

原単位法を用いた沖縄県西海岸における 窒素及びりんの陸域負荷推計*

糸洲昌子・友寄喜貴・座間味佳孝・城間一哲・金城孝一**

Estimation of Nitrogen and Phosphorus Runoff on the West Coast of Okinawa Island using the Environmental Load Unit Method*

Shoko ITOSU, Nobutaka TOMOYOSE, Yoshitaka ZAMAMI, Ittetsu SHIROMA and Koichi KINJO**

要旨：オニヒトデの大量発生は浮遊幼生期の生残率が高まることによって起こるとする「幼生生き残り仮説」が有力な説とされている。オニヒトデ幼生の生残率を高める要因として植物プランクトンの多寡が挙げられ、オニヒトデの大量発生を防ぐためには植物プランクトン密度が高くないよう沿岸海域の水質対策をすることが有用と考えられる。陸域から流出する窒素りんを低減させるには、各負荷源が水質にどの程度影響を与えているかを考える必要がある。このことから本報では、陸域負荷の内訳を推計するため、原単位法を用いて陸域負荷の推計を行った。その結果、流域によって負荷源の寄与率が異なることが推計することができた。また、実際の海域や河川の水質との比較から、当該推計方法により負荷源を定性的に把握することができると考えられた。

Key words: オニヒトデ, クロロフィル *a*, 陸域負荷, 窒素, りん, 原単位法

I はじめに

1. 背景と目的

オニヒトデの大量発生メカニズムは、オニヒトデ浮遊幼生期の生残率が高まることにより起きるとする「幼生生き残り仮説」が有力視されている。オニヒトデ幼生の餌となる植物プランクトンの多寡は生残率に影響を与える要因の一つである。

本県では、オニヒトデ大量発生における水質の寄与の評価を目的として、2013年から水質調査（窒素、りん、有機炭素、クロロフィル *a* など）を実施している。これまでの調査で、沖縄県西海岸サンゴ礁海域における栄養塩濃度と植物プランクトン密度を示すクロロフィル *a* は市街地面積が大きい流域の沿岸で高濃度を示す傾向にあることがわかっている。また、沖縄県の土地利用現況と河川水質との関係については、「住宅地等」及び「サトウキビ畑」の面積と河川水質の間に相関があることが確認されており（金城、2019）¹、陸域における当該土地利用に係る負荷が河川及び海域の水質に影響していることが示唆されている。

以上のことから、陸域からの窒素及びりんの負荷源把握を目的として、原単位法による推計を試みた。

2. 原単位法について

原単位法とは、陸域から発生する汚濁負荷量について、それぞれの負荷源毎に既存の研究や調査などを基にして算出された負荷量原単位を積み上げていくことによって、対象陸域から排出される負荷量を推計する手法である。

今回は推計するに当たって主な負荷発生源である、人、産業、畜産、土地利用に関する情報を統計データ等から収集した。

また、原単位は対象地域で調査を行った結果算出した原単位を使用する場合や、既存研究などから引用した文献値を使用する場合があるが、今回は既存の資料から引用した数値を用いて推計を行った。

II 方法

1. 負荷量推計流域の選定及び流入負荷の分類

市街化が進んでいる中南部からオニヒトデの発生が確認されている恩納村までの流域を対象に、沖縄県西海岸の国場川流域、牧港川流域、伊佐流域、塩屋流域、万座流域の6地域を選定した（図1）。また、選定流域の土地利用状況及び人口は図2のとおり。

*本研究は沖縄県自然保護課・オニヒトデ対策普及促進事業費によって調査したものである。

**沖縄県環境保全課

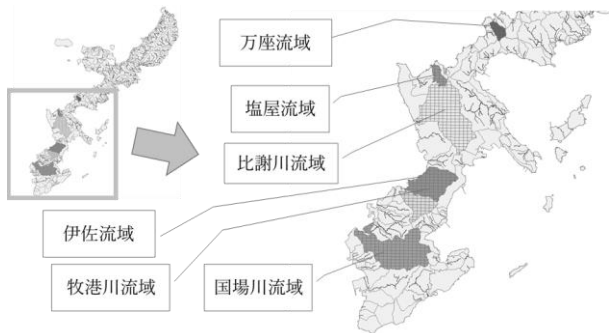


図1. 負荷量推計選定流域の位置.

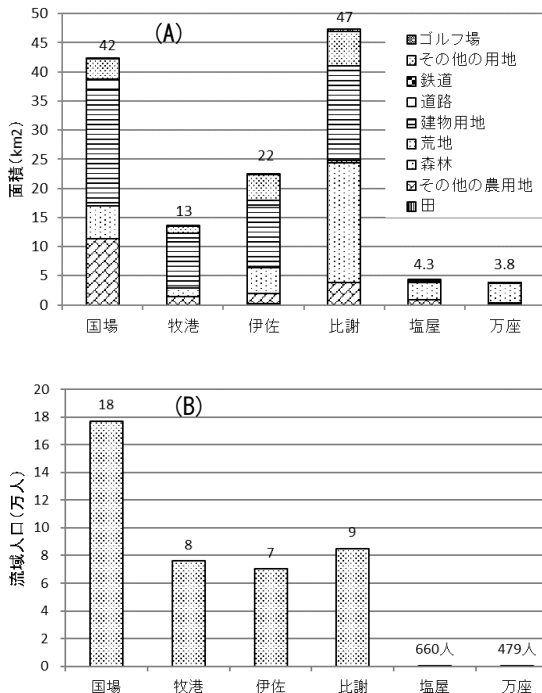


図2. 推計流域の概況. (A)は土地利用状況を示し, (B)は流域人口を示す((A)は国土交通省土地利用細分メッシュデータ¹⁰⁾, (B)は2015年国勢調査人口メッシュデータ²⁾を基に作成).

2. ソフトウェア及びデータ

ソフトウェアは、日本スーパーマップ株式会社製スーパーマップ、Google社製Google Earth pro、Microsoft社製Excelを用いた。

Shape形式で情報を集約し、スーパーマップを用いてレイヤー化して流域を切り取るにより情報を抽出した。抽出した情報はExcelを用いて集計した。事業場などの住所情報はGoogle Earth proを用いてKML形式で出力し、Shape形式へ変換して使用した。

収集したデータの一覧は表1のとおりである。

表1. 収集データ一覧.

収集情報	データ名	発行元
流域図	赤土等流出危険度予測評価システム	沖縄県環境保全課
生活系負荷	2015年国勢調査人口メッシュデータ (500m×500m)	総務省統計局
	平成29年度末沖縄県市町村別汚水処理施設整備状況	沖縄県下水道課
事業系負荷	特定施設台帳	沖縄県環境保全課
	平成29年度沖縄県流域域下水道維持管理年報	沖縄県下水道事務所
	平成29年度水質汚濁物質総量調査	環境省
畜産系負荷	2015年農林業センサス 家畜飼養数	沖縄県統計課
	流域下水道整備総合計画調査 指針と解説	国土交通省
面源系負荷	土地利用細分メッシュデータ (100m×100m)	国土交通省
	流域下水道整備総合計画調査 指針と解説	国土交通省

3. 推計方法

陸域負荷については、生活系負荷 (浄化槽のみ)、事業系負荷、畜産系負荷などを点源負荷とし、山林、水田、畑地、市街地などの非特定汚染源から発生する負荷を面源系負荷として推計した (図3)。なお、今回推計する窒素及びりんは全窒素 (T-N) 及び全りん (T-P) である。

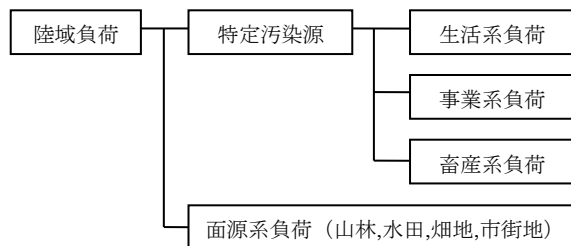


図3. 本報における陸域負荷推計の系統.

(1) 生活系負荷

生活系負荷は下水道設備に接続していない一般家庭からの合併浄化槽及び単独浄化槽からの負荷である。当該負荷を算出するためには、流域内の合併浄化槽及び単独浄化槽の処理人口と一人当たりの原単位が必要であることから、統計データから流域内の推計人口を算出した。流域内の処理人口については、政府統計サイト e-Stat の2015年国勢調査人口メッシュデータ (4次メッシュ 3927境界データ及び人口データ)²⁾を用いて算出した。

次に沖縄県市町村別汚水処理施設整備状況 (平成29年度末) (沖縄県, 2018)³⁾のデータを用いて各市町村における合併浄化槽の人口率を参照した。単独浄化槽等 (汲み取り含む) については市町村毎の処理人口や処理率が示されていなかったことから、式(1)のとおり、各行政区域内の人口からそれぞれの処理の接続人口を差し引いた残りを単独浄化槽 (汲み取り含む) として、人口率を算出した。これらの人口率を流域内市町村人口と掛けることにより、流域内の合併浄化槽及び単独浄化槽人口を得

た。

流域内が複数の市町村にまたがっている場合は、式(2)のとおり流域内の行政区域毎に人口率を掛けて人口を算出し、全体の流域人口を合算した。当該推計結果から得られた流域内の浄化槽人口は表2のとおりである。平成30年度浄化槽の指導普及に関する調査結果（環境省，2019）によると、沖縄県における処理方式別浄化槽全設置基数(平成29年度末現在)は単独処理浄化槽が64.9%，合併処理浄化槽が35.1%となっている⁴⁾。当該情報を鑑みると、単独処理浄化槽の数値が過大に評価されていると考えられ、これは推計値が汲み取り式や未処理も含んだ数値になっているためと考えられる。

一人当たりの負荷量原単位については、河川と栄養塩類（大垣，2005）⁵⁾から表3のデータを参照し、式(3)及び式(4)により表4のとおりとした。

これらの数値を基に、式(5)のとおり流域内の負荷を市町村毎に積み上げ、負荷量を算出した。

単独浄化槽（汲み取り及び未処理含む）率（%）

$$= 1 - \left(\frac{\text{下水道接続人口} + \text{農業集落排水接続人口} + \text{漁業集落排水接続人口} + \text{合併浄化槽処理人口}}{\text{行政人口}} \right) \dots (1)$$

流域内浄化槽人口（人）

$$= \Sigma \left(\text{流域内市町村人口} \times \text{市町村浄化槽人口率} \right) \dots (2)$$

表2. 流域人口及び浄化槽処理人口率から推計した合併浄化槽人口及び単独浄化槽処理人口（汲み取り及び未処理含む）。

流域名	合併浄化槽人口（人）	単独浄化槽人口（人） (汲み取り及び未処理含む)
国場川流域	11,000	33,000
牧港川流域	7,200	16,000
伊佐流域	2,200	18,000
比謝川流域	5,400	15,000
塩屋流域	230	270
万座流域	170	200

表3. 生活系排水に関わる原単位と除去率。

項目	種類	T-N	T-P
原単位 (g/人・日)	雑排水	1.5	0.3
	し尿	7.0	0.7
除去率 (%)	単独処理浄化槽	15	5
	合併処理浄化槽	18	12

$$\begin{aligned} \text{単独処理浄化槽原単位 (g/人・日)} = \\ \text{し尿原単位} \times (1 - \text{除去率}) + \text{雑排水原単位} \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{合併処理浄化槽原単位 (g/人・日)} = \\ (\text{し尿原単位} + \text{雑排水原単位}) \times (1 - \text{除去率}) \dots (4) \end{aligned}$$

表4. 単独処理浄化槽原単位及び合併処理浄化槽原単位。

種類	T-N(g/人・日)	T-P(g/人・日)
単独処理浄化槽原単位	7.5	0.97
合併処理浄化槽原単位	7.0	0.88

生活系負荷（kg/日）＝

$$\Sigma \left\{ \text{流域内市町村人口} \left(\text{合併浄化槽処理率} \times \text{原単位} + \text{単独浄化槽処理率} \times \text{原単位} \right) \right\} \dots (5)$$

(2) 事業系負荷

事業系負荷は事業所から公共用水域に排出される負荷である。今回は水質汚濁への影響が大きいと考えられる、水質汚濁防止法における特定施設を有する事業場に絞って推計を行った。

当該負荷を算出するためには流域内の事業場排水の濃度と水量を把握する必要がある。特定施設台帳の情報から、各事業場の位置、水量を参照した。

水質は過去に当所で測定した水質平均値（施設種別）を用い、データ数の少ない施設種については平成29年度水質汚濁物質排出量総合調査結果報告書（環境省，2018）⁶⁾の平均値を用いた。用いた水質データの一例は表5のとおりである。

事業場の中でも特に排水量の多い下水道終末処理場については排水量のデータが公開されていることから、平成29年度沖縄県流域下水道維持管理年報告（沖縄県，2018）⁷⁾より排水量を参照した。なお、特定施設には豚房施設や牛房施設なども含まれるが、今回は別途畜産系負荷として算出することから、除外して推計を行った。

これらの数値を基に、式(6)のとおり流域内の各事業場の負荷量を積み上げて算出した。

$$\text{事業系負荷 (kg/日)} = \Sigma (\text{平均日水量} \times \text{事業場排水水質平均値}) \cdots(6)$$

表 5. 特定施設別の全窒素及び全りん の平均値 (抜粋).

施設番号	施設名称	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	出典※
2	畜産食料品製造業の用に供する施設	11.2	2.7	1
3	水産食料品製造業の用に供する施設	18.4	3.2	1
9	米菓製造業又は工事製造業の用に今日する洗米機	4.4	4.7	1
11	動物系飼料又は有機質肥料の製造業の用に供する施設	20.2	2.3	1
20	洗毛業の用に供する施設	14.1	2.7	1
68-2	病院 (医療法第 1 条の 5 第 1 項に規定し、患者 20 人以上の収容施設を有するもの) で病床数が 300 以上であるものに設置される施設	11	1.8	1
69	と畜業又は死亡獣畜取扱業の用に供する解体施設	16.3	2.8	1
71	自動式車両洗浄施設	26.9	4.3	1
71-5	トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン又はジクロロメタンによる洗浄施設	15.8	1.4	1
73	下水道終末処理施設	16	1.1	2

※1:平成 29 年度水質汚濁物質排出量総合調査データ (環境省)、2: 当所測定平均値

(3) 畜産系負荷

畜産系負荷は飼養家畜から排出される負荷である。当該負荷を算出するためには、流域内の畜産施設における家畜の飼養頭数等が必要である。そこで、2015 年農林業センサス (沖縄県, 2017) ⁸⁾ の各市町村の家畜飼養数を基に、市町村面積に対する流域面積の割合をかけることにより流域内の飼養頭数を推計した。原単位は牛、豚については流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 (国土交通省, 2015) ⁹⁾ の平成 25 年度水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査の平均値を用い、鶏については同指針と解説の湖沼水質保全計画の平均値を用いて表 6 のとお

りとした。

これらの数値を基に、式(7)のとおり流域内市町村毎に負荷量を積み上げて算出した。

表 6. 飼養家畜別原単位.

種類	T-N (g/頭・日)	T-P (g/頭・日)
牛	27.1	1.37
豚	5.2	2.52
鶏	0.110	0.0010

$$\text{家畜系負荷 (kg/日)} =$$

$$\Sigma (\text{牛飼養数} \times \text{牛原単位} + \text{豚飼養数} \times \text{豚原単位} + \text{鳥飼養数} \times \text{鳥原単位}) \times \text{流域内市町村面積} / \text{市町村面積} \cdots(7)$$

(4) 面源系負荷 (山林, 水田, 畑地, 市街地等)

面源系負荷は山林, 水田, 畑地, 市街地などから面的に発生する負荷のことである。流域内の土地利用情報取は国土交通省の平成 28 年度版土地利用細分メッシュデータ (100 m × 100 m) ¹⁰⁾ を用いた。土地利用を山林, 水田, 畑地, 市街地に分類し, それぞれの分類を流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説 (国土交通省, 2015) ⁹⁾ における原単位平均値を採用し, 表 7 のとおりとして, 負荷量を算出した。

これらの数値を基に、式(8)のとおり流域内の各事業場の負荷量を積み上げて算出した。なお、原単位が年当たりの値で示されていたことから、他の負荷量と同様に一日当たりになるよう、365 で除した。

表 7. 各土地利用細分の原単位.

土地利用細分	分類	原単位 (kg / ha・年)	
		T-N	T-P
森林	山林	4.9	0.3
田	水田	10.6	1.41
その他農用地, ゴルフ場	畑	100.4	1.28
荒地, 建物用地, 道路, 鉄道, その他の用地	市街地	16.2	1.9

$$\text{面源系負荷 (kg/日)} =$$

$$\{ \text{森林面積} \times \text{山林原単位} + \text{田面積} \times \text{水田原単位} + (\text{その他農用地面積} + \text{ゴルフ場面積}) \times \text{畑地原単位} + (\text{道路面積} + \text{建物用地面積} + \text{荒地面積} + \text{その他の用地面積}) \times \text{市街地原単位} \} / 365 \cdots(8)$$

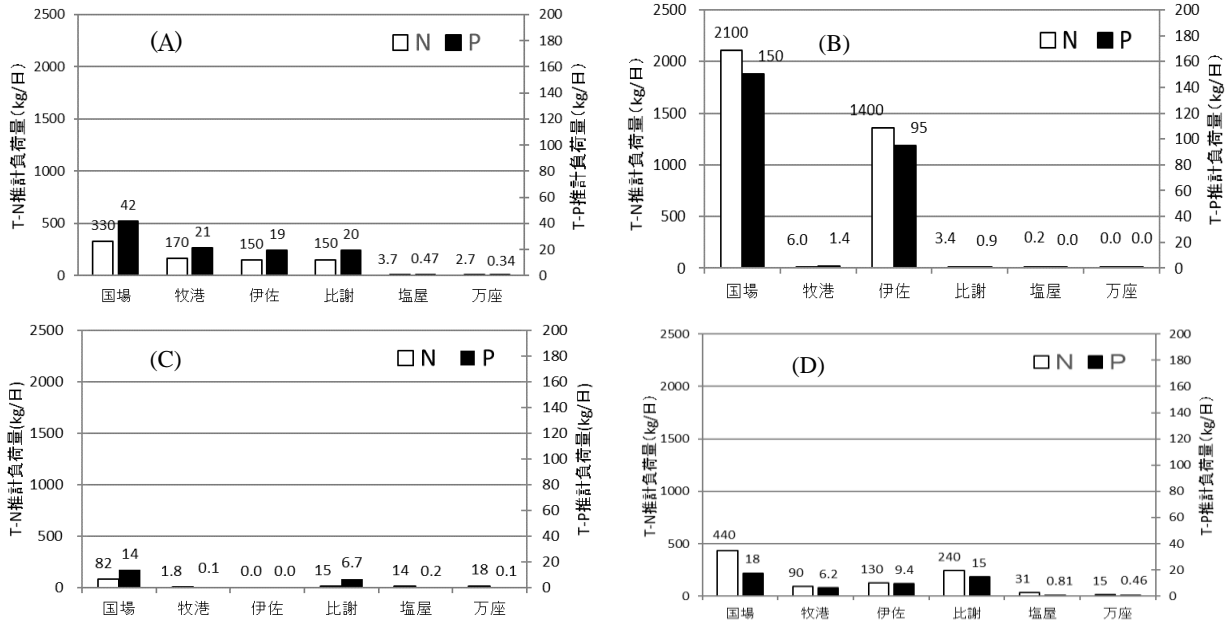


図 4. 各負荷量の推計値. (A)は生活系負荷, (B)は事業系負荷, (C)は畜産系負荷, (D)は面源系負荷の推計結果を示す.

Ⅲ 結果と考察

1. 各負荷量推定の結果

(1) 生活系負荷

推計負荷量の結果は図 4(A)のとおりであり, T-N, T-P 共に流域人口 (図 2(B)) と類似の傾向を示した. なお, 今回, 単独浄化槽, 未処理, 汲み取り式を区別せずに計上しているため, 汲み取り式のし尿部分については過大評価されていると考えられる.

(2) 事業系負荷

推計負荷量の結果は図 4(B)のとおりであり, 下水終末処理場が存在する流域において負荷量が大きくなった. なお, 今回事業場の住所から位置を求めたが, 地図上に反映できなかった事業場があったため, その分過小評価されている.

(3) 畜産系負荷

推計負荷量の結果は図 4(C)のとおりである. 畜産系の施設は集中して位置することが多いが, 今回は位置情報ではなく市町村単位で集計していることから, 特に小さい流域では実際との乖離が大きくなる可能性がある. なお, 衛星画像から塩屋, 万座流域には畜産施設が確認されなかったことから, 推計値は過大評価されている可能性がある. また, 施設の水洗化の有無や排出負荷の肥料回収の有無によっても, 負荷量は大きく変わる可能性がある.

(4) 面源系負荷

推計負荷量の結果は図 4(D)のとおりである. T-N についてはその他農用地, T-P については建物用地の面積 (図 2(A)) と類似の傾向を示した. 面源の原単位は地域の地形や畑への施肥量によって地域差が生じることが推測されるが, 本県における原単位が示された資料はない. そのため, 当該理由による実際との乖離が生じると考えられる.

(5) 全負荷量の合算値

各推計負荷量の推計値を合算した結果は図 5, 各流域における推計総負荷量中の各負荷源の内訳は図 6 のとおりであった.

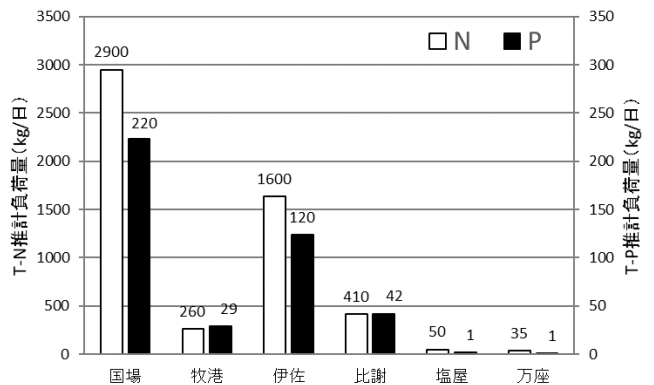


図 5. 各流域の陸域負荷推計値.

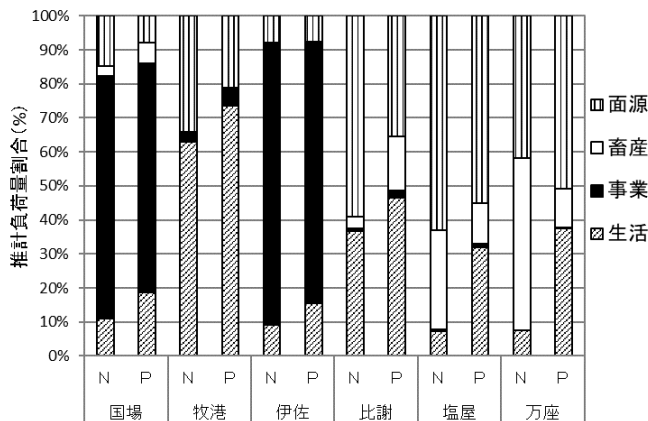


図 6. 各流域の陸域負荷推計値の内訳.

推計の結果、国場及び伊佐は事業計負荷が最も大きく、その他流域では主に生活系負荷、畜産系負荷、面源系負荷が大きな割合を占めた。人口が多く流域面積の大きくない牧港では面源負荷よりも生活系負荷の割合が大きくなり、人口密度の低い塩屋及び万座では面源系負荷や畜産系負荷が生活系負荷よりも大きいという推計結果となった。また人口が多く、流域面積も広い比謝は生活系負荷も面源系負荷も同程度の割合であった。

事業計負荷である下水処理場単徳の負荷量は国場で T-N 2000 kg/日、T-P 140 kg/日で流域内負荷の約 6~7 割、伊佐で T-N 1300 kg/日、T-P 90 kg/日で流域内負荷の約 7~8 割を占めていた。塩屋と万座では畜産系負荷の割合が大きくなっているが、衛星画像ではこれらの地域に畜舎らしきものは確認されていないことから、推計値は過大評価されていると考えられる。当該推計を実際に活用できれば、各流域における主な負荷源を推定することに活用でき、優先して実施すべき陸域負荷源対策の検討に活用することが可能になると考える。

2. 水質実測値との比較

求めた推計負荷量結果が水質の実測値と整合がとれているか確認するために、海域水質及び河川水質との比較を行った。

(1) 海域水質との比較

各流域に最も隣接した地点における過去の水質測定結果と推計負荷量の比較は図 7 のとおりであり、今回の推計結果と全体の傾向は類似していた。

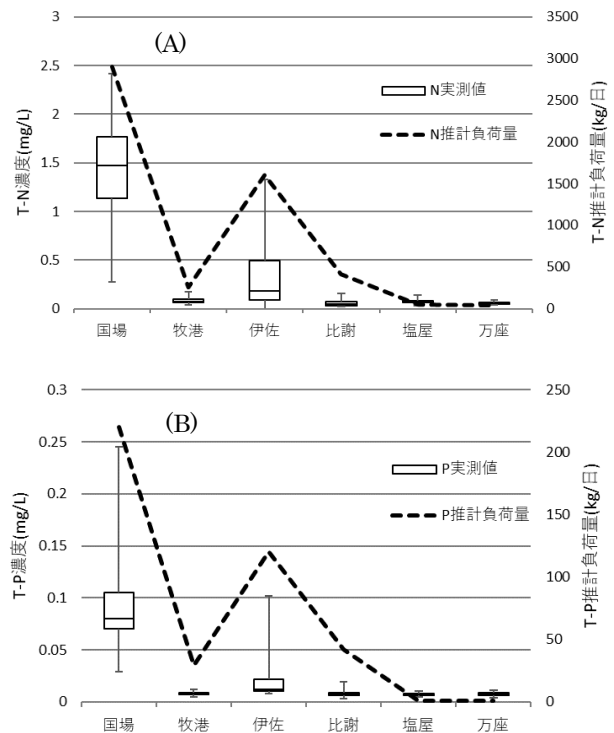


図 7. 各流域に隣接する採水点における海域水質濃度及び推計負荷量値。(A) は窒素濃度及び窒素推計負荷量、(B) はりん濃度及びりん推計負荷量 (国場 n = 21, 牧港 n = 11, 伊佐 n = 21, 比謝 n = 38, 塩屋 n = 13, 万座 n = 13)。

(2) 河川水質との比較

推計負荷量と河川流出量から推計河川水質濃度を算出し、実際の河川水質との比較した。河川流出量は、沖縄の水とその環境 (遠山, 1985) を基に表 8 のとおりとした。結果は図 8 のとおりである。なお、下水道終末処理場は河川ではなく海域に排水していることから、国場流域の負荷量には下水道終末処理場の負荷量は加えなかった。また、伊佐流域は河川がないため推計対象から除外した。

表 8. 各河川の一日常たりの流出量。

流域名	河川名	平均日流出量 (10 m ³ /日)
国場	国場川,長堂川,饒波川	13,705 ^{※1}
牧港	牧港川	4,064
伊佐	—	— ^{※2}
比謝	比謝川	18,583
塩屋	垂川 (真栄田川)	1,313
万座	新川	1,313

※1: 国場川 (長堂川含む) と饒波川の流量の和。

※2: 伊佐流域には主要な河川が存在しない。

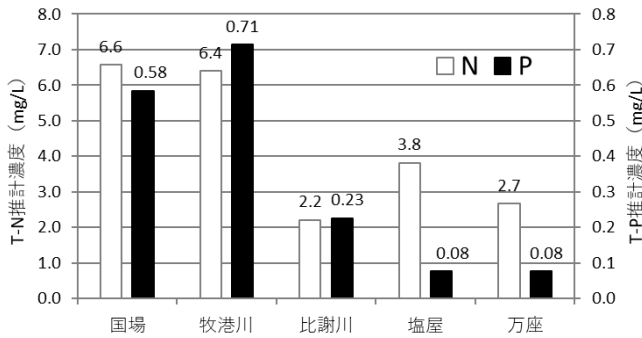


図 8. 各流域の河川流出水質推計値.

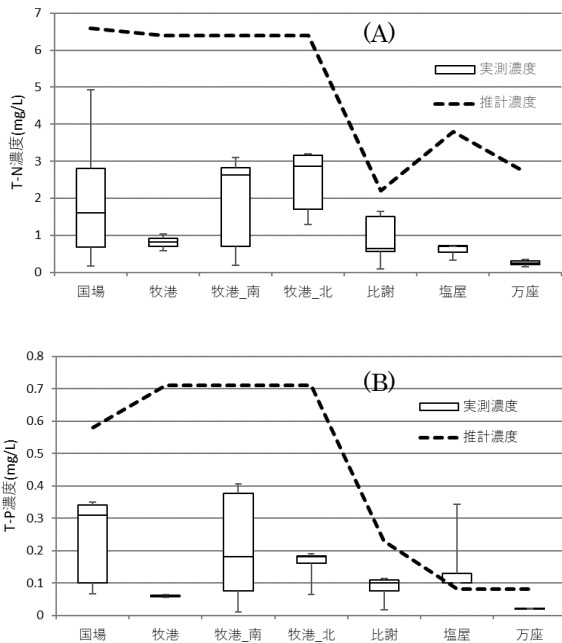


図 9. 河口域の実測水質濃度と推計河川濃度. (A)は全窒素, (B)は全りんを示す. 牧港については海水の影響が考えられたため, 合流前の水質も併せて示した (国場 n = 5, 牧港 n = 2, 牧港_南 n = 9, 牧港_北 n = 6, 比謝 n = 5, 塩屋 n = 5, 万座 n = 2).

これまでの河川水質の測定結果と推計河川水濃度の比較は図 9 のとおりである. なお, 牧港川河口の全窒素全りん濃度が低かったことから, 海水の影響が大きいと考え, 合流前の採水点 (地点名「牧港_南」及び「牧港_北」)の水質についても追加で示した.

推計結果は実際の河川水質より過大に推計されていた. 理由として, 原単位が実態と比較して大きかった, 自然環境中の河川などにおける浄化や土壌中への吸着等を踏まえた流達率が考慮されていないなどの理由が考えられた.

しかしながら, 推計水質濃度と実際の水質で傾向は類似していたことから, 各流域における負荷源について定性的に把握するために活用することは可能であると考え

られた.

IV まとめ

既存の情報を基に沖縄島西海岸における T-N 及び T-P の陸域負荷について推計したところ, 以下のとおりであった.

- 1) 陸域負荷の推計から, どのような負荷が大きな割合を占めるか推定することで, 優先して実施すべき対策を検討する一助となると考えられた.
- 2) 推計の結果, 各流域で主な負荷源が異なることが想定され, 各流域の負荷特性に応じた負荷源対策が必要と考えられた.
- 3) 推計結果は海域水質及び河川水質の実測値の傾向を表現できており, 定性的に実態を把握する手法として活用できる可能性が示唆された.

<謝辞>

本研究は沖縄県自然保護課のオニヒトゲ普及促進事業により実施しており, ご助言及びご協力を頂きました一般財団法人環境科学センターの山川英治様, 金井恵様, 有限会社コーラルクエストの岡地賢様にこの場を借りて深謝いたします.

V 参考文献

- 1) 金城孝一 (2019) 流域及び海域水質調査. オニヒトゲ対策普及促進事業報告書
- 2) 総務省統計局 政府統計ポータル e-Stat, 4次メッシュ境界データ (<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=2&aggregateUnitForBoundary=H&prefCode=47&coordsys=1&format=shape>), メッシュ内人口データ (<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&aggregateUnit=H&serveyId=H002005112015&statsId=T000847>)
- 3) 沖縄県下水道課 (2018) 沖縄県市町村別汚水処理施設整備状況 (平成 29 年度末)
- 4) 環境省 (2019) 平成 30 年度浄化槽の指導普及に関する調査, pp.10
- 5) 大垣眞一郎監修, 財団法人河川環境管理財団編 (2005) 河川と栄養塩類—管理に向けての提言—. 技報堂出版, pp.121
- 6) 環境省 (2018) 平成 29 年度水質汚濁物質排出量総合調査結果報告書, pp.135-138
- 7) 沖縄県下水道事務所 (2018) 沖縄県流域下水道維持管理年報, pp.12, pp.46

- 8) 沖縄県統計課(2017) 農林業センサス, 販売目的の家畜等を飼養している経営体数と飼養頭羽数 (<https://www.pref.okinawa.jp/toukeika/afc/2015/report/data/2-25.xlsx>)
- 9) 国土交通省(2015) 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説, pp.50-51, pp.62, pp.70, pp.71, pp.75
- 10) 国土交通省 GIS ホームページ国土数値情報ダウンロード土地利用細分メッシュデータ (<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html>) 平成 28 年度作成, 地域 3927