

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 23 日現在

機関番号：32678

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K12855

研究課題名（和文）乾燥地における持続可能な水資源管理のための多基準社会的意思決定法の開発

研究課題名（英文）A study on multi-criteria social decision making method for sustainable water resource management in drylands

研究代表者

秋山 知宏 (Akiyama, Tomohiro)

東京都市大学・付置研究所・准教授

研究者番号：90452523

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：持続可能な水資源管理を実現するためには、水資源管理政策の評価や意思決定のための優れた枠組みが必要である。その候補として多基準意思決定法が注目されているが、アンケート調査を実施しなければ適用できないという限界がある。

本研究では、人工知能技術を応用したマルチエージェントモデルは多基準意思決定法の限界を超えられるかという問いを考察した。統計データや観測データに基づいて検証した結果、本モデルは高い精度で水収支を閉じることができ、社会経済的影響も含めて、多面的な影響評価を行えることが明らかになった。したがって、マルチエージェントモデルは多基準意思決定法の限界を超えられると結論づけられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したマルチエージェントシミュレーションモデルのユニークな点は、以下の2つである。第一は、従来異なる学問分野でばらばらに用いられてきた種々の数値モデルを統合したことである。具体的には、水循環モデルや植物動態モデルと社会経済モデルやマルチエージェントモデルを統合したことである。第二は、マルチエージェントモデルは多基準意思決定法の限界を超えられることを実証した点である。以上から、水資源管理政策の評価や意思決定のための新たな枠組みを提示できたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Achieving sustainable water resources management requires a better framework for evaluation and decision-making of water resources management policies. The multi-criteria decision-making (MCDM) method is attracting attention as its candidate; however, there is a limitation that it cannot be applied without conducting a questionnaire survey. This present study examined whether a multi-agent model could overcome the limitation of MCDM. Model validation revealed that this model can close the water balance with high accuracy and can perform complicated impact assessment including socioeconomic impact. Therefore, we concluded that the multi-agent model can overcome the limitation of MCDM.

研究分野：統合学

キーワード：持続可能性 乾燥地 水資源管理 社会的意思決定 多基準意志決定法 マルチエージェントモデル

1. 研究開始当初の背景

アジアの乾燥地では、灌漑農地面積の増大に伴い水需要が増え続けており、水資源逼迫問題が深刻となっている。近年の降水量の増大傾向は水資源逼迫状況を緩和しているが (Akiyama *et al.*, 2013), この降水量の増大は 10 年周期変動による可能性が高く、近い将来の急激な水不足が懸念される。気候変動や人間活動による砂漠化や水資源の枯渇を防ぎ、人類社会の持続可能性を高めるには、適切な水資源管理が必要である。近年、流域スケールの統合的水資源管理が重要視され、政策にも反映されるようになってきた。しかし実際には、多様なステークホルダーの利害が複雑に関わりあい、問題解決に結びついていないと断言がたい。それどころか、グッドプラクティスとされる政策が別の問題をもたらす事例も見られる (Akiyama *et al.*, 2013)。この状態を改善するには、水資源管理政策の評価や意思決定のための優れた枠組みの開発が不可欠である。

そのような枠組の候補として、多基準意思決定法が注目されている。これは、事業や政策の選択に際して、複数の代替案の優劣を複数の評価基準と多様なステークホルダーの嗜好を考慮して評価することにより、最適な選択を導くものである。しかし、評価基準の重み付けにアンケート調査の実施が不可欠であり、ステークホルダーの範囲が空間的・時間的に限定されない場合の意思決定、すなわち社会的意思決定には適用できないという限界がある。

2. 研究の目的

代表者らは、世界の水資源管理をめぐる課題を解決するための意思決定支援システムとして、多基準社会的意思決定法の開発を目指している。これは、新しい分野として確立されつつある多基準意思決定法を、水文学、生態学、社会科学と情報科学を融合した学際的研究により、社会的意思決定に応用できるようにさらに発展させるものである。ここでの重要な問いは、人工知能技術を応用したマルチエージェントモデルを用いることにより、従来の多基準意思決定法の限界を超えられるかである。この問いを考察するために必要な作業は、1) 現地調査に基づくデータセットの作成、2) 持続可能性概念を考慮して水資源管理政策の代替案を策定する方法の開発、3) 政策代替案の効果・影響を客観的に評価するためのマルチエージェントシミュレーションモデルの開発である。本研究では、以上の作業をおこない、多基準意思決定法の限界を超えられるかどうかを考察した。

3. 研究の方法

(1) 現地調査に基づくデータセットの作成

まず、黒河流域の水環境システムを対象として、開発する数理モデルの解析範囲を定めた。その概念図を、図 1 に示す。この図に基づき現地調査をおこない、水循環と水利用の変化、生態系と土地利用の変化、社会経済の変化に関するデータセットを作成した。

(2) 持続可能性概念を考慮して水資源管理政策の代替案を策定する方法の開発

持続可能性の範疇に含まれる概念が多岐に渡ることが具体的な水資源管理政策の策定を困難にしているという現状に鑑み、まず、持続可能性に関わる鍵概念の体系化を試みた。Web of Science などのデータベースでワイルドカード (例えば *sustainab**) を使って論文を検索し、持続可能性に関する数々の概念を抽出した。そして、これらを、哲学における概念の枠組に基づいて、内包と外延で考察した (内包は概念がもつ共通な性質、外延は概念の適用範囲を意味する)。

一方、水資源管理政策の代替案を策定する方法として、情報理論に基づく Ecological Network Analysis というモデル化手法に着目し、持続可能性の定量化のための数理モデルを開発した。その上で、「節水型社会の建設」という中国国家環境政策 (以下、節水政策) のパイロット流域となっている黒河流域 (青海省、甘粛省、内モンゴル自治区) でケーススタディをおこない、提案する手法の妥当性を検証した。

(3) 政策代替案の効果・影響を客観的かつ多面的に評価するためのマルチエージェントシミュレーションモデルの開発

本研究で開発したマルチエージェントシミュレーションモデルの枠組みを図 2 に示す。本モデルは、主として、水文生態モデル (分布型水循環モデル、植生動態モデル)、社会経済モデル (マルチエージェントモデル、インプットアウトプットモデル、応用一般均衡モデル)、インターフェースモデル (境界モデル; 土地利用モデル、水利用モデル) から成る。水文生態モデルと社会経済モデルは、インターフェースモデルを用いて相互に結合することによって、河川流量や

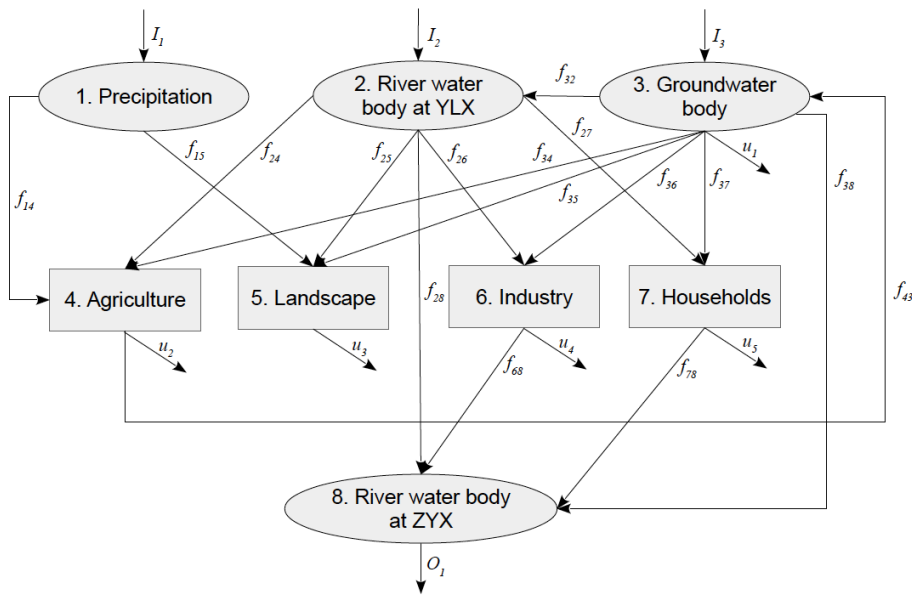


図1. 黒河流域の水環境システム. f は水資源のフロー, u は水利用, I は流域への流入, O は流出を意味する.

地下水位ならびに土地利用や水利用などの変数によって相互に作用するようにした. マルチエージェントベースモデルでは, 複数の自律的なエージェントに内部状態と行動ルールを持たせ, ボトムアップ的に集成的な構造を育成することで, 政策の変化による応答(各エージェントの振る舞い, エージェント間の相互作用, 社会全体の変化)を解析できるようにした. 各モデルの特性(開発言語, 時空間分解能など)が異なるため, オンライン結合(ソースコードレベルでの強い結合)とオフライン結合(インプットアウトプットファイルによる弱い結合)の両方を用いた. 以上のようにして政策代替案を客観的かつ多面的に評価できるようなマルチエージェントシミュレーションモデルを開発し, 統計データや観測データに基づいて検証した.

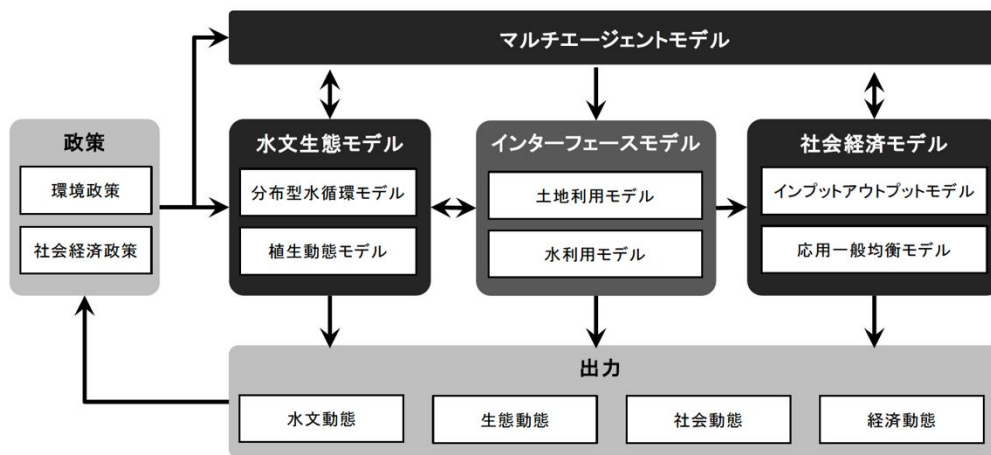


図2. 開発したマルチエージェントシミュレーションモデルの枠組み.

4. 研究成果

(1) 作成したデータセットに基づき, 黒河流域における人間活動と水環境の変化に関する考察
作成したデータセットに基づいて, 水循環と水利用の変化, 生態系と土地利用の変化, 社会経済の変化に関する考察をおこなった. に関する解析の結果, 節水政策の実施にもかかわらず, 取水量の合計が増えたことが明らかになった. 農民レベルで節水された $2.0 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ は, 主に農業企業によって新たに開墾された農地における蒸発散 ($2.6 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$) として消費されたと考えられる. 地下水の取水量も増えており, 地下水位低下に拍車をかけたと考えられる (Akiyama et al., 2018; Bandara and Akiyama, 2018). については, 一定範囲内の全草本・木本のサイズと位置を測定するプロット調査と, Landsat 衛星データを用いたリモートセンシング解析をおこない, その結果を 2003 年に実施した同様の調査結果と比較した. これにより, 節

水政策の効果と影響による土地被覆/土地利用の変化を空間的かつ定量的に明らかにした(Zhou, Akiyama et al., 2018). について聞き取り調査およびアンケート調査をおこなった結果, 作物体系や産業構造の変化, 水利権・土地利用権の取引や転用の実態, 水価格制度や個人レベルの所得の空間的差異, 環境変化に対する住民意識などを明らかにした(Akiyama et al., 2018; Fan, Akiyama et al., 2018; Sun and Akiyama, 2018).

(2) 持続可能性概念を考慮した水資源管理政策代替案の策定する方法の開発に関する考察

持続可能性の範疇に含まれる概念が多岐に渡ることが具体的な水資源管理政策の策定を困難にしているという現状に鑑み, 先ず, 持続可能性に関わる鍵概念の体系化を試みた(Kharrazi, Akiyama et al., 2019). 考察の結果, 持続可能性概念の内包には, 継続性・連続性・存続性, 方向性(オリエンテーションすなわち方向付けをするという性質), 関係性という3つの主要な特性があるとわかった. そして, を決定づける下位概念として適応性・効率性・強靱性(レジリエンス)の3つが抽出され, を決定づける下位概念として分離・統合・補完の3つが抽出された. 関係性についての従来の議論は「分離の原理」に偏っており, 人類や地球の存続を実現するには根本的な転換が必要であるとすれば, そのオリエンテーションには問題があることが示唆された.

一方, 水資源管理政策の代替案を策定する方法として, 情報理論に基づく Ecological Network Analysis というモデル化手法に着目し, 持続可能性の定量化のための数理モデルを開発した. 現地調査で得られたデータセットをもとにしてマトリックス分析をおこなった結果, 節水政策による水利用効率の追求が, 水環境システムのレジリエンスを大幅に低下させてきたことを実証的に示した(Kharrazi and Akiyama, 2019). 開発した数理モデルにより, 水環境システムの効率性やレジリエンスなどを定量的に調整しながら, 水資源管理政策の代替シナリオを策定できるようになったと考えられる.

(3) 政策代替案の効果・影響を客観的かつ多面的に評価するためのマルチエージェントシミュレーションモデルの開発に関する考察

開発したマルチエージェントシミュレーションモデルを統計データや観測データに基づいて検証した結果, 本モデルは高い精度で水収支を閉じることができ, 社会経済的影響も含めて, 多面的な影響評価を行えることが明らかになった.

水収支解析の結果, 黒河流域は, 約 $15.7 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ を降水量として得て, 約 $15.4 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ を蒸発散量として消費したことがわかった. 流域末端の湖の貯水量は $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ の増大傾向であった. この要因は, 2000 年に開始された生態用水分配プロジェクトと, 上流域における降水量の増大であった. 一方, 地下水貯留量は $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ の増大傾向であった. しかしながら, 地域差があった. 中流域では $0.1 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ の減少傾向であった. これは, 灌漑農地の拡大による地下水取水量の増大のためであった. 以上のように, 本モデルは高い精度で水収支を閉じることができた.

一方, マルチエージェントモデルを検証した結果, 農民の振る舞いは改革型と保守型の2つに大別され, アンケート調査の結果と整合することが明らかになった. 改革的な農民は高収益の作物を選択する傾向があり, 保守的な農民は安定した収益を得られる作物を複数選択する傾向があった. 改革的な農民は, 保守的な農民よりも, 水資源管理に対して敏感であった. これらのことは, アンケート調査の結果と整合した.

その上で, ENA モデルを用いて5つのシナリオを作成し, 開発したマルチエージェントシミュレーションモデルを用いて評価した: BAU シナリオ, 環境保全シナリオ, 効率性重視シナリオ, 生産性重視シナリオ, レジリエントシナリオ. 現状維持の BAU シナリオは, 2019 年 12 月 25 日発行の「張掖市落實国家節水行動实施方案」にしたがった. 環境保全シナリオの解析の結果, 下流域への短期的な放流は, 地下水をほとんど涵養しないことを明らかにした. それが洪水状に行われる場合には, 植生には逆効果であると考えられる. 塩分濃度の上昇は, 水ポテンシャルを変化させ, 根からの吸水を減じるためである. 下流域への短期的な放流は, 地下水と植生の保全に効果があると考えられてきたが, そうではないことが明らかになった. 一方, 効率性重視シナリオ, 生産性重視シナリオ, レジリエントシナリオの解析の結果, 生態移民政策は水消費を増大させること, 退耕政策は水消費を減少させること, 2022 年に建設が完了する黄蔵寺ダムなどの新規ダム建設は生態環境に多大な影響を及ぼすことなどを明らかにした. 水利用効率と水生産性の増大は水不足を解消し持続可能な農業のために必要不可欠であると考えられているが, 各灌漑区の水利用効率と水生産性はシナリオによって著しく異なることが明らかになった.

以上のように, 開発したマルチエージェントシミュレーションモデルは, 高い精度で水収支を閉じることができ, 社会経済的影響も含めて, 多面的な影響評価を行えることが明らかになった. したがって, マルチエージェントモデルは多基準意思決定法の限界を超えられるかという問いに対して, マルチエージェントモデルは多基準意思決定法の限界を超えられると結論づけられる.

今後の課題は以下の5つである: 1) オフライン結合をオンライン結合に変えること, 2) 不確実性と複雑性に対応すること, 3) 評価項目を増やすこと, 4) 利用可能なデータセットを最大限

に活用すること、5) 本モデルを意思決定支援システムとして現地の行政と共有し、運用上の効果と課題を評価すること。5) に関しては、シミュレーション結果を数値だけでなく、アニメーションとして提供し、プロセスを共有することで、実効性の高い計画策定につなげる。結果の数値だけを比較するのではなく、プロセスを見て、その原因を探ることまでを行い、計画を評価する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Akiyama, T., Kubota, J., Fujita, K., Tsujimura, M., Nakawo, M., Avtar, R., Kharrazi, A.	4. 巻 5
2. 論文標題 Use of Water Balance and Tracer-Based Approaches to Monitor Groundwater Recharge in the Hyper-Arid Gobi Desert of Northwestern China	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Environments	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/environments5050055	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Zhou, T., Akiyama, T., Horita, M., Kharrazi, A., Kraines, S., Li, J., Yoshikawa, K.	4. 巻 10
2. 論文標題 The impact of ecological restoration projects in dry lands: data-based assessment and human perceptions in the lower reaches of Heihe River basin in China	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 1471
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su10051471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Bandara, A., Akiyama, T.	4. 巻 6
2. 論文標題 A Study on the Groundwater Contamination by the Agriculture Fertilizer Inputs and its Spatial Distribution Pattern in the Zhangye Basin, Northwest China	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bhumi, The Planning Research Journal	6. 最初と最後の頁 18-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4038/bhumi.v6i1.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 増田敬祐. 秋山知宏. 上柿崇英. 中川光弘	4. 巻 12
2. 論文標題 共生社会と「自己」の探求: 求められる人間観	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 共生社会システム研究	6. 最初と最後の頁 80-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fan, H., Akiyama, T., Kharrazi, A.	4. 巻 14
2. 論文標題 An Insight into the Implementation of Land Use Right Transfer Policy in China: A Case Study in the City of Zhangye	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology	6. 最初と最後の頁 105-121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJARGE.2018.093961	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kharrazi, A., Akiyama, T.	4. 巻 1
2. 論文標題 Application of the Ecological Network Analysis (ENA) Approach in Water Resource Management Research: Strengths, Weaknesses, and Future Research Directions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges	6. 最初と最後の頁 259- 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-13-3179-4_14	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kharrazi, A., Akiyama, T., Yarime, M.	4. 巻 1
2. 論文標題 Resilience Thinking and Sustainable Development	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Encyclopedia of Sustainability in Higher Education	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-63951-2_324-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sun, Y., Akiyama, T.	4. 巻 10
2. 論文標題 An Empirical Study on Sustainable Agriculture Land Use Right Transfer in the Heihe River Basin	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 450 ~ 450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su10020450	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Akiyama, T., Kharrazi, A., Li, J., Avtar, R.	4. 巻 190
2. 論文標題 Agricultural water policy reforms in China: a representative look at Zhangye City, Gansu Province, China	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Environmental Monitoring and Assessment	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10661-017-6370-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 服部英二, 中村佳子, 廣井良典, 園田綾子, 秋山知宏, 川勝平太	4. 巻 12
2. 論文標題 A World of Sustainability: とこわかの思想	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地球システム・倫理学会会報	6. 最初と最後の頁 83~106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Akiyama, T.
2. 発表標題 What should education be like? Fostering awareness and practice of intrinsic nature of self
3. 学会等名 World Education Research Association 2019 Focal Meeting in Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akiyama, T.
2. 発表標題 Toward creation of an Integral Science: Meaning of integration
3. 学会等名 24th International Sustainable Development Research Society Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋山知宏
2. 発表標題 文明の転換期をどう生きるのか：本来性の自覚と実践
3. 学会等名 地球システム・倫理学会第14回学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋山知宏
2. 発表標題 統合学の基礎付け：新たな文明のパラダイムを求めて
3. 学会等名 地球システム・倫理学会第13回学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋山知宏
2. 発表標題 統合学の基礎付け：新たな文明のパラダイムを求めて
3. 学会等名 (非営利)一般財団法人京都フォーラム樹福書院「復幸実学共働学習会」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋山知宏
2. 発表標題 統合学から見た「自己」と「関係性の根本原理」
3. 学会等名 共生社会システム学会2017年度大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋山知宏
2. 発表標題 統合学の基礎付け：新たな文明のパラダイムを求めて
3. 学会等名 第292回環境監査研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋山知宏
2. 発表標題 世々代々の公共幸福に向けた方法論的考察
3. 学会等名 地球システム・倫理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Saito, N., Akiyama, T.
2. 発表標題 Distance Education and Pursuit of the Common at the Time of COVID-19: Ontology of Separation
3. 学会等名 Philosophy of Education
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 秋山知宏	4. 発行年 2018年
2. 出版社 PHP研究所	5. 総ページ数 164
3. 書名 砂漠化する中国の水環境問題：中国乾燥地域の黒河流域における地下水涵養機構と水利用に関する研究	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ResearchGate
https://www.researchgate.net/profile/Tomohiro_Akiyama2
 ORCID
<http://orcid.org/0000-0002-6720-8995?lang=en>
 publons
<https://publons.com/researcher/1373040/tomohiro-akiyama/>
 Google Scholar
<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=jbHwB8AAAAJ>
 LinkedIn
<https://www.linkedin.com/in/tomohiro-akiyama-a1759636/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	Chinese Academy of Sciences		