

CLIMATE CHANGE

気候変動

# Stationarity Is Dead: Whither Water Management?

定常性の効力は失せた：水資源管理はどうなるのか

P. C. D. Milly,<sup>1\*</sup> Julio Betancourt,<sup>2</sup> Malin Falkenmark,<sup>3</sup> Robert M. Hirsch,<sup>4</sup> Zbigniew W. Kundzewicz,<sup>5</sup> Dennis P. Lettenmaier,<sup>6</sup> Ronald J. Stouffer<sup>7</sup>

<sup>1</sup>U.S. Geological Survey (USGS), c/o National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, NJ 08540, USA. <sup>2</sup>USGS, Tucson, AZ 85745, USA. <sup>3</sup>Stockholm International Water Institute, SE 11151 Stockholm, Sweden. <sup>4</sup>USGS, Reston, VA 20192, USA. <sup>5</sup>Research Centre for Agriculture and Forest Environment, Polish Academy of Sciences, Poznan', Poland, and Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany. <sup>6</sup>University of Washington, Seattle, WA 98195, USA. <sup>7</sup>NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, NJ 08540, USA.

\*Author for correspondence. E-mail: cmilly@usgs.gov

Climate change undermines a basic assumption that historically has facilitated management of water supplies, demands, and risks

気候変動により水の需給や関連するリスクの管理を促してきたこれまでの基本前提が損なわれている

Systems for management of water throughout the developed world have been designed and operated under the assumption of stationarity. Stationarity—the idea that natural systems fluctuate within an unchanging envelope of variability—is a foundational concept that permeates training and practice in water-resource engineering. It implies that any variable (e.g., annual stream-flow or annual flood peak) has a time-invariant (or 1-year-periodic) probability density function (pdf), whose properties can be estimated from the instrument record. Under stationarity, pdf estimation errors are acknowledged, but have been assumed to be reducible by additional observations, more efficient estimators, or regional or paleohydrologic data. The pdfs,

in turn, are used to evaluate and manage risks to water supplies, water-works, and floodplains; annual global investment in water infrastructure exceeds U.S.\$500 billion (1).

先進国における水資源管理システムは、定常性(stationarity)を前提に設計運営されてきた。定常性とは、自然系は可変性という不変の外層内で変動するという概念で、水資源工学におけるトレーニングや実践を貫く根本概念である。つまり、変数(年間流量または年間洪水ピークなど)はすべて時不変(または1年周期の)の確率密度関数(pdf)を持ち、その特性は計器記録から推定できるということである。定常性においては、pdfの推定誤差が認められている



An uncertain future challenges water planners.

が、観察の追加、推定器の効率向上、あるいは地域または古水文学的なデータにより、低減しうると考えられてきた。pdf は、給水、水道、氾濫原に対するリスクの評価と管理のために利用されている。水資源施設に対する世界の年間投資額は5,000 億米ドルを超える（1）。

The stationarity assumption has long been compromised by human disturbances in river basins. Flood risk, water supply, and water quality are affected by water infrastructure, channel modifications, drainage works, and land-cover and land-use change. Two other (sometimes indistinguishable) challenges to stationarity have been externally forced, natural climate changes and low-frequency, internal variability (e.g., the Atlantic multidecadal oscillation) enhanced by the slow dynamics of the oceans and ice sheets (2, 3). Planners have tools to adjust their analyses for known human disturbances within river basins, and justifiably or not, they generally have considered natural change and variability to be sufficiently small to allow stationarity-based design.

定常性の前提は長いこと河川流域における人為的攪乱に歩み寄ってきた。洪水リスク、給水、そして水質は、水資源施設、水路（河道）の調整、排水工事、土地被覆や土地利用の変化に影響を受ける。定常性にとって他に二つの（時には区別不可能な）問題は外力によるもの、自然の気候変動と、海洋と氷床の遅速な動態により促された低頻度の内部可変性（大西洋の数十年オーダーの振動など）である（2, 3）。計画者は、河川流域内における既知の人為的攪乱に関する分析を調整する手段を有しており、それが妥当か否かにかかわらず、一般には自然の変化や可変性は小さなものであり定常性ベースの設計が十分可能であると考えてきた。

In view of the magnitude and ubiquity of the hydroclimatic change apparently now under way, however, we assert that stationarity is dead and should no longer serve as a central, default assumption in water-resource risk assessment and planning. Finding a suitable successor is crucial for human adaptation to changing climate.

しかし、今確かに進行中の水文気候変動の規模と偏在性を考えると、定常性の効力は失せた、もはや、水資源のリスク評価や計画立案における基本的な初期仮説として使えないと言わざるを得ない。気候変動に対応するには適切な後継を探すことが不可欠である。

*How did stationarity die?* Stationarity is dead because substantial anthropogenic change of Earth's climate is altering the means and extremes of precipitation, evapotranspiration, and rates of discharge of rivers (4, 5) (see figure, above). Warming augments atmospheric humidity and water transport. This increases precipitation, and possibly flood risk, where prevailing atmospheric water-vapor fluxes converge (6). Rising sea level induces gradually heightened risk of contamination of coastal fresh-water supplies. Glacial meltwater temporarily enhances water availability, but glacier and snow-pak losses diminish natural seasonal and interannual storage (7).

いかにして定常性は効力を失ったのか？ 地球の気候が相当に人為的变化を生じたことにより、降水量の平均や極値、蒸発散量、河川流量を変えているからである（4, 5）（上表参照）。温暖化により、大気湿度や水分輸送が増えている。そのため、降水量が増え、広範囲の大気中の水蒸気フラックスが収束した場合には、おそらくは洪水リスクも増大する（6）。海面が上昇し、沿岸部の淡水供給の汚染リスクが徐々に高まる。融氷水が一時的に水供給量を引き上げる

が、氷河や雪塊がなくなることにより自然の季節的で経年的な蓄積が損なわれる（7）。

Anthropogenic climate warming appears to be driving a poleward expansion of the sub-tropical dry zone (8), thereby reducing runoff in some regions. Together, circulatory and thermodynamic responses largely explain the picture of regional gainers and losers of sustainable freshwater availability that has emerged from climate models (see figure, p. 574).

人為的な気候温暖化は、亜熱帯乾燥地帯の極方向への拡大を促しているようだ（8）。これにより、一部地域での流出水が減っている。また、循環反応や熱力学的反応で、気候モデルから導き出された持続可能な淡水の利用可能性に関する地域的な損得状況の全体像はかなり説明できる（P574の表参照）。

*Why now?* That anthropogenic climate change affects the water cycle (9) and water supply (10) is not a new finding. Nevertheless, sensible objections to discarding stationarity have been raised. For a time, hydroclimate had not demonstrably exited the envelope of natural variability and/or the effective range of optimally operated infrastructure (11, 12). Accounting for the substantial uncertainties of climatic parameters estimated from short records (13) effectively hedged against small climate changes. Additionally, climate projections were not considered credible (12, 14).

何故今なのか？ 人為的気候変動が水循環（9）や給水（10）に影響を与えていることは何も新しい調査結果ではない。それでも、定常性の放棄については筋の通った反論が出されていた。一時は、水文気候がはっきりと自然変動の外層およびまたはインフラの最適運用という有効範囲から飛び出すことはなかった（11, 12）。短期記録から推定される気候パラメーターの相当な不確実性を説明すれば小さな気候変動の問題はうまく回避できた。そのうえ、気候予測は信頼できると思われていなかった（12, 14）。

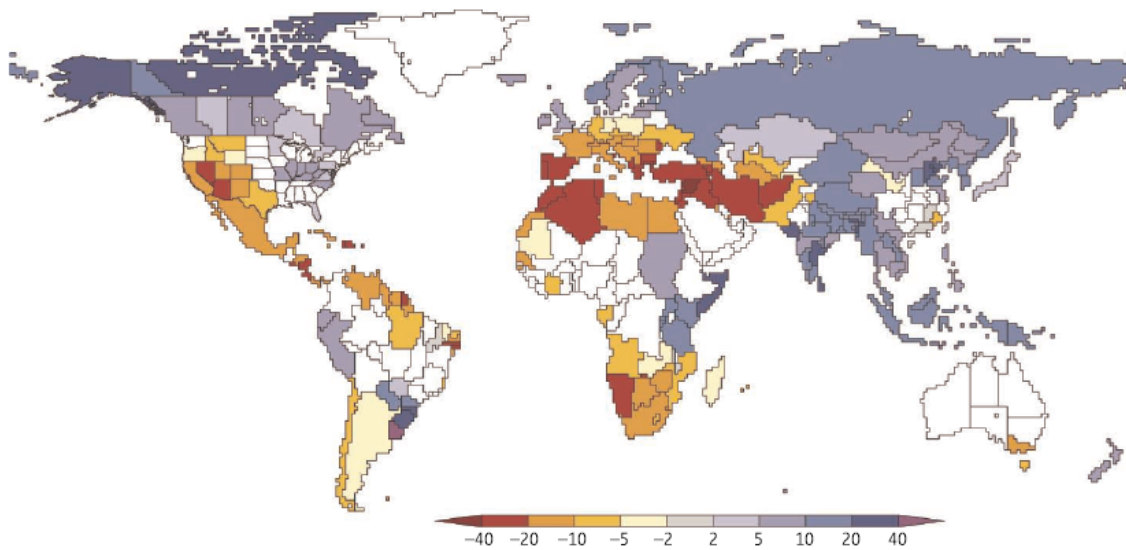
Recent developments have led us to the opinion that the time has come to move beyond the wait-and-see approach. Projections of runoff changes are bolstered by the recently demonstrated retrodictive skill of climate models. The global pattern of observed annual streamflow trends is unlikely to have arisen from unforced variability and is consistent with modeled response to climate forcing (15). Paleohydrologic studies suggest that small changes in mean climate might produce large changes in extremes (16), although attempts to detect a recent change in global flood frequency have been equivocal (17, 18). Projected changes in runoff during the multidecade lifetime of major water infrastructure projects begun now are large enough to push hydroclimate beyond the range of historical behaviors (19). Some regions have little infrastructure to buffer the impacts of change.

最近の傾向は、様子見を止める時がきたことを示すようになった。流出量の変化の予測は、最近実証された気候モデルの過去評価能力により高められている。観察された年間河川流の推移に関する世界的パターンが、自然変動から生じた可能性はなく、気候強制力に対するモデル化された反応と合致している（15）。古水文学研究から、平均的気候の小さな変動により極端に大きな変動が生じる恐れがあることが伺えるが（16）、世界の洪水頻度の最近の変化をとらえようという試みは曖昧な結果に終わっている（17, 18）。大規模水管理施設の整備のための数十年の存続期間における流出量の予測変化は、水文気候を過去の変動範囲から飛び出してし

もうほど大きくなっている（19）。地域によっては、変動を許容するだけの施設がほとんどないところもある。

Stationarity cannot be revived. Even with aggressive mitigation, continued warming is very likely, given the residence time of atmospheric CO<sub>2</sub> and the thermal inertia of the Earth system (4, 20).

定常性の復活は不可能だ。積極的に軽減したとしても、大気中二酸化炭素の滞留時間や地球系の熱慣性を考えると、温暖化が続く可能性は高い（4, 20）。



**Human influences.** Dramatic changes in runoff volume from ice-free land are projected in many parts of the world by the middle of the 21st century (relative to historical conditions from the 1900 to 1970 period). Color denotes percentage change (median value from 12 climate models). Where a country or smaller political unit is colored, 8 or more of 12 models agreed on the direction (increase versus decrease) of runoff change under the Intergovernmental Panel on Climate Change's "SRES A1B" emissions scenario.

**人為的影響。** 21世紀の半ばまでに世界の多くの地域で不凍地からの流出量の劇的変化（1900年から1970年までの歴史的条件に対して）が予想されている。カラー表示部分は変化率を表す（12気候モデルの中央値）。国またはより小さな政治単位をカラー表示している場合は、12モデルのうち8以上が、気候変動に関する政府間パネルの[SRESA1B]排出シナリオにおける流出量の増減傾向について一致していた。

A successor. We need to find ways to identify nonstationary probabilistic models of relevant environmental variables and to use those models to optimize water systems. The challenge is daunting. Patterns of change are complex; uncertainties are large; and the knowledge base changes rapidly.

**後継モデル。** 関連する環境変数からなる非定常性の確率モデルを特定し、そのモデルを使って水系を最適化するための方法を探る必要がある。これは手ごわい問題である。変動パターンは複雑で、不確実性は大きく、知識基盤は急速に変化するからだ。

Under the rational planning framework advanced by the Harvard Water Program (21, 22), the assumption of stationarity was combined with operations research, statistics, and welfare economics to formulate design problems as trade-offs of costs, risks, and benefits dependent on variables such as reservoir volume. These trade-offs were evaluated by optimizations or simulations using either long historical streamflow time series or stochastic simulations of streamflow based on properties of the historical time series.

ハーバード水資源プログラム(Harvard Water Program)が推進した合理的計画の枠組み(21, 22)において、定常性の前提は、貯水池の容量といった変数に左右されるコスト、リスク、便益のトレードオフとして設計の問題を公式化するために、オペレーションズ・リサーチ、統計、そして、厚生経済学と併せて採用されていた。こうしたトレードオフは、河川流量の長期的な歴史的データまたは歴史的変動をふまえた河川流量の確率的シミュレーションのいずれかを使って、最適化またはシミュレーションにより評価されていた。

This framework can be adapted to changing climate. Nonstationary hydrologic variables can be modeled stochastically to describe the temporal evolution of their pdfs, with estimates of uncertainty. Methods for estimating model parameters can be developed to combine historical and paleohydrologic measurements with projections of multiple climate models, driven by multiple climate-forcing scenarios.

この枠組みを気候変動に応用することができる。非定常性の水文学的変数を確率モデル化して、不確実性を推定したうえで、その pdf の時間的進化を記述することができる。モデルパラメーターを推定する方法を開発し、複数の気候強制力シナリオをふまえて、歴史的な古水文学的尺度を複数の気候モデルの予測値と組み合わせることができる。

Rapid flow of such climate-change information from the scientific realm to water managers will be critical for planning, because the information base is likely to change rapidly as climate science advances during the coming decades. Optimal use of available climate information will require extensive training of (both current and future) hydrologists, engineers, and managers in nonstationarity and uncertainty. Reinvigorated development of methodology may require focused, inter-disciplinary efforts in the spirit of the Harvard Water Program.

科学界から水資源管理担当者へのこうした気候変動関連情報の迅速な流れを確保することが計画上不可欠である。今後数十年の間に気候科学が進展するに伴い、情報基盤が急速に変わる可能性があるからだ。入手できる気候関連情報を最適活用するには、(現役将来とも)水文学者、エンジニア、管理担当者らに、非定常性と不確実性について徹底教育する必要がある。方法論をさらに展開させるには、ハーバード水資源プログラムの精神にのっとり重点的かつ学際的な取り組みが必要となるだろう。

A stable institutional platform for climate predictions and climate-information delivery may help (23). Higher-resolution simulations of the physics of the global land-atmosphere system that focus on the next 25 to 50 years are crucial. Water managers who are developing plans for their local communities to adapt to climate change will not be best served by a model whose horizontal grid has divisions measured in hundreds of kilometers. To facilitate information transfer in both directions between climate science and water

management, the climate models need to include more explicit and faithful representation of surface- and ground-water processes, water infrastructure, and water users, including the agricultural and energy sectors. Treatments of land-cover change and land-use management should be routinely included in climate models. Virtual construction of dams, irrigation of crops, and harvesting of forests within the framework of climate models can be explored in a collaboration between climate scientists and resource scientists and managers.

気候予測や気候情報の提供に向けた安定した制度基盤は有用である(23)。今後25~50年に焦点をあてた世界的な地球大気系の物理学に関するより解像度の高いシミュレーションが不可欠である。各国地域社会が気候変動に適応できるよう計画を練っている水資源管理担当者には、水平グリッドが何千キロ単位で測定する区分になっているモデルでは最適に対応できない。気候科学と水資源管理の双方の情報の往来を促すには、気候モデルに農業部門やエネルギー部門を取り込み、地表水プロセスや地下水プロセスをより明白、忠実に再現する必要がある。土地被覆の変化や土地利用管理の扱いについては基本的に気候モデルに入れるべきである。気候モデルの枠組み内でのダムの模擬建設、作物の灌漑、林野の収穫を、気候科学者と資源科学者及び管理担当者との間で協力して検証することができる。

Modeling should be used to synthesize observations; it can never replace them. Assuming climatic stationarity, hydrologists have periodically relocated stream gages (24) so that they could acquire more perspectives on what was thought to be a fairly constant picture. In a nonstationary world, continuity of observations is critical.

観測内容を合成するにはモデリングを採用すべきである。モデリングは絶対に観測に代わり得ない。気候定常性を前提に、かなり安定した全体像と思われるものについてより多くの視点を得られるよう、水文学者らは定期的に水位観測装置を置換えてきた(24)。非定常的な世界にあっては、観測の継続性が非常に重要である。

The world today faces the enormous, dual challenges of renewing its decaying water infrastructure (25) and building new water infrastructure (26). Now is an opportune moment to update the analytic strategies used for planning such grand investments under an uncertain and changing climate.

今世界は、崩壊しつつある水資源施設を刷新し(25)、新しい施設を構築する(26)という大きな二つの問題に直面している。今こそ、不確実な変化する気候のもとでそうした壮大な投資を計画するために採用する分析戦略を見直す好機である。

## References and Notes

1. R. Ashley, A. Cashman, in *Infrastructure to 2030: Telecom, Land Transport, Water and Electricity* (Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, 2006).
2. R. H. Webb, J. L. Betancourt, *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 2379, 1 (1992).
3. C. A. Woodhouse, S. T. Gray, D. M. Meko, *Water Resour. Res.* 42, W05415 (2006).
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group (WG) 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC (AR4)*, S. Solomon et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, 2007), pp. 1–18; [www.ipcc.ch/press/index.htm](http://www.ipcc.ch/press/index.htm).
5. IPCC, in *Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of WG2 to AR4*, M. L. Parry et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, 2007), pp. 1–16.
6. I. M. Held, B. J. Soden, *J. Clim.* 19, 5686 (2006).
7. T. P. Barnett, J. C. Adam, D. P. Lettenmaier, *Nature* 438, 303 (2005).
8. J. Lu, G. A. Vecchi, T. Reichler, *Geophys. Res. Lett.* 34, L06805 (2007).
9. S. Manabe, R. J. Stouffer, *J. Geophys. Res.* 85, 5529 (1980).
10. P. S. Eagleson, in *Scientific Basis of Water-Resource Management* (National Academy Press, Washington, DC, 1982).
11. N. C. Matalas, in *Global Change and Water Resources Management* (Water Resources Update No. 112, Universities Council on Water Resources, Carbondale, IL, 1998).
12. K. E. Schilling, E. Z. Stakhiv, in *Global Change and Water Resources Management* (Water Resources Update No. 112, Universities Council on Water Resources, Carbondale, IL, 1998).
13. J. R. Stedinger, D. Pei, T. A. Cohn, *Water Resour. Res.* 21, 665 (1985).
14. Z. W. Kundzewicz, L. Somlyódy, *Water Resour. Manage.* 11, 407 (1997).
15. P. C. D. Milly, K. A. Dunne, A. V. Vecchia, *Nature* 438, 347 (2005).
16. J. C. Knox, *Quatern. Sci. Rev.* 19, 439 (2000).
17. P. C. D. Milly, R. T. Wetherald, K. A. Dunne, T. L. Delworth, *Nature* 415, 514 (2002).
18. Z. W. Kundzewicz et al., *Hydrol. Sci. J.* 50, 797 (2005).
19. R. Seager et al., *Science* 316, 1181 (2007).
20. IPCC, in *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change, Contribution of WG3 to AR4*, B. Metz et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, 2007), pp. 1–24.
21. A. Maass et al., *Design of Water-Resource Systems: New Techniques for Relating Economic Objectives, Engineering Analysis, and Government Planning* (Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1962).
22. M. Reuss, *J. Water Resour. Plann. Manage.* 129, 357 (2003).
23. E. L. Miles et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103, 19616 (2006).
24. M. E. Moss, *Water Resour. Res.* 15, 1797 (1979).
25. E. Ehrlich, B. Landy, *Public Works, Public Wealth* (Center for Strategic and International Studies Press, Washington, DC, 2005).
26. United Nations General Assembly U.N. Millennium Declaration, Resolution 55/2 (2000).