

炭素・窒素安定同位体比に基づく流域圏生態系健全性評価法の開発

DEVELOPMENT OF RIVER BASIN ECOSYSTEM ASSESSMENT METHOD
BASED ON CARBON AND NITROGEN STABLE ISOTOPE ANALYSIS

赤松良久・宮本大輔・吉村朋子

Yoshihisa AKAMATSU, Daisuke MIYAMOTO and Tomoko YOSHIMURA

正会員 博(工) 琉球大学准教授 工学部環境建設工学科 (〒901-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

学生会員 琉球大学大学院 理工学研究科 (同上)

非会員 琉球大学 工学部環境建設工学科 (同上)

In this study, a new ecosystem assessment method using carbon and nitrogen stable isotope analysis is proposed to evaluate health of river basin ecosystem. The health is mainly based on the material cycling through river, and therefore is able to evaluate by the stable isotope ratios of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in the sediments between river mouth and upstream end. The index of health is defined as dimensionless shift length of observed value from ideal value in three dimensional map $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}-L$ (distance from river mouth). This ecosystem assessment method is applied to the various rivers in the main island of Okinawa. The result shows that the dimensionless shift length can be a reasonable index of health in the river basin ecosystems.

Key Words : Stable isotope , river basin ecosystem, assessment method, material cycling

1. はじめに

流域圏生態系の根幹をなす河川の環境の評価はBOD (Biological Oxygen Demand) 等の水質指標によって行われてきた。これらの水質指標は河川環境を定量的に評価する有効な手段であった。しかし、河川や流域圏の生態系について検討するには窒素・リンなどの生元素の計測が必要不可欠であり、BODのみを河川環境の基準とするには限界がある。今日では溶存態の窒素・リン濃度等の連続計測も一級河川においては行われているものの、多くの二級河川においてはそのような定期的観測は行われていない。また、溶存態の栄養塩濃度は季節によって大きく変動するとともに、流域からの負荷の影響や感潮域では海水の侵入によって日変動もみられるため、河川環境の定量的評価指標としては適切ではない。したがって、河川や流域の環境を定量的に診断する新しい指標が必要とされている。

陸水学や地球化学の分野では古くから安定同位体比による物質循環や食物連鎖の研究が行われており、多くの研究によって安定同位体比が生態系の仕組みを理解することに有効であることが明らかにされている¹⁾。近年では流域における生態系や水環境評価に底質や水生生物の

炭素・窒素安定同位体比を用いる研究が進められている^{2),3)}。また、安定同位体を用いた流域環境評価に関しても体系的な研究が行われている⁴⁾。しかし、安定同位体比を用いて河川や流域の生態系を定量的に評価する手法は開発されていない。

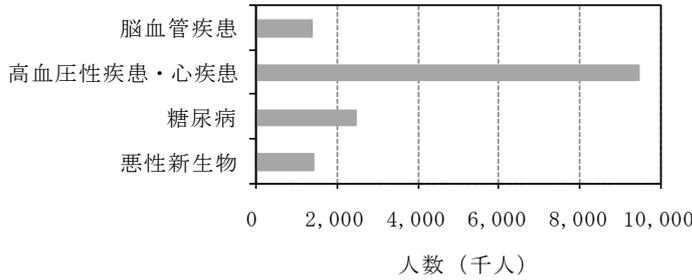
そこで、本研究では流域内に多くの貴重な生態系を有する沖縄本島の様々な流域を対象として陸域から河川・沿岸にかけての流域圏における河床堆積物の炭素・窒素安定同位体比を計測し、流域圏の生態系における物質循環の健全性を評価する方法を開発する。

2. 生命体としての流域圏生態系

流域圏生態系の健全性を把握することは自然共生型流域圏の構築に向けて必要不可欠である。しかし、流域圏生態系全体の健全性を評価することは困難であり、今日流域圏の生態系サービスや持続可能性に着目した環境アセスメント手法の開発が進められている⁵⁾。ここでは、今までとはまったく違った視点で流域を一つの生命体として考え(流域生命体説)、流域圏生態系の健全性について検討してみる。

流域には人間における血管のように河川網が張り巡ら

(a) 日本人の主な生活習慣病



(b) 沖縄本島における流域（河川）の環境問題

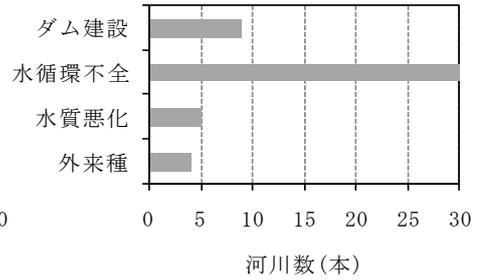


図-1 (a)日本人の主な生活習慣病と(b)沖縄本島における流域（河川）の環境問題の内訳

され、河口域は人間の排泄機能に似た機能を有している。このように流域と人体にはある程度の相似性が見られる。そこで、人間の疾患と流域における環境問題の対応について考察してみる。表-1に日本人の主な生活習慣病とそれに対応する流域の環境問題を示す。悪性新生物は流域生態系における外来種の問題、糖尿病は河川の富栄養化等の水質悪化、人体の循環器に関連する高血圧性疾患や心疾患は流域における水循環不全、脳血管疾患はダム建設による環境問題に対応すると考えることができる。図-1に厚生労働省大臣官房統計情報部による平成17年度の生活習慣病患者数の内訳および沖縄本島における主要な30流域（二級河川）における環境問題の内訳を示す。後者は沖縄県の資料⁽⁶⁾⁽¹¹⁾から独自に作成したものであり、その内訳は完全とは言えないものの、大まかな河川の環境問題の割合をみるには十分なデータと考えられる。ここで水質悪化はBODが3[mg/l]以上の河川と定義し、外来種に関しては魚類のみを対象とした。沖縄本島では古くから湧水が大きな水問題としてあり、ダムが建設されている河川の割合が高い。また、すべての流域において水循環に関する問題を抱えている。これは都市を含む流域では生活排水の流れ込みや湧水の減少によるものであり、一方、山間部や農村を含む流域においては取水による流量低下によるものである。このような流域における水問題の内訳は日本列島全体で考えてもほぼ同じような割合になることが予測される。この結果からも人体と流域の問題にある程度の相似性が存在すると考えることができる。図-1に示されるように人間の病気の大半が循環器に起因するものであると同様に、流域の環境問題もその多くは水・物質の循環の不全に起因するものであり、水・物質循環の健全性を流域圏生態系の健全性と考えることができる。したがって、流域を一つの生命体として見ると、流域圏生態系の健全性を保つためには河川を中心とした水・物質循環の健全性の回復が鍵であると考えられる。

表-1 人間の生活習慣病と流域の環境問題の相似性

人体	流域
悪性新生物	外来種
糖尿病	水質悪化
高血圧性疾患・心疾患	水循環不全
脳血管疾患	ダム建設

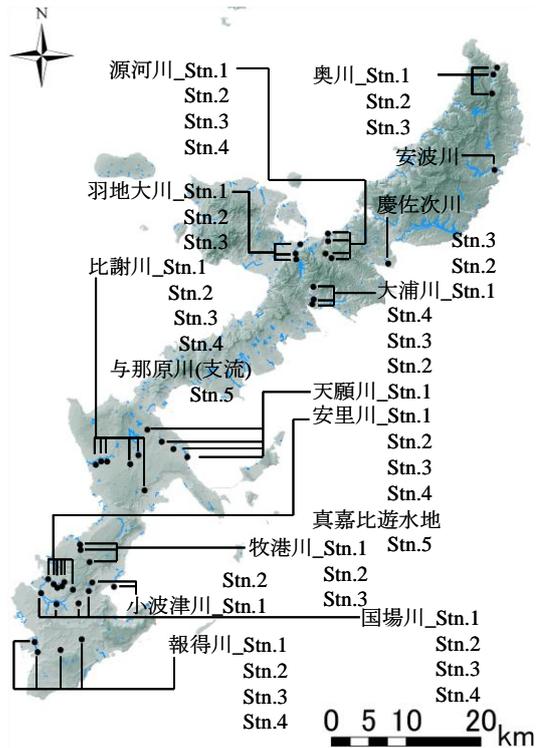


図-2 沖縄本島の13河川における調査地点

3. 沖縄本島の河川環境

沖縄本島の南部では急激な都市化によって多くの河川はコンクリート護岸に固められた排水路に近い様相を呈している一方で、北部では主に山間部を流れる比較的自然状態に近い河川が残っている。しかし、北部の河川においても河口域では住宅地の増加や架橋工事による環境

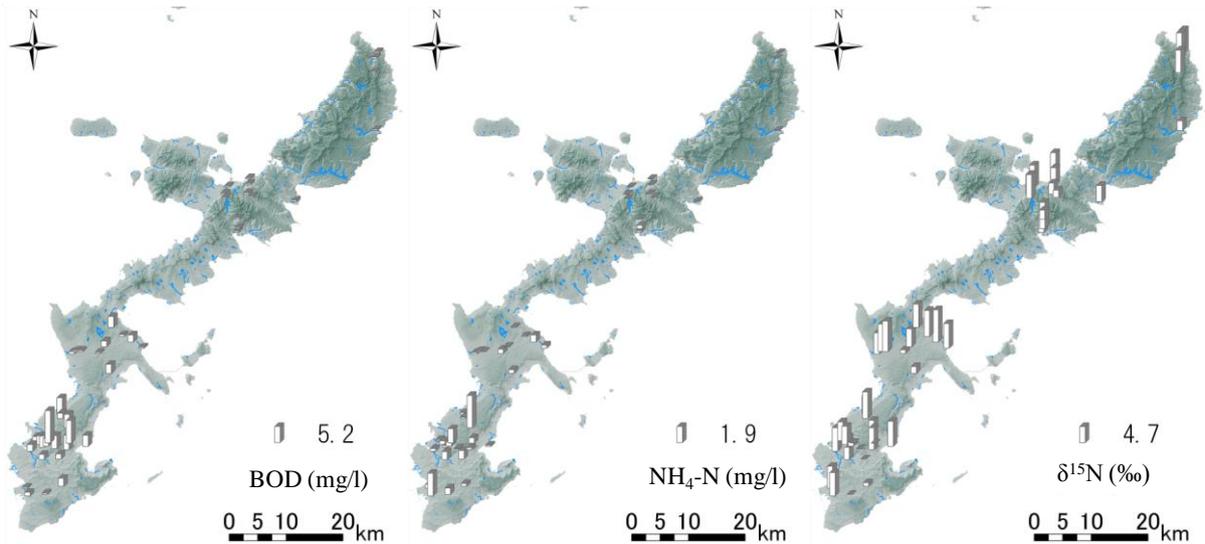


図-3 沖縄本島における河川水中のBOD, NH₄-N濃度および河床堆積物のδ¹⁵N

の悪化が見られる。また、北部には多くのダムが存在しており、様々なタイプの流域（河川）を有する沖縄本島は日本列島の縮図とも考えられる。

沖縄本島の13河川において（図-2），それぞれ上流から河口の複数地点で河川水および河床堆積物のサンプリングを行った（調査期間：2007年11月13日～12月18日）。潮汐の影響を強く受ける河口域では干潮時にサンプリングを行った。河川水サンプルに関してはBOD, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-Pの計測を行い、河床堆積物に関しては炭素・窒素の安定同位体比（δ¹³C, δ¹⁵N）の計測を行った。安定同位体比の計測は季節的変動の影響を受けにくく、流域における水・物質循環の状態を代表すると考えられる河床堆積物のみを対象として行った。NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-Pは全自動水質計測器（BRAN+LUEBBE, TRAACS-2000）により測定した。また、窒素・炭素の安定同位体比は同位体比質量分析計（DELTA^{plus} Advantage, Finnigan TM）により測定を行った。安定同位体比計測の標準偏差は炭素では約±0.3‰で、窒素では約±0.4‰であった。

図-3に沖縄本島における河川水中のBOD, NH₄-N濃度および河床堆積物のδ¹⁵Nを示す。BOD, NH₄-Nともに南部では高く、北部では低い濃度になっていることがわかる。南部の一部の河川ではNH₄-N濃度が2[mg/l]以上という高い値を示しているが、これは豚舎などからの未処理排水が流入しているためと考えられる。また、図-4に各調査地点でのBODとNH₄-Nおよびδ¹⁵Nの関係を示す。NH₄-N濃度とBOD濃度との相関は小さく、BOD濃度が3[mg/l]以下の地点でもNH₄-N濃度が高い値をとっている地点もみられる。また、河床堆積物のδ¹⁵NとBOD濃度についても相関は見られず、BOD濃度がゼロに近い地点においてもδ¹⁵Nの値は大きくばらばらしている。沖縄本島の沿岸には従来貧栄養環境を好むサンゴ礁域が広がっている

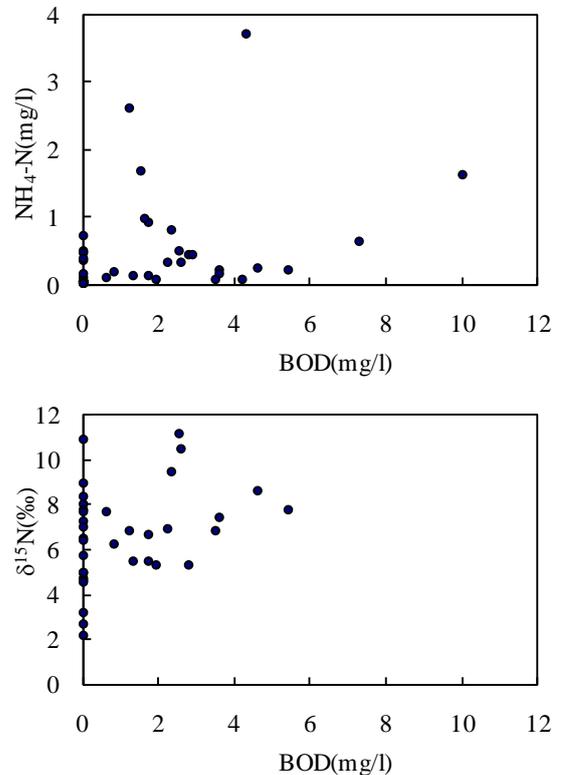


図-4 BODとNH₄-Nおよびδ¹⁵Nの関係

ことから、高濃度の栄養塩を含む河川水の沿岸への流入はサンゴ礁の破壊の一因ともなっており、この結果はBOD濃度のみによる水質基準では不十分であること示唆している。

図-5に都市域を流れる代表的な河川である(a)比謝川と比較的自然の残る河川である(b)源河川における河床堆積物のδ¹⁵Nの河川縦断方向の変化を示す。河川においてδ¹⁵Nが6‰を超える場合は汚濁が著しく、富栄養化が進行していると考えられるため¹²⁾、図中にδ¹⁵Nが6[‰]以上の

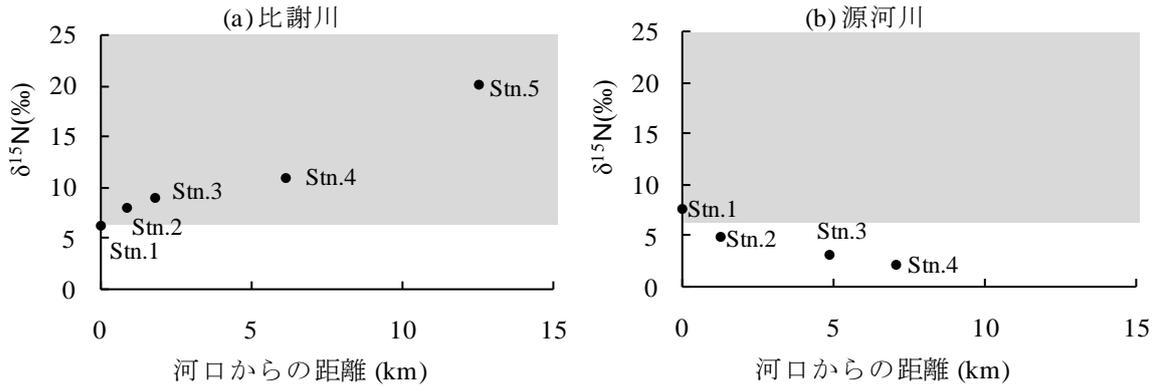


図-5 (a)比謝川および (b)源河川における河床堆積物の窒素安定同位体比の河川縦断方向の変化

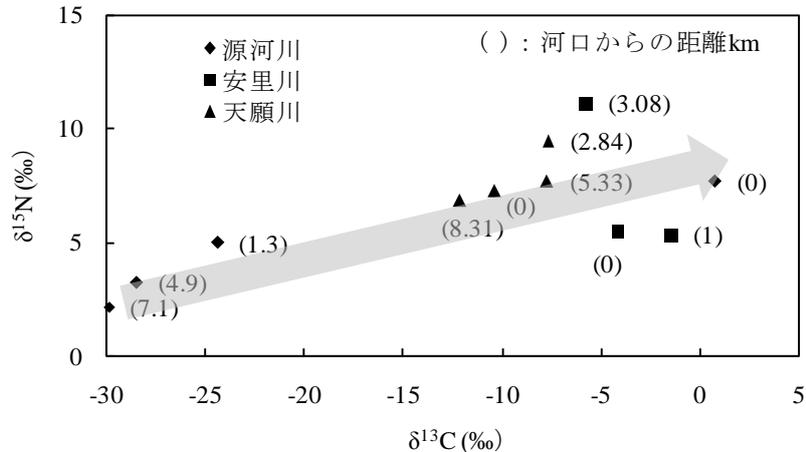


図-6 代表的な3河川(源河川, 安里川, 天願川)における河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}$ マップ

部分を灰色で示している。都市域の比謝川では河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ が全域で富栄養化の基準となる6[‰]を超えている。これは最上流部のStn.5付近は住宅地を流れるコンクリート三面張の都市河川であり、生活排水の流入によって富栄養化が進行しており、中流域のStn.2~3においては河岸に多くの植生が見られるものの、極端に流速が低下しているためであると考えられる。一方、源河川では自然状態に近い中流から上流域において河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ は6[‰]以下の低い値を示している。しかし、河口部のStn.1において $\delta^{15}\text{N}$ が6[‰]を超えている。これはStn.1付近には住宅地、耕地、養鶏場および養豚場があり、陸域からの栄養塩等の負荷が顕著であるためと考えられる。

4. 河床堆積物の炭素・窒素安定同位体比による

流域圏生態系健全性評価法

流域圏生態系全体を一つの生命体と考えれば河川はその大動脈であり、上流から下流への河川を通した流域内の健全な水・物質循環の状態が生態系全体の健全性を代

表すると考えられる。そこで、本研究では河川の上流から河口にわたる河床堆積物の炭素・窒素安定同位体比に着目して流域圏生態系の健全性の評価法を検討した。

代表的な3河川(源河川, 安里川, 天願川)における河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}$ マップを図-6に示す。マップ上の各点の数値は河口からの距離[km]を表す。一般に上流では森林地帯($\delta^{15}\text{N}$: -1~+1‰, $\delta^{13}\text{C}$: -27‰)の影響を受けて $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{13}\text{C}$ は小さい値をとる。河口域では付着藻類や微生物活動の活発化によって $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{13}\text{C}$ は河口に近づくにつれて大きい値になる。つまり、健全な流域内の物質循環が保たれている河川においては図中の矢印に示すように上流から河口に向かって $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ ともに上昇していくと考えられる¹³⁾。沖縄本島北部の比較的健全な河川である源河川においてはその傾向が見られる。それに対して、安里川や天願川では上流から河口まで全体的に $\delta^{15}\text{N}$ および $\delta^{13}\text{C}$ が高く、健全な流域内の物質循環から大きくずれており、不健全な流域圏生態系であることが予測される。

ここで、上流から下流への物質循環の健全性を定量化するために、 $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}-L$ (河口からの距離)の3次元マップを考える。森林から海へと続くほぼ自然状態に近い河川~沿岸においては最上流の森林域では森林地帯の

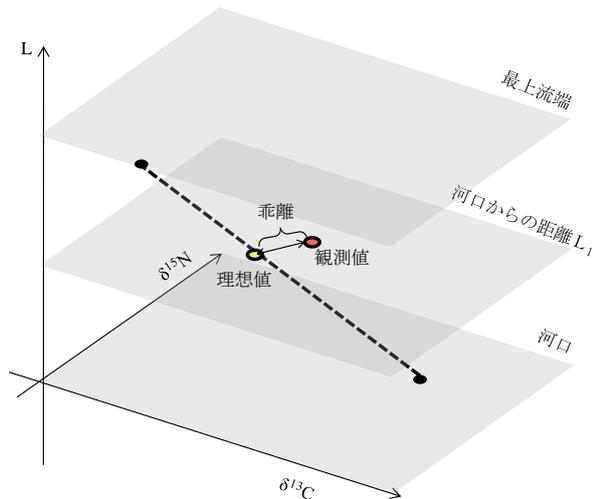


図-7 $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}-L$ (河口からの距離) の3次元マップの概念図

炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_u$: 0‰, $\delta^{13}\text{C}_u$: -27 ‰) をとり, 沿岸に近い河口域では植物プランクトンの炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_d$: 6‰, $\delta^{13}\text{C}_d$: -20‰) をとると仮定する¹⁴⁾. 流域内での健全な物質循環が保たれている場合には3次元マップ上でこの2点を結ぶ直線上に炭素・窒素安定同位体比をとると考えられ, 河口からの距離 L_1 における炭素・窒素安定同位体比は $L=L_1$ 平面と, 理想直線の交点と考えることができる. この理想点と実際に計測から得られた $L=L_1$ 平面における炭素・窒素安定同位体比の距離を $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}$ マップ上での最上流端の値 ($\delta^{15}\text{N}_u$, $\delta^{13}\text{C}_u$) と河口の値 ($\delta^{15}\text{N}_d$, $\delta^{13}\text{C}_d$) の距離で割ったものを乖離度 λ として次式のように定義する.

$$\lambda = \frac{\sqrt{(\delta^{13}\text{C}_i - \delta^{13}\text{C}_m)^2 + (\delta^{15}\text{N}_i - \delta^{15}\text{N}_m)^2}}{\sqrt{(\delta^{13}\text{C}_u - \delta^{13}\text{C}_d)^2 + (\delta^{15}\text{N}_u - \delta^{15}\text{N}_d)^2}} \quad (1)$$

ここに, $\delta^{15}\text{N}_i$, $\delta^{13}\text{C}_i$: $L=L_1$ における炭素・窒素安定同位体比の理想値, $\delta^{15}\text{N}_m$, $\delta^{13}\text{C}_m$: $L=L_1$ における炭素・窒素安定同位体比の計測値である. この値によって流域生態系の健全性の評価を行う. つまり, 乖離度が小さければ小さいほど流域における人間活動の影響が小さく, 自然状態に近い健全な水・物質循環の保たれている流域であると考えられる. また, 乖離度が大きい場合には流域における人間活動の影響で流域内での河川を通じた従来の水・物質循環が保たれておらず, 流域圏生態系が不健全な状態にあると考えることができる.

5. 沖縄本島における流域圏生態系の健全性評価

表-2に沖縄本島の9河川における乖離度の算出結果を示す (調査地点が3地点以下の4河川については割愛し

表-2 沖縄本島の各河川における乖離度

河川名	地点名	河口からの距離 (km)	乖離度
国場川	Stn.1	0.00	0.84
	Stn.2	0.90	1.80
	Stn.3	8.99	1.40
安里川	Stn.1	0.00	1.72
	Stn.2	1.00	2.26
	Stn.4	3.08	2.60
比謝川	Stn.1	0.00	1.15
	Stn.2	0.90	0.35
	Stn.3	1.80	0.76
	Stn.4	6.12	2.06
	Stn.5	12.57	2.41
報得川	Stn.1	0.00	1.29
	Stn.2	1.36	1.22
	Stn.4	9.00	1.92
天願川	Stn.1	0.00	1.05
	Stn.2	2.84	1.70
	Stn.3	5.33	1.92
	Stn.4	8.31	1.78
源河川	Stn.1	0.00	2.26
	Stn.2	1.30	0.34
	Stn.3	4.90	0.42
	Stn.4	7.10	0.39
羽地大川	Stn.1	0.00	0.95
	Stn.2	1.65	0.55
	Stn.3	2.71	1.45
大浦川	Stn.1	0.00	1.93
	Stn.2	0.70	0.37
	Stn.3	3.20	0.35
奥川	Stn.1	0.00	0.45
	Stn.2	1.12	0.33
	Stn.3	4.71	0.77

た). これらの河川のうち, 国場川, 安里川, 比謝川, 報得川, 天願川は沖縄本島南部および中部に位置する都市域を流れる河川であり, 源河川, 羽地川, 大浦川, 奥川は北部の山間部を流れる河川である (図-2). 南部の河川では乖離度が1を超える地点がほとんどであるのに対して, 北部の河川ではほとんど地点で1以下の値をとっている. また, 北部においても河口域に住宅地の広がる源河川や河口付近で河川改修工事が行われていた大浦川では乖離度が大きくなっている. 図-8に安里川と源河川の各観測地点における $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}$ マップ上での観測値と理想値を示す. 安里川では上流域のStn.3で河床堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ の値が10‰を超えており, その結果として乖離度も大きくなっていることがわかる. 源河川に関しては河口域 (Stn.1) での観測された炭素・窒素安定同位体比と理想値のずれが見られるものの, Stn.2からStn.4にかけてほぼ直線に近いライン上に炭素・窒素安定同位体比がのっており, 理想値に近い値をとっている.

これらの結果から $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}-L$ (河口からの距離) の3次元マップを用いた乖離度による本評価法は河川上流

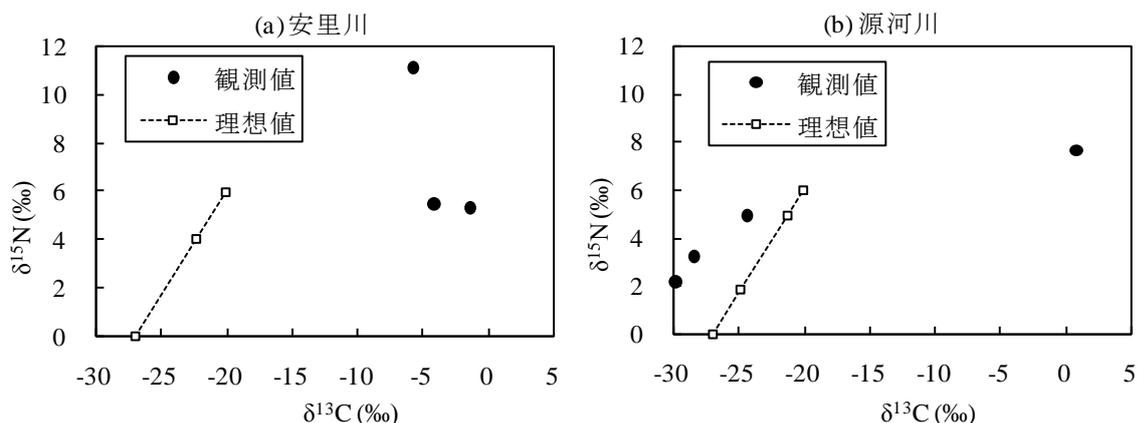


図-8 (a)安里川と(b)源河川の各調査地点における $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}$ マップ上での観測値と理想値

から河口域に至るまでの物質循環の健全性を十分に再現できていると考えられる。しかし、最上流端および河口での理想の炭素・窒素安定同位体比は対象とする地域の森林特性や沿岸域の状況を考慮して決定する必要があると考えられ、今後、日本列島全域に適用する際の課題といえる。また、 $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}-L$ (河口からの距離) の3次元マップ上で最上流端と河口を直線で結ぶのではなく、その河川の物質動態に大きく影響すると考えられる河床勾配の影響等を考慮する必要もあると考えられる。これらの課題を検討することによって、ここで提案された指標は日本全国の河川や世界の河川に適用可能であると考えられる。

6. 結論

流域圏生態系を一つの生命体とみなした時、その健全性は大動脈である河川を通じた水・物質循環によって評価できる。本研究では河床堆積物の炭素・窒素安定同位体比に着目して、 $\delta^{15}\text{N}-\delta^{13}\text{C}-L$ (河口からの距離) の3次元マップを用いて算出される理想的な河川上流から河口域までの炭素・窒素安定同位体比の分布と実際に計測された値との乖離度を新たな流域圏生態系健全性の指標として提案した。本評価法を様々な流域を有する沖縄本島に適用したところ、それぞれの流域の状態を適切に評価可能であることがわかった。

謝辞：本研究は国土交通省建設技術研究助成（研究代表者：赤松良久）の補助を受けている。沖縄本島の河川の環境問題の把握には(財)沖縄環境科学センター総合調整役宮良工氏の協力を得た。また、水質および底質の分析に関して、東京工業大学理工学研究科の池田駿介教授ならびに池田研究室の学生の皆様に機器の使用法等、多くのご指導を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 酒井均・松久幸敬：地球化学安定同位体，東京大学出版会，1996。
- 2) 金澤伸浩・齋藤修成・漆川芳國：底質の安定同位体比を指標とした子吉川の水環境評価，水環境学会誌，vol.31, No.1, pp.53-58, 2008。
- 3) 山本直樹・渡辺幸三・草野光・大村達夫：炭素・窒素安定同位体分析による河川底生動物群集の栄養構造の解明—宮城県広瀬川流域を例として—，水環境学会誌，vol.28, No.6, pp.385-392, 2005。
- 4) 永田俊，宮島利宏編：流域環境評価と安定同位体，京都大学出版，2008。
- 5) 辻本哲郎・戸田祐嗣・田代喬・尾花まき子・佐藤圭輔・椿涼太：自然共生型流域圏環境アセスメント手法に関する基礎的研究，河川技術論文集，vol.14, pp.367-372, 2008。
- 6) 沖縄建設弘済会編・沖縄総合事務局北部ダム事務所監修：羽地大川生物環境調査データ，1995。
- 7) 沖縄建設弘済会編・沖縄総合事務局北部ダム事務所監修：億首川生物環境調査データ，1998。
- 8) 沖縄建設弘済会編・沖縄総合事務局北部ダム事務所監修：奥間川生物環境調査データ，1998。
- 9) 沖縄建設弘済会編・沖縄総合事務局北部ダム事務所監修：大保川生物環境調査データ，1998。
- 10) 沖縄建設弘済会編・沖縄総合事務局北部ダム事務所監修：沖縄本島北部地域における生物調査データ第3巻，2002。
- 11) 沖縄建設弘済会編・沖縄総合事務局北部ダム事務所監修：沖縄における多目的ダム建設，2003。
- 12) 高津文人：窒素安定同位体比による富栄養化診断，水文・水環境学会誌，vol.19, No.5, pp.413-419, 2006。
- 13) 和田英太郎・水谷広・柄沢亭子・蒲谷裕子・南川雅男・米本昌平・辻亮：大槌水系における有機物の挙動，地球化学，vol.18, pp.89-98, 1984。
- 14) 和田英太郎：地球生態学，岩波書店，2002。

(2008. 9. 30受付)