

## 播磨灘の栄養塩管理に資する河川流入負荷量推計モデルの開発

古賀 佑太郎<sup>1</sup> 鈴木 元治<sup>1</sup> 森 正憲<sup>2</sup> 嶋寺 光<sup>2</sup>

<sup>1</sup>兵庫県環境研究センター 水環境科 (〒654-0037 神戸市須磨区行平町 3-1-18)

<sup>2</sup>大阪大学工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

### Development of an influent load estimation model for contributing to nutrient management of Harima Sea

Yutaro KOGA<sup>1</sup>, Motoharu SUZUKI<sup>1</sup>,  
Masanori MORI<sup>2</sup> and Hikari SHIMADERA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Water Environment Division, Hyogo Prefectural Institute of Environmental Sciences,  
3-1-18, Yukihiro-cho, Suma-ku, Kobe, Hyogo 654-0037, Japan

<sup>2</sup>Graduate School of Engineering, Osaka University 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

兵庫県南部に面する瀬戸内海の播磨灘においては、近年窒素濃度の低下によるノリの色落ちが頻発するほか、漁獲量の減少も貧栄養化が一因であるとの指摘があるなど、栄養塩類の挙動について関心が高まっている。そこで、本研究では兵庫県内の一級河川である加古川において播磨灘へ流入する窒素負荷量を把握するため、平水時・降雨時両面の評価が可能な水質モデルを構築し、平水時の常時監視データ及び降雨時の独自調査データを用い、窒素動態を解析した。構築した水文・水質モデルは、河川流量を良好に再現した。窒素濃度については、既報の窒素面源負荷原単位を用いた場合、過大評価となったが、大気沈着量及び山林の窒素消費量を考慮した面源負荷原単位を設定したところ、再現性が改善された。

#### I はじめに

瀬戸内海では、水質汚濁防止法や瀬戸内海環境保全特別措置法等の規制や対策により、陸域からの汚濁負荷量が削減され、水質が改善された。一方で、瀬戸内海の一部である播磨灘においては、近年窒素濃度の低下によるノリの色落ちが頻発するほか、漁獲量が減少している。これらは貧栄養化が原因の一つであるとの指摘があり<sup>1)</sup>、栄養塩類の動態についてより関心が高まっている。

一般的に、大気中や地表面の窒素、りんは降雨により地下水や河川に流入することが知られている<sup>2)</sup>。しかし、各自治体等で蓄積されている常時監視データは平水時を対象としており、降雨時のデータは少ない。また、降雨時の栄養塩流出負荷量は、当該降雨イベントによる負荷が、当該降雨

イベントの積算降水量や降雨強度に加えて、先行降雨や先行晴天期間の影響を受ける特性を有しており<sup>3)</sup>、当該降雨イベント中の期間のみを調査対象としても栄養塩流出負荷量を詳細に解析することができない。そこで、本研究では兵庫県内の一級河川である加古川において播磨灘へ流入する窒素負荷量を把握するため、各自治体等で蓄積されている平水時の常時監視データに加え、独自で調査した降雨時のデータを利用し、先行降雨等の影響を考慮した平水時・降雨時両面の評価が可能な水質モデルを構築した。本モデルの計算結果を用いて、降雨時における陸域の面源からの流出負荷量の影響を評価し、播磨灘における栄養塩類の適正な管理方策に繋がる知見を得ることを目的とした。

## II 方法

### 1. 水文・水質モデル

#### 1.1 モデル概要

モデルの概要をFig. 1に示す. 水文モデルにて, 流域界・水路網データ, 土地利用データ及び気象データの3種類のデータを入力し, 流量を計算した. 続いて水質モデルにて, 全窒素の汚染源である面源負荷量, 事業所負荷量, 下水処理場負荷量及び流量を入力し, 窒素移動量を計算した.

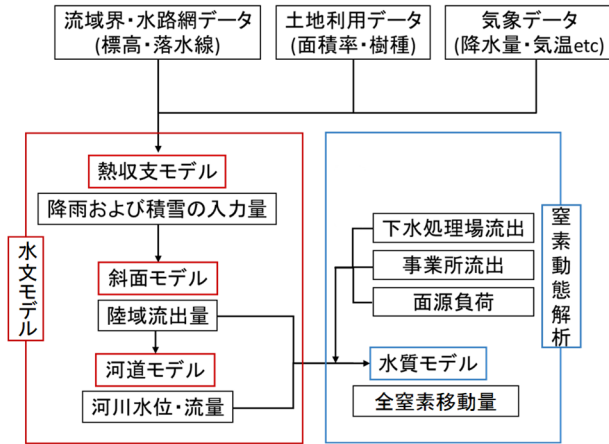


Fig. 1 Model overview.

#### 1.2 水文モデル

本研究で用いる水文モデル概念図をFig. 2に示す<sup>4)</sup>. 対象領域の地表面を網目状に分割し, 計算格子を作成した. 各計算格子に対して鉛直方向に地上からAからDまでの4層の陸域と河道を設定した. 地表面およびA層について, 畑, 山林, 市街地及び水田の4種類の土地利用を考慮し, 各面積率に応じて土地利用特性を考慮する. D層については地下水脈の再現を仮定した.

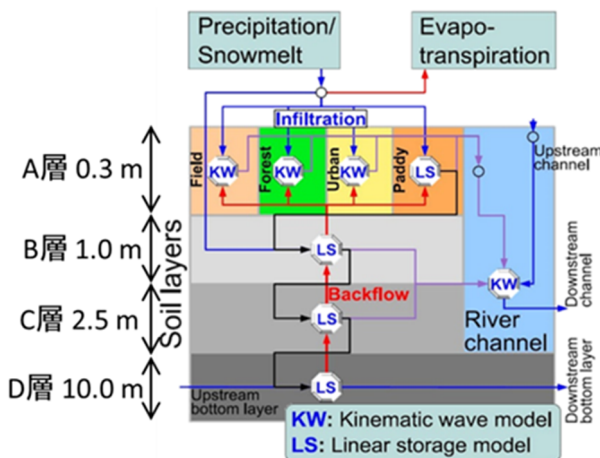


Fig. 2 Model conceptual diagram.

#### 1.3 窒素動態解析モデル

全窒素解析モデルでは, 全窒素を対象として, 移流, 拡散及び斜面からの横流入負荷を考慮し, 式(1)で表される質量保存式に基づき, 河川中濃度を算出した. ここで, 横流入負荷量については, 土地利用ごとの全窒素の汚濁負荷原単位に基づき面源負荷を考え, そこに事業所及び下水処理場の点源負荷を考慮し式(1), (2)にて算出した.

$$\frac{\partial}{\partial t}(A_r C_{TN}) + \frac{\partial}{\partial x}(A_r U C_{TN}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_r D_{TN} \frac{\partial C_{TN}}{\partial x} \right) + f_{TN} \quad \text{式(1)}$$

$$f_{TN} = \frac{\sum_l R_s m_{TNl} A_l}{P} + C_S Q_S + C_{PS} Q_{PS} \quad \text{式(2)}$$

$A_r$ : 河道断面積[m<sup>2</sup>],  $R_s$ : 降水強度[m s<sup>-1</sup>]

$C_{TN}$ : 河川中全窒素濃度[g m<sup>-3</sup>]

$U$ : 断面平均流速[m s<sup>-1</sup>],  $D_{TN}$ : 拡散係数[m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>]

$f_{TN}$ : 斜面からの横流入負荷量[g m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>]

$m_{TNl}$ : 面源汚濁負荷原単位[g m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>]

$A_l$ : 土地利用ごとの流域面積[m<sup>2</sup>]

$P$ : 年間降水量[m y<sup>-1</sup>],  $bl$ : 河道長[m]

$C_S$ : 日別下水処理場放出濃度[g m<sup>-3</sup>]

$Q_{PS}$ : 事業所放出流量[m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>]

$Q_S$ : 日別下水処理場放出流量[m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>]

$C_{PS}$ : 事業所放出濃度[g m<sup>-3</sup>]

#### 1.4 メッシュデータ

##### 1.4.1 標高

流域内の水の流れる方向を決定するために, 計算格子に隣接する4方向のメッシュのうち, 最も標高の低いメッシュを国土交通省の標高データ<sup>5)</sup>より決定し, 下流メッシュとした.

##### 1.4.2 土地利用面積率

各メッシュに土地利用面積率を, 各土地利用には面源負荷原単位<sup>5)</sup>を設定し, 原単位に対して(降水強度/年間降水量)の比率で窒素流出を仮定した.

##### 1.4.3 樹種

各メッシュに常緑針葉樹, 落葉広葉樹及びその他の3種の優先樹種データ<sup>6)</sup>を設定した.

##### 1.4.4 気象

各メッシュの最近傍の気象庁観測所のデータ<sup>7)</sup>を参照した. また, 気温と降水量に関しては高度差による補正をした.

##### 1.4.5 点源負荷

各メッシュに存在する下水処理場排水及び事業場排水の流量及び窒素濃度を入力した.

## 2. 計算条件

### 2.1 計算領域と計算期間

計算領域は Fig. 3 に示す加古川流域全域とし、流域全体を標準地域メッシュに分割し、1852 の計算格子を設定した。計算期間は降雨時の調査を実施した 2015 年の 1 年間とした。

### 2.2 発生源データ

加古川流域の土地利用割合を Table 1 に示す。流域北部から東部にかけて山林が多く、中流域には田畑が多く、河口付近には市街地が集中していた。

本モデルに使用した面源負荷原単位を Table 2 に示す。窒素濃度の計算条件として、流域別下水道整備総合計画調査の平均値<sup>8)</sup>による面源負荷原単位 (AV) 及び大気沈着<sup>9)</sup>・山林の窒素消費<sup>10)</sup>を考慮した面源負荷原単位 (AD) を設定した。

点源からの流出は、加古川水系に排水する下水処理場及び事業場の窒素濃度及び流量を使用した。下水処理場は日平均値または月平均値を使用し、事業場は、水質汚濁防止法に基づく総量規制対象事業場に係る事業場の届出値を用いた。点源の年間窒素負荷量を Table 3 に示す。

### 3. 降雨時の実測データ

本モデルの計算値と比較する全窒素濃度の実測データは、降雨時は独自で実施した調査データ<sup>11)</sup>を使用し、平水時は常時監視データ<sup>12)</sup>を使用した。降雨時の調査は Table 4 に示す 3 回の降雨イベントにおいて、降雨後に上流より採水し（流域調査）、St. 6 では降雨時に自動採水器により 2 時間おきに計 12 回採水（経時調査）を実施した (Fig. 3)。

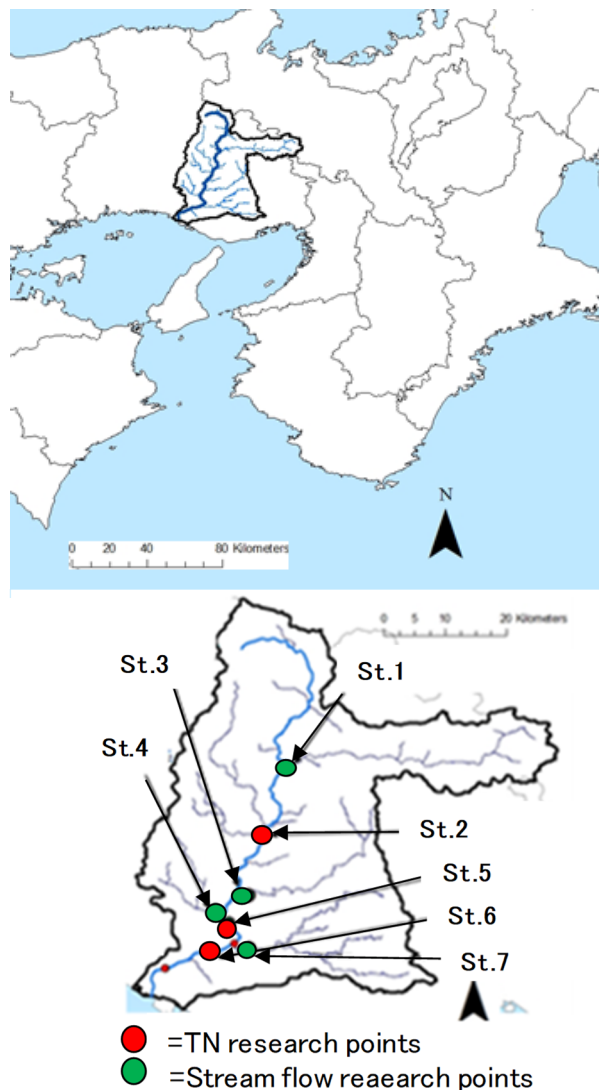


Fig. 3 Modeling domain with locations of sampling points.

Table 1 Land use ratio in the basin of KAKO River.

Land use (%)	Forest	Rice field	Farm land	City	Water area
	66.4	18.7	1.0	11.3	2.6

Table 2 Nonpoint source load per unit.

	Forest	Rice field	Farm land	City
Average value of Comprehensive Basin-Wide Plans of Sewerage Systems (AV)	5.8	10.6	29.5	11.9
Atmospheric deposition (AD)	0.59	5.39	5.39	5.39

Table 4 Sampling dates.

Event	year	Sampling dates
1		Sep. 16-17
2	2015	Oct. 27-28
3		Nov. 17-18

Table 3 Annual TN load from point source.

Annual TN load (t)	Sewage treatment plant	Industrial plant
	183	520

### Ⅲ 結果

#### 1. 流量

全流量観測点における年平均流量の実測値と計算値の比較をFig. 4に示す. 流量は全体的に計算値が過大評価傾向ではあったが, 概ね良好な結果といえる.

得られた結果を式(3)に示すモデル精度の統計指標であるNash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE)を用いて, 統計的に再現性を評価した. 本指標は変動幅が大きい流量の再現性評価によく用いられ, 0.7以上となれば数値計算の再現性が良好であり, 0より小さければほぼ予測の効果が無いとされる<sup>13)</sup>. Table 5に各地点における流量の統計指標を示す. 全体的に過大評価の傾向であったが, NSEの値は全地点で0.7を上回っており, 再現性は良好であると考えられる.

また, 加古川本流の中流域に位置するSt. 2及び下流域に位置するSt. 5における流量時別値の実測値と計算値の比較をFig. 5及びFig. 6に示す. 右図に特に降水量の多かった夏季を併載する. St. 2及びSt. 5において降雨の影響により流量が増加する時間変動傾向が再現されていた.

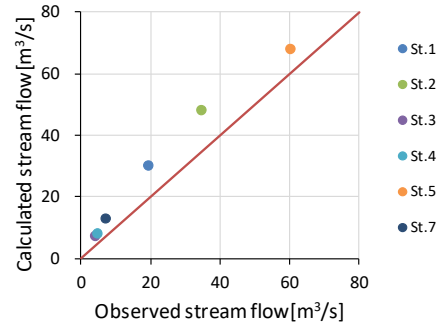


Fig. 4 Comparison of observed and calculated annual mean stream flows.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{式(3)}$$

$M$ : 計算流量 [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ],  $O$ : 実測流量 [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]  
 $N$ : サンプル数,  $-$ : 平均を表す修飾

Table 5 NSE value.

	Observed average [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]	Calculated average [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]	NSE
St. 1	19.9	29.7	0.81
St. 2	35.2	47.8	0.84
St. 3	4.6	7.1	0.85
St. 4	5.2	7.7	0.78
St. 5	60.5	67.8	0.90
St. 7	7.5	12.7	0.93

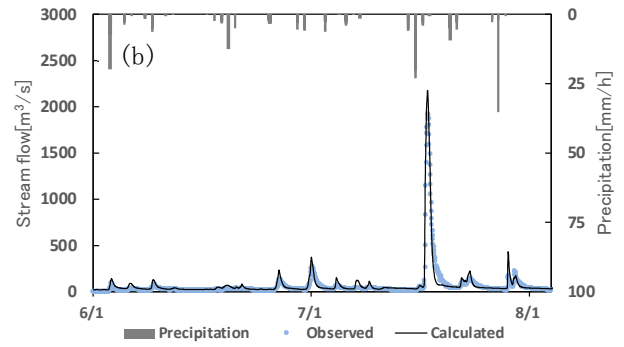
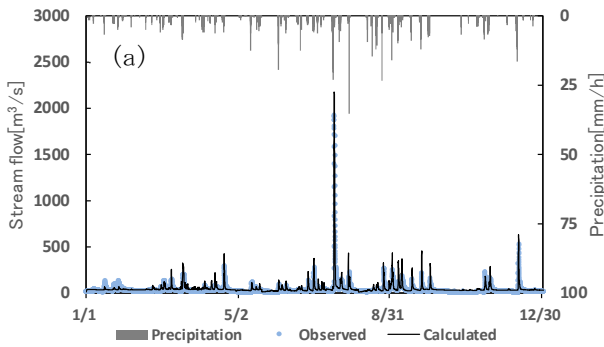


Fig. 5 Observed and calculated values of stream flow at St. 2. (a) annual (b) summer

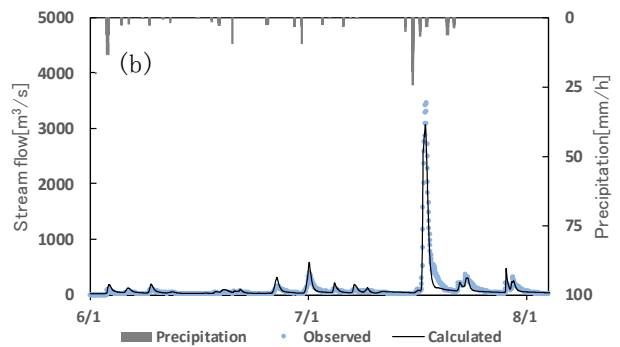
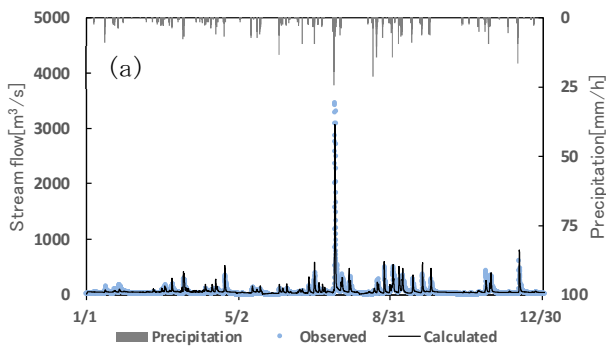


Fig. 6 Observed and calculated values of stream flow at St. 5. (a) annual (b) summer

## 2. 全窒素濃度

全窒素 (TN) 濃度は、St. 6で降雨時に調査した3つの降雨イベント ((i) 9/16~9/18, (ii) 10/27~10/29及び(iii) 11/17~11/19)の実測値と計算値を比較し、それぞれの結果をFig. 7に示す。図中には面源負荷原単位を0 (NPS0)と設定した場合、流域別下水道整備総合計画調査の平均値による面源負荷原単位 (AV)<sup>8)</sup>を使用した場合、及び面源負荷原単位より大気沈着等をそれぞれ抽出した場合 (AD)を使用した場合の3パターンを示す。

AVの条件での計算結果は全窒素濃度が過大評価となった。そこで、本モデルで使用した面源負荷原単位とは別の面源負荷原単位について調査を試みた。環境省マニュアルや既往の調査事例<sup>14)</sup>を参照すると、例えば山林でも地域により0.3~20.9 (kg ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>)と非常に幅広い値を持っており、各土地利用の面源負荷原単位に大きな差があった。そのため、使用した面源負荷原単位が実際と大きく異なった可能性が示唆された。

AVで使用した面源負荷原単位は直接大気降下物負荷、都市・農業・森林地域排出負荷等を全て考慮したものの全国平均値である<sup>15)</sup>。そこで、加古川流域の各土地利用の面源負荷原単位を求めるために、各負荷要因の抽出を試みた。湿性沈着は環境省の平成27年度酸性雨調査<sup>9)</sup>で実施している地点の中で最近傍の尼崎の湿性沈着量を用いた。なお、年間湿性沈着量の全国平均値は29.67 (mmol m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>)であり、尼崎は14.06 (mmol m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>)である。山林においては窒素消費を考慮し、過去の文献<sup>10)</sup>より林外雨中の窒素負荷量と山林からの溶脱量の比を用いた面源負荷原単位 (AD)を設定したところ、計算結果が改善された。

ADの計算で使用した面源負荷は湿性沈着と山林の窒素消費のみであるが、兵庫県内の南部沿岸地域より内陸地域の湿性沈着量が少ないという報告<sup>16)</sup>もあり、施肥量や乾性沈着を含め、これらの影響を詳細に解析すると、更にシミュレーションの精度は向上する可能性がある。

## IV 結論

本研究では、貧栄養化が懸念されている播磨灘に流入する窒素動態を解析するために、平水時・降雨時両面の評価が可能な水文・水質モデルを、加古川流域を対象として構築した。

本水文・水質モデルは、河川流量を良好に再現した。窒素の動態解析をしたところ、既報の窒素面源負荷原単位を用いた場合、窒素負荷量は過大評価となった。この原因として、面源負荷原単位が過大であることが示唆された。そこで、面源負荷原単位中の大気沈着量及び山林の窒素消費量の要素を抽出し、加古川流域内の値を適用したところ、窒素負荷量の再現性が改善された。

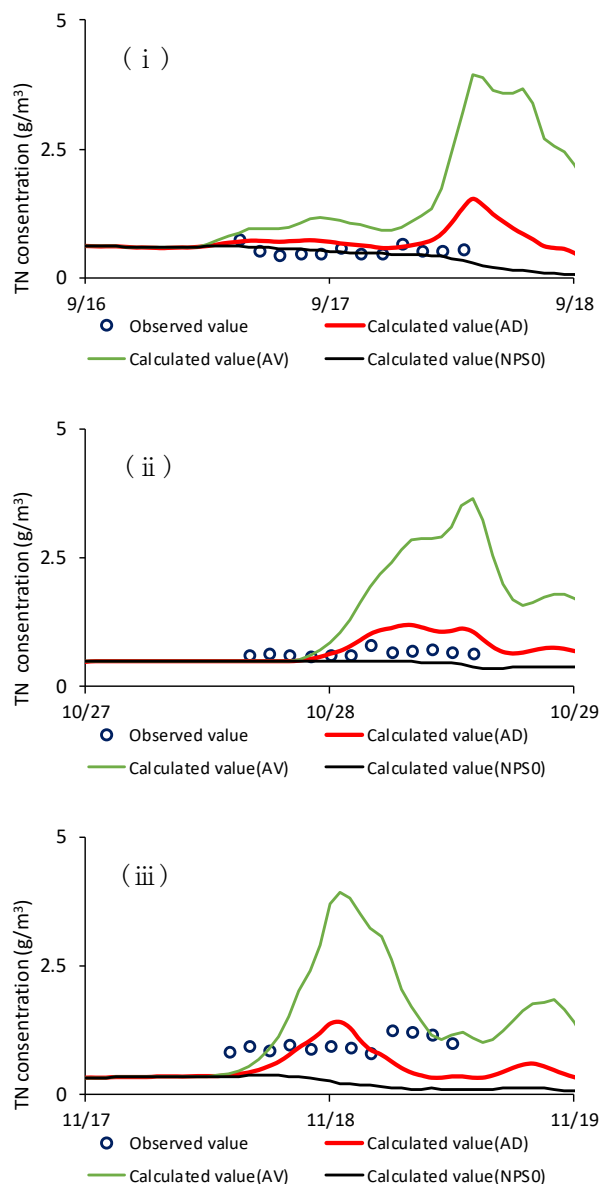


Fig. 7 Observed and calculated values of TN concentration at St. 6.

### 【謝辞】

この研究の一部は、大阪湾広域臨海環境整備センターの助成を受けて実施した。

## 文 献

- 1) 山本民次, 花里孝幸: 海と湖の貧栄養化問題, p. 55-57, 地人書館, 東京 (2015)
- 2) 大垣眞一郎, 財団法人河川環境管理協会: 河川と栄養塩類, p. 142-152, 技報堂, 東京 (2005)
- 3) 國松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析 p. 118-119, 技報堂, 東京 (1989)
- 4) Kundan Lal Shrestha: Water Resource Assessment of Yodo River Basin Using Coupled Hydrometeorological Modeling Approach, p. 41, 2010
- 5) 国土交通省: 国土数値情報ダウンロードサービス (参照2017. 9. 20)  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj>
- 6) 環境省自然環境局: 植生調査3次メッシュデータ生物多様性センター (参照2017. 10. 18)  
[http://www.biodic.go.jp/dload/mesh\\_vg.html](http://www.biodic.go.jp/dload/mesh_vg.html)
- 7) 一般財団法人気象業務支援センター: 気象観測月報 2015年1月-2015年12月
- 8) 国土交通省: 流域別下水道整備総合計画調査指針と解説 -  
<http://www.mlit.go.jp/common/001065300.pdf>
- 9) 環境省: 平成27年度酸性雨調査結果  
<http://www.env.go.jp/air/acidrain/monitoring/h27/index.html> (参照 2018. 8. 17)
- 10) 依田恭二: 森林の生態学, p. 269, 築地書館, 東京 (1971)
- 11) 古賀佑太郎, 宮崎一, 藤森一男, 松林雅之: 加古川流域における降雨時の窒素, りん負荷量の調査, 公益財団法人ひょうご環境創造協会兵庫県環境研究センター紀要, 第7号, pp8-14
- 12) 兵庫県: 公共用水域の水質測定結果報告書 (2015年度版)
- 13) Nash J. E., Sutcliffe J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, pp.282-290, 1970
- 14) 国土交通省: 湖沼水質のための流域対策の基本的考え方 ~非特定汚染源からの負荷対策~  
[http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/kankyo/kosyo/main.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/kosyo/main.pdf) (参照 2017. 9. 20)
- 15) 環境省: 非特定汚染源対策の推進に係るガイドライン (第二版)
- 16) Masahide AIKAWA: Variations and trends in acid deposition in JAPAN within a 100 km × 100 km region from 1989 to 1999, p.238, 2003