

# 気候変動による世界の水需給影響及び適応策評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平24～平27

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：徳永 良雄、海野 仁、  
栗林 大輔、マキシム グシエフ、  
パトリア アン ハネリヤ サンチェス

## 【要旨】

世界各地において渇水が頻発し、アジア、アフリカを中心に被害が生じている。さらに、地球温暖化の進展に伴う水供給量の減少と、人口増に伴う水需要増により、水需給バランスが大幅に悪化することが危惧される。本課題では、気候変動と人口増加に伴い増大する可能性のある渇水を取り上げ、リスクを評価する手法を提示することを目的とした。具体的には、アジア地域を対象に過去に発生した渇水の分布状況を把握するとともに、21世紀半ばの各国における水需要量を予測した。さらに、フィリピン国パンパンガ川流域を対象にBTOPモデルを用い、現在および21世紀後半における貯水池貯留量と同流域における灌漑可能面積を算出し、渇水リスクを評価した。最後に、水ストレスによる社会影響について検討し、渇水被害を軽減するための調整事例を提示した。

キーワード：気候変動、水需給、BTOP、パンパンガ川流域、灌漑可能面積

## 1. はじめに

世界各地において渇水が頻発し、アジア、アフリカを中心に、膨大な数に及ぶ人々が飢餓や生産調整など、渇水による影響を受けている。さらに、気候変動による地球温暖化の進展に伴う水供給量の減少と、今後予想される人口増に伴う水需要増により、水需給バランスが大幅に悪化し、地域格差の拡大や渇水被害の激化が危惧される。各種用水の不足は、2011年にタイで発生した水害と同様、サプライチェーンの停止による世界的な経済影響に波及する恐れすらある。

本課題では、気候変動と人口増加に伴い増大する可能性のある渇水を取り上げ、リスクを評価する手法を提示することを目的とした。具体的には、アジア地域を対象に過去に発生した渇水の分布状況を把握するとともに、21世紀半ばの各国における水需要量を予測した。さらに、フィリピン国パンパンガ川流域を対象にBTOP<sup>1)</sup>モデルを用い、現在および21世紀後半における貯水池貯留量と同流域における灌漑可能面積を算出し、渇水リスクを評価した。最後に、水ストレスによる社会影響について検討し、渇水被害を軽減するための調整事例を提示した。

## 2. アジア各国における水資源賦存量と水需要量

本章では、アジア地域を対象に過去に発生した渇水の状況を取りまとめるとともに、渇水被害の激甚な国、地域及び被害状況を把握する。さらに、各国について水資源賦存量を把握するとともに、将来人口の推計値を活用して、21世紀半ばにおける水需要量を予測する。

### 2.1 アジア各国における渇水の発生状況

CRED（Center for research on the Epidemiology of Disasters）から公開されているデータベース“EM-DAT”<sup>2)</sup>を利用し、過去30年間におけるアジア各国の渇水被害の発生回数ならびに影響を受けた人口を取りまとめた（図-1, 2）。その結果、発生回数では中国が全体の28%と最も高く、次いでタイ、インドの順となった。一方、影響を受けた人口ではインドと中国がほぼ同数で最も多く、これに、イラン、タイが次ぐ結果となった。ここで、渇水による影響を受けた人口をもとに、アジア30か国を4組のグループに分割し（図-2）、第1グループを除く各グループから対象国を1か国選定し、水資源賦存状況を把握した。

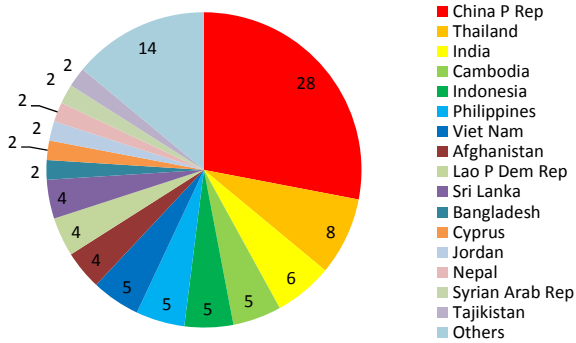


図-1 アジア各国の渇水被害回数

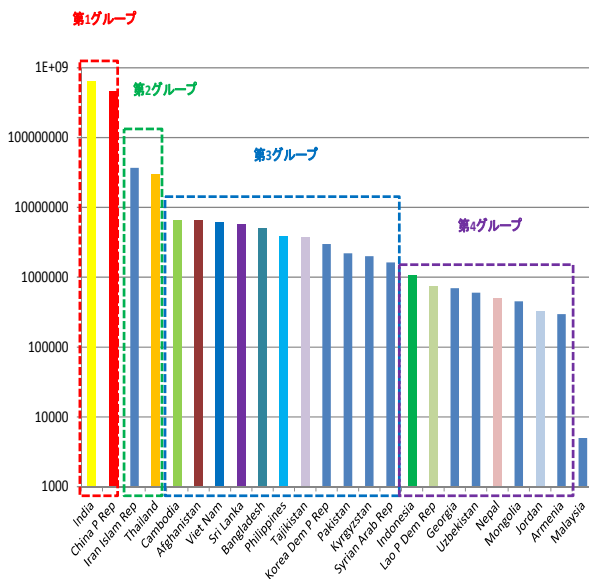


図-2 アジア各国の渇水により影響を受けた人口

## 2. 2 アジア各国における水資源賦存量

アジア各国の渇水により影響を受けた人口(図-2)を基に、第2グループからタイ、第3グループからフィリピン、第4グループからインドネシアを対象国に抽出し、FAOのデータベース AQUASTAT<sup>3)</sup>ならびに日本の水資源白書<sup>4)</sup>のデータを利用し、日本を含む各国における水資源賦存量ならびに水利用量を整理した(表-1, 2)。その結果、水資源賦存量の総量、1人あたり水資源賦存量ともインドネシアが一番多く、日本が他国に比べ少ない状況が見られた。さらに、用途別の水利用量については、各国とも農業用水としての利用の比率が高く、特にタイでは90%以上が農業用水として利用されている状況が見られた。ここで、水資源賦存量に対する水利用量の割合を水利用割合と定義し、国別に整理すると(表-3)、日本における水利用割合が19.7%と最も高い数

値となった。一方、水利用割合が5.6%と最も低いインドネシアでは、新たな水資源の開発余地が多く残されていることがうかがわれた。

表-1 アジア各国別水資源賦存量

国	インドネシア	フィリピン	タイ	日本
データ年	2000	2009	2007	2011
水資源賦存量 [ $\times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ ]	2,019,000	479,000	438,609	410,000
一人当たり 水資源賦存量 [ $\text{m}^3/\text{年}$ ]	8,080	4,868	6,545	3,400

表-2 アジア各国別水利用量

国	インドネシア	フィリピン	タイ	日本
データ年	2000	2009	2007	2011
農業用水 [ $\times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ ]	92,763 (81.9%)	67,066 (82.3%)	51,786 (90.4%)	54,400 (67.2%)
生活用水 [ $\times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ ]	13,129 (11.6%)	6,235 (7.6%)	2,739 (4.8%)	15,200 (18.8%)
工業用水 [ $\times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ ]	7,398 (6.5%)	8,254 (10.1%)	2,777 (4.8%)	11,300 (14.0%)
合計 [ $\times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ ]	113,290 (100.0%)	81,555 (100.0%)	57,302 (100.0%)	80,900 (100.0%)
一人当たり 水利用量 [ $\text{m}^3/\text{年}\cdot\text{人}$ ]	527	843	867	632

表-3 アジア各国別水利用割合

国	インドネシア	フィリピン	タイ	日本
水利用割合 [%]	5.6	17.0	13.1	19.7

## 2. 3 アジア各国における将来水需要量の推計

前節で整理した1人当たり水利用量が将来にわたって変化しないと仮定し、国連の整理した人口予測<sup>5)</sup>を基に、2050年におけるアジア各国の水需要量を予測した(表-4)。今後、インドネシアとフィリピンについては人口の増加が予測される一方、タイと日本については人口が減少し、水需給が緩和される傾向が予測された。人口の増加するインドネシア、フィリピンのうち、インドネシアについては前述のとおり水資源の開発余地が大きいと考えられるものの、すでに現状での水利用割合が17.0%と高いフィリピンについては、将来における水需給のひっ迫が予想された。

表-4 2050年アジア各国別水需要量予測

国	インドネシア	フィリピン	タイ	日本
データ年	2000	2009	2007	2011
現在の人口 (UN) [×10 <sup>8</sup> 人]	208,939 (in 2000)	93,444 (in 2010)	65,559 (in 2005)	127,353 (in 2011)
将来人口予測 (2050年 中間推計値) (UN) [×10 <sup>8</sup> 人]	321,377	157,118	62,452	108,329
1人当たり 水利用量 [m <sup>3</sup> /年・人]	527	843	867	632
将来 水需要量予測 (2050年)	169,366	132,450	54,146	68,464
水需要量 将来/現在比 [%]	154	168	95	85

### 3. 対象流域における水供給の将来予測

本章では、水需給のひっ迫が予想されるフィリピンのパンパンガ川流域（図-3）を対象に、将来における気候変動の影響を考慮した水供給シミュレーションを行い、灌漑用水の供給ならびに灌漑可能な面積の変化について予測する<sup>6-12)</sup>。

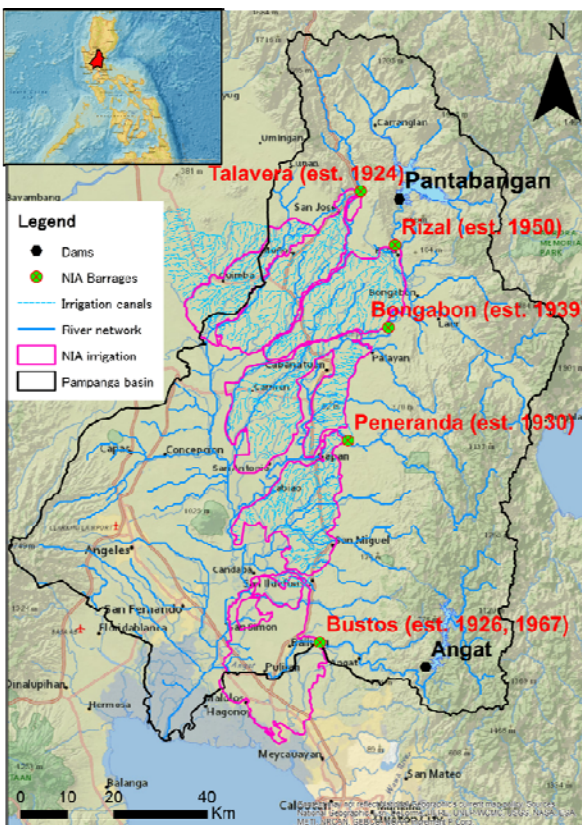


図-3 フィリピン国パンパンガ川流域<sup>13)</sup>

### 3. 1 調査方法

パンパンガ川流域を対象に、分布型流出解析モデルである BTOP モデルを構築し、パンタバンガンダム流入量を再現した。パンタバンガンダムはパンパンガ川上流域に位置し、30 億 m<sup>3</sup> の貯水容量を有する灌漑と発電を主目的とする多目的ダムで、下流域の約 1,000km<sup>2</sup> の農地に灌漑用水を補給している。モデル定数の同定には、パンタバンガンダム地点日降雨量と日平均流入量を用いた。

次に、気候モデルによる気候変動予測データを活用して、BTOP モデルで将来の水供給をシミュレートした。気候変動予測データとしては、20km 四方の超高解像度大気大循環モデルである MRI-AGCM3.2S のデータを用いた<sup>14)</sup>。現在気候実験（1979-2003 年）では、観測された海面水温や海氷の分布や温室効果ガス濃度などを境界条件とした。将来気候実験（2075-2099 年）では、CMIP5 の温暖化シナリオで最も温室効果ガス排出量が多い RCP8.5 シナリオを用いた。この実験では、海面水温や海氷の分布の違いによる不確実性を考慮し、CMIP5 で海面水温を予測した 28 種類のモデルを対象に、クラスター解析により 4 種類の異なる海面水温と海氷の分布を設定し、境界条件とした。これら 28 種類のモデル全てから求めた海面水温分布と比較すると、8 モデルからなる c1 は南北半球ともほぼ様に温暖化を示し、14 モデルからなる c2 は赤道太平洋付近でエル・ニーニョに似た温暖化パターンを示し、6 モデルからなる c3 は南半球より北半球でより温暖化が進む海面水温分布を示す。同じ RCP8.5 の温室効果ガス排出シナリオであっても、これら異なる海面水温や海氷の分布によって、MRI-AGCM3.2S の応答が変化し、異なる将来降水量が求められる。MRI-AGCM3.2S で得られた日降水量データは、バイアス補正した後に BTOP モデルの入力として用いた。

水供給のシミュレーションは、貯水池への流入を計算する BTOP モデルと貯水池運用モデルを組み合わせで実施した。貯水池運用モデルは、実績値を参考に雨季の灌漑面積を 820km<sup>2</sup> に固定のうえ、乾季の灌漑面積を乾季初頭の貯水量に応じて変化させた。さらに、現在気候と将来気候における灌漑可能な面積を比較し、将来における渇水リスクを評価した。

### 3. 2 調査結果

観測雨量を用いたパンタバンガンダムにおける貯水量の再現結果を、図-4 に示す。貯水量の計算結果は実績をおおむね再現しており、モデル定数の妥当性が裏付けられた。

パンタバンガンダムにおける将来気候における貯水量シミュレーションを、図-5 に示す。将来気候については、RCP8.5, RCP8.5-c1, RCP8.5-c2, RCP8.5-c3 の4 ケースについて計算した結果、同じ温室効果ガス排出シナリオにおいても海面水温の分布によって予測が大きく異なる結果となった。ここで、図-5 の横軸には年月を示したが、これらは貯水量が低下する具体的な時期を示したものではない。については、図-5 より将来起り得る程度と頻度を読み取ることが求められる。海面水温の分布により異なるものの、

将来気候における貯水量は、現在気候に比べやや減少する結果が得られた。

パンタバンガンダム下流域では、前述のとおり乾季初頭の貯水量に応じ当該期の灌漑面積を決定している。現在気候と将来気候における灌漑可能面積ならびに灌漑区域生産額を比較すると、表-5 に示す通り、将来において減少が見込まれた。ここで、単位面積当たりの米の収穫量は、CountrySTAT Philippines (フィリピン政府統計局資料) によると、355 [t/km<sup>2</sup>] (2000 年) ~420 [t/km<sup>2</sup>] (2003 年) であることから、400 [t/km<sup>2</sup>] と設定した。単位重量当たり米価は、CountrySTAT Philippines (フィリピン政府統計局資料) によると、8,800 [PhP/t] (2000 年) ~9,440 [PhP/t] (2003 年) であることから、9,000 [PhP/t] と設定した。

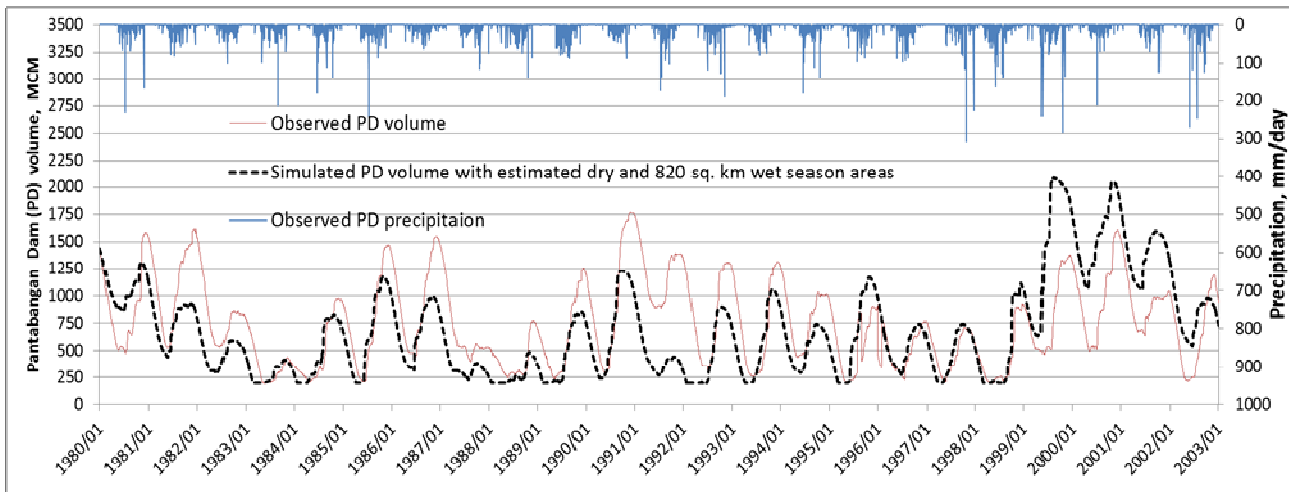


図-4 観測雨量を用いたパンタバンガンダム貯水量の再現

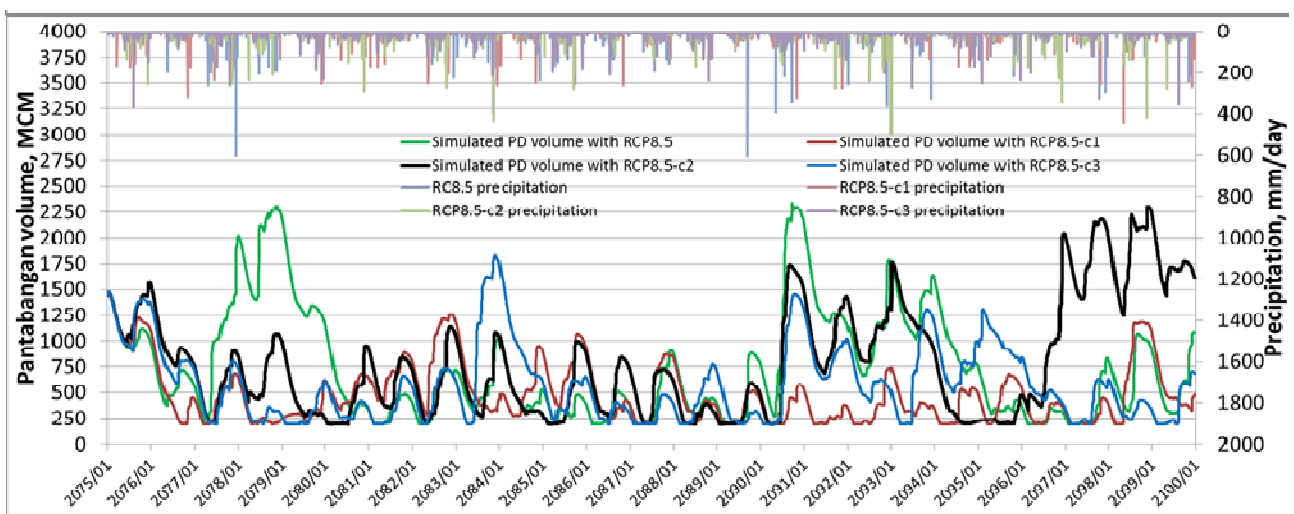


図-5 将来気候におけるパンタバンガンダム貯水量の予測



表-5 現在気候と将来気候における灌漑可能面積の比較

	現在気候 1979年～2003年平均 (A)	将来気候 RCP8.5 2075年～2099年平均 (B)	変化率 (B)/(A)	将来気候 RCP8.5-c1 2075年～2099年平均 (C)	変化率 (C)/(A)	将来気候 RCP8.5-c2 2075年～2099年平均 (D)	変化率 (D)/(A)	将来気候 RCP8.5-c3 2075年～2099年平均 (E)	変化率 (E)/(A)
かんがい可能面積 (乾季) [km <sup>2</sup> ]	650	624	0.96	520	0.80	634	0.97	572	0.88
単位面積当たり 収穫量 [t/km <sup>2</sup> ]	400	400	-	400	-	400	-	400	-
単位重量当たり 米価 [PhP/t]	9,000	9,000	-	9,000	-	9,000	-	9,000	-
かんがい区域 生産額 (乾季) [× 10 <sup>6</sup> PhP/年]	2,340	2,246	0.96	1,872	0.80	2,281	0.97	2,061	0.88

一方、同流域ではパンタバンガンダムの有効活用を図ることを目的に、2001年12月以降、流域間導水が運用されている。本検討では現在気候と将来気候との比較を主目的としていることから流域間導水の効果を見込んでいないが、将来気候において流域間導水の効果を見込んだ場合、水需給が緩和することも予想される。

・地域のイメージダウン

用水不足による社会的影響は、直接被害、間接被害等多岐に及ぶ一方、貨幣価値換算ができる被害とできない被害が抽出された。将来、水需給がひっ迫する地域については、渇水被害を軽減するため、長期的視野に立った水資源開発が求められる。

4. 水ストレスによる社会影響

4.1 水ストレスによる社会影響

水ストレスによる社会的影響を把握することを目的に、我が国で実施されている事業評価の手法を参照し、社会的影響項目を抽出する。

かんがい用水の不足による影響については、「土地改良事業の費用対効果分析に関する基本指針」(図-6)に、以下の記述が見られる。

- ・作物供給の不安定化
- ・作物生産量の減少
- ・作物品質の低下
- ・耕作放棄の拡大
- ・農業労働環境の悪化
- ・水源涵養機能の低下
- ・景観の悪化

一方、生活用水の不足による影響については、「水道事業の費用対効果分析マニュアル」(図-7)に、以下の記述が見られる。

- ・消化器系伝染病の発生
- ・水量確保のための負担増
- ・水質確保のための負担増
- ・断水による2次被害
- ・満足度の低下



図-6 土地改良事業の効果<sup>15)</sup>

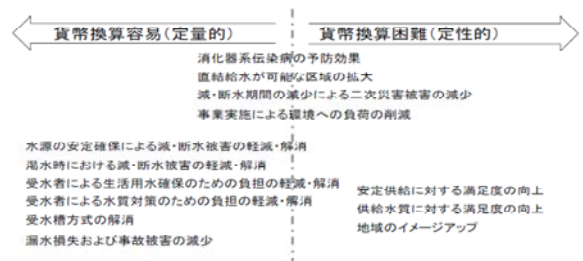


図-7 水道事業の効果<sup>16)</sup>

## 4. 2 渇水調整ルール

将来における渇水被害を軽減するための適応策検討の参考とするため、既往の渇水調整の事例を収集した。例えば、我が国の岩木川では、2012年に発生した渇水の際に、次のような調整が実施された。

- 岩木川の流量、目屋ダムの貯水量が減少した場合、ダム管理者、河川管理者、気象台、利水者から成る渇水情報連絡会を開き、今後の取水量について調整。
- 河川管理者の Web サイトに「渇水情報 HP」を立ち上げ、注意ならびに適正な取水管理を呼びかけ。
- 上水道については、水源が不足する場合、利水者間で水源を融通（弘前市水道の水源が不足する場合、津軽広域水道企業団の水源から融通）。
- 灌漑用水の取水量が不足する場合、番水制を実施（例えば、長瀬堰の場合、48 時間取水、48 時間給水など）。

（青森河川国道事務所記者発表資料 2012 年 8 月 9 日を参考）

一方、インドネシア国のソロ川流域では、次のような渇水調整の実態を聞き取った。

- ソロ川流域では年 2 回（乾季の初期と雨季の初期）、ダム管理者、河川管理者、利水者から成る調整会議を開き、今後半年間の各利水者の利水量を決定。
- 渇水が生じた際の水利利用については、生活用水、農業用水の利用が優先され、工業用水が最も渇水の影響を受ける。
- 工業用水の利水者は渇水の際に農業用水の利水者に個別に相談し、水を融通し、また、渇水に備えて工場内にため池を設けて対応。

（インドネシア国水公団ソロ事業所より聞き取り。

2016 年 3 月 14 日）

既往の渇水時には、まず同一用途内で調整し、さらに状況が悪化した場合は流域全体で調整する状況がうかがわれた。将来、水需給がひっ迫する地域については、日頃より渇水調整に関する協議を行い、流域全体で負担と裨益のバランスの取れた調整案を決定することが求められる。

## 5. まとめ

本課題では、気候変動と人口増加に伴い増大する可能性のある渇水を取り上げ、リスクを評価する手法を提示することを目的とした。検討の結果、以下の結論が得られた。

- 過去 30 年間におけるアジア各国の渇水被害の発生

回数ならびに影響を受けた人口を取りまとめ、特徴の異なるグループ分け、代表国（タイ、インドネシア、フィリピン）を選出し、賦存量を算出した。

- また将来（21 世紀半ば）の各国における水需要量を予測した結果、フィリピンにおいて水需給のひっ迫が予想された。
- フィリピン国パンパンガ川流域を対象に BTOP モデルを用い、現在および 21 世紀後半における貯水池貯留量と同流域における灌漑可能面積を算出した結果、灌漑可能面積の減少による渇水リスクの増大が予想された。
- 水ストレスによる社会的影響を把握した結果、渇水被害を軽減するための長期的視野に立った水資源開発ならびに負担と裨益のバランスの取れた調整が必要と考えられた。

## 参考文献

- 1) Kuniyoshi Takeuch, Prasantha Hapuarachchi, Maichun Zhou, Hiroshi Ishidaira and Jun Magome: “A BTOP model to extend TOPMODEL for distributed hydrological simulation of large basins”, Hydrological Processes, Vol.22, pp. 3236-3251, 2008.
- 2) “Centre for Research on the Epidemiology of Disasters”  
Web ページ: <http://www.emdat.be/>
- 3) “Food and Agriculture Organization of the United Nations”  
Web ページ:  
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>
- 4) 「日本の水資源」 Web ページ:  
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/hakusyo/index5.html>
- 5) 国連人口基金東京事務所 Web ページ:  
<http://www.unfpa.or.jp/publications/index.php?eid=00033>
- 6) Maksym Gusyev, Akira Hasegawa, Patricia Sanchez and Hisaya Sawano: “Using drought indicators for disaster risk management: A case study of dam infrastructure in the Pampanga River Basin, the Philippines”, Invited Presentation, APEC Climate Symposium 2015, Manila, the Philippines, 2015.11.
- 7) Maksym Gusyev, Akira Hasegawa, Jun Magome, Daisuke Kuribayashi, Hisaya Sawano and Sangeun Lee: “Drought assessment in the Pampanga River basin, the Philippines - Part 1: Characterizing a role of dams in historical droughts with standardized indices”, In Weber, T., McPhee, M.J. and Anderssen, R.S. (eds) MODSIM2015, 21st International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and

- Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 1586-1592, ISBN: 978-0-9872143-5-5, 2015.12.
- 8) Maksym Gusyev, Akira Hasegawa, Jun Magome, Hitoshi Umino and Hisaya Sawano: "Drought assessment in the Pampanga River basin, the Philippines - Part 3: Evaluating climate change impacts on dam infrastructure with standardized indices", Oral Presentation, 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia, 2015.12.
  - 9) Jun Magome, Maksym Gusyev, Akira Hasegawa and Kuniyosh Takeuchi: "River discharge simulation of a distributed hydrological model on global scale for the hazard quantification". In Weber, T., McPhee, M.J. and Anderssen, R.S. (eds) MODSIM2015, 21st International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 1593-1599, ISBN: 978-0-9872143-5-5, 2015.12
  - 10) Maksym Gusyev, Akira Hasegawa, Jun Magome, Hitoshi Umino and Hisaya Sawano: "Towards Holistic Flood and Drought Assessment with BTOP model on global and local scales". Poster Presentation, 2<sup>nd</sup> Asian Water Cycle Symposium, Tokyo, March 1-2, Japan, 2016.03.
  - 11) 文部科学省研究開発局:「気候変動リスク情報創生プログラム 課題対応型の精密な影響評価 平成27年度研究成果報告書」, pp.114-pp.116, 2016.03.
  - 12) Maksym Gusyev, Akira Hasegawa, Jun Magome, Hitoshi Umino and Hisaya Sawano: "Drought impacts in Asian river basins: historical and climate change perspectives", The 7th International Conference on Water resources and Environment, Kyoto, Japan, 2016.06.
  - 13) 国際協力機構:「フィリピン共和国パンパンガ川流域統合的水資源管理計画調査最終報告書 第2巻 主報告書」, 2011.01.
  - 14) Akio Kitoh and Hirokazu Endo: "Change in precipitation extremes projected by a 20-km mesh global atmospheric model, Weather and Climate Extremes 11, pp41-52, 2016.
  - 15) 農林水産省:「土地改良事業の費用対効果分析に関する基本指針」, 2008.03.
  - 16) 厚生労働省:「水道事業の費用対効果分析マニュアル」, 2011.07.

# STUDY ON EFFECT OF WORLD WATER SUPPLY / DEMAND BY CLIMATE CHANGE AND ASSESSMENT OF ADAPTATION METHODS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Water Related Disasters

Research Group

Author : TOKUNAGA Yoshio

UMINO Hitoshi

KURIBAYASHI Daisuke

Maksym GUSYEV

Patricia Ann Jaranilla SANCHEZ

**Abstract** : Drought disasters have frequently occurred in Asian and African countries causing many damages in the past. Moreover, another point of great concern is that the water balance of anthropogenic demand and supply will become even worse because of the on-going global warming and increase of population. This study aims to introduce an evaluation method of drought risks estimated to increase in future. Firstly, we analyze the distribution of past droughts in Asian countries and estimate water demands in the middle of 21st century. Secondly, we simulated stored water in a reservoir and possible irrigated area in the Pampanga River basin, the Philippines, in the present and late 21st century climates. Finally we consider the social-economic impacts caused by droughts and present example of coordination activities for drought adaptation.

**Key words** : climate change, water demand and supply, BTOP, Pampanga River basin, possible irrigated area