ウォーターフットプリント指標による水需給バランスの定量評価
：需要構造の地域特性とその変化に着目して

小林　圭太朗[1]・佐藤　圭輔[2]

[1]学生会員　立命館大学大学院　理工学研究科（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail:rv0027vk@ed.ritsumei.ac.jp

[2]正会員　立命館大学准教授　理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）
E-mail:k-sato@fc.ritsumei.ac.jp

世界の水利用のうち現状では約7割を農業用水が占めている．昨今の世界的な食糧需要の変化に伴い，今後の水需要全体への影響が懸念されている．また気候変動による水資源側の変化も地域差が著しいため，水需給バランスの地域的変化が将来の食糧生産に与える影響は多大である．

本研究では全世界を対象とし，ウォーターフットプリント(WF)を用いて，食糧生産に伴う水需要の構造や水需給バランスの地域特性を明らかにすることを目的とした．対象食糧を主要穀物と畜産物とし，自国生産，貿易による間接水の移動を考慮した結果，自国生産WFはアジアで最大3.3×10^{12}(m^3)，輸出入差WFは穀物においてはアフリカで最大1.1×10^{11}(m^3)となり，輸出量の多い北南米やヨーロッパ，オセアニアへの水資源依存の大きさが浮き彫りとなった．

Key Words : *water footprint, food balance, indirect water, sustainable water use, GDP based on PPP*

1. はじめに

世界の水利用のうち現状では約7割を農業用水が占めている．将来は人口の増減やその地域差の拡大，あるいは食生活の変化に伴い，30年後には穀物消費量が約10億トン増え，畜産物の生産量も約11億トンにまで増加すると推計されている[1)]．食糧生産には大量の水が必要であるため水需要全体への影響も大きいこと，また気候変動による水資源側の変化も地域差が著しいことから，水需給バランスの地域的変化が将来の食糧生産に与える影響は多大である．

本研究では，全世界を対象とし，水資源の潜在的な持続可能性を定量化するウォーターフットプリント指標(以下WFと表記)を用いて，食糧生産に伴う水需要の構造や需給バランスの地域特性を明らかにすることを目的とした．近年，WFの定義は国際標準化が進められているが，諸機関によってその解釈は多種多様である[2)]．ここでは原材料の栽培・生産，製造・加工，輸送・流通，消費，廃棄・リサイクルにおけるライフサイクル全体で，直接的・間接的に消費・汚染された水量を定量化するものとしたオランダのウォーターフットプリントネットワーク(WFN)の手法に準じた．またライフサイクルのうち最も水消費量が多い食糧の生産段階に着目しWFによる分析を行った．

対象食糧は世界で大量に消費される，米，とうもろこし，大豆，小麦の4大穀物及び肉牛，羊，豚，山羊，鶏肉，鶏卵，乳牛の7大畜産物[3)]とした．これらは単位収量あたりに必要な水資源量が平均1,000 m^3/t 以上と水需要全体における影響が大きい．WFの現況と将来とを比較することにより，地域における水需要そしてその構造の変化を捉えた．

2. 研究方法

(1) WFの定義

前章で述べた定義について，具体的にどの過程で消費された水であるのかを明らかにするため，貿易による間接水を考慮したWFを定義した．

a) 自国生産WF

まず，各食糧の単位収量あたりに必要な水消費量原単

位[4]を各食糧の各国生産量に乗じて自国生産WFを求めた．水消費量原単位はWFNが公開しているデータを用いた．WFNは，降水由来の消費量であるグリーンウォーター（GW），表流水・地下水由来の消費量であるブルーウォーター（BW），そして汚濁負荷物質希釈に必要な水量であるグレーウォーター（GrW）の3種類のWFを公開している．本研究では食糧の確保に必要な水量を考慮するため，GWとBWの和を水消費量原単位として用いた．なお，自国生産WFはその対象国から他国への食糧輸出に伴うWFを減じていない点に留意が必要である．

b) 輸出入差WF

日本のように大量の食糧を輸入に頼っている国の場合，他国の水資源を間接的に利用していることになる．輸入食糧を自国生産する際に必要となる水量を輸入WF，同様に食糧輸出に伴って消費する水量を輸出WFとし，輸入WFと輸出WFの差を輸出入差WFと定義した．オーストラリアなどのように，食糧自給率が高く，輸出向けの食糧を大量に生産している国々は輸出入差WFが負となり，自国生産WFが大きくなる傾向にある．

c) 正味WF

上述した自国生産WFに輸出入差WFを考慮した（加えた）水需要量を正味WFと定義した．この正味WFは，間接水利用に伴う水量（輸入WF）に加えて，輸出に伴う水量（輸出WF）も考慮されている点に特徴がある．本指標は正味の水需要を指しているが，輸入による増分の基準が実際の生産国ベースとはなっていない（すなわち自国ベースで計算されている）ため，実際の水需要とは異なっている．

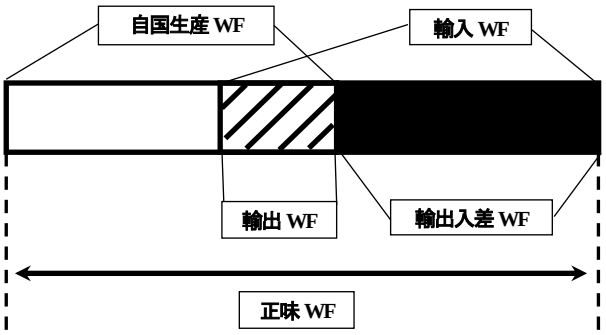

図-1　WFの定義概念図

⑵　穀物需要量の将来予測と水需要量推計

本研究では，棟居ら[5]の推定手法を参考にして，世界242の国・地域を対象に，4大穀物の需要量を推計した．棟居らは食糧消費パターンが各国の社会・経済状況に応じて変化すると考え，一人一日あたりエネルギー摂取量が一人あたりの所得増加（購買力平価一人あたりGDP）にともなって変化し，現在の先進国の平均値に漸近するモデルを仮定している．（式(1)[5]）

$$CAL_{ki}(t+1) = CAL_{ki}(t) + \alpha_{CAL,i} \cdot ((GDP_k(t+1) - GDP_k(t)) / GDP_k(t) \quad \cdots (1)$$

ここで，$CAL_{k,i}(t)$はk国のt期における食糧品目iの一人一日あたりエネルギー摂取量（kcal/人/日），$GDP_k(t)$はk国のt期における購買力平価1人あたりGDP（2005年国際ドル）を表す．式(1)における係数$\alpha_{cal,i}$について棟居らは購買力平価一人あたりGDPと各食糧品目の一人一日あたりエネルギー摂取量の間に対数関数を設定し，回帰分析を行った結果を用いているが，実際にはGDP値の増加時におけるエネルギー摂取量の増減は国・地域の食文化や好み，宗教等によって大きく異なっている．そこで本研究ではまず2003年～2013年の各食糧品目の一人一日あたりエネルギー摂取量の変化量と，その間の購買力平価一人あたりGDPの増加率から係数$\alpha_{cal,i}$を国・地域毎に算出した．その後係数$\alpha_{cal,i}$と購買力平価一人あたりGDPとの間に，各食糧毎にクラスター分析を施し，各クラスターで回帰分析を行った．これにSSPシナリオの購買力平価一人あたりGDP値[6]を組み合わせることで，各年毎に係数$\alpha_{cal,i}$を決定する．ここでSSPについて簡単に説明をする．SSPは縦軸，横軸にそれぞれ緩和策の困難度と適応策の困難度を取り，SSP1: Sustainability（持続可能），SSP2: Middle of the road（中庸），SSP3: Regional Rivalry（地域対立），SSP4: Inequality（格差），SSP5: Fossil-fuel Development（化石燃料依存型発展）の5つのシナリオが定義されている[7]．これらのシナリオをもとに，2050年までの一人一日あたりエネルギー需要量の予測を試みた．各国における品目別の穀物需要量はエネルギー需要量に基づいて設定され，水需要量（正味WFに相当）は水消費原単位を一定として算出された．

3. 結果と考察

⑴　食糧生産に伴う水消費の現状

2010年現在における地域別のWF算出結果 (年間値)を図-2，図-3に示す．まず，穀物と畜産物の自国生産WFはアジアで最も大きく，3.3×10^{12} (m^3)であった．また自国生産WFに占める穀物の割合も約68%と全地域で最大であった．一方でヨーロッパや南北米では畜産物の自国生産WFが最大5.2×10^{11} (m^3)と穀物の割合を上回った．次に正味WFに着目すると，アジアでは自国生産WFに対して1.7×10^{11} (m^3)大きい値となっており，これも全地域で最大であった．また人口増加が著しいアフリカでも正

味WFが自国生産WFに比べ1.3×10^{11} (m^3)大きい値となっており，アジアと同じレベルであることも明らかとなった．一方でオセアニア，中米，南米ではそれぞれ，自国生産WFに対して1.1×10^{11}(m^3)，2.0×10^{10} (m^3)，1.4×10^{11} (m^3) 程度小さい値となっていた．これらの国々の水資源がアジアやアフリカに間接的に輸出されている実態が示唆された．

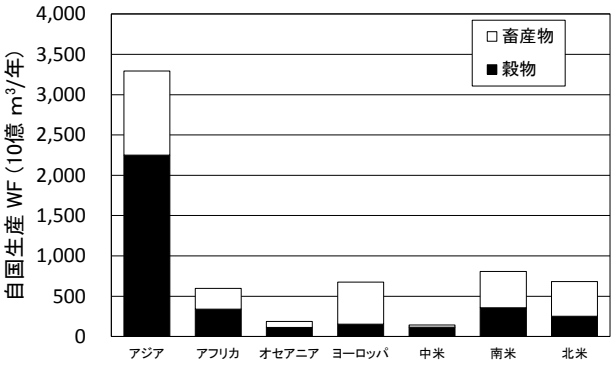

図-2 地域別自国生産WF (2010)

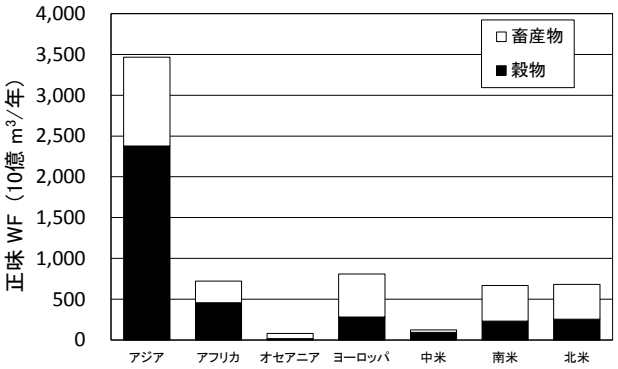

図-3 地域別正味WF (2010)

次に対象食糧毎に地域別に整理した輸出入差WFの算出結果を**図-4**，**図-5**に示す．これらは縦軸に輸出入差WFの値を取っているが，正値が輸入型，すなわち他地域への水資源の依存量を示している．一方で負値は輸出型，つまり自国の水資源を消費して他地域へ輸出している間接的水量を指す．図-4に穀物の輸出入差WFを示した．この結果，水ベースではアジア，アフリカ，中米は水の輸入国が多く，それぞれ9.4×10^{10} (m^3)，1.1×10^{11} (m^3)，1.1×10^{10} (m^3)であった．自国生産WFはアジアが最大であったが，輸出入差WFではアフリカが最大であった．アジアとアフリカではいずれも輸出入差WFが大きい値となり，そのうち小麦，とうもろこしが大半を占めることも明らかとなった．アジアにおける別の特徴として，米の輸出量が水ベースで最も大きい (4.1×10^{10} (m^3)) ことが挙げられる．米食文化が浸透し，自国生産・消費が多い一方で，主にアフリカ向けの米も盛んに生産していることもアジアの特徴であることがわかった．全地域を通して，また，輸出入差WFは人口増加率 (1950年比) と関係があることが示唆され，特にアジア，アフリカでなどの人口増加地域で，食糧輸入量が大きい傾向となった．このことは，アジア・アフリカ地域における将来の人口増加が当該地域の食糧不足を一層深刻化する可能性を示唆されている．

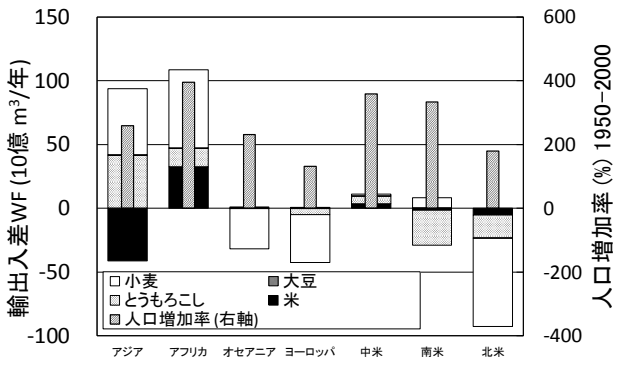

図-4 穀物の輸出入差WF (2010)

続いて畜産物の結果を**図-5**に示す．穀物 (**図-4**) と類似する部分も見られるが，畜産物についてはアジアの輸出入差WFが最大 (4.9×10^{10} (m^3)) となり，特に牛肉と鶏肉で全体の93%を占めた．一方でオセアニアは牛肉と羊肉で9.7×10^{9} (m^3)，南米では鶏肉 (1.4×10^{10} (m^3)) が優先する結果となった．北米の輸出入差WFが相対的に低い値となっているが，畜産物の場合は穀物の場合とは異なり自国生産量が大きい，または同地域内での流通が盛んであることが推察される．他地域への依存度が高いアジア・アフリカの食糧事情は現在も深刻であり，広域的な資源共有や現在の食糧流通の改善を施さなければ，持続可能な食糧生産が崩壊してしまう恐れがある．すなわち，特にアジア，アフリカにおける食生活の見直しと食糧の自国生産を促進し，他地域依存度を抑制する有効策を考える必要がある．

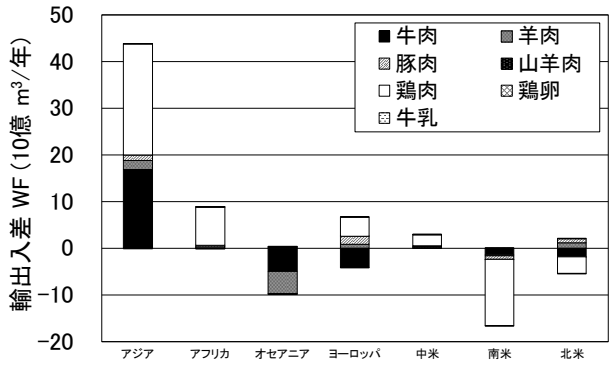

図-5 畜産物の輸出入差WF (2010)

⑵ 水需要量の将来推計

世界の各地域における2050年（SSP1～SSP5）の水需要量推計値を**図-6**に示す．なお**図-6**におけるWFはエネルギー需要量の推計値に基づいて算定された水需要量（正味WFの相当）にて示している．すなわち，2010年における正味WFは**図-2**に示した値とはやや異なっている点に注意されたい．

推計の結果，2050年における世界全体のWFは2010年に比べて4.0×10^{11} (m^3)程度の増加（全SSPシナリオ平均値）であることがわかった．地域別に見ると，アジア，アフリカ，中米の3地域でWFが大きく増加し，一方でヨーロッパ，北南米では減少傾向となった．

アフリカではWFの増加が最も大きく，約3倍に増加するとともに，米が占めるWFが最大56%にまで増加する可能性が示唆された．またアジアには元来米食文化が強い国が多く存在するが，2050年には米のWFが増加し，WF全体に占める割合が現状の49%から最大61%まで増加することがわかった．中米は大豆の需要が伸びる予測結果となり，最大7.7×10^{9} (m^3) 程度のWF増加となった．北南米はともに米の需要が緩やかに増加する傾向が認められ

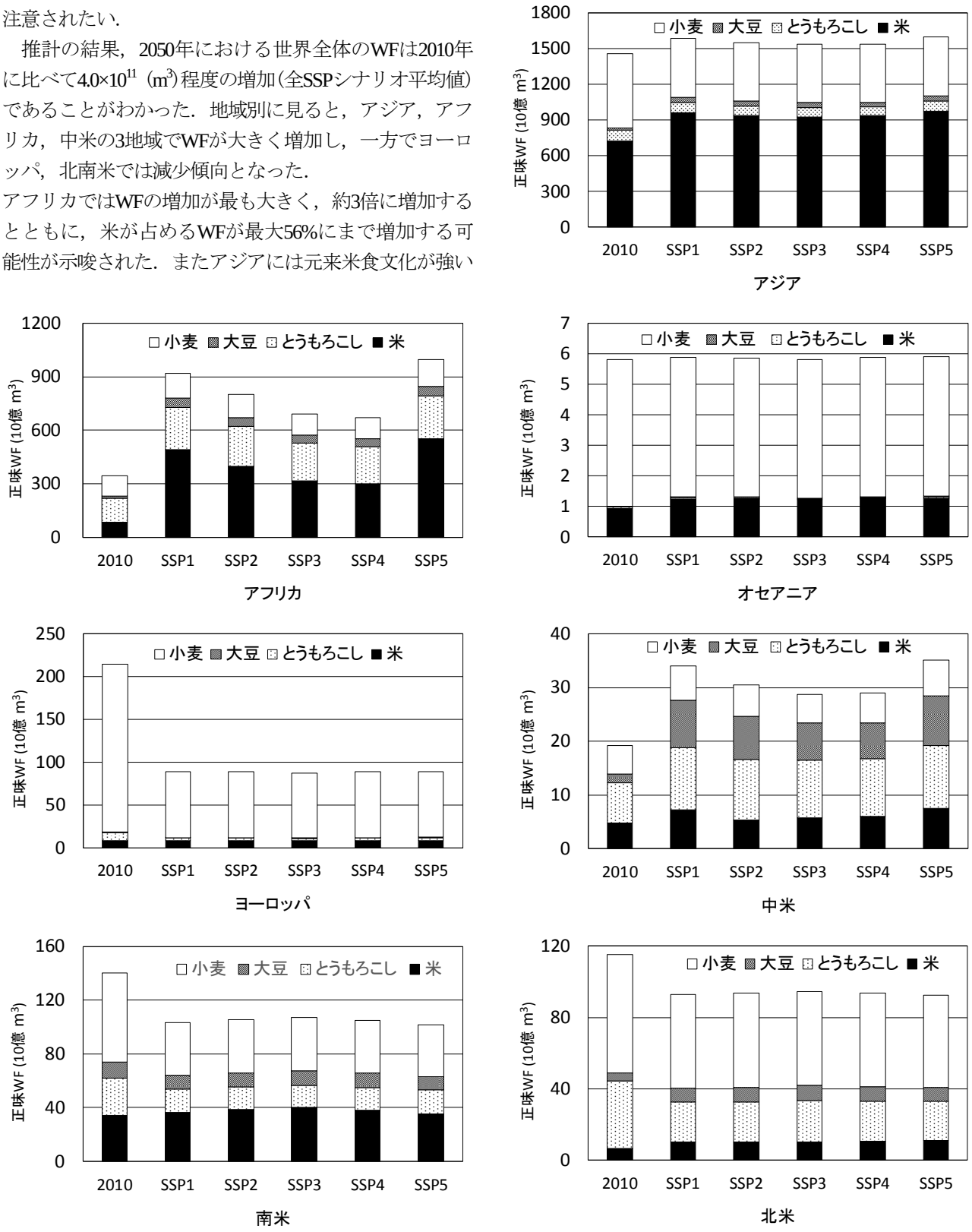

図-6 将来における世界の地域別WF

る一方で，特に南米では小麦の需要が約1割程度減少すると予測が成された．ヨーロッパでは全地域でWFの減少率が高い結果となった．WFの減少は人口減少が主因であり，加えてエネルギー需要量の減少に伴う水需要構成比の変化も影響する結果となった．穀物需要予測で用いた式(1)の係数$\alpha_{cal,i}$の設定方法に改善の余地があるほか，他食糧の摂取量変化ついても再現性向上を図ることで，より的確なWFの予測が可能となる．

4. おわりに

本研究では世界の4大穀物，7大畜産物を対象として，貿易による間接水の移動を考慮した現状のWFの定量評価を行った．その結果，自国生産WFは穀物，畜産物ともにそれぞれアジアが3.3×10^{12} (m^3)，4.9×10^{10} (m^3) と最も大きく，穀物が全体に占める割合は68%で全地域で最大であった．一方，間接水移動を考慮した輸出入差WFは，穀物に関してはアフリカがアジアを上回る結果となり，1.1×10^{11} (m^3) もの水資源を他地域から輸入していることが示された．また，食糧のエネルギー摂取量とSSPシナリオに着目し，将来における穀物需要，水需要量の定量化も行った．全地域における水需要量は，2050年には現状より4.0×10^{11} (m^3) 増加すると推定された．特にアジアやアフリカ，中米では今後の水需要の拡大が見込まれる結果となったため，間接水への依存度が高まる可能性がある．

なお，本研究では将来における食糧需要量を購買力平価一人あたりGDPをパラメータとして推定しており，同一クラスタ内でGDP値に変化がなければ，エネルギー摂取量にも変化がないことを仮定している．実際にはGDP値の変化があまり見られない場合においてもエネルギー摂取量が変化しているのに加え，その変化量も国・地域によって異なる．そのため，国家間の類似性を見出すクラスター分析に加え，一国・地域毎の変化を見ながら，式(1)の変数値を改善していくことや他のパラメータ考慮の有効性を見出し，精度を向上させることが望ましい．さらに，水消費原単位も水資源賦存量や気候変動，国・地域の社会・経済状況等によって変化すると考えられるため，これらを総合的に捉え，水需給バランスを評価することが今後の課題である．

参考文献

1) 農林水産省大臣官房食料安全保障課：2050 年における世界の食料需給見通し；世界の超長期食料需給予測システムによるベースライン予測結果 (分析編), 2012.
2) 沖大幹：水の未来―グローバルリスクと日本，pp.54-57，岩波新書，2016.
3) Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT),Rome,Italy,http://wwWFao.org/faostat/en/#data, accessed in June 2017.
4) M.M.Mekonnen and A.Y.Hoekstra., “The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products”,:Volume2:Appendices, 47, 2010
5) 棟居洋介，増井利彦：IPCC 排出シナリオ(SRES)にもとづいた世界の食料必要量の長期推計，環境科学誌, 21(1)，63-88，2008.
6) IISAS:SSPDatabase,https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=countries, accessed in June 2017.
7) 藤森ほか：AIM による新社会経済シナリオ SSP の定量化とそのシナリオの特徴，土木学会論文集 G（環境），Vol.71，No.6，(環境システム研究論文集第 43 巻)，Ⅱ_217-Ⅱ_228，2015.

(2017. 8. 25 受付)

QUANTITATIVE EVALUATION OF WATER SUPPLY AND DEMAND USING WATER FOOTPRINT FACTOR : FOCUS ON CHANCE CHARACTERISTICS OF THE REGION OF DEMAND STRUCTURE

Keitaro KOBAYASHI and Keisuke SATO

It was known that agricultural water accounts for 70% of water use on global average. The influence on whole water demand in the future is concerned with a change of the global food demand of these days. Also, regional change of water demand and supply balance seriously affects future food production because water supply is influenced remarkably by the area and climate change.

In this study, It is intended to clarify local characteristics of structure of water demand and water supply and demand balance with food production on global scale using water footprint (WF). We chose staple grains and livestocks as subject study and take domestic production, movement of the indirect water by the trade. As a result, domestic WF is up to 3.3×10^{12} (m^3) in Asia and dependence WF is 1.1×10^{11} (m^3) in Africa. Therefore, it was showed that these regions strongly depend on water resources in North and South America, Europe and Oceania that export much food. We also introduce WF considering food consumption in the future.