

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06579

研究課題名（和文）グローバルな水環境を考慮した陸圏と沿岸圏をつなぐ新たな水環境インデックスの提案

研究課題名（英文）Proposal of a new water environment index connecting the land and coastal areas in consideration of the global water environment

研究代表者

石塚 正秀（Ishizuka, Masahide）

香川大学・創造工学部・教授

研究者番号：50324992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：都市毎に水ストレス度を算出することにより、国単位で算出した場合と比較して、水ストレス度が約2～5倍に高まる結果が得られた。また、日本では、河川水質が世界の河川と比較して良好であり、水環境を考慮しても水ストレス度は大きな変化がなかったが、水質悪化の進んだ世界の河川では、糞便性大腸菌群と重金属の値が水質基準値よりも大きく超えている場合、水環境を考慮した水ストレス環境インデックスを用いることで、従来用いられてきた水量だけの水ストレス指標よりも水ストレス度が高まる結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人が実際に利用可能な水資源をより正確に評価するために、河川を通して都市に集水する水ストレスを新たに評価した。さらに、この指標に水環境の要素を加え、新たな水ストレス環境インデックスを提案した。近年あるいは将来的な世界人口増加と異常気象による降水量の時間的・空間的变化に対して、本研究で得た知見は社会的意義が高い。また、水の動態については、複数の河川流出解析や、人工衛星の雨量補正、逆解析、機械学習を行い、様々なパラメタリゼーションを実施した。河川流量の予測が今後実用化されれば、社会的意義は高い。また、新たな水環境指標として明らかにした河川のマイクロプラスチックの特徴は、広く環境問題への啓蒙となる。

研究成果の概要（英文）：By calculating the degree of water stress for each city, the result was obtained that the degree of water stress increased about 2 to 5 times compared to the result calculated for each country.

In Japan, the quality of river water was better than that of rivers in the world, and the degree of water stress did not change significantly even when the water environment was taken into consideration. However, in rivers around the world where water quality has deteriorated, the values of fecal coliforms and heavy metals greatly exceed the water quality standard values. By using the water stress environmental index that considers the water environment, the result was obtained that the degree of water stress became higher than the conventional water stress index calculated only by the amount of water.

研究分野：土木工学

キーワード：水ストレス 水環境リスク 河川水質 マイクロプラスチック 流出解析 水ストレス環境インデックス

### 1. 研究開始当初の背景

世界人口は2100年には今よりも約40億人増加すると予想されており (UN, 2015)、水危機と言われる21世紀は、水ストレス度が高まり、人間を含む生態環境の維持が困難を極める可能性が高い。水資源の将来予測に関する調査・研究は、数多くなされており (例えば、UN, 2003; Shen et al., 2014)、とくにアフリカにおける水ストレス度の増大が懸念されている。しかし、水が「量的」に満足していても、人や生物が利用できる「質」が確保されていなければ、真の意味での利用可能な水とは言えない。これまでの研究では、この視点が欠落していることが大きな問題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、水文学、環境水理学を基盤に、都市活動の社会構造変化・水環境リスクの視点を加えて、以下の(1)~(4)を通じた、水環境を考慮した新たな水ストレスインデックスを提案する。

- (1) 人口変化、産業構造変化などの社会構造の変化に伴う都市活動の関連データを収集・整理し、経済成長と水利用の関係を明らかにする。
- (2) グローバルの水質データ (GEMS/water) を収集・整理し、とくに、NPの溶存態・懸濁態などの形態別の水質特性、および河川毎のNP比の相違を明らかにする。
- (3) グローバル河川流量データベースと生活・工業・農業セクター別の水利用量 (FAO AquaSTAT) を利用して、世界の河川流域の水資源量の特徴を明らかにする。ただし、情報の精度が劣る場合は、地形データや衛星雨量データを整理し、河川流出解析を IFAS (Integrated Flood Analysis System) を用いて行う。
- (4) (2) で得られた水質濃度、(3) で得られた河川流量を用いて、河川からの栄養塩の負荷量解析を行う。さらに、(2) で行う水環境データ解析と相互に結果を補間させながら、新しい水ストレスインデックスを提案する。さらには、沿岸圏環境と陸圏環境との関連を評価し、河川水質管理の適正化方策を検討する。

最終的には、提案された新たな水ストレスインデックスを用いて、量質ともに考慮した真の意味での、水に対する高脆弱な地域を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 流域内都市人口を用いた水ストレスの提案

まず、都市が抱える河川流域 (後背流域) の流域面積を考慮した「都市流域内人口密度」を定義し、都市が集水できる水ストレス度の算出を試みた。

##### ① 都市流域内人口密度の定義

都市流域内人口密度  $\rho_{u,r}$  を以下のように定義する。

$$\rho_{u,r} = \frac{P_u}{A_r} \quad (1.1)$$

ここで、 $P_u$  は都市人口、 $A_r$  は対象とする都市が抱える河川流域 (後背流域) の流域面積である。

##### ② 都市が抱える河川流域の流域面積の算定方法

都市において利用できる水源として、都市に流入する河川流域に着目する。都市流域の算定には、都市エリアデータ (都市の範囲の位置情報) と地理標高データを必要とする。都市エリアデータに GCG05、メッシュ情報は世界流域データベース (Global Drainage Basin Database: GDBD) を利用した。解析は ArcGIS (ESRI Inc.) で行い、都市流域算定の自動処理は Model Builder (Python 言語) を用いて行った。

降水が斜面を流れる流向データは、地理標高データ GTOPO30 (Global 30 Arc-Second Elevation) を基にして算定された GDBD 内のデータを使用し、これを基に河道を作成する。都市エリアと河道が空間的に重なるもの (対象都市に流入する河川) を全て抽出した後、都市内の河川流路上に観測点となるマーカーを作成する。この観測点を起点として流向データから流域を作成し、都市毎に流域の統合を行う。

##### ③ 水ストレス度の算出方法

国毎の全球水ストレス度として、FMI (ファルケンマーク指数) を用いる。これは、ある国・地域において1人当たり1年間に利用可能な水資源量 PWA (per capita annual water availability) の多寡によって水不足の程度を表現する指標である。

$$PWA = \frac{W}{P} \quad (1.2)$$

ここで、年間水資源量 (水資源賦存量) を  $W$ 、人口を  $P$  とする。PWA が  $1,700 \text{ m}^3$  である場合をストレスなく水を利用するために必要な最低値として設定し、これを下回る国・地域は「水ストレス状態」にあるとされる。さらに、 $1,000 \text{ m}^3$  を下回った場合には「水欠乏」、 $500 \text{ m}^3$  未満の場合には「絶対的水欠乏」とみなされる。

## (2) 水環境を考慮した水ストレス指標の提案

日本の利根川、木曾川、信濃川の水質、世界（インド、マレーシア、タイ）の水質を考慮した水ストレス度  $PWA-Q$  を新たに提案し、それぞれの水質項目のうち、水質基準値よりも大きくなったものを使用し算出した。対象とする水質項目を BOD や重金属と発ガン性物質や大腸菌の二つのタイプに分けて、それぞれの健康被害の発生確率をモデル化した。

### ①健康被害の発生確率の定義

健康被害の発生確率  $r_i$  を以下のように定義する。

・Type I : BOD、重金属など

$$r_i = \begin{cases} f_i C_i & (C \geq NOEL) \\ 0 & (C < NOEL) \end{cases} \quad (2.1)$$

・Type II : 発がん物質、大腸菌など

$$r_i = f_i C_i \quad (2.2)$$

ここで、 $C_i$  は水中物質の濃度、 $f_i$  は水中物質濃度  $C_i$  の係数、 $i$  は水質項目とする。水質について、一般の化学物質では、用量を低下させると毒性も低下し、ある用量以下では毒性が 0 になる。この毒性がみられなかった最大用量として、最大無作用量 (NOEL : no observable effect level) を用いた。

つぎに、上記で求めた健康被害の発生確率  $r_i$  の合計を  $R$  とした。

### ②新たな水ストレス度の算出方法

水環境を考慮した新たな水ストレス指標の算出方法を提案するにあたり、従来の水ストレス度  $PWA$  を用いて算出する (式 2.1)。この  $PWA$  に  $1-R$  を乗じ、水ストレスに関して、水環境要素を組み込んだ新たな水ストレス環境インデックス  $PWA-Q$  を提案した。 $PWA-Q$  を人口の多いインド、マレーシア、タイの河川について適用し、日本との比較を行った。

### (3) 河川流量の推定 :

IFAS を用いて、タイのチャオプラヤ川上流域（ピン川、ワン川）の 2 つの流域で解析を行った。その際、流出解析の精度を高めるために衛星雨量データ (GSMap (Global Satellite Mapping of Precipitation)) を GSMap-IF (ver. 2) を用いて補正した。

また、物質移動に影響を与える河川流出量の推定に関しては、従来までの、降雨を入力条件として河川流量を推定する水文流出タイプの物理モデルではなく、パラメタリゼーションによる二つの手法を提案した。一つは、reverse routing 手法を用いた逆解析モデル、もう一つは、ニューラルネットワーク (NN) 手法に学習データの補正を行う機械学習アルゴリズム SMOTER (synthetic minority oversampling technique for regression) を組み合わせたモデルである。

### (4) 新たな水環境指標としてのマイクロプラスチック・微細マイクロプラスチックの適用

プラスチック問題が新たな水環境問題として世界的に注目されたこともあり、水環境インデックスにかかる新たな候補として取り上げることとし、河川および沿岸海域における現地調査を実施し、分析方法の検討を行った。具体的には、香川県高松市を流れる 2 級河川の詰田川水系の御坊川 (流域面積 18 km<sup>2</sup>) の河川水を 2019 年 5 月 16 日、8 月 26 日に、新川水系 (131.9 km<sup>2</sup>) の新川と春日川において 2019 年 6 月 10 日に採水した。また、2019 年 10 月 25 日に御坊川において、出水時に調査を行った。さらに、同年 9 月 19 日に上記河川が合流した河口域の 4 地点において採水を行った。マイクロプラスチックや 300 μm 以下の微細プラスチックの分析手法は、まだ、十分に確立されていないことから様々な検討を行った。

また、赤外スペクトルの分布特性を利用して、プラスチック (本研究では、ポリエチレン PE) の劣化指標を定式化し、劣化度  $DL$  (Degradation Level) を新たな水環境インデックスとして提案できないか検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 主な成果

#### ①流域内都市人口を用いた水ストレスの提案

イスラエルを対象とした結果、都市毎に水ストレス度を算出することにより、国単位で算出した結果と比べて、水ストレス度が約 1.4~5.6 倍に高まる結果が得られ、都市流域内人口密度の有用性が示された (北村ら、2018)。

#### ②水環境を考慮した水ストレス指標の提案

水環境を考慮した水ストレス水環境インデックス  $PWA-Q$  を用いることで、水質悪化により従来の水量だけの水ストレス指標  $PWA$  よりも値が小さくなる (水ストレス度が高まる) 結果が得られた。日本では、河川水質が世界の河川と比較して良好であり、どの河川の水ストレス度をみてもあまり大きな変化がなかった。一方、世界の河川では、インドの河川水質は糞便性大腸菌群と重金属の値が水質基準値よりも大きく超えており、本研究の中で最も多く水ストレス度の値に影響が出ていた。また、マレーシアでも、糞便性大腸菌群の値がそれぞれ水質基準値を大きく超えており、 $PWA-Q$  が低下した。

#### ③河川流量の推定

チャオプラヤ川上流における流出シミュレーションによるハイドログラフについて、GSMap-IF(ver. 2)による補正が最も精度が高い結果が得られた。また、IFASを用いた流出解析では、規模の大きなチャオプラヤ川上流域において衛星雨量の補正の効果がみられた。

逆解析モデルにより、ある地点の流量を既知とした場合に、上流においてどの程度の流量であれば下流側の流量を制御できるのか算定することができた。また、SMOTER アルゴリズムを使用することで、データ数の少ない河川出水時の特徴をより精度良く評価することができた。

#### ④新たな水環境指標としてのマイクロプラスチック・微細マイクロプラスチックの適用

高松市の河川・河口域に様々なマイクロプラスチックが存在することが確認された。種類はPE、PP、PS、PCL などがあり、計 8 種類が同定された。採取されたマイクロプラスチック 37 個のうち、最も個数が多い種類は 22 個採取された PE であった。さらに、マイクロプラスチックの個数濃度は、河口域が河川よりも多こと、出水時には河川を流れるマイクロプラスチックの個数と種類が増えること、泥にもマイクロプラスチックが含まれること、採取されたマイクロプラスチックの中でも劣化しているものが多く占めていることが明らかとなった。そこで、PE (計 24 サンプル) について劣化度を算出した。劣化度 DL を用いることで、PE の劣化状態を定量的に把握できる結果が示された。また、顕微 FTIR を用いて 100  $\mu\text{m}$  以下の懸濁物の分析が可能であることが確認された。

#### (2) 得られた成果の国内外における位置づけ、インパクト

海外における河川水質は、日本と比較して悪化しやすいことから、単に量として水ストレスを考慮するのではなく、実際に利用可能な水量として、今回提案した水ストレス環境インデックス *PWA-Q* は大いに有効な指標となる。とくに、都市や発展途上の国外においては、*PWA-Q* を用いるインパクトは大きいといえる。

河川におけるマイクロプラスチック汚染の実情は十分に理解されていないことから、貴重な観測データを得ることができた。

#### (3) 今後の展望

流出解析のパラメタリゼーションは、流量推定手法の提案に留まったが、今後は、様々な手法を検討し、物質輸送モデルへの実装を行うことが必要である。また、水環境物質の輸送と河川流出量との関係性をリンクさせて研究を行う必要がある。そのことにより、新たな水ストレス環境インデックス *PWA-Q* を動的に取り扱うことができる。

#### (4) 当初予期していなかったことが起きたことにより得られた新たな知見

2019 年の大阪での G20 サミットにおいて、マイクロプラスチックの緊急的課題として取り上げられ、その後、幅広くプラスチック汚染問題が取り上げられるようになった。プラスチック問題という新たな水環境問題が世界的に注目されたこともあり、本研究でも、水環境インデックスにかかる候補として取り上げることとし、河川および沿岸海域における現地調査を実施し、分析方法の検討やプラスチックの特徴を明らかにすることができた。また、プラスチック (PE) の劣化程度を定式化して、新たな水環境インデックスを提案することにつながった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>北村友観・石塚正秀・紀伊雅敦・林礼美・津田守正・中村一樹                   | 4. 巻<br>72                |
| 2. 論文標題<br>都市流域内人口密度を用いた世界の都市における水ストレス度の算定 イスラエルにおける事例解析 | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>土木学会論文集D3 (土木計画学)                              | 6. 最初と最後の頁<br>I_129-I_136 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2208/jscejipm.73.I_129    | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Tsuda, M., Ishizuka, M.   | 4. 巻<br>76                |
| 2. 論文標題<br>Flexible reservoir flood control using a reverse routing method with a kinematic wave equation | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)                    | 6. 最初と最後の頁<br>I_847-I_852 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Okazaki, Y., Okazaki, S., Kajitani, Y., Ishizuka, M.                         | 4. 巻<br>76                |
| 2. 論文標題<br>Regression of imbalanced river discharge data using resampling technique    | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering) | 6. 最初と最後の頁<br>I_133-I_138 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>北村友観、石塚正秀、紀伊雅敦、林礼実、津田守正、中村一樹                    |
| 2. 発表標題<br>都市流域内人口密度を用いた世界の都市における水ストレス度の算定 -イスラエルにおける事例解析- |
| 3. 学会等名<br>平成29年度土木学会四国支部第23回技術研究発表会                       |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>北村友観、石塚正秀、紀伊雅敦、林礼実、津田守正、中村一樹                        |
| 2. 発表標題<br>都市流域内人口密度を用いた都市における水ストレス度の算定手法の開発 - イスラエルにおける事例解析 - |
| 3. 学会等名<br>土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会2017                            |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>北村友観、石塚正秀、紀伊雅敦、林礼実、津田守正、中村一樹       |
| 2. 発表標題<br>都市流域内人口密度を用いたイスラエルの都市における水ストレス度の算定 |
| 3. 学会等名<br>平成29年度全国大会土木学会第72回年次学術講演会          |
| 4. 発表年<br>2017年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>森岡礼菜・石塚正秀・津田守正                      |
| 2. 発表標題<br>地上雨量データを用いたGSMapの補正と流出モデルへの適用に関する研究 |
| 3. 学会等名<br>土木学会第73回年次学術講演会                     |
| 4. 発表年<br>2018年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石橋日菜子・宮本えりか・柴尾葵・吉原航平・石塚正秀                 |
| 2. 発表標題<br>ニューラルネットワークを用いた土器川流域における河川流量予測の入力データ項目の検討 |
| 3. 学会等名<br>令和元年度土木学会四国支部第25回技術研究発表会                  |
| 4. 発表年<br>2019年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>吉原航平、石塚正秀、上村忍、西岡彩美              |
| 2. 発表標題<br>マイクロプラスチックの分析方法と高松市を流れる河川における特徴 |
| 3. 学会等名<br>土木学会水工学委員会環境水理部会研究集会2019        |
| 4. 発表年<br>2019年                            |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>西川遼、金光敦弘、川西康喜、中川あみ、石塚正秀    |
| 2. 発表標題<br>RR1モデルを用いた財田川の降雨流出シミュレーション |
| 3. 学会等名<br>令和2年度土木学会四国支部第26回技術研究発表会   |
| 4. 発表年<br>2020年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>吉原航平、石塚正秀、上村忍、西岡彩美、金光敦弘、一見和彦、山口一岩、末永慶寛、多田邦尚 |
| 2. 発表標題<br>高松市の河川および河口域におけるマイクロプラスチックの特徴に関する基礎的研究      |
| 3. 学会等名<br>令和2年度土木学会四国支部第26回技術研究発表会                    |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石塚正秀                          |
| 2. 発表標題<br>高松市の河川を流れるマイクロプラスチックの調査と水環境課題 |
| 3. 学会等名<br>海洋科学の未来と減災科学シンポジウム            |
| 4. 発表年<br>2020年                          |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|