

# 持続可能社会実現に向けてのグローバルシミュレーション： 水大循環という切り口から

Global Simulation for Assessment and Designing of Sustainability

佐々木 貴宏

Takahiro Sasaki

ソニーコンピュータサイエンス研究所

Sony Computer Science Laboratories, Inc.

How will the environment of the earth and our global society develop on a scale away from the next few decades to 100 years? Are those developments sustainable? If not, what kind of measures should we design and put into practice? These urgent questions we human are now faced with are the problem of ‘open systems.’ In order to obtain the outlook for these long-term and global issues, we are now trying to build a simulation platform that integrates models of the natural-physical earth systems and the socio-economical systems. We herein introduce our initial conception of our ambition, from the point of view of global water circulation.

## 1. 問題意識

### 1.1 人類の直面する課題とオープンシステムサイエンス

気候変動、エネルギー・食料・水資源の安定確保、生物多様性の減少、グローバル感染症、人口問題、グローバル経済の運営、格差拡大と社会不安の増大など、我々が直面している課題の多くは、互いに関連するサブシステムが複雑に絡み合ったものであり、かつ、その構造がダイナミックに変化するようなオープンシステムの問題である。このような問題に対しては、近代科学の特徴でもある要素還元論的なアプローチで対象を分割して個々の部分問題を解いても全体の問題解決に繋がるとは限らない。そもそもどこまでを検討すべき領域とするかをあらかじめ定めることすら困難なことも多い。また、注目する部分の条件を揃えたつもりでもその周辺の状況までコントロールしきれないため、オープンシステムでの現象は、実験室で何度でも再現可能な現象とは異なり、一回性であるという点にも特徴がある。したがって、再現可能性に立脚する伝統的な科学の枠組みを超えた新しい考え方や方法論、オープンシステムサイエンスが必要になってくる [所 09]。シミュレーションの技法はその有望な道具立ての一つになると考えている。

### 1.2 持続可能性：物理・自然系と社会・経済系の両視点

今後数十年から 100 年先という時間スケールで、地球環境はどうなるのか、社会はどのように発展していくのか、それは持続可能なのか、持続可能とするためにはどういった施策をデザインし実行したらよいか、といった人類にとっての切実な問いもオープンシステムの問題である。持続可能性については、とくく地球環境保全的な視点ばかりが強調されがちであるが、筆者は、物質・エネルギーの自然循環、生産と消費を主要素とする実体経済および資本の分配を担う金融経済といった社会・経済的な循環のそれぞれが適切に回ることが持続可能性の実現の鍵であると考え、これらの系が連関するようなモデルとして問題の基本枠組みを捉えている (図 1)。持続可能性は物理・自然系のダイナミクスと社会・経済系の営みとが整合することで実現されるので、この問題を考えるときには両者の視点が不可欠である。ところが、自然・物理系のモデルと社会・経済系のモデルは、これまではそれぞれ独立に探究され、議論されることが多かった。

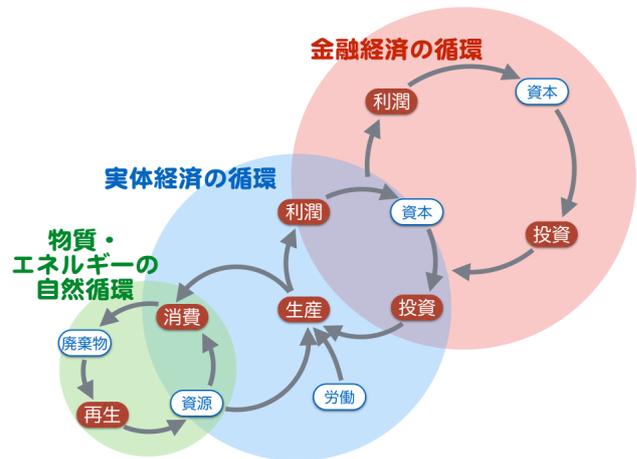


図 1: 三つの循環系と持続可能性

物理・自然系の視点に立ったシミュレーションと言えば、コンピュータ上に作った仮想的な地球を用いた地球温暖化のシミュレーションが代表例として挙げられる [IPCC 14]。社会・経済の発展シナリオの差異によってシミュレーションの将来予測を比較評価する形にはなっているが、それらのシナリオは境界条件として一方向で与えられるに過ぎず、逆に自然系のダイナミクスが社会・経済の発展の道筋に影響を及ぼす可能性が十分に考慮されていない。一方で、社会・経済系の視点に立ったものの例としては、1972 年のローマ・クラブによる『成長の限界』の中で用いられた World3 という社会シミュレーションがよく知られている [Meadows 72]。これは計算機のパワーや利用可能なデータ量が圧倒的に増した現代的な視点からは素朴にすぎると見える。それでもなお、人類社会の持続可能性に関する広くかつ異なる領域に属する諸要素をなるべく多く取り込み、一つの全体モデルとして統合したという点において今見ても画期的である。さらに、その後の追跡研究によって分かったことであるが、1972 年に行われたシミュレーション結果が概ね実際の経過を先取りして正しく予測できていたことも評価に値する [Hall 09]。しかし、この社会発展のモデルには、

連絡先: 佐々木 貴宏 sasaki@csl.sony.co.jp

地球・物理過程による物質循環の側面が含まれていない。

そこで筆者は、持続可能性について論じるにあたって、物理・自然系と社会・経済系の両者が結合ないしは融合されたグローバルモデルを構築することを目指している [佐々木 16]。

## 2. 現在取り組んでいる課題： グローバルな水問題と水大循環

限りある水資源をどのように利用するかは持続可能性の文脈の中でも最重要な問題の一つである。改善されつつあるとはいえ、2015年時点でまだ世界中の6億6,300万人（総人口の10分の1弱）が安全な水にアクセスできていない [unicef 15]。これは主に発展途上国における状況であるが、先進国にも問題がないわけではない。北米有数の穀倉地帯であるグレートプレーンズに位置するオガララ帯水層では、大規模な灌漑農業により自然循環によって補充されるペースを大幅に上回る勢いで地下水が過剰に汲み上げられてきた。これにより地下水位の低下が今も続いており、何らかの対策無しでは将来的な農業ならびに生活の基盤が維持できないと言われている [Smakhtin 04]。

水は地球上の各場所に静的に存在しているわけではなく、グローバルな規模で循環している。その循環も物理・自然現象と社会・経済的な側面とから眺められる。前者については分かりやすい。海洋の水は蒸発し、上空で凝結して雲となる。それが地球の大気の動きに乗って運ばれて、降雨として地上に降り注ぐ。一部は地面の勾配に沿って地表を流れ、また一部は地下に涵養され、その支流が集合することで河川あるいは地下水脈を形成し、再び海洋に戻る。およそ2~3週間の時間スケール（地下水脈を経由する場合はより長期にわたる）で一巡するこうした水文循環は太陽エネルギーと重力によって駆動される自然・物理現象としての水循環である。一方の社会・経済的な側面から見た水循環とは、端的に言うところと世界貿易による物資の移動に伴う水の移動である。農畜産物にして工業製品にして、各々の物資を生産するにあたっては、種類によってその多寡はあるものの水資源を必要とする。例えば、牛肉、チーズ、米、小麦、トウモロコシ、りんごの1kg当たりの生産に必要な水は平均的にはそれぞれ15,400リットル、3,180リットル、2,500リットル、1,300リットル、1,220リットル、822リットルと推定されている。グローバルな貿易のネットワークに乗って物資が世界中で輸出入されるのに伴って、それらを生産するのに要した水資源も付随して仮想的に輸出入されると見なすのが仮想水貿易という考え方である [Allan 99]。こうした仮想水貿易は、人の社会・経済的な活動によって駆動されるグローバルな水循環と捉えられる。

仮想水という考え方は、問題に対して様々な観点を提供する。例えば、国民一人当たりの水資源の使用量の上位国には、ニジェール ( $3,519\text{m}^3/\text{年}/\text{人}$ )、ボリビア ( $3,468\text{m}^3/\text{年}/\text{人}$ )、米国 ( $2,842\text{m}^3/\text{年}/\text{人}$ ) などがある。米国に関しては牛肉の消費量が  $43\text{kg}/\text{年}/\text{人}$ （世界平均の4.5倍）という食文化や先進国ならではの生活消費様式から類推して一人当たりの水負荷が高いのは想像に難くない。一方で、ボリビアでは牛肉の消費量は高々世界平均の1.3倍、ニジェールでは穀物の消費量は高々世界平均の1.4倍と、突出して大きいわけでもなく、また特別に環境負荷の高い派手な生活消費様式を国民が送っているとも考えにくい。ところが、ボリビアで牛肉の生産に要する水資源の量を見ると世界平均の約5倍、ニジェールで穀物の生産に要する水資源の量は世界平均の6倍と推定されている。つまり、水利用という点からは、極めて効率の低い土地で敢えてこれらの農畜産物を生産している結果として、一人当たりの水負

荷が高くなってしまっている [Mekonnen 11]。ここで、極端なグローバルな施策として、このような生産性の低い土地で無理に物資を生産することは止めて、より余裕のある土地で生産されたものを輸入することにすれば、その分の水資源を節約することに繋がり、生命および健康で衛生的な生活を送るのに必要な水に割り当てることが可能になる。もっとも、輸入の対価として交換するものをどのように用意するかといったことや、その問題がクリアになったとしても安全保障の観点から最低限の自給率を確保しておいたり、リスク分散のために輸入元を多様化しておくなど、実務的には単純に一つの評価軸のもとでの数理最適化に留まらずに様々な条件を考慮する必要はある。ただいづれにせよ、世界各地における局所的な水の負荷をどのように低減し、いかに水資源をトータルとして適切に利用するかといったことを考察するにあたっては、自然物理系の現象としての水文循環だけではなく、社会・経済的な（仮想的な）水循環といった考えを取り入れることで、初めて有効な施策についての議論ができると考えている。

最後に、持続可能性の問題を論じるには水の問題だけを着目するのは十分ではない。最低限でも、食とエネルギーと水、これらの要素の三つ巴の観点が必要になると考えている。まずは水という切り口から取り組みを開始しているが、将来的にはこれらを始め他の要素をも取り入れたグローバルモデルを構築していくべきである。

## 参考文献

- [Allan 99] Allan, A.: Water Stress and Global Mitigation: Water, Food and Trade, *Arid Lands Newsletter*, 45 (1999)
- [Hall 09] Hall, C. A. S. and Day, J. W., Jr: Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil, *American Scientist*, Vol. 97, pp. 230–237 (2009)
- [IPCC 14] IPCC, : Climate Change 2014: Synthesis Report, in *Fifth Assessment Report (AR5)* (2014)
- [Meadows 72] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., and Behrens III, W. W.: *The Limits to Growth*, Universe Books (1972), (邦訳『成長の限界』、大来佐武郎監訳、ダイヤモンド社 (1972))
- [Mekonnen 11] Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y.: National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption, *Value of Water Research Report Series, No. 50* (2011)
- [Smakhtin 04] Smakhtin, V., Revenga, C., and Döll, P.: Taking into Account Environmental Water Requirements in Global-scale Water Resources Assessments (2004)
- [unicef 15] unicef, and WHO, : *25 years Progress on Sanitation and Drinking Water: 2015 Update and MDG Assessment* (2015)
- [佐々木 16] 佐々木 貴宏：シミュレーションのさらなる可能性，所 眞理雄，高橋 桂子（編），『水大循環と暮らし：21世紀の水環境を創る』，第9章，pp. 195–210，丸善プラネット (2016)
- [所 09] 所 眞理雄（著編）：オープンシステムサイエンス～原理説明の科学から問題解決の科学へ，NTT 出版 (2009)