を対象にレジリエンス力を定量化し, 比較を行った. その結果, 北東部では特にレジリエンス力が高い一方, 西部では低いことが明らかになり, またレジリエンスが高い郡は, 水害保険への加入率や, 防災事業への一人当たり投資額など, 各群の災害への備えの充実を示すスコアが高いことが明らかになった.

近藤 (2009) は, 2005 年にアメリカで発生したハリケーン・カトリーナ被災後のニューオーリンズ市内 13 地区について, 復興状況の地域差の把握を目指し, 住宅世帯数回復率や被災後居住選択率を地区ごとに比較した. その結果, 大きな住宅被害を受けた地区ほど, 世帯数の回復が遅れ, また従前居住地での選択をやめて移転していることが明らかになった.

Ngo (2001) は, 災害時の高齢者の反応に関する多数の文献を検討した結果, 高齢者は災害時の社会脆弱性が高いことを明らかにした. また, Cutter et al. (2003) は, 高齢化率と社会脆弱性の関係性を分析し, 地域コミュニティの高齢化率が高いほど地域の脆弱性が高まると指摘している.

このように, 災害からの復興過程や回復力には地域性が存在し, 地域の防災事業への取り組みや災害の規模, 地域の高齢化率などに起因することなどが明らかになっている.

しかし, このような復興過程の把握には, 時空間的に詳細なデータが必要となるが, 特に被災地域では, 人間活動や経済状況を記録した十分なデータが入手できないことが多い. また, 調査を行ってデータを収集することは労力が大きく, 特定の災害によって被災した特定の地域に絞った復興過程研究を行わざるを得ない. 結果として, 研究から得られた復興過程に関する知見はあくまでその地域特有のものである場合も多く, 広範囲で共通の一般化された知見の獲得には至っていない.

その知見を得る一つの方法として, 「広範囲にわたり共通で入手できる地域の社会経済活動を示すデータ」を用いた分析が挙げられるが, 国や地域によりそのデータの種類, 時空間的単位, 精度などが異なるため, 国を超えた比較が難しいという限界がある.

2.2 夜間光画像を用いて災害後の社会経済活動の変化等を分析した既往研究

近年, 観測センサーの性能向上やデータ公開の進展に伴い, 人工衛星などが取得したリモートセンシングデータの様々な分野への活用が急速に広まっている. その中で, 世界各国で共通のデータが入手でき, 地域の社会経済活動を示すデータとして注目が高まっているデータが, 夜間光画像である.

Henderson et al. (2012) は, 1992 年から 2008 年における世界各国の GDP 成長率と夜間光光度の変化率との間に強い相関関係があることを明らかにし, 夜間光画像を用いた研究への注目を高める契機となった. この他にも, 夜間光を用いた都市域 (Imhoff et al., 1997), 経済活動 (Doll et al., 2006), 人口動態 (Zhuo et al., 2009) の把握を目指した研究など, 夜間光を人間の社会経済活動を示すデータとして活用した分析が多数行われている. また全球で共通して入手できるという夜間光データの強みを活かし, 全世界的な分析や分析結果の国間比較を行った研究が進んでいる (例えば, Zhou et al., 2019).

近年, 夜間光画像が地域の社会経済活動の活発さと相関を持つこと, そして, 被災地域においても安定したデータが入手でき, また災害前後で共通のデータが手に入ることを利用し, 夜間光画像の分析を通し, 被災地域の社会経済活動の変化の把握・考察を目指した研究が行われている.

Gillespie et al. (2014) は、2004 年のスマトラ島地震の被災地の夜間光光度の変化を分析し、被災直後の 2005 年は津波の影響で明るさの値が大きく低下したが、翌年の 2006 年にはすべての被害地域で津波前の明るさの値が戻ったことを明らかにした。

Kocornik-Mina et al. (2015) は、社会経済活動が行われる地域と水害リスクが高い地域の関係性や水害前後におけるその変化の把握を目指し、2003 年から 2008 年に水害被害を受けた世界各国の都市を対象に、夜間光光度の水害前後における変化を分析した。その結果、低標高地点など水害リスクが高い地域に光度が明るい地点が集中していること、水害が発生した年は被災した都市の夜間光光度が 2%ほど有意に減少するが、翌年以降はその減少が見られなくなることを明らかにし、水害リスクが高い地域に人々が集中していることや、水害後一時的に人々の活動は縮小するが、すぐに回復することなどを指摘した。

Mård et al. (2018) は、人間活動が行われる地域の河川への近接性について、水害前後の変化の把握を目指し、1992 年から 2013 年に甚大な水害被害を受けた 16 か国を対象に、夜間光光度が集中している地域の河川からの距離の変化を分析した。その結果、死者数が多い水害が発生した国ほど水害後に河川から離れる傾向にあること、また水害への防御レベル指標である FLOPROS が低い国では水害後に河川から離れた地域に移動し、逆に FLOPROS が高い国は水害後も近接性が変化しないことなどを明らかにし、被害の大きさや防御レベルによって河川への近接性に変化が生じることを明らかにした。

Qiang et al. (2020) は地域の経済損失や災害からのレジリエンス力の把握・地域間比較を目的に、ハリケーン・カトリーナの被害を受けた地域を対象に、夜間光画像を用いて経済データを補填し、各郡の経済損失や災害後のレジリエンス力を定量化する分析を行った。その結果、ハリケーン上陸地付近など、被害が大きい郡ほど経済的損失が大きく推定されること、また、子供や高齢者が多い郡ではレジリエンス力が低く推計されることなど、社会構造によってレジリエンスに差が生じることを明らかにした。

このように、夜間光画像を社会経済活動の代理変数として分析する研究が進んでおり、災害後における社会経済活動の変化の把握への応用が進んでいる。

2.3 本研究の着眼点

上述のように、夜間光画像を用いると、経済状況などのデータの入手が難しい被災地における社会経済活動の変化を把握でき、また、異なる地域・国間で分析結果を比較することが容易になる。しかし、これらの既往研究で使用されている DMSP 衛星画像は、夜間光光度に上限値が設けられており、明るい都市域などでは実際の明るさを評価した分析ができない。一方で、近年公開が進む VIIRS 衛星画像は光

度に上限値が設定されておらず、また低輝度・高輝度の両方で感知能力が向上している (Elvidge et al., 2013)。また DMSP では入手できる画像は 1 年ごとの平均光度画像、解像度は 30 秒角（赤道付近で約 900m 四方）であるのに対し、VIIRS では 1 ヶ月ごとの平均光度画像、解像度は 15 秒角（赤道付近で約 500m 四方）で公開されており、時空間共に詳細なデータを用いた分析が可能である。しかし VIIRS 画像公開が進んだのは近年であり、まだ分析への活用例は少ない。

VIIRS 画像を活用すると、災害からの復興過程を時空間的により詳細に分析し、その結果に基づく地域間比較に活用することが期待される。そこで本研究は、VIIRS 夜間光画像の光度変化に着目して災害からの復興過程を定量化する手法を構築し、近年発生した水害分析に対して適用し、その結果に基づく地域間比較分析が可能か、その可能性を考察する。

3. 夜間光画像を用いた分析手法の構築

本章では、まず分析に使用する夜間光データおよび水害データについてまとめ、それらを用いて構築する分析手法を説明する。

3.1 使用データ

1) 夜間光画像

2012 年 4 月から 2020 年 12 月までに収集された、VIIRS 夜間光画像の月間画像データである“Monthly Cloud-free DNB Composite” (The Earth Observations Group, 2020) を使用した。VIIRS 画像は、地上夜間光の放射輝度 ($W/cm^2/sr$) を月単位で平均し、15 秒角（赤道付近で地上の 500m 四方に相当）の解像度で記録する。この画像データには迷光による影響を除いたものとその影響を含むものの 2 種類が存在するが、本研究の分析期間全てで入手できるのは後者のみであるため、本研究では後者を利用する。

2) 水害データ

各水害の浸水範囲を示すデータとして、DFO Flood Maps (Brakenridge, 2021) を用いる。DFO flood Maps は、Dartmouth Flood Observatory が人工衛星画像を元に作成した地図であり、DFO の Web サイトから無償で提供されている。なお、本研究の分析期間である 2012 年 4 月以降、85 の水害イベントに関するデータが整備されているが、必ずしもその全てのイベントで浸水範囲地図が入手できるわけではない。また、雲の影響などにより、浸水範囲の表現には限界がある点も指摘されている (Mård et al., 2018)。

3.2 分析手法

復興過程を考察するにあたり、本研究では、「 α . 水害発生月における人間活動の縮小」と「 β . 水害発生後の人間活動の回復率」という 2 つの観点に注目する。これらの定量化には、夜間光の「光度変化率」

に基づいた分析が有効であると考えられる。夜間光と経済状況の関係性を分析し、その分析結果が多くの支持を集めている既往研究 (Henderson, 2012) では、一定期間における夜間光の光度変化率と、地域の GDP 成長率に強い相関があることが指摘されている。また、夜間光画像の光度には地域性が存在することが指摘されているため (Levin, 2017), 仮に水害前後における光度の単純比較を行っても、その結果が必ずしも人間活動の変化を表すとは限らない。そのため本研究では、夜間光光度の変化率に着目し、上述の α , β の観点から復興過程の把握を目指す。

1) 水害毎の各月・浸水範囲内の平均光度算出

まず、本分析には不必要な「人間活動が行われていないセル」を各夜間光画像から除外する。夜間光画像には、光度が -1.5 と記録されている、人間活動のない地域が含まれている。人間の社会経済活動の復興過程に着目するため、各月の夜間光画像から、該当のセルを除外する。

次に、各水害浸水範囲内の各月平均光度を算出する。水害の浸水範囲と重なるセルを浸水セルとして抽出し、浸水セルの平均光度を算出する (図 1)。

2) 水害発生による光度減少と水害前後における夜間光光度変化率の推定

「 α . 水害発生月における人間活動の縮小」と「 β . 水害発生後の人間活動の回復率」を、水害発生月の夜間光光度の減少と、水害前後の夜間光光度変化率の変化を、回帰分析を用いて推計して評価する。

まず、水害前後の推定値を得るために、1) で抽出した各水害浸水範囲内の各月平均光度の値を、その水害発生前 (前群とする) と発生月以降 (後群とする) の 2 群に分類する。そしてそれぞれの群において、(1) 式で示すように、各月平均光度の値を水害発生月からの経過月数によって回帰分析を行う。

$$DN_{iL} = a_L + b_L i + \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 DN_{iL} は L 群における、対象水害の発生月から i 月後における月平均光度、 i は水害発生月を 0 とした時、その月が対象水害の発生から i 月後であることを表す数値である。また、 a_L , b_L は推計パラメータ

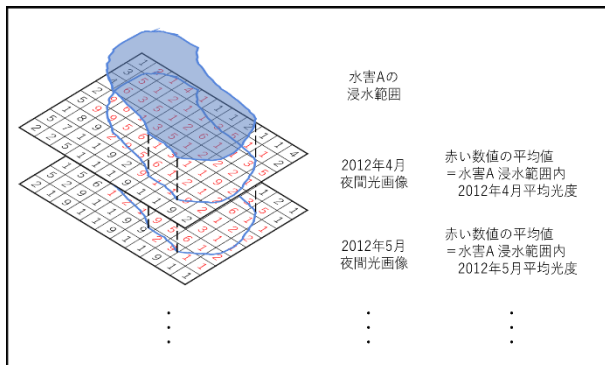


図 1 浸水セルの各月平均光度算出イメージ

である。この回帰分析を各水害イベントにおいて前群・後群それぞれで行い、 $a_{前}$, $a_{後}$, $b_{前}$, $b_{後}$ の 4 パラメータを推計する。これらのうち、 $a_{前}$ と $a_{後}$ は、それぞれ仮に水害が発生しなかった場合と実際に発生した場合の水害発生月における予測光度を表し、その差は「 α . 水害発生月における人間活動の縮小」に該当する。また、 $b_{前}$ と $b_{後}$ はそれぞれ水害発生前後の分析期間内における光度変化率を表し、その差は「 β . 水害発生後の人間活動の回復率」に該当する。

3) 水害発生前後におけるパラメータの有意差検定

2) で算出した各水害イベントにおける 4 つのパラメータについて、 $a_{前}$ と $a_{後}$, $b_{前}$ と $b_{後}$ のそれぞれに有意な差があるかを検定する。各水害イベントに対し、帰無仮説を「 $a_{前}$ と $a_{後}$ は等しい」、対立仮説を「 $a_{前}$ と $a_{後}$ は異なる」とし、有意差が認められた場合は、水害の発生によって人間活動が影響を受けたことが示唆される。 $b_{前}$ と $b_{後}$ についても同様の帰無仮説、対立仮説を立て、検定を行う。

本研究では、「分散が異なる二つの母集団から抽出した平均値」に差が存在するかを検定する手法である、ウェルチの t 検定を応用した検定を行う。水害発生前後の光度差を検定する場合、統計量 t は式 (2) で求められる。

$$t = \frac{a_{前} - a_{後}}{\sqrt{\frac{s_{a_{前}}^2}{N_{前}} + \frac{s_{a_{後}}^2}{N_{後}}}} \quad (2)$$

ここで、 $s_{a_{前}}^2$ と $s_{a_{後}}^2$ はそれぞれ $a_{前}$, $a_{後}$ の推定分散、 $N_{前}$ と $N_{後}$ はそれぞれの群に含まれる月の数を表す。また、この t 分布は式 (3) の自由度 ν に従う。

$$\nu = \frac{\left(\frac{s_{a_{前}}^2}{N_{前}} + \frac{s_{a_{後}}^2}{N_{後}}\right)^2}{\frac{s_{a_{前}}^4}{N_{前}^2(N_{前} - 2)} + \frac{s_{a_{後}}^4}{N_{後}^2(N_{後} - 2)}} \quad (3)$$

なお、 $b_{前}$, $b_{後}$ においても、統計量 t と自由度 ν は同様に求められる。

このようにして得られた統計量 t を用いて、各水害イベントに対し、水害発生月における予測光度の差、および光度変化率の差の有意検定を行う。そしてその差が有意か否か、またその差の正負によって、「 α . 水害発生月における人間活動の縮小」と、「 β . 水害発生後の人間活動の回復率」を考察する。

4. 分析

本章では、3. で構築した分析手法を近年発生した水害に適用し、提案分析手法の有効性を考察する。

4.1 分析対象

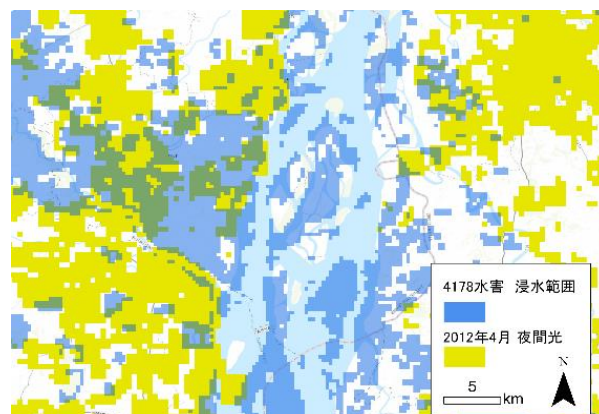
分析期間を、2021年7月現在で月平均 VIIRS 夜間光画像が入手できる、2012年4月から2020年12月までとする。

分析対象とする水害は、分析期間内に発生し、DFO マップで浸水範囲地図が入手できる、アジア諸国で発生した13の水害イベントとする(表1)。近年発生した大規模水害の多くはアジアで発生していると報告されている(Tellman et al., 2021) 一方、アジア地域には被災に関するデータの収集・公開が十分に進んでいない国も多く、その復興過程が明らかになっていない場合がある。そのため、近年水害が多発するアジア諸国を対象に夜間光を用いた分析を行うことで、複数の地域の分析結果の比較が可能になり、また統計データでは明らかになっていない、新たな知見の獲得が期待できる。なお、2019年以降に発生した水害は、水害後の期間が短く復興過程に関する十分な分析ができないと考えられるため、分析対象から除外した。

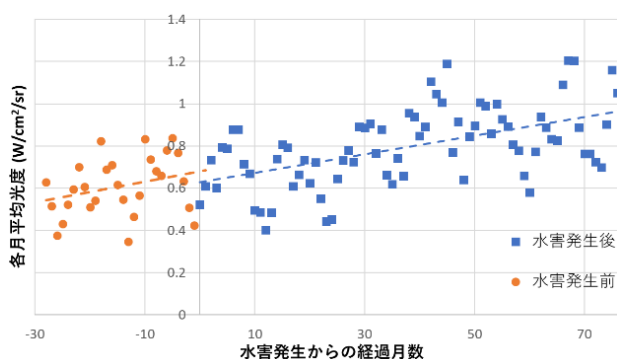
4.2 分析結果

各水害における4つの推計パラメータ、およびそれぞれの有意差検定の結果を表1に示す。また、dfo# 4178水害の浸水範囲と夜間光データ、および、それを用いた分析結果を図2に示す。

分析の結果、水害発生月における予測平均光度では12の水害イベントで、変化率では9つの水害イベントで有意差が確認された。またそれぞれのパラメータの差の正負は、水害により様々な結果が確認された。分析結果を地域間で比較するために、水害イベントを図3に示した6つのパターンに分類した。



(a) 浸水範囲と VIIRS 夜間光画像



(b) 水害前後の平均夜間光光度

図2 dfo# 4178水害の浸水範囲と VIIRS 夜間光画像、および、同水害の平均夜間光光度分析結果

表1 分析対象水害と分析結果

dfo# (DFO HP上における番号)	水害に関する情報				洪水発生月における予測平均光度			光度変化率			パターン
	発生国	発生日	死者数	避難者数	$a_{前}$	$a_{後}$	有意差	$b_{前}$	$b_{後}$	有意差	
4174	India	2014/8/14	0	10000	0.9071	0.8301	***	0.0031	0.0102	***	A
4178	Bangladesh	2014/8/20	17	500000	0.6796	0.6296	***	0.0049	0.0044		E
4179	Pakistan	2014/9/1	300	30000	1.1550	1.1256		0.0057	0.0063		G
4371	India	2016/6/29	30	1800	1.3708	0.9270	***	-0.0083	0.0001	***	A
4382	Bangladesh	2016/7/25	42	25000	0.6401	0.7076	***	0.0023	0.0042	***	C
4384	India	2016/7/15	127	377097	0.9483	0.9954	***	0.0040	0.0093	***	C
4410	Vietnam	2016/10/9	21	100000	1.6132	1.7309	***	0.0108	0.0057	***	D
4459	Bangladesh	2017/3/30	0	0	0.5001	0.7423	***	0.0029	-0.0005	***	D
4466	Bangladesh	2017/4/16	20	0	0.3306	0.4968	***	0.0008	0.0011		F
4474	Sri Lanka	2017/5/23	0	212	1.4382	1.3856	***	0.0046	0.0062	***	A
4507	India	2017/8/10	253	422106	0.8073	0.9045	***	0.0043	0.0047		F
4619	Sri Lanka	2018/5/20	8	0	0.8055	0.8537	***	0.0030	0.0090	***	C
4663	India	2018/8/7	20	1000	1.3464	1.2634	***	0.0065	0.0010	***	B

各水害の死者数、避難者数は DFO Flood Archive に基づく。また、有意差の欄における***は、有意水準5%以下で有意差が認められたことを表す。








パターン	予測光度の有意差	予測光度の差の正負	光度変化率の有意差	光度変化率の差の正負	イメージ
		$a_{後} - a_{前}$		$b_{後} - b_{前}$	
A	あり	負	あり	負	
B				正	
C				なし	
D		正	あり	負	
E				正	
F				なし	
G	なし	なし	なし		

図3 分析結果の分類手法

パターン A：水害発生月には光度が減少し、さらに水害後は水害前よりも光度変化率が減少する。この地域は、水害発生月には人間活動が縮小し、さらにその後も復興が十分には進まず、水害発生以前に比べ人間活動が不活発になった可能性が考えられる。

パターン B：水害発生月には光度が減少するが、水害後は水害前よりも光度変化率が上昇する。この地域は、水害発生月には人間活動が縮小するが、後に復興が進み、水害発生以前に比べ人間活動が活発になった可能性が考えられる。

パターン C：水害発生月には光度が減少するが、その後は水害発生以前の変化率を維持する。この地域は、水害発生月には一時的に人間活動が縮小するが、その後は水害発生以前の程度で人間活動が推移した可能性が考えられる。

パターン D：水害発生月には光度が上昇するが、水害後は水害前よりも光度変化率が減少する。この地域は、水害発生月には復興活動などにより一時的に人間活動が活発になるが、その後は水害発生以前に比べ人間活動が消極した可能性が考えられる。

パターン E：水害発生月には光度が減少するが、その後は水害発生以前の変化率を維持する。この地域は、水害発生月には一時的に人間活動が縮小するが、その後は水害発生以前の程度で人間活動が推移した可能性が考えられる。

パターン F：水害発生月には光度が上昇するが、その後は水害発生以前の変化率を維持する。この地域は、水害発生月には復興活動などにより一時的に人間活動が活発化するが、その後は水害発生以前の程度で人間活動が推移した可能性が考えられる。

パターン G：水害発生月でも有意な光度変化は無

く、その後も水害発生以前の変化率を維持する。この地域は、水害発生月でも人間活動には変化は無く、またその以降においても水害発生以前の程度で人間活動が推移した可能性が考えられる。

4.3 考察

本分析手法を近年の水害に適用した結果、予測光度の変化および変化率において水害発生における有意差を把握でき、またその差の正負を用いて、復興過程を複数パターンに分類することが可能となった。

まず、有意差の把握を通して、ある水害の発生における「 α . 水害発生月における人間活動の縮小」と「 β . 水害発生後の人間活動の回復率」の考察が可能になる。この α , β の観点は復興過程の把握において重要な指標となる一方で、特に被災地域ではこれらを検証できる十分なデータが入手できないことが多かった。しかし夜間光画像や本分析手法を用いることで、十分な統計データが手に入らない場合においても、これらの把握、考察が期待できる。また、復興過程のパターン分類を通して、今後、地域や水害による復興過程の地域間比較や地域差の考察が可能になると考えられる。本研究の分析を応用し、更に多くの水害イベントを対象にした分析や、他の統計データと組み合わせた分析を行うことで、特定災害を対象にした既往研究では把握できなかった、広範囲で共通する一般化された復興過程に関する知見の獲得が期待できる。このように、夜間光画像を用いた本分析手法により、十分な統計データの入手が困難な被災地域における復興過程の把握や、その地域間比較が可能になる。

しかし、研究を発展させるためには、解決すべき課題が存在する。

まず、夜間光画像の季節変動を有しており、その影響を除外する必要がある点である。既往研究でも指摘されているように、夜間光画像には季節性が存在し、実際に本分析においても季節による光度の違いが確認された（図4）。

次に、非浸水地域の光度変化の傾向を考慮できていない点である。本分析では浸水範囲にのみ着目し、その範囲内の光度変化を分析し、各水害イベントによって様々な変化が観測できることを明らかにした。しかし、仮に、その周辺地域や浸水範囲が含まれる都市圏全体など、周囲の非浸水範囲においても同様な光度変化が見られた場合、本分析で確認された光度変化は水害に起因する変化でない可能性が考えられる。そのため、水害による光度変化などを適切に把握するため、周囲の非浸水地域の光度変化の傾向などを考慮した分析手法を構築する必要がある。

このような課題点を有するものの、本分析手法を応用することにより、復興過程の地域性に関する新たな知見の獲得が期待できる。今後も更なる分析を行い、分析手法の確立および復興過程の地域性把握に取り組みたい。

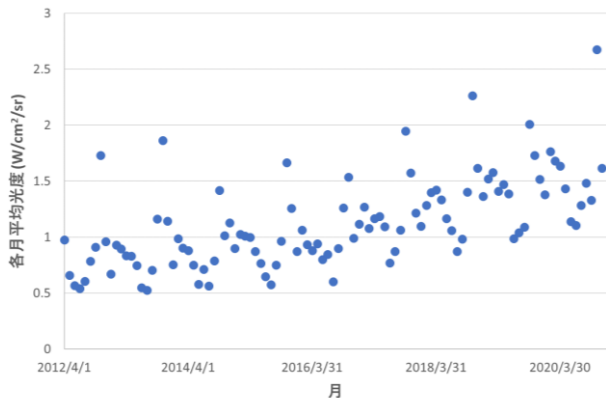


図4 dfo# 4178 水害の浸水範囲内各月平均光度で確認された季節性の例

6. 結論

本研究では、VIIRS 夜間光画像を用いた水害からの復興過程の地域性把握手法の構築と、近年発生した水害への適用を試みた。分析の結果、夜間光画像を用いて「水害発生月における人間活動の縮小」と、「水害発生後の人間活動の回復率」という2つの観定の定量化や、その水害前後における変化の把握、またそれらの違いにより水害イベントを複数パターンに分類することができた。本分析手法が有する課題を解決した上で、多数の水害を対象に分析を行うことで、水害からの復興過程の違いを生む要因について、より詳細な分析が可能になると期待される。

参考文献

近藤 民代, 2009. 米国ハリケーン・カトリーナ災害のニューオリンズ市における地区ごとの復興格差カトリーナ災害 3 年目の考察, 都市計画論文集, No. 44-3.

田代 邦幸, “過去 20 年間,世界で最も影響をおよぼしている自然災害は「水害」”. リスク対策.com. 2017.02.06.(<https://www.risktaisaku.com/articles/-/2355>, 最終閲覧 : 2021.08.30)

Brakenridge, G. R., 2021, “Global Active Archive of Large Flood Events.” Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado. (<http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>, 最終閲覧 : 2021.08.31)

Cutter, S. L., Boruff, B. J., and Shirley, W. L., 2003. Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, **84**(2):243–61.

Cutter, S.L., Ash, K.D., Emrich, C.T., 2014. The geographies of community disaster resilience. *Glob EnvironChange*, **29**:65–77.

Doll, C.N., Muller, H., and Morley, J.G., 2006. Mapping Regional Eco-nomic Activity from Night-Time Light Satellite Imagery. *Ecological Economics*, **57**(1): 75–92.

Elvidge, C.D., Kimberly, E., Baugh, M.Z., and Feng-Chi, H., 2013. Why VIIRS Data Are Superior to DMSP for Mapping Nighttime Lights. *Proceedings of the Asia-*

Pacific Advanced Network, **35**: 62–69.

Fussell, E., Sastry, N., and Landingham, M. V., 2010. Race, socioeconomic status, and return migration to New Orleans after Hurricane Katrina. *Population and Environment*, **1**(1-3) : 20–42.

Gillespie, T.W., Frankenberg, E., Fung Chum, K., Thomas, D., 2014, Night-time lights time series of tsunami damage, recovery, and economic metrics in Sumatra, Indonesia. *Remote Sens*, 286–294.

Henderson, V. J., Storeygard, A., and Weil, D. N., 2012. Measuring Economic Growth From Outer Space, *American Economic Review*, **102**(2), 994–1028.

Imhoff, M. L., Lawrence, W. T., Stutzer, D. C., and Elvidge, C. D., 1997, A technique for using composite DMSP-OLS “city lights” satellite data to map urban area, *Remote Sens. Environ*, **61**:361–370.

Kocornik-Mina, A., McDermott, T. K., Michaels, G., and Rauch, F., 2015, Flooded Cities. *Discussion Paper* 1398.

Levin, N., 2017, The impact of seasonal changes on observed nighttime brightness from 2014 to 2015 monthly VIIRS DNB composites, *Remote Sens. Environ.*, vol. 193: 150-164.

Mård, J., Baldassare, D. G., and Mazzoleni, M., 2018, Nighttime light data reveal how flood protection shapes human proximity to rivers. *Sci. Adv*, 4, eaar5779.

Ngo, E. B., 2001. When Disasters and Age Collide: Reviewing Vulnerability of the Elderly. *Natural Hazards Review*, **2**(2): 80–89.

Qiang, Y., Huang, Q., Xu, J., 2020. Observing community resilience from space: using nighttime lights to model economic disturbance and recovery pattern in natural disaster. *Sustain Cities Soc*, **57**:102115.

Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., and Slayback, D. A., 2021, Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature* vol 596 : 80–86.

The Earth Observations Group, 2020, “Nighttime Light.” (https://eogdata.mines.edu/download_dnb_composites.html, 最終閲覧 : 2021.08.31)

Zhou, L., Sun, Q., Dang, X., and Wang, S., 2019. Comparison on Multi-Scale Urban Expansion Derived from Nightlight Imagery between China and India. *Sustainability*, 11: 4509.

Zhuo, L., Ichinose, T., Zheng, J., Chen, J., Shi, P. J., and Li, X., 2009, Modeling the population density of China at the pixel level based on DMSP/OLS non-radiance-calibrated night-time light images, *Int. J. Remote Sens*, **30**(4), 1003–1018.