

大陸河川の水質指標策定に関する研究 —ライン川を対象として—

寺本智子*・山敷庸亮・寶馨

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

国境をまたぐ大陸河川が地球上には数多く存在するが、それぞれの国によって異なった水質項目や観測手法を用いているために同一流域における水質状況を単純に比較することは困難である。特定の測定可能な水質項目を元に算出された統一指標を用いて水質を客観的かつ同一基準で比較ができれば、より効率的な河川管理政策を行うことが期待できる。現在、国連環境計画地球監視システム淡水部門(GEMS/Water)では地球規模で適用可能な統一水質指標(WQI)の開発が試みられている。本研究では、水質が大幅に改善されたとされるライン川流域に対してWQIを適用し、上流・中流・下流の水質比較をWQIで行いその利点や問題点について言及し、算出に用いた水質項目を個別に削除した際のWQIの感度変化を調べ今後の全球統一指標開発へとつなげる。

キーワード: GEMS/Water, Water quality, Global Water Quality Indices

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。

一方、水の供給面に関しては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。

しかしこのような状況に対して水の量的なアセスメントは十分に行われているが、質的なアセスメントは十分であるとは言えない。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指標が必要であると考えた。質的なアセスメントを行うためには、共通の水質項目の計測を行い、さらに統一した計測方法、同程度の頻度で水質を計測する必要がある。しかし現状は国ごとに水質測定項目や頻度が異なっており、国境をまたぐ大

陸河川において水質を比較することは容易ではない。そこで本研究では複数の指標に対し統計分析を行い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できるという利点がある。このことにより、河川管理政策を効率的に行うことができると期待される。

現在、GEMS/Waterではこの水質指標開発に取り組んでいるが、現在開発されている統一指標は環境変化による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いない。そのため、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。

そこで本研究では、ライン川を対象とし水質を統一指標で表し、また求められた統一指標を用いて各水質パラメータが統一指標にどのような影響を与え

るのかの感度分析を行い、変動の幅がどのように統一指標に影響するのかを推測することを目的とする。

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. 研究対象河川

本研究対象河川は、ヨーロッパのスイス・フランス・ドイツ・オランダを流れているライン川である。

ライン川は水運が発達し、その内陸水路と豊富な地下資源によってライン川流域の経済的、人口的に発展していった。しかし、ライン川の水質は流域の人口増加や工業化によって、1970年代にはヨーロッパの下水道と言われるほど水質は悪化していた。このような状況に対しライン川汚染防止国際委員会に関する協定(1963年)、ライン川塩化物汚染防止条約(1976年)、ライン川化学汚染防止条約(1976年)などの国境をこえた対策がおこなわれていたが、いずれも効果があったとはいえない。しかし、1986年にスイスのサンドスで起きた化学工場火災に伴う水質事故を契機に、ようやく国際委員会による本格的な取組みが始まり「ライン川行動計画」を立案した。その結果、1980年代の終わり頃から、ライン川の環境は衛生上良質な例に挙げられるまでに回復した。Fig.1は1979年から1994年までライン川におけるアンモニア汚濁負荷量である。

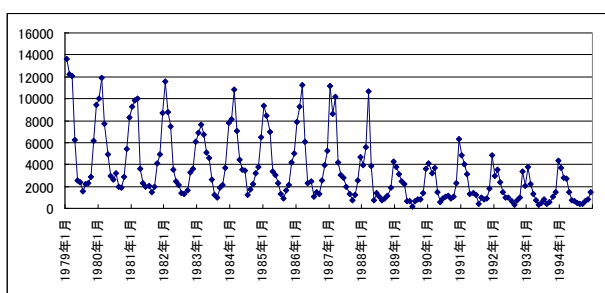


Fig. 1 Ammonia Flux in Rhine River

この表からライン川のアンモニア汚濁負荷量は季節的な変動があるが、1980年代後半にその量が急激に減少し、「ライン川行動計画」の効果があつたことがわかる。

本研究では、対象河川をライン川とし、その中から4か所をWQI算出のとして選んだ。その4地点は上流から、スイスのRekingen、ドイツのMaxau, Mainz, オ

ランダのGerman Frontierである。この対象地点4か所の位置をFig.2に示す。

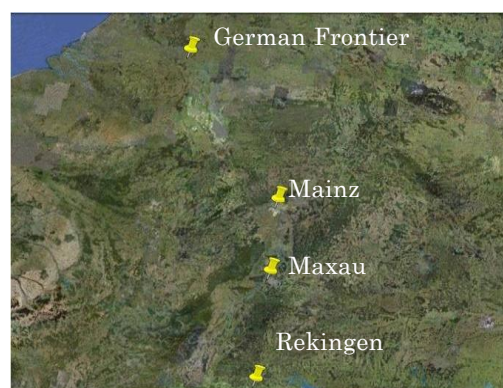


Fig.2 Study Area

3. 研究方法

3.1 国連環境計画地球監視システム淡水部門 (GEMS/Water)

GEMS/Waterの参加国は2004年時点で106カ国、水質調査地点は2800以上存在している。Fig.3は、GEMS/Waterの2004年度時点の水質調査地点を表している。

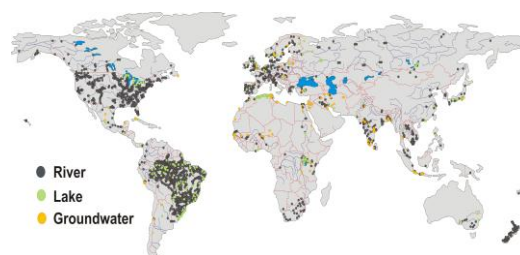


Fig.3 GEMS/WATER Global Network in 2004

また GEMS/Water の設置目的は、①新しい水質管理システムの構築のためにメンバー国の協力関係を築き、また既存のシステムを強化すること②メンバー国間あるいは国内における水質データの妥当性と比較可能性を向上させること、③残留性有機汚染物質による淡水水質汚染の発生と長期的動向を調査することである。

3.2 全球統一指標 (WQI) の算出

(1) Water Quality Index(WQI)とは

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。また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、一つの指標にしたもので、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) WQI算出方法

正確な統一指標を算出するためには、算出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。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。

Table.1 Comparison of WHO drinking water guidelines for selected parameters against guidelines from the European Union (EU), United States (USA EPA) and Japan

| | 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 |

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。

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の算出に使用する水質項目とした。その水質項目をTable.2に示す。

Table.2 Water quality Parameters measured in 20% of all countries

| | 受容性 | 健康 | 微生物 |
|-----|-----------|----|---------|
| 20% | アンモニウム態窒素 | | ヒ素 大腸菌群 |
| | 塩素イオン | | ホウ素 |
| | 鉄 | | カドミウム |
| | 硫酸イオン | | 鉛 |
| | ナトリウムイオン | | 銅 |
| | 亜鉛 | | フッ素 |
| | pH | | マンガン |
| | | | 水銀 |
| | | | 硝酸態窒素 |
| | | | 亜硝酸態窒素 |

WHO飲料水基準では、水質測定項目を“許容”, “健康”, “微生物”のカテゴリーに分類している。このカ

テゴリー分類を利用し、総合的な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。

はじめにAWQIとは、味覚やにおいなどに影響を及ぼす可能性のある水質項目を用いた指標で、“快,不快”を示す統一指標である。

つぎにHWQIは、人体に害を及ぼす可能性のある水質項目を用いた指標で、人体に影響のあるかないかを示す統一指標である。

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。

(3) 算出方法

選択した水質項目に対し、その水質項目の基準と比較し、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。その算出式は式(1)で与えられる。

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

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、式(2)で与えられる。

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

またF2は、基準を超えた水質計測数の割合を表し、式(3)で与えられる。

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

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)を算出する。その算出式は式(4)で与えられる。

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

さらに求めたEXに対して正規化平方和(nse)を算出する。式(5)で与えられる。

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

この正規化平方和を1から100までの範囲に変換したものがF3である。これは式(6)で与えられる。

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

(4) 評価方法

(3)の算出方法を適用し WQI を計算するとその値は 0 から 100 までの数値で算出される。この結果を評価方法と比較して水質の状況を把握する。

Table.3 Index Designation

| Designation | Index value | Description |
|-----------------|-------------|-------------------------|
| Excellent(大変よい) | 95-100 | すべての項目が環境基準内に存在している。 |
| Good(よい) | 80-94 | 望ましい状況である |
| Fair(普通) | 65-79 | 望ましい状況から、しばしば外れることがある程度 |
| Marginal(悪い) | 45-64 | 望ましい状況から、よく外れる |
| Poor(大変悪い) | 0-44 | 望ましい状況ではない |

WQI の評価方法は、95 から 100 までは“Excellent (大変よい) ”, 80 から 94 までは“Good (よい) ”65 から 79 までは“Fair (普通) ”, 45 から 64 までは“Marginal (悪い) ” 0 から 44 までは“Poor (大変悪い) ”までの 5 段階のスケールで評価する。Table.3 は、算出値と評価との対応表である。

4. 研究結果

4.1 研究対象の年と使用した水質項目

WQI算出基準より、1987年・1988年が研究対象の年となった。

Table4にWQI算出に使用した水質項目を示した。4地点では、アンモニア・塩素イオン・ナトリウム・硫酸塩・亜鉛を、またスイスのRekingenを除いた3地点では鉄を使用した。またTable4の●は基準値をこえた水質項目を表している。

Table4. Parameters used to calculate WQI in the Rhine River

| | アンモニア | 塩素イオン | ナトリウム | 硫酸塩 | 鉄 | 亜鉛 |
|-----------------|-------|-------|-------|-----|---|----|
| German Frontier | ● | ● | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Mainz | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ○ |
| Maxau | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ○ |
| Rekingen | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ |

4.2 算出結果

算出式を利用しライン川の4地点のWQIを算出した結果をTable.4に、またそれを折れ線グラフにしたものをFig.4に示す。

Table.5 The result of WQI in Rhine River

| | Rekingen | Maxau | Mainz | German Frontier |
|-------|----------|-------|-------|-----------------|
| 1987年 | 100.0 | 90.3 | 90.1 | 87.7 |
| 1988年 | 100.0 | 90.3 | 87.1 | 88.1 |

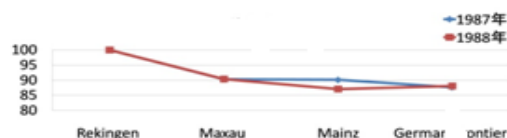


Fig.4 WQI comparison between upstream and downstream in Rhine River

統一指標(WQI)が低い下流では、アンモニア・塩素イオンが基準値を超え、中流の2地点では鉄のみが基準値を超えた。

ライン川の4つの地点における水質の状況は統一指標(WQI)で表すと、望ましい状況ということが分かる。また下流になるほどWQIが低下しているの、蒸留と比較して下流の水質の状況は悪いということがいえる。

5 感度分析

本研究では、Maxau,Mainz,German Frontierの3地点に対して感度分析を行った。

WQI算出に用いた水質指標を1つ1つ除き、WQIがどのような値になるかを算出し、どの要因がWQIに一番影響を与えている因子であるか分析した。この章では、各地点に対し感度分析を行った結果を示す。

5.1 Maxauにおける感度分析

この地点の各水質項目の水質測定回数、水質基準を超えた回数についてはTable.6に示す。上段は1987年におけるもので、下段は1988年におけるものである。

Table.6 Number of Parameters in Maxau

| 1987年 | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
|-------|-------|--------|----|-------|-----|----|
| 全測定回数 | 22 | 22 | 21 | 21 | 21 | 27 |
| 異常値の数 | | | 3 | | | |
| 1988年 | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
| 全測定回数 | 32 | 17 | 16 | 16 | 17 | 11 |
| 異常値の数 | | | 1 | | | |

Maxauにおいて年間計測回数はどの水質項目もほぼ同じである。また、基準値を超えた回数は、1987年と1988年を比べると減少したことが判明した。これらのデータを利用し、各水質項目が除いた場合のWQIを算出した結果がTable7である。

Table.7 Comparing Ammonia Removed WQI, Chloride removed WQI, Iron removed WQI Sodium Removed WQI, Sulfate Removed WQI, and Zinc removed WQI

| | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
|-------|-------|--------|-----|-------|-------|-------|
| 1987年 | 88.36 | 88.36 | 100 | 88.36 | 88.36 | 88.36 |
| 1988年 | 88.43 | 88.44 | 100 | 88.44 | 88.44 | 88.44 |

この地点におけるWQIは、1987年、1988年ともに90.3であった。

基準値を超えた鉄をWQI算出からのぞくとWQIが100となり、この地点におけるWQIと一番離れた数値になった。よって、この地点においては鉄がWQIに影響を与えていることが推測される。

また、F2がWQIに与えている影響を調べるためにアンモニアを除いた1988年のWQIとナトリウムを除いた1988年のWQIの比較を行うと、アンモニアを除いたWQIは88.43、ナトリウムを除いたWQIは88.44である。また、アンモニアの計測総数は32でナトリウムの計測回数の16と比べると2倍あったが、2つのWQIに大きな差はなかった。よってこの地点におけるF2がWQIへ与える影響はないことが推測できる。

5.2 Mainzにおける感度分析

この地点の各水質項目の水質測定回数、水質基準を超えた回数についてはTable.8に示す。上段は1987年におけるもので、下段は1988年におけるものである。

Table.8 Number of parameters in Mainz

| 1987年 | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
|-------|-------|--------|----|-------|-----|----|
| 全測定回数 | 53 | 53 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| 異常値の数 | | | 8 | | | |
| 1988年 | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
| 全測定回数 | 51 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 |
| 異常値の数 | | | 11 | | | |

Mainzでは、アンモニア・塩化物イオンの計測回数が他の4つの水質項目と比べ、2倍計測されていたことが分かった。

これらのデータを利用し、各水質項目が除いた場合のWQIを算出した結果がTable.9である。

Table.9 Comparing Ammonia Removed WQI, Chloride removed WQI, Iron removed WQI Sodium Removed WQI, Sulfate Removed WQI, and Zinc removed WQI

| | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
|-------|-------|--------|-----|-------|-------|-------|
| 1987年 | 88.06 | 88.06 | 100 | 88.17 | 88.17 | 88.17 |
| 1988年 | 83.61 | 84.80 | 100 | 84.80 | 84.80 | 84.80 |

この地点におけるWQIは、1987年では90.1で、1988年では87.1であった。

基準値を超えた鉄をWQI算出からのぞくとWQIが100となり、この地点におけるWQIと一番離れた数値になった。よって、この地点においては鉄がWQIに影響を与えていることが推測される。

また、F2がWQIに与えている影響を調べるためにアンモニアを除いた1987年のWQIとナトリウムを除いた1987年のWQIの比較を行うと、アンモニアを除

いたWQIは88.06、ナトリウムを除いたWQIは88.17となった。また、アンモニアの計測総数は53でナトリウムの計測回数の26と比べると約2倍あったが、2つのWQIには、約1の差が出た。よってこの地点におけるF2がWQIへ与える影響Mainzより大きいことが推測できる。

5.3 German Frontierにおける感度分析

この地点では1988年に対しての感度分析は4 By 4ルールのために行うことができなかった。この地点の各水質項目の水質測定回数、水質基準を超えた回数についてはTable 10に示す

Table.10 Number of parameters in German Frontier

| 1987年 | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
|-------|-------|--------|----|-------|-----|----|
| 全測定回数 | 52 | 52 | 26 | 13 | 10 | 13 |
| 異常値の数 | 21 | | | | | |

German Frontierでは、アンモニア・塩化物イオンの計測回数が鉄の計測回数と比較すると2倍計測され、またナトリウム・硫酸塩・亜鉛と比較すると3倍計測されていた。

これらのデータを利用し、各水質項目が除いた場合のWQIを算出した結果がTable.11である

この地点におけるWQIは、1987年では87.7であ

Table.11 Ammonia Removed WQI, Chloride removed WQI, Iron removed WQI Sodium Removed WQI, Sulfate Removed WQI, and Zinc removed WQI

| | アンモニア | 塩化物イオン | 鉄 | ナトリウム | 硫酸塩 | 亜鉛 |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 1987年 | 100 | 81.69 | 82.73 | 82.42 | 82.67 | 82.67 |

った。

基準値を超えたアンモニアをWQI算出からのぞくとWQIが100となり、この地点におけるWQIと一番離れた数値になった。よって、この地点においてはアンモニアがWQIに影響を与えていることが推測される。

また、F2がWQIに与えている影響を調べるために塩化物イオンを除いた1987年のWQIと、鉄を除いた1987年のWQIさらにナトリウムを除いた1987年のWQIの比較を行うと、塩化物イオンを除いたWQIは81.69、鉄を除いたWQIは82.73、さらにナトリウムを除いたWQIは88.17となった。よってこの地点におけるF2がWQIへ与える影響は、計測回数が少なくなるほどWQIが低下することが推測できる。

6. 考察

はじめに水質基準をこえた指標について考察すると、中流のドイツにある2地点のMaxau, Mainzでは、鉄が基準をこえていた。これはライン川の水運を利用した鉄鋼業が河川周辺に立地していたため、工業排水から鉄の溶出が起こっているのではないかと推測される。

また、下流のオランダのGerman Frontierでは、アンモニアが基準を超えていたが、これは同流域で盛んに行なわれている畜産業からの排泄物が原因であると推定される。ライン川流域においては、特にオランダにおいて、畜産排水の規制は厳しくなっているが、その広大な面積故、地下水の硝酸汚染が問題になっている。

上流と下流を比較すると基準を超える水質項目の種類が異なっているが、下流に行くにしたがって基準を超える回数が増加していることが分かった。この基準値を超えている水質項目、またその測定回数などが統一指標(WQI)に反映されており、統一指標(WQI)は水質を客観的・直観的に明示するのに有効な指標であるといえる。

7. おわりに

WQI算出に関しては、(1)汚濁の総量基準ではなく濃度基準であることで実際の汚濁を正確に反映していない。(2)4 By 4ルールによって、算出できる地点や年が限られてしまい河川の汚濁の経年変化をとらえることができない、(3)水質状況を表すのに多くの国で使われているBOD, COD, DO, SSなどがWQI算出のための水質項目に含まれていないなどの問題がある。この問題を解決し、水質状況を客観的に表すことのできる統一指標作成を行いたいと考えている。

謝 辞

Development of Water Quality Indices for Continental River Basin

Tomoko Teramoto*, Yosuke YAMASHIKI, and Kaoru TAKARA

* 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

本稿作成にあたり、GEMS/Waterに蓄積されている貴重な水質データ使用することができた。データ提供に協力していただいたGEMS/WaterのDr. Richard Roberts, Ms, Kelly Hodgsonに厚く御礼申し上げる。

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_usermanualfctsht_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)

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.

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