

## Abstract

Freshwater management is a core issue for sustainable development<sup>1-2</sup>. Today, agriculture faces a host of challenges related to freshwater availability because of its high freshwater consumption<sup>3-5</sup>. Water-scarce countries can alleviate their water stress by importing food from water-abundant countries<sup>6-8</sup>. The sustainability of freshwater use is often evaluated using the Water Stress Index and water footprint<sup>9-10</sup>. Although freshwater sustainability is often estimated based on the total volume of water consumption (water inventory), the maximum freshwater resource and potential impacts of water-resource depletion differ with location and water source<sup>11</sup>. In addition, most estimates of the environmental impacts of water use have focused on depletion from a single-source perspective without separating geographically distinct water sources<sup>9,12,13</sup>. Therefore, comprehensive potential impacts from multiple water sources in various climatic conditions remain unclear. Here, we apply the water availability factor (*fwa*), which reflects the differences among renewable freshwater resources by place and source<sup>14</sup>, to show that the current agriculture consumes freshwater resources at 1.3 times the rapid rate than sustainable water use. This rate (Relative Unsustainability Rate; RUR) can indicate environmental water scarcity. Among environmentally water-scarce countries, well-financed countries tend to import cereal products as virtual water to compensate for their domestic water resources. Among water-abundant countries, well-financed countries tend to export cereal products by exploiting their freshwater availability. The *fwa* concept provides a non-conventional approach to compare and integrate the potential impacts of freshwater use from various sources and climatic conditions. In addition, the RUR can represent that how far the current global water use is from sustainable water management. The results should focus attention on the need to address not only physical but also social and environmental water-scarcity issues.

## 要旨

持続可能な開発にとって淡水資源管理は重要な課題である。近年の農業活動は大量の水を消費することから、淡水の利用において多くの問題が存在することが知られている。水資源に乏しい国は、水資源が豊富な国から食料という形で仮想的に水を輸入することで、国内の水ストレスを緩和することができる。淡水利用の持続可能性は、水ストレス指標やウォーターフットプリントといった手法を用い、消費された水量の合計（水インベントリ）によって評価されることが多いが、利用可能な水資源量や水利用による潜在影響は、場所や水源によって異なる。また水利用に関する環境影響評価は 1 つの水源からの取水のみがその対象であることがほとんどであり、様々な気候条件のもと、複数水源から取水することによる統合的な潜在影響については未知である。

本研究では、水源および場所による再生可能水資源量の違いを考慮した水利用係数 (*fwa*)を用いて、現在の農業活動が持続可能な水利用の 1.3 倍の速度で淡水資源を消費していることを示した。この速度は環境的な水不足の指標として捉えることができる。環境的水不足の状況では、経済的に裕福な国のみが仮想水として穀物を輸入し、自国内の水資源を節約することができる。一方水資源の豊かな国においては、経済的に裕福な国が効率的に水資源を利用することで穀物製品を輸出している状況が示された。*fwa* は様々な水源や気候条件によって異なる潜在影響の統合と比較が可能な概念であり、水利用が持続可能な

状態からどの程度離れているかを表すことができる手法である。本研究の結果は、世界の水問題が物理的な水不足に加え、社会的、環境的な側面についても併せた上で解決されるべきものであることを示している。