

## 温暖化予測モデルに基づいたアカイカ産卵場の餌環境変動予測

西川 悠<sup>1,†</sup>, 石川洋一<sup>1</sup>, 田中裕介<sup>1</sup>, 淡路敏之<sup>1</sup>

### Estimating the impact of global warming on the neon flying squid by using forecast OGCMs

Haruka NISHIKAWA<sup>1,†</sup>, Yoichi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke TANAKA<sup>1</sup> and Toshiyuki AWaji<sup>1</sup>

2100年までのアカイカ (*Ommastrephes bartramii*) 産卵場における餌環境変動を、気候変動に関する政府間パネルの第3次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) の複数シナリオに基づく複数モデルのシミュレーション結果を用いて推定した。本種稚仔の餌量 (動物プランクトン等) は混合層深度データから間接的に推定した。その結果、21世紀を通じて産卵場は北上し、産卵場の餌量も増加することが示唆された。産卵場での餌量の増加により資源量も増加する可能性はあるものの、温暖化による回遊経路の変化は考慮していないため、現在の主漁場である東北沖での漁獲量変動についてはさらなる調査・検討が必要である。

The stock and migration ecology of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) winter–spring cohort depends on the feeding environment in the spawning grounds. Since the spawning grounds are confined by a sea surface temperature range of 21 to 25°C, the spawning grounds will shift in location with global warming. For that reason, estimation of the feeding environment temporal variation in the new spawning grounds is necessary to present a vision for the future fisheries. There are many climate models that have been used to simulate the future climates in the Coupled Model Intercomparison Project Phases 3 (CMIP3). In this study, we used three different emissions scenarios (B1, A1B, and A2) and models from three different modeling groups (MIROC3.2 (hires), CGCM3.1 (T47) and CSIRO-Mk3.0) to estimate the feeding environment in the spawning grounds. We estimated the chlorophyll-*a* concentration, as an index of feeding environment, in an indirect way by using physical parameters of each model, hence these models did not output the forage, i.e., particulate organic matter and zooplankton. In our study, all simulations showed that the chlorophyll-*a* concentration in the spawning grounds increases continuously through the 21st century due to the spawning grounds northward shift. The better feeding condition strongly suggests an increase in stock, however, it also retains the possibility that the migration ecology will change. So, the flourishing of the neon flying squid may not link to the catch increase in the current fishing grounds.

**Key words:** Neon flying squid, Global warming, CMIP3

#### はじめに

アカイカ (*Ommastrephes bartramii*) は亜熱帯から温帯にかけて生息する外洋性のイカである。北西太平洋系群は冬春季産卵群と秋季産卵群に大別される (Yatsu et al., 1997, 1998; Ichii et al., 2009)。産卵は海面水温 (以下 SST と記す) が 21°C から 25°C となる海域で行われ (Bower, 1994)、冬春季産卵群は 1–5 月に亜熱帯海域で生まれ、夏季に亜寒帯まで北上して索餌した後、冬季に再び産卵場に戻って来る

(Ichii et al., 2004, Fig. 1)。

日本のアカイカ漁の漁期は夏と冬の年二回、冬春季産卵群と秋季産卵群を対象に 5–8 月の北太平洋中央部で行われる夏イカ漁と、産卵回遊途上の冬春季産卵群を対象として 1–3 月の東北沖で行われる冬イカ漁である。ただしアカイカ漁を行う中型イカ釣り漁船の多くは冬季にはスルメイカ (*Todarodes pacificus*) 漁も兼業しており、漁船の燃費や単価を考慮してどちらを対象とするかを決定するため、資源量や漁場形成位置の予測に対する需要は大きい。

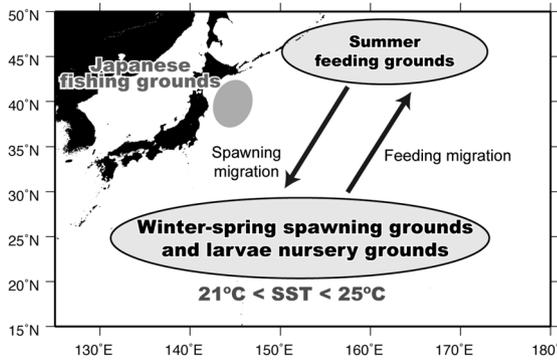
冬春季産卵群の資源量は、140–160°E、21°C < SST < 25°C の海域で冬春季の Chl-*a* 濃度が高くなると増加する傾向にある (Nishikawa et al., 2014)。Chl-*a* 濃度の増加はアカイカ稚仔の餌 (デトリタス・動物プランクトン (Uchikawa et

2015年1月19日受付, 2015年4月21日受理

<sup>1</sup> 国立研究開発法人海洋研究開発機構

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173–25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236–0001, Japan.

<sup>†</sup> harukan@jamstec.go.jp



**Figure 1.** Schematic diagram showing the winter-spring spawning grounds, summer feeding grounds, Japanese fishing grounds, and the migration routes of the neon flying squid.

al., 2009)) の増加につながる (Nishikawa et al., 2015), 初期の餌環境が資源量変動の鍵となっている可能性がある。

稚仔の餌環境および資源量は気候・環境変動の影響を強く受けることが指摘されている (Chen et al., 2007; Nishikawa et al., 2015). 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第5次評価報告書では、温室効果ガス濃度の人為的増加とその他の人為起源強制力の組み合わせによって海洋を含む気候システムの温暖化が起きている可能性が極めて高いと結論付けられた (IPCC, 2013). そして、現時点から温室効果ガスの排出量を最大限抑制したとしても、今後数十年は温暖化傾向が続くことが見込まれている。では、温暖化が進行するとアカイカはどうなるのだろうか？ 温暖化による海洋の成層強化により、地球規模での基礎生産は減少すると予想されている (Steinacher et al., 2010). 一方で亜熱帯に生息するマグロ類などは、温暖化により生息可能海域が北方の富栄養な海域に拡大するため、資源量がむしろ増大すると考えられている (Polovina et al., 2011). つまり亜熱帯の魚に関しては、温暖化は成層の強化による餌の減少と生息域の北偏による餌の増加という、相反する影響を及ぼすと予想されている。

産卵場が水温に規定され、孵化直後の餌環境が資源量に影響を及ぼすアカイカ冬季産卵群の場合、そのどちらの影響が大きいかで将来の資源量・漁獲量が変わってくるだろう。そこで本研究では、海洋の温暖化予測シミュレーション結果を用い、産卵場の北上と産卵場での成層強化の双方の影響を考慮してクロロフィル *a* (以下 Chl-*a* と記す) 濃度を推定し、現在との比較を通して2100年までの資源量変動を推定した。

#### データと方法

温暖化予測モデルの結果から Chl-*a* 濃度を推定するため、本研究では現在の海洋で見られる混合層深度 (以下 MLD

と記す) と Chl-*a* 濃度分布の空間的な関係を用いて、予測モデルによって推定された MLD 空間分布の変遷から将来の Chl-*a* 濃度分布変化を求めた。

#### 温暖化予測モデルの選定

温暖化の影響を推定する際には、なるべく多くの予測モデルの結果を用いたアンサンブル実験を行うことで予測の不確定性を低減させる (e.g., Ito et al., 2013). しかし、本研究では冬季に北西太平洋の中緯度に存在する南北2つの MLF と Chl-*a* 濃度分布の空間的な関係に注目し、温暖化予測モデルの MLD から Chl-*a* 濃度を推定するため、明瞭な MLF を適切な緯度に再現したモデルを選定する必要がある。IPCC 第3次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) の23モデルのうち、2000年代の MLF の再現性が確認された、MIROC3.2 (hires) (実施機関: CCSR and JAMSTEC, 水平解像度: 0.2度×0.3度, 以下同様), CGCM3.1 (T47) (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, 1.9度×1.9度), CSIRO-Mk3.0 (CSIRO Atmospheric Research, 0.8度×1.9度) の3モデルを選択した。産卵場北限となる SST 21°C 等温線の 140–160°E 平均緯度が2000年代から2090年代にかけての北上緯度を温暖化進行速度の指標とすると、選択した3つのモデルは温暖化進行の速い方から3番目、10番目、22番目であった (Fig. 5).

各モデルのバイアスについて、2000年代の各モデルの産卵場重心緯度 (140–160°E, 21°C<SST<25°Cの範囲に形成される産卵場の重心の緯度) と MLF 重心緯度 (140–160°E で平均した SMLF と NMLF の中点) の距離を、同化プロダクトの値と比較したところ、MIROC3.2 (hires) の場合、1–5月の相対距離は同化プロダクトの値に比べ、0.16–1.37度拡大する傾向があった。CGCM3.1 (T47) の場合は拡大する月と縮小する月があり、同化プロダクトとの差は-0.25–0.97度であった。CSIRO-Mk3.0 の場合は、相対距離が拡大する傾向が強く、1.79–2.12度であった。

温暖化予測モデルの結果は温暖化ガス排出シナリオにも依存する。そこで本研究では、排出量が少ない B1, 中程度の A1B, 多い A2 の3シナリオの結果を用いた (IPCC, 2000). ただし MIROC3.2 (hires) はシナリオ A2 に基づく計算を行っていないので、実際に使用したシミュレーション結果は8つである。

#### 現在の MLD・Chl-*a* 濃度データ

現在の MLD と Chl-*a* 濃度分布の空間的な関係を調べるに当たっては、海洋データ同化システム MOVE/MRI.COM-WNP (Usui et al., 2006) による MLD データと衛星 (MODIS) による Chl-*a* 観測データを用いて推定した。MOVE/MRI.COM-WN による同化プロダクトは月平均・水平解像度 0.1 度、MODIS のデータは月平均・水平解像度 9 km で、使用した期間は2003年から2010年である。MLD は海面から密度が 0.125 kg・m<sup>-3</sup> 増加する深度と定義した。MOVE/MRI.COM-WNP は海面高度や水温・塩分などの観測データを同化して

いるため、海面の値はほぼ観測データと一致している。

### 温暖化によって北上した産卵場でのChl-*a*濃度推定

一般にChl-*a*濃度は北に行くほど上昇する。しかし、現在のアカイカ冬春季産卵場 (140–160°E, 20–27°N) の北側に位置する黒潮再循環域 (140–180°E, 30–35°N) の一部では、再循環域に特徴的な厚い冬季混合層が光合成を抑制し、冬季のChl-*a*濃度が低くなるということが知られている (Yasuda and Watanabe, 2007)。したがってアカイカの現在の産卵場および将来の産卵場候補となる北西太平洋中緯度海域では、必ずしもChl-*a*濃度が北に向かって単調に増加するとは限らない。温暖化が進行した場合、再循環域の形成緯度が変化することもあり得るので、将来のChl-*a*濃度を推定するには産卵場と再循環域との相対位置が重要となるだろう。また、再循環域の中でも特に厚い混合層は155°E以西に形成されやすいため (Oka et al., 2012)、Chl-*a*濃度分布は経度にも依存している可能性がある。

そこで本研究では、最初に1–5月のMOVE/MRI.COM-WNPによる2003–2010年平均MLDデータとMODISによる2003–2010年平均Chl-*a*濃度データを用いて、再循環域からの相対位置を基準とした経度1度ごとのChl-*a*濃度南北分布データを作成した。再循環域の南北端には明瞭な混合層フロントが形成されるため、南の混合層フロント (以下SMLFと記す) と北の混合層フロント (以下NMLFと記す) の位置を再循環域位置の指標とした。ある経度においてChl-*a*濃度南北分布データ作成する場合、SMLF以南とNMLF以北となる緯度でのChl-*a*濃度はそれぞれSMLFとNMLFからの相対距離を元にした座標系に再配置し、SMLFとNMLFの間に位置する緯度のChl-*a*濃度はSMLF–NMLF間の内分比を求めたうえでその内分比を基準に再配置した。

こうして求めた現在のMLF-Chl-*a*濃度の関係と、各温暖化予測シミュレーション結果のMLDデータから特定した2100年までの各年・各月のMLF位置情報を組み合わせ、将来の北西太平洋中緯度海域におけるChl-*a*分布を推定した。なお、5月になると混合層が薄くなり、MLFの検出が困難になるため、5月のMLF位置は4月の値で代用した。最後に、各温暖化予測モデルのSSTデータから産卵場位置を特定し、作成したChl-*a*濃度分布図と照らし合わせて、北上した産卵場における経度ごとのChl-*a*濃度を推定した。

### 温暖化による混合層浅化の効果

上の方法で推定した新しい産卵場におけるChl-*a*濃度に、温暖化による混合層浅化によって基礎生産が低下する影響を加えることで、補正を行った。現在のアカイカの産卵場では、冬春季のChl-*a*濃度は栄養塩の供給の多寡で決まるため、秋冬季のMLDに依存することが示唆されている (Nishikawa et al., 2015)。実際に140–160°E, SMLFの南0–7度の海域において平均した10–2月MLDと1–5月のChl-*a*濃

**Table 1.** Coefficients of determination, *p* values (*t*-test) and the regression lines between the autumn–winter MLD (m) versus the monthly Chl-*a* concentration ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in the region 0–7° south of SMLF and between the winter MLD (m) versus the seasonal Chl-*a* concentration ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) in the region between SMLF and NMLF.  $R^2$  denotes the coefficient of determination, and *P* denotes the probability value. Between SMLF and NMLF, January–March value is subtracted from Yasuda and Watanabe (2007) and April–May value is subtracted from Nishikawa and Yasuda (2008).

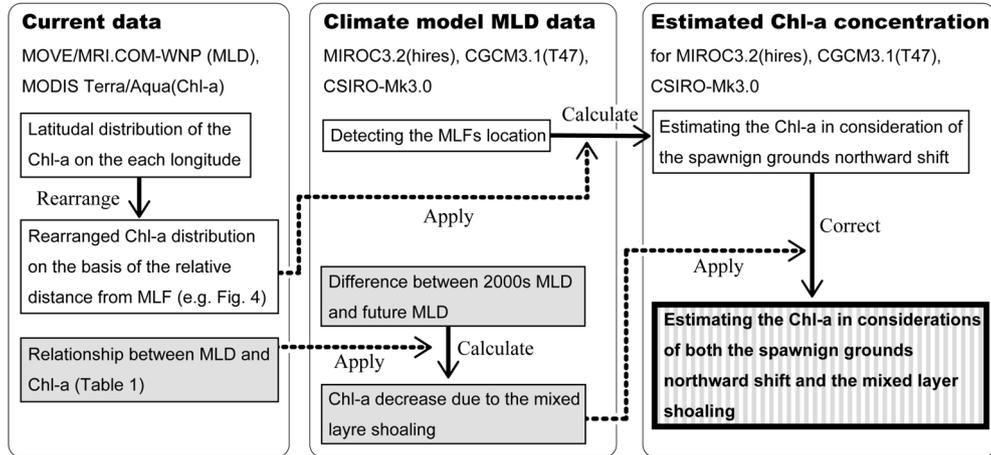
	$R^2$	<i>P</i>	Regression line
0–7° south of SMLF			
January	0.49	0.05	$\text{Chl-}a=0.000451 \times \text{MLD}+0.061324$
February	0.81	0.002	$\text{Chl-}a=0.000878 \times \text{MLD}-0.016454$
March	0.74	0.006	$\text{Chl-}a=0.000875 \times \text{MLD}-0.023207$
April	0.61	0.02	$\text{Chl-}a=0.000481 \times \text{MLD}+0.02894$
May	0.67	0.01	$\text{Chl-}a=0.000315 \times \text{MLD}+0.015363$
Between SMLF and NMLF			
January–March	0.35	0.003	$\text{Chl-}a=-0.0016 \times \text{MLD}+0.7724$
April–May	0.77	0.001	$\text{Chl-}a=0.0026 \times \text{MLD}+0.0192$

度の間には有意な正の相関関係があり、線形回帰直が可能である (Table 1)。表中の回帰直線を用いて、この海域内で温暖化によって10–2月の混合層が浅化した場合の、浅化深度に応じたChl-*a*濃度の減少量を見積もった。混合層の浅化深度は、2000年代の混合層分布の差から計算した。SMLFとNMLFの間の再循環域では、冬季/春季のChl-*a*濃度と冬季MLDの間に有意な負/正の相関関係があり、それぞれの回帰直線が先行研究から求められているので (Yasuda and Watanabe, 2007; Nishikawa and Yasuda, 2008)、その値を用いて混合層浅化の影響を推定した。

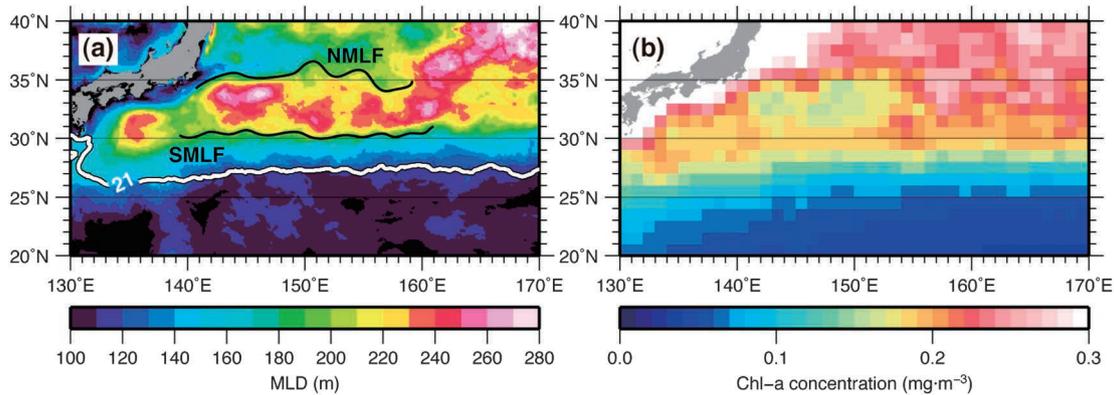
以上のChl-*a*濃度推定手法をFig. 2にまとめた。以下では、産卵場Chl-*a*濃度は月ごと・経度ごとに算出され、1–5月の産卵場Chl-*a*濃度を産卵場全域で平均した値から各年の冬春季産卵群の餌量について検討を加える。なお、本研究で使用した温暖化予測モデルは2001年から2100年までの予測を行っているため、2000年代と言った場合は2001年から2010年までを指す。その他の年代についても同様である。

### トレンドの検出

本研究では、各モデル・シナリオによる産卵場の緯度・MLFの緯度・推定した産卵場Chl-*a*濃度の推移についてトレンドを調べた。トレンドの検出にはMann–Kendall test (Hirsch et al., 1982) を用い、信頼区間は95%に設定した。



**Figure 2.** Charts explaining the estimation of the Chl-a concentration. The northward shift of the spawning grounds is shown in the white charts and shoaling of the mixed layer is shown in the gray charts. In the final step (striped chart) both influences are combined.

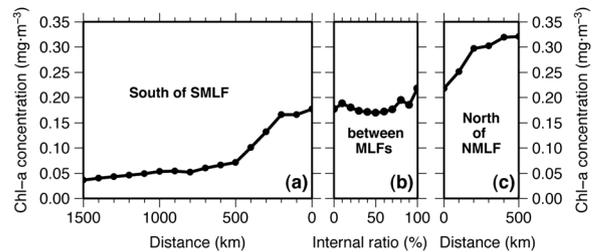


**Figure 3.** (a) Distribution of the February MLD, the locations of the SMLF and NMLF, and the SST 21°C contour line averaged from 2003 to 2010. The SST contour lines correspond to the northern limit of the spawning grounds. MLD and SST data are from MOVE/MRI.COM-WNP. (b) Distribution of the February satellite Chl-a concentrations averaged from 2003 to 2010.

## 結果

### MLFを基準とするChl-a濃度南北分布データ

最初に、現在の冬季MLDと冬季Chl-a濃度空間分布の関係、およびこれらのデータから作成したMLFを基準とするChl-a濃度南北分布データの例を示す。北西太平洋中緯度海域の冬季MLD分布を見ると、SMLFとNMLFとに挟まれた再循環域ではMLDが200 mを超え、特に再循環域の西側（140–150°E, 30–35°N）ではMLDが300 m近くに達する（Fig. 3a）。この再循環域西側では冬季Chl-a濃度が同経度の南側、北側に比べ低い（Fig. 3b）。つまり140–150°EのChl-a濃度南北分布はSMLFまでは増加するが、再循環域に入るといったん減少し、NMLFを越えると再び増加する。ただし同じ再循環域でも150°E以東では冬季Chl-a濃度は北に向かって単調に増加する。このため、冬季再循環域では150°E以東のChl-a濃度が150°E以西のChl-a濃度の1.5–2倍となる。また再循環域西側でも混合層が浅くなる4

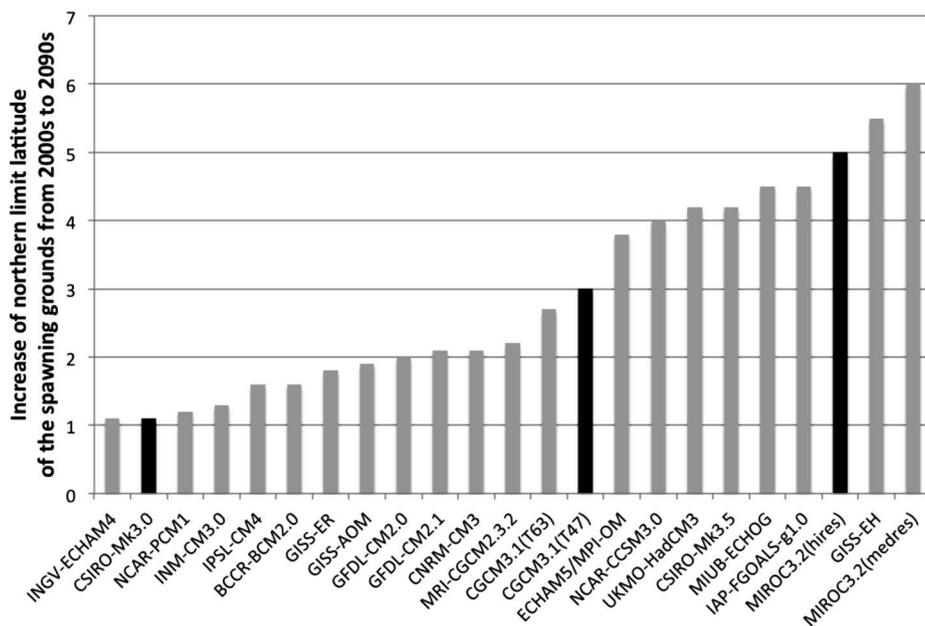


**Figure 4.** Example figures of rearrangement of the Chl-a concentration along 145°E in February according to (a) distance from the SMLF, (b) the internal ratio between the SMLF and NMLF and (c) distance from the NMLF.

月以降のChl-a濃度は北に向かって単調に増加する。このようなMLFとChl-a濃度分布の関係から各月の経度ごとChl-a濃度南北分布データを作成した例として、Fig. 4に2月145°Eのケースを示す。

**Table 2.** Differences in the latitude of the gravity center of the spawning grounds (GCSG), SMLF, and NMLF between 2001 and 2100. The units are latitudinal degrees. The latitudes shifted north unless a minus sign is used to indicate that latitudes shifted south over time. \* denotes that we can detect the northward trend from 2001 to 2100 with a 95% confidence limit.

		Jan-GCSG	Feb-GCSG	Mar-GCSG	Apr-GCSG	May-GCSG
B1	MIROC	3.78 *	3.11 *	2.88 *	2.91 *	4.24 *
	CGCM	1.37 *	1.27 *	0.82 *	0.98 *	1.1 *
	CSIRO	1.45 *	1.13 *	0.86 *	0.73 *	0.76 *
A1B	MIROC	5.08 *	4.55 *	4.31 *	4.67 *	5.39 *
	CGCM	3.6 *	3.06 *	2.6 *	2.56 *	3.18 *
	CSIRO	1.87 *	1.68 *	1.66 *	1.81 *	2.04 *
A2	CGCM	4.96 *	4.61 *	3.96 *	3.65 *	3.96 *
	CSIRO	2.55 *	2.47 *	2.5 *	2.3 *	2.84 *
			Jan-SMLF	Feb-SMLF	Mar-SMLF	Apr-SMLF
B1	MIROC	0.31	0.58	0.67 *	0.64 *	
	CGCM	-0.15	-0.04	-0.49	0.59 *	
	CSIRO	0.42 *	0.24 *	0.08 *	-0.19	
A1B	MIROC	0.19 *	0.32 *	0.25 *	0.37 *	
	CGCM	0.19	0.19	0.11	1.06 *	
	CSIRO	-0.31 *	-0.45 *	-0.28	0.22	
A2	CGCM	0.47 *	0.51 *	0.45 *	0.14 *	
	CSIRO	0.1	0.23	0.29 *	0.94	
			Jan-NMLF	Feb-NMLF	Mar-NMLF	Apr-NMLF
B1	MIROC	-0.35	0	0.17	-0.35	
	CGCM	0.01	-0.06	-0.23	0.01 *	
	CSIRO	0.1 *	-0.18 *	0.09 *	-0.01	
A1B	MIROC	-0.05 *	0.05 *	0.18 *	0.5 *	
	CGCM	0.15	0.15 *	0.22 *	0.31 *	
	CSIRO	-0.05	0.07 *	0.11 *	0.26 *	
A2	CGCM	0.36 *	0.29 *	0.15 *	0.14 *	
	CSIRO	0.18 *	0.39 *	0.41 *	0.34 *	



**Figure 5.** Differences in the latitude of the northern limit (defined as SST 21°C) of the spawning grounds from the 2000s to 2090s in 23 CMIP3 models for scenario A1B. The black bars are the models used in this study.

温暖化による産卵場と混合層フロントの推移

次に、各温暖化予測シミュレーションから得られた産卵場重心とMLF重心の推移について述べる。シナリオ、モデルを問わず、すべてのシミュレーション結果で21世紀を通じて産卵場重心が北上する明確なトレンドが見られ、その移動距離はおおむね1度以上、最大で5度だった (Table 2)。これに対しSMLFの場合、MIROC3.2 (hires) のシナリオA1BやCGCM3.1 (T47) のシナリオA2で北上のトレンドが見られたが、一方で2100年のSMLF重心が2001年時より南下していたケースもあり、1-2月のCSIRO-Mk3.0、シナリオA1Bでは南下のトレンドが検出された。ただし北上にしろ南下にしろ、2001年から2100年までの移動距離はほぼ1度以下と、産卵場重心の移動より小さい (Table 2)。NMLFの場合は温暖化進行が速いシナリオA2では北上のトレンドが見られたが、SMLF同様2001年から2100年までの移動距離はほぼ1度以下と小さかった (Table 2)。以上まとめると、産卵場がシナリオやモデルによらず

明瞭に北上していくのに対し、MLF位置はあまり変わらないか、北上してもわずかである。その結果、元々はSMLFの南にある産卵場は21世紀中にMLFに接近・通過することとなった。例えば最も温暖化進行の速いMIROC3.2 (hires) のシナリオA1Bの場合、2月の産卵場重心は2000年代にはSMLFより6度南にあったが、2090年代には2度まで近づいた。その結果、2100年に2月の産卵場の34%がSMLFとNMLFに挟まれた再循環域に出現した (Fig. 6)。

温暖化による混合層深度の推移

産卵場における推定Chl-a濃度は、産卵場の10-2月平均MLDが2000年代に比べ何m浅化したかを元に補正する。シナリオB1で浅化のトレンドが見られたのはMIROC3.2 (hires) の場合のみで、2100年には2000年代より15m混合層が浅化していた (Fig. 7a)。シナリオA1Bではすべてのモデルで浅化のトレンドが見られた (Fig. 7b)。2020年まではどのモデルの浅化深度も大差なく、2020年代以降、MIROC3.2 (hires) の浅化深度は他のモデルの3倍程度になり、2100年の時点での浅化深度はMIROC3.2 (hires) の場合18m、CGCM3.1 (T47) とCSIRO-Mk3.0では4mであった (Fig. 7b)。また、2070年代以降、MIROC3.2 (hires) とCGCM3.1 (T47) では浅化深度の増加が鈍る傾向にあったものの深くなることはなかったが、CSIRO-Mk3.0では2090年代以降、MLDが深くなる傾向にあった (Fig. 7b)。シナリオA2では、CGCM3.1 (T47)、CSIRO-Mk3.0とも2100年の時点で2000年代より9m浅化した。この値はシナリオA1Bの約2倍である (Fig. 7c)。なお、どちらのモデルでも浅化の進行は単調でなかった。CSIRO-Mk3.0の場合は2030年代に2000年代より混合層が深くなる傾向が見られた (Fig. 7c)。

産卵場Chl-a濃度の推定

以上の結果を元に、産卵場Chl-a濃度の推移を推定した。どのシナリオ、どのモデルにおいても、産卵場Chl-a濃度は増加傾向を示した (Fig. 8)。2005年のMIROC3.2 (hires)、CGCM3.1 (T47)、CSIRO-Mk3.0の産卵場Chl-a濃度はそれぞれ  $0.088 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.094 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  で、MIROC3.2

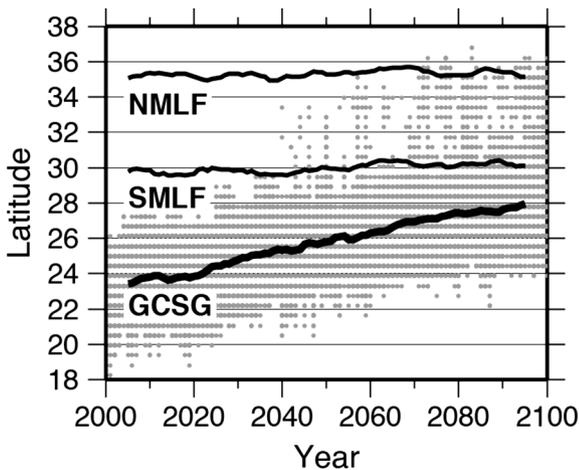


Figure 6. Time-series of the 10-year running mean in the latitude of the GCSG, SMLF and NMLF (solid lines) in February from 2005 to 2095, which was simulated by Scenario A1B of MIROC3.2 (hires). Gray dots denote the spawning latitude.

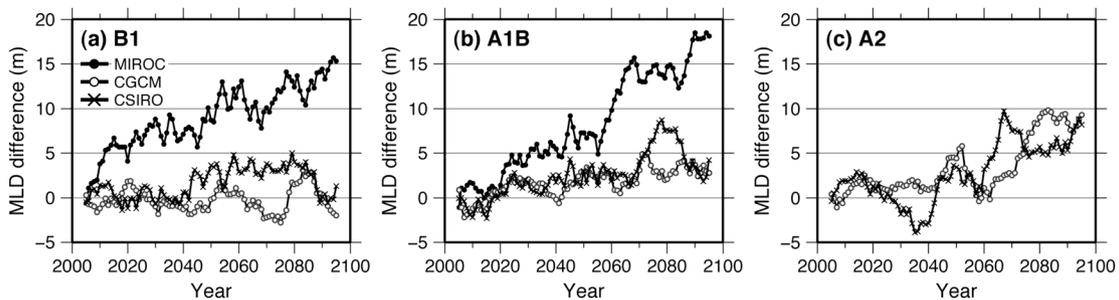


Figure 7. Time-series of the 10-year running mean difference in the autumn–winter MLD from the 2000s for all simulations.

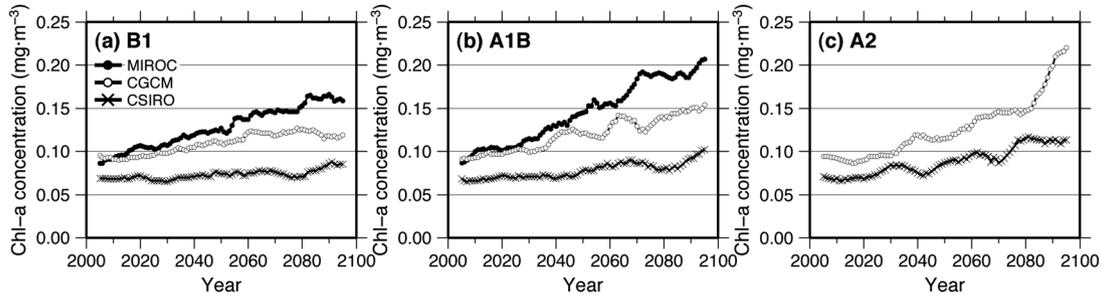


Figure 8. Time-series of 10-year running mean Chl-*a* concentrations in the spawning grounds for all simulations.

(hires) と CGCM3.1 (T47) の値は近いものの、CSIRO-Mk3.0は他の2つのモデルより低くなった。

2090年代平均でのChl-*a*濃度の2000年代平均に対する比率は、シナリオB1の場合、MIROC3.2 (hires), CGCM3.1 (T47), CSIRO-Mk3.0がそれぞれ1.8倍, 1.2倍, 1.2倍となった。シナリオA1Bの場合は同じ順で2.4倍, 1.7倍, 1.5倍となり、シナリオA2の場合はCGCM3.1 (T47) が2.3倍, CSIRO-Mk3.0が1.6倍であった (Fig. 8)。いずれのシナリオ・季節においても、増加率が最も高いのはMIROC3.2 (hires), 次いでCGCM3.1 (T47), 最も低いのはCSIRO-Mk3.0であった。経年変動の特徴としては、MIROC3.2 (hires) のシナリオA1Bでは2060年頃からChl-*a*濃度の増加速度を増し、CGCM3.1 (T47) のシナリオA2では2080年頃から増加速度が増していた (Fig. 8)。これは、産卵場位置がSMLFの南0-3度の、Chl-*a*濃度が急増する海域に入ったためである。

## 考察

### 温暖化予測モデル選択の妥当性

本研究で使用したすべての温暖化予測シミュレーションから、アカイカ産卵場のChl-*a*濃度は温暖化により増加するという結果が得られた。ただしChl-*a*濃度の推移をモデル間で比較すると、最もChl-*a*濃度の増加が大きくなるのはMIROC3.2 (hires), 次いでCGCM3.1 (T47), 最もChl-*a*濃度の増加が小さいのはCSIRO-Mk3.0であった。

推定Chl-*a*濃度の差は、温暖化進行速度および2000年代の産卵場とMLFの相対距離がモデル間で異なるため生じる。温暖化進行が速ければ産卵場がより北上するためChl-*a*濃度が増加する。産卵場の北上速度についてどのモデルの結果が妥当であると判断することは難しいが、Fig. 5で示したように本研究ではCMIP3の23モデルのうち温暖化進行が速いMIROC3.2 (hires), 平均的なCGCM3.1 (T47), 遅いCSIRO-Mk3.0をバランス良く選択している。23モデルでアンサンブル平均を取った場合、CGCM3.1 (T47) の結果に近い値になると考えられる。また、産卵場とMLFの距離が実際より遠ければ、産卵場が温暖化によって北上してもMLFに達するまでに時間がかかるため、Chl-*a*濃度が過小評価になる。2000年代のシミュレーション

の結果を見ると、CSIRO-Mk3.0では産卵場が実際より3度以上南偏しており、他のモデルに比べ産卵場とMLFの相対距離が大きい。したがって、CSIRO-Mk3.0のデータを使ったChl-*a*濃度推定は過小評価となっている可能性がある。

### 産卵場Chl-*a*濃度の経年変動

産卵場のChl-*a*濃度が増加するという結果になった理由の一つは、SSTで規定される産卵場がシナリオ・モデルによらず21世紀を通じて北上を続けるのに対し、再循環域の境界となるMLFの緯度があまり変化しないことである。温暖化が起こっても黒潮位置は変わらないため (Sakamoto et al., 2005), 再循環域の位置も変化しにくいのだと考えられる。したがって産卵場が北上した結果、産卵場とMLFの相対距離を指標とした産卵場Chl-*a*濃度推定値はほぼ単調に増加することとなった。本研究ではさらに温暖化によって混合層が浅化し、栄養塩の供給が減ってChl-*a*濃度が低下することを想定し、MLDの変化をChl-*a*濃度の推定に反映させた。しかし、どのシナリオ・モデルにおいても産卵場の北上によるChl-*a*濃度の増加を打ち消すほど混合層が浅化することはなかった。例えば、2100年の時点で最も混合層が浅化したのはシナリオA1BのMIROC3.2 (hires) のケースで浅化深度は17mであった (Fig. 7)。17mの混合層浅化に対応するChl-*a*濃度の減少分は、 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ で、これらは2001年から2100年までのChl-*a*濃度増加分の12%に過ぎない。

このように冬春季産卵群の平均の産卵場Chl-*a*濃度は増加するものの、増加率には温暖化に従って海域差が生じる。産卵場が北上して黒潮再循環域に移動すると、ここではChl-*a*濃度の増加率は東側でより高くなるためである (Fig. 3b)。これは西側の方が東側より冬季混合層が発達しやすく、冬季光合成を強く抑制することが原因だろう (Yasuda and Watanabe, 2007)。アカイカの初期の餌環境は現時点では産卵場内でほぼ均質だと考えられるが、産卵場が北上すれば東西で餌の獲得度が異なり、成長速度にばらつきが生じる可能性がある。アカイカ稚仔の餌環境は輸送モデルから詳しく推定することができる (Nishikawa et al., 2014)。しかし本研究で使用した温暖化予測モデルは、黒潮の位置

は適切に再現しているものの、水平解像度が粗く黒潮やその反流の流速は観測値の数%程度となっている。このようなモデル流速場では再循環域において現実的なアカイカの輸送・分布を推定することは困難である。そこで今回は産卵場のChl-*a*濃度ボックス平均値で冬春季産卵群の餌環境を代表させた。

### 温暖化のアカイカ冬春季産卵群への影響

本研究からアカイカ冬春季産卵群の産卵場は北の生産性の高い海域に移動し、21世紀を通じて餌環境が良くなることが示唆された。本研究では温暖化によって産卵期は変わらないと仮定した。しかしスルメイカの場合は温暖化が進むと産卵ピークがずれると考えられ(桜井ら, 2007)。実際にスルメイカが環境に応じて生活周期を変化させる可能性は飼育実験からも示唆されている(高原・木所, 2015)。これまでのところアカイカの生活周期が環境に応じて変化することを示す知見はないが、アカイカの場合も温暖化で産卵適水温帯が北上することにより親魚が早く産卵場に到達し、産卵ピークが早まるかもしれない。そこで産卵期が現在より一ヶ月早まることを想定し、2090年代の産卵期が12-4月であった場合の産卵場でのChl-*a*濃度を推定した。その結果、各シミュレーション結果による2090年代12-4月Chl-*a*濃度は、1-5月の値より平均で5%上昇した。これは5月の産卵場におけるChl-*a*濃度より12月の産卵場におけるChl-*a*濃度の方が高いためである。従って温暖化による産卵場の北上に加え産卵の早期化が起こった場合、産卵場のChl-*a*濃度は本研究での推定値より数%上昇する可能性がある。いずれにしても温暖化によって個々のアカイカの成長率は上がり、生残率の上昇につながると考えられる。

ただし、成長率が生残率とリンクするのは捕食圧が一定である場合である。温暖化によって捕食者が変化することも考えられる。アカイカの捕食者は、メカジキ(*Xiphias gladius*)やヨシキリザメ(*Prionace glauca*)などの大型魚、クジラ類などの海産ほ乳類、アカアシカツオドリ(*Sula sula*)などの鳥類と多岐にわたる(Okutani et al., 1976; Okutani and Satake, 1978; Percy, 1991; Mori et al., 2001; Muramatsu et al., 2013)。すべての捕食者の分布や資源量について温暖化の影響を調べるのは現状では困難であるが、Ito et al. (2013)が指摘した通り、温暖化が海洋生物資源に与える影響を正確に理解するためには、生態系全体の変動を捉えたモデルが必要不可欠である。

また、資源量自体が増えたとしても、温暖化の影響により回遊経路が変化し、現在の漁場での漁獲量が減る可能性がある。回遊経路変動を引き起こし得る要因の一つは産卵場の移動である。温暖化により産卵場が北上すると、黒潮離岸緯度は温暖化の影響を受けないため(Sakamoto et al., 2005)、産卵場の一部は黒潮に近接し、卵や遊泳力の小さな稚仔が黒潮によって東に流され、回遊ルートが現在より

沖合化する可能性がある。また、成長率の変化もアカイカの回遊生態に影響を与えるかもしれない。シナリオA1BのMIROC3.2(hires)による予測とシナリオA2のCGCM3.1(T47)による予測では、産卵場のChl-*a*濃度が $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ を上回った(Fig. 8)。この値は、現在のアカイカ秋季産卵群の2-3ヶ月齢時の索餌場のChl-*a*濃度に相当する。秋季産卵群は冬春季産卵群に比べ高緯度で産卵するため、生活史初期に得られる餌が多い。その結果、雄は産卵場周辺で得られる餌だけで成熟することができ、亜寒帯への索餌回遊を行わない(Ichii et al., 2009)。ここから、21世紀中に冬春季産卵群が現在の秋季産卵群以上の高成長率となり、回遊を行わなくなる可能性は低くないと考えられる。回遊経路の沖合化、回遊個体の減少が起これば、産卵回遊群を対象として燃費の嵩まない東北沖で操業している日本のアカイカ漁は大きな打撃を受ける。温暖化による回遊ルートの変化を調べる手法はスルメイカで確立されているため(Kishi et al., 2009)、今後は、アカイカおよびその捕食者の生態に関する知見を収集し、温暖化の影響を考慮した回遊モデルを構築して、アカイカ漁の将来展望を明らかにする必要がある。

### 謝辞

本研究は、文部科学省「気候変動適応推進プログラム(RECCA)」および「地球環境情報統融合プログラム(DIAS)」の支援により実施された。また本論文をまとめるにあたり、水産総合研究センター東北区水産研究所の酒井光夫博士にアカイカの生態学的知見について貴重なご助言を賜った。ここに深くお礼申し上げる。

### 引用文献

- Bower, J. R. (1994) Distribution of paralarvae of the squid *Ommastrephes bartramii* near the Hawaiian archipelago. Master's Thesis, Department of Oceanography, University of Hawaii, 120 pp.
- Chen, X. J., Zhao, X. H. and Chen, Y. (2007) Influence of El Niño/La Niña on the western winter-spring cohort of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the northwestern Pacific Ocean. *Ices. J. Mar. Sci.*, **64**, 1152-1160.
- Hirsch, R. M., J. R. Slack and R. A. Smith (1982) Techniques of trend analysis for monthly water-quality data. *Water Res. Bull.*, **18**, 107-121.
- Ichii, T., K. Mahapatra, M. Sakai, D. Inagake and Y. Okada (2004) Differing body size between the autumn and the winter-spring cohorts of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) related to the oceanographic regime in the North Pacific: A hypothesis. *Fish. Oceanogr.*, **13**, 295-309.
- Ichii, T., K. Mahapatra, M. Sakai and Y. Okada (2009) Life history of the neon flying squid: Effect of the oceanographic regime in the North Pacific Ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **378**, 1-11.
- IPCC (2000) Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the In-

- tergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Ito, S., T. Okunishi, M. J. Kishi and M. Y. Wang (2013) Modelling ecological responses of Pacific saury (*Cololabis saira*) to future climate change and its uncertainty. *Ices. J. Mar. Sci.*, **70**, 980–990.
- Kishi, M. J., K. Nakajima, M. Fujii and T. Hashioka (2009) Environmental factors which affect growth of Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, analyzed by a bioenergetics model coupled with a lower trophic ecosystem model. *J. Mar. Sys.*, **78**, 278–287.
- Mori, J., T. Kubodera and N. Baba (2001) Squid in the diet of northern fur seals, *Callorhinus ursinus*, caught in the western and central North Pacific Ocean. *Fish. Res.*, **52**, 91–97.
- Muramatsu, K., J. Yamamoto, T. Abe, K. Sekiguchi, N. Hoshi and Y. Sakurai (2013) Oceanic squid do fly. *Mar. Biol.*, **160**, 1171–1175.
- Nishikawa, H. and I. Yasuda (2008) Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) mortality in relation to the winter mixed layer depth in the Kuroshio Extension region. *Fish. Oceanogr.*, **17**, 411–420.
- Nishikawa, H., H. Igarashi, Y. Ishikawa, M. Sakai, Y. Kato, M. Ebina, N. Usui, M. Kamachi and T. Awaji (2014) Impact of paralarvae and juveniles feeding environment on the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) winter-spring cohort stock. *Fish. Oceanogr.*, **23**, 289–303.
- Nishikawa, H., T. Toyoda, S. Masuda, Y. Ishikawa, Y. Sasaki, H. Igarashi, M. Sakai, M. Seito and T. Awaji (2015) Wind system interannual variation in the subtropical northwestern Pacific and the neon flying squid stock. *Fish. Oceanogr.* (accepted)
- Oka, E., B. Qiu, S. Kouketsu, K. Uehara and T. Suga (2012) Decadal seesaw of the Central and Subtropical Mode Water formation associated with the Kuroshio Extension variability. *J. Oceanogr.*, **68**, 355–360.
- Okutani, T. and Y. Satake (1978) Squids in the diet of 38 sperm whales caught in the Pacific waters off northeastern Honshu, Japan, February 1977. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.*, **93**, 13–27.
- Okutani, T., Y. Satake, S. Ohsumi and T. Kawakami (1976) Squids eaten by sperm whales caught off Joban district, Japan, during January–February, 1976. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.*, **87**, 67–113.
- Pearcy, W. G. (1991) Biology of the transition region. NOAA Tech. Rep. NMFS., **105**, 39–55.
- Polovina, J. J., J. P. Dunne, P. A. Woodworth and E. A. Howell (2011) Projected expansion of the subtropical biome and contraction of the temperate and equatorial upwelling biomes in the North Pacific under global warming. *Ices. J. Mar. Sci.*, **68**, 986–995.
- Sakamoto, T. T., H. Hasumi, M. Ishii, S. Emori, T. Suzuki, T. Nishimura and A. Sumi (2005) Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extension to global warming in a high-resolution climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **32**.
- 桜井泰憲・岸 道郎・中島一步 (2007) スケトウダラ, スルメイカ, 地球規模海洋生態系変研究 (GLOBEC) —温暖化を軸とする海洋生物資源変動のシナリオ. 月刊海洋, **5**, 323–330.
- Steinacher, M., F. Joos, T. L. Frolicher, L. Bopp, P. Cadule, V. Cocco, S. C. Doney et al. (2010) Projected 21st century decrease in marine productivity: A multi-model analysis. *Biogeosciences*, **7**, 979–1005.
- 高原英生・木所英昭 (2015) 生息環境による成長・生活周期の変化特性を基にしたスルメイカの資源変動機構の解明—生息水温が与える若齢期における成長と成熟への影響—. 平成26年度スルメイカ資源評価協議会報告, 31–36.
- Uchikawa, K., M. Sakai, T. Wakabayashi and T. Ichii (2009) The relationship between paralarval feeding and morphological changes in the proboscis and beaks of the neon flying squid *Ommastrephes bartramii*. *Fish. Sci.*, **75**, 317–323.
- Usui, N., S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda and M. Kamachi (2006) Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Adv. Space Res.*, **37**, 806–822.
- Yasuda, I. and T. Watanabe (2007) Chlorophyll *a* variation in the Kuroshio Extension revealed with a mixed-layer tracking float: Implication on the long-term change of Pacific saury (*Cololabis saira*). *Fish. Oceanogr.*, **16**, 482–488.
- Yatsu, A., S. Midorikawa, T. Shimada and Y. Uozumi (1997) Age and growth of the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii*, in the North Pacific Ocean. *Fish. Res.*, **29**, 257–270.
- Yatsu, A., N. Mochioka, K. Morishita and H. Toh (1998) Strontium/Calcium ratios in statoliths of the neon flying squid, *Ommastrephes bartramii* (Cephalopoda), in the North Pacific Ocean. *Mar. Biol.*, **131**, 275–282.