

## 日本河川における統一指標の適用と感度分析

寺本智子<sup>(1)</sup>・山敷庸亮・寶馨

(1) 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

水質計測を行う目的は国や地域によってさまざまである。そのため計測している水質項目や頻度、さらその計測方法などが異なっているため国際河川間の客観的な水質の比較を行うことは難しい。国をまたぐ大陸河川が地球上には多く存在しているが、国によって異なった項目を用いているために水質比較を単純に行うことは難しい。特定の水質基準などの指標を元に統一指標で表すことによって水質を客観的に比較ができれば、より効率的な河川政策を行うことが期待できる。現在、国連環境計画地球監査システム(GEMS/Water)では統一指標の開発が試みられている。しかし開発されている指標は濃度基準の指標であるため汚濁の程度が反映されないという欠点もある。本研究では、汚濁負荷量を算出し、現在策定されている濃度基準の比較から現在の指標の改善点を明らかにする。

**キーワード:** GEMS/Water, 水質, 水質指標

### 1. はじめに

国連教育科学文化機関 (UNESCO) の World Water Resources at the beginning of the 21st Century'によると人口増加によって水需要が増加するといわれている<sup>1)</sup>。一方、気候変動による水資源の偏在化、そして水質汚濁による水供給量の減少が今以上に深刻になると推測されていて、今後水の需要量と供給量の不均衡が生じ、世界の水問題が危機的な状況となる可能性が高いといわれている。

このような将来の水の危機に備えるために質的なアセスメントを行うことのできる統一した指標が必要であると考え、複数の指標に対し統計分析を行い1つの統一指標の算出を行った。水質状況を統一した指標で表すことで、複数の指標で水質状況を比較するよりも統括的・明示的に水質状況を把握することが出来ることが期待される。

特に本研究の対象としている日本では、毎年BODで河川の汚濁ランキングを行っているが、河川汚濁を単一の指標だけで評価するのは難しく、特にBODで水質を評価することは、アンモニアなどの窒素化合物の酸化による酸素消費も含まれること、そして難分解性有機物は対象外であるといった問題がある

と提起されている。

さらには河川管理を効果的に行うには住民の参加が必要不可欠であるが、住民と連携できるような分かりやすい指標がないとも言われている。このような状況に対し、においや見た目などを用いて水質を主観的に表す試みが行われている。しかし統計的な解析方法を用いて複数の指標を単一の指標で客観的に表すといった試みは未だ行われていない。

そこで本研究では、日本の河川に対し現在開発中の全球統一指標 (WQI) を適用し、WQIが日本の水質汚濁状況を反映していることを示し指標の有効性を確かめることを第一の目的とする。

そこで本研究では特に水質汚濁の著しかったといわれている1975年の河川水質に対しWQIを算出し水質の評価を行った。

一方、環境変化により基準を超えた指標の数、基準を超えた値の総数、またその基準を超えた値と基準値の幅が変化した場合に、統一指標がどの程度の影響があるのかを定量化を行っておらず、基準を超えた指標の数、基準を超えた値の総数、またその基準を超えた値と基準値の幅に関して統一指標がどのように変動するか判断するのが難しい。本研究では、求められた統一指標で用いた各水質パラメーターに

対し感度分析を行い、変動の幅がどのように統一指標に影響するのかが推測することを第二の目的とする。これによって、不確実な事象に対して、統一指標がどのくらい変動するのが推測することができ、これにより、土地利用変化、人口変化などの外的要因が統一指標に影響するのかが判断できるようになることが期待できる。

## 2. 研究方法

本研究では、日本の河川において国連で開発されている統一指標算出を適用し、河川の水質の評価を行った。本章では、開発途中の統一指標の算出方法を記す。

### 2.1 全球統一指標(WQI)

WQIは国連環境計画 GEMS/Water で開発されている水質の評価を行うための統一指標である。複数の水質項目を設定した基準（例えば WHO 水質基準）に対して変動値の項目数・頻度・幅を統計的に解析し、一つ指標にしたもので、多項目を総合した水質汚濁の程度が客観的・直観的に明示されることができることがこの指標の特徴である。

### 2.2 全球統一指標 (WQI) の算出

正確な統一指標を算出するためには、WQIの算出をする前に基準の選択・適切な水質項目をえらばなければ、ならないために、最初に基準、水質項目の抽出を行い、最後にWQI算出を行う。

はじめに、比較対象となる水質基準を決める。本研究では、ほぼすべての水質項目に対し、基準を設定しているWHO飲料水基準を用いた。Table 1はWHO飲料水基準とEU, アメリカ, そして日本における水質基準を比較したものである。

次に水質項目・水質地点・対象年度の選択方法を行う。

これは指標算出するための水質項目を選択することで自動的に決めることができる。

この研究では、世界の水質測定項目の20%が計測している水質項目をWQIの算出に使用するパラメータとした。

また算出に使用する水質項目数や水質測定頻度に関しては、少なすぎると算出結果が高くなり、正確な結果が出せないという特性から、4 By 4ルールという基準を満たしたものを算出に用いる水質項目とした。4 By 4ルールとは、1年間に、最低4つの水質

Table 1 Comparison of Water Quality Standards

	WHO	EU	USA EPA	Japan
アンモニア	1.5mg/L	0.5mg/L		
塩素イオン	250mg/L	200mg/L	250mg/L	200mg/L
鉄	0.3mg/L	0.2mg/L	0.3mg/L	0.3mg/L
鉛	0.01/mg/L	0.02mg/L	0.015mg/L	0.1mg/L
ヒ素	0.01mg/L	0.01mg/L	0.05mg/L	0.01mg/L
銅	2.0mg/l	2.0mg/L	1.3mg/L	1.0mg/L

項目を測定し、さらに、その項目の測定回数が1年間に最低4回あるというものである。また、WHO飲料水基準では、水質測定項目を“許容”、“健康”、“微生物”のカテゴリに分類している。このカテゴリ分類を利用し、WQIだけでなく“許容WQI(以下AWQI)”、“健康WQI(以下HWQI)”のといった目的に応じた統一指標の算出も行うことができる。

算出方法は、選択した水質項目に対し、その水質項目の基準とを比較し、比較した結果を統計分析し、分析結果を足し合わせ、WQIを算出する。

その算出式を(1)に示す

$$WQI = 100 - \sqrt{\frac{(F_1)^2 + (F_2)^2 + (F_3)^2}{3}} \quad (1)$$

この数式におけるF1は基準を超えた水質項目の割合を表し、(2)より求めることができる。

$$F_1 = \left( \frac{\text{基準を超えた水質項目数}}{\text{総水質項目数}} \right) \times 100 \quad (2)$$

またF2は、基準を超えた水質計測数の割合を示し(3)より求める。

$$F_2 = \left( \frac{\text{基準を超えた計測数}}{\text{総計測数}} \right) \times 100 \quad (3)$$

最後にF3は、基準がどのくらい超えているかを表し、まず基準をこえた計測値に対してどのくらい基準値を超えているか(振幅; EX)を(4)より算出する。

$$EX = \frac{\text{計測値}}{\text{基準値}} - 1 \quad (4)$$

さらに求めたEXに対して正規化平方和(nse)を(5)より算出する。

$$nse = \frac{EX}{\text{総計測数}} \quad (5)$$

この正規化平方和を1から100までの範囲に(6)より変換する。これがF3である。

$$F_3 = \frac{nse}{0.01nse + 0.01} \quad (6)$$

### 2.3 評価方法

WQIは0から100までの数値で算出される。また、

求めた算出結果を Index value と比較し“Excellent (大変よい)”から“Poor (大変悪い)”までの5段階のスケールで評価する。

## 2.4 感度分析

感度分析は、F1からF3に対するWQIの感度分析と水質項目に対するWQIの感度分析の2種類を行った。

F1からF3までとWQIとの感度分析は、算出した各河川におけるF1からF3とWQIとの相関係数を算出するという方法で行った。なお、感度分析は統計ソフトRを用いた。

また、各水質項目とWQIとの感度分析は、WQI算出に使用した水質項目を一つ一つ取り除いたWQIの算出を行い、それとWQIとの相関関係を求めた。なお、この場合における相関が高いということは、その水質項目の感度が低いことを示し、逆に相関が低いことは、水質項目の感度が高いことを示している。

## 3. 結果

### 3.1 対象地域と対象年

2章で示した対象となる指標とルールにより、WQI算出対象となった河川は18河川である。また、1975年を研究対象の年とした。

### 3.2 1975年におけるWQI算出結果と感度分析

算出結果と水質を一つ一つ取り除いたWQI算出結果はTable 3である。

この表より、特に東京湾に流入している河川や大阪

湾に流入する河川のWQIが低いことが判明した。一方、北海道の河川はいずれも良好であると評価した。

### 3.3 感度分析

水質項目を統計解析し統一指標で表す時とすると、まず基準を超えた項目の割合であるF1、基準を超えた計測数のF2、基準をどのくらい超えたのかのF3が算出される。感度分析は、水質項目に関するものと統計解析して得られた値の2つを対象に行った。感度分析にあたり、まずF1からF3の値のWQIへの感度分析を行った。F1からF3までの感度を明らかにするために、まずF1からF3までの相関関係図を統計ソフトRで作成した。その結果をFig. 1に示す。

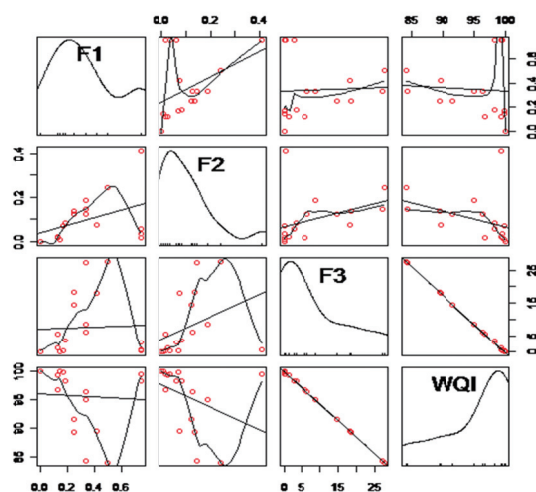


Fig. 1 Correlation between WQI and F1,F2 and F3

Table 2 Result of Water Quality Index and WQI which is removed one parameter

	WQI	生活環境の保全に関する環境基準項目	人の健康の保護に関する環境基準項目				富栄養化項目		
		ph	カドミウム	ヒ素	鉛	水銀	アンモニア	硝酸塩	亜硝酸塩
猪名川	84.0	82.3		83.0	83.1		84.1		
鶴見川	84.3	81.9		83.3	86.4	84.1	94.6	82.8	82.8
相模川	89.5	87.8	88.9	88.9	97.1		90.4	88.5	88.5
多摩川	91.6	90.1	91.0	91.0	92.8	91.4	96.3	90.7	90.7
揖保川	95.0	98.8		94.4	94.0		98.8	94.0	94.0
大和川	96.4	99.8	95.7	95.7	95.7	95.7	99.9		
釧路川	96.7	95.9							
石狩川	98.3	98.4			98.4				
円山川	98.3	98.3	98.2	98.2	98.2	98.2	99.9		
熊野川	99.3	99.1	99.2	99.2	99.2	99.2	100.0		
常呂川	99.4	99.5							
阿武隈川	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.5	99.5
名取川	99.6	99.5	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
淀川	99.8	100.0	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8		
十勝川	99.9	99.9			99.9				
岩木川	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
加古川	100.0	100.0		100.0	100.0		100.0	100.0	100.0
由良川	100.0	100.0		100.0	100.0				

表のグラフの横軸はWQIの値で、縦軸はそれぞれF1,F2,F3の値である。

この相関関係図から、特に F3 の感度が高いことが判明し、かつ F3 と WQI は逆相関関係であった。つまり F3 が高い値をとれば、WQI も低い値となり、また F3 が低い値をとれば WQI を用いた水質評価は高いものとなっている。一方、F1,ならびに F2 は WQI との相関がないことが判明した。

さらにピアソンの積率相関を用いて相関係数を求めた。結果を Table 3 に示す。

Table 3 Pearson product-moment correlation coefficient

	WQI	F1	F2	F3
WQI	1.00			
F1	-0.06	1.00		
F2	-0.38	0.42	1.00	
F3	-1.00	0.04	0.37	1.00

この結果、F3 と WQI の相関が-1となり、WQI と F3 が逆相関であることが示された。

しかし、F1、F2の感度は低いものであった。このことから頻度や水質項目の割合は WQI との相関はないと言える。

WQI は、たとえ統一指標であっても基準を超えた割合を正確に反映しており、WQI はこの段階では水質を反映しているといえることができる。

次に、各水質項目の感度分析を行った、算出した元の WQI から水質項目を1つ1つ抜き、その抜いた時の WQI を用いて感度分析を行った。その方法は水質項目を1つずつ抜いて算出した WQI と元の WQI との相関関係図を作成し、相関を示す。本研究では相関を示す水質指標をアンモニア、pH、鉛、ヒ素とする。その結果を Fig. 2 から Fig. 5 に示す。

相関関係図では横軸を WQI、縦軸を WQI とする。

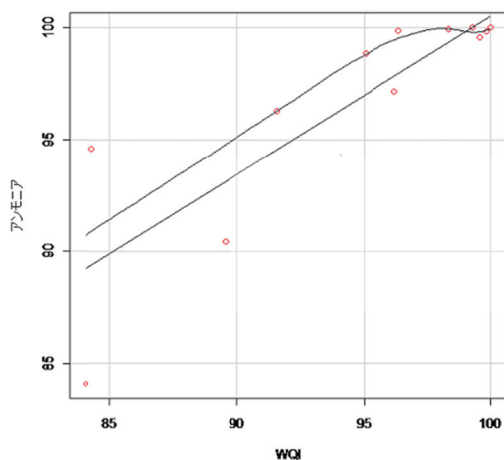


Fig. 2 Correlation between WQI and Ammonium

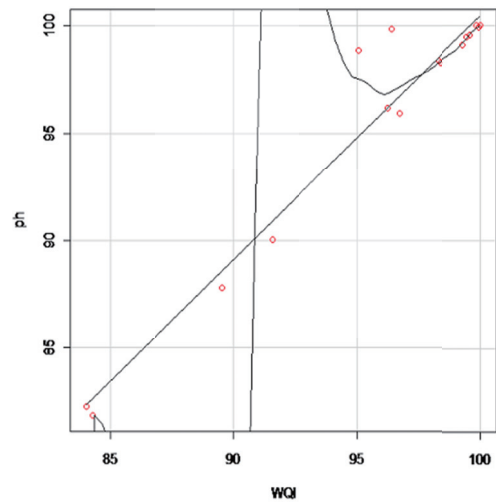


Fig. 3 Correlation between WQI and pH

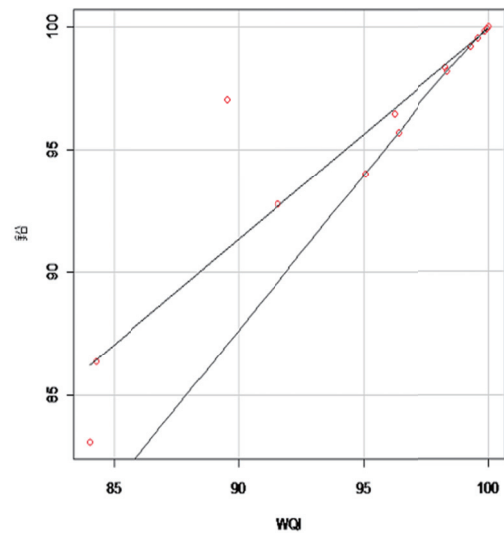


Fig.4 Correlation between pH and Lead

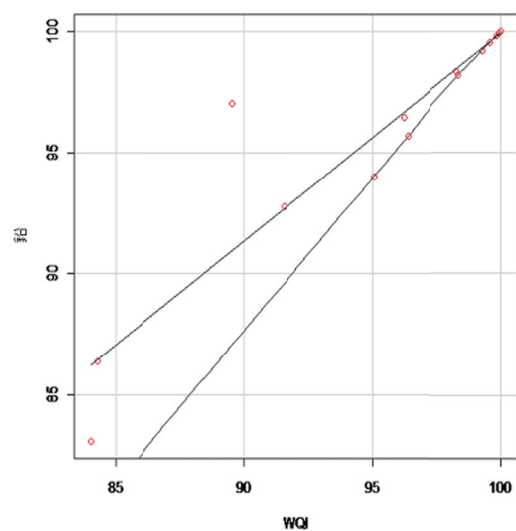


Fig.5 Correlation between WQI and Arsenic

Table 4 Pearson product-moment correlation coefficient

	ph	カドミウム	ヒ素	鉛	水銀	鉄
WQI	0.975	0.996	0.999	0.933	0.999	0.979
	亜鉛	銅	マンガン	アンモニア	硝酸塩	亜硝酸塩
WQI	0.997	0.995	0.996	0.862	0.992	0.992

アンモニア, pH, 鉛, ヒ素各水質項目の中ではヒ素が WQI と正相関を示した。

さらにピアソンの積率相関係数を算出した。その結果を Table6 に示す

相関関係図, ピアソンの相関係数より水質項目を抜いた WQI は強い正相関関係があることを示した。つまり正相関を示した水質項目は WQI に影響しない。このことは相関係数でも同じであると示された。

#### 4. 考察

WQI による水質評価に関して, 相関関係図やピアソンの相関係数より F1, F2, F3 のなかでも F3 が WQI と強い相関があることから基準を超過した割合が WQI に反映されている。このことより WQI を用いての水質評価は, 基準を超過した割合が WQI に反映されており, 有効であることが示された。しかし, 水質項目に関しては, さらなる議論があることが示された。

この結果に至った背景は, 水質項目の選定方法にあることがいえる。現在の WQI は, 水質項目が, 許容項目にあるか受容項目であるかの分類にとどまっている。今後は, 水質項目に関して現在決められている水質項目だけでなく, 窒素やリンなどの富栄養化に関する水質項目も含めた WQI や人体に影響のある水質項目を対象にした WQI を作成するために, さらに感度分析を行い, よりよい指標の作成に努め, 河川管理に生かすことができるような指標開発につなげたいと考えている。

#### 参考文献

- UNESCO IHP 1999. Summary of the Monograph “World Water Resources at the beginning of the 21st Century” (<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/summary/html/summary.html>)
- UNEP GEMS/Water Programme..2007. Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report (<http://www.gemswater.org/publications/pdfs/gwqi.pdf>)
- CCME. 2001. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, User’s manual. In: Canadian Environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Manitoba ([http://www.ccme.ca/assets/pdf/wqi\\_usermanualfctsh\\_t\\_e.pdf](http://www.ccme.ca/assets/pdf/wqi_usermanualfctsh_t_e.pdf))
- CCME. 2005. Canadian Environmental Sustainability Indicators. Freshwater Quality Indicator: Data Sources and Methods. Catalogue no. 16-256-XIE (<http://www.statcan.ca/bsolc/english/bsolc?catno=16-256-XIE#formatdisp>)
- UNEP GEMS/Water Programme. 2005. Workshop report: Development and use of global water quality indicators and indices. Vienna, Austria 4-6th May.2005. ([http://www.gemswater.org/publications/pdfs/indicators\\_workshop\\_report.pdf](http://www.gemswater.org/publications/pdfs/indicators_workshop_report.pdf))
- 新矢 将尚: “河川水質を取り巻く近年の動向” .

(論文受理日 : 2012年6月8日)

## **Water Quality Index and Sensitivity Analysis**

Tomoko TERAMOTO<sup>(1)</sup>, Yosuke YAMASHIKI and Kaoru TAKARA

(1) Graduate school of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

A composite index is developed to assess source water quality at global scale. In this study we have testified application of WQ indices developed by GEMS/Water Program. The approach for development was three-fold: (1) to select guidelines from the World Health Organization that are appropriate in assessing global water quality for human health, (2) to select variables that have an appropriate guideline and reasonable global coverage, and (3) to determine, on an annual basis .The developed index includes frequency and extent to which variables exceeded their respective WHO guidelines, at each individual monitoring station. In this study, we applied WQI to Japanese River. The result shows rivers in urban area have low WQI but rivers in Hokkaido or Tohoku area have high WQI. That means water quality of rivers in urban area is not good.

**Keywords:** GEMS/Water, Water quality, Global Water Quality Indices