

炭素・窒素安定同位体分析によるカタクチイワシとマイワシの
栄養段階に関する研究

**Study on Trophic Levels for the Japanese Anchovy and Sardine,
based on bulk Carbon / Nitrogen and
Amino Acids Nitrogen Stable Isotope Analyses**

宮 地 俊 作

2016

論文の内容の要旨

序論

カタクチイワシ *Engraulis japonicus* およびマイワシ *Sardinops melanostictus* は、漁業資源として重要であるとともに、魚や鳥などの大型捕食者に捕食される海洋食物網の主要な中間構成種でもある。したがって、バイオマスが大きい両種の摂餌生態に関する知見は、海洋生態系における捕食と被捕食の関係を考える上で重要といえ、それらの栄養段階（以後 TL）を解明することが望まれる。

これまで、鰓耙の構造と胃内容物の観察とから、マイワシは主に植物プランクトン食、カタクチイワシは動物プランクトン食といわれてきた。しかしながら、胃内容物の査定計量は多大な労力を要し、しかも、捕獲直前に捕食した餌の情報しか得られないために、仮に摂餌対象が明確化できたとしても、栄養分として同化されたか否かは分からないといった問題がある。

ここで、食性を知る別の方法に、生体中に含まれる窒素の同位体比を用いるものがある。これは、窒素含有化合物の代謝にともなう同位体効果に基づいており、「捕食者の同位体比と被捕食者の同位体比との差が一定」という経験的な事実を利用している。この方法で、個体全体や組織中の窒素安定同位体比（以後 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ）から TL を推定するのがバルク法と呼ばれる食性解析手法である。バルク法は、胃内容物調査ではわかりにくかった食性情報が得られることから、近年、水産研究において注目されている。なお、個体全体や組織中の炭素安定同位体比（以後 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ ）は、窒素の安定同位体比と較べて食物連鎖において大きな変化を示さないことから、食物網の起点を推察することに広く用いられている。

一般に、生物由来の炭素や窒素の同位体比は、その生物が属する食物連鎖上の一次生産者の同位体比に栄養段階ごとの同位体効果が加わったものになる。したがって、研究対象となる生物の TL をバルク法で確定するには、当該食物連鎖上で TL が明らかな生物（たとえば一次生産者）の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を知ることが不可欠である。しかしながら、これは多くの場合、容易ではない。

特に水系生態系においては一次生産者である植物プランクトンと一次消費者である動物プランクトンを分取すること自体が困難であると同時に、その同位体比が時間と空間で変動する。特に沿岸域においては、同所個体群中に他海域由来の個体が混在していることが考えられ、「TL の変化」と「異なる食物網に属する個体群の混在」との分別が難しく、カタクチイワシやマイワシのような海洋生態系間を移動する回遊性浮魚類の TL に関する同位体比を用いた知見はいまだ少ない。このため、カタクチイワシの $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が相模湾では大きい変動を示すことは知られているものの、成魚の TL および食源が異なる個体群の混在するダイナミクスについては解明が進んでいない。

このような状況下、一次生産者など TL の明らかな生物の同位体基準を必要とせず、捕食者の組織に含まれるアミノ酸（グルタミン酸とフェニルアラニン）の窒素同位体比を分析することで TL を求める方法が最近、開発された。

そこで本研究は、このアミノ酸法と呼ばれる手法に基づいて得られる TL を、親潮外洋域のカタクチイワシとマイワシおよび相模湾のカタクチイワシについて求め、アミノ酸法の適用可能性を吟味するとともに、バルク法と組み合わせて、親潮外洋域と相模湾における食物網の違いの解明に資することを目的とした。

材料および方法

・ 採集地および時期

相模湾における試料の捕獲は2006年から2008年にわたっておこなわれた。カタクチイワシは江ノ島沖約1 km の定置網で、シラスは7月、10月、11月に片瀬・江ノ島漁業協同組合の協力を得て沿岸船曳漁で採取した。得られた試料は保冷して研究室に持ち帰り-80°Cで凍結保存した。また、鹿島灘では2006年12月と2007年10月に大洗町漁業協同組合の協力を得て採取した。伊東沖の未成魚と成魚は2007年12月に静浦漁業協同組合の協力を得て採取した。採取された鮮魚は冷凍保存し研究室に運搬された。相模湾食物網の起点に関する現地性指標として潮間帯の転石の石面付着藻類（以後EOM）を2103年5月と10月に江ノ島の磯で採集した。外洋域におけるカタクチイワシおよびマイワシの試料は、2010年9月～10月に水産総合研究センター中央水産研究所の調査用船北鳳丸の中層トロールにより北西太平洋の親潮外洋域で捕獲され、直ちに冷凍保存され研究室に運搬された。試料はすべて前処理まで凍結保存された。

・ 前処理およびバルク安定同位体分析

集められた個体試料はサイズにより区分し、シラス: 標準体長（以後SL）17mm から40mm未満（その内でSLが25mmまでのものを後期仔魚とする）、未成魚: SL40mmから90mm未満、成魚: SL90mm以上とした。カタクチイワシおよびマイワシはSLを測定後、成魚と未成魚は胸びれ後ろの背側白色筋を摘出し、前処理をするまですべて凍結保存（-30°Cあるいは-80°C）した。脱脂はFolch *et al.*(1957)の方法に準じクロロフォルム-メ

タノール液 (2:1) を用いた。シラスの内、後期仔魚については1個体だけでは分析に必要な量が得られなかったため数個体をまとめて1試料とした。その結果、33個体から5つの試料を得た。後期仔魚に該当しないものは1個体で1試料とした。EOMは炭酸塩を取り除くために1日間濃塩酸の蒸気に晒し、脱灰処理した。すべての試料は粉末化し、分析するまで乾燥状態で保存した。試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ と $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は、日本大学生物資源科学部生物環境科学研究センターの全自動窒素炭素安定同位体比質量分析計(EA/IRMS) ANCA-SL(PDZ Europa)を用い、筋肉組織は炭素と窒素を同時に、付着藻類は別々に、測定した。測定精度は $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \leq 0.1\text{‰}$ 、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} \leq 0.2\text{‰}$ である。

・アミノ酸の窒素安定同位体分析

アミノ酸の窒素安定同位体比は海洋研究開発機構において測定した。機器の構成は、GC-C/TC IIIインターフェイスで Thermo Fischer Scientific Deltaplus XP IRMS に連結された Agilent Technologies 689N GC(GC/C/IRMS)であり、分析精度は0.4‰である。

アミノ酸法による栄養段階(以後、 $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$)は、得られた窒素安定同位体比から以下に示す Chikaraishi *et al.* (2009)による式で求めた。

$$\text{TL}_{\text{Glu/Phe}} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} - 3.4)/7.6 + 1$$

ここで $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ は、それぞれ試料中のグルタミン酸とフェニルアラニンの窒素同位体比である。

・統計処理

サンプルの正規性は χ^2 適合度検定, 等分散性は F 検定, 2 群の差の検定は Student's t -test または Mann-Whitney U -test を Satcel2 (柳井, 2007) を用いて実施した. 正規性および等分散性の検定は $P > 0.05$ で判断した. 群間の差は $P < 0.05$ のとき有意と判断した.

相模湾で採取されたカタクチイワシのバルク法による栄養段階

北西太平洋親潮外洋域で得られたカタクチイワシ成魚の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は $-19.8 \pm 0.4\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は $8.9 \pm 0.9\text{‰}$ であった. 一方, 相模湾では $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は $-17.4 \pm 1.5\text{‰}$ であったのに対し, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は $11.2 \pm 2.0\text{‰}$ であった.

外洋域での成魚について, Aita *et al.* (2011) による親潮域の植食性動物プランクトン *Eucalanus bungii* ($\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} = 5.1\text{‰}$) を食源と仮定し TL をバルク法で推定した値 (以後 TL_{bulk}) は 2.9 から 3.3 の範囲であり, 単純平均は 3.1 であった. 一方, 相模湾については, 現地性の後期仔魚の TL が 3 であると仮定して成魚の TL_{bulk} を 84 個体について求めると単純平均で 3.0 であり, 最小値は 2.2, 最大値は 5.2 であった.

相模湾における TL_{bulk} の単純平均値は外洋域と同様であったものの, 個体ごとの違いが余りに大きく, これが実際の TL を反映しているとは考え難い. この点について, Tanaka *et al.* (2008) は様々な個体群の混在を示唆しており, さらに宮地他 (2013) は春~初夏にかけて相模湾で採取した大型個体群では $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ も $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ も低いことを報告し, 鹿島灘, 駿河湾など周辺海域の大型個体の値に近いこともあわせて, 湾外からの個体群の来遊の可能性を推

察した.

アミノ酸法に基づくカタクチイワシとマイワシの個体ごとの $TL_{Glu/Phc}$ の決定 と食物連鎖の再構築

相模湾個体群に周辺海域からのものが混在している可能性を確かめるために、季節変動を排除した5月に一回の採取で得た試料の中から、 $\delta^{15}N_{bulk}$ が最も低い値を示す試料 M-01 ($\delta^{15}N_{bulk}=9.1\%$) と最高値を示す試料 M-05 ($\delta^{15}N_{bulk}=16.2\%$) を選び、アミノ酸法により $TL_{Glu/Phc}$ を求めた。また、比較のために、典型的な外洋域である北西太平洋親潮外洋域で得られたカタクチイワシの中で、その $\delta^{15}N_{bulk}$ が最も低い値 (8.1%) を示したもの (試料名 T23k-04) , マイワシでも同様に最低値 (7.9%) を示したもの (試料名 T23M-04) についても、 $TL_{Glu/Phc}$ を求めた。

その結果、外洋域のカタクチイワシでは *E. bungii* を食源と仮定したバルク法での推定値に近い値である $TL_{Glu/Phc}=2.8$ が得られ、これから推定される食源の $\delta^{13}C_{bulk}$ と $\delta^{15}N_{bulk}$ は栄養段階2で -20.7‰と 5.4‰、栄養段階1では -21.7‰と 2.0‰となった。栄養段階1の推定値は、Aita *et al.*(2011)による親潮域の植物プランクトンの実測値 ($\delta^{13}C_{bulk}= -21.8$, $\delta^{15}N_{bulk}=2.5\%$) に近く、これら外洋域のカタクチイワシの食源は外洋域の現地性食源と判断された。

また、相模湾のカタクチイワシ M-01 は $TL_{Glu/Phc}=3.2$, M-05 では $TL_{Glu/Phc} 3.1$ となり、同

じ TL であることが示された。このことから、M-01 と M-05 は異なった食物網に属していると考えられる。すなわち、M-05 が属する食物連鎖の一次生産者の同位体比は $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} = -16.8\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} = 9.0\text{‰}$ と求められ、これは相模湾の現地性指標である江ノ島の EOM の値 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} = -16.9\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} = 7.1\text{‰}$) に近い。一方、M-01 では一次生産者の同位体比は $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} = -20.9\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} = 1.5\text{‰}$ と求められ、Takai *et al.* (2007) による伊豆半島沖の3月の粒子状有機物質 (POM ; TL 1 に相当する) の実測値 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} = -20.8\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} = 0.7\text{‰}$) に近い。相模湾外を食物連鎖の起点にしていると考えられる伊豆半島沖の後期仔魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は Takai *et al.* (2007) によると 8.6‰ であるが、この後期仔魚の TL が 3 であるとして M-01 の TL を求めると 3.1 となる。これは、M-01 が相模湾外から流入した個体であることを強く示唆し、相模湾では食物網の起点が異なる個体が混在していることが示されたと言えよう。

一方、既に述べたように外洋域のカタクチイワシ (T23k-04) の $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ は 2.8 であったが、同所で同時に捕獲されたマイワシ (T23M-04) の $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ についても 2.8 が得られた。このことから、親潮海域において年間を通して卓越している *E. bungii* などが、鰓耙の構造が粗いカタクチイワシでも細かいマイワシでも共通して、主要な餌となっていたことが推察される。

以上から、バルク法による TL 推定は試料内変動が小さい場合は有効であるものの、試料内変動が大きい場合には誤った結果を導いてしまうことが示された。その一方でアミノ酸法は、試料内変動が大きい場合、回遊魚の摂餌履歴が異なる場合でも、TL について矛盾のない結果を与えた。

今後の展望

今回, アミノ酸法によって食物連鎖の起点の違いを明らかにすることができたことから, アミノ酸法が, 生態系間を移動する個体の存在などのために困難であった沿岸域などでの捕食と被捕食の関係を理解するのに有用なツールであることが示された. 今後, 固相抽出などによる試料調整法の改良と, 多くの関連するデータが蓄積されることとで, アミノ酸法は, 海洋生態系における食物網構造解明の発展に寄与することだろう.

目 次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4

第2章 研究の方法

2.1. 安定同位体比の定義	6
2.2. バルク法による栄養段階(TL _{bulk})	6
2.3. バルク法による栄養段階の問題点	
2.3.1. これまでの食性研究と栄養段階	7
2.3.2. TL _{bulk} 推定と同位体基準	9
2.3.3. 回遊魚類の生態と安定同位体比	10
2.4. アミノ酸の特定化合物の窒素同位体分析に基づく栄養段階(TL _{Glu/Phe})	
2.4.1 アミノ酸法による TL _{Glu/Phe} の定義	12
2.4.2 原理	13
2.5. $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ map による食物連鎖再構築	14
2.6. 統計処理	15

第3章 相模湾で採取されたカタクチイワシのバルク法による栄養段階

3.1. 緒言	16
3.2. 材料および方法	
3.2.1. 採集地および採集時期	16
3.2.2. 前処理	17
3.2.3. 安定同位体分析	18
写真：分析装置	
Fig.1 Sampling location	20
3.3. 結果	
3.3.1. 北西太平洋親潮外洋域における $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ ・ $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ および栄養段階	21
3.3.2. 相模湾(沿岸域) および周辺海域における $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ ・ $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ および栄養段階	22
図表	25~30

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ map for adult anchovy / sardine in Sagami Bay

Table 1 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ and TL_{bulk} data for Japanese anchovy/sardine in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

Table 2 The isotopic baselines for Japanese anchovy and their food sources

Table 3 TL_{bulk} and TL_{Glu/Phe} data for anchovy/sardine in Sagami bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

Fig.2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ map for adult Japanese anchovy / sardine in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

Fig.3 Relationships between standard length (SL) and $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ of Japanese anchovy in Sagami Bay and the marginal waters

Fig.4 The histogram of $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ for Japanese anchovy ($n=84$) in Sagami Bay

3.4. 考察	
3.4.1. 北西太平洋親潮外洋域の栄養段階と食物網構造	31
3.4.2. 相模湾(沿岸域)の栄養段階と食物網構造	32
図表	36~38
Table 4 The data of isotope ratios to reconstruct the food source of Japanese anchovy by using mean TL_{bulk}	
Table 5 The data of isotope ratios to reconstruct the food source of Japanese anchovy/ sardine by using each TL_{bulk}	
Fig.5 Reconstructed simple food chains for Japanese anchovy by using TL_{bulk} in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio waters	
第4章 アミノ酸法に基づくカタクチイワシとマイワシの個体ごとの栄養段階	
4.1. 緒言	39
4.2. 材料および方法	
4.2.1. 採集地および標本採集の時期	40
4.2.2. 前処理	40
4.2.3. アミノ酸の窒素安定同位体分析	41
4.3. 結果	42
Table 6: The $\delta^{15}N$ of amino acids data in Japanese anchovy and sardine	43
4.4. 考察	44
図表	47~48
Table 7 $TL_{Glu/Phe}$ and isotope ratios data for Japanese anchovy / sardine and their reconstructed food sources	
Fig.6 Reconstructed simple food chains for Japanese anchovy/sardine based on $TL_{Glu/Phe}$ in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio waters	
第5章 総括	
5.1. 総合考察	49
5.2. 今後の展望	51
謝 辞	52
引用文献	55
参考文献	63
データリスト	64~66

第1章 序論

1.1 研究の背景

カタクチイワシ *Engraulis japonicus* Temminck et Schlegel (1844) およびマイワシ *Sardinops melanostictus* Temminck et Schlegel (1846) は、漁業資源として重要であるとともに、魚や鳥などの大型捕食者に捕食される海洋食物網の主要な中間構成種でもある。したがって、バイオマスが大きい両種の摂餌生態に関する知見は、海洋生態系における捕食と被捕食の関係を考える上で重要といえ、それらの栄養段階（以後TL）を解明することが望まれる。

これまで、鰓耙の構造と胃内容物の観察とから、マイワシは主に植物プランクトン食、カタクチイワシは動物プランクトン食といわれてきた (魚谷 1985a; 1985b, Kawasaki & Kumagai 1984, 三谷 1988)。しかしながら、胃内容物の査定計量は多大な労力を要し、しかも、捕獲直前に捕食した餌の情報しか得られない (Takai *et al.*, 2007, 杉崎ほか 2013)、したがって、仮に摂餌対象が明確化できたとしても、栄養分として同化されたか否かは分からないといった問題がある。

ここで、食性を知る別の方法に、生体中に含まれる窒素の同位体比を用いるものがある。これは、窒素含有化合物の代謝にともなう同位体効果に基づいており、「捕食者の同位体比と被捕食者の同位体比との差が一定」という経験的な事実を利用している (Minagawa & Wada 1984, 和田 2009)。この方法で、個体全体や組織中の窒素安定同位体比（以後 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ）からTLを推定するのがバルク法と呼ばれる食性解析手法である。バルク法は、胃内容物調査ではわかりにくかった食性情報が得られることから、近年、水産研究において注目されて

いる(富永・高井 2008). なお, 個体全体や組織中の炭素安定同位体比 (以後 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$) は, 窒素の安定同位体比と較べて食物連鎖において大きな変化を示さない(DeNiro & Epstein 1978)ことから, 食物網の起点を推察することに広く用いられている.

一般に, 生物由来の炭素や窒素の同位体比は, その生物が属する食物連鎖上の一次生産者の同位体比に栄養段階ごとの同位体効果が加わったものになる. したがって, 研究対象となる生物のTLをバルク法で確定するには, 当該食物連鎖上でTLが明らかな生物 (たとえば一次生産者) の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を知ることが不可欠である. しかしながら, これは多くの場合, 容易ではない.

特に水系生態系においては一次生産者である植物プランクトンと一次消費者である動物プランクトンを分取すること自体が困難であると同時に, その同位体比が時間と空間で変動する. 特に沿岸域においては, 同所個体群中に他海域由来の個体が混在していることが考えられ, 「TLの変化」と「異なる食物網に属する個体群の混在」との分別が難しく, カタクチイワシやマイワシのような海洋生態系間を移動する回遊性浮魚類のTLに関する同位体比を用いた知見はいまだ少ない(山本・片山 1995, Takai *et al.* 2007, 銭谷ほか 2013, Miyachi *et al.* 2015, 宮地ほか 2015a; 2015b). このため, カタクチイワシの $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が相模湾では大きい変動を示すことは知られているものの(Lindsay *et al.* 1998, Tanaka *et al.* 2008, 宮地ほか 2013), 成魚のTLおよび食源が異なる個体群の混在するダイナミクスについては解明が進んでいない.

このような状況下, 一次生産者などTLの明らかな生物の同位体基準を必要とせず, 捕食

者の組織に含まれるアミノ酸（グルタミン酸とフェニルアラニン）の窒素同位体比を分析することでTLを求める方法が最近、開発された (Macko *et al.*, 1986, McClelland & Montoya 2002, McClelland *et al.* 2003, 力石ほか, 2007, Chikaraishi *et al.* 2009b).

1.2. 本研究の目的

このアミノ酸法と呼ばれる手法に基づいて得られるTLを、親潮外洋域のカタクチイワシとマイワシおよび相模湾のカタクチイワシについて求め、アミノ酸法の適用可能性を吟味するとともに、バルク法と組み合わせて、親潮外洋域と相模湾における食物網の違いの解明に資することを本研究の目的とした。

1.3. 本論文の構成

本論文は本章も含めて、5つの章から構成される。

第1章では緒言として本論文の背景、既往の研究を述べ、そこから未だ明らかにされていない事象および既往研究の不確定な内容等を抽出した。

本研究の目的、アミノ酸法によるカタクチイワシの $TL_{Glu/Phe}$ 、バルク法を組み合わせ、その食物網の起点を明らかにすることについて述べた。

第2章では研究の方法について述べた。安定同位体比の定義、バルク法による栄養段階(TL_{bulk})、アミノ酸の特定化合物の窒素安定同位体分析と栄養段階($TL_{Glu/Phe}$)、 $\delta^{13}C_{bulk}$ - $\delta^{15}N_{bulk}$ map による食物連鎖再構築のために一次消費者(TL_2)、一次生産者(TL_1)の $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ 値の復元、統計処理について述べた。

第3章では、材料および方法で試料の採集地および採集時期、前処理からバルク法による安定同位体分析を述べた。その結果、カタクチイワシについて、北西太平洋親潮外洋域における $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ 値の特徴、相模湾における $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ 値の特徴を考察し、北西太平洋親潮外洋域と沿岸域の相模湾におけるカタクチイワシのバルク法により TL_{bulk} を推定し、その $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ 値からその食源(TL_2, TL_1)の $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ 値を復元し、その食物連鎖の再構築を論じ、課題を明らかにした。

第4章では、材料および方法で試料の採集地および採集時期、前処理からアミノ酸法による安定同位体分析を述べた。沿岸域の相模湾において $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ 値の試料内変動が大きかったカタクチイワシについてアミノ酸法に基づき、 $TL_{Glu/Phe}$ を求め、その個体の $\delta^{13}C_{bu}$

ikおよび $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値からその食源(TL2, TL1)を復元し, 食物連鎖を再構築した. また, 同所/同時に捕獲されたカタクチイワシとマイワシについて北西太平洋親潮外洋域における $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を求め, その $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値から食物網の起点を復元した. さらに, $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を決定された個体の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値を同位体基準に両種の TL_{bulk} を推定し, その食源(TL2, TL1)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値を復元した.

第5章は総括として, 本論文の総合考察を行い, 北西太平洋親潮外洋域と沿岸域の相模湾におけるカタクチイワシのTLおよび再構築された食物連鎖の起点の違いについて述べた. また, $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値の試料内変動が大きかった相模湾カタクチイワシについて再構築された食物連鎖の構造について論じた. さらに, 北西太平洋親潮外洋域において同所/同時に捕獲されたカタクチイワシとマイワシの $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ および TL_{bulk} についても論じた. 最後に, 今後の展望を述べた.

第2章 研究の方法

2.1. 安定同位体比の定義

安定同位体比は、次の(1)式で定義される標準物質からの千分偏差 ($\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N}$) を千分率(‰)で表される。

$$\delta^{13}\text{C} \cdot \delta^{15}\text{N} = [\text{R sample}/\text{R standard} - 1] \times 1000(\text{‰}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\text{R} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ または ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ 、標準物質はCがPee Dee Belemnite, Nが大気中の N_2 である。

2.2. バルク法による栄養段階(TL_{bulk})

バルク法では生物の組織を丸ごとその有機炭素、窒素の安定同位体比を測定する。動物は捕食によって餌から窒素を得ることにより、食物連鎖によって重い同位体(${}^{15}\text{N}$)が濃縮され、体組織は ${}^{15}\text{N}$ に富む同位体分別が起こる関係を利用し、Minagawa & Wada (1984)の経験則に基づいて TL_{bulk} を推定する。そのためには基準となるTLの明らかな生物の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値が不可欠である。Minagawa & Wada(1984)の定義式を改変し、次の式(2)で TL_{bulk} を推定した。

$$\text{TL}_{\text{bulk}} = \alpha + (\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk baseline sample}})/3.4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで3.4はTLあたりの $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 濃縮, α は基準に用いた生物のTL値で, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の添え字は試料および基準に用いた生物を表す. baseline sample (基準生物)は, 同位体基準としてTLの明らかな生物の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値を用いた. 例えば, TL1としては付着藻類(EOM), TL2としては植食性動物プランクトン, TL3としてはfirst feeding larvaeといわれ専ら植食性動物プランクトンを常食としている若いシラス(後期仔魚)が用いられている.

2.3. バルク法による栄養段階の問題点

2.3.1 これまでの食性研究と栄養段階

Lindeman (1942)によって提唱されたTLは, Tansley (1935)の生態系における根底に横たわる統一性を探る物理的量として提起された. 食物連鎖概念はこのような生態系を理論的に単純化しようとする試みであると述べている Lalli & Parsons (1997)は, よく知られている生物海洋学の入門教科書で, カタクチイワシの TLは湧昇域と大洋では異なると記載されている. 正確なTLの決定は複雑な生態系を概念的に単純化し, 統一性を探るために, 重要な課題である. これまでTLはおよそのことは分かっても正確に数値化することが難しく, 半定量化といっても過言ではなかった. 特に, 水系生態系, 海洋生態系では顕著であった.

伝統的な胃内容物の観察では, マイワシは主に植物プランクトン食, カタクチイワシは動物プランクトン食といわれてきた (Kawasaki & Kumagai 1984, 魚谷1985a; 1985b, 三谷 1988). これまで胃内容物を観察して査定計量する手法が多く用いられてきた. しかしながら, この方法は多大な労力を要し, しかも, 捕獲直前に捕食した情報しか得られない. たとえ

、胃内容物観察により摂餌対象が明らかになったとしても、必ずしも栄養分として同化されたかは正確には分からない。

一方、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は、食物連鎖に沿って(TLの上昇とともに)、筋肉組織など生体中に含まれる $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が上昇し、それをを用いることによって生態系の食物連鎖網が解析できることが1980年代に知られるようになった。これは生体内の酵素反応系において、軽い同位体(^{14}N)を含むアミノ酸が重い同位体(^{15}N)を含むそれよりもわずかに速く代謝され、結果として生体内に ^{15}N が「蓄積」することに起因している。動物は捕食によって餌から窒素を得る一方、代謝された窒素を尿素やアンモニアとして体外に排出し、その際に排出される窒素は ^{15}N に乏しく、体組織に残る窒素は ^{15}N に富むという同位体分別が起こるためである。この関係を利用することで、生物の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ からその生物の生態系の中での位置「 TL_{bulk} 」を推定することができる(Minagawa and Wada, 1984)。

しかしながら、この手法には、得られる結果の精度がしばしば議論の対象となってきた(Cabana & Rasmussen 1996, Post 2002, 力石ほか 2010)。これまでの研究では、バルク法は胃内容物観察に比べれば、定量的に数値化されたデータを提供したが、生物組織の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 分析による TL_{bulk} は、絶対的なTLを定量的に示すツールというよりは、相対的な被食捕食の関係を示すツールとして用いられることが多かった(O' Reilly *et al.* 2002, Schmidt *et al.*, 2003, 力石ほか 2010)。

2.3.2. TL_{bulk} 推定と同位体基準

TL_{bulk} の推定には、その基準となるTLの明らかな生物の $\delta^{15}N_{bulk}$ 値が不可欠であり、これまでは $100\mu m$ 以下のサイズの懸濁有機物(POM)を植物プランクトンの指標と見なし、その $\delta^{13}C_{bulk}$, $\delta^{15}N_{bulk}$ 値をTL1の指標としてきたこともあった(Takai *et al.* 2007). しかしながら、POM($\leq 100\mu m$)はpico-, nano-サイズの動物プランクトンやdetritusなどの混合物であり、正確なTL1の指標とはなり得ない. 成功した例の一つとして、Takai *et al.* (2007)の3月のPOMはブルーム時期であったと考えられ、TL1に相当すると示唆されるが、他の月のデータについては、同位体基準として適切でないと考えられた. ブルーム時期であれば、より正確な値が求まるのかも知れない. したがって、以下のような問題がある.

(1)微細な植物プランクトンの $\delta^{15}N_{bulk}$ を測定することはpico-, nano-,サイズの動物プランクトンと植物プランクトンを分けることが技術的に難しく、POMの値を代用(指標)してきたが、これは植物プランクトン、動物プランクトン、detritusが混在したものである.

(2)純粋に植物プランクトンの値を測定したとしても、この値は時間・空間的に変動することが知られている.

すなわち、海洋生態系において起源となる有機物(基礎生産者や遺骸など)の特定が難しいことに加え、基礎生産者である植物プランクトンはしばしば顕著な時間的・空間的変動が生じ、かつ、微小な植物プランクトンやバクテリアなどは安定同位体比を分析できる十分量を収集することが困難である. この問題を解決する方法として同位体基準として一次生産者の代わりにTLの明らかな消費者の $\delta^{15}N_{bulk}$ 値を用いることが考案された(Post 2002, Takai *et*

al. 2007). Takai *et al.* (2007) による $TL_{\text{bulk/larvae}}$ では同位体基準として専ら植食性動物プランクトン (TL=2) を常食していると仮定し、カタクチイワシの後期仔魚 (first feeding larvae) がTL=3として用いられた。

2.3.3. 回遊魚類の生態と安定同位体比(同位体基準)

カタクチイワシはマイワシと同様、小型浮魚類の中でもとりわけ広範囲の分布域を持つ魚種である。両種は過去において大規模な資源変動を繰り返してきた(森本2010, 須原ほか2013)。両種の大きな個体数変動は、海洋生態系のレジームシフトといわれている (Kawasaki & Omori 1988)。カタクチイワシは、資源の低水準時には成魚小型群(体長90~120mm)が中心となり、その分布域は沿岸及び内湾に限られていた(船越茂雄 1990)。資源高水準時には、大回遊・沖合回遊を行う成魚大型群(体長120mm以上)が主体となり、分布域および産卵域は道東や日付変更線付近の外洋域にまで拡大していることが知られている(船越茂雄 1990, Funakoshi 1992, 高橋ほか 1992, 靄田・高橋 1997, Takasuka & Aoki 2006)。

カタクチイワシ仔魚の成長速度最適水温は22.0°Cで、北西太平洋におけるカタクチイワシの水温適正は高温性・広塩性で(Takasuka 2009)、沖合域に分布する産卵親魚は沿岸に生息するものに比べて低水温で産卵が可能で、現在は資源繁栄期にある(三原行雄 2000)。高水準時には、体長120mm以上の個体群が春先を中心に太平洋沿岸域に多数出現する(靄田 2001)。田中(2006)によると分布域および産卵域が資源量変動と関連しており、資源水準が高くなると分布域・産卵域が沿岸から沖合域へと拡大することが知られている。Funamoto & Aoki

(2002)は沿岸（相模湾）と東日本沖合域のカタクチイワシの産卵生態について、東日本沖合に生息する群が沿岸である相模湾に生息する群に比べて産卵頻度が高く、より低温下で産卵を行っていることを報告した。また、由上 (2003)は成魚の耳石の日輪を解析し、三陸沖合、常磐沖合に生息する群は、相模湾の群に比べ速い成長を遂げており、約1年で被隣体長130mm以上に到達することを示唆した。

一方、沿岸域においては植物プランクトンのみならず、底生微細藻類や海藻類などの底生性の一次生産者がそこに生息する多くの生物の生産を大きく支えていると考えられている(田中 2006)。Takai *et al.* (2002)によると広島湾における底生魚類や無脊椎動物の多くが底生微細藻類や海藻類などから多量の炭素源供給を受けていることを示唆している。これらのことから海洋生態系の構造は、沿岸域と沖合域で異なることが考えられた。外洋および沿岸域での本種についての $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が報告され、沿岸域から外洋域へ分布拡大した本種の生態的特性に差異が生じ、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ に反映している(Tanaka *et al.*2008, Miller *et al.*2011)。相模湾には、他海域から回遊してきた摂餌履歴を反映した異なった $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を持つ個体群が来遊している可能性があった(宮地ほか2013)。

このようなことから、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は回遊履歴における摂餌履歴の平均値を示すので、回遊魚類の場合、回遊直後でターンオーバー前であれば、以前捕食した異地性の食源の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を保持していることがあり、バルク法によりTLを推定する場合困難が伴う。

そこで、相模湾に回遊してきたカタクチイワシの TL_{bulk} を推定するために、同位体基準について外洋域の後期仔魚の値を異地性指標とし、相模湾の後期仔魚の値を現地性の指標とし

て区別することが必要と考えられる。しかしながら、回遊魚についてバルク法による $TL_{bulk/larvae}$ の推定には限界があり、沿岸・沖合からの回遊個体群が混在するケースを解決するよりよい方法が期待された。

2.4. アミノ酸の特定化合物の窒素同位体分析と栄養段階 ($TL_{Glu/Phe}$)

2.4.1. アミノ酸法の $TL_{Glu/Phe}$ の定義

バルク法の問題点を解決する方法として、新しい方法が開発されている。アミノ酸の特定化合物の窒素安定同位体分析に基づくTL推定(アミノ酸法)では、一次生産者 または、同位体基準としてTLの分かっている生物の $\delta^{15}N_{bulk}$ 値を必要としない。同位体基準に用いる生物の同位体比の情報なしで捕食者のTLを正確に決定できる (McClelland and Montoya 2002; Chikaraishi *et al.* 2009b)。TL決定には捕食者の組織から抽出したアミノ酸の $\delta^{15}N$ を測定することが必要である。すなわち、捕食者の持つ2つのアミノ酸(glutamic acid (Glu.) とphenylalanine (Phe.))の $\delta^{15}N$ だけを用いて $TL(TL_{Glu/Phe})$ を推定することができる。

Macko *et al.* (1986)により、アミノ酸の同位体分別の大きさは、その種類により特異的であることが明らかになり様々な研究が進められてきた。重い同位体(^{15}N)の濃縮をバルク(生物の組織丸ごと)としてではなく、生物に含まれる個々の有機化合物、とりわけアミノ酸に注目した研究が行われてきた。特に、McClelland & Montoya (2002)により、海洋生態系解析ツールとしての重要性が再認識されるようになった(McClelland *et al.* 2003, Chikaraishi *et al.* 2007)。それにより、捕食者のアミノ酸の窒素同位体比は餌に対して、フェニルアラニ

ン(Phe)で約0.4%, グルタミン酸(Glu)で約8.0%高くなることがわかってきた(Chikaraishi *et al.* 2007). すなわち, 生物に含まれる両者のアミノ酸の $\delta^{15}\text{N}$ を比較することで $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を式(3)により推定することができる(Chikaraishi *et al.*, 2009a;2009b).

$$\text{TL}_{\text{Glu/Phe}} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}} - 3.4)/7.6 + 1 \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\delta^{15}\text{N}_{\text{Glu}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{Phe}}$ は, それぞれ試料中のグルタミン酸とフェニルアラニンの窒素同位体比である.

このアミノ酸を用いた分析法は, 生物のTLを推定する上で, 一次生産者の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を必要とせず, 言い換えれば, 一次生産者の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の変動に左右されずに, 研究対象の生物に含まれる2つのアミノ酸の $\delta^{15}\text{N}$ だけで正確にTLを推定することができる点で本質的に優れている (力石他2010).

2.3.2. 原理

天然レベルの安定同位体はトレーサーとして用いられると共に, 天然レベルの微小な安定同位体比の変動から, 自然界で起きている事象を解析する方法論としても用いられてきた. 化学反応において反応物と生成物の間で, 安定同位体比が平衡論的あるいは速度論的にごくわずかだが差異が生じることを理論的な背景としている(大河内ほか 2012). 水界中に生息する独立栄養生物についてみると, フェニルアラニンとグルタミン酸の差は, あらゆる藻類, シアノバクテリアなどを通して平均3.4%である(Chikaraishi *et al.* 2007b, 力石ほか 2007,

大河内ほか 2012). 水界における植物や陸上高等植物を起点とするいずれの生態系においても, TLにともなう $\delta^{15}\text{N}$ の上昇はほぼ同じ値を示す. いかなる生物間の捕食プロセスであっても, 餌とその消費者を比較すると, グルタミン酸は8‰も消費者が高い値をもつのに対し, フェニルアラニンはほとんど変化しない($\sim 0.4\%$ の上昇). 従属栄養生物は, フェニルアラニンを常に餌に含まれる植物由来のそれに依存するしかないため, どれほど高次の捕食者といえども, 利用している必須アミノ酸の究極的な起源は一次生産者ということになる. 最初に植物が合成したフェニルアラニンが, 食物連鎖を通して高次捕食者へと移動していきだけと言える.

ここで重要なことは, フェニルアラニンが代謝される際, アミノ基の窒素と α 位炭素間のN結合が開裂しないので(水酸基が付加されてチロシンになる), 同位体分別が起きないことである(Chikaraishi *et al.* 2007). このためフェニルアラニンは, 「捕食」というプロセスを通してその $\delta^{15}\text{N}$ を変動させることがない. バリンは, フェニルアラニンと同じように必須アミノ酸であるが, その代謝で窒素—炭素結合が開裂するため, その $\delta^{15}\text{N}$ は変動する (小川ほか 2009). 生物の栄養段階が, グルタミン酸 (Glu) とフェニルアラニン (Phe) の $\delta^{15}\text{N}$ の差だけの一次関数になることである. したがって, 目的生物の試料さえ手にすれば個体ごとのTLを知ることができる.

2.5. $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ mapによる食物連鎖の再構築:

食源(TL2, TL1)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の復元

食物連鎖の解析のため、上の式(2) または 式(3)で求めた TL_{bulk} または $TL_{Glu/Phe}$ から試料の食源 (TL1, TL2) の $\delta^{13}C_{bulk}$ および $\delta^{15}N_{bulk}$ を次の式(4),(5)より計算した (DeNiro & Epstein 1978, Minagawa & Wada 1984を改変) :

$$\delta^{13}C_{bulk} = \alpha + \delta^{13}C_{bulk \ sample} - TL_{sample} \dots \dots \dots (4)$$

$$\delta^{15}N_{bulk} = 3.4\beta + \delta^{15}N_{bulk \ sample} - 3.4TL_{sample} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $\delta^{13}C$ と $\delta^{15}N$ の濃縮係数は1‰と3.4‰とした。 TL_{sample} は式(2)で得た捕食者のTL値を表し、 α および β は求める食源のTL値(1または、2)である。 $\delta^{13}C_{bulk \ sample}$ および $\delta^{15}N_{bulk \ sample}$ は食源を求める捕食者の値である。

2.6. 統計処理

サンプルの正規性は χ^2 適合度検定、等分散性は F 検定そして、2群の差の検定は、Student's t -testまたは、Mann-Whitney U -testをSatcel2 (柳井 2007)を用いて実施した。正規性および等分散性の検定は $P > 0.05$ で判断した。群間の差は $P < 0.05$ のとき有意と判断した。

第3章 相模湾で採取されたカタクチイワシのバルク法による栄養段階

3.1. 緒言

日本周辺の本種の安定同位体比には、青木ほか (2005)および田中ほか (2005)によると回遊2型があり、さらに、Tanaka *et al.*(2008)によると地理的特徴があり、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値は、外洋域では低く、瀬戸内海・富山湾・相模湾などの沿岸域では高い。特に、相模湾ではTanaka *et al.*(2008)による本種 ($n=8$)の $\text{SL}=110\pm 11.3\text{mm}$ (90~121mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値は $-17.6\pm 1.6\text{‰}$ ($-18.9\sim -14.2\text{‰}$)、 $11.3\pm 2.8\text{‰}$ ($8.9\sim 17.8\text{‰}$)で、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が大きくTLが転換しているように見えるが、主に動物プランクトン食であるという胃内容物観察結果と一致せず、TL転換はないと述べ、様々な個体群の混在をほのめかしていた(Tanaka *et al.*2008)。また、Lindsay *et al.* (1998)によると相模湾ではシラスから未成魚にかけて成長に伴って $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が高くなり、TLが転換し高くなると述べていた。さらに、宮地ほか(2013)は春先から初夏にかけて $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の低い個体群が相模湾に出現すると報告した。

一般に、動物の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は餌が変わらなければ、成体になると変動が少ないといわれる。回遊魚である本種の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値は他海域での摂餌履歴を反映している可能性があり、相模湾成魚の試料内変動が大きいことは個体のTLが異なるのか、個体が属する食物網が異なるのかははっきりしなかった。

3.2. 材料および方法

3.2.1. 採集地および採集時期

沿岸域の相模湾におけるカタクチイワシの試料($n=125$)は、2006年11月、2007年5月～2007年12月、2008年4月～2008年8月に江ノ島沖約1kmの定置網($139^{\circ}28'E, 35^{\circ}17'N$)で、シラス($n=19$)は沿岸船曳漁で片瀬・江ノ島漁業協同組合の協力を得て採取した(Fig. 1). 得られた試料は保冷して研究室に持ち帰り $-80^{\circ}C$ で凍結保存した. また、鹿島灘の試料($n=4$)は2006年12月に大洗町漁業協同組合、伊東沖の試料($n=5$)は2007年12月に静浦漁業協同組合の協力を得て採取した. 採取された鮮魚は冷凍保存し研究室に運搬された. 相模湾食物網の起点に関する現地性指標として潮間帯の転石の石面付着藻類(EOM)の試料($n=2$)は2003年5月と10月に江ノ島の磯で採取し、保冷し研究室に運ばれた. 外洋域におけるカタクチイワシおよびマイワシの試料は2010年9月～10月に水産総合研究センター中央水産研究所の調査用船北鳳丸の中層トロールにより北西太平洋 T09site($45^{\circ}N, 157^{\circ}E$), T23site($43^{\circ}N, 165^{\circ}E$), T29site($44^{\circ}N, 160^{\circ}E$)の親潮外洋域で、捕獲された (Fig. 1). 試料は冷凍保存され、研究室に運搬された. 試料はすべて前処理するまで凍結保存された. その中から各 site で $n=5$ ずつを選んだ. 一般に、沿岸域とは水深 200m までの大陸棚、外洋域はその外側の海域を指す.

3.2.2. 前処理

集められた個体試料はサイズにより区分し、シラス: 標準体長(以後SL)17-40mm未満(その内でSLが25mmまでのものを後期仔魚とする), 未成魚: SL40-90mm未満, 成魚: SL90mm以上とした. カタクチイワシおよびマイワシはSLを測定後、成魚と未成魚は胸びれ後ろの背

側白色筋を摘出し，前処理をするまですべて凍結保存（-30 或いは-80℃）した．脱脂はFolch *et al.*(1957)の方法に準じクロロフォルム-メタノール液(2:1)を用いた．シラスは1個体全体，または，後期仔魚(SL17~25mm)は脱脂すると1個体だけでは分析に必要な量が得られないので，数個体(6~8個体)をまとめて脱脂し，1つの試料として分析し，33個体から5つの試料を得た．EOMは炭酸塩を取り除くために1日間濃塩酸の蒸気に晒し，脱灰処理をした．すべての試料は粉末化し，分析するまで乾燥状態で保存した．

3.2.3. 安定同位体分析

すべての試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は，日本大学生物資源科学部生物環境科学研究センターの全自動窒素炭素安定同位体比質量分析計(EA/IRMS) ANCA-SL(PDZ Europa)を用いて，筋肉組織はCとNを同時に，付着藻類はCとNを別々に測定された．測定精度は $\delta^{13}\text{C} \leq 0.1\text{‰}$ ，および $\delta^{15}\text{N} \leq 0.2\text{‰}$ である．

分析装置



凍結乾燥機



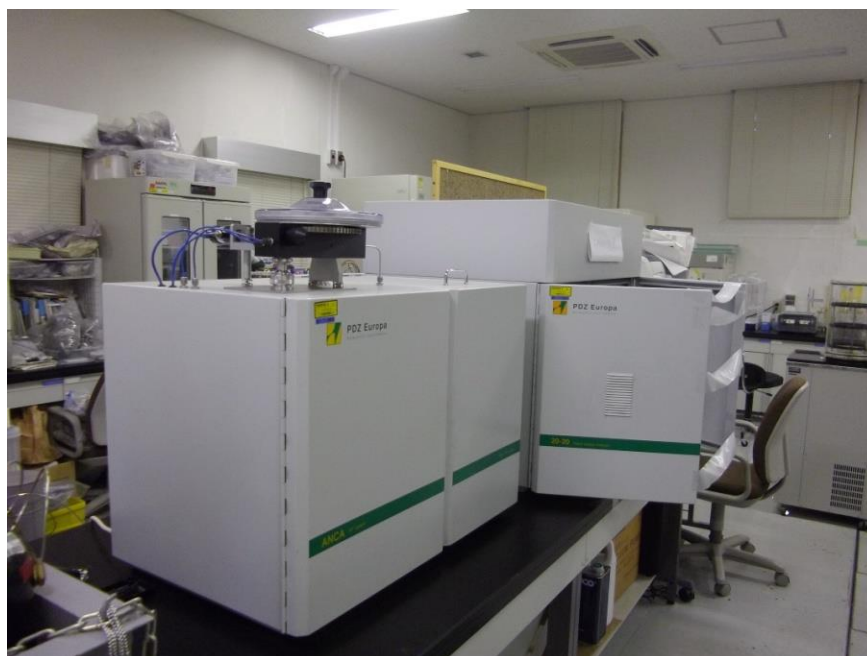
真空ポンプ



粉碎



遠心分離機



全自動窒素炭素安定同位体比質量分析計 ANCA-SL(PDZ Europa)

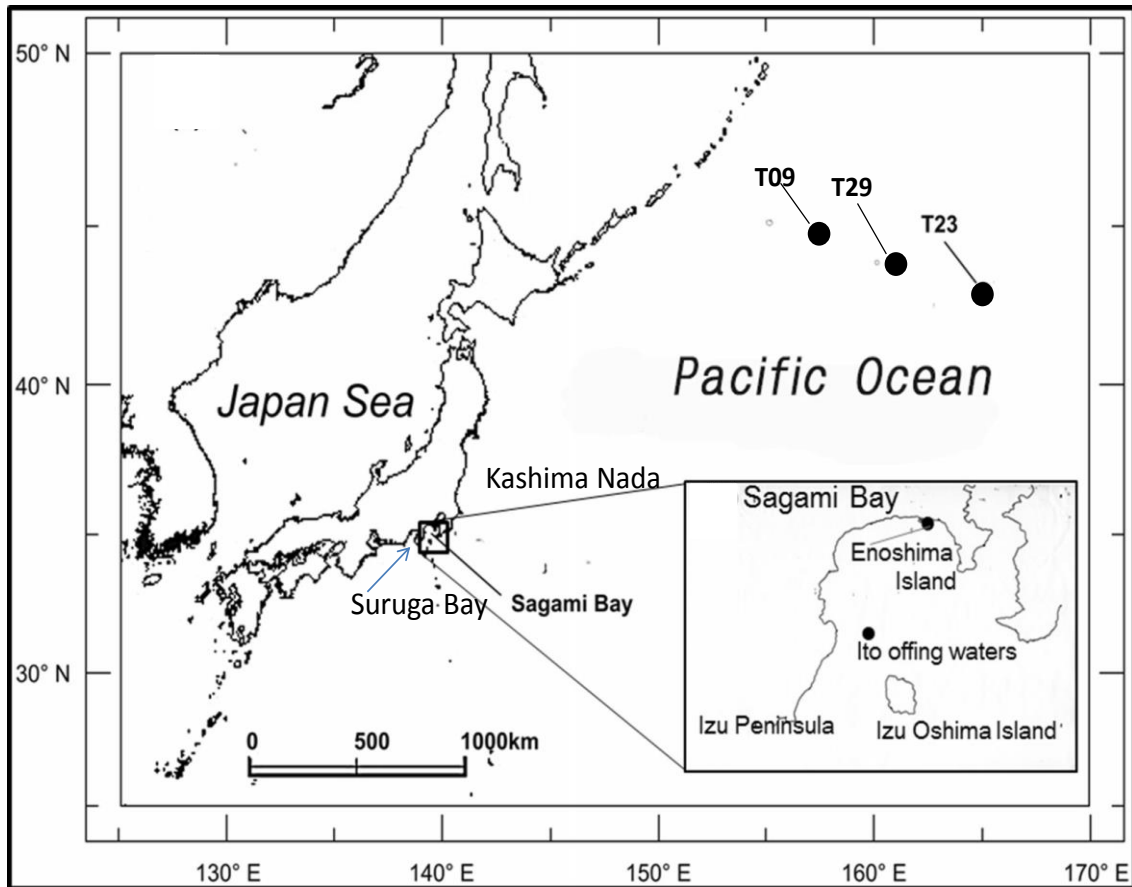


Fig. 1 Sampling location

1

3.3. 結果

3.3.1. 北西太平洋親潮外洋域における $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ ・ $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ および栄養段階

カタクチイワシ成魚については、T09k-01~05($n=5$)SL=122±8mm(110~130mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ の平均±SD(範囲)は-19.4±0.2‰(-19.7~-19.2‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は8.8±0.3‰(8.6~9.2‰)であった。T23k-01~05($n=5$)SL=114±3mm(109~117mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-20.1±0.4‰(-20.5~-19.4‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は8.6±0.3‰(8.1~8.8‰)であった。T29k-01~05($n=5$)SL=122±5mm(110~127mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-19.8±0.5‰(-20.5~-19.4‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は9.2±0.5‰(8.8~10.1‰)であった。全成魚($n=15$)SL=119±7mm(109~130mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-19.8±0.4‰(-20.5~-19.2‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は8.9±0.4‰(8.1~10.1‰)であった。

マイワシ成魚T09M-01~05($n=5$)SL=120±3mm(118~124mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-19.6±0.2‰(-19.9~-19.3‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は9.1±0.2‰(8.8~9.3‰)であった。T23M-01~05($n=5$)SL=122±4mm(117~126mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-19.5±0.5‰(-20.3~-19.2‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は8.5±0.4‰(7.9~8.9‰)であった。T29M-01~05($n=5$)SL=123±3mm(117~125mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-19.3±0.3‰(-19.6~-18.8‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は9.1±0.3‰(8.7~9.5‰)であった。マイワシ全成魚($n=15$)SL=122±3mm(117~126mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は-19.5±0.4‰(-20.3~-18.8‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は8.9±0.4‰(8.5~9.5‰)であった(Table 1)。外洋域の各 site でカタクチイワシおよびマイワシの $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($n=5$)は正規性が認められた($P>0.05$)。また、トータル $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($n=15$)でも正規性が認められた($P>0.05$)。

外洋域での成魚について、Aita *et al.* (2011)による親潮域の植食性動物プランクトン *Eucalamus bungii* ($\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}=5.1\text{‰}$)を食源と仮定し、バルク法で TL_{bulk} (以下 $\text{TL}_{\text{bulk}/\text{bungii}}$)を推定

した値は、T09k01-05($n=5$)で 3.1 ± 0.1 (3.0~3.2), T23k01-05($n=5$)で 3.0 ± 0.1 (2.9~3.1), T29k01-05($n=5$)で 3.2 ± 0.2 (3.1~3.5)を得た。外洋域のカタクチイワシの平均 $TL_{\text{bulk/bungii}}$ ($n=15$) は 3.1 ± 0.1 (2.9~3.5)を示した(Table 3).

3.3.2. 相模湾(沿岸域) および周辺海域における $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ ・ $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ および栄養段階

相模湾におけるカタクチイワシの全成魚($n=84$) $SL=115 \pm 10$ mm(91~133mm)の $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は $-17.4 \pm 1.5\text{‰}$ (-20.2 ~ -14.1‰), $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は $11.2 \pm 2.0\text{‰}$ (8.3 ~ 18.5‰)で, $\delta^{13}C_{\text{bul}}$ ・ $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は共に著しく大きな試料内変動を示した(Table1). 5月の1回のサンプリングによる5月試料($n=18$) $SL=114 \pm 7$ (97~123mm)の $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は $-16.9 \pm 1.1\text{‰}$ (-18.7 ~ -14.7‰), $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は $11.5 \pm 1.9\text{‰}$ (9.1 ~ 16.2‰)で同様の傾向を示した(Fig. 2).

未成魚($n=41$) $SL70 \pm 12$ mm(46~90mm)の $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は -16.1 ± 1.1 (-18.9 ~ -13.9‰)で, $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は 13.5 ± 1.4 (10.7~18.1‰)であった.

シラス($n=19$)は $SL27 \pm 4$ mm(17~32mm)の $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は -16.1 ± 0.5 (-16.9 ~ -14.8‰)で, $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は 11.9 ± 0.8 (10.6~13.0‰)であった. その内の SL (17~25mm)が後期仔魚($n=5$)で, $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は $-16.3 \pm 0.6\text{‰}$ (-16.9 ~ -15.6‰)および $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は $11.0 \pm 0.3\text{‰}$ (10.6~11.5‰)であった. EOM($n=2$)の $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は $-16.9 \pm 0.5\text{‰}$ (-17.3 ~ -16.6‰)および $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は $7.1 \pm 2.7\text{‰}$ (5.2~9.0‰)であった(Table 2). シラスから未成魚では SL が大きくなるに伴い $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は高い値を示すものもあった(Fig. 3).

大型成魚個体群 ($n=30$) $SL=124 \pm 3$ (121~133mm)が4月から7月にかけて湾内で捕獲され, その $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は $-18.6 \pm 0.8\text{‰}$ (-19.8 ~ -16.3‰), $\delta^{15}N_{\text{bulk}}$ は $9.8 \pm 0.9\text{‰}$ (8.7 ~ 12.0‰)で低かった.

一方, $SL120$ mm以上の大型成魚は, 8月に2個体, 9月は成魚が0で, 定置網に入らず, 8月以降は小型個体 $SL105$ mm(91~119mm)の成魚($n=21$)が主体で $\delta^{13}C_{\text{bulk}}$ は $-16.1 \pm 1.0\text{‰}$ (-18.1

~-14.1‰), $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は $13.1 \pm 1.9\%$ (10.4~18.5‰)であった。こちらは $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ 共に高く, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が著しかった(Table1).

さらに, 周辺海域では, 鹿島灘成魚 ($n=4$) SL= $112 \pm 5\text{mm}$ (100~125mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は -17.9 ± 1.6 (-19.4~-16.3‰)で, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は 10.1 ± 1.4 (8.5~11.4‰)で, $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 共に低く, 相模湾の大型個体群の値に近かった。伊東沖成魚($n=3$)SL= $122 \pm 5\text{m}$ (114~128mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は -19.1 ± 0.5 (-19.7~-18.8‰)で, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は 8.8 ± 1.1 (7.6~9.9‰), 伊東沖成魚/未成魚($n=2$)SL= $97 \pm 18\text{mm}$ (84~109mm)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は -15.6 ± 1.0 (-16.3~-14.9‰)で, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$: 12.9 ± 2.0 (11.5~14.3‰)を示し, $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ について高いものと低いものと2つのグループに分かれた(Table1)。周辺海域で本種の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ も低い個体が存在することが明らかになった。

未成魚でも9, 10月にかけて高い値を示す個体があった。一方, 6月の未成魚で $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が高くない個体もあり, 8月以降には多数出現した。8月未成魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は成魚と同じレベルであった(データリスト参照)。8月に水揚げされた定置網の魚種は殆どがカタクチイワシであった。しかしながら, 9月の定置網にはカタクチイワシの成魚が全く入らず, わずかな未成魚しか得られなかった。9月の未成魚($n=5$)の値(SL, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$)は, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の高いグループ(85mm, 15.8‰), (88mm, 18.1‰)と低いグループ(80mm, 13.0‰), (80mm, 13.5‰), (90m, 14.3‰)に分かれた。漁協関係者の話によると水温が高くなると本種は沖合に移動するので江ノ島の定置網には入らなくなることがあるとのことであった。

相模湾の成魚 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($n=84$)は正規性が認められなかった($P < 0.05$)。また, $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ のヒストグラムは2つの最頻値(-18.4~-17.5‰)を示した(Fig. 4)。

相模湾での成魚($n=84$)について, Takai *et al.* (2007)に従って, 相模湾で捕獲された現地性の後期仔魚の値($\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}=11.0\text{‰}$)を同位体基準にした TL_{bulk} (以下 $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$)は平均で 3.0 ± 0.6 (2.2 ~ 5.2)で, 5月試料($n=18$)の $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は平均で 3.1 ± 0.5 (2.4 ~ 4.5)であった.

Table 1 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ and TL_{bulk} data for Japanese anchovy/sardine in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

site	latitude-longitude	sample name	mean SL (mm)	n	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$			$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$							
					mean	SD	range min. max.	mean	SD	range min. max.					
Inshore	Sagami Bay	35-140	April	116	5	-17.8	0.9	-18.7	-16.5	10.3	1.0	9.1	11.4		
			May	114	18	-16.9	1.1	-18.7	-14.7	11.5	1.9	9.1	16.2		
			June	119	28	-18.5	1.2	-20.2	-15.5	9.9	1.1	8.3	11.9		
			July	122	11	-17.7	1.4	-18.9	-14.9	11.1	1.8	9.4	15.2		
			A groupe (large sized SL)*	124	30	-18.6	0.8	-19.8	-16.3	9.8	0.9	8.7	12.0		
			August	107	14	-16.4	1.0	-18.1	-14.1	12.8	1.8	10.5	18.5		
			October	107	3	-16.3	1.3	-17.8	-15.2	11.9	1.5	10.4	13.3		
			December	105	5	-15.9	0.9	-17.4	-14.7	14.1	1.7	11.3	16.3		
			B groupe (small sized SL) **	105	21	-16.1	1.0	-18.1	-14.1	13.1	1.9	10.4	18.5		
			Inshore total	115	84	-17.4	1.5	-20.2	-14.1	11.2	2.0	8.3	18.5		
marginal	Ito offing area+	35-140	immatures	70	41	-16.1	1.1	-18.9	-13.9	13.5	1.4	10.7	18.1		
			larvae	27	19	-16.1	0.5	-16.9	-14.8	11.9	0.8	10.6	13.0		
			large sized group	122	3	-19.1	0.5	-19.7	-18.8	8.8	1.1	7.6	9.9		
			small sized group	97	2	-15.6	1.0	-16.3	-14.9	12.9	2.0	11.5	14.3		
			Ito-total+	115	5	-17.7	2.0	-19.7	-14.9	10.4	2.6	7.6	14.3		
			large sized group	124	2	-19.3	0.6	-19.4	-19.2	8.9	1.4	8.5	9.3		
			small sized group	101	2	-16.5	0.1	-16.7	-16.3	11.3	0.7	11.2	11.4		
			Kashima Nada-total	112	4	-17.9	1.6	-19.4	-16.3	10.1	1.4	8.5	11.4		
			anchovy-T09k1-5	122	5	-19.4	0.2	-19.7	-19.2	8.8	0.3	8.6	9.2		
			anchovy-T23k1-5	114	5	-20.1	0.4	-20.5	-19.4	8.6	0.3	8.1	8.8		
Offshore	Oyashio waters	36-141	anchovy-T29k1-5	122	5	-19.8	0.5	-20.5	-19.4	9.2	0.5	8.8	10.1		
			Offshore total	119	15	-19.8	0.4	-20.5	-19.2	8.9	0.4	8.1	10.1		
			sardine-T09M1-5	120	5	-19.6	0.2	-19.9	-19.3	9.1	0.2	8.8	9.3		
			sardine-T23M1-5	122	5	-19.5	0.5	-20.3	-19.2	8.5	0.4	7.9	8.9		
			sardine-T29M1-5	123	5	-19.3	0.3	-19.6	-18.8	9.1	0.3	8.7	9.5		
			Offshore total	122	15	-19.5	0.4	-20.3	-18.8	8.9	0.4	8.5	9.5		
			TL: trophic level; SL: standard length; SD: standard deviation												
			*A groupe (large sized SL) : $\geq 120\text{mmSL}$ (124 - 133mm)												
			**B groupe (small sized SL) : $< 120\text{mmSL}$ (91 - 119mm)												
			+ Ito offing area is the boundary between Sagami Bay and Sugami Nada (the entrance flowing pass kroschio branch in Sagami Bay)												

Table 2 The isotopic baselines for Japanese anchovy and their food sources														
site	latitude-longitude	sample name	mean SL		$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$				$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$				TL	
			(mm)	n	mean	SD	range		mean	SD	range			
							min.	max.			Min.	Max.		
inshore	Sagami Bay	35-140	post larvae	17-25	5	-16.3	0.6	-16.9	-15.6	11.0	0.3	10.6	11.5	3
			EOM	-	2	-16.9	0.5	-17.3	-16.6	7.1	2.7	5.2	9.0	1
	Suruga Bay	34-138	post larvae	15-25	3	-18.0	0.5	-18.5	-17.6	8.2	0.8	7.3	8.1	3
offshore	Izu offshore waters	35-140	post larvae+	16.3-18.5	11	-18.3	0.3	-18.7	-17.6	8.6	0.2	8.4	8.9	3
			POM(Mar.)+	-		-20.8		0.7						1
	Oyashio waters	42,43-144,146	<i>E. bungii</i> ++	-	5	-20.9	1.0	-22.4	-19.8	5.1	0.3	4.6	5.3	2
			phytopl. sp.++	-	4	-21.8	0.3	-22.2	-21.3	2.5	0.8	1.7	3.2	1
		43-165	T23k-04	115	1	-19.9		8.1		2.8				
T23M-04	120		1	-19.6		7.9		2.8						

TL: Trophic level; EOM: Epilithic organic matter; SL: standard length; SD: standard deviation; POM: particulate organic matter
+ Izu Offshore samples: POM(Mar.) collected at 20m depths in surface water on Mar. and first feeding larvae(post larvae) by Takai *et al.* (2007)
++ Oyashio samples: *Eucalanus bungii* (zoo plankton) and phytopl.(phytoplankton) by Aita *et al.* (2011)

Table 3 TL_{bulk} and TL_{Glu/Phe} data for Japanese anchovy/sardine in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

site	sample name	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$			TL													
		mean	SD	range min. max.	TL _{Glu/Phe}			TL _{bulk/larvae}			TL _{bulk/bungii}			TL _{bulk/Glu-Phe}				
					mean	SD	min. max.	mean	SD	min. max.	mean	SD	min. max.	mean	SD	min. max.		
Inshore	May (n=18)	11.5	1.9	9.1 16.2	-	-	-	3.1	0.5	2.4 4.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	M-01 (n=1)		9.1		3.2			2.4, 3.1*										
	A groupe (large sized SL) n=30	9.8	0.9	8.7 12.0	-	-	-	3.4*	0.3	3.1 4.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	M-05 (n=1)		16.2		3.1			4.5, 3.7***										
	B groupe (small sized SL) n=21	13.1	1.9	10.4 18.5	-	-	-	3.6**	0.6	2.8 5.2	-	-	-	-	-	-	-	-
	Inshore total (n=84)	11.2	2.0	8.3 18.5	-	-	-	3.0*	0.6	2.2 5.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Offshore	anchovy-T09k1-5 (n=5)	8.8	0.3	8.6 9.2	-	-	-	3.0**	0.1	3.0 3.2	3.1 ⁺	0.1	3.0 3.2	3.0 ⁺⁺	0.1	3.0 3.2	3.0	3.2
	anchovy-T23k1-5 (n=5)	8.6	0.3	8.1 8.8	-	-	-	3.0**	0.1	2.9 3.1	3.0 ⁺	0.1	2.9 3.1	3.0 ⁺⁺	0.1	2.8 3.0	3.0	3.0
	T23k-4 (n=1)		8.1		2.8			2.9			2.9			2.8				
	anchovy-T29k1-5 (n=5)	9.2	0.5	8.8 10.1	-	-	-	3.2**	0.2	3.0 3.3	3.2 ⁺	0.2	3.1 3.5	3.2 ⁺⁺	0.2	3.0 3.4	3.4	3.4
	Offshore total (n=15)	8.9	0.4	8.1 10.1	-	-	-	3.1**	0.1	2.9 3.3	3.1 ⁺	0.1	2.9 3.5	3.1 ⁺⁺	0.1	2.8 3.4	3.4	3.4
	sardine-T09M1-5 (n=5)	9.1	0.2	8.8 9.3	-	-	-	3.1**	0.1	3.0 3.2	3.2 ⁺	0.1	3.1 3.2	3.2 ⁺⁺	0.1	3.1 3.2	3.2	3.2
sardine-T23M1-5 (n=5)	8.5	0.4	7.9 8.9	-	-	-	3.0**	0.1	2.8 3.1	3.0 ⁺	0.1	2.8 3.1	3.0 ⁺⁺	0.1	2.8 3.1	3.1	3.1	
T23M-4 (n=1)		7.9		2.8			2.8			2.8			2.8					
sardine-T29M1-5 (n=5)	9.1	0.3	8.7 9.5	-	-	-	3.1**	0.1	3.0 3.3	3.2 ⁺	0.1	3.1 3.3	3.2 ⁺⁺	0.1	3.1 3.3	3.3	3.3	
Offshore total (n=15)	8.9	0.4	8.5 9.5	-	-	-	3.3**	0.1	2.8 3.3	3.1 ⁺	0.1	2.8 3.3	3.1 ⁺⁺	0.1	2.8 3.3	3.3	3.3	
TL: trophic level; SL: standard length; SD: standard deviation																		
* by using $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (8.6‰) of post larvae (TL3) isotopic baseline for M-01 and A groupe (large sized SL \geq 120mmSL)																		
** by using $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (11.0‰) of post larvae (TL3) isotopic baseline for B groupe (small sized SL < 120mmSL) by Takai <i>et al.</i> (2007)																		
*** by using $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (7.1‰) of EOM (TL1) at Enoshima Island isotopic baseline for M-05																		
+ by using $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (5.1‰) of Eucalanus bungii (TL2) for isotopic baseline by Aita <i>et al.</i> (2011)																		
++ by using $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (‰) of adult fish that determined TL _{Glu/Phe} for isotopic baseline																		

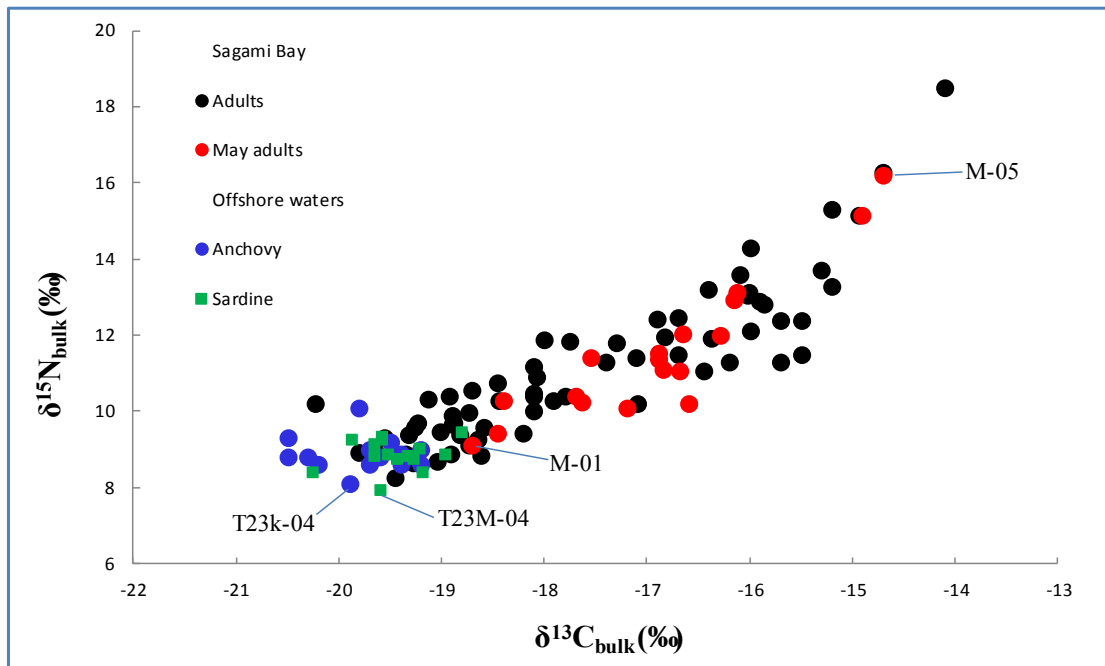
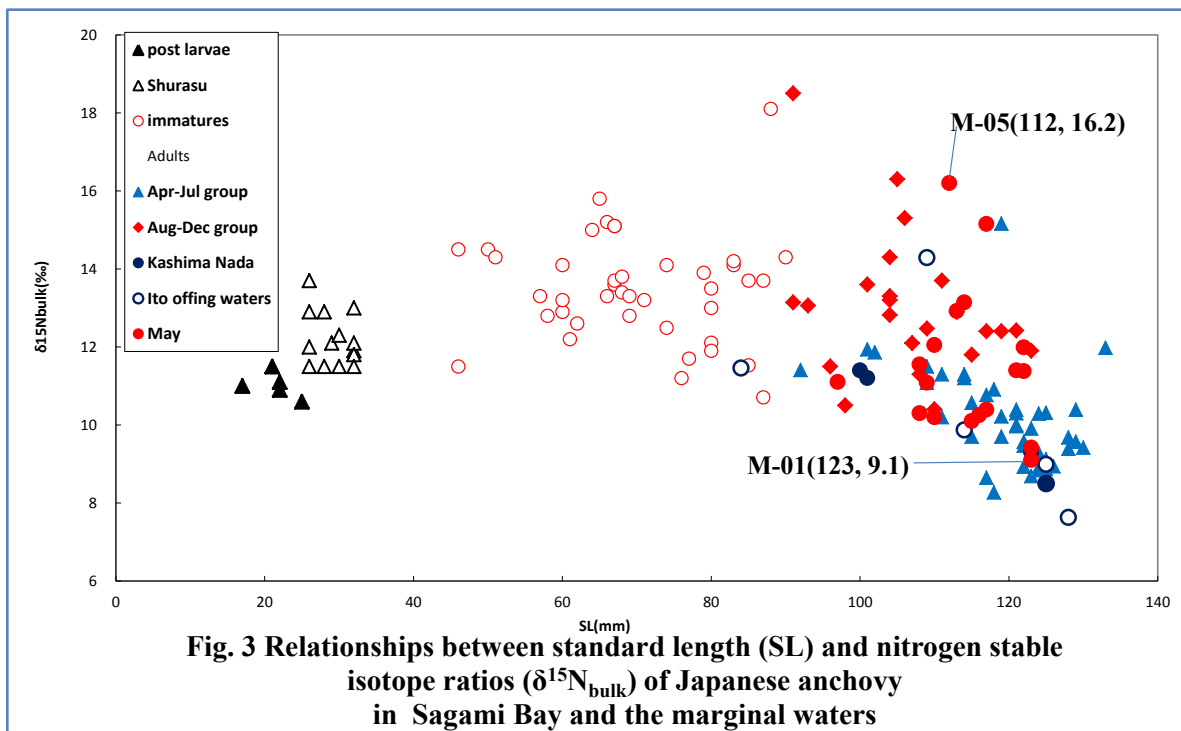


Fig. 2 $\delta^{13}C_{bulk}$ - $\delta^{15}N_{bulk}$ map for adult anchovy / sardine in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

M-01 and M-05 are the samples of Japanese anchovy in Sagami Bay.

T23k-04 and T23M-04 are the samples of Japanese anchovy and sardine in Northwestern Pacific Oyashio offshore waters.



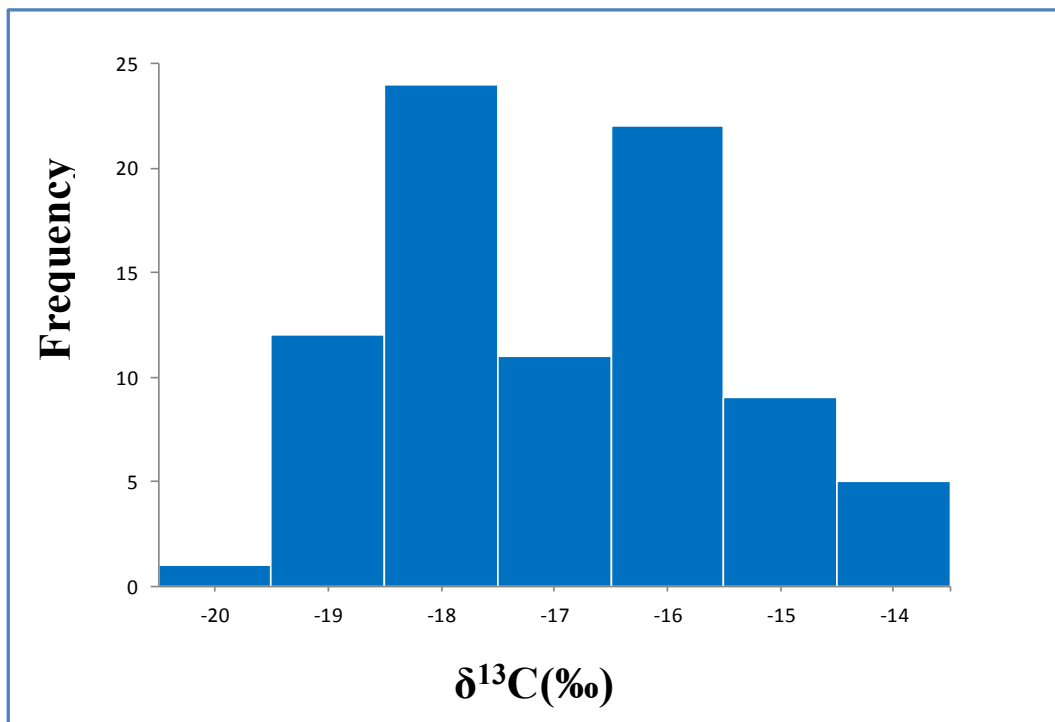


Fig. 4 The histogram of $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ for the Japanese anchovy ($n=84$) in Sagami Bay
(From Papers on Environmental Information Science, No29 : Fig.3(a) of Miyachi *et al.* 2015)

3. 4. 考察

3. 4. 1. 北西太平洋親潮外洋域の栄養段階と食物網構造

北西太平洋の親潮外洋域での各 site の T09 ($n=5$), T23 ($n=5$), T29 ($n=5$)の成魚カタクチワシの $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ および 3site ($n=15$)の平均 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($-19.8\pm 0.4\text{‰}$, $8.9\pm 0.4\text{‰}$)は Mitani *et al.* (2006)による(39°N , 145°E ; 40°N , 151°E)で捕獲された本種の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($-18.9\pm 0.5\text{‰}$, $8.8\pm 0.9\text{‰}$), さらに, Tanaka *et al.*(2008)による北日本のはるか沖合の PO5 (42°N , 165°E)での($-19.9\pm 0.3\text{‰}$, $8.7\pm 0.34\text{‰}$)に近く, $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は外洋域で低く, かつ, 試料内変動が小さいことは Tanaka *et al.*(2008), Mitani *et al.* (2006)に一致した. 特に, T23 site をはじめ 3つの海域での $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値が Tanaka *et al.*(2008)の PO5 の値に近いことはこれらが北西太平洋親潮外洋域の特徴を示しているとし唆された.

また, Miller *et al.* (2011)によると浮魚類(カタクチワシなど)の TL は, 黒潮 - 親潮移行域では低く, 黒潮域では高いと $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を基に相対的に述べられていた. しかしながら, 数値は示されなかった.

本研究では, 外洋域におけるバルク法によるカタクチワシ成魚の $\text{TL}_{\text{bulk/bungii}}$ の推定の結果は, これまで本種が主に動物プランクトン食であるという胃内容物観察結果と矛盾はなかった.

3つの site の平均 $\text{TL}_{\text{bulk/bungii}}$ ($n=15$)から再構築された食物連鎖の食源(TL1)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (-21.9 , 1.7‰)は Aita *et al.* (2011)の植物プランクトンの実測値(-21.8 , 1.7‰)に一致した (Table 2; 4). 食物連鎖の起点の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値が低いことが明らかになった. 外洋域で本種の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値が低いのは食物連鎖の起点が低いことに由来すると示唆された.

すなわち、TL を求めることができれば、食物連鎖を再構築し、食物網の起点を明らかにすることができた。

3.4.2. 相模湾(沿岸域)の栄養段階と食物網構造

本研究で得られた相模湾における本種成魚 ($n=84$) の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は $(-17.4 \pm 1.5, 11.2 \pm 2.0\text{‰})$ で、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が $(8.3 \sim 18.5\text{‰})$ を示したことから、沿岸域では $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値は共に高く、試料内変動が大きいという Tanaka *et al.* (2008) を支持する。すなわち、相模湾カタクチワシの $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が著しく大きいことは測定データの間違いではない。また、シラスから未成魚では SL が大きくなるに伴って $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は高い値を示したことは Lindsay *et al.* (1998) を支持する。

相模湾については現地性の後期仔魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (11.0‰) を同位体基準に用いた $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は全成魚 ($n=84$) 平均で 3.0 ± 0.6 ($2.2 \sim 5.2$)、5 月試料 ($n=18$) で 3.1 ± 0.5 ($2.4 \sim 4.5$) を示し、再構築された食物連鎖の起点は親潮外洋域の食物網の起点と異なった (Fig.5)。

しかしながら、相模湾での $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は平均値では外洋域と同じように見えたが、個体ごとの $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ のバラツキ ($2.2 \sim 5.2$) は著しく大きく、植物プランクトン食からサメなどの高次捕食者までの 3 つのレベルに跨ることは、これまでの胃内容物観察結果ともあまりにもかけ離れている。カタクチワシの TL が 5 というのは、海洋生態系における生態的地位がトッププレデターに相当することになる。同様に、5 月試料は 1 回のサンプリングであるが、 $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は $2.4 \sim 4.5$ を示した。これが実際の TL を反映しているとは言い難い。

なぜ、相模湾におけるカタクチワシの同位体比に著しい試料内変動が生じているのか、試料内変動の要因について検討した。

相模湾での $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値についてシラス~未成魚にかけての変化について、三谷(1988)によると相模湾ではシラスは成長に伴って、主なエサの動物プランクトンの種類が変わり、大型になると述べていた。このことが外洋域に比べて相模湾における $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値が高いことは説明できるが、低い個体群の存在を説明できない。

また、一次生産者における $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の季節変動の影響が考えられるが、寿命が長い高次捕食者では、極限中心定理がはたらきほとんど影響がなくなるといわれている(南川・吉岡 2006)。年間を跨ってサンプリングされた全成魚($n=84$)では影響があるかも知れないが、1回のサンプリングである5月試料($n=18$)では季節変動の影響はないと考えられた。

田中はD論(2006)で、TLが転換しているように見えるが、胃内容物観察の結果と矛盾し、回遊魚類における安定同位体比には沖合・沿岸問題があると述べていた。さらに、Tanaka *et al.* (2008)は、相模湾では成魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値の試料内変動が大きく、TLが転換しているように見えたが、胃内容物観察結果と一致しないことから、TLの転換はないと述べ、様々な個体群の混在をほのめかしていた。

これらが同一食物網に属している場合には、TLの異なることが考えられる。しかしながら、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ が $-17.4 \pm 2.0\text{‰}$ で、変動幅が 6.1‰ ($-20.2 \sim -14.1\text{‰}$) を示しているので同一食物網に属しているとは考えにくい。さらに、相模湾の成魚 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($n=84$)は正規性が認められず ($P < 0.05$)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ のヒストグラムは2つの最頻値($-18.4 \sim -17.5\text{‰}$ と $-16.4 \sim -15.5\text{‰}$)を示した (Fig. 4)。したがって、宮地ほか(2015a)は相模湾では様々な個体群が混在し、本種にかかわる食物網は複数あると推測した。

宮地ほか (2013)は春先から初夏にかけて $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値の低い大型個体群が相模湾に来遊すると報告した。4月～7月にかけて相模湾で捕獲された SL120mm 以上の大型個体群 ($n=30$)は $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ ($9.8\pm 0.9\%$)で、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ ($-18.6\pm 0.8\%$)も低い。一方、8月～12月の試料の SL91～120mm の小型個体群($n=21$)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ は($-16.1\pm 1.0\%$)、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は($13.1\pm 1.9\%$)を示した(Table 1)。湾内育ちの未成魚、成魚の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は高くなることから、この湾内の後期仔魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ より低い値を持つ大型個体群は相模湾育ちではないと推察された。

宮地ほか (2013)によると駿河湾の後期仔魚($n=3$)の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は 8.2 ± 0.8 (7.3～8.7%)であった。この4月～7月にかけて相模湾に現れた大型個体群($n=30$)は湾外の摂餌履歴を持つ個体が相模湾に移動してきたと仮定して、駿河湾の後期仔魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (8.2%)を異地性の同位体基準として $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ を推定した結果は、平均で 3.5 ± 0.3 (3.1～4.1)を示した。この中に含まれていた5月試料の M-01 の $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は3.3であった。さらに、Takai *et al.* (2007)による伊豆半島沖の後期仔魚の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (8.6%)を同位体基準にした $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は平均で 3.4 ± 0.3 (3.1～4.0)で、M-01 の $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ は3.1を示した。この結果は、Takai *et al.* (2007)の伊豆半島沖の本種の $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}=3.3$ に近く、これまでの胃内容物観察結果とも矛盾がなかった。

さらに、この $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の低い大型個体群は鹿島灘、駿河湾など周辺海域の大型個体の値に近いことから相模湾における他の個体群とは異なった食物網に属した摂餌履歴を反映していると示唆された。

一方、相模湾で現地性食物網の起点(TL1)の指標と考えられた江ノ島の EOM の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ (7.1%) を同位体基準とした M-05 の TL_{bulk} は3.7であった(Table 5)。

したがって、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ で著しい試料内変動を示す相模湾のカタクチイワシは TL が異なるのではなく、属する食物網が異なり、それぞれの食源の同位体比の違いを反映している可能性が高い。

本種外洋域個体群($n=15$)と相模湾個体群($n=84$)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$ および $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の関係を示した $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}-\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ マップ(Fig. 2)および Fig. 3 SL- $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$, Fig.4 Histogram で明らかになったことは、様々な摂餌履歴を持つ個体群が混在し、異なる食物網の起点が存在すると解釈できる。

これらのことから、相模湾において個体ごとの TL_{bulk} が著しくバラツキがあるのは、「回遊魚なので同位体基準としての $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ 値について、自生性の食源と他生性の食源が区別されずに TL を推定していることが原因の一つと推察された」。北西太平洋外洋域のように TL_{bulk} を求め、食物連鎖を再構築し、その起点の値を明らかにできるはずである。

カタクチイワシの $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が大きい相模湾の場合、これらの個体群が同じ食物網に属していれば、TL の差は大きく、異なった食物網に属した個体群が混在していれば、TL の差は小さいはずである。したがって、このことを確かめるためには相模湾個体群について正確な TL を求めることが課題である。

Table 4 The data of isotope ratios to reconstruct the food source of Japanese anchovy by using mean TL_{bulk}

Sampling site	Offshore waters		Sagami Bay(Inshore waters)							
	T09, T23, T29 (n=15)		Sagami Bay (n=84)		May sample (n=18)		A group(large sized SL) (n=30)		B group (small sized SL) (n=21)	
mean TL _{bulk}	3.1*		3.0**		3.1**		3.4+		3.6**	
isotope ratios	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$
Japanese anchovy	-19.8	8.9	-17.4	11.2	-16.9	11.5	-18.6	9.8	-16.1	13.1
TL2	-20.9	5.1	-18.5	7.7	-18.0	7.6	-19.9	5.2	-17.7	7.7
TL1	-21.9	1.7	-19.5	4.3	-19.0	4.2	-20.9	1.8	-18.7	4.3

isotopic baseline:

* offshore waters T09, T23, T29 : *Eucalanus bungii* (TL2) (5.1‰) by Aita et al.(2011)

** Sagami Bay, May sample and B group (small sized SL) : autochthonous post larvae (11.0‰) in Sagami Bay

+ A group (large sized SL) : Izu peninsula offshore post larvae (8.6‰) by Takai et al.(2007)

Table 5 The data of isotope ratios to reconstruct the food source of Japanese anchovy/ sardine by using each TL_{bulk}

Sample name	Japanese anchovy				Sardine			
	M-01		M-05		T23k-04		T23M-04	
TL _{bulk} *	3.1		3.7		2.9		2.8	
isotope ratios (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$
determined TL	-18.7	9.1	-14.7	16.2	-19.9	8.1	-19.6	7.9
TL2.0	-19.8	5.2	-16.4	10.5	-20.8	5.1	-20.4	5.1
TL1.0	-20.8	1.8	-17.4	7.1	-21.8	1.7	-21.4	1.7

***isotopic baseline:**M-01: Izu peninsula offshore post larvae (TL3=8.6‰) by Takai *et al.* (2007)

M-05: EOM(TL1=7.1‰) at Enoshima Island in Sagami Bay

T23k-04 and T23M-04 : *Eucalanus bungii* (TL2=5.1‰) by Aita *et al.* (2011)

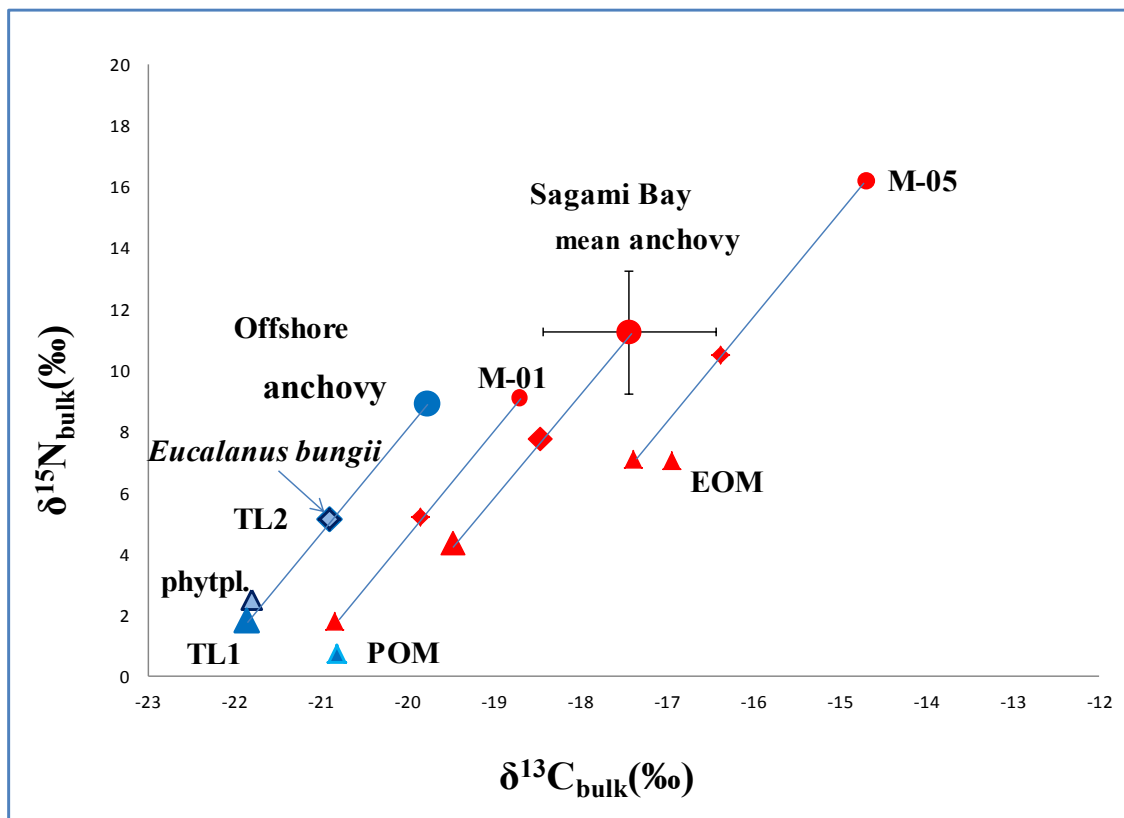


Fig. 5 Reconstructed simple food chain for Japanese anchovy by using TLbulk in Sagami Bay and Northwester Pacific Oyashio offshore waters

第4章 アミノ酸法に基づくカタクチイワシとマイワシの 個体ごとの $TL_{Glu/Phe}$ の決定と食物連鎖の再構築

4.1. 緒言

前章では、バルク法による TL は外洋域でも、相模湾でも平均はほぼ 3 であったが、相模湾では個体ごとの TL はバラツキが著しく、実際の TL を反映しているとは言い難かった。

回遊魚の $\delta^{13}C_{bul} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ はターンオーバー前であれば、他海域の摂餌履歴を保持しているので、沿岸域の相模湾では、 $\delta^{15}N_{bulk}$ の試料内変動が大きい場合、現地性の同位体基準だけでは適切な同位体基準を得られず、バルク法により個体ごとに正確な TL_{bulk} を推定することは難しかった。

前章で、相模湾では様々な個体群が混在していると示唆された。4 月～7 月にかけて相模湾に現れた大型個体群($n=30$)は湾内の現地性後期仔魚の $\delta^{15}N_{bulk}$ より低い値を持ち相模湾育ちではないと推察された。湾外から移動してきた摂餌履歴を持つと仮定し、湾外の異地性の後期仔魚を同位体基準に用いてバルク法による TL_{bulk} の推定を試みた。

Miyachi *et al.* (2015) および宮地ほか (2015b) は、アミノ酸法により捕食者のみで TL を決定することを試みた。

その際、重要なことは、TL を求め、食物網の起点を明らかにするためには、 $\delta^{15}N_{bulk}$ の季節変動と無関係の試料を用いることが望ましい。そこで、 $\delta^{13}C_{bul} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ が著しく大きな試料内変動を示した年間を通した全成魚($n=84$)と同様の傾向を示し、かつ、5 月に一回の採取で得た試料を用いることにより、 $\delta^{15}N_{bulk}$ の試料内変動の要因の一つである季節変動の影響を排除することができる。

そこで、5月試料の中から、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が最も低い値を示す試料 M-01 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}=9.1\%$) と最高値を示す試料 M-05 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}=16.2\%$) を選び(Fig. 2), アミノ酸法により $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を求めた。

$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が大きい場合、これらの個体群が同じ食物網に属していれば、TL の差は大きく、異なった食物網に属していれば、TL の差は小さいはずである。また、比較のために、典型的な外洋域である北西太平洋親潮外洋域で得られたカタクチイワシの中で、その $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ が最も低い値 (8.1%) を示したもの (試料名 T23k-04), マイワシでも同様に最低値 (7.9%) を示したもの (試料名 T23M-04) についても、 $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を求め、回遊性浮魚類の TL について、アミノ酸法の適用可能性を吟味するとともにバルク法と組み合わせて、食物網の違いの解明について論じる。

4. 2. 材料および方法

4. 2. 1. 採集地および採集時期

カタクチイワシ成魚($n=84$)は、2006年11月、2007年5月~12月、2008年4月~8月に相模湾江ノ島沖約1kmの定置網(139°28'E, 35°17'N)で片瀬・江ノ島漁業協同組合の協力を得て集められた(Fig. 1)。外洋域におけるカタクチイワシおよびマイワシ成魚は、2010年9月~10月に水産総合センター中央水産研究所の調査用船北鳳丸の中層トロールにより北西太平洋 T09site(45°N, 157°E), T23site(43°N, 165°E), T29site(44°N, 160°E)の親潮外洋域で捕獲された(Fig. 1)。試料は冷凍保存され、研究室に運搬された。試料はすべて前処理をするまで凍結保存された。その中から各 site で、成魚($n=5$ ずつ)が選ばれた。この選ばれた試料は、前章で用いられたものと同じである。

4.2.2. 前処理

集められたカタクチイワシおよびマイワシはSLを測定後、SL90mm以上を成魚とし、試料は胸びれ後ろの背側白色筋を摘出し、前処理をするまですべて凍結保存 (-30 或いは-80°C) した。脱脂はFolch *et al.* (1957)の方法に準じクロロフォルム-メタノール液(2:1)を用いた。すべての試料は粉末化し、分析するまで乾燥状態で保存した。すべての試料の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は、日本大学生物資源科学部生物環境科学研究センターの全自動窒素炭素安定同位体比質量分析計(EA/IRMS) ANCA-SL(PDZ Europa)を用いて、CとNは、同時に測定された。

4.2.3. アミノ酸ごとの窒素安定同位体分析

$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を測定した試料の中から代表的なものを選び、アミノ酸ごとの窒素安定同位体比($\delta^{15}\text{N}$)は海洋研究開発機構において測定された。アミノ酸の窒素安定同位体比分析は、生体試料からの抽出、揮発性物質への誘導體化、GC/C/IRMSによる同位体比測定の手順で行われた。抽出には塩酸加水分解が用いられ、生体タンパク質のアミノ酸への分解と抽出が同時に行われた。アミノ酸に揮発性を持たせるための誘導體化には、N-ピバロイル/イソプロピルエステル化(NP/iPr)を用いた。個々のアミノ酸の $\delta^{15}\text{N}$ はGC-C/TC III インターフェイスでThermo Fisher Scientific DeltaplusXP IRMSに連結されたAgilent Technologies 6890N GC (GC/C/IRMS) を用いて決定された(Chikaraishi *et al.*, 2007)。ワーキングスタンダードは N_2 ガス($\delta^{15}\text{N} = -4.3\text{‰}$)であった。必要な試料量はアミノ酸1分子あたり窒素量で約30ngで、標準物質および試料の測定精度は0.4‰であった。

グルタミン酸 (Glu)とフェニルアラニン (Phe)を用いた場合のTL($\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$)は次の式(6)で推定した(力石ほか2007; Chikaraishi *et al.*, 2009)。

$$TL_{Glu/Phe} = (\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - 3.4) / 7.6 + 1 \dots \dots \dots (6)$$

ここで $\delta^{15}N_{Glu}$ および $\delta^{15}N_{Phe}$ は捕食者の値を表し, 3.4 は水棲生物の一次生産者における $\delta^{15}N_{Glu}$ と $\delta^{15}N_{Phe}$ の差を表し, 7.6 は TL 当たりの両者の $\delta^{15}N$ 濃縮係数を表す(Chikaraishi *et al.* 2007; 2009) .

4.3. 結果

カタクチイワシ M-01 のグルタミン酸(Glu)とフェニルアラニン(Phe)の $\delta^{15}N$ は, それぞれ 22.8‰と 2.4‰, M-05 では 30.7‰と 11.3‰, T23k-04 では 18.7‰ と 1.3‰, マイワシの T23M-04 では 17.1‰ と -0.3‰あった. したがって, アミノ酸 Glu と Phe の $\delta^{15}N$ を用いたカタクチイワシ M-01, M-05, T23k-04 の $TL_{Glu/Phe}$ はそれぞれ, 3.2, 3.1, 2.8 と決定され, また, マイワシ T23M-04 の $TL_{Glu/Phe}$ は 2.8 であった(Table 6).

Table 6 The $\delta^{15}\text{N}$ of amino acids data in Japanese anchovy and Sardine

	M-01	M-05	T23k-04	T23M-04
	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)			
Alanine (Ala)	22.3	30.7	16.2	17.1
Glycine (Gly)	0.6	9.5	-1.8	-0.5
Valine (Val)	19.1	27.7	18.2	17.4
Leucine (Leu)	19.8	26.4	17.0	16.6
Isoleucine (Ile)	18.2	28.5	17.3	13.6
Proline (Pro)	19.0	26.8	15.1	13.0
Aspartic acid (Asp) + Threonine (Thr)	-	-	10.9	5.3
Serine (Ser)	1.4	10.1	3.0	2.2
Methionine (Met)	1.1	10.2	0.4	-1.3
Glutamic acid (Glu)	22.8	30.7	18.7	17.1
Phenylalanine (Phe)	2.4	11.3	1.3	-0.3
Hyp	-	-	-	-
$\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$	3.2	3.1	2.8	2.8

The analytical precision is 0.4‰ in 1 sigma (σ).

4.4. 考察

北西太平洋親潮外洋域における T23k-04 の $TL_{Glu/Phc}$ は 2.8 で、前章の *E. bungii* を同位体基準とした TL_{bulk} の 2.9 に近かった。T23k-04 から復元した食源 TL2 の $\delta^{13}C_{bulk}$, $\delta^{15}N_{bulk}$ は (-20.7, 5.4‰) で、TL1 の $\delta^{13}C_{bulk}$, $\delta^{15}N_{bulk}$ は (-21.7, 2.0‰) で、Aita *et al.* (2011) による親潮域の典型的な植食性動物プランクトン *Eucalamus bungii* (-20.9, 5.1‰) および親潮域の植物プランクトン (-21.8, 2.5‰) の実測値に近かった。したがって、カタクチイワシ T23k-04 は親潮外洋域の現地性食源に支えられていたと判断された。親潮外洋域では、カタクチイワシ食物網の起点の $\delta^{13}C_{bulk}$, $\delta^{15}N_{bulk}$ (-21.7, 2.0‰) はこの付近にあり、低いことが示唆された (Fig. 6)。

相模湾のカタクチイワシ M-01 は 3.2, M-05 は 3.1 で、両者の $\delta^{15}N_{bulk}$ の差は 7.1‰ もあり、バルク法による TL_{bulk} では TL が転換をしているように見えたが、アミノ酸法では両者の $TL_{Glu/Phc}$ はほとんど差がなく、TL 転換はないと判断した。TL が同レベルであることから、両者は異なった食物網に属し、食源 (TL1) の $\delta^{15}N_{bulk}$ を反映し、食物連鎖の起点が異なっていると示唆された。M-01 と M-05 の食源 (TL2, TL1) の $\delta^{13}C_{bulk} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ を復元し (Table 7), $\delta^{13}C_{bulk} - \delta^{15}N_{bulk}$ map にプロットし食物連鎖を再構築した (Fig. 6)。その結果、相模湾において高い $\delta^{15}N_{bulk}$ 値を示した M-05 から復元された食源 (TL1) の $\delta^{13}C_{bulk} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ は (-16.8, 9.0‰) で、相模湾の現地性指標である江ノ島の EOM (付着藻類) の実測値 (-16.9, 7.1‰) に近いので、M-05 は相模湾の現地性食源に支えられていたと示唆された。一方、相模湾で低い $\delta^{15}N_{bulk}$ 値を示した M-01 から復元された食源 (TL1) の $\delta^{13}C_{bulk} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ は (-120.9, 1.5‰) で、Takai *et al.* (2007) による伊豆半島沖の 3 月の POM (TL1 相当) の実測値 (-20.8, 0.7‰) に近く、外洋域の T23k-04 の食物連鎖構造とも似ていた。さらに、前の章で得られた大型個体群について、Takai *et al.* (2007) による伊豆半島沖の湾外の異地性後期仔魚を同位体基準に推定した

$TL_{\text{bulk/larvae}}$ は平均で(3.4±0.3)であった。また、M-01 の $TL_{\text{Glu/Phe}}$ が 3.2 で、湾外の伊豆半島沖の異地性の後期仔魚による $TL_{\text{bulk/larvae}}$ が 3.1 であった。

したがって、M-01 は外洋域食物網に属していたことがあると強く示唆された。すなわち、M-01 は相模湾から見ると異地性食源に由来する摂餌履歴を持つと見なされた。このようなことから相模湾では現地性と異地性の異なる食源を摂餌履歴に持つ個体群が混在し、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は幅を持つと判断した。

一方、既に述べたように外洋域の T23k-04 の $TL_{\text{Glu/Phe}}$ は 2.8 であったが、同所で、同時に捕獲されたマイワシ(T23M-04)の $TL_{\text{Glu/Phe}}$ についても 2.8 が得られたことは、山本・片山(012)および銭谷他(2013)による瀬戸内海において同所で捕獲された場合に TL が同じであることと一致した。さらに、北西太平洋親潮外洋域の T23 site において $TL_{\text{Glu/Phe}}$ を決定された個体の $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を同位体基準に T09, T23, T29 site のカタクチイワシおよびマイワシについて $TL_{\text{bulk}}(TL_{\text{bulk/Glu-Phe}})$ を求めた。その結果からもこれらの海域において同所、同時に捕獲された両種の TL は同じであった(宮地他 2015b)。したがって、T23 site だけでなく、北西太平洋親潮外洋域での同所・同時に捕獲されたカタクチイワシとマイワシの TL が同じであることが分かった。Tsuda *et al.* (2004) によると *E. bungii* など大型動物プランクトンが親潮海域において年間を通して卓越していることから、鯰耙の構造が粗いカタクチイワシでも細かいマイワシでも同所に生息していることで、共通して、主要な餌となっていたことが推察される。両種は同所に生息している場合、エサの競争が起きている可能性がある。マイワシにとって生息分布の北限と考えられる北西太平洋親潮外洋域ではこれまで見られなかったことで、マイワシ復活の兆しをとらえたのかも知れない(中央水研プレスリリース <http://www.fra.affrc.go.jp/pressrelease/pr25/250625/index.html> 水研セ中央水研, 20150401)。

以上のことから「アミノ酸法」はカタクチイワシの $TL_{Glu/Phe}$ を個体毎に推定し、 $\delta^{15}N_{bulk}$ の試料内変動が大きくても TL はほとんど同じであった。復元した食源(TL2, TL1)についてはそれぞれの海域の現地性の TL2 および TL1 の実測値に近かった。これらのことから外洋と沿岸の食物連鎖の起点(食源)の $\delta^{13}C_{bulk} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ は異なり、外洋域では起点が低く、相模湾では高いことが明らかになった。さらに、試料内変動が大きい相模湾で、「バルク法」でははっきりしなかった TL について、「アミノ酸法」は回遊魚の摂餌履歴が異なる場合でも、矛盾のない結果が得られたことにより、食物網の起点の高い個体群と低い個体群が混在していることが明らかになった。

Table 7 TL_{Glu/Phe} and isotope ratios data for Japanese anchovy/ Sardine and their reconstructed food sources

Sample name	Japanese anchovy				Sardine			
	M-01		M-05		T23k-04		T23M-04	
TL _{Glu/Phe}	3.2		3.1		2.8		2.8	
isotope ratios (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$
determined TL	-18.7	9.1	-14.7	16.2	-19.9	8.1	-19.6	7.9
TL2.0	-19.9	4.9	-15.8	12.4	-20.7	5.4	-20.4	5.2
TL1.0	-20.9	1.5	-16.8	9.0	-21.7	2.0	-21.4	1.8

(This Table was changed from a part of Table 4 of Miyachi et al. in Fisheries Science (2015))

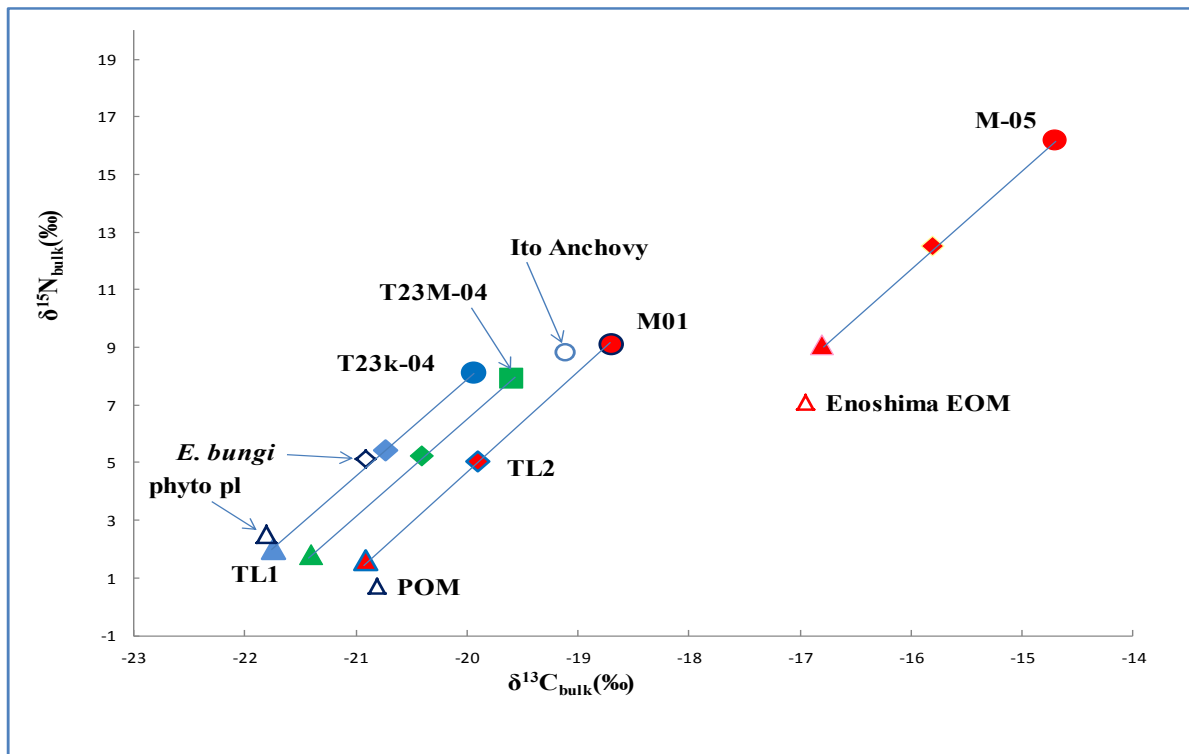


Fig.6 Reconstructed simple food chains for Japanese anchovy / sardine in Sagami Bay and Northwestern Pacific Oyashio offshore waters.

(From Fig. 3 of Miyachi *et al.* in Fisheries Science (2015))

- : Sagami Bay anchovy, ● : offshore anchovy, ■ : offshore sardine
- ◆ : TL2, ▲ : TL1 ▲ : estimated value, △ : measured value
- ◆ : TL2, ▲ : TL1 ▲ : estimated value, △ : measured value

M-01 and M-05: Japanese anchovy in Sagami Bay,

T23k-04 and T23M-04 :Japanese anchovy and sardine in Northwestern Pacific Oyashio offshore waters

Ito anchovy: Japanese anchovy at Ito offing area between Sadami Bay and Sagami Nada

EOM: epilithic organic matter at Enoshima island in Sagami Bay

POM: particulate organic matter (TL1) in Izu offshore waters by Takai *et al.* (2007)

E. bungii: Eucalanus bungii Zooplankton (TL2) in Oyashio waters by Aita *et al.* (2011)

phyto pl.: phytoplankton (TL1) in Oyashio waters by Aita *et al.* (2011)

第5章 総括

5.1. 総合考察

カタクチイワシの食物網の起点の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ は親潮外洋域で低く、相模湾では低いものと高いものがあることは予想されていたが(Tanaka *et al.* 2008, 宮地ほか 2015a), アミノ酸法により本種の $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を求めることができたことにより、親潮外洋域と相模湾(沿岸域)では食物網の起点が異なることが明らかになった。

親潮外洋域で再構築された食物連鎖における TL2 は Aita *et al.* (2011)による *Eucalamus bungii*(植食性の動物プランクトン) と TL1 は Aita *et al.* (2011)による植物プランクトンの実測値に近かった。

さらに、バルク法による $\text{TL}_{\text{bulk/bungii}}(n=15)$, $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}(n=15)$ の結果から得られた食源の値も Aita *et al.* (2011)の実測値と一致した。

したがって、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が小さい外洋域ではアミノ酸法による $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ とバルク法による TL_{bulk} がほとんど同じ結果が得られ、バルク法による TL_{bulk} の推定は有効であると示唆された。

一方、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動の大きい相模湾において M-01 と M-05 について $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の差は 7‰以上もあったが、アミノ酸法による $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ は同じであった。したがって、食物網の起点の異なることが示唆され、現地性と異地性の食源を判別できた。

しかしながら、バルク法では $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の試料内変動が大きい相模湾では、現地性の同位体基準だけでは $\text{TL}_{\text{bulk/larvae}}$ のための適切な同位体基準が得られず正確な TL 推定は困難であった。

アミノ酸法による現地性と異地性の食源を判別できたことにヒントを得て、駿河湾や伊豆半島沖の後期仔魚を異地性の同位体基準として用いバルク法による TL_{bulk} を推定することを試み、M-01 について、3 章においてバルク法により湾外における異地域性の同位体基準から求めた $TL_{bulk/larvae}=3.1$ とアミノ酸法による $TL_{Glu/Phe}=3.1$ が一致した。再構築された M-01 の食物網の起点は伊豆半島沖の POM の $\delta^{13}C_{bulk} \cdot \delta^{15}N_{bulk}$ に近かったことから、M-01 は相模湾外における異地性食源を摂餌履歴に持つと判断された。

さらに、親潮外洋域の食物連鎖の構造にも似ていた。相模湾で4月から7月に捕獲された M-01 を含む大型個体群($n=30$)について上記異地域性の同位体基準とした $TL_{bulk/larvae}$ は平均で 3.4 ± 0.3 (3.1~4.6)を示したことから、これらの中に他海域からの回遊個体が含まれていたことは否定できない。これは、宮地ほか (2013)により、シラス後期仔魚より低い $\delta^{15}N_{bulk}$ を示す成魚大型個体群が春から初夏に相模湾に出現することから、湾外の他の海域から回遊してきた個体群である可能性が高いと報告していることを支持する。これらの結果により、アミノ酸法の有効性が確認された。

以上のことから、「バルク法」による TL 推定は試料内変動が小さい場合は有効であるものの、沿岸域における回遊魚の試料内変動が大きい場合には現地性の同位体基準だけでは、個体ごとの TL 推定には限界があることが示された。一方、「アミノ酸法」による TL は、カタクチイワシやマイワシの $\delta^{15}N_{bulk}$ に試料内変動が小さい外洋域だけでなく、沿岸域で異なる摂餌履歴を持つ個体が混在して $\delta^{15}N_{bulk}$ に大きな差があっても捕食者だけで個体ごとに正確な TL を推定できた。

さらに、TL が求まったことにより Tanaka *et al.* (2008) が沿岸域と外洋域の間で $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ における大きな違いは食物網の起点における違いに起因するらしいと述べていたことを突き止めた。

また、バルク法の結果と組み合わせて、捕食者の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ から食物網の起点の $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ を推定し、食物連鎖の違いを比較し、相模湾におけるカタクチイワシの $\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ の大きな差は食物網の起点における現地性と異地性食源の違いに起因することが明らかになった。

5.2. 今後の展望

今回は、多くのバルクデータの中から、代表的な試料を選んでアミノ酸分析を行った。わずかな試料数であったが、 $\text{TL}_{\text{Glu/Phe}}$ を推定し、その $\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}} \cdot \delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}$ から食源を復元し、食物連鎖の起点を比較することができた。このアミノ酸レベルの TL の推定は、生態系間を移動する個体の存在などのために困難であった沿岸域などでの捕食と被捕食の関係を理解するのに有用なツールであることが示された。今後、固相抽出などによる試料調整法の改良と、多くの関連するデータが蓄積されることとで、アミノ酸法は、海洋生態系における食物網構造解明の発展に寄与することだろう。

謝 辞

本論文を執筆する機会を与えて戴きました日本大学大学院生物資源科学研究科教授 河野英一博士には、研究室に所属して以来長きに渡りご指導、ご鞭撻を賜りました。

本論文の主査として詳細な校閲を戴き、ご鞭撻を賜りました同教授 水谷広博士には、日本大学生物資源科学部生物環境科学研究センター実験室1における安定同位体分析についてのご指導並びに安定同位体についてデータ解析をはじめ、研究上の数々のご助言を戴きましたことに深く感謝申し上げます。

本論文の副査として同教授 広海十朗博士、同教授 糸長浩司博士には、懇切丁寧なご校閲を戴くとともに有益なご助言を戴きましたことに厚く御礼申し上げます。

日本大学大学院生物資源科学研究科専攻主任の同教授 上田眞吾博士および同名誉教授 片瀬隆雄博士には、安定同位体についてデータ解析をはじめ、研究上の数々のご助言を戴きました。また、本研究を進める上で有益なご助言を戴くとともに、地域環境保全学研究室研究生として所属以来長きに渡り、研究活動についてご指導戴き、かつ、本論文をご校閲戴いた同准教授 笹田勝寛博士、これまでの研究活動及び本論文のご校閲を戴くとともに図表の作成で有益なご助言を戴いた同専任講師 對馬孝治博士に感謝の意を表します。さらに、胃内容物観察についてプランクトンの同定及び顕微鏡並びに撮影装置の提供を戴いた同教授（元所属）大島海一博士、同短期大学教授（元所属）浅野紘臣博士には多くのご助言を戴きましたことに厚く御礼申し上げます。

アミノ酸ごとの窒素安定同位体分析を実施して戴くとともに、有益なご助言を戴いた国立研究開発法人海洋開発機構の大河内直彦博士、同小川奈々子博士、同力石嘉人博士に厚く御礼申し上げます。また、安定同位体についてデータの解析をはじめ、研究上の数々の

ご助言を戴きました国立研究開発法人海洋開発機構の和田英太郎博士，福井県立大学教授富永修博士に厚く御礼申し上げます。

日本大学生物資源科学部の生物環境科学研究センター実験室1における安定同位体分析装置の基本操作についてご指導を戴きました日本大学生物資源科学部准教授 高井則之博士，京都大学生態学研究センターにおける安定同位体分析研修でご指導戴いた同教授（元所属） 陀安一郎博士並びに同センターの方々に感謝申し上げます。さらに，本学の生物環境科学研究センター実験室1での分析に当たり，長期に渡り終始ご協力戴きました日本大学大学院研究生 馬谷原武之氏，分析装置について技術的サポートを戴いた EsTech 京都の林秋一氏，太陽日酸株式会社の大野敬司氏には心から感謝の意を表します。

北西太平洋の親潮外洋域における標本採集では国立研究開発法人水産総合研究センター中央水産研究所（元所属）の川端淳博士並びに北鳳丸船長はじめ乗組員の方々，相模湾における標本採集では神奈川県水産技術センターの三谷勇博士（元所属），同仲手川恒氏，同石戸谷博範博士および江ノ島・片瀬漁業協同組合長の故浜野正一郎氏ならびに同漁業協同組合，大洗町漁業協同組合，静浦漁業協同組合の方々，また，相模湾におけるプランクトンやムラサキイガイ調査では，日本大学生物資源科学部准教授荒功一博士，源春丸船長湯浅一春氏，さらに，日立造船株式会社の能地優氏，中川豪樹氏にご協力を戴いたことに対して深く感謝致します。

東北大学名誉教授の川崎健博士には回遊性浮魚類の生態について，同助教伊藤絹子博士，独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所の田中寛繁博士にはデータの解析や実験方法について，有益なご助言を戴いたことに厚く御礼申し上げます。

Miyachi Shunsaku-3

日本大学生物資源科学部地域環境保全学研究室の大学院生，研究生，卒業生の方々，ならびに同生物環境科学研究センターの方々には本研究において多くのご協力を戴きましたことに感謝の意を表します。

以上の方々，また，これまでにお名前を上げさせて戴いたの方々以外にも，多くの方々に私の研究を支えて戴きましたことに心より感謝申し上げます。

引用文献

- Aita, M.N., Tadokoro, K., Ogawa, N.O., Hyodo, F., Ishii, R., Smith, S.L., Saino, T., Kishi, M.J., Saitoh, S., and Wada, E. (2011). Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments. *Journal of plankton research* 33, 1629–1642.
- 青木一郎, 根本洋樹, 安保充 (2005). 日本周辺海域におけるカタクチイワシの資源構造
月刊 海洋 号外, 161~165.
- Cabana, G., and Rasmussen, J.B. (1996). Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 93, 10844-10847.
- Chikaraishi, Y., Kashiyama, Y., Ogawa, N.O., Kitazato, H., and Ohkouchi, N. (2007). Metabolic control of nitrogen isotope composition of amino acids in macroalgae and gastropods: implications for aquatic food web studies. *Marine Ecology-Progress Series* 342, 85-90.
- 力石嘉人, 柏山祐一郎, 小川奈子, 大河内直彦 (2007). 総説 安定同位体利用技術 生態学指標としての安定同位体：アミノ酸窒素同位体分析による新展開. *Radio Isotopes* 156, 463-477.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., and Ohkouchi, N. (2009a). Compound-specific nitrogen isotope analysis of amino acids: Implications of aquatic food web studies. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 73, A219-A219.

- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., Kashiyama, Y., Takano, Y., Suga, H., Tomitani, A., Miyashita, H., Kitazato, H., and Ohkouchi, N. (2009b). Determination of aquatic food-web structure based on compound-specific nitrogen isotopic composition of amino acids. *Limnology and Oceanography-Methods* 7, 740-750.
- Chikaraishi, Y., Ogawa, N.O., and Ohkouchi, N. (2010). Further evaluation of the trophic level estimation based on nitrogen isotopic composition of amino acids. (Kyoto Kyoto University Press).
- 力石嘉人, 小川奈々子, 高野淑識, 土屋正史, 大河内直彦 (2010). アミノ酸の窒素同位体比を用いた水棲生物の栄養段階の解析. *地球化学* 44, 233-241.
- DeNiro, M.J., and Epstein, S. (1978). Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 42, 495-506.
- Folch, B., Lees, M., and Stanley, G. (1957). A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *The Journal of Biological chemistry* 226, 497-509.
- Funakoshi, S. (1992). Relationship between stock levels and the population structure of the Japanese anchovy. *Mar Behav Physiol* 21, 1-84.
- 船越茂雄 (1990). 遠州灘, 伊勢湾・三河湾及びその周辺海域におけるカタクチイワシの再生産機構に関する研究. *愛知水試研究業績* 8 集, 1~208.
- Funamoto, T., and Aoki, I. (2002). Reproductive ecology of japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu, Japan. *Jpournal of Fish Biology* 60, 154-169.

- Kawasaki, T., and Kumagai, A. (1984). Food Habits of the Far Eastern Sardine and Their Implication in the Fluctuation Pattern of the Sardine Stocks. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 50, 1657-1663.
- Kawasaki, T. and Omori, M., (1988). Fluctuations in the three major sardine stocks in the Pacific and the global trend in temperature. In: T. Wyatt and G. Iarranenta (eds). *Long Term Changes in Marine Fish Populations A symposium held in Vigo.*: 37-53.
- Lalli, C.M., and Parsons, T.R. (1997). *Biological Oceanography: An Introduction*. Second Edition. Butterworth-Heinemann. London.
- Lindeman, R.L. (1942). The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology* 23, 399-418.
- Lindsay, D.J., Minagawa, M., Mitani, I., and Kawaguchi, K. (1998). Trophic shift in the Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in its early life history stages as detected by stable isotope ratios in Sagami Bay, Central Japan. *Fisheries Science* 64, 403-410.
- Macko, S.A., Forgel Estep, M.I., Egel, M.H., and Hare, P.E. (1986). Kinetic fractionation of stable nitrogen isotopes during amino acid transamination. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 50, 2143-2146.
- McClelland, J.W., and Montoya, J.P. (2002). Trophic relationships and the nitrogen isotopic composition of amino acids in plankton. *Ecology* 83, 2173-2180.

- McClelland, J.W., Holl, C.M., and Montoya, J.P. (2003). Relating low delta N-15 values of zooplankton to N-2-fixation in the tropical North Atlantic: insights provided by stable isotope ratios of amino acids. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap* 50, 849-861.
- 三原行雄 (2000). 道東太平洋およびその周辺海域におけるカタクチイワシの成熟. *水産海洋研究* 64, 10~17.
- Miller, T.W., Lingen, C.V.D., Brodeur, R., Omori, K., Hamaoka, H., and Isobe, T. (2011). Understanding What Drives Food Web Structure in Marine Pelagic Ecosystems. *Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry-Marine Environmental Modeling & Analysis*, Eds Ehime University, Matsuyama, 125-131.
- Minagawa, M., and Wada, E. (1984). Stepwise enrichment of ^{15}N along food-chains: Further evidence and relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 48, 1135-1140.
- Mitani, Y., Bando, T., Takai, N., and Sakamoto, W. (2006). Patterns of stable carbon and nitrogen isotopes in the baleen of common minke whale *Balaenoptera acutorostrata* from the western North Pacific. *Fish. Sci.* 72, 69-76.
- 三谷勇 (1988). 相模湾シラス漁場におけるカタクチイワシの食性. *日本水産学会誌* 54, 1859-1865.

宮地俊作, 馬谷原武之, 對馬孝治, 笹田勝寛, 河野英一 (2013). 相模湾カタクチイワシ

(*Engraulis japonicus*)の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ による回遊個体群の検討. 環境情報科学 学術研究論文
文集 27, 27-32.

Miyachi, S., Mayahara, T., Tsushima, Sasada, K., Kohno, E., Ogawa, N. O., Chikaraishi, Y. and

Ohkouchi, N.(2015) Approach to determine individual trophic level and the difference in food
sources for each Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay based on
compound-specific nitrogen stable isotope analysis of amino acids.

宮地俊作, 馬谷原武之, 對馬孝治, 笹田勝寛, 河野英一 (2015a). 安定同位体比を用いた外

洋域と沿岸域カタクチイワシの栄養段階および食物網構造の推定. 環境情報科学 学術
研究論文集 29, 17-22. .

宮地俊作, 馬谷原武之, 對馬孝治, 笹田勝寛, 河野英一, 川端淳, 力石嘉人, 小川奈々子, 大

河内直彦 (2015b). 安定同位体分析による北西太平洋におけるカタクチイワシとマイワ
シの栄養段階と食源の推定 日本生物地理学会会報 70, 33-41.

森本晴之, 2010. 日本産マイワシにおける繁殖特性の時空間変化とその個体群動態への影

響. 水産海洋研究 74(特集号): 35-45.

小川奈々子, 力石嘉人, 大河内直彦 (2009). アミノ酸の天然レベル窒素安定同位体組成を

用いた食性解析. 臨床化学 38, 266-271.

O'Reilly, C.M., Hecky, R.E., Cohen, A.S., and Plisnier, P.-D. (2002). Interpreting stable isotopes in food webs: Recognizing the role of time averaging at different trophic levels. *Limnol Oceanogr* 47, 306-309.

Post, D.M. (2002). Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. *Ecology* 83, 703-718.

Schmidt, K., Atkinson, A., Stubing, D., McClelland, J.W., Montoya, J.P., and Voss, M. (2003). Trophic relationships among Southern Ocean copepods and krill: Some uses and limitations of a stable isotope approach. *Limnology and Oceanography* 48, 277-289.

杉崎宏哉, 児玉真史, 市川忠史, 山田圭子, 和田英太郎, 渡邊朝生 (2013). 安定同位体による新食物網解析法—数値の解釈と基礎生産者の同位体比推定記述モデルの検討—. *水産技術* 6 (1), 57-68.

須原三加・森泰雄・三原行雄・山本昌幸・川端淳・高橋素光・勝川木綿・片山知史・山下洋・村知彦・邊良朗(2013). カタクチイワシの繁殖特性の海域比較. *日水誌* 79: 813-822.

Takai, N., Mishima, Y., Yorozu, A., and Hoshika, A. (2002). Carbon sources for demersal fish in the western Seto Inland Sea, Japan, examined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis *Limnol Oceanogr* 47, 730-741.

Takai, N., Hirose, N., Osawa, T., Hagiwara, K., Kojima, T., Okazaki, Y., Kuwae, T., Taniuchi, T., and Yoshihara, K. (2007). Carbon source and trophic position of pelagic fish in coastal waters of

south-eastern Izu Peninsula, Japan, identified by stable isotope analysis. *Fisheries Science* 73, 593-608.

高橋章策, 大関芳沖, 高橋裕一郎, 渡邊良朗, 小谷祐一, 小達和子, 横内克己 (1992). 東北沖合海域におけるサンマその他の小型浮魚類の分布と被食状況. 平成2年度漁業資源評価システム高度化調査結果報告書, pp. 58~90.

Takasuka, A., and Aoki, I. (2006). Environmental determinants of growth rates for larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in different waters. *Fisheries oceanography* 15, 139-149.

Takasuka, A. (2009). Studies on early life ecology and species alternation mechanism of small pelagic fish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 75, 640-643.

Tanaka, H., Takasuka, A., Aoki, I., and Ohshimo, S. (2008). Geographical variations in the trophic ecology of Japanese anchovy, *Engraulis japonicus*, inferred from carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Marine Biology* 154, 557-568.

田中寛繁, 高須賀明典, 青木一郎 (2005). カタクチイワシの回遊二型—炭素・窒素安定同位体比の海域比較 月刊海洋 37, 580~585.

田中寛繁 (2006). カタクチイワシを中心とした小型浮魚類の摂餌生態の比較研究. In 農学生命科学研究科 (東京, 東京大学大学院), pp. 189pp.

Tansley, A.G. (1935). The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 16, 284-307.

- 富永修・高井則之 編 (2008) 安定同位体比分析を始める人たちへ. 安定同位体スコープ
で覗く海洋生物の生態—アサリからクジラまで. 水産学シリーズ 159. 日本水産学会監修.
165pp. 恒星社厚生閣. 東京
- Tsuda A, Saito H, and H, K. (2004). Life histories of *Eucalanus bungii* and *Neocalanus cristatus*
(Copepoda: Calanoida) in the western subarctic Pacific Ocean. *Fish Oceanogr* 13, 10-20.
- 鶴田義成, 高橋章策 (1997). 黒潮続流域および混合水域におけるカタクチイワシ *Engraulis japonicus* の産卵生態. 北水研報 61, 9~15.
- 鶴田義成 (2001). カタクチイワシの生活史戦略. *Nippon Suisan Gakkaishi* 67, 1133-1134.
- 魚谷逸朗 (1985a). カタクチイワシの摂餌器官の発達と摂餌方法. *日本水産学会誌* 51,
197-204.
- 魚谷逸朗 (1985b). カタクチイワシの摂餌器官の発達と摂餌方法. *日本水産学会誌* 51(7),
1057-1065.
- 山本昌幸・片山知史, 2012. 1995年の瀬戸内海燧灘東部におけるカタクチイワシとマイワシ
の食性の比較. *水産海洋研究* 76: 66-76.
- 柳井久江 (2007). 4steps エクセル統計. (東京, OMS 出版).
- 由上龍嗣 (2003). カタクチイワシ成魚の耳石履歴の解析. (東京, 東京大学).
- 和田英太郎 (2009). 安定同位体フィンガープリント法. *日本生態学会誌* 59, 259-268
- 銭谷弘・河野悌昌・亘真吾・塚本洋一, 2013. 瀬戸内海燧灘におけるクラゲ・クシクラゲ
類, 浮魚類の栄養段階: 炭素・窒素安定同位体比による評価. *水産海洋研究* 77: 68-82.

参考文献

生態学事典(2003), 巖佐 庸・松本忠夫・菊沢喜八郎・日本生態学会編. 682pp. 共立出版.

東京

Odum, E.P. 水野寿彦訳(1967), 生態学. 224pp. 築地書館. 東京.

和田英太郎(2002), 地球生態系. 環境学入門. 171pp. 岩波書店. 東京

南川雅男・吉岡崇仁(2006), 生物地球化学. 地球化学講座. 日本地球化学会監修. 216pp. 培

風館. 東京

山路勇(1991), 日本海洋プランクトン図鑑. 538pp. 保育社. 東京

付属資料							
データ リスト No. 1							
相模湾 カタクチイワシ(1) シラス (後期仔魚を含む) および未成魚							
No.	Sample Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地	備考	
1	130 07101005SRS	-16.9	11.0	17	相模湾・江ノ島	後期仔魚	pooled 8 samples
2	49 07071303SRS	-15.6	11.5	21	相模湾・江ノ島		pooled 8 samples
3	50 07071306KSRS	-15.8	10.9	22	相模湾・江ノ島		pooled 5 samples
4	131 07101004SRM2	-16.9	11.1	22	相模湾・江ノ島		pooled 6 samples
5	51 070713052KSRM2	-16.3	10.6	25	相模湾・江ノ島		pooled 6 samples
6	53 070713051KSRM1	-15.8	12.0	26	相模湾・江ノ島	シラス	
7	52 070713022SRM2	-16.0	11.5	26	相模湾・江ノ島		
8	139 07103153SRL	-16.4	12.9	26	相模湾・江ノ島		
9	132 071031451SRB	-15.9	13.7	26	相模湾・江ノ島		
10	54 070713021SRM1	-15.8	11.5	28	相模湾・江ノ島		
11	133 071031331SRC	-16.1	12.9	28	相模湾・江ノ島		
12	55 07071304KSRL	-15.9	12.1	29	相模湾・江ノ島		
13	56 07071301SRL	-15.7	12.3	30	相模湾・江ノ島		
14	111 06111606-10Ssirs(KE)	-16.0	11.5	30	相模湾・江ノ島		
15	136 071010062SRL	-14.8	13.0	32	相模湾・江ノ島		
16	135 071010032SRL	-16.2	11.9	32	相模湾・江ノ島		
17	137 07101007SRL	-16.5	12.1	32	相模湾・江ノ島		
18	134 071010031SRL	-16.5	11.8	32	相模湾・江ノ島		
19	138 07101008SRL	-16.6	11.5	32	相模湾・江ノ島		
1	115 07103124JKM	-15.7	14.5	46	相模湾・江ノ島		未成魚
2	33 07121816JKS	-18.9	11.5	46	相模湾・江ノ島		
3	116 07103123JKM	-15.6	14.5	50	相模湾・江ノ島		
4	117 07103125JKM	-15.8	14.3	51	相模湾・江ノ島		
5	34 07121813JKM	-17.1	13.3	57	相模湾・江ノ島		
6	35 07121815JKM	-17.3	12.8	58	相模湾・江ノ島		
7	36 07121811JKM	-17.0	14.1	60	相模湾・江ノ島		
8	38 07121814JKM	-17.3	13.2	60	相模湾・江ノ島		
9	37 07121812JKM	-17.5	12.9	60	相模湾・江ノ島		
10	118 071031101JKM	-17.1	12.2	61	相模湾・江ノ島		
11	119 071031102JKM	-17.2	12.6	62	相模湾・江ノ島		
12	120 071031103JKM	-15.3	15.0	64	相模湾・江ノ島		
13	140 07091805JKL	-14.7	15.8	65	相模湾・江ノ島		
14	122 07103182JKL	-15.0	15.2	66	相模湾・江ノ島		
15	121 07103178JKL	-17.2	13.3	66	相模湾・江ノ島		
16	106 06111601A dt(KE)	-14.5	13.6	67	相模湾・江ノ島		
17	123 071031100JKM	-14.7	15.1	67	相模湾・江ノ島		
18	124 071031104JKM	-15.0	15.1	67	相模湾・江ノ島		
19	125 07103181JKL	-16.6	13.7	67	相模湾・江ノ島		
20	107 06111602A dt(KE)	-14.8	13.8	68	相模湾・江ノ島		
21	108 06111603A dt(KE)	-15.1	13.4	68	相模湾・江ノ島		
22	127 07103180JKL	-17.3	13.3	69	相模湾・江ノ島		
23	126 07103179JKL	-17.4	12.8	69	相模湾・江ノ島		
24	109 06111605A dt(KE)	-15.3	13.2	71	相模湾・江ノ島		
25	85 08061719JKL	-15.4	12.5	74	相模湾・江ノ島		
26	22 07080701JKL	-15.5	14.1	74	相模湾・江ノ島		
27	23 07080703JKL	-16.9	11.2	76	相模湾・江ノ島		
28	128 07103162SGL	-17.3	11.7	77	相模湾・江ノ島		
29	24 07080709JKL	-15.7	13.9	79	相模湾・江ノ島		
30	141 07091803JKL	-15.7	13.0	80	相模湾・江ノ島		
31	142 07091804JKL	-15.9	13.5	80	相模湾・江ノ島		
32	86 08061718JKL	-16.1	12.1	80	相模湾・江ノ島		
33	129 07103161SGL	-17.1	11.9	80	相模湾・江ノ島		
34	110 06111604A dt(KE)	-14.3	14.2	83	相模湾・江ノ島		
35	25 07080706JKL	-15.9	14.1	83	相模湾・江ノ島		
36	26 07080708JKL	-15.8	13.7	85	相模湾・江ノ島		
37	1 08041519JKL	-16.8	11.5	85	相模湾・江ノ島		
38	27 08080503JKL	-15.6	13.7	87	相模湾・江ノ島		
39	87 08061717JKL	-17.3	10.7	87	相模湾・江ノ島		
40	143 07091802JKL	-13.9	18.1	88	相模湾・江ノ島		
41	144 07091801JKL	-15.7	14.3	90	相模湾・江ノ島		

Miyachi Shunsaku-3

データ リスト No.2							
相模湾 カタクチイワシ(2) 成魚							
No.	Sample Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地	備考	
1	7 07080722SGM	-14.1	18.5	91	相模湾・江ノ島		
2	8 08080505SGM	-16.0	13.1	91	相模湾・江ノ島		
3	2 08041515SGM	-17.1	11.4	92	相模湾・江ノ島		
4	9 08080504SGM	-16.0	13.1	93	相模湾・江ノ島		
5	10 07080717SGM	-16.7	11.5	96	相模湾・江ノ島		
6	88 070529s53	-16.8	11.1	97	相模湾・江ノ島		
7	11 07080716SGM	-18.1	10.5	98	相模湾・江ノ島		
8	12 07080715SGM	-16.1	13.6	101	相模湾・江ノ島		
9	57 08061715SGM	-16.4	11.9	101	相模湾・江ノ島		
10	58 08061716SGM	-17.8	11.9	102	相模湾・江ノ島		
11	112 07103159SGL	-15.2	13.3	104	相模湾・江ノ島		
12	13 08080506SGM	-15.9	12.8	104	相模湾・江ノ島		
13	29 07121805SGM	-16.0	14.3	104	相模湾・江ノ島		
14	28 07121803SGM	-16.4	13.2	104	相模湾・江ノ島		
15	30 07121802SGM	-14.7	16.3	105	相模湾・江ノ島		
16	31 07121804SGM	-15.2	15.3	106	相模湾・江ノ島		
17	113 07103158SGL	-16.0	12.1	107	相模湾・江ノ島		
18	90 070529f37	-16.9	11.6	108	相模湾・江ノ島		
19	32 07121801SGM	-17.4	11.3	108	相模湾・江ノ島		
20	89 07052902SGL	-18.4	10.3	108	相模湾・江ノ島		
21	59 07061907SGL	-15.5	11.5	109	相模湾・江ノ島		
22	3 08041514SGM	-16.5	11.1	109	相模湾・江ノ島		
23	91 070529s45	-16.7	11.1	109	相模湾・江ノ島		
24	14 08080502SGL	-16.7	12.5	109	相模湾・江ノ島		
25	92 07052904SGL	-16.6	10.2	110	相模湾・江ノ島		
26	93 070529s50	-16.7	12.1	110	相模湾・江ノ島		
27	114 07103160SGL	-17.8	10.4	110	相模湾・江ノ島		
28	15 08070731SGL	-15.3	13.7	111	相模湾・江ノ島		
29	61 07061909SGL	-15.7	11.3	111	相模湾・江ノ島		
30	60 07061905SGL	-17.1	10.2	111	相模湾・江ノ島		
31	94 07052905SGL(M-05)	-14.7	16.2	112	相模湾・江ノ島		
32	16 07080714SGL	-15.9	12.9	113	相模湾・江ノ島		
33	95 070529f36	-16.2	12.9	113	相模湾・江ノ島		
34	96 070529s51	-16.1	13.1	114	相模湾・江ノ島		
35	63 07061908SGL	-16.2	11.3	114	相模湾・江ノ島		
36	62 07061906SGL	-18.1	11.2	114	相模湾・江ノ島		
37	97 07052903SGL	-17.2	10.1	115	相模湾・江ノ島		
38	17 07080733SGL	-17.3	11.8	115	相模湾・江ノ島		
39	39 080701s13	-18.7	10.6	115	相模湾・江ノ島		
40	64 070619Ads38	-18.9	9.7	115	相模湾・江ノ島		
41	98 070529s63	-17.6	10.3	116	相模湾・江ノ島		
42	99 070529f39	-14.9	15.2	117	相模湾・江ノ島		
43	18 07080726SGL	-15.7	12.4	117	相模湾・江ノ島		
44	100 070529s44	-17.7	10.4	117	相模湾・江ノ島		
45	40 080701s15	-18.5	10.8	117	相模湾・江ノ島		
46	65 070619Adf26	-19.3	8.7	117	相模湾・江ノ島		
47	66 08061704SGL	-18.1	10.9	118	相模湾・江ノ島		
48	67 08061714SGL	-19.5	8.3	118	相模湾・江ノ島		
49	41 080701f02	-14.9	15.2	119	相模湾・江ノ島		
50	19 07080727SGL	-15.5	12.4	119	相模湾・江ノ島		
51	68 070619Ads32	-19.2	9.7	119	相模湾・江ノ島		
52	69 070619Ads37	-20.2	10.2	119	相模湾・江ノ島		
53	20 08080501SGL	-16.9	12.4	121	相模湾・江ノ島		
54	101 070529f64	-17.6	11.4	121	相模湾・江ノ島		
55	44 080701s12	-17.9	10.3	121	相模湾・江ノ島		
56	42 080701f04	-18.1	10.0	121	相模湾・江ノ島		
57	43 080701f05	-18.7	10.0	121	相模湾・江ノ島		
58	70 070619Adf23	-18.9	10.4	121	相模湾・江ノ島		
59	102 070529s40	-16.3	12.0	122	相模湾・江ノ島		
60	103 070529s42	-16.9	11.4	122	相模湾・江ノ島		
61	73 08061711SGL	-18.6	9.6	122	相模湾・江ノ島		
62	72 08061702SGL	-19.0	9.5	122	相模湾・江ノ島		
63	71 070619Adf31	-19.8	8.9	122	相模湾・江ノ島		
64	21 07080729SGL	-18.0	11.9	123	相模湾・江ノ島		
65	105 070529f38	-18.5	9.4	123	相模湾・江ノ島		
66	104 07052901SGL(M-01)	-18.7	9.1	123	相模湾・江ノ島		
67	45 080701s11	-18.9	9.9	123	相模湾・江ノ島		
68	74 070619Adf30	-19.1	8.7	123	相模湾・江ノ島		
69	75 070619Ads33	-19.3	9.4	123	相模湾・江ノ島		
70	76 08061713SGL	-19.6	9.3	123	相模湾・江ノ島		
71	4 08041513SGL	-18.4	10.3	124	相模湾・江ノ島		
72	79 08061712SGL	-18.6	8.8	124	相模湾・江ノ島		
73	77 08061705SGL	-18.7	9.3	124	相模湾・江ノ島		
74	78 08061710SGL	-19.4	8.9	124	相模湾・江ノ島		
75	5 08041512SGL	-18.7	9.1	125	相模湾・江ノ島		
76	81 08061701SGL	-18.9	8.9	125	相模湾・江ノ島		
77	80 070619Adf24	-19.1	10.3	125	相模湾・江ノ島		
78	82 070619Ads34	-19.6	8.9	126	相模湾・江ノ島		
79	46 080701s14	-18.8	9.4	128	相模湾・江ノ島		
80	83 070619Adf22	-18.9	9.7	128	相模湾・江ノ島		
81	47 080701f01	-18.1	10.4	129	相模湾・江ノ島		
82	84 08061703SGL	-19.3	9.6	129	相模湾・江ノ島		
83	6 08041511SGL	-18.2	9.4	130	相模湾・江ノ島		
84	48 080701f03	-16.8	12.0	133	相模湾・江ノ島		

成魚

Miyachi Shunsaku-3

データ リスト No.3					
江ノ島EOM					
No.	Sample Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地
1	130522-103a	-17.3	5.2		相模湾・江ノ島
2	131018-ENO	-16.6	9.0		相模湾・江ノ島
伊東沖カタクチイワシ成魚・未成魚					
No.	Sample Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地
1	06121801JK	-16.3	11.5	84	伊東沖
2	06121802SG	-14.9	14.3	109	伊東沖
3	06121803SG	-19.7	7.6	128	伊東沖
4	06121804SG	-18.8	9.9	114	伊東沖
5	06121805SG	-18.9	9.0	125	伊東沖
鹿島灘カタクチイワシ成魚					
No.	Sample Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地
140	06121101AdtM	-16.3	11.2	101	鹿島灘
141	06121102-05AdtM	-16.7	11.4	100	鹿島灘
143	06121112-14,16AdtL	-19.2	9.3	123	鹿島灘
144	06121115AdtL	-19.4	8.5	125	鹿島灘
北西太平洋親潮外洋域					
(1)カタクチイワシ成魚					
No.	Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地
1	100928T09k-01	-19.2	9	110	T09
2	100928T09k-02	-19.7	8.6	121	T09
3	100928T09k-03	-19.5	9.2	124	T09
4	100928T09k-04	-19.6	8.8	127	T09
5	100928T09k-05	-19.2	8.6	130	T09
6	101003T23k-01	-20.3	8.8	109	T23
7	101003T23k-02	-20.2	8.6	115	T23
8	101003T23k-03	-19.4	8.6	117	T23
9	101003T23k-04	-19.9	8.1	115	T23
10	101003T23k-05	-20.5	8.8	112	T23
11	101006T29k-01	-19.4	8.9	124	T29
12	101006T29k-02	-19.8	10.1	116	T29
13	101006T29k-03	-19.4	8.8	127	T29
14	101006T29k-04	-19.7	9.0	124	T29
15	101006T29k-05	-20.5	9.3	118	T29
(2)マイワシ成魚					
No.	Name	$\delta^{13}\text{C}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{bulk}}(\text{‰})$	SL (mm)	採集地
1	100928T09M-01	-19.6	9.3	120	T09
2	100928T09M-02	-19.9	9.3	124	T09
3	100928T09M-03	-19.3	8.9	118	T09
4	100928T09M-04	-19.7	9.2	118	T09
5	100928T09M-05	-19.4	8.8	122	T09
6	101003T23M-01	-19.7	8.8	126	T23
7	101003T23M-02	-20.3	8.4	117	T23
8	101003T23M-03	-19.0	8.9	124	T23
9	101003T23M-04	-19.6	7.9	120	T23
10	101003T23M-05	-19.2	8.4	123	T23
11	101006T29M-01	-19.6	9.4	123	T29
12	101006T29M-02	-19.2	9.0	124	T29
13	101006T29M-03	-18.8	9.5	125	T29
14	101006T29M-04	-19.3	8.7	125	T29
15	101006T29M-05	-19.5	8.9	117	T29