

土地利用

## 大規模な河道との再接続による持続的な氾濫原利用

堤防を戦略的に撤去または再配置すると、洪水リスクの低減、財とサービスの供給拡大につながる可能性がある。

ジェフリー・J・オPPERマン、<sup>1,2\*</sup> ジェラルドE・ギャロウェイ、<sup>3</sup> ジョセフ・ファルジオーネ、<sup>1</sup>  
ジェフリー・F・マウント、<sup>2</sup> ブライアンD・リヒター、<sup>1</sup> シルビア・セッチ、<sup>4</sup>

洪水は世界的に最も被害の甚大な自然災害であり、その被害を受けやすい人口は今後も増加が見込まれている(1)。気候変動(1)と、土地利用の変化(湿地の埋立や不透水性表土の拡大など)による河川への降雨流出の加速化という二つの理由から、洪水リスクが高まる可能性がある。米国では、河川洪水による年間損失が増加を続けているが(2)、中西部(1993年に総額300億ドル、2008年度は150億ドル)やカリフォルニア州のセントラルバレー(1995年と1997年;各40億ドル)における大規模洪水により特に膨らんだ(3)。堤防保全の財源は慢性的に不足している一方で(5)、洪水がおきやすい河岸地域(氾濫原)の住宅開発圧力は変わらない(4)。



The Yolo Bypass while flooded. [Photo by William Harrell, California Department of Water Resources]

### 氾濫時のヨーローバイパス

洪水防止施設(堤防など)は氾濫原への洪水の流入を防いでいるが、自然の洪水貯留能力や健全な河岸林や湿地を持続させるプロセスが損なわれている。うまく機能していれば、生物多様性を支え、社会に財やサービスを提供するための最も貴重な生態系の一つとなるにもかかわらず(6,7)、氾濫原(河川に連続する平原)は地球上で最も脅威にさらされた生態系の一つとなっている。そこで、経済的、環境的に持続可能な氾濫原を管理するには、早急に土地利用や政策を大々的に変える必要があることを提起したい。堤防を戦略的に撤去するか河川から離して設け、洪水流を貯留し送水するという自然の機能を果たしうる氾濫原地域を拡大しなければならない。

氾濫原の再接続により3つの基本目的が達成される:洪水リスクの低減、氾濫原における財とサ

ービスの供給拡大、そして気候変動の潜在的影響に対する回復力である。人口密度の高い氾濫原の面的な再接続には相当な費用を要することから、現在農業に使われている広域氾濫原の戦略的再接続に活動の焦点をあてるべきである。この変更は、少なからぬ社会経済的、政治的問題に直面するであろう。しかし、それも土地の私有や活気ある農業経済と両立する氾濫原の土地利用を促進することで克服できるはずである。この具体的な提言は米国を対象としたものだが、この考え方は世界のどこでも適用できる。同じような変更の要請が行われている国もある（例えば（8））。

### リスクの低減、便益の増大

大規模な氾濫原再接続により洪水リスクは二つの形で低減される。まず、再接続された氾濫原内の土地利用が定期的な浸水に対応できる活動へと移行していく。洪水に強い土地利用（後述）は、はるかに洪水被害の影響を受けにくく、それにより災害救済金の要請も減る可能性がある。第二に、再接続により洪水流を貯留し送水するために使える面積が増え、近隣地域への洪水リスクが低減される可能性がある。米国ではほとんどの地域で、こうした便益は、堤防の決壊により偶然に生じている。例えば、2008年の中西部での洪水発生時には、農地保護を目的とした近くの堤防が決壊したため、ある町が洪水を免れ、洪水流は原野を氾濫させ、町の堤防への圧力を和らげることとなった（9）。しかし、市民の安全という便益を最大化するために氾濫原の戦略的再接続を設計実施することは、地方や地域の洪水リスクの低減に大変有望である（8）。例えば、イリノイ川の調査から、8000haの氾濫原の再接続により、大規模洪水による浸水確率が半減し、農地26,000haの保護が改善されることが分かった（10）。

氾濫原の大規模再接続は、水管理施設の柔軟性や回復力を高める可能性もある。世界的に、何千もの大規模な多目的ダムが洪水防止や給水および/または水力発電に使われている（または、その目的で建設中である）。貯水池の水位を一部抑える必要性（洪水流の貯留目的で）と、満水時にもたらされる便益（給水、水力発電、レクリエーション、健全な生態系を保つための環境流量）とのバランスをとらなければならない。気候変動モデルから、世界の多くの地域で、洪水、旱魃ともに発生頻度が増えることが伺える。そのため、多くの目的のバランスをとることが困難になりつつある（1）。氾濫原の大規模再接続により洪水流を貯留し送水すれば、上流の貯水池を一部空けておく必要性が減り、満水時に提供し得る便益が高まる。氾濫原再接続による水管理システムの回復力強化は、生態系に基づく気候変動への適応策として有望な一例である。

このアプローチの経済的、政治的な実行可能性の鍵は、再接続された氾濫原地域が概ね私有地のまま残る可能性があるため、農業生産性などによる収益をもたらすことである。定期的な浸水に対応できる農作業としては、牧草地、木材、洪水に強い作物の栽培（スイッチグラスや柳などのバイオマス燃料源など）などがあげられる（11）。米国西部など、洪水の季節性が強い地域では、乾季

に一年生作物を栽培することができる。洪水が栽培期と重なる場合でも、さほど頻繁に浸水しない（10年に一度以下など）再接続地では、多様な作物を栽培することができるであろう。

自然植生下の氾濫原では高い生物学的生産性や多様性（7）が支えられ、ヘクタール当たりの価値で言えば各種生態系の中でも河口に次ぐ豊かな生態系を提供している（6）。例えば、多年生植物により（復元された生息域であれバイオマス作物であれ）、炭素隔離が促され（12）、土壌侵食の軽減や栄養塩の保持の増加により（11）水質が改善する。

### 資金管理と再接続

ここで概説した構想は、氾濫原の新しい土地利用パターンにより、洪水流の定期的な送水と貯留が可能となり、洪水リスクの低減や多目的貯水池による便益の増大など、相当な社会的便益が生れるとの前提をふまえている。こうした便益には、洪水被害に対する定期的な補償と共に、堤防の後退、浸水地役権、土地取得、復元に関わる巨額の先行投資が発生する。州または連邦政府は、氾濫原の土地所有者と、洪水リスクの低減、貯水池の再配分、生態系サービスの受益者とを結びつける制度的または財政的な仕組みを支援する必要がある。

サクラメント地域洪水防止局（Sacramento Area Flood Control Agency）の提案に似た形で、例えば受益者（または代理として政府）は、洪水リスクの増大または再接続地の経済的生産性の喪失に対する土地所有者への補償を支払うことができる（13）。同局の提案は、大型暴風雨時に、「安全弁」となり開発地への影響を緩和することとなった氾濫原の農家に補償するというものであった。生態系サービスは炭素隔離や栄養物隔離の新たな市場を通して収益を生む可能性がある。野生動物の生息地、公的オープンスペース、あるいは地下水涵養の提供といった他のサービスは、公的財源（湿地保存計画 Wetland Reserve Program など）あるいは、狩猟用借地料徴収や湿地、絶滅危惧種の生息地、地下水を保全するための「銀行」などにより（14, 15）、資金を確保し得る。

氾濫原再接続に対する潜在的需要を表す一例がある。米農務省（USDA）は、氾濫原の地役権設定のためのアメリカ回復再投資法（American Recovery and Reinvestment Act）に基づき1億4,500万ドルを受け取り、登録可能な面積（14,400ha）を超える10倍以上の土地（192,000ha）について申請を受け取った（16）。水（近い将来の水資源開発に関する連邦の原則と指針の改正など（17））およびエネルギー、農業、気候変動にかかわる現行の法規及び政策立案プロセスは、洪水リスク低減手段としての氾濫原再接続を推進する機会をもたらしている。

### 成功例：ヨーローバイパス（Yolo Bypass）

ほとんど実施されていないものの、大規模な氾濫原再接続というこの構想に前例がないわけでは

ない。カリフォルニア州のヨーローバイパスは、大規模な洪水発生時に、洪水流をサクラメント市から迂回させ、サクラメント川の洪水流の80%を流下させた(1487ページの図参照)(18)。このバイパスは、「堤防のみ」のアプローチでは洪水被害を十分に低減できないことが明らかになった。1930年代に、24,000haの氾濫原を再接続して構築された(19)。大量の洪水流を運び、カリフォルニア州の水管理施設の柔軟性を高めている。1986年3月の洪水時には、125億立方メートル以上の水、つまり、サクラメントの全流域貯水池が受け入れられる洪水防止貯水総量(35億立方メートル)の3倍以上の水を運んだ。この時、洪水防止システムはほぼフル稼働していた(20)。バイパス氾濫原がなければ、カリフォルニア州は巨大な洪水防止施設を別に構築するか、既に一杯の利水容量をさらに洪水防止用に配分する必要があるであろう。

バイパスの3分の2は私有の生産農地である。浸水時には、鳥類や在来魚の生息地となっている(18)。バイパスは、急成長する地域の広場、レクリエーション(収益をもたらすカモ猟クラブなど)、地下水涵養(旱魃時の流域土手として貴重)など、別の生態系サービスを提供している(14)。

## 結論

先進諸国では持続的でない氾濫原の土地利用が一般的であり、開発途上国も同じ道をたどっている(7)。ここに紹介した構想は氾濫原から人間の活動を排除せよと求めるものではない。むしろ、社会と個人土地所有者の双方に氾濫原の最大の便益をもたらしつつ、非持続的な利用を減らしていくというアプローチである。

(著者所属)

- 1 自然保護委員会 Arlington, VA22203, USA
- 2 カリフォルニア大学デイビス校、流域科学センター、Davis, CA 95616, USA
- 3 メリーランド大学、土木環境工学科および公共政策大学院、College Park, MD 20742, USA
- 4 南イリノイ大学、アグリビジネス経済学科、Carbondale, IL62901, USA

\*連絡先：メール：jopperman@trc.org

## LAND USE

# Sustainable Floodplains Through Large-Scale Reconnection to Rivers

Jeffrey J. Opperman,<sup>1,2</sup> Gerald E. Galloway,<sup>3</sup> Joseph Rengione,<sup>1</sup> Jeffrey F. Mount,<sup>4</sup>  
Brian D. Richter,<sup>1</sup> Silvia Secchi<sup>5</sup>

**F**looding is the most damaging natural disaster worldwide, and the flood-vulnerable population is expected to grow in coming decades (1). Flood risks will likely increase because of both climate change (2) and shifting land uses, such as filling of wetlands and expansion of impervious surfaces, that lead to more rapid precipitation runoff into rivers. In the United States, annual river flood losses continue to rise (2), punctuated by major events in the Midwest (1993, \$20 billion in total costs; 2008, \$15 billion) and California's Central Valley (1995 and 1997, \$4 billion each event) (3). Meanwhile, pressure to develop new housing in flood-prone areas near rivers (floodplains) continues (4), even as levee-system maintenance is chronically underfunded (5).

Flood-control infrastructure (e.g., levees) prevents high flows from entering floodplains, thus diminishing both natural flood-storage capacity and the processes that sustain healthy riverside forests and wetlands. As a result, floodplains are among the planet's most threatened ecosystems, even though functioning floodplains—those connected to rivers—are among the most valuable ecosystems for supporting biodiversity and providing goods and services to society (6, 7). We propose that a large-scale shift in land use and policy is urgently needed to achieve economically and environmentally sustainable floodplain management. The area of floodplains allowed to perform the natural function of storing and conveying floodwaters must be expanded by strategically removing levees or setting them back from the river.

Floodplain reconnection will accomplish three primary objectives: flood-risk reduction, an increase in floodplain goods and services, and resiliency to potential climate-change impacts. Efforts should focus on strategic reconnection of large areas of floodplain



The Yolo Bypass while flooded. (Photo by William Harrel, California Department of Water Resources)

currently used for agriculture, as large-scale reconnection of densely populated floodplains would be considerably more expensive. The changes we propose will confront considerable socioeconomic and political challenges, but we believe these can be overcome by promoting floodplain land uses that are consistent with private ownership and a vibrant agricultural economy. Although our specific recommendations are for the United States, this vision is applicable worldwide. Similar calls for change have been made in several countries (e.g., 8).

### Reduced Risk, Enhanced Benefit

Large-scale floodplain reconnection will reduce flood risk in two ways. First, land use within reconnected floodplains will move toward activities compatible with periodic inundation. Flood-tolerant land uses (described below) will be much less vulnerable to flood damages and therefore less likely to require disaster relief payments. Second, reconnection increases the area available to store and convey floodwaters and can reduce flood risk for nearby areas. In most of the United States, this benefit occurs haphazardly

If riverside levees are strategically removed or repositioned, the result can be reduced flood risk and increased goods and services.

through levee failure. For example, during 2008 floods in the U.S. Midwest, a town was spared because an nearby levee protecting croplands failed, allowing floodwaters to inundate fields and alleviating pressure on the town's levees (9). But strategic reconnection of floodplains, designed and implemented to maximize public safety benefits, holds great promise for reducing local and regional flood risk (8). For example, a study of the Illinois River found that reconnection of 8000 hectares (ha) of floodplain would improve protection for 36,000 ha of farm land by halving the probability of inundation from major floods (10).

Large-scale reconnection of floodplains may also increase flexibility and resilience of water-management infrastructure. Globally, thousands of large, multipurpose dams provide (or are being built to provide) flood control and water supply and/or hydropower. The need for partially empty reservoirs (to store floodwaters) must be balanced with the benefits from full reservoirs (water supply, hydropower, recreation, and environmental flows to maintain healthy ecosystems). Climate-change models suggest that many regions of the world will experience increased frequency

<sup>1</sup>U.S. Nature Conservancy, Arlington, VA 22203, USA; <sup>2</sup>Center for Watershed Sciences, University of California, Davis, CA 95616, USA; <sup>3</sup>Department of Civil and Environmental Engineering and School of Public Policy, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA; <sup>4</sup>Department of Agriculture, University of Southern Illinois, Carbondale, IL 62901, USA

\*To whom all correspondence should be addressed. jopp@nature.org

of both floods and droughts, exacerbating the challenge of balancing these multiple objectives (7). Large-scale floodplain reconnection provides floodwater storage and conveyance, reducing the need for upstream reservoirs to remain partially empty and thus increasing the benefits they could provide when full. Increased resiliency of water management systems through floodplain reconnection is a promising example of ecosystem-based adaptation to climate change.

A key to the economic and political viability of this approach is that reconnected floodplains can remain largely under private ownership, generating revenue such as through productive agriculture. Agricultural practices consistent with periodic inundation include pasture, timber, and cultivation of flood-tolerant crops (e.g., biomass fuel sources such as switchgrass and willow) (17). Where there is strong seasonality in floods, such as the western United States, annual crops can be grown during the dry season. Even where floods are coincident with the growing season, a broader variety of crops could be cultivated on reconnected lands that are inundated less frequently (e.g., less than once per decade).

Connected floodplains under natural vegetation support high levels of biological productivity and diversity (7) and provide numerous ecosystem services, second only to estuaries among ecosystem types in terms of value per hectare (8). For example, perennial plants, in different natural habitats or biomass crops, increase carbon sequestration (2) and improve water quality by reducing soil erosion and increasing nutrient retention (17).

#### Funding Management and Reconnection

The vision outlined here is based on the premise that new floodplain land-use patterns, allowing periodic conveyance and storage of floodwaters, will produce substantial societal benefits, including reduced flood risk or increased benefits from multipurpose reservoirs. Achieving these benefits will incur large upfront costs for levee setbacks, flow easements, land acquisition, and restoration, along with periodic compensation for flood damages. State or federal governments will need to support institutional or financial mechanisms that link floodplain landowners with beneficiaries of reduced flood risk, reservoir reallocation, and ecosystem services.

For example, beneficiaries (or, by proxy, government) could compensate landowners for increased flood risk or lost economic productivity on reconnected lands, similar to a proposal from the Sacramento Area

Flood Control Agency to compensate farmers whose land floods during large storms, serving as "relief valves" and easing pressure on developed areas (13). Ecosystem services could potentially generate revenue through emerging markets for carbon and nutrient sequestration. Other services—such as providing wildlife habitat, open space, or groundwater recharge—can be supported by public sources of funding (e.g., Wetland Reserve Program), or, for example, through hunting leases and "banks" for wetlands, endangered species habitat, or groundwater (14, 15).

As an indication of the potential demand for floodplain reconnection, the U.S. Department of Agriculture (USDA), which received \$445 million under the American Recovery and Reinvestment Act to acquire floodplain easements, received applications for >10 times the area of land (1.92,000 ha) than they were able to enroll (14,400 ha) (16). Current legislative and policy-making processes for water (e.g., forthcoming revisions to the federal Principles and Guidelines for water development) (17), as well as energy, agriculture, and climate change provide opportunities to promote floodplain reconnection as a flood-risk reduction tool.

#### Demonstrating Success: The Yolo Bypass

Although to date rarely implemented, this vision of large-scale floodplain reconnection is not unprecedented. California's Yolo Bypass conveys 80% of Sacramento River floodwaters during large events, routing water away from the city of Sacramento (see figure, page 1487) (18). The bypass was created in the 1930s by reconnecting a 24,000-ha floodplain when it became apparent that a "levees only" approach would not sufficiently reduce flood damages (19). By conveying large volumes of floodwaters, the bypass increases the flexibility of California's water management infrastructure. During a March 1986 flood, the bypass conveyed ~12.5 billion cubic meters (bcm) of water, more than three times the total flood-control storage volume in all Sacramento basin reservoirs (3.5 bcm). This occurred during a period when the flood-control system was operating near maximum capacity (20). Without the bypass floodplain, California would need to build massive additional flood-control infrastructure or allocate more of its already strained water-supply storage capacity to flood control.

Two-thirds of the bypass is privately owned, productive agriculture. During inundation, the bypass provides habitat for birds and native fish (18). The bypass provides

additional ecosystem services, such as open space for a rapidly growing region, recreation (including revenue-producing duck-hunting clubs), and groundwater recharge (of great value as a water bank during droughts) (14).

#### Conclusion

Unsustainable floodplain land use is common throughout the industrialized world, and developing countries are following the same trajectory (7). The vision outlined here is not a call to empty the floodplain of human activity. Rather it is an approach that would reduce unsustainable uses while maximizing floodplain benefits for both society and private landowners.

#### References and Notes

1. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
2. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
3. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
4. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
5. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
6. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
7. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
8. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
9. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
10. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
11. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
12. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
13. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
14. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
15. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
16. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
17. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
18. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
19. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).
20. D. Miller, *Science* **320**, 1242 (2007).

10.1126/science.1211001