

香川県の沿岸域における魚類の炭素・窒素安定同位体比の分布

中島沙知・山田佳裕・多田邦尚

The carbon and nitrogen stable isotope ratios of the fishes in the coastal area of Kagawa Prefecture

Sachi NAKASHIMA, Yoshihiro YAMADA, Kuninao TADA

The carbon and nitrogen stable isotope ratios of the fishes in the coastal area of Kagawa Prefecture were measured. The fishes were collected in the coastal areas of Kanonji, Aji, and Hiketa. The nitrogen stable isotope ratios differed in each area. The nitrogen stable isotope ratios of the fishes belong to the planktonic food-chain were similar in each areas. On other hand, for the fishes belong to the benthic food-chain, the nitrogen stable isotope ratios of Hiketa and Aji areas was higher than it of Kanonji area about three per mil. This result indicates that in Hiketa and Aji, the organic matter with the high nitrogen stable isotope ratio, such as the feed used in fishery culture and the organic matter produced in the eutrophic river, is supplied to the benthic food chain.

Key Words: nitrogen stable isotope, carbon stable isotope, coastal area, fishes, food chain, Seto Inland Sea.

1. はじめに

瀬戸内海は1970年代から赤潮が頻繁に発生するような富栄養化した海域であるが、1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法が制定されて以降、水質を改善する努力が続けられてきた。ここ数年、工業排水、畜産排水など汚染源が特定できる場所の排出に関する規制が強化され、水質は改善してきた。しかしながら、現在でも断続的に赤潮が発生している。

これまでの瀬戸内海のモニタリング指標としては、窒素、リン、CODなどが挙げられるが、効果的な環境保全を行うには生態系を解析できる新しい指標が必要である。

生物を構成する生元素には、軽い元素と重い元素があり（例えば ^{12}C と ^{13}C ）、これらが存在する割合は、生態系内での化学反応などを通して変化する。このことから、これらの比を測ることによって、生態系内の物質循環や食物網を解析することができる⁽¹⁻⁵⁾。水域の有機物として重要な一次生産者は生成・生育環境に対応した炭素、窒素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 値、 $\delta^{15}\text{N}$ 値）を示す。例えば、陸上高等植物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -27% 、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は 0% 程度と低い値を示すのに対し、海洋の植物プランクトンはそれぞれ -20% 、 6% 程度と高い値を示す⁽⁶⁾。また、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は植物プランクトンの活性が高くなると値は上昇し⁽⁷⁾、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は生態系内において硝化、脱窒が活発に起こっていると値が高くなる^(8,9)。生態系内の $\delta^{13}\text{C}$ 値、 $\delta^{15}\text{N}$ 値の変動は生物活動によるものだけではなく、

基質の $\delta^{13}\text{C}$ 値、 $\delta^{15}\text{N}$ 値を反映した値も示す。例えば、降水中の $\delta^{15}\text{N}$ は 0% 付近を示すのに対し、農業・畜産排水、生活廃水は $3\sim 7\%$ 以上の値を示す^(10, 11)。また、これらの排水は、集水域からの流入過程で値が上昇することもある。このように、 $\delta^{13}\text{C}$ 値、 $\delta^{15}\text{N}$ 値から瀬戸内海における生元素の挙動を解析することにより、生態系内で起こっている生物地球化学的な諸過程を明らかにすることができると考えられる。

そこで本研究では、瀬戸内海における生態系の評価手法に資することを目的に、香川県沿岸域に生息する魚類の $\delta^{13}\text{C}$ 値、 $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定し、その分布傾向を明らかにした。

2. 方法

魚類の採取は2001年7月に行った。観音寺漁協、庵治漁協、引田漁協において、その日に捕獲された魚類（回遊性、底生性各種類；表1）数個体を得た。養殖された魚類は除いた。

採取した魚類は、筋肉を採取し、乾燥後、粉末状にした。その後クロロホルム：メタノールを2：1の割合で混合した試薬で12時間脱脂を行い、再び乾燥させ、炭素、窒素安定同位体比分析用の試料とした。炭素、窒素安定同位体比は元素分析計（NC2500, Thermo Fisher Scientific K. K., Waltham, USA）と連結した質量分析計（DELTA plus, Thermo Fisher Scientific K. K., Waltham, USA）で分析した。値は以下の式によって δ 値で表し

た.

$$\delta X = [R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1] \times 1000 \quad (\%)$$

$$[X = {}^{15}\text{N} \text{ または } {}^{13}\text{C}, R = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N} \text{ または } {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$$

$$\text{Standard} = \text{大気中の窒素ガスまたはPDB}]$$

各魚類の学名は、原色日本海水魚類図鑑⁽¹²⁾、原色日本大型甲殻類図鑑⁽¹³⁾によった。また、各魚類の生態は前述の図鑑に加え、図説魚と貝の大事典⁽¹⁴⁾を参考にした。

3. 結果及び考察

1) 観音寺沿岸域

観音寺沿岸域(図1)における回遊性の魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が $14.3 \pm 0.8 \sim 16.6 \pm 1.7\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-16.6 \pm 0.6 \sim -15.2 \pm 0.3\%$ であった(表1)。一般的に食物連鎖では、栄養段階が1つ上がるごとに、 $\delta^{15}\text{N}$ 値で3.3%、 $\delta^{13}\text{C}$ 値で1%上昇するとされている^(15, 16)。マルアジ、コノシロ、カタクチイワシの $\delta^{15}\text{N}$ 値は、 $14.3 \pm 0.8 \sim 15.7 \pm 0.5\%$ であり、海洋の植物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ 値は6%⁽⁶⁾であることから、これらの魚類は、栄

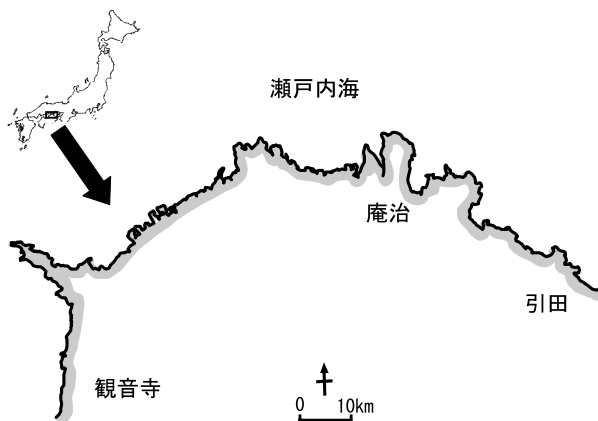


図1 香川県における沿岸域の概要

養段階が3であると推定できる。また $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-16.6 \sim -15.8\%$ であることからこれらの魚類は、前述の濃縮率を適用した場合、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-19 \sim -18\%$ の植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に属すると考えられる。また、アカカマスは $\delta^{15}\text{N}$ 値が $16.6 \pm 1.7\%$ であることから、栄養段階が4であり、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が -15.2% であることから、上記の魚類と同様、植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に属すると考えられる。

底生性の魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が $12.2 \pm$

$0.4 \sim 17.4 \pm 0.2\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-17.8 \pm 0.8 \sim -14.7 \pm 0.0\%$ であり、 $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値ともに種によって値に違いがみられた(表1)。 $\delta^{15}\text{N}$ 値はクルマエビやヨシエビが最も低い値であり、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が $12.2 \pm 0.4 \sim 12.6 \pm 0.3\%$ であった(表1)。次いで、シロギス、イボダイ、メイタガレイ、マダコ、ガザミが $14.0 \pm 1.4 \sim 15.6 \pm 0.7\%$ 、マアナゴ、マダイ、シャコが $16.1 \pm 0.4 \sim 17.4 \pm 0.2\%$ であった。従って、栄養段階はゴカイや藻類、動物の死骸などを餌とするクルマエビ、ヨシエビが2、シロギス、イボダイ、メイタガレイ、マダコ、ガザミが3、マアナゴ、マダイ、シャコが3~4であると思われる。 $\delta^{13}\text{C}$ 値はメイタガレイが $-17.8 \pm 0.8\%$ 、シロギスが $-16.5 \pm 0.2\%$ 、イボダイが $-16.9 \pm 0.3\%$ 、マダコが $-14.7 \pm 0.0\%$ 、ガザミが $-15.4 \pm 0.3\%$ であった。これらの魚類のうち、栄養段階が3のシロギス、イボダイ、ガザミは前述の $\delta^{13}\text{C}$ 値が -18% 程度の沿岸の植物プランクトンの寄与が大きい食物連鎖に属していることが推定される。一方で、同じ栄養段階である、メイタガレイは $\delta^{13}\text{C}$ 値が若干低く、マダコは若干値が高かった。海域よりも $\delta^{13}\text{C}$ 値が低い有機物の起源としては、陸起源の有機物が考えられる。陸上高等植物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -27% 程度⁽⁶⁾、湖沼の植物プランクトンは $-30 \sim -25\%$ ⁽¹⁷⁾であることから、それを起源とする河川の有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は低い。このことから、メイタガレイは若干、陸起源有機物の影響を受けた食物連鎖に属すると考えられる。一方で、沿岸域の植物プランクトンよりも $\delta^{13}\text{C}$ 値が高い有機物としては、付着藻類が挙げられる⁽¹⁸⁾。このことから、マダコは付着藻類の寄与がある食物連鎖に属すると考えられる。また、栄養段階が2のクルマエビ、ヨシエビの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-15.4 \sim -15.6\%$ 、栄養段階が3~4のマアナゴ、マダイ、シャコの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-15.7 \sim -15.1\%$ であることから、これらの魚類は植物プランクトンの寄与が大きい食物連鎖に属していると考えられる。

以上より、観音寺沿岸域では、魚類の多くは沿岸域の植物プランクトンを出発点とする食物連鎖であり、メイタガレイとマダコは沿岸域の植物プランクトンに加え、それぞれ、陸起源有機物や付着藻類の寄与を受けていると思われる。

2) 庵治沿岸域

庵治沿岸域(図1)における回遊性の魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は、スズキがそれぞれ、 $19.5 \pm 0.7\%$ 、 $-14.7 \pm 0.5\%$ 、マルアジがそれぞれ $14.5 \pm 0.6\%$ 、 $-16.1 \pm 0.1\%$ であった(表1)。スズキはマルアジよりも $\delta^{15}\text{N}$ 値が高いことから、栄養段階が1段階高いと考えられ、スズキが栄養段階4、マルアジが栄養段階3であると考えられ

表1 観音寺、庵治、引田各沿岸域における魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値

和名	学名	観音寺沿岸域		庵治沿岸域		引田沿岸域	
		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
回遊性の 魚類	アカカマス	<i>Sphyræna pinguis</i>	16.6±1.7	-15.2±0.3			
	スズキ	<i>Lateolabrax japonicus</i>			19.5±0.7	-14.7±0.5	19.9±0.2 -15.9±0.7
	マアジ	<i>Trachurus japonicus</i>	14.9	-16.6			17.5±0.3 -17.0±0.2
	マルアジ	<i>Decapterus maruadsi</i>	15.7±0.5	-16.0±0.5	14.5±0.6	-16.1±0.1	15.5±0.6 -15.8±0.4
	コノシロ	<i>Konosirus punctatus</i>	15.7±0.1	-15.8±0.4			
	マイワシ	<i>Sardinops melanostictus</i>					16.9±0.3 -16.9±0.3
	カタクチイワシ	<i>Engraulis japonicus</i>	14.3±0.8	-16.6±0.6			
	ヤリイカ	<i>Loliyo breckeri</i>					17.0±0.4 -16.3±0.4
底生性の 魚類	マアナゴ	<i>Conger myriaster</i>	16.3±0.8	-15.4±0.3			
	マダイ	<i>Pagrus major</i>	17.4±0.2	-15.7±0.1			
	マゴチ	<i>Platycephalus sp.</i>					19.9 -14.4
	メバル	<i>Sebastes inermis</i>			19.2±0.3	-15.6±0.2	18.6±0.2 -16.0±0.5
	キュウセン	<i>Halichoeres poecilopterus</i>			18.8±0.9	-14.2±0.4	17.4 -13.9
	シロギス	<i>Sillago japonica</i>	15.6±0.7	-16.5±0.2			
	イボダイ	<i>Psenopsis anomala</i>	15.4±0.4	-16.9±0.3			17.9±0.3 -16.1±0.1
	メイタガレイ	<i>Pleuronichthys cornutus</i>	14.3±0.8	-17.8±0.8	16.8±0.8	-17.0±0.4	17.1 -14.3
	マダコ	<i>Octopus vulgaris</i>	14.0±1.4	-14.7±0.0	16.6±0.9	-15.5±0.7	
	テナガダコ	<i>Octopus minor</i>					17.3±0.3 -13.5±0.6
	コウイカ	<i>Sepia (Platysepia) esculenta</i>					14.4±0.1 -14.5±0.1
	シャコ	<i>Oratosquilla oratoria</i>	16.1±0.4	-15.1±0.1			
	ガザミ	<i>Portunus (Portunus) trituberculatus</i>	14.5±0.3	-15.4±0.3			
	クルマエビ	<i>Penaeus (Melicertus) japonicus</i>	12.6±0.3	-15.6±0.5			
ヨシエビ	<i>Metapenaeus ensis</i>	12.2±0.4	-15.4±0.3				

る。また、マルアジは $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-16.1\pm 0.1\%$ であることから、沿岸の植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に属していることが考えられる。一方で、スズキの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-14.7\pm 0.5\%$ と高いことから、植物プランクトンを出発点とする魚類に加えて、付着藻類を出発点とする魚類も餌としていることが考えられる。

底生性の魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、メイタガレイとマダコがそれぞれ $16.8\pm 0.8\%$ 、 $16.6\pm 0.9\%$ 、メバルとキュウセンは若干値が高く、それぞれ、 $19.2\pm 0.3\%$ 、 $18.8\pm 0.9\%$ であった。このことから、メバルとキュウセンはメイタガレイとマダコより栄養段階が高いと考えられ、メイタガレイとマダコが栄養段階3~4、キュウセン、メバルは4であると考えられる。 $\delta^{15}\text{N}$ 値から推定した栄養段階は、観音寺沿岸域と比較して若干高いことから、庵治沿岸域の海域における食物連鎖の起源となる有機物には、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が高い人間活動由来の有機物が影響を及ぼしているかもしれない。また、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は、メイタガレイが $-17.0\pm 0.4\%$ 、メバルとマダコがそれぞれ、 -15.6

$\pm 0.2\%$ 、 $-15.5\pm 0.7\%$ 、キュウセンが $-14.2\pm 0.4\%$ であった。マダコはメバルよりも栄養段階が1低いにもかかわらず、 $\delta^{13}\text{C}$ 値はメバルと同程度であった。このことから、メイタガレイ、メバルは沿岸の植物プランクトンの寄与が大きい食物連鎖に属し、マダコとキュウセンは付着藻類の寄与がある食物連鎖に属していると考えられる。

3) 引田沿岸域

引田沿岸域(図1)における回遊性の魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が $15.4\pm 0.5\sim 19.9\pm 0.2\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-17.5\pm 0.3\sim -15.8\pm 0.4\%$ であった(表1)。 $\delta^{15}\text{N}$ 値は、マルアジで $15.5\pm 0.6\%$ 、スズキ、マアジ、マイワシ、ヤリイカで $17.0\pm 0.4\sim 19.9\pm 0.2\%$ であった。このことからこれらの魚類の栄養段階は、マルアジが3、マアジやマイワシは3~4、スズキ、ヤリイカが4であると考えられる。また、マルアジの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-15.8\pm 0.4\%$ であることから、植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に

属していると考えられる。また、栄養段階が3~4であるマアジ、マイワシの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-17.0\sim-16.9\%$ 、栄養段階が4であるスズキ、ヤリイカは $-16.3\sim-15.9\%$ であることから、これらの魚類は植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に属していると考えられる。

底生性の魚類は、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は $14.4\pm 0.1\sim 19.9\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-16.0\pm 0.5\sim -13.9\%$ であった(表1)。 $\delta^{15}\text{N}$ 値はコウイカが $14.4\pm 0.1\%$ 、キュウセン、イボダイ、メイトガレイ、テナガダコは $17.1\%\sim 17.9\%$ 、マゴチ、メバルがそれぞれ、 19.9% 、 $18.6\pm 0.2\%$ であった。このことから、これらの魚類の栄養段階は、コウイカが2~3、キュウセン、イボダイ、メイトガレイ、テナガダコが3~4、マゴチ、メバルが4であると考えられる。これらも庵治沿岸域と同様、観音寺沿岸域と比較して若干高めである。 $\delta^{13}\text{C}$ 値はイボダイが $-16.1\pm 0.1\%$ 、キュウセン、メイトガレイ、テナガダコが $-14.3\sim -13.5\%$ であった。このことから、イボダイは植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に属すると考えられる。また、キュウセン、メイトガレイ、テナガダコの $\delta^{13}\text{C}$ 値は特に高かった。これは、付着藻類の影響を強く受けていると考えられるが、人間活動由来の $\delta^{13}\text{C}$ 値の高い有機物の影響を受けていることも考えられる。また、栄養段階が2のコウイカの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-14.5\pm 0.1\%$ 、栄養段階が4のマゴチの $\delta^{13}\text{C}$ 値は -14.4% と高く、メイトガレイなどの $\delta^{13}\text{C}$ 値が高い食物連鎖に属すると考えられる。一方で、栄養段階が4のメバルの $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-16.0\pm 0.5\%$ であり、イボダイと値が似ていることから、植物プランクトンを出発点とする食物連鎖に属すると考えられる。

4) 各沿岸域における魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の比較

観音寺、庵治、引田の各沿岸域の2ヶ所以上で採取された魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値を比較してみる。対象とする魚類は、マルアジ、メイトガレイ、キュウセン、スズキ、マダコ、メバル、イボダイの7種である。これらの $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の平均値をプロットしたものを図2に示した。

観音寺、庵治、引田の各沿岸域で採取した回遊性の魚類であるマルアジの $\delta^{15}\text{N}$ 値は $14.5\sim 15.7\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は $-16.1\sim -15.8\%$ でよく似た値であり、栄養段階は3であると考えられた。そこで、マルアジの $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の平均値から、瀬戸内海の植物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値を見積もってみる。これまで報告されている $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の濃縮率に従えば、瀬戸内海の植物プランクトンの値は $\delta^{15}\text{N}$ 値が約9%、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が約 -18% と見積もられる。外洋の植物プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値はそれぞれ、約6%、約 -20% である⁽⁶⁾こ

とから考えると、瀬戸内海の植物プランクトンの値は若干高いといえる。一般的に $\delta^{15}\text{N}$ 値は基質である栄養塩の $\delta^{15}\text{N}$ 値を反映して高くなり、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は一次生産が活発化したときに値が上昇する。基質の $\delta^{15}\text{N}$ 値が高くなる要因としては、農業、畜産排水、生活排水の流入、硝化・脱窒が活発に起こることが考えられる⁽⁸⁻¹¹⁾。この海域での脱窒活性が他の海域と比較して同程度であるとすると、瀬戸内海においては、陸域や沿岸域において人為的に負荷される窒素が食物連鎖に大きく寄与しており、一次生産も活発であることが示唆される。

底生性の魚類は、観音寺沿岸域で採取された魚類は $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値それぞれ、 $14.0\sim 15.4\%$ 、 $-17.8\sim -14.7\%$ であった。これに比べて、庵治、引田各沿岸域で採取された魚類は $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値ともに高い値であり $\delta^{15}\text{N}$ 値で $16.6\sim 19.2\%$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値で $-17.0\sim -13.9\%$ であった(図2)。庵治、引田各沿岸域の底生性の魚類であるメバルとキュウセンの $\delta^{15}\text{N}$ 値は、Takai et al.⁽¹⁹⁾で示されている値よりも4%程度高かった。また、マダコ(引田沿岸域を除く)とメイトガレイの $\delta^{15}\text{N}$ 値は庵治、引田各沿岸域は観音寺沿岸域と比較して、2.5~3.3%高かった。この理由として、庵治、引田各沿岸域の方が観音寺沿岸域と比較して食物連鎖の出発点となる有機物の $\delta^{15}\text{N}$ 値が高いことが考えられる。マダコとメイトガレイの栄養段階を観音寺沿岸域と同様に3であると仮定すると、各々の食物連鎖の起源としての有機物の $\delta^{15}\text{N}$ 値

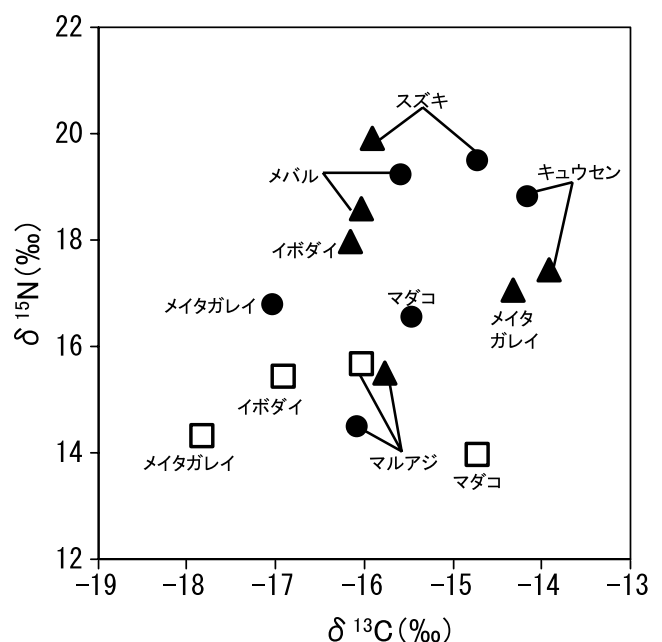


図2 観音寺、庵治、引田の各沿岸域における魚類の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の分布 (□, 観音寺沿岸域; ●, 庵治沿岸域; ▲, 引田沿岸域)

は、観音寺沿岸域で7.6%、庵治、引田各沿岸域で10.2%と推定される。沿岸の付着藻類の値も瀬戸内海の植物プランクトンと同様（約9%）であると考えられることから、10.2%という値は非常に高い値である。そのため、海洋で生産された有機物以外の $\delta^{15}\text{N}$ 値が高い有機物が食物連鎖に大きく寄与していると考えられる。庵治、引田沿岸域においては、養殖漁場が多く、その餌料は栄養段階3の魚類を用いることが多い⁽²⁰⁾。一般的に、魚類は、藻類などに比べて $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が高い。これらの海域では、養殖の餌料に用いられた有機物が周辺の食物連鎖に大きく影響していることが考えられる。

以上をまとめると、瀬戸内海沖においては、陸域からの人間活動由来の窒素の負荷が海域の食物連鎖に寄与していることがわかった。特に、観音寺沿岸域よりも、庵治、引田各沿岸域において、その割合が大きいことがわかった。

このような安定同位体比を用いた物質循環の解析は生態系を理解する上で有効であることがわかる。本研究においては、指標魚類として、回遊性の魚類はマルアジ、底生性の魚類はメイタガレイとマダコが有用であることが示された。今後、さらに生物の選定を行い、安定同位体比を指標としたモニタリングを行うことが瀬戸内海の環境を捉える上で必要であろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり、庵治漁業協同組合、引田漁業協同組合、観音寺漁業協同組合にサンプル採取について協力していただきました。また、熊本県立大学の堤裕昭教授に分析機器を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- (1) 小倉紀雄, 木村健司, 関川朋樹, 山田和人, 南川雅男: 東京湾内湾部における懸濁有機物の炭素安定同位体比. 地球化学, 20, 13-19 (1986).
- (2) YOSHIOKA, T., WADA, E. and SAJO, Y.: Isotopic Characterization of Lake Kizaki and lake Suwa. *Jpn. J. Limnol.*, 49, 119-128 (1988).
- (3) 小川浩史, 青木延浩, 近磯晴, 小倉紀雄: 夏期の東京湾における懸濁態および堆積有機物の炭素安定同位体比. 地球化学, 28, 21-36 (1994).
- (4) 山田佳裕, 吉岡崇仁: 水域生態系における安定同位体解析. 日本生態学会誌, 49, 39-45 (1999).
- (5) 山田佳裕, 中島沙知: 流域研究における標準的指標としての安定同位体比の利用. 陸水学雑誌, 64 (3), 197-202 (2003).
- (6) WADA, E., MINAGAWA, M., MIZUTANI, H., TSUJI, T., IMAIZUMI, R. and KARASAWA, K.: Biogeochemical Studies on the Transport of Organic Matter along the Otsuchi River Watershed, Japan. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 25, 321-336 (1987).
- (7) NAKATSUKA, T., HANDA, N., WADA, E. and WONG, C. S.: The dynamic changes of stable isotopic ratios of carbon and nitrogen in suspended and sedimented particulate organic matter during a phytoplankton bloom. *J. Mar. Res.*, 50, 267-296 (1992).
- (8) BLACKMER, A. M. and BREMNER, J. M.: Nitrogen isotope discrimination in denitrification of nitrate in soils. *Soil. Biol. Biochem.*, 258 (14), 8613-8617 (1977).
- (9) YAMADA, Y., UEDA, T. and WADA, E.: Distribution of Carbon and Nitrogen Isotope Ratios in the Yodo River Watershed. *Jpn. J. Limnol.*, 57, 4 (2), 467-477 (1996).
- (10) HEATON, T. H. E.: Isotopic studies of nitrogen pollution in the hydrosphere and atmosphere: a review. *Chemical Geology (Isotopic geoscience section)*, 59, 87-102 (1986).
- (11) 米山忠克: 土壌-植物系における炭素, 窒素, 酸素, 水素, イオウの安定同位体自然存在比: 変異, 意味, 利用. 日本土壌肥料学会誌, 58 (2), 252-268 (1987).
- (12) 蒲原稔治, 岡村収: 原色日本海水魚類図鑑 (I), (II). (株) 保育舎, (1985).
- (13) 三宅貞祥: 原色日本大型甲殻類図鑑 (I), (II). (株) 保育舎, (1981).
- (14) 魚類文化研究会編: 図説 魚と貝の大事典. 柏書房株式会社, (1997).
- (15) DENIRO, M. J. and EPSTEIN, S.: Influence of diet on the distribution of carbon isotope in animal. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 42, 495-506 (1978).
- (16) MINAGAWA, M. and WADA, E.: Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 48, 1135-1140 (1984).
- (17) YOSHIOKA, T., WADA, E. and HAYASHI, H.: A stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake. *Ecology*, 75, 835-846 (1994).

- (18) FRANCE, R. L.: Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **124**, 307-312 (1995).
- (19) TAKAI, N., MISHIMA, Y., YOROZU, A. and HOSHIKA, A. : Carbon sources for demersal fish in the western Seto Inland Sea, Japan, examined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses. *Limnol. Oceanogr.*, **47** (3), 730-741 (2002).
- (20) YAMADA, Y., YOKOYAMA, H., ISHIHI, Y. and AZETA, M. : Historical feeding analysis in fish farming based on carbon and nitrogen stable isotope ratio in sediment. *Fish. Sci.*, **69** (1), 213-215 (2003).

(2006年10月31日受理)