

博士論文 2022 年度

洪水リスク軽減と生息地提供の
共便益を考慮した氾濫原管理の研究

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

山田 由美

洪水リスク軽減と生息地提供の共便益を考慮した氾濫原管理の研究

山田 由美

日本では近年、短時間強雨が増加傾向にあることが 1976 年から 2019 年の間の観測から報告されている。これを受け国土交通省は今後気温が 4 度上昇した場合（気候変動シナリオ RCP8.5）、降雨量は 1.3 倍に変化するとの予測を出した。治水施設性能や河川整備の進捗を超える規模の自然災害の大きさに対応するためには、河川整備に加えて氾濫原の土地利用の再考が欠かせない。この増大するリスクに対し国は、河道の外も含めた治水対策「流域治水対策」を 2020 年から本格化させ、一時的な貯留をして洪水調整する氾濫原管理を推進している。この介入策に重要な視点は、非日常的な事象である洪水時にリスク軽減できると同時に、日常的にはその土地独自の生態系が生み出す便益を得られるよう計画することである。古来氾濫原の多くを占める水田生態系において、冠水する空間を使った主な便益は耕作による食料生産であったが、生息地劣化・喪失が社会課題となった現在においては氾濫原性生物の生息地が提供されるという根源的価値も非常に重要であり、氾濫原性生物の潜在的な分布を把握して、生息地提供による生物多様性保全の便益が得られるような空間計画を推進する必要がある。

上述の背景を受けて、本研究の目的は、一時的な貯留をするという氾濫原管理を実施することで得られる、洪水リスク軽減と生息地提供を、期待減被害額と対象生物が出現する潜在的な確率によってそれぞれ数値化し、最終的にはそれらが同時に得られる空間分布を提示することとした。なお、本論では一つの施策により得られる複数の便益を共便益と定義し、喫緊の課題である洪水リスク軽減と生息地提供の二つを扱う。

第 1 章では背景に挙げた気候変動対策と生物多様性保全の統合が世界的潮流になる中「自然に根ざした社会課題の解決策（Nature-based solutions (NbS)）」が期待され、研究蓄積や議論が求められている現在までの動向をまとめた。上述の一時貯留する施策はまさに今国内で統合的解決策として位置づけられており、その根拠には河川と氾濫原の横断的接続性をもつ生態系の作用を活用した仕組みがあることを既往研究のレビューで整理した。

第 2 章では共便益が得られる量と分布を明らかにする手法が、氾濫水理シミュレーション

ンと経済価値への変換による期待減被害額計算（第3章）と、生息適地モデルによる生息地の潜在性計算（第4章）、そしてそれらの結果をGIS上で重ね合わせる空間分析（第5章）で成り立つという全体のアプローチをまとめた。氾濫解析は求める精度に応じてプロセスモデルと機会学習モデルを使い分け、経済価値への変換は治水経済調査マニュアル（案）を初めて不連続堤防と水田の貨幣価値提示に活用した。生息地の潜在性はGPS追跡の位置情報や衛星画像情報などの活用で全国100m空間解像度での分析を可能にした。

第3章では、氾濫原の特定の空間に一時貯留することで洪水調整機能が働くことを氾濫水理シミュレーションで明らかにした。滋賀県湖北に位置する天野川流域を対象に治水技術の一つ「不連続堤防（霞堤）」を介して、水田生態系が一時貯留機能を果たすと、最大想定降雨時に年間43,830円/1000m²の建物資産被害を減らせるとの経済効果を示した。8段階の外力で効果を計算することにより、100年確率降雨以上で経済効果がプラスとなることがわかった。対象流域では100年に1度の頻度で降る雨の量以上の外力を想定した計画が有効であることを示している。

第4章では、地域の環境保全に影響力のあるシンボル種として「コウノトリ」を対象に、出現分布確率を予測した。野生復帰したコウノトリの生息適地推定を広域的に行った初めての成果であり、水田の存在が最も出現確率に貢献するという結果を得た。氾濫原の水田を保全することが生息地になる潜在性を上げることを示唆する。併せて、景観の不均一性の重要性も示された。

第5章では、第3章と第4章の結果から洪水による洪水リスク軽減と生息地提供が同時に実現できる共便益性のある空間の分布を明らかにしたところ、日本全国で465km²が抽出された。その72.7%が水田・河川地および湖沼であり、分布としては河川網の近接性が見られた。この結果から共便益は水田生態系を基盤に生み出されていると結論づけた。なお、生態系が生み出す便益にはリクリエーション、食料生産、健康増進なども挙げられるため、本論が示す共便益分は地域が得られる総便益の一部であることを明示しておく。

最後に第6章では、第5章までで得られた知見を踏まえて、今後の氾濫原管理のあり方を提案した。国際自然保護連合（IUCN）が示すNbSの8つの国際基準にあてはめた議論を行い、氾濫原管理を社会実装に近づけるための提案を行った。

本研究により、洪水時に一時的な貯留をする氾濫原管理をすることは、水田生態系が建物資産価値の期待被害額を軽減することと同時に、生息地の潜在性を上げることが分かった。この結果から明らかになったことは共便益を支える基盤が水田生態系であることであった。本研究の成果は水田生態系において河川と氾濫原の接続性が生む洪水という自然の

作用に着目を促すものであり、流域治水対策において高リスク空間の利用を再考する上で有効と考えられる。

キーワード：NbS（自然に根ざした社会課題の解決策）、気候変動、氾濫原、水田生態系、生息適地モデル、氾濫水理モデル

SUMMARY OF PhD DISSERTATION

Floodplain Management as a Co-beneficial Solution for Flood Risk Reduction and Habitat Provision

Yumi YAMADA

(Abstract)

In Japan, the annual rainfall is projected to increase by 1.3 times, if temperatures increase by 4° C in the future (IPCC RCP8.5 scenario), based on the report which recorded an increase in intense rainfall from observations between 1976 and 2019.

In response to the change in flood risk, we need to reconsider the flood plain's land use in addition to river improvement. In 2020, Japan's Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) has shifted its floodplain management policy to the new policy, "River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All" which includes flood control measures outside the river channel, and temporary storage is one of the expected measures.

An important point for the intervention is that we should make more room for floodwater against extraordinary events, while at the same time for the benefits generated by the local ecosystems daily. In paddy ecosystems, which have traditionally occupied much of the floodplain, the main benefit of using flood-prone areas was food production through cultivation, but now that habitat degradation and loss have become a social issue, the intrinsic value of providing habitats for floodplain organisms is also very important. Thus, mapping potential habitats for wildlife management is urgently needed for spatial planning.

With this background, the study aimed to quantify how much the intervention of floodplain management reduced the flood risk and gained habitat, by calculating expected preventable damage to buildings and the potential probability of the target organisms, respectively. The final goal focused on the visualization of spatial distribution where these benefits can be obtained simultaneously. In this paper, multiple benefits from a single measure are defined as co-benefits.

Chapter 1 introduced a global trend for Nature-based Solutions (NbS) as an integrated

approach for climate change adaptation and biodiversity conservation. Japan's new water retention measure is now being considered an integrated solution and its mechanism can be explained by a natural process driven by its lateral connectivity between rivers and floodplains by previous studies. However, quantitative evaluations are insufficient.

Chapter 2 shows the whole method for identifying the quantity and distribution of co-benefits. It consists of hydrological simulation (Chapter 3), calculating habitat potential (Chapter 4), and spatial analysis to overlay these results (Chapter 5). Process models and machine learning models were used for hydrological simulation depending on the accuracy required. The amounts of damage and flood-damage reduction (i.e., the benefit) were calculated with the manual of economic investigation of river improvement. As for habitat potential, the probability of occurrence of oriental white stork, which was identified as symbol species. The GPS-tracking data and satellite imagery were used for species distribution modelling at 100m high resolution.

In Chapter 3, The hydrological simulation showed that the value of paddy areas near open levee was calculated to be 43,830 JPY/1000 m²/year at the maximum. By calculating the water regime for eight return rainfall periods, the economic impact was found to be positive at the 100-year probability of rainfall or more. The result showed that land use should be considered with a long-term perspective of at least 100 years ahead.

In Chapter 4, the probability of occurrence was predicted for the Oriental White Stork as a symbolic species that is influential in the conservation of the local environment. This is the first result of a large-scale prediction of suitable habitat for the reintroduced individuals, and it showed that the rice paddies contributed the most to the probability of occurrence and maintaining habitat. At the same time, the importance of landscape heterogeneity was also highlighted.

In Chapter 5, the results of Chapters 3 and 4 were used to identify the distribution of co-beneficial areas where flood risk reduction and habitat provisioning can be achieved simultaneously. 72.7% of these areas were occupied by rice paddies, riverine lands and lakes, and their distribution showed proximity to river networks. From these results, it was concluded that co-benefits are generated based on the paddy field ecosystem. It should be noted that the co-benefits shown in this study are part of the total benefits obtained by the region, as the benefits produced by ecosystems also include recreation, food production and

health promotion.

Finally, Chapter 6 proposes the future of floodplain management based on the findings obtained; it discusses and discusses the application of the eight international standards of Nature-based Solutions (NbS) by the IUCN, putting floodplain management into implementation.

The study found that floodplain management that allowed water flow in the rice paddies can reduce flood risk and also contribute to maintaining habitat. The results indicate that the foundation for co-benefits is the paddy ecosystem. The study encourages attention to the natural process of floods driven by the connectivity between rivers and floodplains in paddy ecosystems. And this research result can be useful for reconsidering the use of high-risk areas.

Keywords: NbS: Nature-based Solutions, Climate changes, Flood plain, Paddy ecosystem, Species distribution model, Hydrological modelling

目次

1. 研究の背景と目的	9
1.1 研究の背景	9
1.1.1 気候変動の影響による浸水害リスクの増大	9
1.1.2 流域治水対策への転換	11
1.1.3 河川と氾濫原の横断的接続性回復への期待	14
1.2 気候変動対策と生物多様性保全の統合的解決	19
1.2.1 統合的解決の意義	20
1.2.2 複数の社会課題解決法 NbS への着目	23
1.3 本研究の目的と全体構成	25
2. 分析の方法論の整理	27
2.1 氾濫解析のためのプロセスモデル	27
2.2 氾濫解析のための機械学習モデル	29
2.3 潜在生息適地モデル	29
3. 洪水調整機能の評価	34
3.1 手法	35
3.1.1 浸水深と被害額予測	36
3.1.2 一時貯留できる空間の特性抽出	40
3.1.3 土地利用変化分析・社会調査	43
3.2 洪水調整機能の結果	43
3.2.1 浸水深と被害額予測結果	44
3.2.2 一時貯留できる空間の特性	47
3.2.3 土地利用変化と社会調査結果	47
3.3 考察	48
3.4 小括	51
4. 野生生物の生息地提供機能の定量化	52
4.1 野生生物の絶滅から見た生息地保全の重要性	52
4.1.1 コウノトリをシンボル種にする意味	54
4.1.2 コウノトリの生態の整理	56
4.2 手法	57
4.2.1 潜在生息地予測	57

4.3	分布確率予測の結果	63
4.4	分布確率予測の議論	68
4.5	小括	69
5.	統合評価	71
5.1	生息地提供と減災効果が期待できる空間の抽出	71
5.2	統合評価手法	71
5.3	結果と考察	72
6.	総合考察	75
6.1	本研究のまとめ	75
6.2	洪水リスク軽減と生息地提供の共便益を得る氾濫原管理のあり方（提案）	77
7.	図リスト	82
8.	表リスト	83
9.	写真リスト	83
10.	引用文献	83
11.	既発表参考論文	94
12.	謝辞	95

1. 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

1.1.1 気候変動の影響による浸水害リスクの増大

本研究の大きな背景に、気候変動により浸水害リスクが増大し、土地利用のあり方を見直す必要性が生じていることが挙げられる。2021年に公表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書は、人間の活動が温暖化を引き起こしていることには疑う余地がない(IPCC 2021)と断言した。「今後、強い雨が増える確信度が高い（95%以上の確信度）」と報告され、人の安全や資産を脅かす可能性が上げることが懸念される。現在気候変動は世界中の最も重大なリスクとして捉えられており、氾濫しやすい空間利用の再考は喫緊の課題である。

毎年、世界各国のリーダーが経済問題に取り組むためにスイス・ダボスで年次総会（通称ダボス会議）を開催する世界経済フォーラム(WEF)は、その報告書「グローバルリスク報告書 2022」の中で気候変動を深刻度の観点で見た2022年から今後10年間の最も重大なリスクとして位置付けた(WEF 2022)。気候変動への対応を怠れば、世界のGDPは縮小する可能性があるとし、経済状況を大きく変えるリスク要因としてみなされているのが現在の世界的な潮流である。

既に第5次評価(IPCC 2014)で報告された将来の気温上昇と降雨頻度の高まり予測を受けて適応策の検討の必要性が指摘されていたため、水害被害額の推計やそれに基づいたリスク分析の研究は国内外問わず進んできた。北海道という特定の地域での気候変化(国土交通省北海道開発局 et al.)から全世界でのGDPへの影響や被災人口の予測(Winsemius et al. 2016)など空間・時間のスケールも多様に進む研究において将来対策への意識転換・投資の必要性が叫ばれている。

風間らは再現期間100年の雨（つまり100年に1回の頻度で起こる強さの雨）による洪水が発生した場合の現在と将来の被害額を比較し、近未来では現在の1.5倍、遠未来では約2倍になる推計結果を示した。また、適応策を講じることで（治水レベル再現期間70年）により被害額が5兆円軽減されることも示している(風間 2015)。土地利用規制による洪水に対する適応策の効果の評価研究も進んでおり、山本らは日本全国の21世紀末における予想降水量から浸水深を求め、再現期間200年の洪水時に3m以上浸水する箇所を規制する土地利用規制による適応策は現在の気候において年期待被害額を26%減少させると推定して、土地利用規制の重要性を説いた(山本 et al. 2019; Yamamoto et al. 2020)。

しかしその最中にも激甚災害は毎年のように起こり、直接的な人的・物質的被害のほ

か、間接的に暮らしや事業に影響を与えている。特に 2019 年には台風 19 号 (*Hagibis*) が関東地方・東北地方を中心に甚大な被害をもたらしたこともあり同年の水害被害額はおよそ 2 兆 1500 億円と津波以外の年間水害被害額としては 1961 年の統計開始以来最大を記録した(国土交通省 2020a)。さらに同 2019 年の統計で、氾濫危険水位を超過する河川の発生件数が全国指定河川 2092 に対し 403 と 19.2%に達し、統計のある 6 年前の 4.2%から顕著に増加したことも報告されている(国土交通省 社会資本整備審議会 2020a)。これらから見られるのは、河道掘削や堤防の整備などのインフラ整備の新規・更新の投資が進められているにもかかわらず、治水対策の進捗速度に対して自然災害の大きさが上回り、安全度が確保できていない状況である。今後老朽化する社会資本が増え従来の維持管理・更新ですら支出ができなくなる推計(国土交通省 2017)がある中、未整備インフラへの懸念はますます高まる。施設の能力には限界があり、危険な土地の使い方を再考しなければならない。

雨量の変化については、気象庁の全国約 1,300 のアメダス観測地点で観測された降雨量のデータの記録が詳しく、気象庁と文部科学省がまとめる「日本の気候変動 2020」において「1 時間降水量が 50 mm 以上又は 80 mm 以上の短時間強雨の年間発生回数は 1976 年から 2019 年の間で統計的に有意に増加した」と報告された。また短時間強雨について、1 時間降水量が 50mm 以上となる年間の回数を「1976 年から 1985 年」と「2010 年から 2019 年」で比較すると、直近の 10 年間は約 1.4 倍の発生回数になったことも特筆すべき変化である(文部科学省及び気象庁 2020)。

大雨、短時間強雨の頻度が増加する最大の原因は、気温の上昇により大気中に含まれる水蒸気量が増加することにある。気象庁は、より多くの統計と分析が必要としながらも、その降雨量増加傾向は今後も続くことを想定しており、これらを受け、国土交通省は今後の対策のため「気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会」を立ち上げ、降雨量、流量、そして洪水発生頻度がどの程度変化するかを表 1.1 に示すとおり試算した(国土交通省 2020b)。降雨量変化倍率は大気循環の影響などにより地域で差が生じており北海道や九州の一部で特に大きいとされるが、全国平均値で見ると 2 度上昇した場合(気候変動シナリオ RCP2.6)、全国平均の降雨量変化倍率は 1.1 倍、4 度上昇した場合(気候変動シナリオ RCP8.5)、1.3 倍と予測されている。

表 1.1 降雨量変化倍率をもとに算出した流量変化倍率と洪水発生頻度の変化

気候変動シナリオ	降雨量	流量	洪水発生頻度
RCP2.6(2度上昇相当)	約 1.1 倍	約 1.2 倍	約 2 倍
RCP2.6(4度上昇相当)	約 1.3 倍	約 1.4 倍	約 4 倍

出典：国土交通省 社会資本整備審議会 (国土交通省 2020b)

増大する外力を踏まえた施設計画や設計における対策は、「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について」と題する答申にまとめられ公表されており、(国土交通省 社会資本整備審議会 2020b)、治水計画を、「過去の降雨実績に基づくもの」から、「気候変動による降雨量の増加などを考慮したもの」に見直し、今後予想される不確実なリスク対応へ大きく舵を切ることになった。ここに新しい解決策を追加的に提示する意義があり、リスクを軽減・適応していくための空間の使い方提示が必要であると本論では捉えている。

1.1.2 流域治水対策への転換

高度成長期以降の全国的な市街化の進展により河川の流域の保水能力や遊水能力が不足している問題に対しては、1970年代から対策が議論されていたため河道の外も活用して対策を講じていく取組みは以前より存在した。急激な開発にさらされる一部の都市河川を総合治水対策特定河川に指定し「流域」という空間を使って治水対策を行うことで(岸 2013)、1980年代には浸水戸数や面積を減らすなどの効果を上げてきた(国土交通省 水管理・国土保全局)。これが「統合治水対策」である。ただ主に都市部への対策であったことや、更なる気候変動の影響による洪水流量の増大と人口集中により内容の改変が求められ、全国的に展開されることになったのが「流域治水対策」である。河川管理者のみならずあらゆる関係者が、流域全体で治水に取り組むことを目指すもので、河川管理者が管轄する河川区域の外の氾濫原も使った対策を進めていくとした。関連法として2021年4月に可決、成立した「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律」(令和3年法律第31号。通称「流域治水関連法」)があり、本法案は洪水リスクを構成する「ハザード」「暴露」「脆弱性」に対して、以下の対策を目指すものとしている。

① 氾濫をできるだけ防ぐ、減らすための対策 (ハザードへの対応)

雨水浸透施設や装置で土壌にしみこませ、河川への流出を抑制させること。そして貯める空間として水田やため池等の高度利用が挙げられる。

② 被害対象を減少させるための対策（暴露への対応）

高リスク空間を特定し、その土地利用制限をする対応が挙げられる。移転を伴う対応となれば町づくりも併せて利害関係者が議論を進めていく必要があり、また移転に際しては補助金の拠出など財政的な対応も必要となる。

③ 被害の軽減、早期復旧、復興のための対策（脆弱性への対応）

建物内で垂直避難ができるように建築規制を設けることなどが挙げられる。個別事例を挙げると、滋賀県では2015年に「滋賀県流域治水の推進に関する条例」を施行し、200年確率降雨で3m以上の浸水が予想される区域には一定の建築物の建築の制限をすべきとした浸水警戒区域指定を行った。人命被害を防ぐための実行力を備えた先進事例である(滋賀県2019a)。

流域治水関連法施行後、「流域治水プロジェクト」と題された取組みが各一級水系単位に開始された。2022年4月時点で360の流域治水協議会が立ち上がり、上記①、②、③において取り得る様々な対策と実践的に実施を推進できる主体を可視化する作業が進められている。

具体的には「田んぼダム」「輪中堤」「片側堤防」「不連続堤防（霞堤）」などが挙げられ、一つずつ紹介する。まず近代的な手法としては国内多くの地域で取り組みや効果検証が進んでいる「田んぼダム」がある。これは「氾濫水を一時的に貯める」という対策であり、上記①ハザードへの対応に貢献する。大雨の際に排水路への落水を少なくする調整版を入れて水田が本来持つ貯留機能を強化するもので、河川の水位を下げる効果などの洪水調整機能が評価されている(吉川 et al. 2009, 2011)。なお、「貯める対策」は既に水害に強いまち（流域）づくりを目指した「特定都市河川浸水被害対策法（2003年施行）」において1つのメニューとして掲げられている。具体的には「防災調整池をつくること」「学校の校庭で貯留をすること」「ため池やクリークを治水利用すること」「建物内で雨水貯留施設を用意すること」「住宅各戸で貯留対策をすること」などで、ここに「水田で貯留すること」も含まれている。

伝統的治水技術としてよく知られている一つが「輪中堤」である。集落など特定の空間をリング状に囲むように作られた堤防で、その中の集落を「輪中」と呼ぶ。河川からの氾濫があっても浸水範囲を特定し、堤防による防御により集落の暴露を避けることを目指している点で主に②の暴露への対応に貢献する。元々自然堤防などの微高地に起源があるとされ、特に濃尾平野では氾濫原から三角州にかけてみられる(堀 and 田辺 2012)。

「片側堤防」は、堤防がない側に内水貯留及び遊水を行い、堤防を有する側への氾濫を防ぎ、氾濫域を限定するものである(寺村 and 大熊 2005b; 寺村 and 島谷 2018)。暴露を避ける手段としてこれも②に貢献する。写真 1.1 は福岡県小石原川が筑後川に合流する付近を上流側から見たもので、写真右側の右岸が高くなっていることが分かる。右岸には住居が分布し、左岸は田畑が広がっており、氾濫する場合は堤防の低い側から越水が起きる。基本的には人命を優先するための意図的な構造であるが、優先的に守りたい城や町の側を高くして反対側に溢れさせるなどの制御の仕組みにも使われる。



写真 1.1 福岡県 小石原川右岸（写真右側）に残る片側堤防
(2020 年 9 月 20 日 筆者撮影)

「不連続堤防（霞堤）」はところどころ不連続に切れている堤防形態を指す。急流河川、緩流河川などで目的が大きく異なり、堤内（氾濫原側）からの排水や、上流で破堤氾濫したときに被害が拡大しないよう速やかに河道に戻すなどの目的ほか、一時的に遊水して洪水調整するなど様々な機能を持つ（時に併せ持つこともある）。その点で①にも②にも貢献することが可能な仕組みである。洪水が逆流する空間は濁流渦巻く洪水流の魚類の退避場所となっており、川沿いの住民は洪水時に霞堤部分に行って投網を打つ習慣があったともいわれている(大熊 2020)。

以下図 1.1 左は滋賀県に残る霞堤を上空から撮影して取得した画像である。堤防が折り重なる姿が見て取れ、これが霞のように見えるのが霞堤の語源である。右図は暖色（高）から寒色（低）の配色で表層面の高さを表しており、○印に堤防の開口部が確認される。

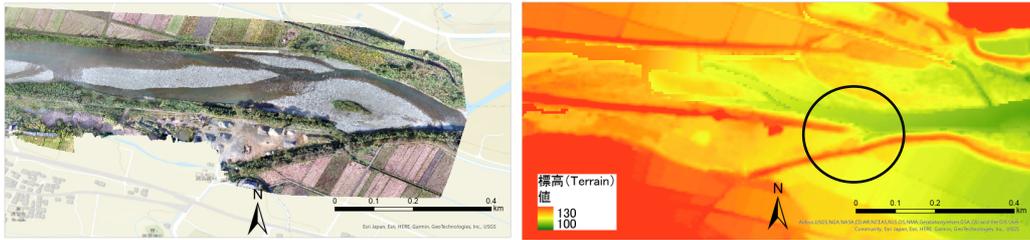


図 1.1 滋賀県高島市安曇川流域の霞堤。左図は滋賀県高島市安曇川流域のドローン空撮データより得た画像（2017年10月17日 筆者ら撮影）ドローンはDJI社製Phantom4、オルソタイル処理はPix4D社のPix4D Mapperを利用。右図は標高地図（出典：DEM（数値標高モデル）国土地理院）。

「霞堤」の大きな特徴は洪水の出入りを許すことにあり、地形的に集水性を活かしている点にある。具体的には、この河川と氾濫原の接続性が水の出入りや貯留空間の確保を可能にして浸水害の軽減に寄与し、併せて水分条件や水深などが時空間的に異なる多様性のある場所が豊かな生物空間を創出するという2つの効果を発揮するという点にある。

この多面的機能を重要視し、国土交通省は流域治水対策を進めるにあたり「まちづくりと一体となって堤防や護岸を整備して、地域の環境と調和する景観を保全・創出など、治水と環境の両立を図る取組を新たにとりまとめる」との考えを明らかにしており(国土交通省 水管理・国土保全局 2022)、治水と環境配慮は両輪で進めるべきという国の方針がここに示されている。つまり本施策は単一目的ではなく、複数（治水と環境）目的を目指すためである。1.2章ではこの「複数の目的を同時に目指す意味」について理論的背景を述べるが、その前になぜ接続性が治水と環境に貢献するのかを、河川の構造から整理しておく。

1.1.3 河川と氾濫原の横断的接続性回復への期待

氾濫原を特徴づける環境条件は定期的・不定期的な増水である(鷲谷 2007)。つまり洪水である。本節では、(1) その自然の作用である洪水と人はどう付き合ってきたか、(2) 作用を喪失しつつある今、何が起きているのか、(3) 今後どう活用すべきと議論されているかを整理した。これらの整理は、その土地の最大限の活用や保全の前提となるため、実社会の課題や既往研究も含めここでまとめた。

(1) 自然の作用である洪水と人はどう付き合ってきたか

まず氾濫原とは洪水時に河道から水が溢れた際に流水中の土砂が堆積して形成された場

所と定義される(川那部 et al. 2013)。流域内で河川に沿いに両側に広がり、上流部で狭く下流部で広く分布するが(応用生態工学会 2019)、日本の河川工学分野では河川下流の後背湿地を氾濫原と呼び、上流部の勾配が急な場所に発達する砂洲などは氾濫原と呼ばない場合が多い(西廣 2021)。

我が国では春の雪解け、梅雨、台風の 3 時期、強烈な洪水が起きるといわれている(江崎 2016)。自然事象である氾濫は栄養素や有機物を運搬して養分の高い土壌を蓄積させ、それによって形成された肥沃な耕地は人々の生活を支えてきた。それを基盤に縄文時代の稲作の伝来以降、人々は弥生時代にはかんがい用の水路を作り出し、以降治水・利水の発展に奮闘してきた。輪中堤、霞堤のような伝統治水工法はその必要の中で生まれたものである。大河川の氾濫原などで新田開発が開始されたのは江戸時代後期であった。長期的にみると日本の人口は江戸時代以降顕著に増加の一途を辿っており、利根川では変流や改修工事が行われた報告がある(大熊 1981)。いずれも河川の状態を自然的与件とし、「災い」を「恵み」に変えることで社会を発展させる基盤としていたのである。

明治時代以降、なおも人口増加は加速し頻繁に冠水が起きる地帯にも多くの人が居住を始めるといふ社会変化が起きた。これに対しコンクリートの連続堤防など近代河川技術が西洋から導入されたことは更なる居住地・耕作地の確保につながり、まさにニーズが合致したことになる。これにより従来部分的に逃したり、貯めたりしていた洪水は一切河道内に閉じ込めて流す方策へと大きな転換が図られることになった(和田 et al. 2005; Furuta and Shimatani 2018)。

この時から日本の主に氾濫原に起こった土地利用変化は、河川の両岸に堤防を築き、河道をなるべく直線化するために接続性を減らし、湿地や湿田であった氾濫原空間を、暗渠を用いて排水を促す耕地や住宅地に変えるというものであった(国土地理院 2019a)。国土交通省の「日本全国の湿地面積変化の調査結果」によると 1999 年時点で、明治・大正時代に存在した湿地面積は 61.1%に当たる 1289.62km²(琵琶湖の約 2 倍の広さに相当)が消失したと報告されている(国土地理院 2000)。

治水に重点を置いた 1896 年に制定された旧河川法は、河道内での流下を基本とする考え方をベースとした「高水工事」を全国的により押し進めることになる。沖積平野に連続堤防が築造されたことで治水は画期的に進み、高水工事が日本の成長を支えたことは間違いない。自然がもたらす恵みは人口をますます集中させ、鉄道の敷設、交易の活発化など世界中で文明を発展させる駆動力として働いたのである。

増加の一途を辿る人口が 1 億人を突破したのが戦後高度成長期の 1967 年であった。水

利と治水、新田開発によって発展した稲作により、ちょうどこの年の全国の水稲収穫量はピークに達した。1960年代からは大面積の住宅地開発が盛んになり、人工的な地形改変が活発化した(Takeuchi et al. 1986; Tamura 1991)。その後も増え続ける人口は食糧需要・住宅需要を高め、より空間を確保するため土地利用への圧力をさらに強めることになる(Totman 2018)。

今や日本は、国土の10%しかない沖積平野に、総人口の50%、総資産の75%が集中するという世界でも特異な状況となった(関 1994)。ここで、本研究が課題として位置付ける「暴露の増加」という事象が顕在化している。氾濫水を受け入れていた水害リスクが高い土地にまで開発が及び(寺村 and 大熊 2005a)、資産、人命の暴露が増加しているという状況が生じていることはデータからも明らかになっている(秦 2020)。

我が国の人口がピークを迎えた2008年以降も、農村地域の一部では住宅供給が続き、水田から住宅や商業地への転換が止まっていない。比較的地代が安価な農村部ではまとまった土地が確保しやすく、住宅の新規着工、大型商業施設やソーラーパネルの建設が続いている。背景としては高齢化により農業の継続が難しくなったことや、後継者が不足して農地を手放す状況がある。

都市域の氾濫原に目を向けると、住宅地・商業地・農地が発達し、暮らしや生業が定着しているように見える。しかし近年市街地でその被害が深刻化しているのが、降雨の排水が追い付かず水に浸る「内水氾濫」である。被害額の大きさでは河川からの越水による氾濫の「外水氾濫」による被害額が内水氾濫のそれを上回るが、水害件数の7割以上が内水氾濫によるものと報告されている(中野 and 木内 2020)。また堤防は切れ目なく頑強に補強が繰り返されているが、流速・流量を増した洪水流は破堤のリスクを上げ、人命や資産を脅かすようになった。

自然災害が起きた時に都市的土地利用の拡大が被害を増大させることは、東日本大震災後の被災からも報告された(Ichinose et al. 2019)。暴露量が多くなれば、リスクも高まるのは必然であり、災害実績から報告される面積当たりの一般資産被害額「一般資産水害密度」は急騰を示していることからその状況がうかがえる(国土交通省 2004)。自然地理的に災害危険度の高い土地における無秩序な開発による市街化を都市計画段階で抑制する都市政策が進められるべきと指摘がされる(三好 2022)など、リスク評価に基づいた土地利用検討は喫緊の課題である。

氾濫原に資産と人命が集中する日本の洪水は被害額が大きく且つ迅速な政策対応が求められる自然災害である。流域全体で水害が起こりやすい箇所をリスクを低減する解決策

を見つけなければならない時を迎えているのが今の氾濫原の状況である。

(2) 作用を喪失すると何が起こるのか

洪水という自然の作用がなくなると氾濫原での集水機能と生態的機能を失うことになることについて、その背景を整理する。生態学では、洪水による流路の移動や土砂の堆積により様々な場所が生まれ、それが時間的に変化することを動的モザイクと呼ぶ(西廣 2021)。洪水の流れを大きく特徴付けるのは地形である(Dadson et al. 2017)。そのためどこでも同じように水に浸かる訳ではなく、その分布や時間は不均一となる。強く攪乱を受けたところや弱いところ、最近攪乱を受けたところから、既に攪乱から時間が経って回復途上にあるところまで、発達段階の異なるパッチがモザイク状に存在する(井出 2006)。このように洪水は時空間的に水域、陸域、遷移帯を変動させ、それが全体として不均一性の高い空間を創出してきた。この多様さがさまざまな生態特性を持つ陸生・水生生物の生息場所を提供しており、それが結果的に貴重な生物多様性を保つことにつながる。

水が行き来できる水文学的連結性は、河川水系の4つの次元(縦断、横断、垂直、時間的)で作用をされると言われている(Amoros and Bornette 2002)。つまり3つの空間的次元と時間である。本論では人が住む空間の冠水(浸水害)に着目するため、河川と氾濫原がつながる連結性の中でも、横断的な連結性(Lateral connectivity)に着目して話を進める。

今日の日本では、その河道と氾濫原を横断的につなぐ水の出入りなくすための人為的な様々な改変が見られる。下図に見られるとおり、霞堤や支流を塞ぎ、圃場整備に伴う乾田化・水路のコンクリート3面張り化などで川から水を出さないようにしている。(図 1.2)。

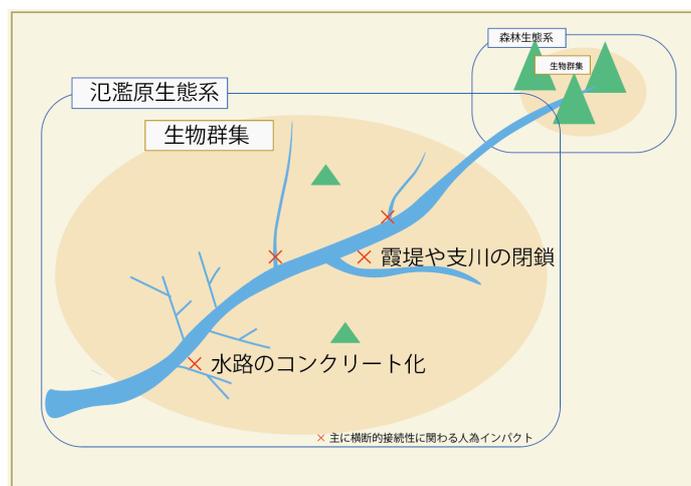


図 1.2 氾濫原生態系における、河川と氾濫原の接続性に対する人為インパクト例

このような人為的改変が加わると氾濫原は動的モザイク性を失い、それに依存して生息する氾濫原生態系の生物群集は影響を受ける。主に河川生態学の分野では、その影響研究が進み、本来のダイナミズムを制約された河川は洪水調整機能も生息地提供機能も果たせなくなっていることに警鐘が鳴らされている(石山 et al. 2017)。機能が脆弱化した氾濫原の管理には有効な介入の整理・研究が求められており、積極的に介入すべき喫緊の課題とされている。

(3) 今後、洪水という作用をどう活用すべきと議論されているか

流域治水対策の中で、動的モザイクを起こす不連続堤防（霞堤）への期待の議論が高まっている。1.1章で紹介した伝統的治水工法の紹介における説明を再掲すると「河川と氾濫原の接続性が水の出入り口や貯留空間の確保を可能にして浸水害の軽減に寄与し、併せて水分条件や水深などが時空間的に異なる多様性のある場所が豊かな生物空間を創出する」仕組みであり、治水と環境の両面に対する貢献が期待できる。

この多面的な働きをする治水施設に関しては、先の流域治水対策で挙げた「特定都市河川浸水被害対策法等の一部を改正する法律」に関する以下の付帯決議でも言及された。

「三. 流域治水の取組においては、自然環境が有する多様な機能を活かすグリーンインフラの考えを推進し、災害リスクの低減に寄与する生態系の機能を積極的に保全又は再生することにより、生態系ネットワークの形成に貢献すること」(衆議院 2021)。

付帯決議とは「本法の施行に当たっては、次の諸点に留意し、その運用について遺漏なきを期すべきである」と書かれた試行に関する意見などであり、法的な拘束力は有しない。しかし、治水のみならず環境配慮への貢献が求められたことは大きな影響力を持つ。実際、この動きを受け、流域治水を進める国土交通省は「霞堤を適切に維持し、河川と流域を生息域とする魚類等の連続した環境を保全し、生物の多様性の維持を図ること」の重要性を示している(国土交通省 水管理・国土保全局 2022)。現在、全国の1級河川109水系のうち54水系で不連続堤防（霞堤）が確認されており、霞堤は今でも治水対策を果たしている(国土交通省 社会資本整備審議会 2019)。国管理の区間だけでなく、都道府県管理の中小河川を加えると、現存する不連続堤防（霞堤）は無数にあると言われている(木村 2021)。一方で、その働きが認知されないまま、開いている堤防が閉じられることもあり、流域治水対策において、その可視化や評価を急がなければならない。

不連続堤防（霞堤）を利用する治水介入策が期待される理由のもう一つが低コスト性である。現実的に治水対策は原則的に下流優先に進められ進捗に差がある中で中・上流に予

算が後回しになることや、急ピッチで進む整備事業や予算が追い付かないこともあり、コスト面は重要な考慮事項と言わざるを得ない。

コストを低く抑えられる理由はそれぞれの流域が持つ自然の作用や氾濫原生態系が提供する機能を活用するからである。周囲よりも低いところを目指して水を誘導する設計にするため洪水自体が動力であり、河川の水位が下がると自律的に排水するのでポンプ施設なども基本的に不要である。堤防の開口部に竹林が設置されれば洪水流を減勢・停滞させる制御機能を働かせることができる(長尾 2004)。つまり地形の勾配による流況の変化、植生などを巧みに扱っており、生態系の機能をインフラとして働かせているのである。

もちろんその防御可能性には不確かさがつきまとう(Onuma and Tsuge 2018)。鋼やコンクリートを主材料としたグレーインフラと呼ばれる人工構造物は、単一機能を確実に発揮できるという点で優れた利点を持つため今後の社会に不可欠である。しかし気候変動により施設性能を超える事象が起こる不確実性や経済性を鑑みた時、既存インフラが耐えうる自然災害の強さを超えた場合、自然のインフラにも防御の可能性があるのは非常に重要である。両者が重層的に整備されれば、地域の洪水調整能力を高められるであろうという期待は多くの組織で議論され(国土交通省 総合政策局 環境政策課 2017; 複合構造委員会・グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究小委員会 2020) 伝統的な治水技術を再評価し活用していく意義は大きい。

以上の背景から、不連続堤防(霞堤)を活用することの評価は今後の治水と環境両面への貢献になるとして、具体的な氾濫原管理の手法として不連続堤防(霞堤)の利用に焦点を絞るものとする。

1.2 気候変動対策と生物多様性保全の統合的解決

本章では、先の流域治水対策でも示された「治水のみならず環境へも貢献すること(共便益を得ること)」がなぜ期待されるのか国内外の取り組みも交えてまとめる。

共便益を目指す理由は以下3点ある。

1. 同一の立地条件を基盤に機能が両方に発現する空間があるにもかかわらず、単体のみを目指すると他の可能性を捨ててしまうことになる。
2. 洪水リスクは豊かな生息地との親和性が高いので対策をとりやすい。
3. 災害後の復興にはリスク対策に重点が置かれ環境配慮を入れにくい。よい環境が見過ごされないよう、災害時に備えて平時に研究成果を顕在化させるべき。

そして、ここで便益という言葉について言及しておく。野生生物の永続的な存在は必ずしも人間社会の安定や発展といった福祉（well-being）や利用価値に直結しなくても資産であると捉えられており(Dasgupta 2021)、本論でもこの考え方に従い「便益」を広義に捉えることとする。経済の視点で言えば便益は費用と効果の対比で語られるが、今回はその価値を維持するための費用を考慮する計算まではしていないことをここに明記しておく。

1.2.1 統合的解決の意義

共便益を得るということについて国際的にどう議論されているか、国際的な議論をレビューする。既に生物多様性と気候変動が相互に作用を及ぼすことは認識されており、個別に議論は深められていた。両課題を統合的に扱うべきだとされる統一的な流れが生まれた重要な年が2021年である。同年、生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム（IPBES）、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）双方から研究者らが会して合同ワークショップを開催した。その共同作業の成果である科学レポート「生物多様性と気候変動 IPBES-IPCC 合同ワークショップ報告書」（Pörtner et al. 2021）で「気候変動と生物多様性喪失の問題は相互依存し、その統合的解決は持続可能で公平な人間福利に欠かせない」との見解が示されたことは重要な転機であった。

同報告書では2030年までの10年の取り組みの議論がまとめられている。作成過程に政府の関与がないため公式に政策プロセスに影響を及ぼすものではないが、科学的な重要性は多くの国から評価されている(公益財団法人地球環境戦略研究機関（IGES）2021）。

着目すべきは気候変動適応と自然や自然の恵みを得る対策は、組み合わせ次第でどちらかに悪影響を及ぼし、いわゆるトレードオフが生じる可能性があるという報告である。気候変動緩和・適応のみに焦点を絞った場合、例えばCO₂削減のために外来樹種を再植林することや森林伐採を伴ったメガソーラーの開発などは生物多様性に悪影響を与えるといったものである（図 1.3）。

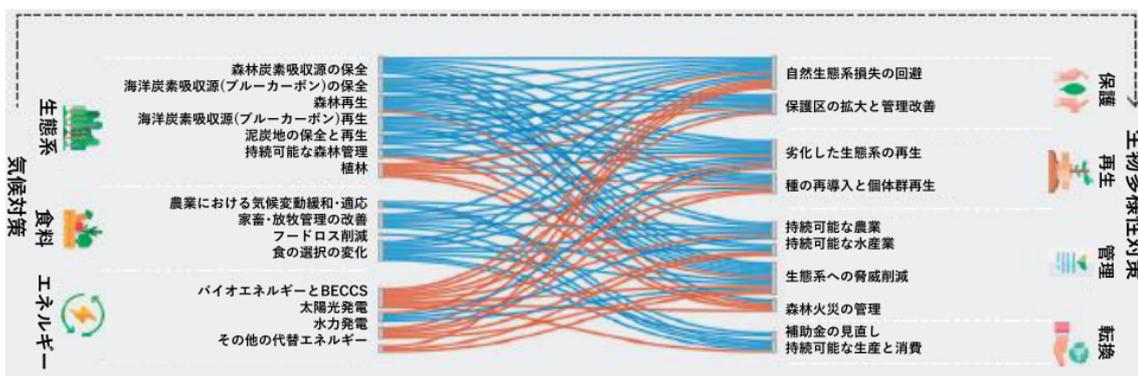


図 1.3 気候変動緩和策による生物多様性保全策への影響

青色の線は正の影響（相乗効果）、オレンジ色の線は悪影響（トレードオフ）を表す。

出典：IPBES and IPCC (Pörtner et al. 2021) The Scientific Outcomes of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change, Figure 7-1 (p152)

日本語訳：環境省自然環境局自然環境計画課生物多様性戦略推進室（環境省 2021）

そこで元来減災にも機能を持つ生態系を保全・活用して気候変動に適応していく方向で考えると正の影響が増え、共便益（コベネフィット）を最大しやすくなるという。図 1.3、1.4 はアイディア段階とされているが、統合的に考慮して対策を進めていく意義がここにあるといえる。

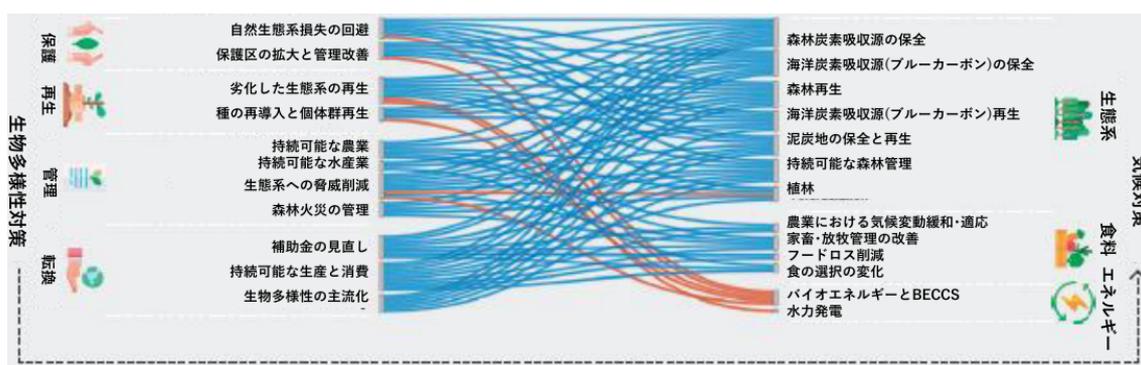


図 1.4 生物多様性保全策による気候変動緩和策への影響。出典は上の図 1.3 と同じ。

「浸水害の激甚化」と「生物の生息地の喪失」は様々な間接的きっかけ、直接的きっかけが絡み合って、それぞれの問題を引き起こし、それらが結果的に我々の生活を脅かす構図として整理された（図 1.5）。それ故に、単一的な解決よりも統合的な解決が高いレジリエンスを生むことが主張されている。

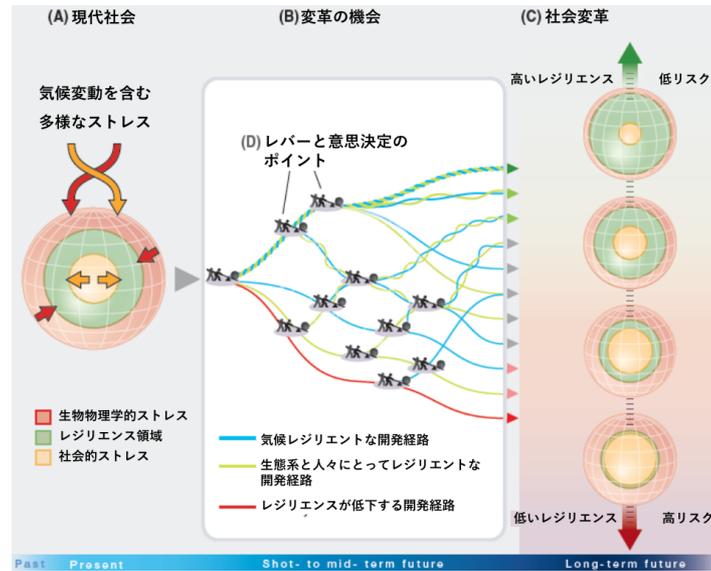


図 1.5 生物多様性保全と気候変動対応の統合的解決によるレジリエンスの強化
 出典：IPBES and IPCC (Pörtner et al. 2021) The Scientific Outcomes of the IPBES-IPCC
 co-sponsored workshop on biodiversity and climate change, Figure 7-4 (p151)
 日本語訳：環境省自然環境局自然環境計画課生物多様性戦略推進室（環境省 2021）

図中（A）の「現代社会」で気候変動を含む多様なストレスとして扱う外力は降雨の増加によるハザードの増大や、土地の高度利用で洪水を貯えられる領域が無くなった現在の日本の危機的な状況を示す。図中（B）で「変革の機会」の中では、高いレジリエンスを生みだせるかどうかの転換点が「てこの原理」に喩えて「レバー」として描かれている。高いレジリエンスを得るための社会変容に向けた積極介入ポイントである。本論の氾濫原管理に当てはめて言及すると、そのレバーの1つは「河川と氾濫原の関係のあり方を変えていく」ことに該当する。「洪水リスク軽減（気候変動対策）」と「生息地提供（生物多様性保全）」を強固に絡めて取り組むと、よりよい暮らしに向かうことが線の結びつきで示されている。そしてその意思決定にはインセンティブを示していくことが重要となる。図中（C）は「社会変革」を示す。（B）で自然とのかかわり方を変え、巧く絡み合えるとレジリエンスの高い状態になる。

この国際的な「気候変動対策」と「生物多様性保全」へ統合的取り組みは、単一ではなく複数（両方）を扱う意義の重要な背景となるため、流れをまとめて図 1.6 に示した。

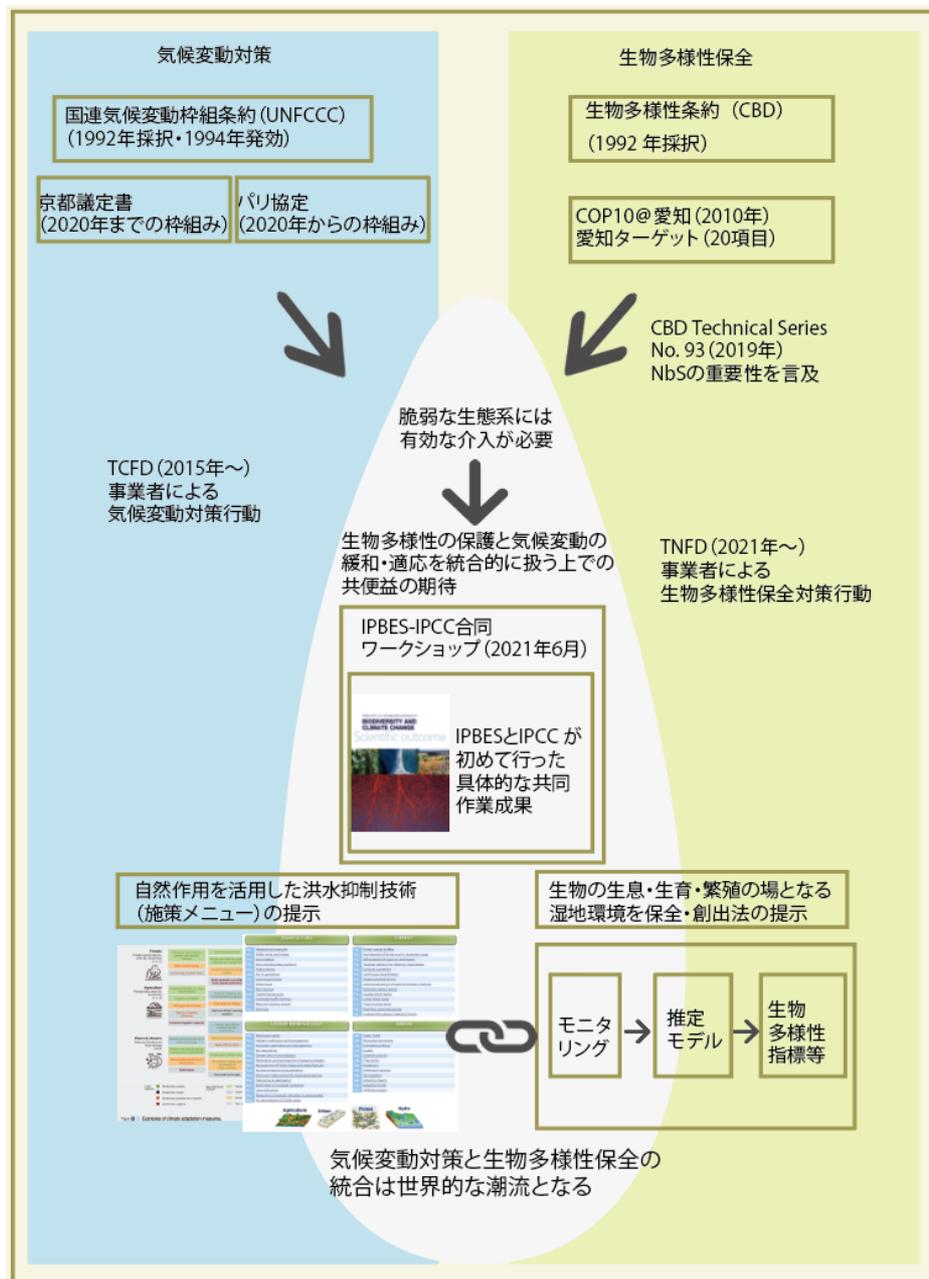


図 1.6 気候変動対策と生物多様性保全の統合的取り組みに向けた流れ

1.2.2 複数の社会課題解決法 NbS への着目

絡み合った社会課題に対する統合的な解決策として、自然に根ざした社会課題の解決策 (Nature-based solutions(NbS)) という概念があり、本論ではこれに着目したい。NbS の概念は 1980 年代に端を発し、生物多様性保全の基盤にもなってきた(IUCN 国際自然保護連合 2020)。国際自然保護連合 (IUCN) によって、以下のように定義されている。

自然に根ざした社会課題の解決策（Nature-based solutions(NbS)）とは「社会課題に効果的かつ順応的に対処し、人間の幸福および生物多様性による恩恵を同時にもたらし、自然の、そして、人為的に改変された生態系の保護、持続可能な管理、回復のための行動」である(IUCN 国際自然保護連合 2020)。

NbS は取り組む課題や着目したい分野によって多様な対策や概念を包括している。例えば課題が自然災害に対する防災・減災であれば生態系減災（Ecosystem-based Disaster Risk Reduction）略して Eco-DRR と呼ばれる（一ノ瀬 2021; 大橋 and 岡野 2021）。本論で評価し提案する氾濫原管理は減災を目的としているため NbS の概念、そしてその傘下の概念である Eco-DRR を実装する手段である。

NbS という概念は新しいものではない。国土の狭い日本の河川は急勾配なものが多く、短い流路を一気に流下することや、山地に挟まれて流域面積が小さいため溢れやすいこと、また梅雨や台風で集中豪雨が起きやすい気象などから、古来より沖積平野に住まう人々は水害を被ってきた。その一方で水の確保、肥沃な堆積層による高い食糧生産力、交通など生活のための好条件が得やすく、それらを求めて居住や開発を進めた日本人にとって、浸水被害と豊かな恵みは対に受ける存在である。

そういった環境下、日本人はその位置や頻度を認識した上で自然堤防の微高地に居を構え、強い降雨時には周囲より低い土地を一時貯留地にするなど自然と調和して恵みと減災を両立させてきたのは氾濫原の歴史で述べたとおりである。低頻度で発生する攪乱事象と、日々の生活を折り合わせるための知恵と技術を継承させながら、洪水が起きうる沖積平野で豊かな食料と美しく多様な生物相を育む里山景観を得てきた伝統的な知恵はまさに NbS の概念を具現化したものといえる。

しかしそれを見えづらくしているのは現在の人為改変を加えられた土地利用である。地形的に様々な自然条件がありつつも、均質的に都市的土地利用が土地を覆った地図からはその差を読み取れなくなっている。NbS 機能の発現は空間に依存するという原則があり、特定の生態系に対する十分な理解が必要と言われている(Cohen-Shacham et al. 2019)。つまりその寄与の度合いや空間的な分布について科学的、且つ文化的側面から生態系の特性を明らかにしていく必要があるのである。

IPBES-IPCC の合同ワークショップの報告書には「統合的に対策を進めることで気候変動の緩和と生物多様性の保全のコベネフィット（共便益）を得ようとする介入施策は、土地が多面的機能を持つという特性を最大化することで実現する」とある(公益財団法人 地球環境戦略研究機関 (IGES) 2021)。つまり多面的機能をもつ土地を選択していけば最大

限の効果が得られるのである。ただ、生態系が生み出す便益は洪水リスク軽減、生息地提供のほか、リクリエーション、食料生産、健康増進なども挙げられるため、本論が示す共便益分は地域が得られる総便益の 2 つを足し合わせた部分に過ぎない。最大化させるためには、すべての多面的機能を引き出し、さらにはその機能維持に掛かる費用に対する比で語らなければならず、その研究の発展が待たれる。

1.3 本研究の目的と全体構成

以上までの背景を踏まえ、本研究の目的を「氾濫時に河川周囲の水田生態系が保全されて水が行き来できるようになっているという洪水調整をすると、人や資産の被害が軽減でき、平時には豊かな自然を提供できる」という氾濫原管理の効果を実証的に明らかにすることとし、具体的に取り組む研究目的を以下のとおり設定する。

- 目的 1. 不連続堤防（霞堤）と水田生態系による洪水調整の経済効果分析
- 目的 2. 野生生物生息地提供機能に寄与する景観構造の解明
- 目的 3. 減災と生息地提供を両立させる空間構造の整理

本研究の構成を図 1.7 に示す。まず第 2 章は目的を達成するための手法のレビューと方針整理で構成する。目的 1 に第 3 章が対応する。分析用データ・モデルが利用可能な滋賀県の一流域を対象に氾濫シミュレーションを行い、軽減できる被害額を用いて不連続堤防と水田で一時貯留する自然作用が果たす経済効果を示す。

目的 2 には第 4 章が対応する。ここでは野生生物をシンボル種としてのコウノトリ (*Ciconia boyciana*) という鳥類に絞り研究を進める。GPS 追跡による観測位置データと環境条件との関係性を機械学習で定量化し、潜在的な生息地を空間分布で示す。

目的 3 には第 5 章が対応する。第 3 章で減災効果が明らかになった一時貯留空間と、第 4 章で予測できた潜在生息地、両者重なりあう空間を空間解析で抽出して整理する。

第 3 章、第 4 章、第 5 章より得た知見を第 6 章で総合考察する。

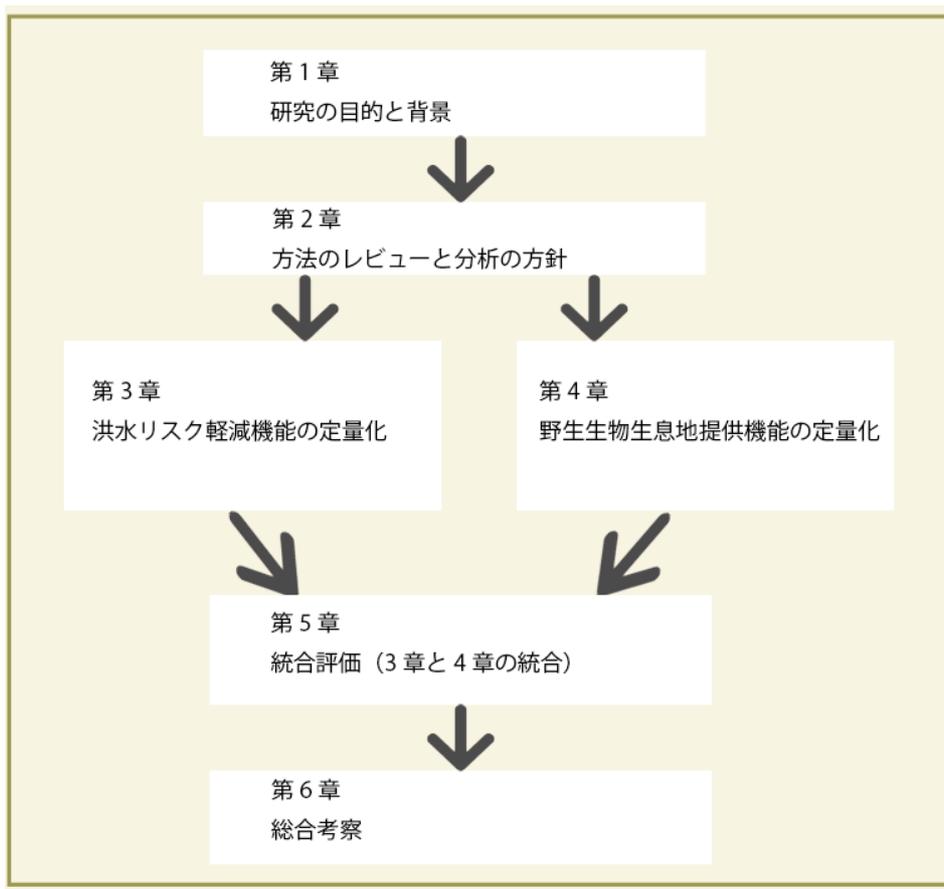


図 1.7 本研究の構成

2. 分析の方法論の整理

本論文の第3章、第4章、第5章で取り組む研究課題の分析手法に関し、本章では取り得る手法のレビューとその課題、それを踏まえた本研究で取り得る手法とその独自性を整理する(図2.1)。第3章では浸水深予測に氾濫水理モデル(図2.1中(a))、機械学習モデル(図2.1中(b))を用いている。第4章には種の分布推定をするために機械学習モデル(図2.1中(c))を用いている。第5章における第3章、第4章の結果の重ね合わせはGISの空間解析(図2.1中(f))で実行している。

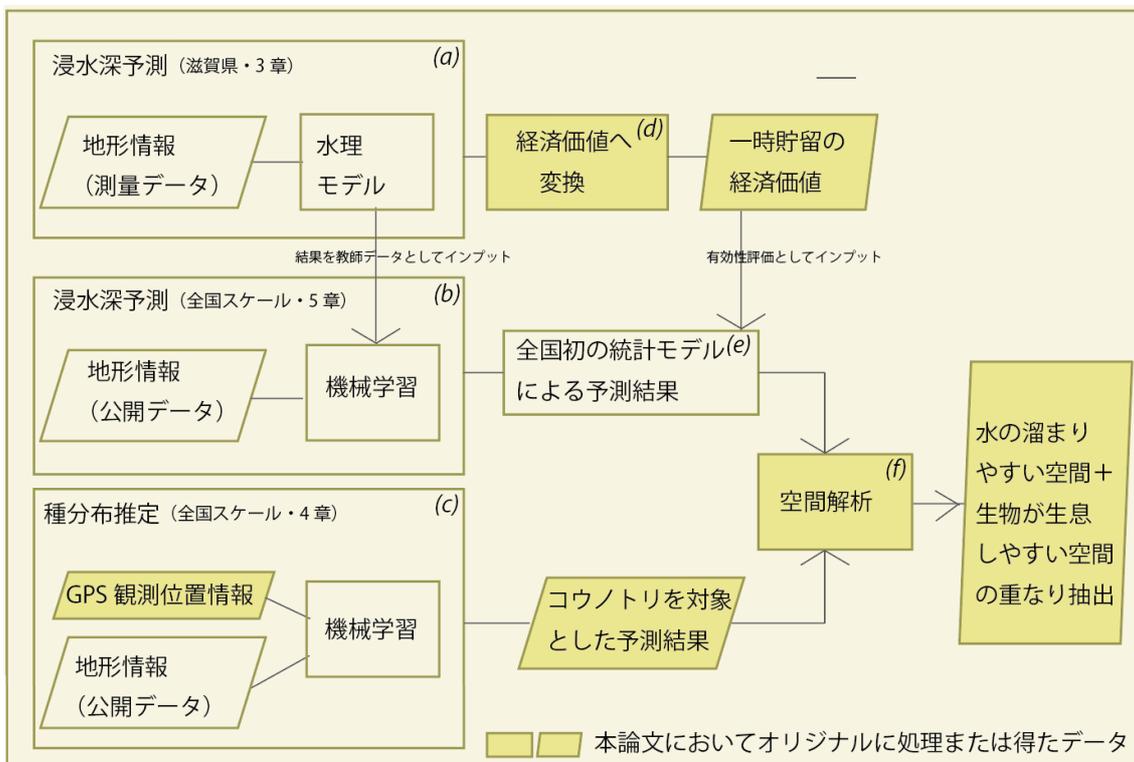


図 2.1 本論文中で研究課題解決のために用いた手法・データ

2.1 氾濫解析のためのプロセスモデル

第3章では「不連続堤防(霞堤)を活用し洪水を調整することで、床上浸水や建物資産価値軽減といった被害を軽減すること」の機能を定量化する(図2.1中(a))。モデルで評価する理由は、実際に堤防施設に対して起こった強い降雨の量・被害量などを実験的に求めることは現実的に不可能であるためである。流域の中で多段階の外力による流況や氾濫原浸水を表現できる唯一の手段は理論上の水理モデルであるため今回の研究はこのモデル

を使った定量化を目標にした。

評価対象の不連続堤防（霞堤）は氾濫原で洪水流を一時的に貯留する治水施設であるため、その貯留効果を知るために氾濫原に降った雨の流れや浸水も知る必要がある。その浸水の水位に応じて被害の金額が求められるが、その浸水深は外水・内水氾濫を統合的に解析し、浸水をセンチメートル単位で予測しなければならない。そこでまずは実現可能な水理モデルと測量データで高度な浸水深予測をすることを目指した。

浸水深予測について基本的な説明を行う。現在の浸水深の予測モデルは「降雨から流出までの過程をモデル化したプロセスモデル」と、「環境変数と浸水深を統計的に関連付ける統計モデル」に大別される。現在日本全国の多くの河川を対象に公開されている浸水深はほぼ前者のプロセスモデルにより計算されている。降雨から地表面の流動、河道への流れ込み、堤防からの越水、氾濫原での浸水といった、一連のプロセスを力学的な水理計算で表現するものである。高精度な予測が可能であるが計算量が膨大でありコストが掛かるため全国の地先予測を網羅していない。洪水予報指定河川以外の中小河川については予測と公表が追いつかず水害リスク情報の空白域解消が課題として挙げられていた(国土交通省水管理・国土保全局 2021)。そこにいち早く各地点の浸水深を予測できる独自の数値計算モデルを開発し、上記の課題を県内で解消したのが滋賀県であった。そのモデルは降雨から氾濫までの一連の水文過程を再現するもので、プロセスモデルともいわれる。氾濫計算モジュールでは、内外水の氾濫が同時に考慮され、50m×50m 格子で浸水深や平均流速などの水理諸量が算出される(Taki et al. 2013)。滋賀県は流域全体で取り組む洪水リスク対策のため2014年に「流域治水の推進に関する条例」を施行しており、上記のモデルはその条例の科学的根拠として使われている。県から「地先の安全度マップ(滋賀県 2017)」として一般公表され政策の重要な基盤としての役割を果たしていることから、本モデルは本論のシミュレーションに十分な説明力があると判断した。

洪水による浸水の期待被害額の算出に関しては、国土交通省河川局が出す治水経済調査マニュアル（案）(国土交通省水管理・国土保全局 2020)に則った算出が一般的であり官民学で広く使われている。同マニュアルは治水事業の経済効果を測定するために、公共事業を実施することで減らせる被害のうち計測可能なものを「便益」として捉え、その算出手法を示すものである。本研究で新しい試みとしたのは、上述の(a)のモデルからの出力結果を使って、不連続堤防という治水施設を使った洪水調整効果を経済価値に変換したことにある。

同マニュアルでは建物、家庭用品、事業所資産、農作物などを総じて一般資産と称し(国

土交通省 2015a)、年次や種別に応じて算出することができる。本研究で算出した対象は建物のみとした。

2.2 氾濫解析のための機械学習モデル

図 2.1 中(b)は日本全国の浸水深を知るために必要な部分である。総合地球環境学研究所 Eco-DRR プロジェクトにより進められている研究領域で機械学習を用いた統計モデルによる浸水深予測がされている(本誌執筆時(2022 年 7 月)未発表)。特定河川の堤防決壊や河川から溢れた水に起因する浸水を対象とした個別評価でなく、氾濫原全体での面的な予測浸水深が全国一律に得られるという点では他に例がなく、本論文で第 5 章の統合評価を進める際、本モデルを使うことにより最大範囲で日本全国の評価が可能になる。

本モデルは、滋賀県が作成した水理モデル(図 2.1 中(a))の計算結果である浸水深と地形の関係を機械学習の一種・勾配ブースティング回帰木により学習し全国に外挿して予測値を得ている。破堤(堤防の決壊)は考慮しておらず堤防を越えた分だけ氾濫原に伝播する想定としている。

本研究では予測される浸水は「流域で貯留できるという集水能力」と捉え、その分布を知ることを必要とした。全国一律の評価をするために、本データを利用している。その際 200 年に 1 回の降雨という外力を想定した。理由は滋賀県が 200 年に 1 回の降雨を浸水警戒区域における建築物の建築の許可の基準に使っているからである。

地形条件に着眼してリスク評価をするため、予測変数は国土数値情報 5m-10mDEM などのオープンデータから生成する値や河川との隣接性などを利用している。妥当性の検証は「令和元年(2019 年)東日本台風 千曲川・那賀川氾濫の発表値」(国土地理院 2019b)との差分検証で行われた。

想定する降雨波形については、2.1 に示した滋賀県のモデルと同様、中央集中型モデル降雨(降雨継続時間は 24 時間)が採用されている。

2.3 潜在生息適地モデル

「豊かな自然環境を提供すること」を「野生生物の生息地が提供できること」と捉えると、未知の生息地も含めてどこがどのような環境条件によって生息地として決まるのかを解明することが課題となる。それを既知の観測位置と環境条件の関係でモデル化して明らかにする手法を整理する。潜在生息地を定量化した先に集水機能のある空間との重なりを検出し、最終的に共便益を目指す空間を特定する分析は別途、空間解析を行う。

ここでは潜在生息地を示す野生生物の中でも対象種として環境保全に訴求力の高い希少種「コウノトリ」を選定した。詳細な選定根拠に関しては第4章で後述する。

その観測位置と環境条件との関係を定量化するために図2.1中(c)の機械学習モデルを用いた。既知の限られた情報から面的に推定して未知の生息地発見に役立てることができる(Engler et al 2004)。生物の観察情報が不足していても保全上重要なホットスポットを推定することができ(Raes et al 2009)、この手法を用いて保護区選択をすることがある(Lehtomäki et al. 2019)。近年、生態観測技術の進歩で動植物観測データの利用可能性が向上したことや、市民科学のデータ取得は、潜在生息地を理解していく上で、大きな貢献をもたらしている。

GPS 衛星追跡

特に本節の目的に大きな影響を及ぼすのは、リモートセンシング技術やGPS衛星による追跡などの生物観測の技術向上と、統計モデルを使った現象の理解の急速に発展である(Kendall 2015)。例えば著者らの研究では、渡り鳥の衛星追跡データを得ることで季節的な行動把握(Shimada et al. 2016)や採餌環境の変化を把握すること(Shimada et al. 2018)が可能となった。これは対象個体に発信機を装着し、地上の環境情報の位置を人工衛星経由で取得するアルゴシステム (www.argos-system.org) と呼ばれる仕組みを活用している(CLS 2016)。本誌執筆時点で当システムを使って毎月4,500個体もの鳥が追跡されているほど生態観測技術としては一般的になった。

発信機の送信周波数の安定性、衛星の仰角、衛星が1回に通過する間に発信機からの電波を受信する回数などによって測位の度に位置精度は変動するが(樋口 2001)、上述の研究では最も精度がよい場合250mの誤差で収まる状態で位置が把握できている。

現在、再導入が進むトキ(環境省が実施)やコウノトリ(兵庫県(2005年開始)・福井県(2013年開始)・千葉県(2015年開始))の一部の野外放鳥個体についても位置追跡がされている。放鳥後の自然環境に順化する様子のモニタリングなどが目的である。鳥に装着させる器具の総重量は負担を減らすために生体の5%を下回ることが望ましい(Bander and Cochran 1991)という議論から、追跡装置の小型化は年々進んできた。福井県のコウノトリ放鳥個体の例では、成体になると4-5キログラムといわれる体重に対してGPS受信機も併せて搭載した総量40グラム、または70グラムの装置が使われている。GPS衛星の利用を組み合わせることで、装置の種別にもよるが誤差15m~20mとアルゴシステム単体よりも格段に精度が向上する。

このような GPS 追跡位置を活用する利点は主に以下 2 点に整理した。まず 1 点目は、調査バイアスが減らせることにある。調査に行きやすい場所、調査しやすい時間帯だけに観測データが集中するという偏りを避けることができる。2 点目が低コスト性である。人が同様の調査を行うことはほぼ不可能であり、現実的な費用で継続的な調査をすることも本手法が優良な点である。観測記録はデジタルデータとして蓄積され、利用可能性も高いことから研究に資するビッグデータとしての価値も高い。もちろん人の精緻な行動観測などに代わるものではないため、補完して活用するものと位置付けている。

今回、その貴重な位置データを初めて広域な生息地分布予測に応用した。データは福井県・兵庫県が福井県の飼育個体に装着し、その後のデータ取得・管理・編集を継続させているものである。

最大エントロピー法を活用した MaxEnt

生息地の分布を予測するための第一歩は、環境条件と生物の生息に関する指標との関係性の定量化が必要と言われている。この手法の背景にある基本的な考え方はそれぞれの生物は生育・生息に適した環境条件（ニッチ）が決まっているというものである(鷲谷 2010)。そこで未知の生息地も含めた潜在生息地を環境条件から推定する統計学的手法をとった。その予測手法は生息適地モデル（ハビタットモデル、種分布モデリング、ニッチモデル等とも呼ばれる）と呼ばれる。生物個体群に重要な環境要因を統計学的手法を用いて予測するものである(Kusumoto et al. 2017)。

近年、生態学の分野では、一般化線形モデル（GLM）等をはじめとする生物の空間的变化を扱うモデルの枠を超え、機械学習の活用や特定の要因を組み込んだ階層モデリングに発展するなどそのモデル手法は急速な発展を遂げている。そのモデル構築は「概念的なモデルの検討」「統計学的な検討」「キャリブレーション」「予測」「評価」という流れ (Guisan and Zimmermann 2000)を参考に段階的に進めた。

まず 1 番目には文献や現地調査から「概念的なモデル」を考えた。コウノトリの利用地点を GPS データで確認し、愛知県、岐阜県、福井県、滋賀県、徳島県で行った現地調査からは、レンコン田やため池など水はけの悪い浅水域を利用していることがわかっていった。その情報から、水田の重要性に加え水の集まりやすさに注目することとした。次に統計学的に当てはめられる手法を検討した。用意できる観測情報は生物の「在」「不在」のうち「在」だけである。双方に対してバイナリ（論理）、およびカウント（個体数や観測回数）データで揃えられれば、一連の説明変数との関係から二項分布やポアソン分布などの

一般化線形モデル (GLM) を適合させることができる。すると 2 値のうち「不在」を用意して「偽不在」として用意する必要がある。ただし、偽不在の与え方次第で精度は大きく変動する。今回追跡対象にしたコウノトリは幼鳥で探索的に行動する時期でもあり、利用しないと断定できる判断は難しく、できたとしても必ず偽不在地の作成に対して恣意性も入る。そのため「偽不在を作る手法は採用しない」判断をした。

そこで在データのみを適用した手法、最大エントロピー法をアルゴリズムとして利用した最大エントロピーモデルという機械学習法を用いることとした。近年最もよく使われている手法の一つで、在データのみの場合に精度がよいとされている (Guillera-Arroita et al. 2015)。予測値を 0~1 までの連続値で出力するオープンソースのソフトウェア MaxEnt (MaxEnt version 3.3.3e; (Phillips et al. 2006)) で実行することができる。

Maxent では偽不在に相当するデータを背景データ (Background data) として用意する。その環境条件の出現頻度と、すべての在データでの環境条件の出現頻度の比較に基づいて確率推定を行っている。不在データがない限り正確な分布予測は不可能なので、所与の条件のもとでの相対的な確率分布になるが、コウノトリの出現する分布確率の相対値を計算することができる。予測結果としては、環境要因の貢献度合いや AIC も求められるが、それに関してもモデルに対する相対的な効き具合や精度ということになる。

原理としては、以下の最大エントロピーを求める公式 (Jaynes 1957) に従う (式 2.1)。

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (\text{式 2.1})$$

ここで、エントロピーは $H(\hat{\pi})$ は、有限集合 X 上に存在するポイントのセットと、未知の確率分布を π で表す。環境情報を 6 種 (全国版では 4 種) 用意しているため、それぞれ高次元に確率分布が出る。確率は 0 以上であり、確率の合計は 1 とする。この条件を満たす確率分布は最尤推定で求まる。

MaxEnt はサンプルバイアスを補正することが可能であるが、今回 GPS 位置を使うことで、先述の通り調査しやすいところだけ記録するなどのバイアスが掛かっていないので、補正はかけていない。また GPS 衛星で短時間間隔に連続取得する位置情報が包含する空間自己相関の問題に関しては 1km という大きな空間解像度では影響は小さいと捉えたことと、空間間引き (同じグリッド内に複数回観測されても 1 回の在とみなす) で考慮した。別途解像度を上げた研究では、空間自己相関を組み込んだ階層モデル (条件付き自己回帰モデル) 構築を進めている。

モデルが決まった後はキャリブレーションを行う。パラメータ設定だけでなく、環境変

数の切り捨ても含む。ここでは環境変数間に相関があるとモデルの精度に悪影響を加えるという観点から多重共線性の高い変数のうち片方を除外した。「予測」は出現確率を0-1の範囲で得ようロジスティック変換して出力している。「評価」は既往研究などとも照らし合わせていき、今回考慮できていない部分などを整理いくこととした。今回考慮出来た、或いは出来ていない部分に関しては以下に詳しく整理する。

予測が含む不確実性

MaxEnt というモデルの手法とは別に、内容的な不確実性について明示しておく。コウノトリは大型の動物で高い移動能力を持つ。生息地のコンディションや餌資源量により採餌場所を季節移動させる傾向があること(Naito and Ikeda 2007)、個体による行動パターンの差も大きいとされている。つまり特定の環境条件に依存しなければ生息できない種ではなく、状況に応じて環境を選好する能力を有する。そのため予測にはそれら事情や個体の選好性に関わる不確実性が多く含まれる。

また、分布は環境の好適度だけで決まっているわけではなく、種間の競争、捕食者の存在なども関係し、環境の好適範囲より狭い範囲にしか分布しないことも多い。それら動物間相互作用は今回のモデルでは考慮しておらず、今回は出現予測をする範囲を、景観構成、土地利用、水条件などの非生物的な環境からのみに限定していることを図2.2に示しておく。

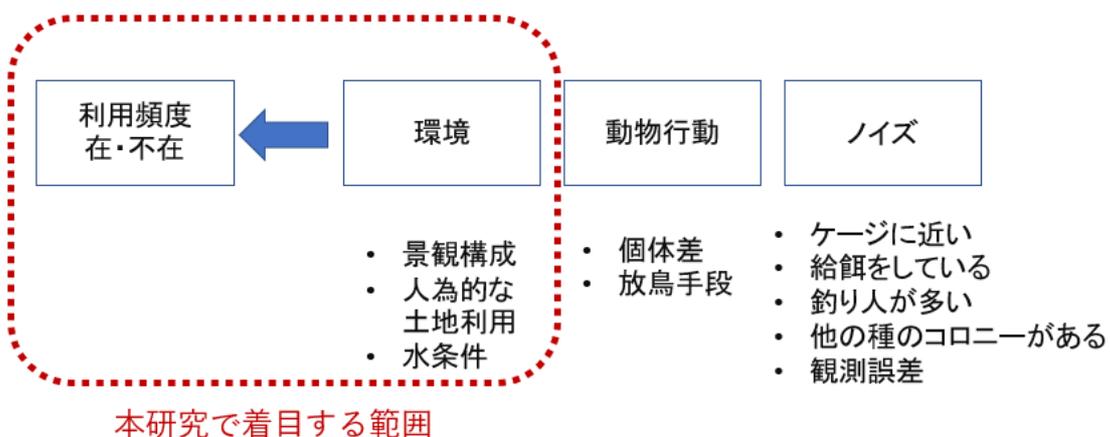


図 2.2 生息適地モデル対象範囲

3. 洪水調整機能の評価

本章では「氾濫時に河川周囲の水田生態系が保全されて水が行き来できるようになっていると人や資産の被害が軽減でき、平時には豊かな野生生物空間を維持できる」氾濫管理のうち、前者の「氾濫時に河川周囲の水田生態系が保全されて水が行き来できるようになっていると、人や資産の被害が軽減できる」という部分を不連続堤防（霞堤）と水田生態系による洪水調整がもたらす経済効果の分析で明らかにする。以下統一的に霞堤と称する。

霞堤は、要件定義をベースに性能設計・施工されるインフラとは異なり、形状や機能の不明瞭性が高く、また地域固有であるという特徴を持つ。それ故に一般化して捉えにくいのが、定量的な評価を目指す文脈においての霞堤を形状・歴史・地形・範囲などの点で整理していく。

まず「霞堤の概念図」を図 3.1 に示す。河川堤防の一形態であり、洪水が集中しやすい部分の堤防を部分的に開けている。堤防が流域内で所々切れているため不連続堤ともよばれ、洪水時に堤防の切れたところから氾濫流が出入りできる。湛水する範囲は一時的ならば収穫に支障がでにくい水稲を育てるため、主に水田として利用がされている。また冠水範囲が拡散しないよう外側にも堤防を築き市街地を防御した。不連続になった堤防と二重に防御する一体の仕組みであり、相互が関連したシステムとして働く（図 2.1）。この形を大熊は「越流堤と遊水地を組み合わせた治水システム」と表現している（大熊 2020）。

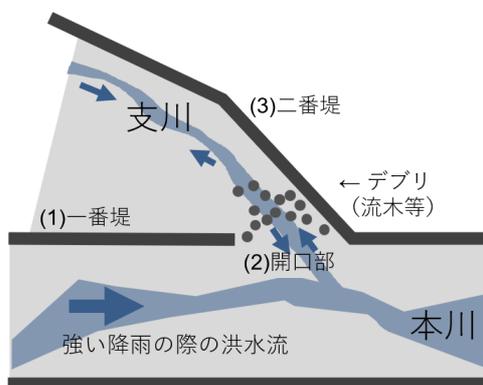


図 3.1 霞堤のシステムとしての概念図

(1) 本川の一番堤 (2) 開口部 (3) 二重堤

霞堤について最も古く記録が残るのは1500年代後半であり、考案したのは甲斐地方の有力大名であった武田信玄と言われている(Katayama et al. 2015)。しかし地域の知恵の結集の一つでもあり起源を明らかにできるものではない(大熊 1987)。国外の管理された氾濫と

は違い急峻河川を相手に狭い国土のゾーニングとセットで扱われるべき施策という点で、本論では霞堤は日本独自の氾濫管理の装置として捉えている。

3.1 手法

本研究は分析データ・モデルの利用可能性から滋賀県の一流域を一つの評価対象とした(図 3.2)。滋賀県では日本最大の面積と貯留量を誇る琵琶湖(面積 670.25km²)を中心として平地が広がり、その外側を分水嶺が取り囲んでいる(滋賀県 2010)。1 本以外のすべての河川が琵琶湖に向かって急峻に流下する地勢で、低平地は多くの洪水被害を受けてきたという地域特性がある(滋賀県 2021)。

研究対象とする滋賀県の一級河川、天野川(流路延長 19.0km, 流域面積 111.6km²(滋賀県 2016a))流域は古来より破堤による氾濫など水害の歴史を持つ(滋賀県)が、その物理的対策のひとつが霞堤といった装置であった。



図 3.2 天野川の位置

霞堤は県内で他の河川にも存在しているが、天野川では現在でも集落が霞堤の機能(効果)を認知し、その一時貯留地を「集落の共有地」として管理するなど、機能が維持されている取り組みがあるため、その理由からこの流域を対象とした。

天野川は標高 1084m の水源地から河口である琵琶湖の標高 87m までを流路延長 19.0km で流下する。河道は両端を山地に挟まれ、谷底低地・氾濫原に位置し(Wakamatsu and Matsuoka 2013)、傾斜の転換点(河口から 15km 付近)を境に上流域は 8/1000、中・下流域

は 4/1000 という河川勾配を持つ。土地利用としては水田が卓越するほか、本川沿いには集落、農地、水路などが発達する（図 3.3）。異質な土地利用の集合体は「里山」として称され(IPSI 事務局 2020)、その動的モザイク性から生物多様性の高い空間とされる(武内 and 三瓶 2006)。

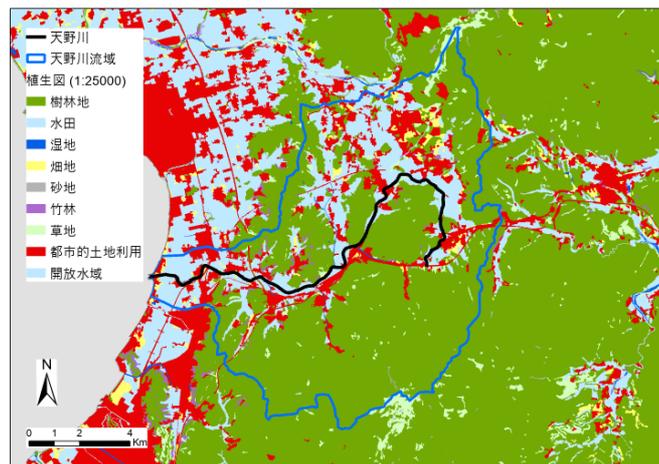


図 3.3 研究対象の天野川流域の土地利用

3.1.1 浸水深と被害額予測

本節では「霞堤が洪水調整機能を働かせると浸水による被害額の軽減させる」を明らかにするために、氾濫水理シミュレーションと地形データを用いて氾濫原の浸水深を予測した。氾濫水理シミュレーションには、瀧らの水理モデル(Taki et al. 2019)を用いた。主要河川からの氾濫だけでなく小河川や用水路などから水が溢れる内水氾濫も予測する本水理モデルを用いることで、微少な浸水域の差も「霞堤による接続性があるケースとないケース」の比較をすることが可能となる。滋賀県では天野川周辺の河川・水路群も網羅的にデータ化しており、様々な降雨波形から内外水の区別なく流出域・河道域・氾濫域までの一連の水理現象を統合的に扱える。モデルの概念図を図 3.4 に示す。

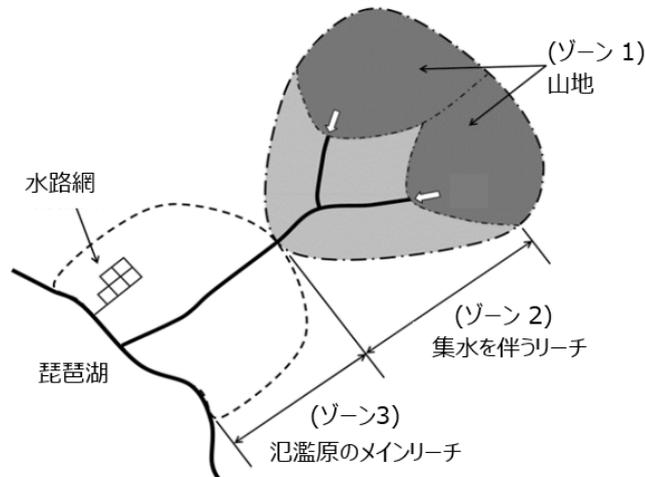


図 3.4 統合型水理モデル概念図

降雨の流出、河道内のフロー、そして越流や破堤により氾濫原で流出するプロセスを予測しているモデル。集水域を3つのゾーンに分け、図中ゾーン1は山地、ゾーン2は集水を伴うリーチ、ゾーン3は氾濫原のメインリーチを示す。

最初に、霞堤の介在で現れる「浸水深低減効果（氾濫原での浸水がどれだけ減るか）」を明らかにする。評価外力としては再現期間を2年、10年、30年、50年、100年、200年、500年、1000年とする8降雨を流域全体に与え、浸水深を予測する。「再現期間」とはある現象が平均的に何年に1回起きるかを表した値を言い(気象庁 2022)、地域によってその降水量は異なる。例えば滋賀県においては再現期間100年の雨は、109mm相当/1時間(Taki et al. 2010)という雨が平均して100年に1回起き得るということを意味する（100年に1回しか起こらない訳ではない）。再現期間が長くなるほど、より稀な雨ということになり量も多くなる。200, 500, 1000年確率降雨は、100年確率の降雨波形をそれぞれ1.2倍、1.5倍、1.8倍している。

氾濫水理シミュレーションでは、現況の霞堤が介在した場合と、すべての開口部を閉じ霞堤が介在しない場合2通りの浸水深比較を行い、介在の場合の減災効果を定量値で示す。

それぞれ以下の通りケース1、ケース2と呼称する。ケース1が現況で、本研究でその有効性を確かめたいスキームである。ケース2は霞堤がない状態を疑似的に作り出している。現実的には霞堤は閉じているか、開いているかの二択の議論ではない。実際に京都府を流れる淀川水系の一級水系である「桂川（かつらがわ）」では、水害が度々発生することに地元住民からは不満の声があり、全11か所中の4か所の堤防に盛土し洪水流を入りにくくする対策を施すことになった。流況が変化することから、環境及び治水に配慮した霞

堤のあり方が議論されている(京都府南丹土木事務所 2021)。ただし、今回のシミュレーションでは上記の事例のように遊水させる「度合い」の調整は行わないものとする。

具体的には部分的な低下部を無くすため、堤防高を前後で平滑化した高さまで上げて河道と氾濫原の水の行き来を断っている。(図 3.5, 3.6)。これにより「浸水深低減効果(氾濫原での浸水がどれだけ減るか)」を、ケース 1 とケース 2 の差分で示すことができる。

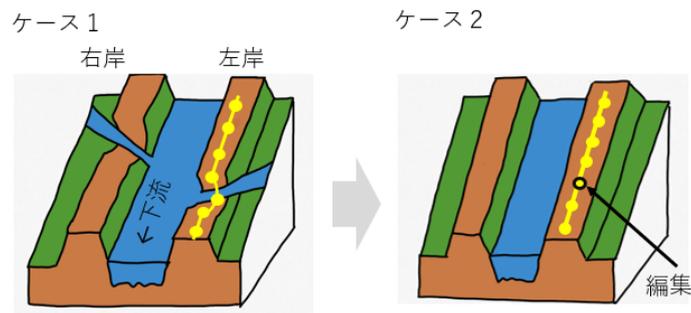


図 3.5 ケース 1 からケース 2 における堤防の縦断図の変更イメージ。

それぞれの点は堤防上で地盤が測量された箇所を示す。

霞堤の位置は堤防高の計測値から特定した。なお河道内の計算水位によらず破堤しないと仮定する。ケース 2 の堤防高を変更については、設定の詳細な方法を以下に示す。

ケース1 (開口部あり)

ケース2 (開口部なし)

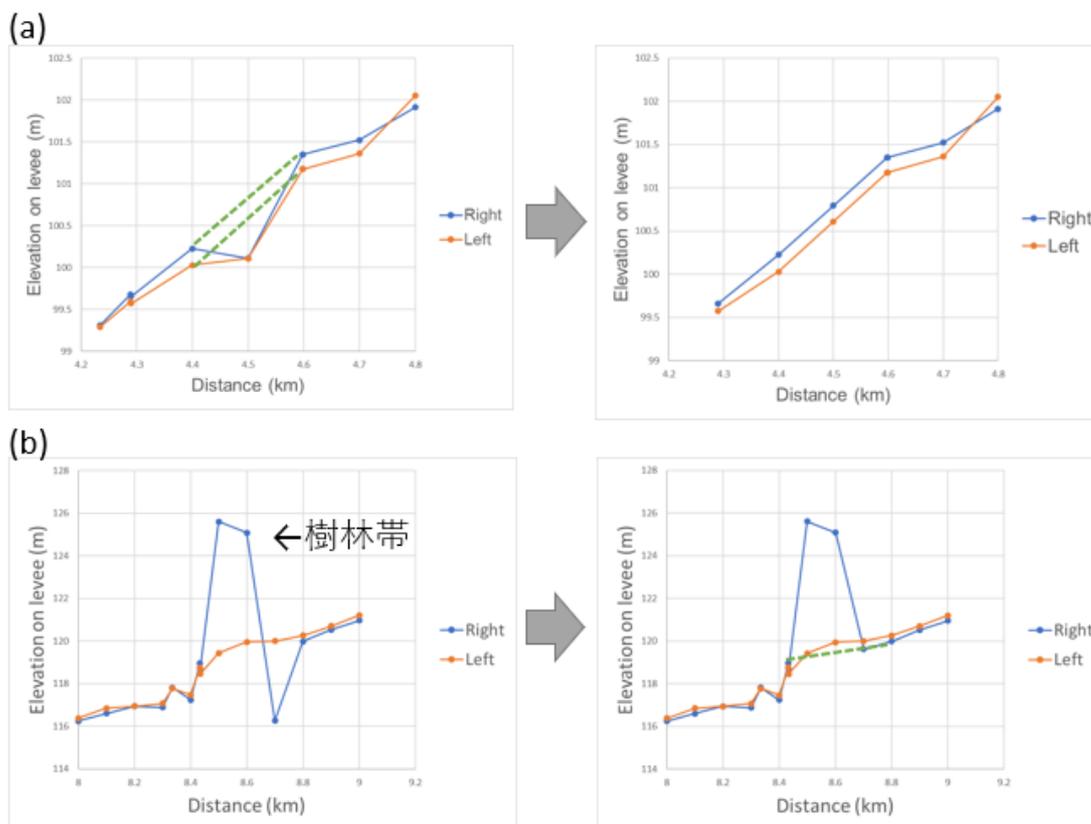


図 3.6 堤防高の設定方法。開口部（部分的に低い箇所）というのが不連続堤防（霞堤）の部分であり、これを閉じて連続堤防化した場合のシミュレーションを行う。原則的には前後の堤防高で線形補間する(図中(a))。変更樹林や橋梁など地物が検知されている場合(図中(b))もあるが、原則は堤防高だけ変更するためそれらに改変は加えない。

期待被害額の推定法

霞堤を介在したケースの経済効果は貨幣価値で示す。施策を講じることで避けることができる損害額、省くことができたインフラなどは経済的な便益として示すことができる(Ruangpan et al. 2020)。生態系を活用した防災・減災のアプローチが進まない理由のひとつは全体の便益が過小評価されているからとも言われており(Renaud et al. 2013)、経済価値で表出させることは重要と考える。

日本国内で浸水被害評価手法の代表的なものとしては「治水経済調査マニュアル(案)」(国土交通省水管理・国土保全局 2020)が定められており、被害額推定をすることができる。建物、家庭用品、事業所資産、農作物などを総じて一般資産と称するが(国土交通省 2015a)、本研究では建物被害額の算出を同マニュアルに従って行うこととした。

被害額は浸水深に対応した被害率を用い個々の建物資産に対して算出する。地盤勾配により3パターンに分かれるが対象地の地形から勾配1/500以上の値を対応させる。地盤勾配で異なる被害率を適用するのは氾濫水の流体力の差を考慮したものである。ただし被害率は段階的に設定されているため値と値の間の差異がわかりにくい。そこで微細な経済効果も定量化するために近似の関数(式3.1)を独自に用意する。

$$y = 0.2572x + 0.0797 \quad (\text{式 3.1})$$

y は被害率、 x は浸水深を表す。決定係数 R^2 は0.942であった。なお0.1m以下の浸水深は水理モデル設計上のマージンエラーとみなし x が0.1以下の場合には計算から除外する。

次にケース1とケース2の損害額の期待値を求める。 $T^1 \sim T^8$ (T^i) の8つの再現期間 (T^1 は2、 T^2 は10、 T^3 は30、 T^4 は50、 T^5 は100、 T^6 は200、 T^7 は500、 T^8 は1000) について、ケース1とケース2の損害額の期待値を計算する。

建物の予想損害額 C は式(3.2)に示される通り、延床面積×面積当たりの評価額×被害率×補正係数で求める

$$C(\text{JPY}) = a \times b \times \gamma \times y \quad (\text{式 3.2})$$

ここで、 a は延べ面積 (m^2) であり、建物面積と階数の積は株式会社ゼンリンの建物データベース「Zmap-TOWNII」からデータを取得した。 b は 1m^2 あたりの土地価格の評価額であり、都道府県別に発表されている。滋賀県は192,200円(固定値)である。 γ は、地価公示に基づく補正係数で、建物の階数(f)は、 $f < 3$ のとき $\gamma = 1.0$ 、 $f \geq 3$ のとき $\gamma = f/2$ となる。最終的に T^i に対するケース2のコストからケース1のコストを差し引いた値が減らせる被害額である。

次に式(3.3)を用いて、年間の期待コスト削減額 w (円) を算出した。

$$w = \sum_{i=n-1}^n \{ [P(T_i) - P(T_{i+1})] \times (D_i + D_{i+1}) / 2 \} \quad (\text{式 3.3})$$

ここで、 w は1年あたりの平均的な期待コスト削減額の合計で表されている。この値を霞堤介入の経済価値とした。

3.1.2 一時貯留できる空間の特性抽出

霞堤自体は不連続な堤防という構造物であり、生物の生息地を期待できるのはその構造物によって冠水がおきる空間である。主に霞堤付近の水田(私有地または共有地)が一時的な貯留域として貴重なゾーンとして機能してきた。ただ水稲耕作の観点からはそれを阻

害する冠水は避けたく、その遊水は歓迎されるものではない。また公的に行政から減災のための貯留を求められている訳でもない。その点から一時貯留する水田は減災機能を果たしながらも地図上で明確に区域が示されることはなく、そのことがこの霞堤による接続性の価値を評価することを難しくしていた。今回空間を特定することは、その有効性評価に欠かせない作業となるが、その浸水深と範囲を明らかにするには降雨の強度を決めて冠水域を特定しなければならない。

本論では、滋賀県が、土地利用や建築規制のために 200 年の再現期間を用いていることから、それが重要な外力であるとして捉えた。そこで、霞堤が近くであり、200 年再現期間で 1m の浸水深が予想される水田を遊水できる空間として抽出した。前述の通り、この空間は一時貯留が許容されている空間と同義ではない。地形上確率的に遊水が予測される空間であることを理解してこの空間の活用を検討していく必要がある。

地形的湿潤度からみる遊水空間の特性把握

一時貯留できる空間の潜在的な湿潤度を示すために、3 つの情報を用いて 50m×50m の各格子における値を定量化した。1 つ目の値は、地形の物理的な特徴に関連し、土壌水分を特定することが期待される Topographic Wetness Index (以下 TWI) である。これは、式(3.4)で計算される。

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan \beta}\right) \quad (\text{式 3.4})$$

ここで、 α は集水面積 (m^2/m)、 β は斜面勾配 (ラジアン) を表す。TWI は、250m 解像度の DEM (デジタル標高モデル) (国土地理院 1997) から作成した地形図から算出した (図 3.7)。DEM の解像度は 250m と 50m の 2 種類があり、日本全国をカバーする等高線ベースの DEM が用意されていた。しかし、50m 解像度の DEM は、250m 解像度の DEM に比べて TWI 値の算出範囲が狭く、細かすぎるといった問題があった。水文学的なプロセスを理解するためには、流域スケールでの潜在的な湿潤度を知る必要がある。そのため、250mDEM が妥当であると判断した。

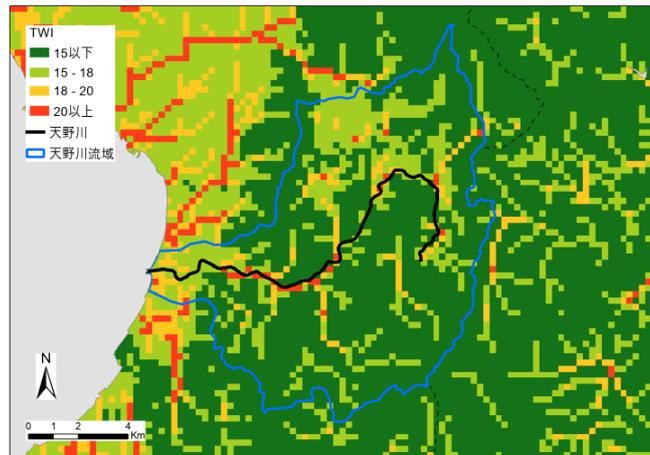


図 3.7 対象領域内の地形湿潤指数 (TWI)

土壌特性については日本の国土全域を網羅する「全国デジタル土壌図(縮尺 20 万分の 1 相当) (農研機構 2017)」を利用して評価した。この土壌図は 2011 年に策定された分類基準包括的土壌分類体系に基づいており、土壌大群を 10 大群に分類している(神山 et al. 2017)。その一つが低地土大群であり、排水不良の性質をもつ (図 3.8)。そこでグリッドがその低地土大群のタイプであるかどうかを判定した。

なお低地土大群は F1 低地水田土、F2 グライ低地土、F3 灰色低地土、F4 褐色低地土、F5 未熟低地土の 5 つの土壌群がある(Obara et al. 2015)。

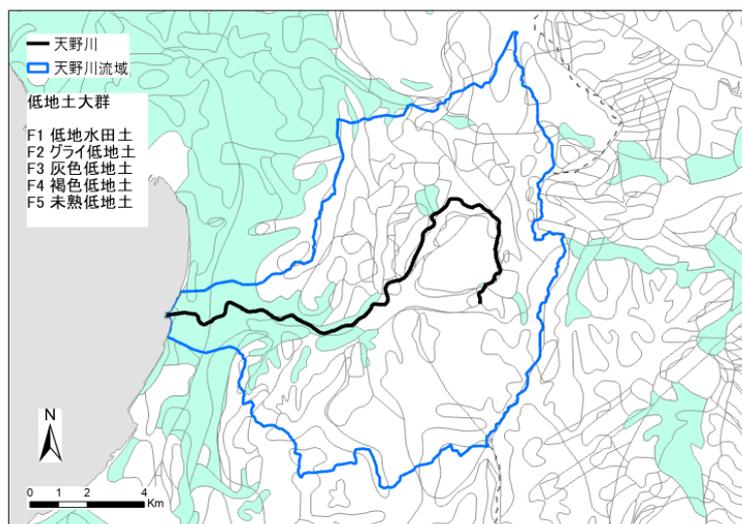


図 3.8 対象領域内の低地土大群の分布図

出典：農研機構 (2017) 「縮尺 1:200,000、全国デジタル土壌図」を抜粋加工

最後に、「一時貯留水田」と「低位置帯」のポリゴンデータ(国土地理院 2015) (図 3.9) をオーバーレイして、各グリッドが低地帯に位置するか特定した。低位置帯データは周辺部よりも標高が低く、排水が困難である地帯を整備したものである。

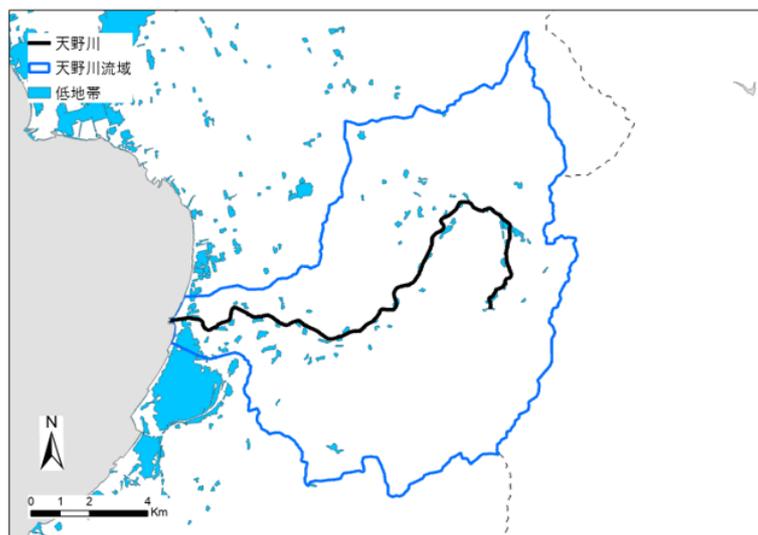


図 3.9 対象領域内の低地帯の分布図

出典：国土地理院（2015）国土数値情報 低位置帯データ

3.1.3 土地利用変化分析・社会調査

当該地の最も古い測図結果の 1/25000 縮尺旧版地形図（1920 年）と、最も新しい調査結果の第 2 回～5 回 1:25000 現存植生図(環境省生物多様性センター)をオーバーレイし、水田、樹林地、畑地、都市的土地利用、その他、計 5 種の土地利用面積変化を集計した。2 つの地図を比較することで、土地利用の変化を定量的に把握することができる。すべての空間データの解析は、ArcGIS Pro2.6.3 (ESRI Inc., Redlands, CA) を使用した。

また、浸水想定域の現在の農地としての使われ方を整理するため、当該自治体、滋賀県米原市にヒアリングを行い農地行政上の位置付けと継続支援に対する確認した。

3.2 洪水調整機能の結果

地盤高から以下に示す 9 か所の霞堤が特定することができた (図 3.10)。この作業は河川によっては地形図に描かれている堤防の開口部分を検出して特定することもできる。

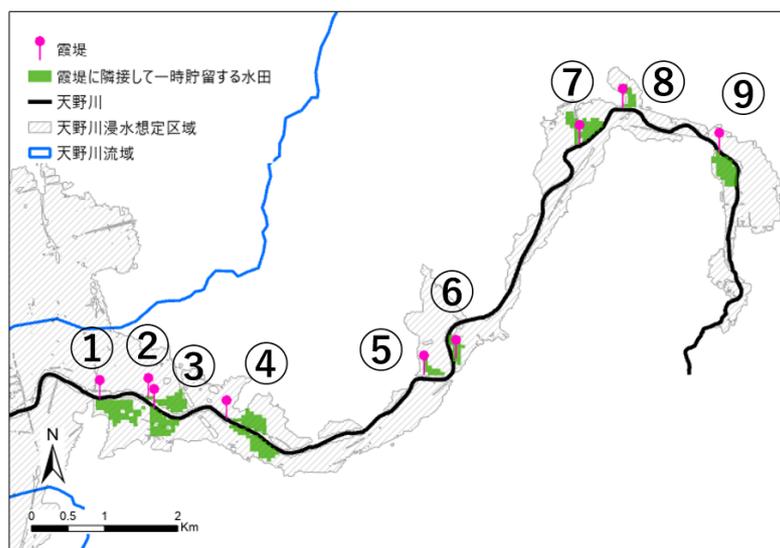


図 3.10 天野川本川で検出された 9 か所の霞堤。緑色部分が霞堤に付随し一時貯留する水田を示す。(200 年確率降雨で 1m 浸水する水田)

3.2.1 浸水深と被害額予測結果

氾濫水理シミュレーションによる 8 降雨パターンの予想浸水深（平均値・最大値・分散）を以下の表に示す。いずれも所与の条件下（河道断面・氾濫原地盤高・河道粗度・破堤無し想定）による数値、雨の降り方、建物の構造、人工物の設置、季節による植生の違いなどにより状況は異なることを明記しておく。

表 3.1 確率降雨パターン別 予測浸水深(範囲は天野川流域) (単位：mm)

再現期間 (年)	ケース 1			ケース 2			ケース 2 - ケース 1 (平均)
	平均	最大	分散	平均	最大	分散	
2	260.7	2055.0	39.1	260.7	2054.0	39.1	0.0
10	319.7	2209.0	65.1	315.6	2207.0	65.7	-4.1
30	390.5	2413.0	93.1	391.1	2413.0	93.4	0.5
50	432.4	2563.0	107.7	435.0	2562.0	108.8	2.6
100	492.5	2923.0	131.4	519.4	2928.0	137.7	26.9
200	589.5	3170.0	168.8	620.5	3175.0	179.0	31.0
500	767.9	3470.0	269.6	805.5	3443.0	287.9	37.7
1000	939.1	3748.0	362.6	979.1	3679.0	388.2	40.1

注記：各数値は天野川流域で算出した値。モデルグリッドの浸水予測値が 0.1m 以上の地域のみを計算対象とした。

100年確率降雨を過ぎた評価外力から、堤防を閉じると浸水深が大きくなり最大1000年に1回の降雨時には、流域全体で約40mm浸水を増大させる結果となった。

図3.11では浸水深の増加により被害の増大が予想された建物の分布を確認することができる。霞堤を閉めて連続堤防にすると浸水深が増える建物は霞堤の周辺に分布することがわかり、浸水深の増加は最大で0.37mと推定された。

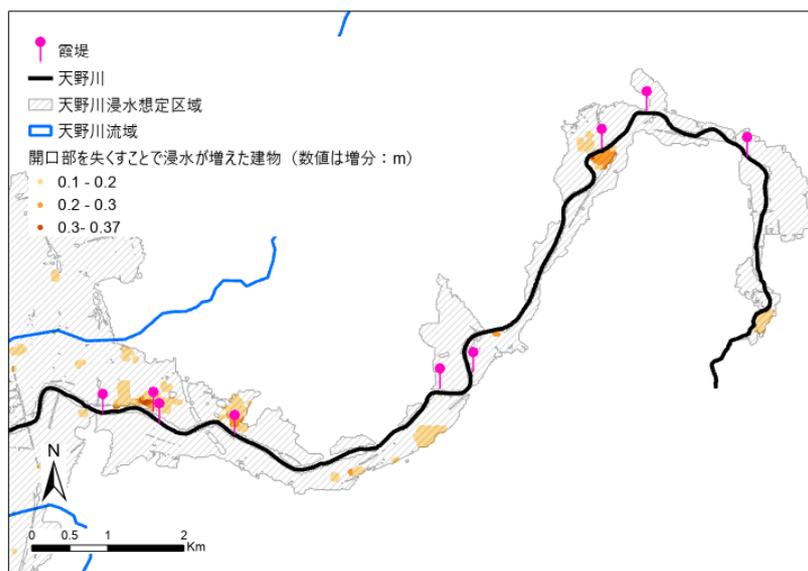


図 3.11 霞堤を閉めて連続堤防にすることで浸水深が増える建物の分布

ケース1とケース2、それぞれで起こりうる損害の量を明らかにするために床上浸水戸数を表3.2で比較した。100年確率降雨を過ぎた評価外力から、堤防を閉じると床上浸水する家屋の戸数が大きくなる。つまり、現状の開口部のある堤防（霞堤）の状態が便益を得ることが示されている。

表 3.2 床上浸水（浸水深0.5m以上）の浸水が予想される建物の総数（単位：戸）

再現期間(年)	2	10	30	50	100	200	500	1000
ケース1 (堤防が開いた状態)	149	473	1162	1677	2435	3663	5472	6603
ケース2 (仮に堤防を閉じた状態)	149	455	1162	1679	2755	4044	5768	6844

図3.12に示すのは、8つの確率降雨パターン別の予測総被害額である。額は天野川流域全体で合計している。10年確率降雨を除き、ケース1（現況霞堤を開いた状態）の方が、

被害額が小さい結果となった。

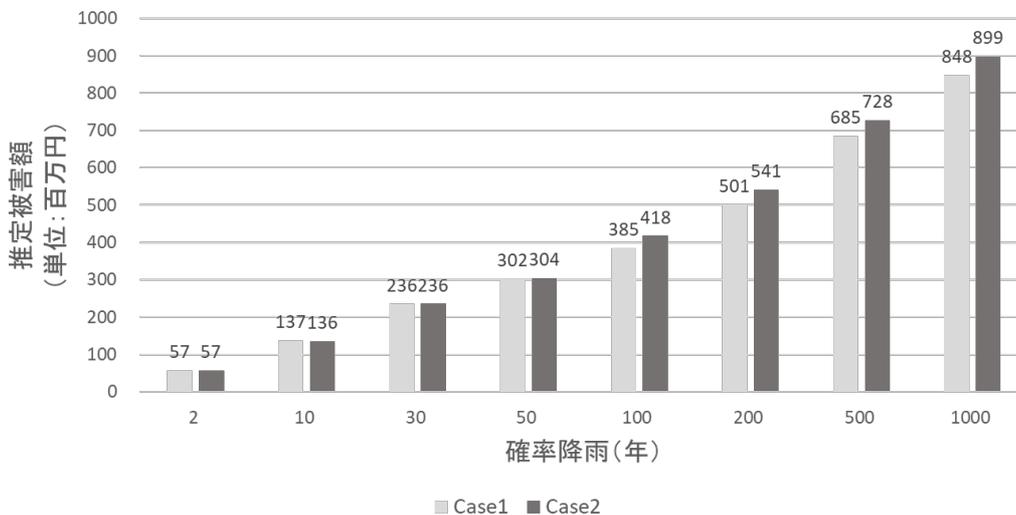


図 3.12 再現期間別期待被害額

再現期間 2-1000 年降雨、ケース 1・ケース 2 それぞれの推定平均浸水深 (浸水深 10cm 以上による被害額を対象)。

図 3.13 に示すのは、評価区間別の期待減被害額である。2 年から最大 1000 年の間で、被害軽減額に区間の洪水生起確率を乗じて計算している。

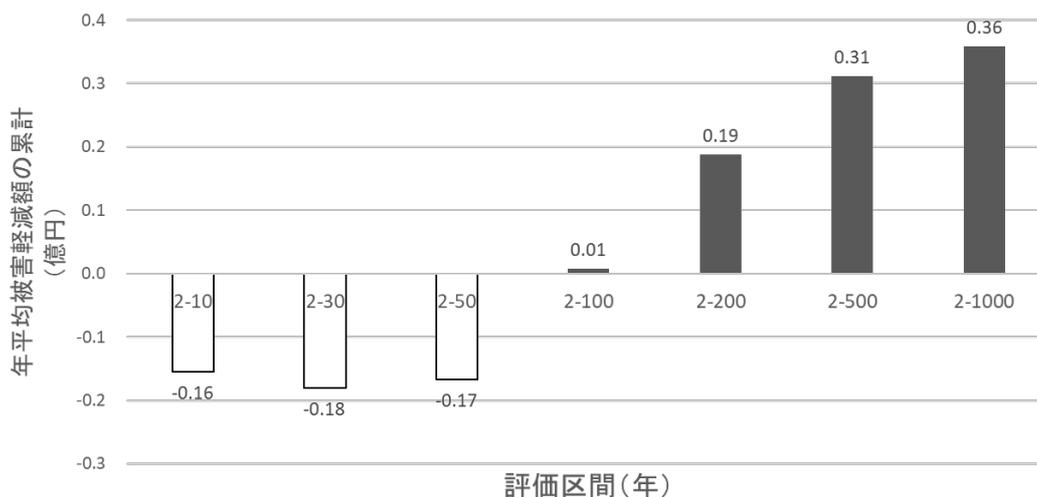


図 3.13 評価期間別期待減被害額

(2-10 年、2-30 年、2-50 年、2-100 年、2-200 年、2-500 年、2-1000 年の各区間)

これにより霞堤が維持されることは、2 年から 1000 年確率降雨の最大評価区間において

3,600 万円の期待減被害額をもたらすと試算された。「霞堤」が隣接する水田（一時貯留水田）の全体面積は 817,500 m² である。1000 m² あたりの期待減被害額を出すと 43,830 円となった。

3.2.2 一時貯留できる空間の特性

「霞堤」が隣接する水田（一時貯留水田）が、それ以外の流域内空間とどれだけ地形特性、地質特性が異なるのか明らかにした結果を示す。地形的湿潤指数（TWI）平均値に関しては、域内は 18.3%、域外は 14.7%と域内の平均値が高かった。土壌タイプとして排水不良の性質が高い低地土大群の割合に関して域内は 66.4%、域外は 14.6%と域内の方が排水不良の傾向が高かった。低位置帯と重なる率は域内が 24.2%、域外が 2.4%と域内の方が低位置帯と重なる率が高かった。

3.2.3 土地利用変化と社会調査結果

歴史的な変化と現状に関する調査では、「霞堤」周辺の水田が今までどれだけ地域に守られてきたか、今後どう守るべきかを知る情報を得ることができた。

まず本研究で対象にした 9 つの霞堤は 200 年確率降雨における浸水想定域も含め、農業振興地域の整備に関する法律に定められた農業振興地域に包含されていた。ここは県が定める「滋賀県農業振興地域整備基本方針」（滋賀県 2016b）により市区町村が優良農地として指定した区域であり、農地以外の転用は禁止されている。農地からの除外要件については上記方針内で厳しく定められており、浸水域が含まれる米原市において除外されるケースは殆ど無い。また法律上は、宅地やソーラーパネルなどの開発行為は許可されない。つまり、200 年に 1 回の降雨で 3m の浸水が予想される土地に関しては法律上農地として維持が義務付けられ、保全される対象となっている。

ただし高齢化が進む状況下、農地維持に課せられる農家の負担は大きい。農地が浸水害を被った場合その損害をカバーできる可能性があるのは農業共済など個別に加入する保険等であり、自助努力の範疇に過ぎない。民有地である水田が流域に減災効果を発揮しながら同時に経済的なロスを被ったとしても、公的に補われることがないのが現状である。

水田の多面的機能に対して経済的な支援をする仕組みとしては 2015 年から「多面的機能支払交付金」が法律に基づく国の制度として存在している。これは農用地の保全に資するものであることから、上述の農業振興地域の整備と連携している（農林水産省 2020a）。滋賀県ではこの制度を独自に運用しており、防災・減災型、生態系保全型の田には 10a あた

り 1,800 円、水路更新など資源の長寿命化の活動を行う田に対しては上限単価である 4,400 円の交付金を支給している。

しかし米原市内全域において防災・減災型での活用事例は存在していないことが米原市へのヒアリングよりわかっている（2020 年 11 月実施）。その理由の一つは防災・減災型は田面からの排水コントロール、いわゆる「田んぼダム」（吉川 et al. 2009）に支払われることにある。急峻地が多い米原市でこれを実施すると法面の崩壊につながる危険性があり実施をしていないのが現状である。

3.3 考察

本章では霞堤を介在させる洪水管理の効果を経済価値で示すことができた。洪水の検証に関して、国内で唯一実態調査を記録している情報として水害統計(国土交通省水管理・国土保全局)が挙げられるが情報が最小単位でも市区町村であり、特定の堤防形態の損害を評価できるものではないため今回は参照していない。しかし 2.1 に整理したとおり、本モデルは公的に条例を支える役割も果たし、十分な計算結果を得られると考えられる。

今回氾濫水理モデルで計算された浸水深の増大は堤防高の変更のみにより生み出されている。そのため精緻な値は別途詳細な水理シミュレーションが必要ではあるが「霞堤が閉じられ河川と氾濫原の接続性が欠如すると、100 年確率降雨を過ぎた評価外力から、堤防を閉じると浸水深が大きくなり最大 1000 年に 1 回の降雨時には、流域全体で約 40mm 浸水を増大させる」結果となった。つまり、強い雨ほど現状の開口部のある堤防（霞堤）の状態の方が被害軽減できていると示している。

浸水が増えた空間は霞堤付近に集中しており、周囲より低い集水性の高い空間の堤防が閉じているので、氾濫原の内水が河道に排水できなくなり建物被害が増大したと解釈できる。これは天野川の霞堤が「内水排除」の役割を果たしていることを意味する。なお「内水排除」を目的とした霞堤は同時に遊水による「一時貯留」や破堤した場合に「氾濫水を戻す」機能を兼ねることが多いとも言われている(寺村 and 大熊 2005a)が、ここでは破堤を想定したシミュレーションをしていないので効果の提示は「内水排除」に留める。

「霞堤」が隣接する水田（一時貯留水田）の地理情報からは地形湿潤指数（TWI）から高い集水性、土壌タイプから排水不良の性質の高さが見いだされた。冠水頻度の高い空間は一般的に生物相が豊かであると言われており(萱場 2000; Tockner and Stanford 2002)、地形的な集水性の高さ、土壌の水はけの悪さは特定の生物の生息地に寄与する可能性がある。周囲より低地で、集水しやすい空間は「氾濫水による冠水を利用した生活史戦略を持

つ個体群が維持されること」(応用生態工学会 2019)であることが期待される。実際天野川流域では貴重な日本固有種のモリアオガエル、ビワマスの生息が確認されているほか、国の天然記念物として文化財指定されているゲンジホタルの発生地も霞堤周辺に位置することがわかった。

国より下位である県が管理する天野川は、国が管理する大河川と比べ、予算も限られる(滋賀県 2016a)。このような状況下、自然資本の価値を見積もり、最大限活用することは喫緊の課題であった。実際国から認可を受けている当該地の河川整備計画でも超過洪水時の減災に対策として、霞堤などの整備・保全による対策強化が明記されており(滋賀県 2019b)、流域全体での治水に取り組みに対する期待は大きい。その意味でも経済価値や環境の整理が進んだことは意義が大きい。

ただし、結果には重要な今後の課題も付記しておかなければならない。本研究では流域全体の便益のみを扱った。損失を考慮していないことに加え、発生した便益がどの空間や主体に帰着するのかという点は今後考慮していく必要がある。

まず霞堤の介入という施策が流域全体に対し公益的な便益を生むとしても、農家にとっては外部経済効果でしかない限り彼らの便益になり得ないことが重要な点で、それを前提に維持のあり方を考えなければならない。下流の減災(受益)のために上流が負担を強いられることは地元の方にとっては容易には受け入れがたいという声が上がること(朝日新聞 2021)は必然と考える。具体的に考えられる損失は農業被害額、流入するゴミの処理額、堤防維持費などである。

現在、霞堤が介入し湛水した水田の農家が農作物の災害補償を受けるには、農家自身が保険・共済などに加入し、農業災害補償制度内で損害を回復しなければならないこと(農林水産省 2020b)が維持の課題であることはヒアリングでも挙げられた点である。大規模な遊水池機能を持つ場合は河川管理者が「用地を買収する」か「民法土地役権を設定し土地価格の一部を補償費として所有者に支払う」2つの選択肢があるが、霞堤のような小規模な治水の仕組みの場合、慣例的に水田に遊水させている事例がほとんどであり(宮崎 et al. 2002; 杉浦 2007)このことが湛水する水田の維持を難しくしている。

霞堤のシステムや高頻度冠水を受け入れる水田維持のために地域や社会の支えは不可欠で、そこに経済効果の認知・共有は欠かせない。今回算出した経済効果を現実的な値に近付けるには、より精緻な物理計算が必要となるが、維持に対する「公平な負担」に関する協議に資する手法の一つとなることを期待する。

さらに遊水の際発生する塵芥(漂着物)の処理は今もよく聞かれる問題である。神奈川

県を流下する一級河川「鶴見川（総延長約 42.5km）」には河口から約 15km 地点に越流堤（堤防が一段低くなっている堤防）を設けた多目的遊水地が整備されている。これは霞堤とは呼ばれないが、仕組みは同じで、大雨により河川の水位が上昇すると越流堤から流水を遊水地に流し込み、河川の水位が下がると排水する。この出入りにより下流の洪水リスクを低減する。実はこの排水後には多くの塵芥（漂着物）が残されるという事象が発生する（写真 3.1）。



写真 3.1 神奈川県横浜市港北区小机町 鶴見川河道内（2018 年 3 月 9 日 筆者撮影）

似たような現象は霞堤から水が入る私有地でも「大きな負担」として聞かれる。三重県の上野遊水地の事例では、民地部分の塵芥処理は土地所有者だけでは困難を伴い、地元住民、市、河川事務所が一斉掃除で対応したことも報告された。その際清掃した人員数は、延べ約 100 名であったといい(穴山 and 青木 2018)、越水の度の対応は地元の負担が大きい。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨鬼怒川災害の調査(中村 et al. 2017)でも報告されたように、塵芥を捕捉するための装置（氾濫流向のコントロールや遊水地を兼ね備えた樹林帯など）を設置する検討があり得る。

流況のダイナミズムを許すことは、従来河道からの出水をなるべく防ぐために治水・利水を進めてきたインフラ整備とは真逆の価値観を持つことになる。そのため上記のような負担がある限り変革はおこりにくいであろう。程度や場所によっては出水を許容するという価値観に転換していくまでには、古来日本人が自然とどうかかわってきたか、自然を賢く使うとどのような恩恵が受けられるのか、理解した上で、将来を見越した判断を下さなければならない。

3.4 小括

本章では、8段階の評価外力（確率降雨）別に内水・外水氾濫ともにリスクを数値化して、不連続堤防である霞堤の機能評価を行った。霞堤が維持されることによって得られる経済効果（期待減被害額）は年間最大 3,600 万円と試算し、この額を一時貯留する水田に割り当てると 43,830 円/1000 m²となった。多段階で評価することにより、100 年確率降雨以上で経済効果がプラスとなることがわかった結果も重要である。つまり、この霞堤を介して水田が一時貯留するという仕組みは本研究対象においては 100 年に 1 度の頻度で降る雨の量以上の外力を想定した計画が有効であることを示している。

4. 野生生物の生息地提供機能の定量化

本章では「氾濫時に河川周囲の水田生態系が保全されて水が行き来できるようになっていると、人や資産の被害が軽減でき、平時には豊かな生物生息地を提供できる」という氾濫原管理をした場合の、特に後半の「平時には豊かな自然が提供できる」役割について定量的な期待値を出すことを目指す。

期待値を示すことで、宅地化・農地化などで失われつつある氾濫原湿地の一部が生息地提供を果たす多機能で価値ある空間であることを示すことができる。

4.1 野生生物の絶滅から見た生息地保全の重要性

2019 年、生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム (IPBES) は「生物多様性と生態系サービスに関する地球規模評価報告書」(S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A 2019)の中で、世界的にみて野生生物の生息地は喪失・劣化していると報告した。世界中で推計 100 万種の動植物が絶滅、あるいは、絶滅の危機に瀕していることは、生物多様性への脅威であるとして、政策決定者向けレポートにおいてその脅威を取り除く行動の必要性を説いている。

日本国内で、希少な野生生物と生態系を守るため必要な措置を定めているのは「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」(種の保存法)である(環境省 1993)。これは 1993 年に施行された法律で「個体等の取扱規制」「生息地保護」「保護増殖」「動植物園」で保護の施策を定めている。同法に基づき作成されているのが、絶滅のおそれのある野生生物を記載した「レッドリスト」である。環境省が生物学的な観点から個々の種の絶滅の危険度を評価しおおむね 5 年ごとにまとめている。国際的には国際自然保護連合 (IUCN) が、同様に全世界の希少種を対象に評価した絶滅危惧種レッドリストをまとめ情報提供しており、日本国内では 588 種が登録されているが(IUCN 2021)、環境省版レッドリスト 2020 年版は 3,716 種と評価された種数が多く、保全の取り組みを進めるための重要な資料となっている。

世界中の陸域・水域・海域ともに種が減少している筆頭の原因は 1.3 章で述べた通り、土地利用の改変が直接のきっかけ(ドライバー)であり、その間接的なドライバーとなったのは人口増加などの行動様式や価値観の変化であった(IPBES 2019)。土地利用の変化を起こしているのは人間活動であるが、その活動の一例は農業、エネルギー供給、観光、イン

フラ整備など多岐に渡る。これらの活動を現状のまま継続した場合、自然環境を維持や利用を継続することは不可能で、経済・社会・政治・技術革新などを通じた社会変革が必要であると IPBES は警鐘を鳴らしている。

この課題を効果的かつ緊急に対応する目的で1993年に発効された国際条約「生物の多様性に関する条約（生物多様性条約）」は、2002年のCOP6以来、生物多様性の喪失速度を顕著に減少させようという「2010年目標（2011-2020）」を締約国間の国際目標として定めた。

この成果は「地球規模生物多様性概況第5版」で報告されている（Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2021）。そこでは個別目標として掲げられた20項目に対する進捗状況がまとめられている。種の絶滅を防ぎ生物多様性を保全するという観点では、「目標11:陸域の17%、海域の10%が保護地域などにより保全される」「目標12:絶滅危惧種の絶滅・減少が防止される」が本研究で取り組む課題に該当するが、日本は未達成で、世界各国でも愛知目標の達成度は不十分なレベルであった。

ただし過去10年間における保全行動がなければ鳥類及び哺乳類の絶滅は2～4倍ほど多かったことだろうと言われている。

また、再導入を含む、様々な措置を通じた近年の保全活動によって絶滅数が減少したとされ、同報告書では絶滅危惧種であるトキ（*Nipponia nippon*）が放鳥され野生の生息数を増加させ、繁殖も成功した事例が取組みとして紹介されている。

トキの放鳥事業の類似の取り組みとして、本研究でこの後扱う日本在来の大型肉食鳥類コウノトリ（*Ciconia boyciana*）の再導入、すなわち野生復帰事業も挙げることができる。

兵庫県、福井県、千葉県で進む野生復帰事業では、個体数を271まで回復させている（2022年6月30日現在）ことも同様に取り組み事例として挙げられる。

ただし、このような個別事例があるとはいえ、愛知目標の個別目標に対する進捗は未達成とされ、引き続き生物多様性は減少していると結論付けられたことで、日本は今後更なる取り組みが求められる。次回開催の2022年COP会議では2030年までの10年の取り組みに関して保護地区を30%まで引き上げる議論が予定されている。「保護地域以外で生物多様性に資する地域」も対象となることから、地域、自治体、民間事業者などが守り続けているコウノトリが生息する里山環境もこの保護地区拡大に関係してくる。

「野生生物の生息地」については、愛知目標の戦略目標AからEのうち、Cに属する目標11が生息地の保全や回復が求められている部分に該当する。生息地保全の取り組みは日本全国で配慮すべき課題とは言え、（野生生物が好まない環境を保護しても効果がないた

め) より生物多様性の高い空間の優先保全が重要となる。限られた予算、時間で効率的に対策を講じることが求められる。どの空間に介入すればよいのかを戦略的に判断していく必要があるのである。

しかし広域な生物分布情報の収集には多大な苦勞を要することが多い(藪原 et al.)。そこで実際の生物観測データから種分布推定モデリングにより、環境の寄与を明らかにし、広域な潜在生息地図 (ポテンシャルマップ) を出力することを目指した。

既に生物多様性の喪失は後戻りできない危機的状況にあるといわれている。生物生息地として潜在性の高いところにも開発圧をかけてしまう前に維持や再生に舵を切らなければならない。その判断を支えられるのが潜在生息地地図であり、数値化した結果は今後の空間計画に資するものと考えている。

4.1.1 コウノトリをシンボル種にする意味

本章では「氾濫原空間を利用するコウノトリをシンボル種として潜在生息地図をつくること」を目指した。潜在生息地地図を作成する過程で、複数の環境要因の寄与を推定する。

シンボル種とは保全生態学の分野で使われる言葉であり、認知や関心が高く、多くの主体の保全参画・促進が期待できる種とされている。環境アイコンと呼ばれることもあるが(佐藤 2008)本論ではシンボル種と称する。



写真 4.1 野外コウノトリ (徳島市) (2018 年 10 月 27 日 筆者撮影)

コウノトリをシンボル種に設定する 3 点の理由を挙げる。

1 点目は食物連鎖の中の頂点捕食者であり、その生態は下層の豊かな生物相を基盤にしていると考えられることから、豊かな生態系を代替的に示せる種であることが挙げられる。コウノトリは平地の猛禽ともいわれ(Ezaki 2012)旺盛な食欲で知られている。主な餌はカエルやドジョウなどをはじめとした魚類・両生類・甲殻類などの水生生物で、飼育下

では1日に500g以上の餌を採食する。採餌は視覚で探し捕食するか、くちばしで無作為に水面を突き触れたものを採る方法があるが、生物の密度が高くないと十分な餌をとることができない。逆に言えば、豊富な餌生物が生息する環境にこそ生きられる湿地の生き物であり、生態系の状態を表す環境指標となる(菊地 2006)。

餌資源の多様さが証明された種はアンブレラ種ともよばれ生態学的な重要性を持つが、コウノトリは個体数が少なく、また2005年に開始された野外放鳥開始から時間経過も少なく野外で採食内容に関する十分な情報が揃っていない。故に、その検証は今後の研究が待たれるが、その保全により分布域全体に対し包括的な保全効果があると考えられている。シンボル種とアンブレラ種の双方の働きができる種としては大型鳥類のタンチョウの研究が進んでおり(Senzaki et al. 2017)、北海道における自然再生事業で重要な役割を果たしている。

2点目はコウノトリの認知度が高く環境広報的な役割を果たせることにある。赤ちゃんを運んでくるという有名な伝承を持つ鳥は別種のシュバシコウ (*Ciconia ciconia*) であるが、分類学的には同じコウノトリ属に属し、人にポジティブな感情を想起させる。また古くから瑞鳥として人気を集め、巣ごもりを見物する娯楽もあったと言われているように(菊池 and 栗田 2021)豊かな地域を象徴するものであった。兵庫県では公共財的資源として扱われ、保全に協力した生産物にローカル環境認証を与えて市場価値を与える(大元 2016)。野生復帰は地域のコメ生産農家に経済に有利な影響を与え、地域経済に正の効果を与えた(大沼 and 山本 2009; 本田 2015)。「人と自然の共生」のシンボルとしての高い訴求力は地域の環境保全に大きな貢献をしていることが実績としても示され、2013年には「関東エコロジカル・ネットワーク推進協議会」が同種を指標種として地域づくりを目指すなど、活用が広がっている。

3点目は空間分布の観点で、日本人の営みの空間、つまり氾濫原と関連の深い種であることが挙げられる。コウノトリは決して人里から離れて生息する遠い鳥ではなく、古来、里に暮らす鳥といわれている。1960年代中ごろまで兵庫県但馬地方では初夏から夏にかけて田んぼへの取水により水位が低くなった川へ農耕用の牛を放牧していた。そこにコウノトリもやってきて一緒に餌をとり休息するという光景は人々の記憶、歴史に残っている(菊地 2006)。このように本種の分布域と人の氾濫原での生活とは古くから関係性があったということが伺え、本論で扱う洪水氾濫が起きる空間と同一範囲で議論できると考えられる(森林にしか生息しない生物を指標種に設定すると空間的に被らず、同一地域で共生することを論じられなくなる)。

4.1.2 コウノトリの生態の整理

コウノトリは主に湿地に生息する渡り鳥である。コウノトリはロシアや中国東北部で繁殖し、日本にも飛来・越冬する(大迫 2012)。その全世界での個体数は減少傾向にあり、世界中の個体数は 1000 から 2500(IUCN 2020)と推定されている。

開発により生息地が脅かされている状況があり(Tamura 2000)、同種の生活史を支える繁殖地と越冬地という生息地喪失には以前から警鐘が鳴らされていた(Higuchi and Pierre 2005)。現在コウノトリは以下の通り保護の対象になっている。

表 4.1 コウノトリの希少性に関する各機関の保護上の位置付け

指定元	指定の分類	説明
環境省レッドリスト (環境省 2020)	絶滅危惧 I A 類 (CR)	ごく近い将来、野生での絶滅の危険性が極めて高いもの
IUCN レッドリスト (BirdLifeInternational and The IUCN 2018)	Endangered (EN)	Critically Endangered (CR) ほどではないが、近い将来、野生での絶滅の危険性が高いもの
ワシントン条約	附属書 I	絶滅のおそれのある種で取引による影響を受けている又は受けるおそれのあるもの

出典：コウノトリの郷公園 HP(兵庫県立コウノトリの郷公園 2022)に一部加筆

大陸では湿原、池沼、河川などを主な生息地としてきたが、近年、中国の湿地生息環境も農地開発のために分断・縮小されてきた(Liu et al. 2004)。世界中の氾濫原には持続性の異なる大小多様な湿地がみられ(Collinson et al. 1995)、日本においても湿地は全国に渡って分布している。野生生物の生息地として機能するだけでなく、ヨシ原などが人の手によって管理され資源収集の場として活用される空間であった。しかし今や湿地は最も急速に失われている生態系の一つであり、単なる面積の減少のみならず農薬の多用や乾田化といった質的な変化も報告されている(鷲谷 2007)。そのような変化がありつつも、氾濫源湿地の代替として生息地の役割を果たし続けてきたのが里山に囲まれた水田・河川のある里地空間であった。

現在、日本で野外放鳥されたコウノトリは主に水田で採餌しているが、個体群の絶滅以前も日本のコウノトリの採餌は水田や水路、河川で確認されており(Naito and Ikeda 2007)、水田が代替湿地として生息地を提供してきたと言える。その状況は韓国でも同様であり、人が管理した水田を含む湿地や農地で採餌をしていることが報告されている(Yoon et al.

2012)。

ところが、その代替湿地である水田の耕地面積も減少の途をたどる。水田の耕作面積は1969年の3,441,000haをピークに以降減少(農林水産業 2020)。その減少傾向に入った直後である1971年、日本国内では野生の個体が絶滅した。絶滅の理由のひとつは強力な農薬、ふたつ目には遺伝的多様性の低下が挙げられているが(Ezaki 2012)、このふたつの要因は必ずしも独立に作用したのではなく前者が後者に影響したと考えられている(兵庫県教育委員会 and 兵庫県立コウノトリの郷公園 2011)。我が国の野生個体群絶滅後、日本はロシアから1985年に6羽の幼鳥の寄贈を受け、兵庫県立コウノトリの郷公園を中心に飼育が進められた。2002年には飼育個体が100羽を超えたことを契機に2005年に初の試験放鳥が実施された。兵庫県や豊岡市などの行政も支援する形で進める野生復帰プロジェクトは現在も継続している。現在では兵庫県立コウノトリの郷公園ほか、福井県越前市・千葉県野田市からの放鳥も含め、271羽(2022年6月現在)の放鳥個体が野外で確認され、日本全国47都道府県に滞在記録を残している。

4.2 手法

4.2.1 潜在生息地予測

観測データ

予測に用いる観測データは福井県より野外放鳥されたコウノトリの移動追跡データの貸与を受けた。コウノトリは背に40g(たからとさきは70g)の発信機を装着し5:00-19:00(JST)の位置情報(緯度経度、高さ、スピードなど)を送信している。この情報は米国海洋大気庁(NOAA)およびフランス国立宇宙研究センター(CNES)が開発し、その後各国の宇宙機関の協力で運営されている「アルゴスシステム」を利用して衛星から地上に届く。GPSを併せて装着することによりアルゴスシステム単体よりも高い精度で位置が取得でき、本研究で用いている通信システムもARGOS-GPSを用いている。誤差は15m~18m以内(仕様上)でこの位置情報を在データとして活用した。4個体の詳細は以下の通りで、放鳥日から約2年分を観測データとして利用している。

表 4.2 GPS 追跡データの特性

有効サンプルサイズ	N=15,346
誤差	15m~18m 以内
サンプリング時期	2015 年 10 月 3 日 (放鳥) ~2020 年 10 月 17 日
サンプリング間隔	げんき・ゆめは 2 時間間隔、たから・さきは 1 時間間隔 5:00 から 17:00 まで観測し、夜間は観測なし

表 4.3 位置情報を利用した野外個体の属性

個体愛称	生まれ・性別	個体識別番号	GPS	放鳥日
げんき	2014.6.14 生まれ オス	J0118	ARGOS-GPS Model 40GPS, 40g GPS PTT (Northstar, Inc. USA) Accuracy ± 15m	2015.10.3 越前市白山地区
ゆめ	2014.6.16 生まれ メス	J0119	同上	同上
たから	2016.5.30 生まれ オス	J0138	Solar ARGOS/GPS PTT-100 Accuracy ± 18m	2016.9.25 越前市坂口地区
さき	2016.5.30 生まれ メス	J0139	同上	同上

表 4.3 に示す通り、放鳥個体は放鳥時にそれぞれ生後 4 カ月と 1 歳であった。コウノトリが営巣をするのは 3、4 歳からと言われており (Ezaki and Ohsako 2013)、今回用いた GPS 追跡記録はすべて幼齢期の探索的な行動をしている独身のフローターの時期のデータということになる。そのため本研究での予測は採餌とねぐらを考慮したもので営巣の要素は加味されていない。

GPS データは三段階のスクリーニングを行っており 1)GPS 取得エラーとしてのデータ欠損値の除外、2)精度不足データとして誤差 25m 以上のデータを除外、3)飛行中 (移動中) としてスピード値 0 ノット以外の除外を行った。なおスピードの値は受信機の位置を計測することで、例えば 1 秒間に受信機がどれだけ移動したかを求め、移動距離から速度を得る方法で計算されている。

対象地

潜在生息地の予測対象範囲は、放鳥が行われた福井県を含む4県(23,270 km²)とした。隣接性のある領域で集中的な行動圏を含む。日本の中央部分であり地形的な特性としては、山地が58.5%、低地が20.1%、丘陵地が10.2%、台地段丘が6.1%、火山地が4.9%、その他0.2%という面積割合構成である。

解像度

モデルの空間解像度に関しては、コウノトリはなわばりの半径を2km程度として行動すること(兵庫県立コウノトリの郷公園2011)から、それより細かい解像度を目指すことと、汎用性を重視し、「標準地域メッシュ3次メッシュ(1kmグリッド)」を使うこととした。1km四方でも都市的土地利用、水田、畑、樹林地は、0~100%のばらつきを持つため1kmスケールで、解析できるレベルが十分にあると判断した。

環境変数として用意したすべてのラスタデータは同座標系、同セルサイズの ERDAS raster format (.img) に整備し、それを ESRI ASCII Grid format(.asc)に変換した。在データの位置情報は CSV format(.csv)に変換した。

変数間の相関行列表を作成し、相関をピアソンの積率相関係数で求めて評価した。この多重共線性を評価したところ、最も高い相関係数でも水田割合と低地割合が0.618であり、除外せずとも影響は大きくないと判断して全変数を投入することとした。一連の空間解析は ArcGIS 10.3[®] (ESRI Inc., Redlands, CA, USA)にて、統計解析は R3.3.2(2016 R Foundation for Statistical Computing)を使って行った。

予測モデル

分布予測は2.3で述べたとおり、最大エントロピー法を活用したオープンソースのソフトウェア、MaxEntで行った。MaxEntによるモデルの適合度は「感度」と「1-特異度」から得られるROC(receiver operating curve)曲線からAUC(Area Under the Curve)を算出することで評価した。手法全体の手順は以下の通りにまとめられる。

1. コウノトリの生息(本研究では採食・ねぐら)に影響を与える可能性のある変数を候補として同じ空間解像度のラスタデータで整備する。
2. 全変数間相関をピアソンの積率相関係数で求めて多重共線性を評価、つまり相関の高い環境変数を除外する。

3. MaxEnt を実行する。MaxEnt に変数入力、計算後で寄与率重要度を定量化、レスポンスカーブで応答を可視化する。
4. モデルの感度を ROC 曲線から算出される AUC の値で評価する。

環境変数

地形レベルでの生息の必要条件としては「海岸付近に位置する河川 と水田のセット、及び平地上に丘陵が適度に散在していることが既往研究により示されている(兵庫県教育委員会 and 兵庫県立コウノトリの郷公園 2011)。これらの知見は長きに渡る採食行動などの記録・調査といった直接観察によるものであり、これに対して本研究は衛星追跡データやオープンデータの活用をするという別のアプローチをとっている。野生復帰した同種がより定着できる環境を得て個体群を回復していくために、今両方から情報の蓄積が進んでいる。

本研究では、まず生息適地予測をする環境変数を抽出する参考として研究対象地内の観測点(6,040 点)の地理的特性を整理したところ、標高値は 4m、最高標高値は 784m で、平均標高値は 82.7m であった。値はスペースシャトルに積み込んだレーダで取得された 1 秒メッシュ (約 30m) 空間解像度の DEM データ、SRTM30(Farr et al. 2007)から取得した。

ハビタットタイプは自然環境保存基礎調査植生調査データ (第 2 回~5 回 1:25000 現存植生図) (環境省生物多様性センター)の凡例より整理した 9 分類「開放水域、砂れき地、湿地、樹林地、水田、草地、竹林、都市的土地利用、畑地」の利用環境割合を集計した。水田 62.3%、都市的土地利用 8.0%、湿地 7.6%と続く結果から水田生態系の利用が最多であった。なお、本来コウノトリは都市的土地利用 (宅地、工業地域など) を忌避するが、選好性のある谷津田など樹林地と水田の境界には民家が存在することが多く、観測点が GPS の誤差により都市的土地利用部分に入り込んだ可能性がある。

地形は 1:200000 土地分類基本調査(国土地理院)から読み取った。低地 82.9%、台地段丘 9.1%、丘陵地 4.2%、山地 3.8%という割合であった。また、コウノトリはかつての氾濫原性湿地に生息していたことも兵庫県豊岡市の研究(菊地 2010; 内藤 et al. 2011)で分かっているように元来湿地生態系の鳥類であるが、湿地の減少により水田を代替的な餌場としている鳥類の一種となっている(鷺谷 2007)。そこで好採餌場という観点では水分量が重要な要素となると考え、地形的な湿潤度合いを測っておくために観測点の TWI (地形湿潤指標: Topographic wetness index/indices) の値を特定した。TWI は地

表流水のたまりやすさを指標化したデータで、以下の式 4.1 で表される。

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b} \quad \text{式(4.1)}$$

a は流域面積。b は傾斜角度（ラジアン） 計算は ArcGIS10.3[®] (ESRI Inc., Redlands, CA, USA)を用い、NASA の SRTM30 をインプットデータとしてラスタ演算を行い算出した。

4 個体が集中的に利用した自治体（愛知県美浜町・南知多町、岐阜県犬山市・可児市・高山市）を対象に行った現地調査では水田と二次林が隣接する谷幅の狭い谷津田を選んでいることがわかっている。生息の安全性という観点と考えられ、そのモザイク性を検出するためにも「林縁長」と「景観多様度指数」を 1:25000 植生図より計算して環境変数に加えた。「林縁長」はハビタットタイプの「樹林地」と「水田」が接する線分の長さをメートルで表したもので、1km メッシュ内の総延長を変数とする。「景観多様度指数」は 1km メッシュ内を占める土地利用タイプの面積からシン普森の多様度指数 (Simpson's Index of diversity) を計算し用いた。指数は以下の式 4.2 で表される。この値は 0-1 の範囲にあり、景観が 1 種に均一化されていれば 0 を取り、種数が多く均質に配分されるほど 1 に近づく。この値により景観の多様さと組成の均質さの 2 つの要素を測ることができる。

$$\text{Simpson's Index of landscape diversity} = 1 - \sum_{i=1}^s pi^2 \quad (\text{式 4.2})$$

S は景観の種数（都市的土地利用を除外した 8 種）

P_i = i 番目の景観パッチが全体に占める面積割合

以上の経緯で用意した環境変数の一覧と地図を以下に示す。

表 4.4 環境変数一覧 (4 県版)

生息適地予測に使った 環境変数	データ出典	内容
水田面積割合	1/25,000 植生図	水田のメッシュ内割合 (%)
樹林地面積割合	GIS 内で生成	樹林地のメッシュ内割合 (%)
樹林と水田の接線長	GIS 内で生成	水田と樹林地の接線のメッシュ内総計値 林縁長 (m)
TWI (地形湿潤指数)	1/25,000 植生図	Topographic Wetness Index(TWI)の 平均値
シンプソンの多様度指数	GIS 内で生成	砂地、草地、樹林地、開放水域、湿 地、水田、畑地、竹林の占める面積か ら 0-1 の値を取る指数を計算
都市的土地利用面積割合	1/25,000 植生図	市街地、造成地、工場用地など都市 的土地利用のメッシュ内割合 (%)

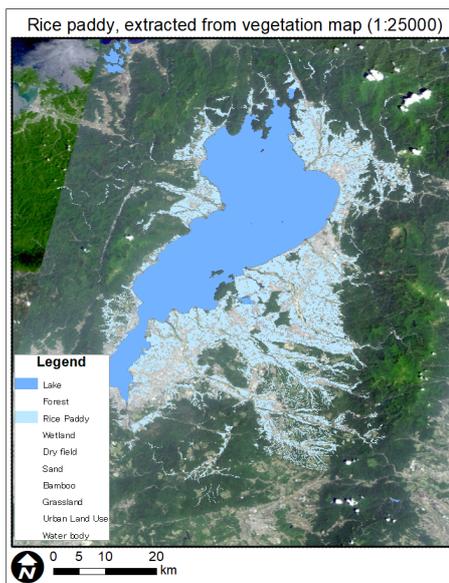


図 4.1 水田面積割合

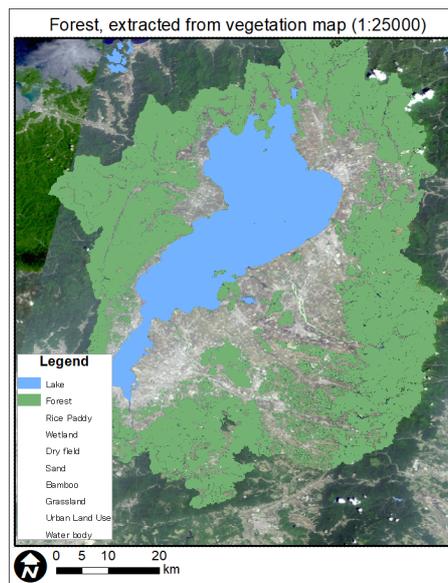


図 4.2 樹林地面積割合

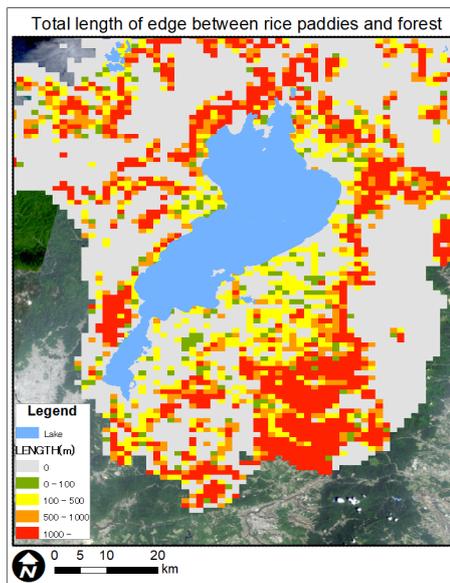


図 4.3 水田と樹林地の接線長

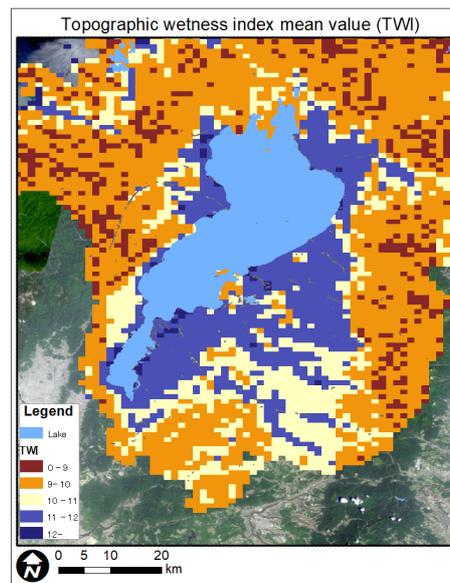


図 4.4 TWI (地形湿潤指数)

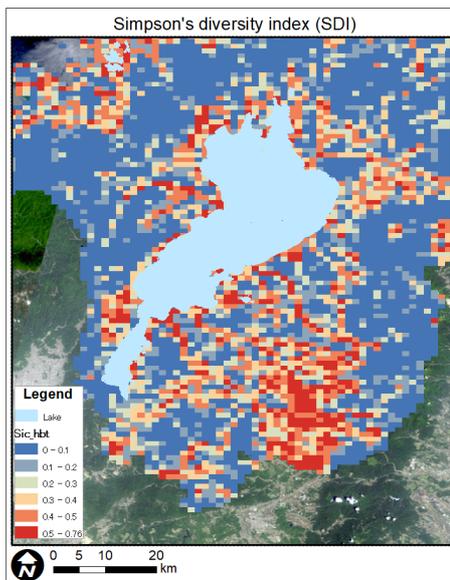


図 4.5 シンプソンの多様度指数

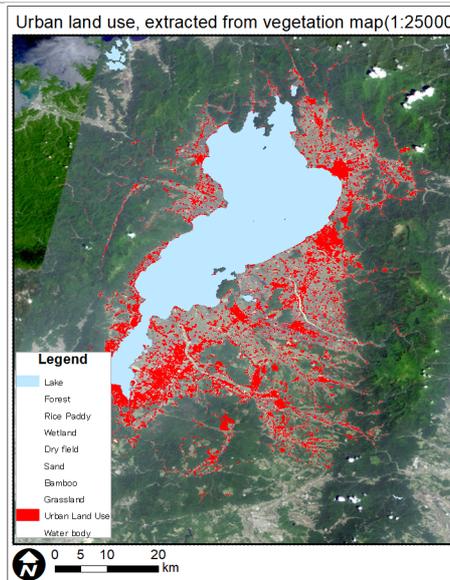


図 4.6 都市的土地利用面積割合

4.3 分布確率予測の結果

MaxEnt 分布予測モデルの AUC 値は 0.94 であった。0.7 程度以上であれば実用的な精度であるとする基準がよく知られている (Swets 1988; Manel et al. 2001) ことから MaxEnt モデルでの分布予測の結果は高い精度を得られたと判断できる。それぞれの環境変数の寄与率は以下のとおり示された。寄与率はそれぞれの環境変数がモデル作成に使用された割合を示している。

表 4.5 生息確率に影響を及ぼす環境要因の強さ

環境変数	寄与率(%)
水田面積割合	40
樹林地面積割合	21.7
樹林と水田の接線長	15.7
TWI (地形湿潤指数)	10
シンプソンの景観多様度指数	9.4
都市的土地利用面積割合	3.2

代替生息地としての水田の重要性、樹林地との隣接性（景観多様性）の寄与の強さが示された結果となっている。出現確率予測の出力結果は 0-1 の出現可能性（probability of presence）という連続値で得たが、わかりやすく出現確率が高い側と低い側に二分するため、しきい値を最大感度特異度合計（maxSSS threshold : Maximum Sensitivity plus Specificity）の 0.124 で設定した。不在データがない場合に感度（Sensitivity）と特異度（Specificity）を最大化することを目的とした閾値で（Liu 2013）、観測個体数も少なく、不在箇所が不明瞭な場合に有効と判断した。

本研究で用いたコウノトリ個体はわずか 4 羽で、一度は絶滅した本種が生息できる個体群集が多く再生できているとも考えられない状況から、偽陽性となる率（実際には存在しないのにあると予測する率）が高まることを避けるため、カットオフ値は高く設定して考察している。

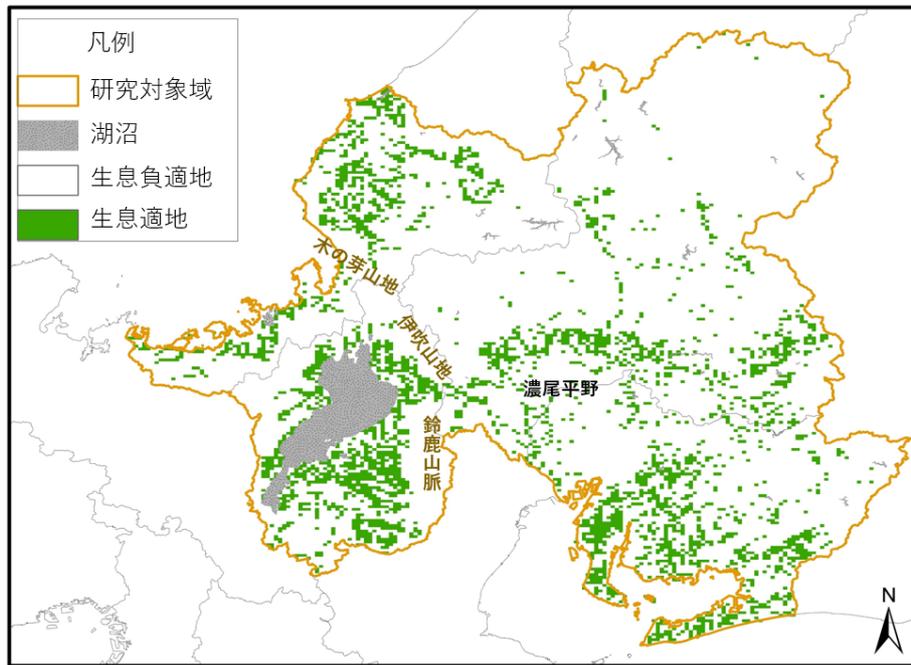


図 4.7 4 個体の衛星追跡データから予測した潜在生息地図

予測された 0-1 までの出現確率を閾値で区切り、出現可能性が高い空間を生息適地として緑色で示した。(範囲：福井・滋賀・岐阜・愛知の 4 県 空間解像度：1000m) 以下文中で言及している山地・山脈・平野には図中にキャプションを追加した。

図 4.7 では面的に生息適地を示すことができた。個体が放鳥された福井県からその分布の特徴を詳しく記す。福井県は敦賀市と今庄町の間を横たわる木ノ芽山地（木の芽峠）を境にして、嶺南・嶺北という 2 つの地方に区分される(門井 2001)。嶺北に位置する九頭竜川流域、日野川流域、そして丹生山地を境に嶺南では主に北川流域の流域に潜在的な生息適地が分布していた。河口部に限らず、流路に沿った低平地に分布は広がっていた。山地には殆ど生息適地の分布がないが GPS 位置は山地を経て観測されていたことから、山地は移動経路としてだけ使われており、山地をまたいで複数の流域を利用していたといえる。福井県の野外放鳥個体は嶺南の越前市で放鳥されている。放鳥直後は慣れた飼育ケージの近辺に戻るなどの行動が確認されており、観測データがその周辺に多かったため、予測分布もその周辺に多く出されている。

隣接する滋賀県では琵琶湖岸の低地帯に生息適地が分布した。ここでも実際の GPS 位置を参照してみると琵琶湖を渡っていることがわかっている。鈴鹿山地の西に多くの生息適地が予測されているが、実際には殆ど観測されていない。実際に居たところと似た環境であったことで出現の確率が高まったと考えられる。

岐阜県には濃尾平野以北、福井県との県境に山地帯が存在するが、その山地に沿った低地部に多くの分布が見られた。岐阜県においては、その山地付近と共に県西部を流下する揖斐川、長良川、木曾川の流路に沿って分布が見られた。愛知県では県南部の知多半島、渥美半島に多くの分布が見られた。知多半島は丘陵地・台地が点在している地形で、合間に水田や畑地などの農地が混在する不均一性の高い景観構成が特徴的である。渥美半島には実際の観測は殆どない。滋賀県の鈴鹿山地の西に多くの分布が予測されたのと同様、実際にいた環境と似た環境を持ち期待値が高まったと言える。その他、愛知県内で分布が見られた箇所は中山間地の谷底低地であった。このことは流域の河口に近い下流部のみならず、上流部にも生息適地が予測されていることを意味する。

対象範囲の拡大とより詳細な水田特性の分析

ここまでの 4 県を対象とした分析の結果を受け、分析範囲を日本全国に拡大することを目指した。理由は全国一律議論できるようにするためである。日本全国に拡大した際の手法をまとめる。まず 4 県での分析後、さらに GPS 装置を装着して放鳥された個体が増え、衛星追跡データの蓄積がされたため在データとして用いる衛星追跡位置情報は 5 個体分追加した。空間解像度は今後の土地利用のあり方議論に利用する際 1000m では粗すぎ、且つ、河川ラインに対する位置や土地利用を知るために 100m に変更した。

環境変数は河川密度を追加した。先の分析では、表 4.5 に示すとおり水田の寄与が最も高かった。しかし上述のとおり単一的に水田が占有する空間より、河川に沿う、あるいは山地に沿っている地域に生息適地は分布する傾向が見て取れた。そのことから、日本全国で考慮する際には環境変数として河川の要素を加えることとした。その他、水田を示すデータは植生図（環境省）からより新しい情報を利用するために土地利用細分メッシュデータ(国土地理院 2016)に更新し、景観多様度指数も同データから再計算した。なおモデリング手法は同様に MaxEnt を利用している。以上の経緯で実行したモデリング結果を以下に示す。

表 4.6 生息確率に影響を及ぼす環境要因の強さ

環境変数	内容	寄与率(%)
水田面積割合	流域の中で水田が占める割合 水田は土地利用細分メッシュデータ (国土地理院 2016)を利用。	62
シンプソンの景観多様度指数	シンプソンの多様度指数を利用し、 土地利用の不均一性を数値化した。 上と同じ土地利用細分メッシュデー タ(国土地理院 2016)を利用。	33
TWI (地形湿潤指数)	100m グリッド内平均値	3.3
河川密度	河川密度グリッドの重心から半径 2km の円内でいずれかの河川とイン ターセクトするグリッドの比率を作 成。2km はコウノトリのおおよその 行動圏。	1.7

予測された日本全国版の潜在生息地図を以下図 4.8 に示す。これを第 5 章に用いる。

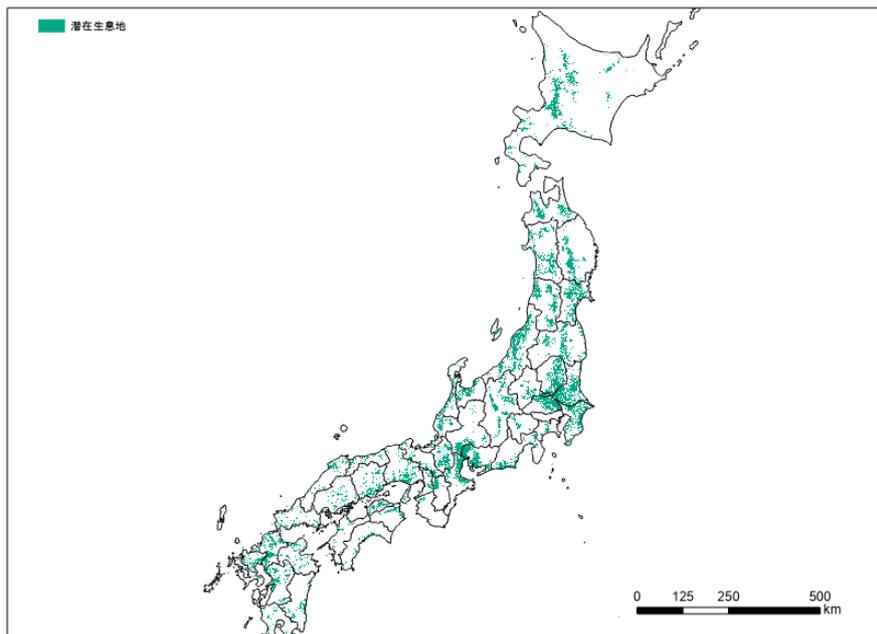


図 4.8 9 個体の衛星追跡データから予測した潜在生息地図 (全国版)。予測された 0-1 までの出現確率を閾値で区切り、出現可能性が高い空間 (100m グリッド) を緑色で示した。

(範囲：日本全国 空間解像度：100m)

4.4 分布確率予測の議論

本節では GPS 追跡位置を在データとし、最大エントロピー理論を用いた分布推定モデリング手法を用い、潜在生息地を推定できた。しかし在のみデータに基づく分布推定に関しては不在情報がないことに起因する特有の注意点がある。不在情報がないということは環境変数に対する生物の応答パターンが決まらないということである。MaxEnt というツールによる予測から得た結果は分布確率の相対順位で、生息地の相対的な良さといえる(石濱 2017)。例えば 0-1 まで連続数値で予測された出現確率は絶対的な値ではなく例えば 0.9 という値は 90%の確率で個体が出現する訳ではなく、あくまで今回のモデル(対象領域とデータセット)における出現確率であり、他のモデルと比較することはできない。しかし今回その順位付けにより影響の大きい環境要素が明らかになったことは、今後の生息地保全の根拠として重要な結果である。

最も高い寄与率で出現を予測したのは、従来より重要な生息地と言われてきた水田の存在であった。ただ着目すべきは同じ水田でも樹林地と隣接、あるいは混在する空間に生息適地が分布したことである。丘陵地や台地の辺縁部は水生生物の好生息地であり(一ノ瀬 2007)、動的モザイク性の高さから生物多様性の豊さが存在する(武内 et al. 2001)。猛禽類であるサシバ (*Butastur indicus*) も林地と水田が近接する谷津田を選好するとする研究(Momose et al. 2005)が示されており水田と樹林地という土地利用の隣接関係、あるいは混在は重要な要素と考える。なお、営巣や定着する齢に達していないため、樹林は主にねぐらや安全性確保に重要な役割を果たしていると考えられる。実際集中利用が観測された愛知県美浜町・南知多町、岐阜県犬山市・可児市・高山市を対象に行った現地調査ではコウノトリが水田と二次林が隣接する谷幅の狭い谷津田を好んで利用していることがわかっている。



写真 4.2 愛知県知多郡美浜町でコウノトリが利用していた谷津田

(2019年5月10日 筆者撮影)

野外放鳥を行った福井県において分布が越前市に多かったことに関しては、生息適地モデルに用いた在データがそこに集中していたことに由来している。兵庫県豊岡市から野外放鳥された幼鳥の個体もほとんどが、広く全国を移動した後に生まれた場所に帰還したことが報告されている(大迫 2012)。結果を見る際にはこのように幼鳥が生まれた場所に戻る傾向が予測に働いていることを考慮する必要がある。

本研究では、生物の空間分布と環境条件の関係をモデル化することで、面的に種の分布を予測することができた。生物にはその生息に適した空間スケールがあり、移動能力の高いコウノトリは分布が全国に分散していたことからランドスケープのレベルを選択して分布を説明した(図 4.9、上段)。この空間スケールが小さければローカルなレベルがあり(図 4.9、下段)それぞれに対象とする空間、種、着目する地形の特性、分析によって見いだされる知見やその空間計画への応用場面、そして評価が異なるため以下にまとめた。

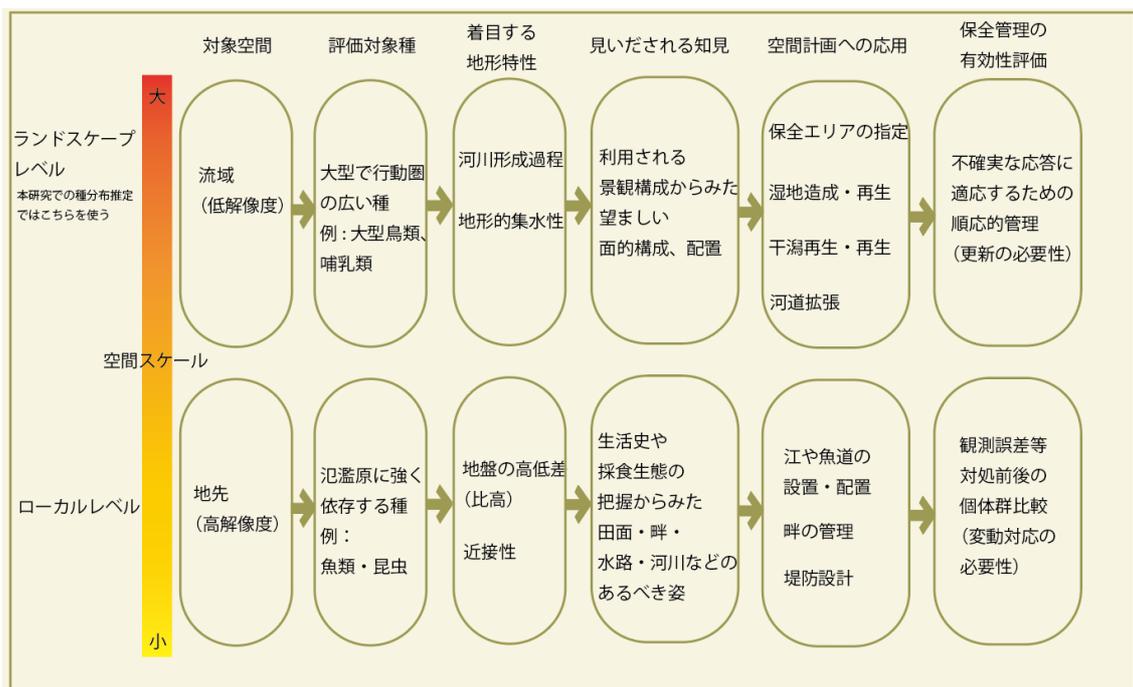


図 4.9 ランドスケープレベルとローカルレベル別の種分布推定の流れ

4.5 小括

本章では、希少生物の生息地提供ができる可能性を示すために、コウノトリをシンボル種に設定した潜在的な生息地地図を作成した。GPS 位置情報を在データと複数の環境変数か

ら潜在的な生息地を予測することを目指し、在のみのデータで予測する最大エントロピー理論を用いた分布推定でグリッド単位の出現確率を得た。

これにより得られた知見は、4 県を対象に行った予測において、分布確率に貢献度の高い環境条件の順位付けは1番目に土地利用が水田であること、2番目に樹林地があること、そして3番目に樹林と水田の接線長の順であったことである。また予測結果を地図上に可視化すると、水田が占有する土地利用よりも樹林地が混在した空間、つまり水田と樹林地が混在した里山環境が選好されていたことも重要な知見であった。

これにより、氾濫原の水田を保全することで生息地を増やせるのかという点に「水田が出現確率を上げる」と答えることができるようになったことも本論の大きな成果である。

5. 統合評価

5.1 生息地提供と減災効果が期待できる空間の抽出

第3章では「水田として利用されているような低地帯が氾濫水を一時貯留して減災効果を発揮する」という結論を、第4章では「水田の存在、地形的な湿潤度の高さ、景観多様性がコウノトリの生息潜在性を高める」という結論を得た。

本章では、第3章から「地形的に貯留しやすい空間」、第4章から「指標種のコウノトリの潜在生息地」の空間分布をGIS上に用意し、双方が共に機能を発揮する空間を特定するために両条件が重なった空間を抽出する。これを本論では統合評価と称する。

5.2 統合評価手法

「両機能が重なる空間」を抽出するために使う（表5.1）と地図（図5.1）を示す。

表5.1 「両機能が重なる空間」を抽出するために使うGISデータ

知見	抽出する空間	用意方法
水田として利用されているような低地帯が一時貯留などで減災効果を発揮する（第3章より）	「貯留しやすい空間」 200年確率降雨で3m以上の浸水が予測されている空間を特定 (以下に3mを利用した根拠を記載)	全国一律に用意された連続的な浸水深データはなく、総合地球環境学研究所Eco-DRRプロジェクトで作成した「 <u>リスクマップ</u> 」を利用
水田の存在、地形的な湿潤度の高さ、景観多様性が生息の潜在性に効く（第4章より）	「潜在生息地」 MaxEntで予測した出現可能性の高い（閾値で高低を区分）空間推定分布図	第3章の出力結果を利用

「氾濫しやすい空間」として3mという値を使ったが、3mという深さは1階屋根に到達する高さであり家屋が流失してしまう流体力を持つ。滋賀県の条例で建築規制が掛かるのもこの200年確率3m以上という浸水深である。氾濫を遊水に切り替えて考えるのは何m以上かという点に一意の解はなく他の数値もあり得るが、今回は一例として滋賀県の数値を取り上げた。

表5.1に記した「リスクマップ」は、筆者も参画する総合地球環境学研究所の研究プロジェクト「人口減少時代における気候変動適応としての生態系を活用した防災減災（Eco-DRR）の評価と社会実装」より研究目的の貸与を受けた。同プロジェクトでは従来コスト等の問題から定量化されていなかった「小規模河川や内水氾濫を含めた浸水害リスク」の

予測値を滋賀県の結果をベースに機械学習手法を取り入れて予測している。それをベースに人や資産が現在の降雨、そして将来の降雨でどれだけの安全性を確保できるかを計算した市区町村毎推計値を J-ADRES サイト (<https://j-adres.chikyu.ac.jp/>) を通じ一般公開している(総合地球環境学研究所 Eco-DRR プロジェクト 2022)。気候変動の影響で浸水害が増加している中、人口減少局面を迎えた日本が、今後リスクを減らしつつ自然の恵みを得る土地利用を判断していくための情報で、第 1.2 章にて記した「気候変動と生物多様性保全の統合解決」の先進的な事例の一つである。

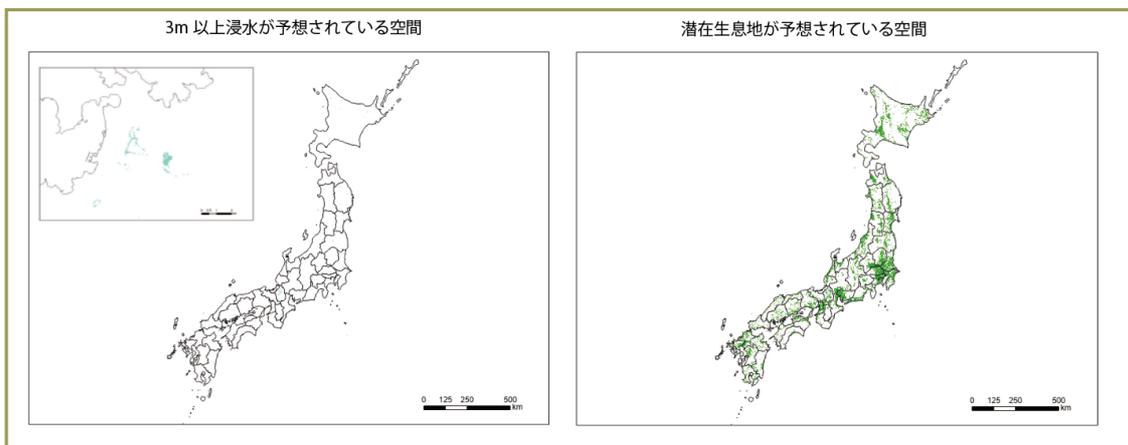


図 5.1 「貯留しやすい空間」と「潜在生息地」。左図は地形的に貯留しやすい空間として抽出した 3m 浸水想定区域(総合地球環境学研究所 Eco-DRR プロジェクト, 2022)。右図はシンボル種として設定した「コウノトリ」の出現確率が高い潜在生息域。

5.3 結果と考察

GIS で「地形的に貯留しやすい空間」と「シンボル種のコウノトリの潜在生息地」の両条件がそろう 100m グリッドを抽出して「両機能が重なる空間」を特定した。全国で総計すると 465 km²となる。その土地利用は 2016 年版土地利用種別(国土地理院 2016)を参照すると 58.7%が水田、14.1%が建物用地、14.0%が河川地および湖沼、その他の農用地 7.5%、その他 5.7%であった。

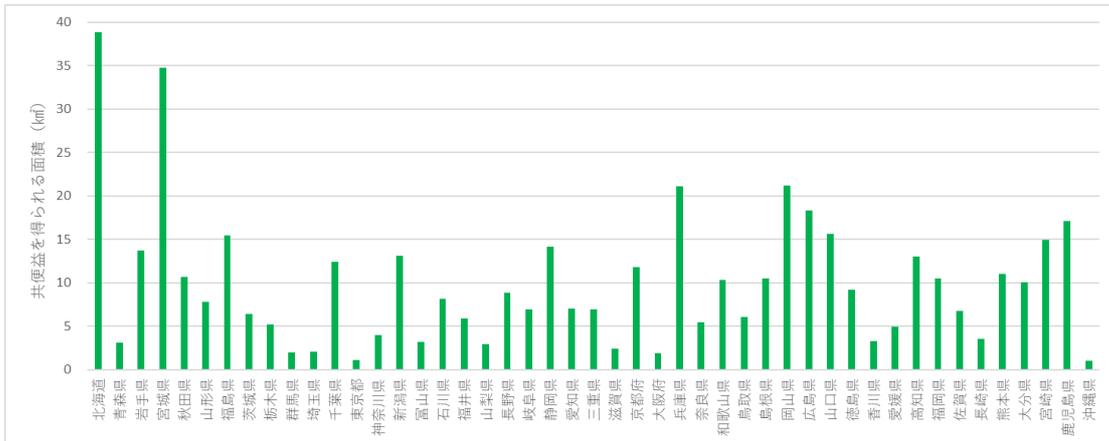


図 5.2 都道府県別 両機能が重なる空間の面積 (単位: km²)

日本全景では分布を認識できないため、以下図 5.3 に例として生息地評価の対象種コウノトリの出生地である福井県における拡大表示図を示す。



図 5.3 福井県内で抽出された両便益の重なり空間

いずれの分布も河道に近接しており、水系網を基軸としたつながりが見られる。この空間は第 1 章でも重要性を指摘した河川と氾濫原の横断的な接続性を持つ空間である。モデルで予測された分布域ではあるが、北川流域と日野川流域において以下紹介する 2 つの事例が実際に水の貯留のしやすさとコウノトリの生息地を両立させる土地であることを実証

している。

まず北川では図 5.3 中北川流域で青く示した分布域を中心に実際コウノトリの飛来が確認され、小浜市国富地区において 2021 年、2022 年と連続で繁殖が報告された(田原 et al. 2022)。ここに営巣、繁殖した「つがい」は兵庫県と島根県生まれの個体であり予測モデルに用いた福井放鳥個体ではないが、モデルの分布域とつがいの繁殖行動域は一致していた。また、この北川には霞堤が 11 か所あり、強い降雨時には周囲より低い農地に霞堤から水が入ることで地域が守られてきた歴史がある。それら実績を踏まえ、北川水系では日常的にはコウノトリも生息できる豊かな自然を提供し、土地利用で治水を進化させると謳った流域治水プロジェクトが発足し議論や事業の計画が進んでいる(国土交通省近畿地方整備局 2022)。

また、日野川流域(福井市片粕(かたかす)地区)では「日野川水防災・湿地創出事業」が 2016 年に着工している。流下能力を確保するために河道掘削を行うと同時に、高水敷を切り下げ、採掘形状を工夫することでコウノトリをはじめとした多様な生物の生息・生育の場所となる湿地環境の創出を目指した(福井河川国道事務所 2022)。完成後コウノトリや多数のサギ類の飛来が確認されている。

両事業の根底の取り組みは治水と環境の両立を目指す流域治水プロジェクトである。福井県は今後も同プロジェクトの更なる推進を発表しており(福井県 九頭竜川・北川流域治水協議会 2022)、今後も河道内外共に事業が進む計画である。

このように氾濫原の特徴を踏まえて、安全且つ自然環境豊かなまちづくりは全国各地で活発化することが予想される。そこで、今回の研究による知見を受けた各地で進む流域治水施策に則った地域づくりの提案をまとめていくことにする。

6. 総合考察

本章では前章までに得られた知見を踏まえて、今後の氾濫原管理のあり方を提案としてまとめる。はじめに各章の研究で得られた知見を以下の通りまとめる。

6.1 本研究のまとめ

はじめに本研究の目的を再掲する。

- 目的 1. 不連続堤防（霞堤）と水田生態系による洪水調整の経済効果分析
- 目的 2. 野生生物生息地提供機能に寄与する景観構造の解明
- 目的 3. 減災と生息地提供を両立させる空間構造の整理

上記に対する本研究の知見は以下の通りであった。

目的 1 の成果：氾濫水理モデルによる推定ハザードと個別建物暴露をもとにした期待減被害額の定量化（第 3 章）

- 不連続堤防（霞堤）と水田生態系が一体となった治水システムの介入が流域の浸水にどのような洪水調整機能を働かせているか、8 段階の降雨パターンで定量的に初めて示した。外水・内水氾濫を統合的に考慮した流況の把握ができ、建物被害軽減が期待されるのは 100 年に 1 度の頻度で降る雨の量以上の外力を想定した場合であり、その外力を考慮すべき治水の仕組みであることを示した。
- 霞堤が維持されることで得られる経済効果（期待減被害額）は年間最大 3,600 万円と試算した。一時貯留機能がある水田が効果発揮していることを明らかにし、単位当たりの被害軽減額は 43,830 円/1000 m²と算出した。

目的 2 の成果：GPS 追跡データを活用した生息適地予測が示すコウノトリの選好環境把握（第 4 章）

- GPS 追跡データを在データとして種の分布推定を行った。不在データがないという制約上の長所・短所を整理して生息適地地図を出力するまでを実装した。GPS データは高精度・高頻度に位置情報が取得でき、蓄積が進むビックデータで、移動ルート解析などの活用がされてきたが、少なくとも国内で鳥類の生息適地予測に適用した例はない。空間自己相関やデバイスによる精度の違いの扱いなど課題は残るが、生態観測技術活用の可能性を示した。

- 絶滅危惧種であるコウノトリを指標種に設定した出現確率の空間的な分布図を初めて示した。予測は GPS 位置情報の在データと環境変数を機械学習で関係づけ、未知の空間に対しても出現確率を求めていくことで、面的な可視化を可能とした。この予測には最大エントロピー法を活用した MaxEnt を用いている。予測値は相対的な確率分布として捉える必要があるが、順位からは重要な土地利用を定量的に把握できた。4 県を対象に行った予測において、分布確率に貢献度の高い環境条件の順位付けは 1 番目に土地利用が水田であること、2 番目に樹林地があること、そして 3 番目に樹林と水田の接線長の順であることが示された。

目的 3 の成果：統合評価（第 5 章）

- 「地形的に貯留しやすい空間」と「シンボル種のコウノトリの潜在生息地」の共通空間は「河川を基軸に水路網が発達している集水性の高い低地帯で、景観多様性の高い水田生態系」であった。洪水という自然作用が働く里山景観と言え、全国計 465 km²存在した。この空間を保全していくことが、人の生活にとってもコウノトリにとっても好影響をもたらすとし、都道府県別にその空間的な量がどのくらい存在するかを面積で明らかにした。

上記より、本研究で得られた成果を以下の通りまとめた。

第 1 章では、気候変動の影響と生物多様性喪失の危機が起こる氾濫原の自然作用に着目したことで統合的に解決される意義を整理した。

第 2 章では水理モデルと種の分布推定の利用可能性を整理した。

第 3 章では河道と氾濫原の連続性が洪水調整に寄与することを示した。

第 4 章では水田生態系と景観の多様性がコウノトリの生息適地に寄与することを示した。

第 5 章では第 2 章と第 3 章でそれぞれ効果発揮する空間の重なりを検出したことで、洪水による被害低減と生息地提供機能が双方発揮される空間の面積は 465 km²と判明した。

その 72.7%が水田・河川地および湖沼に占有されており、河川網の近接性が見られた。この結果から共便益は水田生態系を基盤に生み出されていると結論づけた。

本論の重要な知見は、洪水リスク軽減と生息地提供の共便益を得られる空間が存在し得るという潜在性を分布と量で示せたことである。ただし今回それぞれの便益に費用や損失を加えていない。費用や損失は今後の土地利用誘導次第で空間的にも時間的にも変化（理想的には減少）すると見込まれ、定量化は今後の課題と位置付ける。

6.2 洪水リスク軽減と生息地提供の共便益を得る氾濫原管理のあり方（提案）

本論では氾濫原管理という一つの施策をすることでリスク軽減と生息地提供が両方図れることが共便益を得られることと定義した（第 1.2 章に記載）。研究の結果、その共便益を得るには氾濫原管理の手法として不連続堤防（霞堤）と水田生態系を機能させることが重要であったという結論を得た。それを受け、本章ではこの氾濫原管理を推進する提案を行う。

今後の実装に対しては、霞堤と水田生態系の保全には今も進行する宅地造成・工場誘致などを抑制する必要があると、状況に応じた土地利用の誘導が重要と考える。それを将来的に進めるための提案を、公的なガイドラインに則って整理・議論することにした。ここに活用できるのが IUCN によって作られたガイドライン「自然に根ざした解決策に関する IUCN 世界標準の利用ガイダンス」(IUCN 国際自然保護連合 2020)である。NbS の実装を実践分野で発展させられるよう IUCN が整理したものである。

既存の取り組みを NbS 基準に照らし説明できることは、資金提供者や投資家にとって重要である。国連環境計画 (UNEP) は NbS への投資を 2050 年までに 4 倍にする必要があるとし、各国政府、金融機関、産業界、NGO などの取り組みを後押しする報告書を出した (UNEP 2021)。国内でも次期生物多様性国家戦略の中で NbS の取り組み強化が謳われ (次期生物多様性国家戦略研究会 2021)、その活用の期待は高い。

基準は 8 つ設けられている (図 6.1)。2016 年に IUCN が示した NbS 定義に関連する NbS の根本原則 (IUCN (International Union for Conservation of Nature) 2016) をベースとしてまとめられた。8 つの基準はすべてお互いに関連しあうとされている。

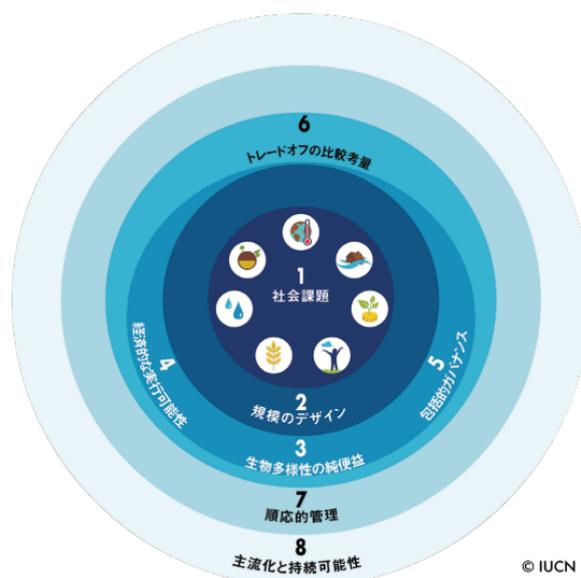


図 6.1 IUCN の NbS 国際標準を形作る 8 つの基準

この8つの基準には2つの機能があると言われている。1つはNbSのデザインを方向づけること。従来なかった氾濫原管理の方法を単なるコンセプトから脱却させ方向性をもった発展をさせることができる。そして2つ目はデザインがNbSの規定を遵守しているか検証することができる。チェックリスト的に活用することで、プロジェクトの管理サイクルにも対応できるものである。この中で特に基準2は空間計画に関わるものであり今後の土地利用を考えていく上で関係深い。物理的な規模で方向性が絞り込まれることを示しているため、特に検討を深めるべき基準と考える。以下一つずつ整理する。

基準1：NbSは効果的に社会課題に取り組む

氾濫原管理を推進するにあたり、まず現時点での社会、経済、環境について評価されなければならないとされている。ベースラインを把握していなければ将来の効果も測れないからである。今優先的に取り組むべき課題は降雨増加による水害リスク増大と、生息地喪失である。1章に示した通り雨量増加データをもとに、国土交通省は気候変動によって雨も洪水も今後増大する予測を示しており、今までの治水施設では安全度が確保できないことは明確だとした。安全に流下させられない、と文書で名言しているのがこの段階である。同様に生物生息地の喪失、劣化の定量化は今回のシンボル種に設定したコウノトリを例にとれば代替生息地である水田面積の減少で表されている（福井・滋賀・愛知・岐阜対象に水田面積は27.5%減少（2000年—2012年に調査が行われた第6回～7回1:25000現存植生図(環境省自然環境局生物多様性センター2017a)と1983年—1999年に調査が行われた第3回～5回1:50000現存植生図(環境省自然環境局生物多様性センター2017b)の比較)。このように取り組む課題と現状を定量化・文書化していくことを提案する。

基準2：NbSのデザインは規模によって方向付けられる

NbSの規模は、小規模なものは公園、生け垣などから、国レベルでは大規模な自然保護区や森林域などが挙げられる。小規模ならば都市にも農村にも策を介入することができ、人為的な環境でも活用可能であるが、今回減災効果を評価した霞堤は規模的に中間程度で、都市の人口密集地に活用することは難しい。

また、同じ流域規模でも生態系の構成、配置および相互作用は様々としており、研究対象領域（滋賀県天野川流域）は水田生態系が流域面積に対して比較的小さかった。つまり低平地の集水域が狭いので多くの水は貯められない。そのかわりに氾濫水を迅速に河道に戻す機能に優れることがわかった。今回分析対象とした霞堤は個々の施設としての規模、

便益が大きくなるとも流域に分散配置させれば NbS のネットワークを構築することもできる。空間計画にはその視点が必要とされる。

基準 3：NbS は、生物多様性、および、生態系の健全性に純便益をもたらす

本論では IUCN 絶滅危惧種のレッドリストに掲載された種をシンボル種に生息地の潜在性を定量化することができた。個体の位置が GPS 追跡といった高度な観測技術でデータ取得・蓄積できれば、そのベースラインも将来期待値も数値化することができる。本研究では在位置と環境情報が GIS 上で整備できたので、出現に影響を及ぼす主要因が水田の存在であったことも把握できた。地域に合った評価対象種とモニタリング手法、将来予測手法を確立し、生態系の健全性を数値化することを提案する。

基準 4：NbS は経済的に実行可能である

氾濫原管理が誰の便益で誰の費用になるのかを明示することを提案する。本論のケースでは氾濫原管理は特定の家屋所有者の市場価値喪失を抑えるという便益になる。氾濫原管理は特定の農地所有者の農地売上喪失、管理負担という費用が生じる。と考えた。今回は水理学的な集水性を考慮するため流域単位で分析したが、その流域という単位の中で水害リスクは偏在することが氾濫水理シミュレーションでわかった。そしてそれは農地が冠水し農作物被害や流入するゴミ処理負担の存在からも明らかであった。ガイドラインは「全ての利害関係者は平等に NbS の影響を受けるわけではない」と明言し NbS を実行した結果損害が生じることも述べており、損失の補償についても言及している。NbS の実践者は、NbS の便益と費用、その受益者と負担者を特定し、文書化する必要があるとしている。透明性の高い期待値を出すことを提案する。これを分配していくのが基準 6 につながる。

ただし本論では負担者・受益者間の不公平性を解消する検討までは扱っていない。これは今後の課題となるが、筆者の考えとしては、日本の人口が減少傾向に入り開発圧が弱まっている傾向、つまり積極的に高リスクエリアにまで開発を広げて宅地や事業地を確保しなくても土地の余剰分が生じてくる傾向を利用して、新規開発制限を適用し「負担者」自体を減らす土地利用誘導の必要性があると考え。選択肢は所有者が退去することに限らない。

基準 5：NbS は、包括的で、透明性が高く、力を与えていくガバナンスプロセスに基づいている

本論の氾濫原管理に実行力を持たせるには、国が主導する流域治水対策に則り「治水と

環境両方を目指したまちづくり」を掲げ、早期実現性の観点からは現行法を活用し、強制力のある土地利用の誘導を加えていくことを提案する。

例えば今回試算した期待減被害額を根拠に、多面的機能支払制度を活用し第 5 章で抽出した「生息地提供と減災効果、両方が期待できる空間」の保全と経済的支援をセットで進めることを提案する。

今回の研究対象地（滋賀県天野川流域）では一時貯留する水田は殆どが農業振興地域の整備に関する法律上の農振農用地に指定され農地からの土地利用転用は原則不可であった。これを順守すれば法律上は農地として維持されるはずである。間接的手法ではあるが、農振農用地の制限による保全を徹底することを提案する。

また、洪水管理機能に影響を及ぼさないよう、霞堤が存在するエリアは盛土をしないよう土地利用の誘導を行うことを提案する。土地利用としては官地（河道域、道路、水路）と民地（農地、工場、宅地など）に区分され、現状規制はされていないため資材置き場やソーラーパネルへの土地利用転換が確認された。管理者・土地所有者との協定（覚書）が考えられるが方策としては弱いのが実情である。強制力のある条例制定を行い今後の土地利用転換、地盤高変更などの景観形成に大きな影響を与える開発行為の規制を制定していく方策を提案する。

基準 6：NbS は、主目的の達成と複数便益の継続的な提供の間のトレードオフを公平に比較考量する

不確実性の高い生態系の機能を活用していくには、高い透明性と公平性のある議論を経て、時間的な視点からもトレードオフを判断していく必要がある。

本論で扱った霞堤の減災効果は 100 年以上の再現期間を想定して初めて便益を得られるものであった。そのため有効な施策として計画するならば 100 年に 1 度の頻度で降る雨の量以上の外力を想定して計画を練るべきであろう。例えば上記より大きい外力の 1000 年に 1 回の頻度の降雨まで想定することは国際的にも一般的である。その 1000 年に 1 回の頻度の降雨は明日起こる可能性も、何世代後に起こる可能性もある。この氾濫原管理が適切であるか、若年層も意思決定に参加すべきで、議論には世代間で公平な参画と議論を提案する。

基準 7：NbS はエビデンスに基づき、順応的に管理される

NbS の実行は反復的に繰り返していく必要があると考える。今回の氾濫水理シミュレー

ションは想定の一部に過ぎず、堤防条件も選択肢は「開けるか閉じるかの二択」ではない。地域の要望により霞堤の盛土の高さを変えて入り込む洪水量を変える、開口部を変える、防備林を設置する、といった順応的管理を提案する。この順応的管理を通じて、地域が受け入れられるリスクの閾値や範囲を決めていくものとする。洪水調整、生息地提供のどちらも win-win の形で機能発揮する場所を第 5 章で示したが、それは NbS の概念を具現化する可能性のある空間として、議論のエビデンスに活用してもらうことを期待している。

基準 8：NbS は、持続可能で適切な法域の文脈の中で主流化される

主流化というのは、価値が転換した状態であり、氾濫原管理の文脈でいえば氾濫というネガティブな事象を遊水というポジティブな機能に転換し、その価値観が地域に受け入れられることと捉える。現在流域治水対策ではこの 180 度の価値の転換が急がれているが、上述の基準 1 から 7 を相互に関係させながら時間を掛けて最終的に達成できるのがこの基準 8 と考える。

以上、今後の氾濫原管理における土地利用計画を推進できるよう具体的な提案をまとめた。再掲になるが国土交通省が主導する流域治水対策において条例の付帯決議で霞堤の活用が求められたこともあり、国土交通省・自治体・地域は霞堤を活かした治水の事業計画を旅活発に策定し始めている。

ただ、この貴重な共便益の発現は水田生態系が健全に保てることが大前提である。多くの人々が生態系の機能を通じて生み出される便益を認識し、その生態系を保全しなければ便益は得られない。開発抑制を含めた空間計画が必要であるのと同時に、開発を受け入れざるを得ない地域には経済的支援が渡る価値があるとする。

7. 図リスト

- 図 1.1 滋賀県高島市安曇川流域の霞堤
- 図 1.2 氾濫原生態系における、河川と氾濫原の接続性に対する人為インパクト例
- 図 1.3 気候変動緩和策による生物多様性保全策への影響
- 図 1.4 生物多様性保全策による気候変動緩和策への影響。出典は上の図 1.3 と同じ。
- 図 1.5 生物多様性保全と気候変動対応の統合解決によるレジリエンスの強化
- 図 1.6 気候変動対策と生物多様性保全の統合的取り組みに向けた流れ
- 図 1.7 本研究の構成
- 図 2.1 本論文中で研究課題解決のために用いた手法・データ
- 図 2.2 生息適地モデル対象範囲
- 図 3.1 霞堤のシステムとしての概念図
- 図 3.2 天野川の位置
- 図 3.3 研究対象の天野川流域の土地利用
- 図 3.4 統合型水理モデル概念図
- 図 3.5 ケース 1 からケース 2 における堤防の縦断図の変更イメージ
- 図 3.6 堤防高の設定方法
- 図 3.7 対象領域内の地形湿潤指数 (TWI)
- 図 3.8 対象領域内の低地土大群の分布図
- 図 3.9 対象領域内の低地帯の分布図
- 図 3.10 天野川本川で検出された 9 か所の霞堤
- 図 3.11 霞堤を閉めて連続堤防にすることで浸水深が増える建物の分布
- 図 3.12 再現期間別期待被害額
- 図 3.13 評価期間別期待減被害額
- 図 4.1 水田面積割合
- 図 4.2 樹林地面積割合
- 図 4.3 樹林と水田の接線長
- 図 4.4 TWI (地形湿潤指数)
- 図 4.5 シンプソンの多様度指数
- 図 4.6 都市的土地利用面積割合

- 図 4.7 4 個体の衛星追跡データから予測した潜在生息地図 (4 県)
- 図 4.8 9 個体の衛星追跡データから予測した潜在生息地図 (全国版)
- 図 4.9 ランドスケープレベルとローカルレベル別の種分布推定の流れ
- 図 5.1 「貯留しやすい空間」と「潜在生息地」
- 図 5.2 都道府県別 両機能が重なる空間の面積 (単位: km²)
- 図 5.3 福井県内で抽出された両便益の重なり空間
- 図 6.1 IUCN の NbS 国際標準を形作る 8 つの基準

8. 表リスト

- 表 1.1 降雨量変化倍率をもとに算出した流量変化倍率と洪水発生頻度の変化
- 表 3.1 確率降雨パターン別 予測浸水深(範囲は天野川流域) (単位: mm)
- 表 3.2 床上浸水 (浸水深 0.5m 以上) の浸水による影響が予想される建物の総数 (戸)
- 表 4.1 コウノトリの希少性に関する各機関の保護上の位置付け
- 表 4.2 GPS 追跡データの特性
- 表 4.3 位置情報を利用した野外個体の属性
- 表 4.4 環境変数一覧 (4 県版)
- 表 4.5 生息確率に影響を及ぼす環境要因の強さ
- 表 4.6 環境変数一覧 (日本全国版)
- 表 4.7 生息確率に影響を及ぼす環境要因の強さ
- 表 5.1 「共便益が得られる空間」を抽出する流れ

9. 写真リスト

- 写真 1.1 福岡県 小石原川右岸 (写真右側) に残る片側堤防
- 写真 3.1 神奈川県横浜市港北区小机町 鶴見川河道内
- 写真 4.1 野外コウノトリ (徳島市)
- 写真 4.2 愛知県知多郡美浜町でコウノトリが利用していた谷津田

10. 引用文献

- Amoros C, Bornette G (2002) Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains. *Freshw Biol* 47:761–776. doi: 10.1046/J.1365-2427.2002.00905.X

- Bander R, Cochran W (1991) Radio-location Telemetry, 3rd Ed.
- BirdLifeInternational, The IUCN (2018) The IUCN Red List of Threatened Species. In: IUCN Red List Threat. Species. Version 2021-3.
<https://www.iucnredlist.org/species/22697695/131942061>. Accessed 14 Apr 2022
- CLS (2016) Argos User's Manual © 2007 -2016 CLS Last updated on June 15, 2016
- Cohen-Shacham E, Andrade A, Dalton J, et al (2019) Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environ. Sci. Policy* 98:20–29
- Collinson NH, Biggs J, Corfield A, et al (1995) Temporary and permanent ponds: An assessment of the effects of drying out on the conservation value of aquatic macroinvertebrate communities. *Biol Conserv* 74:125–133. doi: 10.1016/0006-3207(95)00021-U
- Dadson SJ, Hall JW, Murgatroyd A, et al (2017) A restatement of the natural science evidence concerning catchment-based “natural” flood management in the UK. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 473
- Dasgupta P (2021) The economics of biodiversity: the Dasgupta review. London
- Ezaki Y (2012) Reintroduction of the Oriental White Stork *Ciconia boyciana* aiming at reconstructing its meta-population structure in Japan. *Reintroduction* 2:3–10
- Ezaki Y, Ohsako Y (2013) Re-introduction of the oriental white stork for coexistence with humans in Japan. *Glob Re-introduction Perspect* 85–89
- Farr TG, Rosen PA, Caro E, et al (2007) The shuttle radar topography mission. *Rev Geophys* 45:. doi: 10.1029/2005RG000183
- Furuta N, Shimatani Y (2018) Integrating ecological perspectives into engineering practices – Perspectives and lessons from Japan. *Int J Disaster Risk Reduct* 32:87–94. doi: 10.1016/j.ijdrr.2017.12.003
- Guillera-Arroita G, Lahoz-Monfort JJ, Elith J, et al (2015) Is my species distribution model fit for purpose? Matching data and models to applications. *Wiley Online Libr* 24:276–292. doi: 10.1111/geb.12268
- Guisan A, Zimmermann NE (2000) Predictive habitat distribution models in ecology
- Higuchi H, Pierre JP (2005) Satellite tracking and avian conservation in Asia. *Landsc Ecol Eng* 1:33–42. doi: 10.1007/s11355-005-0002-4
- Ichinose T, Itagawa S, Yamada Y (2019) A Century of Land-use Changes and Economic Damage in Kesenuma City Caused by the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami. *J Environ Inf Sci*

- IPBES (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. doi: 10.5281/ZENODO.3553579
- IPCC (2021) AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis
- IPCC (2014) AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC.
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Accessed 18 May 2021
- IPSI事務局 (2020) SATOYAMA イニシアティブ国際パートナーシップ (IPSI) 自然共生社会の実現に向けて
- IUCN (2021) the IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-2.
<http://www.iucnredlist.org>. Accessed 13 Apr 2022
- IUCN (2020) *Ciconia boyciana* (Oriental Stork).
<https://www.iucnredlist.org/species/22697695/131942061>. Accessed 23 Jun 2020
- IUCN (International Union for Conservation of Nature) (2016) Resolution 69 on Defining Nature-based Solutions (WCC-2016-Res-069). Hawaii
- IUCN 国際自然保護連合 (2020) 自然に根ざした解決策に関する IUCN世界標準の利用ガイドライン. Hawaii
- Jaynes ET (1957) Information theory and statistical mechanics. *Phys Rev* 106:620–630
- Katayama N, Osawa T, Amano T, Kusumoto Y (2015) Are both agricultural intensification and farmland abandonment threats to biodiversity? A test with bird communities in paddy-dominated landscapes. doi: 10.1016/j.agee.2015.08.014
- Kendall BE (2015) Some directions in ecological theory. *Ecology* 96:3117–3125. doi: 10.1890/14-2080.1
- Kusumoto B, Shiono T, Konoshima M, et al (2017) How well are biodiversity drivers reflected in protected areas? A representativeness assessment of the geohistorical gradients that shaped endemic flora in Japan. *Ecol Res* 32:299–311. doi: 10.1007/S11284-017-1451-6
- Lehtomäki J, Kusumoto B, Shiono T, et al (2019) Spatial conservation prioritization for the East Asian islands: A balanced representation of multitaxon biogeography in a protected area network. *Divers Distrib* 25:414–429. doi: 10.1111/DDI.12869
- Liu H, Zhang S, Li Z, et al (2004) Impacts on wetlands of large-scale land-use changes by agricultural development: The Small Sanjiang Plain, China. *Ambio* 33:306–310. doi: 10.1579/0044-7447-33.6.306

- Manel S, Ceri Williams H, Ormerod SJ (2001) Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence
- Momose H, Ueta M, Fujiwara N, et al (2005) サシバ (*Butastur indicus*) の営巣場所数に影響する環境要因. *ランドスケープ研究* 68:555–558. doi: 10.5632/JILA.68.555
- Naito K, Ikeda H (2007) Habitat Restoration for the Reintroduction of Oriental White Storks. *Glob Environ Res* 11:217–221
- Obara H, Maejima Y, Kohyama K, et al (2015) Outline of the Comprehensive Soil Classification System of Japan – First Approximation. *Japan Agric Res Q JARQ* 49:217–226. doi: 10.6090/JARQ.49.217
- Onuma A, Tsuge T (2018) Comparing green infrastructure as ecosystem-based disaster risk reduction with gray infrastructure in terms of costs and benefits under uncertainty: A theoretical approach. doi: 10.1016/j.ijdr.2018.01.025
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Modell* 190:231–259
- Pörtner H-O, Scholes RJ, Agard J, et al (2021) Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. doi: 10.5281/ZENODO.5101125
- Renaud FG, Sudmeier-Rieux K, Estrella M (2013) The role of ecosystems in disaster risk reduction. United Nations University Press
- Ruangpan L, Vojinovic Z, Di Sabatino S, et al (2020) Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: a state-of-the-art review of the research area. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 20:243–270. doi: 10.5194/nhess-20-243-2020
- S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A and CNZ (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2021) Global Biodiversity Outlook 5. Montreal
- Senzaki M, Yamaura Y, Shoji Y, et al (2017) Citizens promote the conservation of flagship species more than ecosystem services in wetland restoration. *Biol Conserv* 214:1–5. doi:

- 10.1016/J.BIOCON.2017.07.025
- Shimada T, Hijikata N, Tokita KI, et al (2016) Satellite-tracking of the spring migration and habitat use of the brent goose *Branta bernicla* in Japan. *Ornithol Sci* 15:37–45. doi: 10.2326/osj.15.37
- Shimada T, Yamada Y, Hijikata N, et al (2018) Utilisation of terrestrial habitat by Black Brant *Branta bernicla nigricans* after the Great East Japan Earthquake of 2011. *Wildfowl* 68:172–182
- Swets JA (1988) Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems. *Science* (80-) 240:1285–1293. doi: 10.1126/SCIENCE.3287615
- Takeuchi K, Hajime K, Tamura T, Miyagi T (1986) Land characteristics of the hills and the man-induced change of their natural potential. *J Japanese Inst Landsc Archit* 50:125–130. doi: 10.5632/jila1934.50.5_125
- Taki K, Matsuda T, Ukai E, et al (2013) Method for evaluating flood disaster reduction measures in alluvial plains. *J Flood Risk Manag* 6:210–218. doi: 10.1111/j.1753-318X.2012.01172.x
- Taki K, Matsuda T, Ukai E, et al (2010) 中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計. *河川技術論文集* 16:477–482
- Tamura M (2000) Satellite observation of movements and habitat conditions of red-crowned cranes and oriental white storks in east Asia. *Glob Environ Res*
- Tamura T (1991) The Recent Trend in Anthropogenic Soil Formation in Japan : An Approach from Landform Transformation(Circumstances and Classifications of Anthropogenic Soils). *Pedologist* 35:117–128. doi: 10.18920/pedologist.35.2_117
- Tockner K, Stanford JA (2002) Riverine flood plains: Present state and future trends. *Environ Conserv* 29:308–330. doi: 10.1017/S037689290200022X
- Totman CD (2018) 日本人はどのように自然と関わってきたのか：日本列島誕生から現代まで. 築地書館, 東京
- UNEP (2021) Nature-based solutions for climate change mitigation. Nairobi and Gland
- Wakamatsu K, Matsuoka M (2013) Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and Vs30 Zoning. *J Disaster Res* 8:904–911
- WEF (2022) The Global Risks Report 2022 17th Edition
- Winsemius HC, Aerts JCJH, Van Beek LPH, et al (2016) Global drivers of future river flood risk. *Nat Clim Chang* 6:. doi: 10.1038/NCLIMATE2893

- Yamamoto T, Kazama S, Touge Y, et al (2020) Estimation of the mitigation and the landuse control for climate change based on the flood analysis in Japan日本全国洪水氾濫解析による気候変動への緩和策及び土地利用規制の評価. J Japan Soc Civ Eng Ser G (Environmental Res 76:I_141-I_150. doi: 10.2208/jscejer.76.5_i_141
- Yoon J, Na S-H, Kim S-K, Park S-R (2012) Use of the foraging area by captive bred oriental storks (*Ciconia boyciana*) in a closed semi natural paddy field. J Ecol F Biol 35:149–155. doi: 10.5141/JEFB.2012.010
- 一ノ瀬友博 (2021) 生態系減災Eco - DRR: 自然を賢く活かした防災・減災. 慶應義塾大学出版会, 東京
- 一ノ瀬友博 (2007) 耕作放棄によって失われていく農村地域の水辺環境とその保全再生. 地球環境 12:37–47
- 三好規正 (2022) 気候変動時代における実効的な流域治水と自治体の役割. 自治総研 48:1–30. doi: 10.34559/JICHISOKEN.48.519_1
- 中村太士, 島谷幸宏, 西廣淳, et al (2017) 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨鬼怒川災害調査報告. 応用生態工学 19:259–267. doi: 10.3825/ECE.19.259
- 中野卓, 木内望 (2020) 水害統計調査基本表に基づく河川水害による建物・市街地被害の傾向
- 井出任 (2006) 農村の景観構造と生物相の保全. 景観生態学 10:71–74. doi: 10.5738/JALE.10.71
- 京都府南丹土木事務所 (2021) 「環境及び治水に配慮した霞堤のあり方に係るアドバイザー会議」規約
- 佐藤哲 (2008) 環境アイコンとしての野生生物と地域社会——アイコン化のプロセスと生態系サービスに関する科学の役割——. 環境社会学研究 14:70–85. doi: 10.24779/JPKANKYO.14.0_70
- 公益財団法人 地球環境戦略研究機関 (IGES) (2021) 生物多様性と気候変動 IPBES-IPCC 合同ワークショップ報告書: IGESによる翻訳と解説. 葉山町
- 兵庫県教育委員会, 兵庫県立コウノトリの郷公園 (2011) コウノトリ野生復帰グランドデザイン
- 兵庫県立コウノトリの郷公園 (2022) コウノトリとは. http://www.stork.u-hyogo.ac.jp/park_intro/how_ows/. Accessed 14 Apr 2022
- 内藤和明, 菊地直樹, 池田啓 (2011) コウノトリの再導入: IUCN ガイドラインに基づく放鳥の準備と環境修復. 保全生態学研究
- 吉川夏樹, 有田博之, 三沢眞一, 宮津進 (2011) 田んぼダムの公益的機能の評価と技術的可能性. 水文・水資源学会誌 24:271–279. doi: 10.3178/jjshwr.24.271

- 吉川夏樹, 長尾直樹, 三沢眞一 (2009) 田んぼダム実施流域における洪水緩和機能の評価. 農業農村工学会論文集 77:273-280. doi: 10.11408/jsidre.77.273
- 和田一範, 竹内邦良, 有田茂, 後藤知子 (2005) 歴史的な河川施設にみる水管理の教訓に関する考察—信玄堤と都江堰ならびに川除文書における流水制御を例として—. 土木学会論文集 2005:105-123. doi: 10.2208/jscej.2005.789_105
- 国土交通省 (2020a) 水害統計調査. In: 国土交通省. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00600590>. Accessed 15 Apr 2022
- 国土交通省 (2017) 社会資本ストックの戦略的維持管理
- 国土交通省 (2020b) 気候変動の影響について. Tokyo, Japan
- 国土交通省 (2004) 水害対策を考える 1-1-5 10年間で水害被害2.6倍に.
https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_1-1-5.html. Accessed 18 May 2021
- 国土交通省 (2015a) 【参考1：過去10カ年の水害被害額の推移（平成12年価格（除平成17年速報値））】（単位：億円・%）
- 国土交通省 (2015b) 社会資本整備重点計画
- 国土交通省 水管理・国土保全局 (2022) 報道発表資料：現場での流域治水の深化を目指します～地域での多様な取組に繋げよう！1級水系で「見える化」～.
https://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo05_hh_000141.html. Accessed 2 Apr 2022
- 国土交通省 水管理・国土保全局 水害対策を考える. In: 2012.
https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/kiroku/suigai/suigai_4-5-jirei.html. Accessed 7 Jun 2022
- 国土交通省 社会資本整備審議会 (2020a) Material for the committee of flood disaster under the climate change. Tokyo
- 国土交通省 社会資本整備審議会 (2020b) 気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について
- 国土交通省 社会資本整備審議会 (2019) 河川分科会 第1回 気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会 配付資料 - 【資料3】国土交通省等における水災害対策の取組状況
- 国土交通省 総合政策局 環境政策課 (2017) グリーンインフラストラクチャー～人と自然環境のより良い関係を目指して～
- 国土交通省北海道開発局, 北海道, 北海道大学 気候変動を踏まえた新しい洪水リスク解析[降雨・流量編]

国土交通省水管理・国土保全局 (2021) ハザードマップに関する現状と課題 ハザードマップの
ユニバーサルデザインに関する検討会資料 ハザードマップに関する現状と課題
国土交通省水管理・国土保全局 水害統計調査
国土交通省水管理・国土保全局 (2020) 治水経済調査マニュアル (案)
国土交通省近畿地方整備局 (2022) 北川水系流域治水プロジェクト. [https://www-
1.kkr.mlit.go.jp/fukui/ryu_kita_tisui/index.html](https://www-1.kkr.mlit.go.jp/fukui/ryu_kita_tisui/index.html)
国土地理院 (2019a) 地理教育の工具箱 氾濫平野.
https://www.gsi.go.jp/CHIRIKYOUIKU/kawa_1-4-2.html. Accessed 12 Apr 2022
国土地理院 (2000) 日本全国の湿地面積変化の調査結果.
<https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/shicchimenseki2.html>. Accessed 26 Apr 2022
国土地理院 (2019b) 令和元年(2019年)台風19号に関する情報 | 国土地理院.
<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihuu19gou.html>. Accessed 15 Mar 2020
国土地理院 (2015) 国土数値情報 低位地帯データ.
https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G08-v1_0.html. Accessed 15 Apr 2022
国土地理院 土地分類調査・水調査 | 20万分の1土地分類基本調査.
https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/1_national_map_20-1.html.
Accessed 14 Apr 2022
国土地理院 (2016) 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ.
<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>. Accessed 16 Apr 2022
堀和明, 田辺晋 (2012) 濃尾平野北部の氾濫原の発達過程と輪中形成. 第四紀研究 51:93–102.
doi: 10.4116/JAQUA.51.93
大元鈴子 (2016) フラグシップ種を活用したローカル認証の役割 —コウノトリ育む農法とサー
モン・セーフ認証—. 人と自然 27:109–115. doi: 10.24713/HITOTOSHIZEN.27.0_109
大橋祐輝, 岡野直幸 (2021) COP26 と自然を活用した解決策 (Nature-based Solutions : NbS)
大沼あゆみ, 山本雅資 (2009) 兵庫県豊岡市におけるコウノトリ野生復帰をめぐる経済分析. 三
田学会雑誌 102:191–211
大熊孝 (2020) 洪水と水害をとらえなおす: 自然観の転換と川との共生. 農文協プロダクション,
東京
大熊孝 (1981) 利根川治水の変遷と水害. 東京大学出版会, 東京
大熊孝 (1987) 霞堤の機能と語源に関する考察. 日本土木史研究発表会論文集 7:259–266
大迫義人 (2012) コウノトリの野生復帰・新たな展開と目標

- 宮崎利博, 竹崎幸博, 福留章洋 (2002) '98高知豪雨 —新河川法制定後の流域協議会の取り組み—. J Japan Soc Hydrol Water Resour 15:309–319. doi: 10.3178/jjshwr.15.309
- 寺村淳, 大熊 (2005a) A Study on evolution and role of open levees on alluvial-fran rivers in the Hokuriku Distrct. Hist Stud Civ Eng 24:161–171. doi: 10.11532/journalhs2004.24.161
- 寺村淳, 大熊孝 (2005b) A Study on evolution and role of open levees on alluvial-fran rivers in the Hokuriku Distrct. 土木史研究論文集,
- 寺村淳, 島谷幸宏 (2018) 筑後川中流域における伝統的治水と屋地盛集落の形成. 景観・デザイン研究講演集 No14 35–41
- 山本道, 風間聡, 峠嘉哉, et al (2019) 気候変動による洪水被害と土地利用規制の効果の推定. 水文・水資源学会
- 岸由二 (2013) 「流域地図」の作り方: 川から地球を考える. 筑摩書房, 東京
- 川那部浩哉, 水野信彦, 中村太士 (2013) 河川生態学. 講談社, 東京
- 応用生態工学会 (2019) 河道内氾濫原の保全と再生. 技報堂出版
- 文部科学省及び気象庁 (2020) 日本の気候変動2020
- 朝日新聞 (2021) 「なぜ自分たちが犠牲に？」霞堤と集団移転、治水対策に揺れる集落: 朝日新聞デジタル. In: 朝日新聞デジタル.
<https://www.asahi.com/articles/ASPBS4W12PBPUTIL027.html>. Accessed 31 Mar 2022
- 木村駿 (2021) 私たちはいつまで危険な場所に住み続けるのか: 自然災害が突き付けるニッポンの超難問. 日経BP, 東京
- 本田裕子 (2015) 野生復帰事業における住民意識の比較を通じたコウノトリやトキの地域資源化について. 225–228
- 杉浦未希子 (2007) 霞堤周辺住民による「水」との共存 —環境と治水の両立に関し宮崎県北川町の農業従事者を事例に一. J Japan Soc Hydrol Water Resour 20:34–46. doi: 10.3178/jjshwr.20.34
- 樋口広芳 (2001) 高度情報通信技術を利用した野生動物の移動追跡(<特集>生態学とIT). 日本生態学会誌 51:205–214. doi: 10.18960/SEITAI.51.3_205
- 次期生物多様性国家戦略研究会 (2021) 次期生物多様性国家戦略研究会報告書
- 武内和彦, 三瓶由紀 (2006) 里山保全に向けた土地利用規制
- 武内和彦, 鷲谷いづみ, 恒川篤史 (2001) 里山の環境学. 東京大学出版会, 東京
- 気象庁 気象庁ホームページ 確率降水量とは.
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/exp_qt.html

- 江崎保男 (2016) エコロジカル・ユニットとしての流域生態系. 野生復帰 4:21-27
- 滋賀県 (2019a) 滋賀県流域治水の推進に関する条例に基づく浸水警戒区域の指定について.
<https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kendoseibi/kasenkoan/19549.html>. Accessed 15 Apr 2022
- 滋賀県 (2017) 地先の安全度マップの公表について | 滋賀県ホームページ.
<https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kendoseibi/kasenkoan/19584.html>. Accessed 15 Mar 2020
- 滋賀県 (2010) 滋賀県の河川整備方針. Shiga, Japan
- 滋賀県 (2021) 滋賀県水害情報発信サイト | 滋賀県ホームページ.
<https://www.pref.shiga.lg.jp/suigaijyouhou/index.html>. Accessed 25 Apr 2020
- 滋賀県 (2016a) 淀川水系・木曽川水系湖北圏域河川整備計画. Shiga, Japan
- 滋賀県 Shiga prefecture home page -the photos of typhoon 13 in 1953-.
<https://www.pref.shiga.lg.jp/suigaijyouhou/gaiyou/photo/301225.html>. Accessed 20 Jun 2020
- 滋賀県 (2016b) 滋賀県農業振興地域整備基本方針. Shiga, Japan
- 滋賀県 (2019b) 淀川水系・木曽川水系 湖北圏域河川整備計画 (変更原案) . Shiga, Japan
- 環境省 (2021) 生物多様性と気候変動に関する ipbes-ipcc 合同ワークショップ 報告書の解説
環境省 環境省_種の保存法とは | ワシントン条約と種の保存法.
<https://www.env.go.jp/nature/kisho/kisei/species/>. Accessed 30 Mar 2022
- 環境省 (2020) 環境省いきものログ. In: 環境省
環境省生物多様性センター 第2-5回自然環境保全基礎調査植生調査報告書.
https://www.biodic.go.jp/kiso/vg/vg_kiso.html. Accessed 14 Apr 2022
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2017a) 1:25000現存植生図.
<http://www.biodic.go.jp/trialSystem/EN/info/vg67.html>
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2017b) 1:50000現存植生図.
<http://www.biodic.go.jp/trialSystem/EN/info/vg.html>
- 田原大輔, 出口雅浩, 関岡裕明 (2022) breeding of the Oriental White Stork *Ciconia boyciana* in the Obama City of Fukui Prefecture. 野生復帰 10:11-19
- 石山信雄, 永山滋也, 岩瀬晴夫, et al (2017) 河川生態系における水域ネットワーク再生手法の整理: 日本における現状と課題. 応用生態工学 19:143-164. doi: 10.3825/ECE.19.143
- 石濱史子 (2017) 標本情報等の分布推定への活用とその実際: バイアスの除去から精度評価ま

- で. 保全生態学研究 22:21-40
- 神山和則, 神田隆志, 高田裕介, 若林正吉 (2017) 包括的土壌分類第 1 次試案に基づく縮尺 1/5 万
全国デジタル農耕地土壌図の作成. 日本土壌肥料学
- 福井河川国道事務所近畿地方整備局 (2022) 日野川水防災・湿地創出事業
- 福井県 九頭竜川・北川流域治水協議会 (2022) 流域治水プロジェクトの拡充について
- 秦康範 (2020) 全国ならびに都道府県別の洪水浸水想定区域の人口の推移. 日本災害情報学会誌
18:107-114
- 穴山悟司, 青木勇樹 (2018) 上野遊水地における塵芥処理について
- 総合地球環境学研究所Eco-DRRプロジェクト (2022) J-ADRES: 自然の恵みと災いからとらえ
る土地利用総合評価. <https://j-adres.chikyu.ac.jp/>
- 菊地直樹 (2006) 蘇るコウノトリ: 野生復帰から地域再生へ. 東京大学出版会, 東京
- 菊地直樹 (2010) コウノトリの野生復帰を軸にした地域資源化. 地理科学 65:165-175. doi:
https://doi.org/10.20630/chirikagaku.65.3_161
- 菊池義浩, 栗田英治 (2021) 豊岡盆地における近年の土地利用変遷とコウノトリ営巣場所の環境
*菊池義浩. 野生復帰 9:69-76
- 萱場祐一 (2000) 雫石川におけるハビタットの変化と冠水頻度との関連について. 環境 システ
ム研究論文集 28:347-352
- 藪原佑樹, 赤坂卓美, 山田芳樹, et al 北海道北部地域を対象としたオジロワシの営巣適地推定. 保
全生態学研究 2012. doi: 10.18960/HOZEN.2012
- 衆議院 (2021) 第204回国会閣法第18号 附帯決議.
https://www.shugiin.go.jp/Internet/itdb_rchome.nsf/html/rchome/Futai/kokudoB82B6401ACD9B759492586B0001DCB58.htm. Accessed 1 Apr 2022
- 複合構造委員会・グリーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究小委員会 (2020) グ
リーンインフラとグレーインフラの融合に関する研究. 土木学会論文集A1 (構造・地震工
学) 76:II_105-II_118. doi: 10.2208/JSCEJSEEE.76.5_II_105
- 西廣淳 (2021) 人と生態系のダイナミクス. 5, 河川の歴史と未来. 朝倉書店, 東京
- 農林水産省 (2020) 作物統計調査 作況調査 長期累年
- 農林水産省 (2020a) 多面的機能支払交付金実施要綱.
https://www.maff.go.jp/j/nousin/kanri/tamen_siharai.html. Accessed 12 Nov 2020
- 農林水産省 (2020b) 農業保険 (収入保険・農業共済) .
<https://www.maff.go.jp/j/keiei/nogyohoken/index.html>. Accessed 17 Aug 2020

農研機構 (2017) (研究成果) ウェブで使える「全国デジタル土壌図」.

https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/niaes/074982.html. Accessed
15 Apr 2022

長尾朋子 (2004) 久慈川中流域における水害防備林の立地と機能. 地理学評論 77:183–194. doi:
10.4157/grj.77.183

門井直哉 (2001) 嶺南・嶺北を結ぶ交通路の変遷. 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要
2:109–115

関正和 (1994) 大地の川: 甞れ、日本のふるさとの川. 草思社, 東京

風間聡 (2015) 平成26年度_環境研究総合推進費終了成果報告書(S-8-1(4)) 沿岸・防災リスクの
推定と全国リスクマップ開発. http://www.nies.go.jp/s8_project/group/group04.html.
Accessed 18 May 2021

鷺谷いづみ (2007) 氾濫原湿地の喪失と再生: 水田を湿地として活かす取り組み. 地球環境
12:3–6

鷺谷いづみ (2010) 保全生態学の技法: 調査・研究・実践マニュアル. 東京大学出版会, 東京

11. 既発表参考論文

Yamada Y, Itagawa S, Yoshida T, et al (2019) Predicting the distribution of released Oriental
White Stork (*Ciconia boyciana*) in central Japan. Ecol Res. doi: 10.1111/1440-1703.1063

Yamada Y, Taki K, Yoshida T, Ichinose T (2022) An economic value for ecosystem-based
disaster risk reduction using paddy fields in the kasumitei open levee system. Paddy Water
Environ. doi: 10.1007/s10333-021-00885-0

12. 謝辞

本研究は実に多くの方々に支えられ、寄り添っていただいで論文の形にすることができた。皆様からいただいたお力添えに深く感謝の意を表す。私は1997年に環境情報学部を卒業後、2018年に政策・メディア研究科に社会人入学した。40代の人生に再び豊かな学びの機会を与え、知と経験を惜しみなく下さった主査の慶應義塾大学一ノ瀬友博先生に最初に心からの感謝をお伝えしたい。

一ノ瀬先生は2021年に環境情報学部長に就任された。多忙極まる中でも一貫して私の拙い話にも丁寧に耳を傾け、混沌としたメールにも的確な忠言を返し、失敗しても次の機会を下さり、常に研究を支えて下さった。学術面はもとより、研究に対し持つべき透明性・公平性の大切さ、調査現場で受け取るべき感覚、判断。その全てを一ノ瀬先生から授かることができよかったですと心から思う。人生を豊かにしていただいたことすべてにお礼を申し上げたい。

私が学部在籍中に本研究の要となるGIS（地理情報システム）の理論と技術を授けて下さったのが巖網林先生であった。再会後も副査を快くお引き受け下さり、広い視野での指摘をいただいた。それが本論の構成作りの土台になっている。また、統計学を生態学にも計量経済学にも発展させる第一人者の古谷知之先生に副査としてご指導をいただいたことは本当に贅沢なことであった。これからも先生の資料で学びを続けたいと思っている。

学外副査をお受けいただいた東京大学の吉田丈人先生には総合地球環境学研究所のプロジェクトに参加させていただいたことに深く感謝申し上げる。私が多大な経験と知を得られる幸せな研究者生活を送れたのは吉田先生のご厚意のおかげであった。同プロジェクトの共同研究者の滋賀県立大学の瀧健太郎先生のお名前もここに記したい。私が理解し、達成することを支え、喜びを分かち合って下さった。わかるまで何度でも見せる！と霞堤を周回し、何時間もzoomをつなぎ、算数から叩き込んでもらった成果が第3章である。

辛抱強く、私の研究に寄り添い、力を与えて下さった先生方に心から感謝すると共に、これから先も尊敬する存在として多くを共有させていただけることを心からお願いしたい。

このように素晴らしい先生方に出会えるという機会を得た一方、2020年春からのCOVID-19の影響により多くの貴重な研究の機会を喪失したことは否めなかった。最大限の配慮をいただいたが地方調査には出づらく、海外渡航は原則許されなかった。研究は無言で一人進めるものとなり、一方家事や育児の負担は増え、実はここで一度休学を考えた。救いだったのは慶應大学の教職員は試行錯誤しながらも学びを止めない対応を続けてくれたことだ。殆どの論文を取得でき、書籍をオンラインで読め、高価なライセンスのソフト

を使えることで大学の有難さを再認識した。改めて慶應義塾大学には感謝したい。

しかしより大きな打撃はウクライナ侵攻であった。豊かな大地が荒廃し、今も人のみならず多くの生命が失われている。人為の影響が強すぎて生態系の保全という研究があまりにも無力・無意味に感じざるを得なかった。この研究の苦しさを軽くしてくれたのは「気付いた人が出来ることをやるといい」という昔の会話の一片であった。私はたまたま生態系の重要性に気付いた人間であるし、それを大事にするための学問や経験を授けてもらったので、そこに柱を立てて独り立ちできればと思う。

先述の総合地球環境学研究所のプロジェクトでは、中村太士先生、鎌田磨人先生、秋山祐樹先生、西廣淳先生、上原三知先生をはじめ、黄琬恵さん、饗庭正寛さん、千田昌子さんほか沢山の方々にお世話になった。関連して公益財団法人リバーフロント研究所の中村圭吾さんには多くのつながりや応援をいただいた。

第3章の研究に関しては、先述の瀧先生ほか、データを提供して下さった滋賀県、米原市、高島市の市役所の皆様、視察を許可下さった地元の方々にお礼申し上げる。

第4章の研究に関しては兵庫県立コウノトリの郷公園、福井県自然環境課からは、長きに渡る野外復帰事業の一環として取られた貴重なデータ提供をいただいた。敬意と感謝を以ってお礼申し上げたい。特に兵庫県立大学の佐川志朗先生、出口智広先生からは河川生態学、動物行動学の視点から貴重なご教示をいただき、福井県西垣正男さん、木村美貴さんにはデータ貸与で大変お世話になった。分析に力をつけられたのは宮城県伊豆沼内沼環境保全財団嶋田哲郎さん、慶應義塾大学樋口広芳先生との有難い共同研究のおかげである。

慶應義塾大学学内の宮地恵美先生、牛山潤一先生、塚原沙智子先生にはたくさん話を聞いていただいた。一ノ瀬研究室の学生さん、特に研究を支えてくれた井本郁子先生、研究員の佐々木恵子さん、OBの板川暢さん、荒金恵太さん、湯浅拓輝さん、奈良晃太さん、野上奨之輔さん、二川原湧さん、そして卒業生の皆さん、秘書の榎本道子さん、菅井奈美さん。私の困難の場面にいつも優しく、そして素早く手を貸してくれたのはみなさんだった。優秀且つあたたかい仲間と一緒にすごせた時間は生涯の宝だと思っている。

「子供たちは私達に任せて研究がんばって！」と子供の送迎や調査出張の際にはお弁当まで作ってくれた黄エンル・陳鵬元さんご夫妻。多謝！！大切な友人達、応援ありがとう。

本研究の成果は、人間文化研究機構総合地球環境学研究所のプロジェクト(人口減少時代における気候変動適応としての生態系を活用した防災減災(Eco-DRR)の評価と社会実装(No. 14200103)、代表者：吉田丈人)、日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B)

Eco-DRR 施設群の性能評価および最適計画に関する基礎的研究 課題番号 20H04377、代表者：瀧健太郎)、日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B)コウノトリ野生復帰事業の現状評価と真のワイルドライフマネジメントの提案と実行 課題番号 21H03652、代表者：佐川志朗)、東京大学空間情報科学センター共同研究 (No.952) 生態系を活用した防災・減災のための土地利用のシナリオ開発、代表者：吉田丈人)の一部である。

また 2019 年度,2020 年度 森泰吉郎記念研究振興基金による研究助成 (研究者育成費)、2019 年度, 2020 年度 慶應義塾大学 博士課程学生研究支援プログラム(研究科推薦枠 /全塾推薦枠)による助成を受けた。ここに深くお礼申し上げます。

そして最後に。博士学位取得への挑戦を後押しし、研究生生活を支えてくれた両親、義母、夫、娘たちに最大限の感謝をおくります。