

博士論文（要約）

東シナ海沖合域における流れ藻の分布、起源、輸送に関する研究

2016

東京大学大学院農学生命科学研究科  
水圏生物科学専攻

水野紫津葉

# 目次

第1章 緒言 .....	1
1.1 節 流れ藻とその研究 .....	1
1.2 節 東シナ海における流れ藻の分布 .....	3
1.3 節 研究の目的 .....	5
第2章 2-3月の東シナ海沖合における流れ藻の分布と生物量 .....	9
2.1 節 はじめに .....	9
2.2 節 材料と方法 .....	9
2.2.1 研究船による流れ藻分布の目視観測と流れ藻採集 .....	9
2.2.2 流れ藻の分布解析 .....	10
2.3 節 結果 .....	11
2.3.1 流れ藻の構成種 .....	11
2.3.2 付着器の有無と主枝長 .....	11
2.3.3 流れ藻の分布海域と分布密度 .....	11
2.4 節 考察 .....	13
2.4.1 東シナ海沖合域に分布する流れ藻の構成種 .....	13
2.4.2 流れ藻の分布海域と海域間の比較 .....	14
第3章 東シナ海における流れ藻の起源推定 .....	24
3.1 節 はじめに .....	24
3.2 節 材料と方法 .....	24
3.2.1 東シナ海表層の海流データ .....	24
3.2.2 粒子追跡モデル .....	25
3.2.3 粒子順追跡の計算条件と解析方法 .....	28
3.3 節 結果 .....	29
3.3.1 東シナ海沖合域の流れ藻採集点からの粒子逆追跡 .....	29
3.3.2 粒子順追跡 .....	30
3.4 節 考察 .....	31
3.4.1 東シナ海沖合域に分布するアカモク流れ藻の起源と発生時期 .....	31
第4章 2-3月に東シナ海沖合域に分布する流れ藻の輸送 .....	53
4.1 節 はじめに .....	53
4.2 節 材料と方法 .....	53
4.2.1 衛星通信型 GPS プイによる流れ藻輸送経路の把握 .....	53
4.2.3 粒子順追跡実験 .....	54
4.3 節 結果 .....	54
4.3.1 GPS プイの追跡 .....	54

4.3.2 東シナ海沖合域から日本海側と太平洋側への粒子輸送.....	55
4.3.4 各海域への流れ藻に見立てた粒子の輸送の割合.....	55
4.4 節 考察.....	56
第5章 春季鹿児島県海域に分布する流れ藻の起源.....	70
5.1 はじめに.....	70
5.2 材料と方法.....	71
5.2.1 鹿児島県海域における3,4月の流れ藻調査.....	71
5.2.2 粒子順追跡.....	71
5.3 結果.....	72
5.3.1 薩南海域の流れ藻の構成種.....	72
5.3.2 薩南海域における中国起源の粒子の分布.....	72
5.4 考察.....	73
5.4.1 鹿児島県海域における3月、4月の流れ藻の起源.....	73
5.4.1 薩南海域への流れ藻の輸送.....	74
第6章 総合考察.....	92
6.1 節 東シナ海におけるアカモク藻場と海洋環境.....	92
6.2 節 東シナ海沖合域流れ藻とブリの再生産.....	93
6.3 節 まとめ.....	95
謝辞.....	96
引用文献.....	98

## 第1章 緒言

### 1.1 節 流れ藻とその研究

海では、さまざまな大型海藻や海草がパッチをつくって浮遊し、しばしば潮目に集まり団塊を形成する。これらは、流れ藻とよばれており、世界の海で見られる。古くは、大航海時代にポルトガルの船乗りが大規模に漂流している大量の流れ藻を発見し、*Sargassum* とよんだことから、流れ藻の分布する大西洋のこの海域は Sargasso Sea と呼ばれるようになった。Sargasso Sea の海藻は、*Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon と *Sargassum fluitans* (Børgesen) Børgesen という 2 種類のホンダワラ科 Sargassaceae の海藻である(Parr 1939)。大西洋北東のヨーロッパ周辺では、Irish Sea においてヒバマタ目 Fucales をはじめとする褐藻や小型の緑藻が (Davenport & Renshaw 1993)、北海では褐藻類の *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis、*Himanthalia elongata* (Linnaeus) S. F. Gray、ホンダワラ *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt (Franke et al. 1999)、アイスランド周辺海域では褐藻類の *A. nodosum* や *Fucus vesiculosus* Linnaeus(Ingólfsson 1995)が流れ藻となっている (表 1-1)。カリフォルニア沖(Mitchell & Hunter 1970, Harrold and Lisin 1989, Bushing 1994, Kingsford 1995, Hobday 2000)や、南半球のチリ沖(Macaya et al. 2005, Hinojosa et al. 2010)、南アメリカの最南部周辺海域 (Helmuth 1994)、タスマニア海 (Edgar 1987) において、ジャイアントケルプ(*Macrocystis pyrifera* (Linnaeus) C.Agardh)が量的に多い (表 1-1)。以上のように流れ藻は世界各地の海に分布し、上述の *Sargassum*、*Macrocystis*、*Ascophyllum*、*Fucus* 属に分類される海藻である(Thiel and Gutow 2005)。

日本沿岸においても、1950 年代から流れ藻の分布量や構成種について流れ藻の生態的な研究が行われてきた。これは、後述するように、流れ藻が様々な水産重要種の再生産の場として重要な役割を果たしていることから行われたものである。これらの研究によれば、流れ藻を構成しているのはおもに褐藻のホンダワラ属で、春から夏にかけて多く出現した (瀬川ら 1960; 吉田 1963; 広崎 1963; Ida et al. 1967a; 池原・佐野 1986; Hirata et al. 2001)。

また、流れ藻の分布量については、九州から津軽海峡にかけて調査船から目視によって流れ藻のサイズを階級ごとにわけて湿重量を推定した研究（瀬川ら 1961a, b, c; 吉田 1963）、九州沿岸において航空機からの写真撮影による調査と調査船による採集調査から湿重量を推定した研究（三谷 1965a, b, c）があり、各海域の分布量と、その季節的消長が報告された。そして、流れ藻を構成する海藻種の出現には季節変動があり、例えば静岡県伊豆半島沖合における流れ藻を構成する枝長 45cm 以上の個体の種ごとの出現時期を調べた Hirata et al. (2003)によると、4-6 月はアカモクからヨレモクモドキ(*Sargassum yamamotoi* Yoshida)、7 月はヨレモクモドキ、ノコギリモク(*Sargassum macrocarpum* C. Agardh)、コブクロモク(*Sargassum crispifolium* Yamada)、マメタワラ(*Sargassum piluliferum* (Turner) C. Agardh)、8 から 10 月はノコギリモクからトゲモク(*Sargassum micracanthum* (Kützinger) Endlicher)とオオバモク(*Sargassum ringgoldianum* Harvey)が優占し、優占種に季節性があった。Hirata et al. (2001) は伊豆半島に流れ藻として出現する海藻の構成種の季節変動と太平洋側の他海域とを比較し、流れ藻の季節変動は周辺海域の藻場における海藻相を主に反映し、そこに局地的に生育する海藻種が加わって海域ごとに流れ藻の季節変動を特徴付けていると推定している。

流れ藻には魚類、無脊椎動物が蟄集することが知られており(Kingsford and Choat 1985)、日本周辺海域においても、流れ藻を生活史のいずれかの段階で利用する生物など、流れ藻に伴う魚類の研究が行われてきた（内田・庄島 1958; 庄島・植木 1964; Ida et al. 1967b）。中でもサンマ、トビウオ、サヨリのようなダツ目魚類は、流れ藻を産卵基盤として利用すること（庄島 1981; 千田 1965）、マアジ・メバル・ブリ・カンパチなどが生活史初期の一時期を流れ藻に随伴して過ごすことが知られており(庄島・植木 1964; 千田 1965)、流れ藻は水産上重要な魚種の再生産・生育場としての役割を果たしている。特に、東シナ海は、ブリやマアジの産卵場として知られていて（Sassa et al. 2006; 山本 2007）、冬季にはサンマ卵も分布することから（庄島 1981）、流れ藻の分布や生態を調べることはこのような魚種の持続的利用を考える際に必要不可欠である。

## 1.2 節 東シナ海における流れ藻の分布

東シナ海に面する九州西岸では3-5月の流れ藻が距岸20km以内の沿岸水域や沿岸前線付近に多く見られるが、大隅半島以南では非常に少なく、ことに種子島、屋久島周辺海域以南では非常に少ないと吉田(1963)は報告した。千田(1965)も、東シナ海縁辺部に形成される黒潮と大陸沿岸水との潮境域においても大量の流れ藻が認められることはない述べている。これらのことから、東シナ海に形成される黒潮と大陸沿岸水との潮境域においては大量の流れ藻が見られることはないと考えられ、その後、この海域における流れ藻分布に関する研究は行われてこなかった。

2000年になり、同年4-5月に西海区水産研究所が行ったマアジ稚魚を対象とした東シナ海沖合の定点におけるニューストンネット採集で、流れ藻が入網したことを西海区水研ニュースで小西(2000)は報告した。この調査は九州西方から薩南海域、奄美大島四方に至る海域におけるマアジ稚魚の分布調査であったが、その際に奄美大島西から鹿児島県甬島西の沖合大陸棚縁辺で大量の流れ藻が分布していることを発見した。この報告によると、稚魚網に入網した流れ藻は褐藻のアカモク(*Sargassum horneri* (Turner) C.Agardh)というホンダワラ属海藻が主体であった。小西(2000)は、この3-5月に東シナ海大陸棚上に分布するアカモク流れ藻の起源について、東シナ海の流動環境や、日本沿岸のアカモク分布域の南限である九州において大規模なアカモク藻場が無いこと、中国浙江省にはアカモクの藻場が卓越していることから、中国沿岸から輸送されたものではないかと推測した。しかし、その後、継続した研究は行われなかった。

東シナ海沖合域における流れ藻の分布およびその起源を調べる研究を、小松ら(2005; 2006)は2000年から開始した。東シナ海沖合域における流れ藻とその構成種の分布の、経年変化と季節変化を明らかにするために、Komatsu et al. (2007)は、2002年5月と2004年3月に学術研究船白鳳丸航海で目視観測と採集を行った。その結果、流れ藻は東シナ海大陸棚

縁辺の黒潮と沿岸水との潮境域に沿って分布しており、アカモクだけで構成されていることが明らかになった。Komatsu et al. (2008) は、これらの流れ藻の、単位面積あたりの個数 (raft km<sup>-2</sup>)である豊度と、単位面積あたりの分布量(kg WW km<sup>-2</sup>)である生物量を見積もった。その結果、東シナ海では、2002 年 5 月の目視調査では大陸棚縁辺部の黒潮フロントよりも大陸側で大型の流れ藻が出現すること、2004 年 3 月に行った目視調査では、東シナ海大陸棚上で小型の流れ藻が多く出現し、どちらの調査でも大陸棚縁辺から大陸棚において分布量が最も多いことを定量的に明らかにした。さらに、Komastu et al. (2007)は、2004 年の 3 月に GPS 付き衛星通信ブイを浙江省沖合域から放流したところ、5 月に東シナ海沖合域に到達したと報告し、浙江省沖合の島嶼が起源ではないかと推察した。

東シナ海沖合域における流れ藻構成種がアカモクのみであったことから、小松ら(2005; 2006)は、文献調査、標本調査、現場における潜水調査を行い、中国沿岸におけるアカモクの分布域を調べた。上海自然博物館および科学院海洋研究所に収蔵されている海藻腊葉標本の調査の結果、北は遼寧省大連、山東省青島、浙江省沖合の舟山群島、南は温州南麂島までアカモクが分布していた (図 1)。浙江省北部の枸杞島において 2004 年 5 月下旬に潜水調査による坪刈採集を行ったところ、大型藻類のうち、アカモクが最も優占し、生物量が多いことが確認された(小松ら 2005; 2006)。

2002 年 5 月に東シナ海大陸沖合の地陸棚縁辺部に分布する流れ藻の起源を調べるために、Filippi et al. (2010) は、プリンストン大学で開発された海洋数値モデルで、水平座標は一般直交曲線座標を用い、鉛直座標に  $\sigma$  座標 (鉛直境界適合格子系 : 海面から海底までの距離でスケーリング) を使用する Princeton Ocean Model (Mellor and Yamada 1982) を用いて、文献で報告されてる中国沿岸のアカモク分布域からアカモク流れ藻に見立てた粒子を海面に置いて、時間に沿って流れにより粒子が輸送される数値実験を行った。その結果、2002 年 3 月 1 日に浙江省から福建省の沿岸より放流された粒子は、Komatsu et al. (2007) で示された 3-4 月に浙江省沖合の島から放流された GPS ブイと重なる軌跡をたどり、5 月中旬に白鳳丸

研究航海において大量の流れ藻の分布を確認した海域に輸送された。Filippi et al. (2010) は、シミュレーション結果から、5 月の流れ藻の起源が、浙江省から福建省の沿岸のアカモクの藻場であると推定した。

これらの春季の東シナ海沖合域における流れ藻に関する一連の研究を通して、Komatsu et al. (2008)は、庄島(1981)による、東シナ海におけるサンマ卵の分布に関する報告に、2-3 月にもホンダワラ科の流れ藻が広く分布している記述があることから、3 月以前にも東シナ海沖合域に流れ藻が分布している可能性を指摘した。これまでの東シナ海沖合域における流れ藻に関する研究は春季の流れ藻を対象としており、冬季については分布や構成種などの詳細な報告は無い。また、Komatsu et al. (2008) による 3 月の観測は東経 126 度以東の 2 本の観測定線のための報告であり、観測定線の最も西においても流れ藻が分布していたことから、さらに西方にも流れ藻が分布していると考えられるため、3 月についても調査海域を南西に広げ、分布を明らかにする必要がある。

以上に述べたように、春季の東シナ海の流れ藻については分布や起源が明らかになりつつあるが、2 月にも流れ藻が分布するという断片的な報告があること（庄島 1981）、冬季から春季は流れ藻を利用する水産重要種の再生産の場であることから、冬季から春季の東シナ海流れ藻について詳細に調べる必要がある。

### 1.3 節 研究の目的

本研究では、東シナ海沖合域において、冬季および、これまで情報の少なかった初春にあたる 2-3 月の流れ藻の分布域・分布量を調べ、それらの流れ藻の起源となる藻場、輸送先を数値実験によって推定することを目的にした。研究の目的を述べた本章に続く第 2 章では、2010 年 2-3 月および 2011 年の 2 月に学術研究船を用いて観測した、東シナ海における流れ藻分布と分布量、流れ藻を構成する海藻の生態的な特徴について述べる。第 3 章では、

東シナ海沖合域に分布する流れ藻の起源と、推定された起源からの輸送過程について、物理モデルに基づく高い時空間分解能を実現した数値シミュレーションで再現された流動場を用いる粒子追跡シミュレーションにより検討する。流れ藻の起源を探るために、2010 年と 2011 年時の観測で得られた流れ藻の分布域に流れ藻に見立てた粒子を配置し、時間をさかのぼる粒子逆追跡により粒子が漂着した海岸をポテンシャルな起源とし、この海岸に粒子を配置し、時間に沿った粒子追跡により、元の流れ藻分布域に到達するかどうかで、起源の可能性を判定する。第 4 章では、2-3 月の東シナ海流れ藻の太平洋と日本海側への輸送について、2010 年と 2011 年時の観測で得られた流れ藻の分布域に流れ藻に見立てた粒子を配置し、時間に沿った粒子追跡シミュレーションを行い、得られた結果と、研究航海時に流れ藻発見時に放流した GPS ブイの輸送先から、粒子追跡結果の妥当性について検討する。第 5 章では、総合考察として、東シナ海沖合域に 2-3 月に分布する流れ藻の本研究で推定された起源の結果から、流れ藻の持続的な供給について検討する。

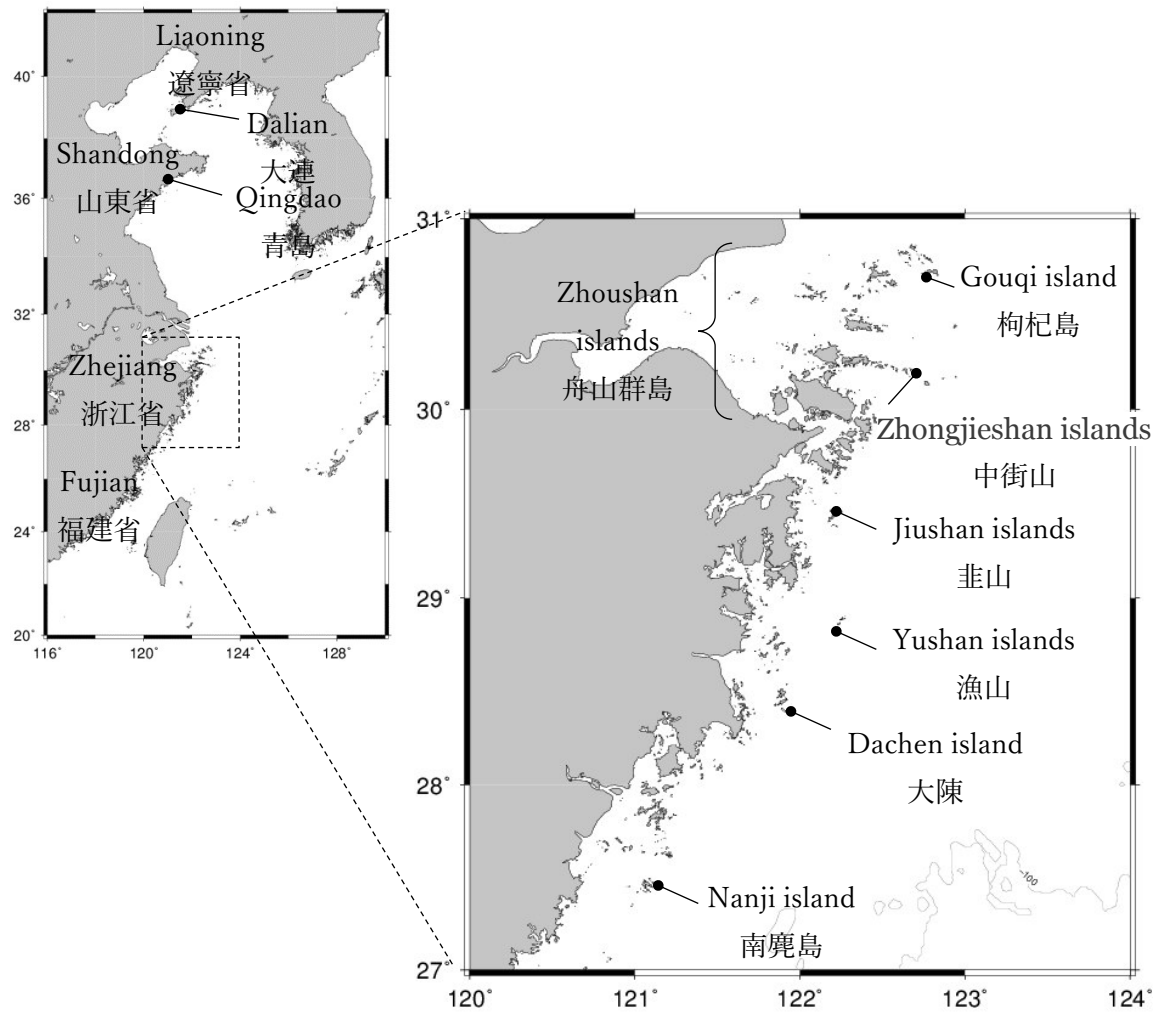


図 1. アカモクを産する中国の省（左図）と、浙江省沖合の島嶼（右図）。

表 1. 今までに出版された論文をもとにした、日本以外の流れ藻分布に関する研究結果。海域、流れ藻を構成する海藻種（目、科、属、種）、分布量（+++：大量に分布、++：よく見られる、+：少量、n.i：分布量に関する記載なし）、文献。\*は緑藻綱、それ以外は褐藻綱。

Region		Order	Family	Species	Abundance	Reference
West Atlantic	Sargasso Sea	Fucales	Fucaceae	<i>Ascophyllum</i>	+	Niermann 1986
			Sargassaceae	<i>Sargassum fluitance</i>	+++	Parr 1939, Niermann1986
				<i>Sargassum natance</i>	+++	Parr 1939, Niermann1986
	Florida	Fucales	Sargassaceae	<i>Srgassum fluitance</i>	+++	Bomber1988
				<i>Sargassum hystrix</i> Agardh	+	Bomber1988
				<i>Turbinaria turbinaria</i>	+	Bomber1988
North East Atlantic	Gulf of Mexico	Fucales	Sargassaceae	<i>Sargassum</i>	n.i.	Hoffmayer et al. 2005
	Irish Sea	Ectocarpales	Chordariaceae	<i>Leathesia difformis</i>	n.i.	
			Ectocarpales	<i>Ectocarpus</i> spp.	n.i.	
		Fucales	Fucaceae	<i>Ascophyllum nodosum</i>	n.i.	
				<i>Fucus serratus</i>	n.i.	
				<i>Fucus spiralis</i>	n.i.	
				<i>Fucus</i> spp.	n.i.	
				<i>Fucus vesiculosus</i>	n.i.	Davenport & Rees 1993
				<i>Himanthalia elongata</i>	n.i.	
		Laminariales	Chordaceae	<i>Chorda filum</i>	n.i.	
			Cladophoraceae	<i>Chaetomorpha</i> spp.	n.i.	
	Ulvaes*	Ulvaes*	Ulvaes*	<i>Enteromorpha intestinalis</i>	n.i.	
				<i>Ulva lactuca</i>	n.i.	
	Iceland	Fucales	Fucaceae	<i>Ascophyllum nodosum</i>	+++	Ingolfsson1995,1998,2000, Olafsson 2001
				<i>Fucus vesiculosus</i>	++	Ingolfsson1995,1998, Olafsson 2001
				<i>Fucus distichus</i>	+	Ingolfsson1995,1998
				<i>Fucus spiralis</i>	+	Ingolfsson1998
				<i>Chorda filum</i>	++	Ingolfsson1998
				<i>Laminaria</i> sp.	+	Ingolfsson1998
		Laminariales	Laminariaceae	<i>Enteromorpha</i> spp.	+	Ingolfsson1998
		Ulvaes*	Ulvaes*			
	North Sea	Fucales	Fucaceae	<i>Ascophyllum nodosum</i>	+++	
			Himanthaliaceae	<i>Himanthalia elongata</i>	+	Franke et al. 1999
			Sargassaceae	<i>Sargassum muticum</i>	+	
South Atlantic	Chile	Laminariales	Laminariaceae	<i>Macrocystis pyrifera</i>	+++	Hinojosa et al. 2010
		Fucales	Durvillaeaceae	<i>Macrocystis</i> spp.	+++	Macaya et al. 2005
				<i>Durvillaea antarctica</i>	++	Hinojosa et al. 2010
	South America	Laminariales	Laminariaceae	<i>Macrocystis pyrifera</i>	+	Helmuth 1994
North Pasific	North East Pacific	Fucales	Fucaceae	<i>Fucus</i> sp.	+++	Shaffer et al. 1995
		Laminariales	Laminariaceae	<i>Nereocystis luetkeana</i>	+++	
	California	Fucales	Sargassaceae	<i>Cystoseira osmundacea</i>	++	Bushing 1994
				<i>Sargassum</i> sp.	+	Bushing 1994
				<i>Laminaria</i> sp.	+	Mitchell & Hunter 1970
		Laminariales	Laminariaceae	<i>Macrocystis angustifolia</i>	++	Bushing 1994
				<i>Macrocystis integrifolia</i>	++	Bushing 1994
				<i>Macrocystis pyrifera</i>	+++	Mitchell & Hunter 1970, Bushing 1994, Kingsford 1995, Hobday 2000
				<i>Nereocystis luetkeana</i>	+	Bushing 1994
				<i>Pelagophycus gigantcus</i>	+	Bushing 1994
				<i>Pelagophycus porra</i>	++	Bushing 1994
				<i>Pelagophycus porra</i>	++	Mitchell & Hunter 1970
				<i>Pterygophora californica</i>	++	Mitchell & Hunter 1970
			Lessoniaceae	<i>Egregia laevigata</i>	++	Mitchell & Hunter 1970
				<i>Egregia</i> sp.	++	Bushing 1994
South Pasific	Australia Sydney	Fucales	Seirococcaceae	<i>Phyllospora comosa</i>	++	Druce & Kingsford 1995
	Tasmania	Fucales	Durvillaeaceae	<i>Durvillaea antarctica</i>	+++	Smith 2002
		Laminariales	Laminariaceae	<i>Macrocystis pyrifera</i>	n.i.	Edgar 1987
	New Zealand	Ectocarpales	Chordariaceae	<i>Leathesia</i> spp.	+	Kingsford 1992
		Fucales	Sargassaceae	<i>Carpophyllum maschalocarpum</i>	+++	Kingsford 1992, 1993
				<i>Carpophyllum plumosum</i>	+++	Kingsford 1992, 1993
				<i>Carpophyllum flexuosum</i>	+++	Kingsford 1992, 1993
				<i>Carpophyllum angustifolium</i>	+++	Kingsford 1992
				<i>Cystophora</i> spp.	+++	Kingsford 1992
				<i>Sargassum sinclairii</i>	+++	Kingsford 1992, 1993
				<i>Durvillaea antarctica</i>	+	Kingsford 1992
				<i>Hormosira banksii</i>	+	Kingsford 1992
		Laminariales	Lessoniaceae	<i>Ecklonia radiata</i>	+	Kingsford 1992
		Bryopsidales*	Codiaceae	<i>Codium</i> spp.	+	Kingsford 1992

## 第2章 2-3月の東シナ海沖合における流れ藻の分布と生物量

### 2.1 節 はじめに

東シナ海沖合域における2月から3月初旬の流れ藻分布域を把握することは、第1章で述べたように、水産学的に重要である。2月から3月にも流れ藻が分布する場合には、流れ藻の分布および生物量、構成種について調べる必要があるだろう。そこで、本章では2-3月の東シナ海沖合域を対象海域として、学術研究船淡青丸を用いた現場観測を行った。

### 2.2 節 材料と方法

#### 2.2.1 研究船による流れ藻分布の目視観測と流れ藻採集

学術研究船淡青丸 KT10-1 次研究航海(2010年2月22日から3月6日)、および同 KT11-1 次研究航海(2011年2月18日から2月23日)において、流れ藻の目視観測と採集を行った。目視観測では、原則として黒潮フロントに直交するように大陸棚から黒潮域に向かう観測定線を設定した。船のブリッジの左舷側と右舷側に観測員各1名を配置し、日の出から日没まで目視観測を行った。流れ藻を発見した場合には、流れ藻がブリッジ正横を通過した時刻、流れ藻までの正横距離、流れ藻の面積を円とみなしたときの円の直径(等価円直径)を野帳に記録した。流れ藻の野帳に記載された発見時刻と船舶ログの時刻と位置を照合し、流れ藻の発見位置とした。観測員間の違いが少なくなるように、停泊時の港において出港前に、0.5m、1m、2mのターゲットを作成し、舷側から、5m、10m、20m、30m、50m、70m、100mの位置に置き、停泊中の淡青丸ブリッジから距離と流れ藻の直径を目視計測する訓練を行った。

研究航海中、発見した流れ藻の中から無作為に ORI ネット(口径 1.6m, 目合 1.0mm)により流れ藻を採集した (Fig2-1)。波高が高いときや風速が強いときには ORI ネットを使用できないため、タモ網(目合い 5mm)を用いて採集した。流れ藻採集時にも、ブリッジから目視に

より採集する流れ藻の等価円直径を記録した。採集した流れ藻を、ただちに船上で藻体 1 個体ごとに分け、種を同定し、湿重量を計測した。採集した流れ藻の塊を構成していた個体の湿重量の合計を採集した流れ藻 1 塊の湿重量とした。

### 2.2.2 流れ藻の分布解析

流れ藻の水平分布の空間解析には、地理情報システム(GIS: Geographic Information System)ソフトウェア ArcGIS Desktop10(ESRI 社)を使用した。野帳に記録した流れ藻発見時刻の研究船の緯度経度を流れ藻の位置とし、GIS を用いてマッピングした。

流れ藻の密度推定には距離標本法 (distance sampling method) を用いた。目視観測により得られた流れ藻の観測定線からの距離のデータをもとに、ソフトウェア DISTANCE version 6.0 Release 2 (Thomas et al., 2010)を用いて舷側からの正横距離に対する流れ藻分布の発見確率の関数 (detection function) を決定し、密度関数から有効探索幅  $\mu(m)$  を求めた。有効探索幅とは、流れ藻を発見した確率と見逃した確率が等しくなる正横距離であり、この有効探索幅を用いることで、密度計算には、目視観測で得られたすべての流れ藻データを用いることができる。発見確率の関数については、単一分布(uniform、発見確率一定)、半正規分布(half-normal)、ハザード比(hazard rate)、コサイン(cosine)、simple polynomial、エルミート多項式の関数であてはめた場合に、赤池情報量基準 (AIC: Akaike's Information Criterion) が最も低いモデルを当てはまりの良いモデルとして選択した。

海況条件が目視観測時ごとに異なることを考慮し、観測定線ごとに求めた有効探索幅  $\mu(m)$  と観測定線  $L(km)$  の距離から探索面積  $A (km^2)$  を求め、流れ藻の発見個数  $n$  (個) を探索面積で除すことで流れ藻の密度  $D (rafts km^{-2})$  を推定した。

次に、2010 年と 2011 年に採集した流れ藻の塊の面積を円とした場合の等価円直径  $D_i (m)$  と湿重量  $W_i (g WW)$  のデータをプールして、直径と湿重量の関係式を求めた。この式を用いて、観測定線ごとに、目視観測により得られるそれぞれの流れ藻塊の等価円直径から推定した

流れ藻の湿重量を合計し、発見個数  $n$  で除してその観測定線の流れ藻の平均湿重量  $M$  (kg WW 個<sup>-1</sup>)を求めた。そして、流れ藻の密度  $D$  を乗じ、各観測定線における単位面積あたりの流れ藻湿重量  $S_w$  (kg WW km<sup>-2</sup>)を求めた。

## 2.3 節 結果

### 2.3.1 流れ藻の構成種

東シナ海沖合域において、2010 年 2-3 月と、2011 年 2 月に採集した流れ藻はすべてアカモクであった（表 2-1）。沿岸に近い、2010 年 2 月の五島列島南部沖合約 48km (F2)と、同年 3 月の室戸岬沖 4km (F12)と 12km (F13)では、流れ藻中の大型海藻はホンダワラ属のみであったが、その他の小型海藻もあった。五島列島南部ではアカモクの出現が最も多く、小型の紅藻、緑藻がわずかに見られ、太平洋岸の室戸岬沖ではヨレモクモドキ(*Sargassum yamamotoi* Yoshida)が優占し、複数のホンダワラ属海藻がみられ、小型のフクロノリ (*Colpomenia sinouosa* (Metres ex Roth)Derbes et Solier) と海草のアマモ (*Zostera marina* L.) が少し出現した（表 2-1）。

### 2.3.2 付着器の有無と主枝長

付着器のついたホンダワラ類として、2010 年 2 月の沿岸に近い五島列島南部(F2) でヨレモクモドキが、2010 年 3 月の沿岸に近い室戸岬沖(F12)でヨレモクモドキが、同じく室戸岬沖(F13)で、ヨレモクモドキとアカモクが採集された（表 2-1）。2010 年 2-3 月および 2011 年 2 月ともに東シナ海大陸棚縁辺上では付着器のついたアカモク個体は採集されなかった。

### 2.3.3 流れ藻の分布海域と分布密度

2010 年と 2011 年に採集した流れ藻の塊をブリッジから目視した等価円直径( $Di$ )と計測した湿重量( $Wt$ )のデータをプールして、 $Di$ (m)と  $Wt$  (g Wet Weight: g WW)の関係を求めたところ

ろ、

$$Wt = 368.64 Di^3 + 379.25 Di^2 + 1755.1 Di \quad (2.1)$$

で表された( $R^2 = 0.796$ ) (図 2-3)。この式(2.1)を用いて、観測定線ごとの流れ藻湿重量を推定した。

2010 年 2-3 月、2011 年 2 月の観測定線と流れ藻の発見個数を観測定線 20km ごとに区切って計数した。東シナ海沖合において、流れ藻は、ほとんどが黒潮より西側の底深 200m 以浅の大陸棚縁辺部から大陸棚に分布し、発見個数は東経 124 - 127 度、北緯 26 - 30 度で多く、九州沿岸では少なかった (図 2-2)。すべての観測定線上で流れ藻以外の漂流物が発見されたが、黒潮の流路より東側に位置する沖縄周辺の 2 本の観測定線上(2010 年 2 月 26 日、2010 年 3 月 1 日)では、流れ藻は全く見られなかった。

流れ藻の密度 ( $D$ ) は、2010 年 2-3 月では 1.5-26.0 個  $\text{km}^{-2}$ 、2011 年 2 月では 1.7-220.2 個  $\text{km}^{-2}$  で (図 2-4、表 2-2)、2011 年 2 月の東経 124 度、北緯 27 度付近の観測定線で最も多かった (図 2-4)。

東シナ海における流れ藻の単位面積あたりの分布量は、2010 年 2 月では 3.2-28.9 kg WW  $\text{km}^{-2}$ 、2010 年 3 月では 4.9-100.2 kg WW  $\text{km}^{-2}$ 、2011 年 2 月では 1.8-733.5 kg WW  $\text{km}^{-2}$  であった (図 2-5)。水平分布をみると、東経 124 - 127 度、北緯 26 - 30 度で個数と湿重量ともに分布量が多く、東シナ海南西に向かって分布量が高くなった。一方、九州のごく沿岸である五島列島周辺海域や、薩南海域では生物量は少なかった。調査海域を Komatsu *et al.* (2008) より南西に広げた 2011 年 2 月の調査では、石垣島北部の黒潮フロントより西方の大陸棚上である底深 200m 以浅海域で流れ藻の生物量は 504.1 kg WW  $\text{km}^{-2}$  と最も多かった (図 2-5)。東シナ海北東部の観測定線の生物量 (31.6kg WW  $\text{km}^{-2}$ 、1.8kg WW  $\text{km}^{-2}$  と) 比較すると、数十倍から数百倍であり、調査海域の南西部に行くほど流れ藻が大量

に分布していた（図 2-5）。

## 2.4 節 考察

### 2.4.1 東シナ海沖合域に分布する流れ藻の構成種

3 月中旬と 5 月に東シナ海沖合域に分布する流れ藻を調べた Komatsu et al. (2007)の結果では、流れ藻の構成種はアカモクのみであった。2010 年 2-3 月、2011 年 2 月の東シナ海沖の流れ藻の構成種もアカモクのみであり、晩冬から春の東シナ海沖合域に大量に分布する流れ藻の特徴は、アカモクだけで構成されることである。九州、本州沿岸の流れ藻の種組成を調べた研究では、複数の種類で流れ藻が形成されており、東シナ海とは異なっている(吉田 1963; Ohno 1984; Hirata 2001; 広崎 1963; 蒲生・松浦 1975)。このように東シナ海沖合域ではアカモクのみが見られたことから、起源となる藻場は、1) ほぼアカモクで形成されている場合、2) ほかのホンダワラ類も混生しているが、アカモク以外は沖合まで長期間浮遊できない場合、が考えられる。

上述の 1)について考えてみる。小松ら(2005)は、中国浙江省の沖合にある枸杞島を調査し、ほぼアカモクだけで形成される藻場が島の周囲に分布していること、また、中街山島、魚島、南鹿島などでは、アカモクが卓越していることを報告している。もし、2-3 月のアカモクの供給源がこのような藻場からであれば、アカモクのみ流れ藻が分布することになる。2)について、浮遊期間に関する研究をもとに検討する。春に成熟するアカモクやヤツマタモクは成熟前に基質から剥がれて流れ藻になると、数か月間は浮遊する(三上ら 2006; Yatsuya 2008)。したがって、アカモクだけが長期間浮遊することは考えられない

アカモクの付着器に着目すると、大野(1984)は土佐湾で、八谷ら (2005)は日本海の丹後海で、それぞれ採集したアカモク流れ藻に付着器がついた個体があったと報告している。本研究でも、四国南(F13)で採取されたアカモクに付着器がついていた。一方、東シナ海沖のアカモク流れ藻には付着器がついた個体は採集さなかった。東シナ海のアカモク流れ藻に

付着器がついていない理由として、1) 沿岸域から輸送される過程で付着器の付いた流れ藻が沈降したこと、2) 基質から剥離する段階で付着器が付いていなかったことが考えられる。1) については、流れ藻は気胞が徐々に脱落することで浮力を失うことが屋外水槽での培養実験によって観察されており (三上 2007)、比重の大きい付着器を有する藻体は早く沈降する。このため、沿岸から東シナ海沖合に輸送されるまでに、付着器のついた重い個体が沈降した可能性がある。2) については、アカモクは単年生で、仮盤状の付着器をもち、多くの場合、付着器ごと流出するが、中国浙江省の南麂島のアカモクは 2 年生で、流出期には付着器が基質に残存する個体もあると報告されており (Sun et al. 2008)。このような藻場からであれば、東シナ海で付着器のないアカモク流れ藻が発生する可能性がある。いずれの場合にも、付着器がないことによって、より長期間浮遊することが可能になり、沖合域に輸送され易くなったと推測される。

#### 2.4.2 流れ藻の分布海域と海域間の比較

2010 年 2-3 月、2011 年 2 月の東シナ海では、流れ藻は、ほとんどが黒潮より西側の大陸棚縁辺部から大陸棚に分布し、生物量は東経 124 - 127 度、北緯 26 - 30 度で多く、九州沿岸では少なかった (図 2-4、2-5)。Komatsu et al. (2008)の結果でも、2002 年 5 月と 2004 年 3 月の東シナ海では、流れ藻は、大陸棚縁辺部で東経 125-128 度、北緯 28-30 度で多く、それよりも北部、東部で少なく、本研究により明らかにされた分布海域と同様の傾向であった。これらのことは、東シナ海中南部の大陸棚上では、流れ藻が滞留しやすい海洋環境となっていることを示唆している。表層を浮遊している生物は収束域に集まることから (Kingsford and Choat 1986)、東シナ海中南部の大陸棚上は、ここに滞留する流れ藻と流れ藻に関わる生物の遭遇場所となると考えられる。したがって、冬季に東シナ海沖合でブリの産卵が行われ、稚魚になった場合に、この海域では、流れ藻との遭遇する確率も高くなると考えられる。

2010年2-3月および2011年2月における東シナ海沖合域のアカモク流れ藻の分布が得られた。次章では、モデルで計算された海洋表層の海流データを用い、得られたアカモク流れ藻の位置からの粒子逆追跡により、これらのアカモクの起源となる藻場を探ることとする。

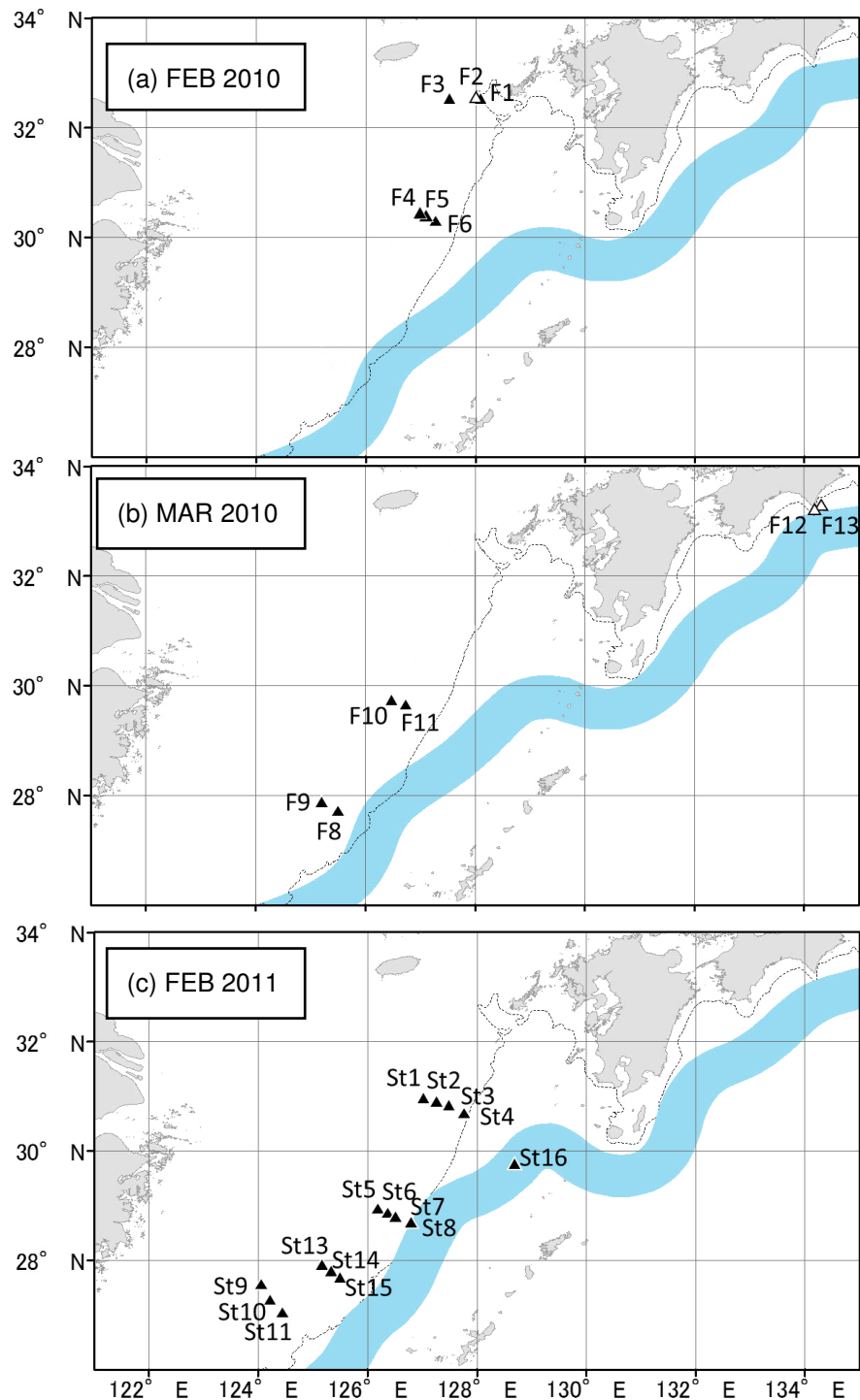


図 2-1. 流れ藻の採集点の位置（三角）と採集点名を月ごとに表した図。  
 (a)2010 年 2 月、(b)2011 年 3 月、(c)2011 年 2 月で、アカモクだけが採集  
 された点を黒塗り、それ以外の海藻も採集された点を白塗りとした。水色の  
 帯は 2010 年の 2 月における黒潮の流路 (a、b) (海上保安庁, 2010) および  
 2011 年 2 月の黒潮流路 (c) (海上保安庁, 2011) を示す。

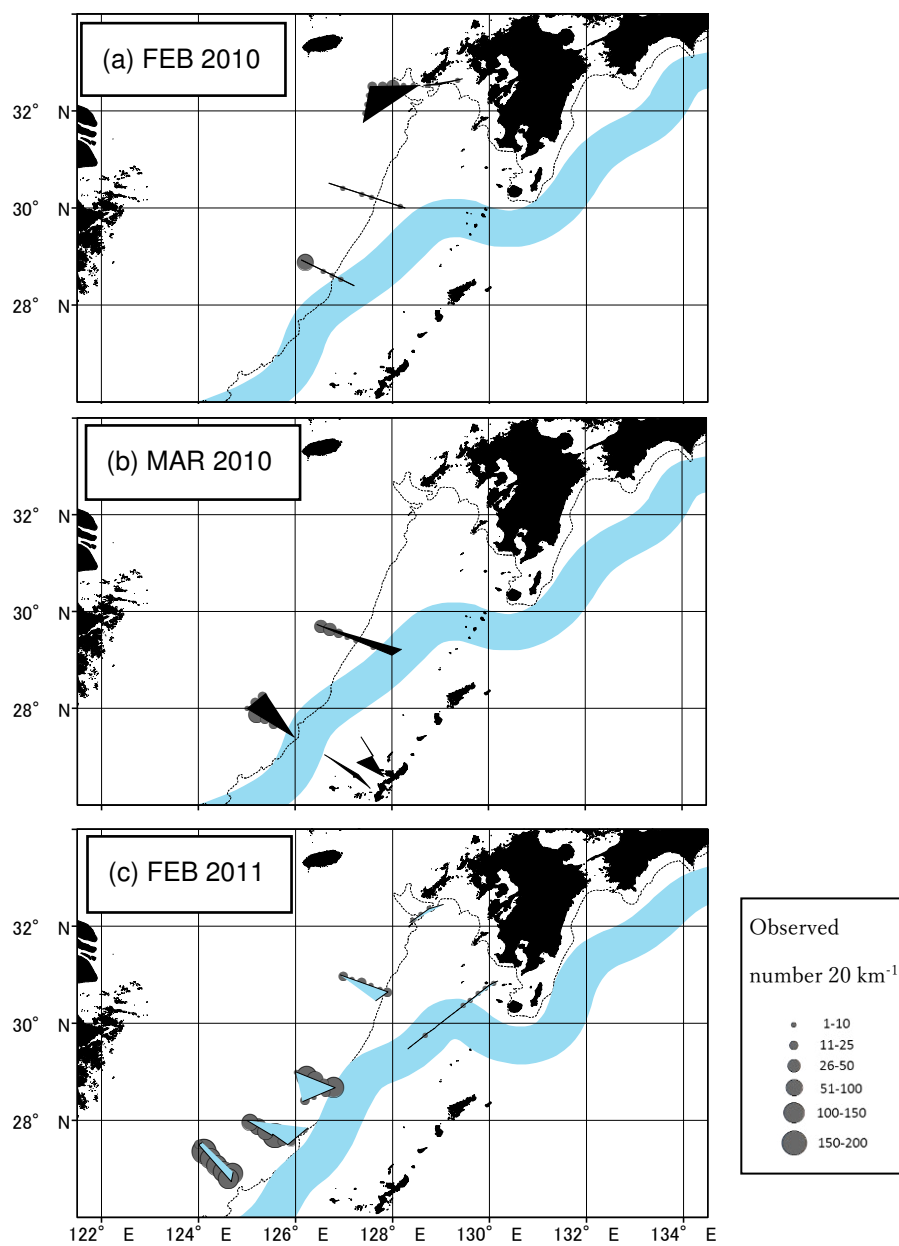


図 2-2. 2010 年 2(a)、3 月(b)、2011 年 2 月(c)の研究航海において、目視観測を行った定線を黒実線で、目視した流れ藻個数の階級を 20km ごとに円の大きさで、200m 等深線を黒色破線で示した図。水色の帯は図 2-1.と同様の黒潮流路を示す。

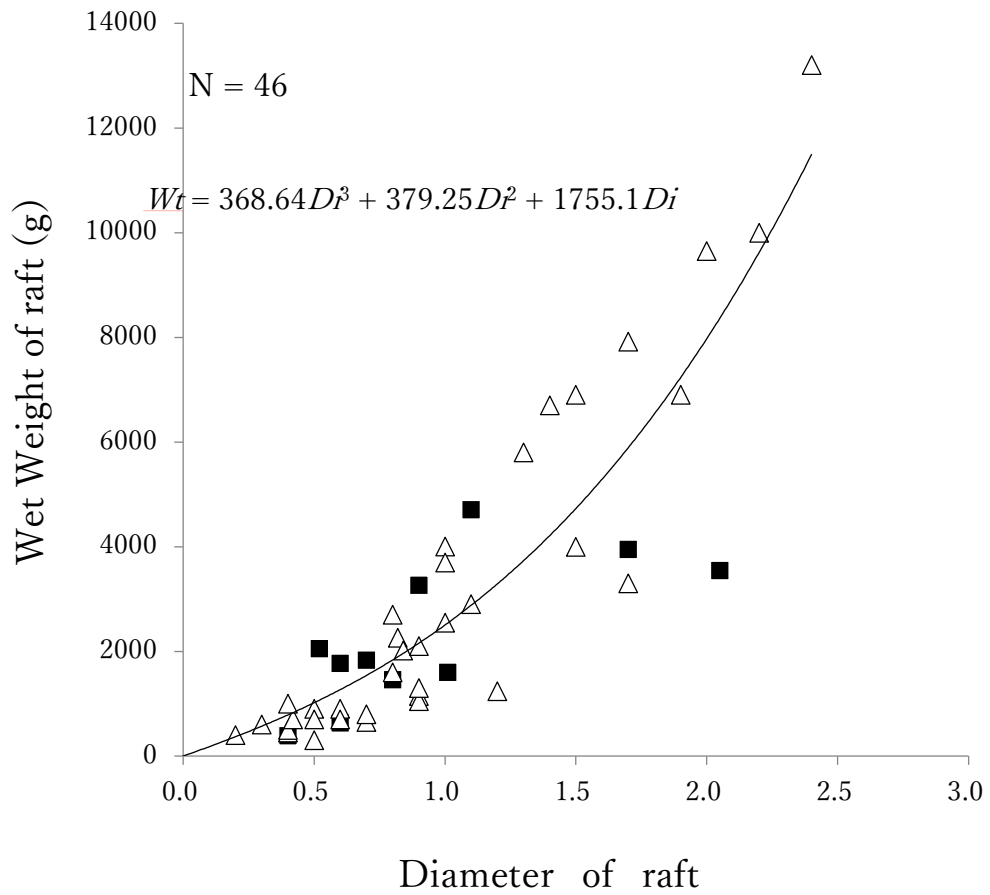


図 2-3. KT10-1 (2010 年 2-3 月: 三角形) および KT11-1 (2011 年 2 月: 正方形) で採集された流れ藻 1 塊の直径と湿重量の関係。実線は、直径と湿重量の 3 次の回帰式( $R^2 = 0.796$ )。

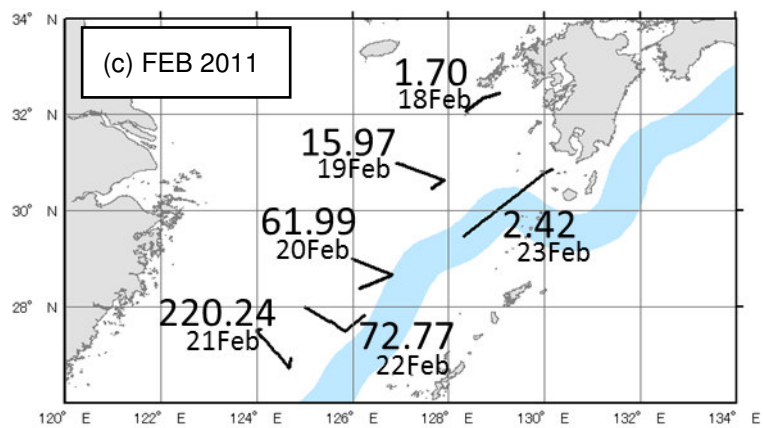
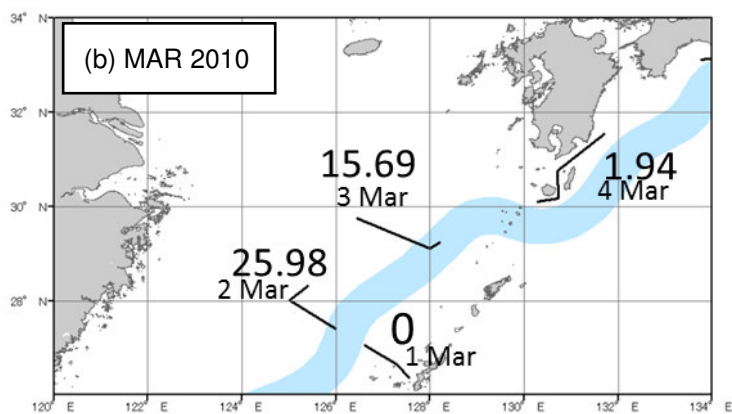
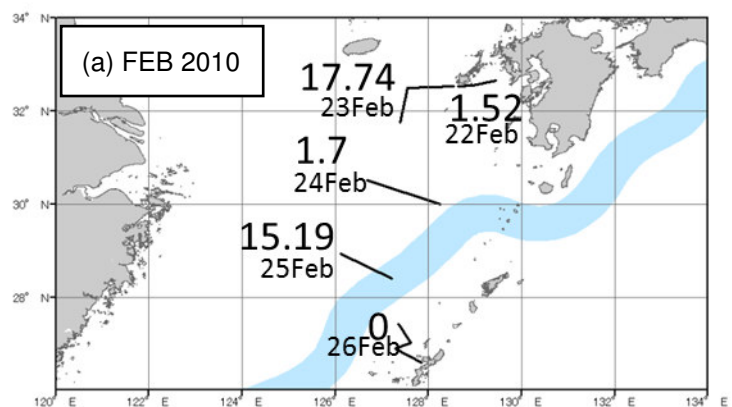


図 2-4. KT10-1、KT11-1 研究航海の目視観測データから求めた、各航海の月毎にまとめた各定線の単位面積あたりの流れ藻个数（个数 km<sup>-2</sup>）。黒色の実線は観測定線を、水色の帯は図 2-1.と同様の黒潮流路を示す。

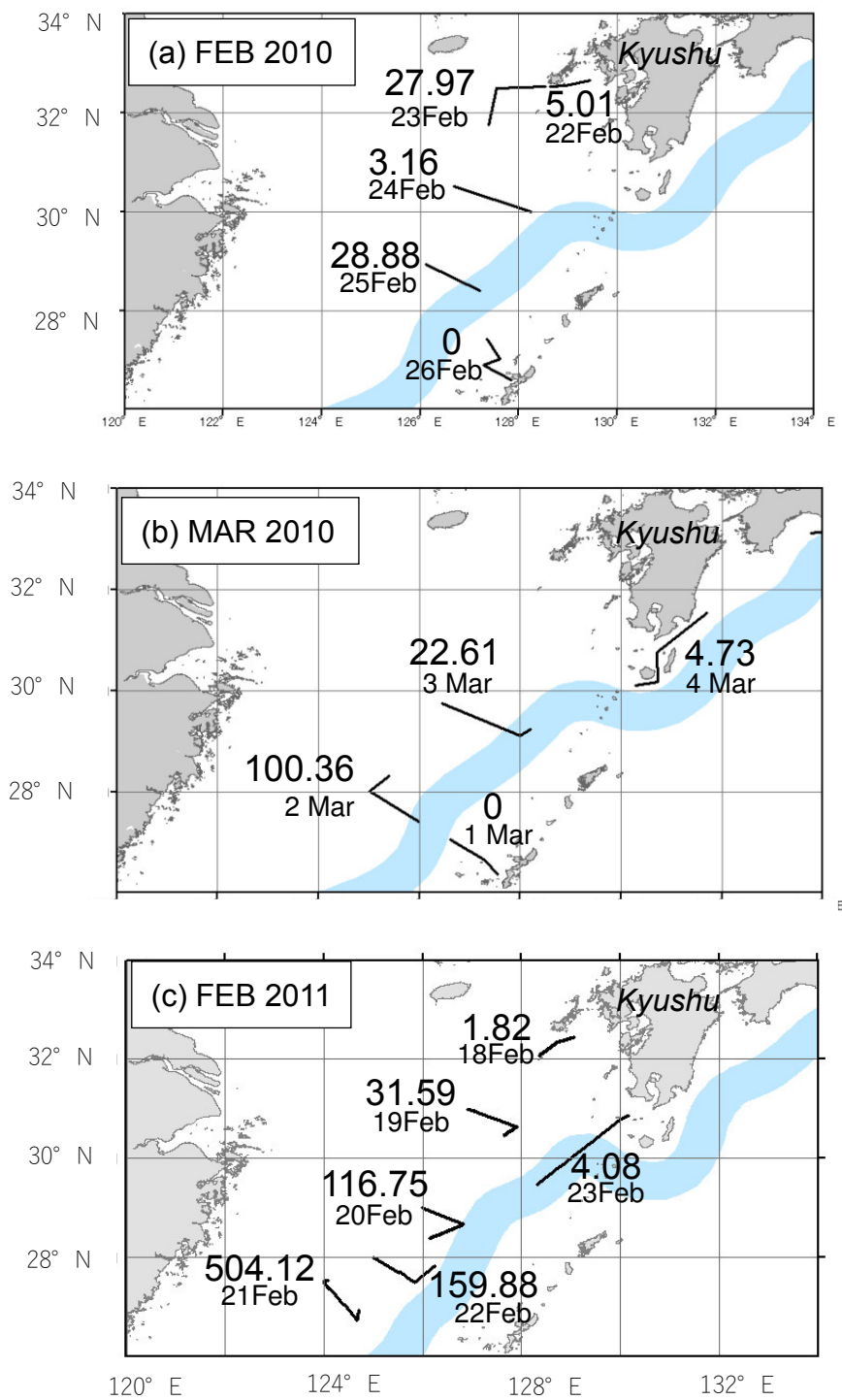


図 2-5. KT10-1, KT11-1 研究航海の目視観測データから求めた、各航海の月毎にまとめた各定線の単位面積あたりの流れ藻の湿重量 (kg WW km<sup>-2</sup>)。黒色の実線は観測定線を、水色の帯は図 2-1.と同様の黒潮流路を示す。

表 2-1. 2010 年 2-3 月の KT10-1 次研究航海（上段）と 2011 年 3 月の KT11-1 次研究航海（下段）で採集した流れ藻の構成種と個体数組成。KT10-1 研究航海の採集点 F12 と F13 は室戸岬沿岸で、それ以外の採集点は東シナ海。括弧内の数は、採集した個体のうち、付着基盤の付いた個体数を示す。

KT10-1													
Species name	Station												
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F8	F9	F10	F11	F12	F13	
<i>Colpomenia sinuosa</i> (Metres ex Roth) Derbes et Solier												1	
Rhodophyceae sp		1											
<i>Sargassum filicinum</i> Harvey												6(4)	
<i>S. fulvellum</i> (Turner) C.Agardh													
<i>S. fusiforme</i> (Harvey) Setchell		1(1)										1	
<i>S. horneri</i> (Turner) C. Agardh	2*	25*	10*	13*	5*	21*	60*	136*	51*	111*	3	6(3)	
<i>S. micracanthum</i> Endlicher		1											
<i>S. muticum</i> (Yendo) Fensholt												1	
<i>S. patens</i> C. Agardh											7	10(1)	
<i>S. siliquastrum</i> (Turner) C. Agardh												1(1)	
<i>S. fulvellum</i> (Turner) C. Agardh											1	5(1)	
<i>S. thunbergii</i> (Mertens ex Roth) Kuntze												1	
<i>S. yamamotoi</i> Yoshida											42*	138*(97)	
Ulvaes sp													
<i>Zostera marina</i> L.		1											9

KT11-1															
Species name	Station														
	St1	St2	St3	St4	St5	St6	St7	St8	St9	St10	St11	St12	St13	St14	St15
<i>S. horneri</i> (Turner) C. Agardh	2*	4*	2*	1*	5*	2*	10*	10*	15*	6*	9*	7*	16*	2*	14*
															2*

表 2-2. 2010 年 2-3 月の KT10-1 次研究航海における定線ごとの流れ藻目視結果を用いて定線ごとに Distance6.0 R2 で選択された AIC 最小のモデルと有効探索幅 (ESW: 有効探索幅(m)、 $L$ : 定線長(km)、 $n$ : 標本数 (流れ藻の目視個数)、 $M$ : 各定線の流れ藻 1 塊あたりの平均湿重量(kg WW raft<sup>-1</sup>)、 $D$ : 推定分布密度(個 km<sup>-1</sup>)、 $D_{LCL}$ : 推定分布密度上方信頼限界、 $D_{UCL}$ : 推定分布密度下方信頼限界、 $D_{CV}$ : 推定分布密度の変動係数)。Half は半正規分布 (Half-normal)、Hazard はハザード関数(Hazard-rate)、Uniform は単一分布 (発見確率一定) を示す。Simple は Simple-polynomial Cos はコサイン関数(Cosine)、Hermite はエルミート関数の略。

Date	Model function (Key / adjustment)	ESW (m)	$L$ (km)	$n$ (個)	$M$ (kg WW 個 <sup>-1</sup> )	$D$ (個 km <sup>-1</sup> )	$D_{LCL}$	$D_{UCL}$	$D_{CV}$
22 FEB.	Half / Hermite	11.4	86.9	4	3.34	1.5	0.2	9.6	0.45
23 FEB.	Half / Cos	13.8	179.8	98	1.58	17.7	14.1	22.3	0.12
24 FEB.	Uniform / Cos	25.7	159.3	14	1.86	1.7	1.1	2.7	0.22
25 FEB.	Half / Hermite	16.3	117.6	59	1.90	15.2	12.4	18.6	0.10
2 MAR.	Half / Hermite	16.0	166.7	147	3.86	26.0	22.8	29.6	0.07
3 MAR.	Hazard / Hermite	15.9	190.5	102	1.44	15.7	13.4	18.4	0.08
4 MAR.	Uniform / Simple	17.2	234.7	18	2.49	1.9	1.5	2.6	0.13

表 2-3. 2011 年 2 月の KT11-1 次研究航海における定線ごとの流れ藻目視結果を用いて定線ごとに Distance6.0 R2 で選択された AIC 最小のモデルと有効探索幅 (ESW: 有効探索幅(m)、 $L$ : 定線長(km)、 $n$ : 標本数 (流れ藻の目視個数)、 $M$ : 各定線の流れ藻 1 塊あたりの平均湿重量(kg WW raft<sup>-1</sup>)、 $D$ : 推定分布密度(個 km<sup>-1</sup>)、 $D_{LCL}$ : 推定分布密度上方信頼限界、 $D_{UCL}$ : 推定分布密度下方信頼限界、 $D_{CV}$ : 推定分布密度の変動係数)。Half は半正規分布 (Half-normal)、Hazard はハザード関数(Hazard-rate)、Uniform は単一分布 (発見確率一定) を示す。Simple は Simple-polynomial Cos はコサイン関数(Cosine)、Hermite はエルミート関数の略。

Date	Model function (Key / adjustment)	ESW (m)	$L$ (km)	$n$ (個)	$M$ (kg WW 個 <sup>-1</sup> )	$D$ (個 km <sup>-1</sup> )	$D_{LCL}$	$D_{UCL}$	$D_{CV}$
18 FEB.	Uniform / Cos	14.7	80.0	4	1.07	1.7	0.4	7.1	0.34
19 FEB.	Hazard / Cos	11.0	134.2	47	1.98	16.0	6.3	40.6	0.49
20 FEB.	Half / Cos	17.8	162.5	351	2.63	60.7	52.6	69.9	0.07
21 FEB.	Half / Cos	14.4	138.5	878	2.29	220.2	204.3	237.4	0.04
22 FEB.	Hazard / Cos	17.1	159.4	397	1.60	72.8	63.7	83.1	0.07
23 FEB.	Half / Hermite	17.4	237.4	20	1.69	2.4	1.7	3.5	0.18

## 第3章 東シナ海における流れ藻の起源推定

### 3.1 節 はじめに

2-3 月の東シナ海に流れ藻が大量に分布することが明らかになった。そこで、本章では、この季節の東シナ海の流れ藻の起源となる藻場を推定し、発生時期と輸送過程について検討する。海洋において、流れ藻のような浮遊物は、周囲の海流や風という物理的な力により、受動的に輸送される。このような浮遊物の起源や輸送経路の解明については、近年、高空間高時間解像度の海流シミュレーションの発展に伴って、得られた海流データを利用した粒子追跡実験が有効になってきている。例えば、魚類の卵、遊泳力の弱い仔稚魚について、粒子順追跡によって輸送先が調べられ (Kobayashi 2006)、同様に粒子逆追跡によって孵化日まで遡ることで産卵海域が推定されている (e.g. Allain et al. 2007; Christensen et al. 2007)。海面に浮遊する海ゴミについても、粒子追跡により集積海域や起源、輸送先が推定されている (e.g. Lebreton and Borrero 2013; Reisser et al. 2013)。一般に、粒子逆追跡実験を行うと、起源の候補地が複数検出されるため、Kako et al. (2010) は海ゴミの参照データとして、現場調査で得られたライターの電話番号から流出場所を特定し、粒子追跡の結果とあわせて起源と流出時期を絞り込んだ。このように、漂流する物の起源について、補助的なデータを用いることで、現実的な結果に導くことができる。

本章では、海流のシミュレーションモデルで得られる表層の海流データをもとに、第2章で得られた流れ藻の分布域から、流れ藻に見立てた粒子を置き、時間を遡る粒子追跡により流れ藻の発生する潜在的な起源藻場を調べ、流れ藻の生物的な情報をもとに起源として可能な藻場を推定する。

※ 本章の以下の内容（材料と方法、結果、考察、図表）は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。5年以内に出版予定。

## 第4章 2-3月に東シナ海沖合域に分布する流れ藻の輸送

### 4.1節 はじめに

第3章での検討により、2-3月東シナ海沖合域に分布する流れ藻の起源が主に中国浙江省沖合の島嶼で、前年の11月、12月に発生した流れ藻は2-3ヶ月漂流し、2-3月に東シナ海大陸棚上に輸送されると推定された。東シナ海は日本海へ注ぐ対馬暖流と本州南岸に東に向かう黒潮との上流域にあり、流れ藻に随伴する生物の輸送に関係しているが、2-3月に東シナ海沖合域に分布した流れ藻がどこに輸送されるのかまだわかっていない。そこで、本章ではこの流れ藻の輸送先を粒子順追跡、および、学術研究船淡青丸での現場観測で流れ藻を発見したときに、流れ藻群と一緒に放流した衛星通信型GPS付きブイの流跡によって検討する。

※ 本章の以下の内容（材料と方法、結果、考察、図表）は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。5年以内に出版予定。

## 第 5 章 春季鹿児島県海域に分布する流れ藻の起源

### 5.1 はじめに

千田(1965)の流れ藻と幼稚魚に関する総説によれば、「ブリの幼稚魚が流れ藻につくことは、かなり古くから一部の漁業者に知られていた」といわれ、その稚魚を活用した養殖が 1957 年ごろから多くの県に広まった。そして、1950 年代に流れ藻に随伴するブリ稚魚（モジャコと呼ばれる）を流れ藻ごと採捕して養殖種苗として用いるブリ養殖が盛んになり始めた。この稚魚の採捕量の増加に伴うブリ資源量の低下を危惧したことから、水産庁を中心に関係各県によって流れ藻とそれに伴う幼稚魚の共同研究が実施された（千田 1965）。

日本ではモジャコは共食いする性質を持つことから種苗を人工的に生産することは困難で、流れ藻ごと天然モジャコを採捕するモジャコ漁で得られる種苗をブリ養殖では使うことから、ブリ養殖は流れ藻に依存しているといえる(久保, 2004)。東シナ海のブリの産卵場と産卵期について総説をまとめた山本ら(2007)によると、東シナ海中南部海域において 2 月には稚魚が採集されたことから、当海域における産卵は 2 月には始まっていると考えられている。流れ藻はモジャコの隠れ家となり生き残りに重要であること(安楽・畔田 1965)から、2-3 月の流れ藻分布（第 2 章）はモジャコにとって不可欠である。

鹿児島県海域では毎年春に、流れ藻を利用した「モジャコ漁」という漁法で、養殖用のブリの稚魚が採捕される。モジャコ漁は南日本を中心に、全国 9 県で実施されており、鹿児島県はその中でも採捕量全国 1 位となっている（図 5-1）。このモジャコ漁は、流れ藻に随伴するブリの稚魚を流れ藻ごと掬い上げる漁であるため、モジャコ漁を実施する西日本太平洋側から南日本にかけて、解禁日設定のために、モジャコ漁が行われる県の水産研究機関は流れ藻来遊量と付着するモジャコ量の漁期前調査を行っている(e.g. 鹿児島県水産技術開発センター 2016、高知県水産試験場 2016)。しかしこれらの流れ藻がどこからやってくるのかを調べた例はなかった。鹿児島県は毎年漁期前の 3 月と 4 月に調査船によって流

れ藻の目視観測、採集と採集した流れ藻へのモジャコの付着量について調べている。この調査による流れ藻の試料を東シナ海のものと比較し、中国沿岸からの粒子順追跡による流れ藻の輸送シミュレーションによって、これらの流れ藻の起源について検討する。

※ 本章の以下の内容（材料と方法、結果、考察、図表）は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。5年以内に出版予定。

## 第6章 総合考察

### 6.1 節 東シナ海におけるアカモク藻場と海洋環境

東シナ海は中国大陆と台湾琉球列島に囲まれた縁海であり、年間 944km<sup>3</sup> 流出する長江からの河川水の影響を大きく受ける (Bianchi and Allison, 2009)。今までの中国沿岸の栄養塩濃度についてのデータでは、1997 年から 2000 年に行われた調査の結果、生長期である冬季から春季に浙江省北部の 30° N、123.5° E の表層 0~10m における、硝酸濃度と亜硝酸濃度の鉛直分布は、それぞれ 0.03-0.4  $\mu$  M、0.2-0.45  $\mu$  M であった (郑ら 2003)。

長江は全長 6300km でアジア最長の河川であり、北部の水不足から世界最大級のダムとなる三峡ダムの建設が 1993 年から開始された。三峡ダムは同時に水力発電機能を備えている。2003 年には一部湛水し発電が開始され、2006 年にダム本体が完成し 2009 年には発電所を含む全施設が完成した。この三峡ダムが長江の河口域や沿岸環境に与える影響についていくつか報告がある (e.g. Hwang et al. 2004、Liu et al. 2006; 2007、Chai et al. 2009、Hu et al. 2012)。Hu et al. (2012) は 2006、2007 年の長江河口域と水深 75m 程度までの内側陸棚(inner-shelf) 域について堆積性有機物の空間分布を調べ、陸を起源とする堆積有機物が長江河口域から南方の中国浙江省・福建省まで分布していることを明らかにした。夏季は南東からの季節風によって沿岸流が弱化しているが、冬季の強い波浪によって河口域の堆積物は再懸濁し、冬季季節風によって発達した浙江省—福建省沿岸流 (ZFCC; Zhejiang-Fujian Coastal Current) によって南方へ輸送される (Liu et al., 2007)。そのため、長江を通じて輸送される陸起源有機物が、浙江省・福建省沿岸まで分布すると考えられている。

Chai et al. (2009) によると、堆積性有機物の量が減少している一方で、2002 年から 2006 年にかけて、11 月頃の長江河口域の溶存無機窒素 (Dissolved Inorganic Matter: DIN) の濃度の経年変化は増加傾向にあった。また、長江河口域から離れるにしたがって DIN 濃度は

低下するが、10-20  $\mu$  M 程度存在していた。長江河川水中の溶存無機有機物の濃度が上昇し、東シナ海へ流入して南方の浙江省・福建省に輸送されると思われるが、流量や流れとの関係を吟味する必要がある。

中国浙江省沿岸における冬季の海面水温（第 3 章図 3-13）は、アカモクの生育に適しており (Umezaki 1984)、生長期に豊富な栄養塩濃度が分布することは重要である。京都府沿岸のホンダワラ類では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  吸収能は種間で大きく異なっており、ヨレモクでは富栄養化の進んでいる場所の個体が最も速い吸収速度を示すという研究結果があり（西垣ら、2004）、アカモクの環境中の N、P に対する応答について調べる必要があるだろう。

中国の浙江省から広東省までの沿岸部は経済発展が続いていたことから、土地が不足し、埋め立てが行われている。沖合域の島嶼では、埋め立てが進んではないが、アカモク藻場に対する脅威として潜在的にあるものと思われる。

以上述べたように、長江から東シナ海に供給される栄養塩や河川水量が変化することで、浙江省および福建省沖合の島嶼の岩礁域のアカモクの生長に影響を及ぼす海洋環境も変化しているはずである。東シナ海沖合の流れ藻分布に影響を及ぼすこともありうる。また、埋め立てなどによる藻場の直接的な破壊も生じる可能性がある。中国の研究者とともに、浙江省および福建省沖合の島嶼の岩礁域のアカモクの分布を調べることや、衛星画像解析による藻場マッピングによるモニタリングなどを行って、変化を把握し、持続的な発展に不可欠である藻場の保全について日中の研究者が協力していく必要がある。

## 6.2 節 東シナ海沖合域流れ藻とブリの再生産

本研究によって明らかにされた東シナ海における 2-3 月流れ藻の分布域は大陸棚縁辺であり、ブリの主要な産卵海域であることが知られている。ブリの産卵は海面水温 19° C 程度になると始まるといわれており、東シナ海では 1 月には台湾北部海域、大陸棚縁辺で産卵が開始される (山本ら 2007)。孵化したブリ仔魚は稚魚となり、産卵後日齢 30 日ほどで流

れ藻に随伴するといわれている(Sakakura and Tsukamoto, 1997)。したがって、1月に孵化したブリ稚魚は2月に東シナ海中南部海域に分布する流れ藻に随伴し始めるので、東シナ海中南部海域に流れ藻があると最も早く生まれたの生育場として利用されるはずである。

東シナ海におけるブリ仔稚魚の分布について、南西海区水産研究所は1964-1969年の2-3月に東シナ海のブリ稚魚分布調査を実施し、2-3月期の東シナ海流れ藻分布域と重なる東シナ海沖合の海面水温19-21℃でブリ稚魚が出現すると報告した(南西海区水産研究所、1970)。2010、2011年の流れ藻調査において、流れ藻を観測した海域の表面水温は各年16.8-22.8℃、15.3-18.4℃の範囲であり、ブリ稚魚の出現する水温帯に近い。2010年、2011年の2-3月頃に北緯26-30°、東経124-128°の黒潮よりも大陸棚側では、中国大陸由来の流れ藻が滞留していたことから(第2章)、この海域で流れ藻とモジャコが遭遇する確率は非常に高く1月初旬から2月下旬に発生したモジャコの生育場となると考えられる。

第3章で検討したように、2-3月の東シナ海中南部沖合域には中国浙江省と福建省を起源とする流れ藻が分布し、これらの流れ藻がブリ稚魚の重要な生息場となっていることが示された。第4章および第5章で述べたように、2-3月の東シナ海中南部海域に分布した流れ藻は、3-4月頃に薩南海域へ輸送され、流れ藻に随伴するブリ稚魚を採捕するモジャコ漁場に参加する。言い換えれば、日本のモジャコ漁場に来遊するモジャコ資源は、中国沿岸を発生源とする流れ藻に依存しているといえることができる。

宍道ら(2015)は、薩南海域に来遊する流れ藻の量が近年増加傾向にあり、またアカモク流れ藻の来遊ピークが4月から3月にシフトし、早期化していると報告した。この要因について、宍道ら(2015)は流れ藻の出現に関係する海洋環境について検討した。毎年3-4月に薩南海域におけるモジャコ漁業の解禁日を決める漁期前調査を行ったときに目視で得られた流れ藻の生物量(流れ藻来遊量指数に変換)と、中国沿岸の波浪との関係を調べた。中国舟山群島沖の日平均波高が2m以上の日数を12月、1月、2月の月ごとに集計し、経年変化を調べたところ、12月の2m以上の波高となる日数の経年変化は有意な増加傾向が

あり、流れ藻の来遊量指数と有意な正の相関があった。また、与那国島で観測した風速 8m 以上の日数も近年増加傾向にあり、流れ藻来遊量指数と有意な正の相関があった。これらのことから、12 月の東シナ海海上風が近年強化し、それにより、12 月の中国沿岸の波浪も大きくなる日が増加し、この高い波によってアカモクが基質から引き離される個体数が増加し、3-4 月に薩南海域に来遊するアカモク流れ藻が増加していると解釈できる。本研究の結果は、浙江省と福建省の沖合島嶼、特に舟山列島周辺を中心に東シナ海沖合流れ藻の起源が分布していることを示しており、宍道ら(2015)の結果と整合する。

第 4 章の粒子順追跡の結果を考慮すると、中国を起源とする東シナ海沖合域の流れ藻は、太平洋側だけでなく日本海側へも輸送されるため、流れ藻に伴ってブリ稚魚も輸送される。東シナ海沖合域における、流れ藻の分布、ブリ稚魚の付着率、水温分布といったデータがあれば、ブリ稚魚の日本海側と太平洋側への資源の分配を推定することも可能であろう。

### 6.3 節 まとめ

以上のように、中国沿岸域の物理的、化学的環境要因、埋め立てなどは、アカモクの流れ藻発生に大きな影響を及ぼす。中国沿岸の開発や長江に建設された三峽ダム建設などにより沿岸環境が悪化し、アカモク藻場が衰退すれば日本のモジャコ漁やブリ資源が負の影響を受ける懸念がある。また、中国の沿岸の水産資源にとってもアカモク藻場は再生産の場として重要な生態学的な役割を担っていると考えられる。持続的な資源に利用をはかるために、日本と中国の研究者が協力して、中国沿岸のアカモク藻場の保全に取り組むことは重要である。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、東京大学大学院農学生命科学研究科の小松輝久准教授には修士課程から 7 年間に渡って熱心なご指導と温かい激励を頂いた。ここに心より御礼申し上げます。また、東北大学大学院農学研究科の青木優和准教授、東京大学アジア生物資源環境研究センターの岩滝光儀准教授、東京大学大気海洋研究所の小松幸生准教授、および東京大学大学院農学生命科学研究科の山川卓准教授には本論文の審査において、貴重なご助言を頂いた。深く感謝申し上げます。

九州大学応用力学研究所の広瀬直毅教授には、DREAMS モデル DR\_M による流速データをご提供いただいた。また、粒子追跡モデルについては、東京大学大気海洋研究所田中潔准教授およびコルシカ大学の Jean-Baptiste Filippi 研究員が開発された POM を用いる東シナ海における 5 月の流れ藻分布追跡モデルで用いたプログラム JeoSim をもとに開発したものである。元、行動生態計測分野に所属し、現在東京都環境科学研究所研究員である國分優孝博士にはモデルの駆動に際し多大なる技術のご指導を頂いた。鹿児島県水産技術開発センターの宍道弘敏主任研究員には、鹿児島県がモジャコ漁期前調査において採集した海藻を提供していただくとともに、流れ藻とモジャコ漁の現状について、貴重なご助言を頂いた。これらの方々に深く御礼申し上げます。

研究船淡青丸での流れ藻の採集や目視観測では、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 船長をはじめ乗組員の皆様の多大なるご協力がなければ成し得ることができなかった。行動生態計測分野元大学院学生であった、Soumaya Lahbib 氏、國分優孝氏、毛利明彦氏、渡口響子氏、Alabsi Natheer 氏、外国人研究員であった Nurjannah Nurdin 氏、Eva Rothauslar 氏、京都大学助教鰐坂哲朗博士、東北大学准教授青木優和博士には、淡青丸での流れ藻目視および採集調査に協力いただいた。ここに感謝する。

本研究のとりまとめにあたっては、東京大学大気海洋研究所行動生態計測分野の佐々修司特任研究員、カンタチュンポー・アタチャイ特任研究員、濱名正泰特任研究員には、ご

支援、ご助言を、 大学院学生サラ・ゴンザルボ・マロ氏、浅田みなみ氏、瀧波りら氏  
には多大なるご協力を頂いた。

最後に、長い学生生活を通して、温かく支えてくださった家族に、深く感謝申し上げます。

## 引用文献

- Allain, G., Petitgas, P., Lazure, P., & Grellier, P. (2007) Biophysical modelling of larval drift, growth and survival for the prediction of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) recruitment in the Bay of Biscay (NE Atlantic). *Fisheries Oceanography*, 16(6): 489-505.
- 安楽正照・畔田正格(1965) 流れ藻に付随するブリ稚仔魚の食性, 西海水研報 33, 13-45.
- Bianchi, T. S., & Allison, M. A. (2009) Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(20): 8085-8092.
- Buckland, S. T., Anderson, D. R., Burnham, K. P., Laake, J. L., Borchers, D. L. & Thomas, L. (2001) *Introduction to Distance Sampling*. Oxford: Oxford University Press. 432pp.
- Bushing, W.W. (1994) Biogeographic and ecological implications of kelp rafting as a dispersal vector for marine invertebrates. In *Proceedings of the Fourth California Islands Symposium: Update on the Status of Resources, March 22–25, 1994*, W.L. Halvorson & G.J. Maender (eds). Santa Barbara, California: Santa Barbara Museum of Natural History, 103–110.
- Bomber, J. W., Morton, S. L., Babinchak, J. A., Norris, D. R., & Morton, J. G. (1988) Epiphytic dinoflagellates of drift algae—another toxigenic community in the ciguatera food chain. *Bulletin of Marine Science*, 43(2): 204-214.
- Chai, C., Yu, Z., Shen, Z., Song, X., Cao, X., & Yao, Y. (2009) Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after

- impoundment of the Three Gorges Dam. *Science of the Total Environment*, 407(16): 4687-4695.
- Chou, H. N., & Chiang, Y. M. (1981) The *Sargassum* of Taiwan. *Acta Oceanographica Taiwannica*, 12: 132–149.
- Christensen, A., Daewel, U., Jensen, H., Mosegaard, H., John, M. S., & Schrum, C. (2007) Hydrodynamic backtracking of fish larvae by individual-based modelling. *Marine Ecology Progress Series*, 347: 221-232.
- Davenport, J., & Rees, E. I. S. (1993) Observations on neuston and floating weed patches in the Irish Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36(4): 395-411.
- Druce, B.E. & Kingsford, M.J. (1995) An experimental investigation on the fishes associated with drifting objects in coastal waters of temperate Australia. *Bulletin of Marine Science*, 57: 378–392.
- Edgar, G. J. (1987) Dispersal of faunal and floral propagules associated with drifting *Macrocystis pyrifera* plants. *Marine Biology*, 95(4): 599-610.
- Filippi, J.-B., & Bisgambiglia, P. (2004) JDEVS: an implementation of a DEVS based formal framework for environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*, 19: 261–274.
- Filippi, J.-B., Komatsu, T., & Tanaka, T. (2010) Simulation of drifting seaweeds in East China Sea. *Ecological Informatics*, 5(1): 67–72.
- Franke, H. D., Gutow, L., & Janke, M. (1999) The recent arrival of the oceanic isopod *Idotea metallica* Bosc off Helgoland (German Bight, North Sea): an indication of a warming trend in the North Sea? *Helgolander Meeresuntersuchungen*, 52: 347-357.

Guiry, M.D. & Guiry, G.M. (2016) AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 27 June 2016.

花岡藤雄(1995) ブリの産卵とモジャコの来遊機構. 宮崎県水産試験場研報, 146, 1-44.

Hanson, H. P., & Long, B. (1985) Climatology of Cyclogenesis over the East China Sea. Monthly Weather Review, 113(5): 697–707.

Harrold, C., & Lisin, S. (1989) Radio-tracking rafts of giant kelp: local production and regional transport. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 130(3): 237–251.

Helmuth, B., Veit, R. R., & Holberton, R. (1994) Long-distance dispersal of a subantarctic brooding bivalve (*Gaimardia trapesina*) by kelp-rafting. Marine Biology, 120(3): 421–426.

Hinojosa, I. A., Pizarro, M., Ramos, M., & Thiel, M. (2010) Spatial and temporal distribution of floating kelp in the channels and fjords of southern Chile. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 87(3): 367-377.

Hirata, T., Tanaka, J., Iwami, T., Ohmi, T., Dazai, A., Aoki, M., Ueda, H., Tsuchiya, Y., Sato, T., & Yokohama, Y. (2001) Ecological studies on the community of drifting seaweeds in the south-eastern coastal waters of Izu Peninsula, central Japan. I: Seasonal changes of plants in species composition, appearance, number of species and size. Phycological Research, 49(3): 215–229.

Hirata, T., Tanaka, J., Iwami, T., Ohmi, T., Dazai, A., Aoki, M., Ueda, H., Tsuchiya, Y., Sato, T., & Yokohama, Y. (2003) Ecological studies on the community of drifting seaweeds in the south-eastern coastal waters of Izu Peninsula, central Japan. II:

- Seasonal changes in plants showing maximum stipe length in drifting seaweed communities. *Phycological Research*, 51(3): 186–191.
- 広崎芳次(1963). 流れ藻につく魚類の生態学的研究 I. 資源科学研究所彙報 60: 66-75.
- Hirose, N., Takayama, K., & Moon, J. H. (2013) Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas. *Sea and sky*, 89(2): 1-9.
- Hobday, A. (2000) Abundance and dispersal of drifting kelp *Macrocystis pyrifera* rafts in the Southern California Bight. *Marine Ecology Progress Series*, 195: 101–116.
- Hoffmayer, E. R., Franks, J. S., Comyns, B. H., Hendon, J. R., & Waller, R. S. (2005) Larval and juvenile fishes associated with pelagic *Sargassum* in the northcentral Gulf of Mexico. In *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 56: 259-270.
- Hu, L., Shi, X., Yu, Z., Lin, T., Wang, H., Ma, D., Guo, Z., & Yang, Z. (2012) Distribution of sedimentary organic matter in estuarine–inner shelf regions of the East China Sea: implications for hydrodynamic forces and anthropogenic impact. *Marine Chemistry*, 142: 29-40.
- 黄俊翰(2012) 北部 2012 年 3 月銅藻入侵淡水河事件, 湿地報道,  
<http://wetlandreport.pixnet.net/blog/post/26760947> , 2016 年 6 月 17 日
- Ichikawa, H., & Beardsley, R. C. (2002) The Current System in the Yellow and East China Seas. *Journal of Oceanography*, 58: 77-92.
- Ida, H., Hiyama, Y., & Kusaka, T. (1967a) Study on fishes gathering around floating seaweed - I. Abundance and species composition. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 33: 923–929.
- Ida, H., Hiyama, Y., & Kusaka, T. (1967b) Study on fishes gathering around floating seaweed - II. Behavior and feeding habitat. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 33: 930–936.

- 池原宏二・佐野修 (1986) 佐渡海峡水域の流れ藻の出現種と分布. 日水研報, 36, 59-75.
- Ingólfsson, A. (1995) Floating clumps of seaweed around Iceland: natural microcosms and a means of dispersal for shore fauna. *Marine Biology*, 122: 13–21.
- Ingólfsson, A. (1998) Dynamics of macrofaunal communities of floating seaweed clumps off western Iceland: a study of patches on the surface of the sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 231: 119–137.
- Ingólfsson, A. (2000) Colonization of floating seaweed by pelagic and subtidal benthic animals in southwestern Iceland. *Hydrobiologia*, 440: 181–189.
- 鹿児島県水産技術開発センター(2016) モジャコ情報 <http://kagoshima.suigi.jp/mojako/>  
2016 年 6 月 15 日
- Kako, S. I., Isobe, A., Seino, S., & Kojima, A. (2010) Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data. *Journal of oceanography*, 66(2): 291-297.
- Kingsford, M.J. (1992) Drift algae and small fish in coastal waters of northeastern New Zealand. *Marine Ecology Progress Series*, 80: 41–55.
- Kingsford, M.J. (1993) Biotic and abiotic structure in the pelagic environment: importance to small fishes. *Bulletin of Marine Science*, 53: 393–415.
- Kingsford, M. J. (1995) Drift algae: a contribution to near-shore habitat complexity in the pelagic environment and an attractant for fish. *Marine Ecology Progress Series*, 116(1): 297–301.
- Kingsford, M. J., & Choat, J. H. (1985) The fauna associated with drift algae captured with a plankton-mesh purse seine net. *Limnology and Oceanography*, 30(3): 618–630.
- 気象庁(2011) 過去の気象データ・ダウンロード  
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/> 2016 年 6 月 20 日

Kobayashi, D. R. (1989) Fine-scale distribution of larval fishes: patterns and processes

adjacent to coral reefs in Kaneohe Bay, Hawaii. *Marine Biology*, 100(3): 285-293.

高知県水産試験場(2016) モジヤコ調査結果

<http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/040409/mojoyako.html> 2016 年 6 月 15 日

Komatsu, T., Matsunaga, D., Mikami, A., Sagawa, T., Boissier, E., Tatsukawa, K., Aoki, M.,

Ajisaka, T., Uwai, S., Tanaka, K., Ishida, K., Tanoue, H., & Sugimoto, T. (2008).

Abundance of drifting seaweeds in eastern East China Sea. *Journal of Applied*

*Phycology*, 20(5): 801–809.

Komatsu, T., Mizuno, S., Natheer, A., Kantachumpoo, A., Tanaka, K., Morimoto, A., Hsiao,

S. T., Rothäusler, E. A., Shishidou, H., Aoki, M., & Ajisaka, T. (2014) Unusual

distribution of floating seaweeds in the East China Sea in the early spring of 2012.

*Journal of Applied Phycology*, 26: 1169-1179.

Komatsu, T., Tatsukawa, K., Filippi, J. B., Sagawa T., Matsunaga, D., Mikami, A., Ishida, K.,

Ajisaka, T., Tanaka, K., Aoki, M., Wang, W. D., Liu, H.F., Zhang, S. D., Zhou, M.

D., & Sugimoto, T. (2007) Distribution of drifting seaweeds in eastern East China

Sea. *Journal of Marine Systems*, 67(3-4): 245–252.

小松輝久, 立川賢一, 王偉定, 劉惠飛, 鰐坂哲朗, 章守宇, 田中克彦, 周民棟, 上井進也, 杉

本隆成(2005) 中国浙江省枸杞島におけるガラモ場の種組成と繁茂期生物量. *藻類*,

53(01): 103.

小松輝久, 王偉定, 立川賢一, 章守宇, 鰐坂哲朗, 上井進也, 青木優和, 田中克彦, 杉本隆成

(2006) 中国沿岸のアカモクの分布 - 特に浙江省を中心にして -. *月刊海洋*,

38(11): 795-797.

小西芳信(2000) 流れ藻は中国からもやってくる. *西海区水研ニュース*, 103, 11-15

- 久保満(2004) 鹿児島県におけるモジャコ漁業のための流れ藻調査についての現状報告. 月刊海洋, 36(6): 458- 463.
- 久野正博・瀬藤聡(2015) FRA-ROMS を用いた熊野灘に来遊するモジャコの輸送実験. 黒潮の資源海洋研究 16: 83-91.
- Lebreton, L.C.-M., & Borrero, J.C. (2013) Modeling the transport and accumulation floating debris generated by the 11 March 2011 Tohoku Tsunami. Marine Pollution Bulletin, 66: 53–58.
- Lee, H. J., Yoon, J. H., Kawamura, H., & Kang, H. W. (2003) Comparison of RIAMOM and MOM in modeling the East Sea/Japan Sea circulation. Ocean and Polar Research, 25(3): 287-302.
- Liu, J. P., Li, A. C., Xu, K. H., Velozzi, D. M., Yang, Z. S., Milliman, J. D., & DeMaster, D. J. (2006) Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. Continental Shelf Research, 26(17): 2141-2156.
- Liu, J. P., Xu, K. H., Li, A. C., Milliman, J. D., Velozzi, D. M., Xiao, S. B., & Yang, Z. S. (2007) Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. Geomorphology, 85(3): 208-224.
- Macaya, E. C., Boltana, S., Hinojosa, I. A., Macchiavello, J. E., Valdivia, N. A., Vásquez, N. R., Buschmann, A. H., Vásquez, J. A., Vega, J. M. A. & Thiel, M. (2005) Presence of sporophylls in floating kelp rafts of *Macrocystis* spp. (Phaeophyceae) along the Chilean pacific coast. Journal of Phycology, 41(5): 913-922.
- Masumoto, Y., Sasaki, H., Kagimoto, T., Komori, N., Ishida, A., Sasai, Y., Miyama, T., Motoi, T., Mitsudera, H., Takahashi, K., Sakuma H., & Yamagata, T. (2004) A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). Journal of the Earth Simulator, 1: 35-56.

- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1982) Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4): 851.
- 三上温子(2007) 固着器から流れ藻期における褐藻ホンダワラ類の純一次生産量の推定. 東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻博士後期課程学位論文. 289pp.
- 三上温子, 小松輝久, 青木優和(2006) 流れ藻の寿命. *月刊海洋*, 38(8): 570-574.
- 三谷文夫(1965a): 航空観察によって得られた流れ藻量からモジャコ資源量を推定する 1 つの試み－I. *日本水産学会誌*, 31: 423-428.
- 三谷文夫(1965b) 航空観察によって得られた流れ藻量からモジャコ資源量を推定する 1 つの試み－II. *日本水産学会誌*, 31: 429-434.
- 三谷文夫(1965c) 航空観察によって得られた流れ藻量からモジャコ資源量を推定する 1 つの試み－III. *日本水産学会誌*, 31: 500-505.
- Mitchell, C. T., & Hunter, J. R. (1970) Fishes associated with drifting kelp, *Macrocystis pyrifera*, off the coast of southern California and northern Baja California. *California fish and game*, 56 (4): 288-297.
- Miyazawa, Y., Kagimoto, T., Guo, X., & Sakuma, H. (2008) The Kuroshio large meander formation in 2004 analyzed by an eddy - resolving ocean forecast system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C10).
- Miyazawa, Y., Zhang, R., Guo, X., Tamura, H., Ambe, D., Lee, J. S., Okuno, A., Yoshinari, H., & Komatsu, K. (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *Journal of oceanography*, 65(6): 737-756.
- 村山達朗(1991) 日本海におけるブリの資源生態に関する研究. *島根水試研報* 7: 1-64.

- 南西海区水産研究所(1970) 四国南方～台湾東方海域のブリ類稚仔出現状況と水温分布. モジャコ採捕のブリ資源に及ぼす影響に関する研究報告書 (続報).
- Niermann, U. (1986) Distribution of *Sargassum natans* and some of its epibionts in the Sargasso Sea. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 40(4): 343-353.
- 西垣友和, 八谷光介, 道家章生, 和田洋蔵(2004) ヤツマタモク, ヨレモクの栄養塩吸収能力. 京都府立快癒尾センター研究報告, (26): 21-29.
- ODINWESTPACK(2016) <http://www.odinwestpac.org/>, 2016 年 6 月 10 日
- 大野正夫(1984) 土佐湾沖の流れ藻の藻類学的研究. 日本水産學會誌, 50(10):1653-1656.
- Ólafsson, E., Ingólfsson, A. & Steinarsdóttir, M.B. (2001) Harpacticoid copepod communities of floating seaweed: controlling factors and implications for dispersal. *Hydrobiologia*, 453: 189–200.
- Parr, A. E. (1939) Quantitative observations on the pelagic *Sargassum* vegetation of the western north Atlantic. *Bulletin of the Bingham Oceanographic Collection*, 6: 1–94.
- Reisser, J., Shaw, J., Wilcox, C., Hardesty, B. D., Proietti, M., Thums, M., & Pattiaratchi, C. (2013) Marine Plastic Pollution in Waters around Australia: Characteristics, Concentrations, and Pathways. *PLoS ONE*, 8(11): e80466.
- Sakakura, Y., & Tsukamoto, K. (1997) Age Composition in the Schools of Juvenile Yellowtail *Seriola quinqueradiata* Associated with Drifting Seaweeds in the East China Sea. *Fisheries science*, 63(1): 37-41.
- Sasai, Y., Richards, K. J., Ishida, A., & Sasaki, H. (2010) Effects of cyclonic mesoscale eddies on the marine ecosystem in the Kuroshio Extension region using an eddy-resolving coupled physical-biological model. *Ocean Dynamics*, 60(3): 693-704.

- Sassa, C., Konishi, Y., & Mori, K. (2006) Distribution of jack mackerel (*Trachurus japonicus*) larvae and juveniles in the East China Sea, with special reference to the larval transport by the Kuroshio Current. Fisheries Oceanography, 15(6): 508-518.
- 瀬川宗吉, 沢田武男, 檜垣正浩(1961a) 流れ藻の海藻学的研究 - VI: 九州西海域の流れ藻. 九州大学農学部学芸雑誌, 18(4): 411-417.
- 瀬川宗吉, 沢田武男, 檜垣正浩, 吉田忠生(1961b) 流れ藻の海藻学的研究 - I: 津屋崎近海流れ藻の周年変化. 九州大学農学部学芸雑誌, 19(1): 125-133.
- 瀬川宗吉, 沢田武男, 檜垣正浩, 吉田忠生(1961c) 流れ藻の海藻学的研究 -VII: 壱岐・対馬東水道の流れ藻量の季節的变化. 九州大学農学部学芸雑誌, 17(1): 83-89.
- 瀬川宗吉, 沢田武男, 吉田忠生(1960) 流れ藻の海藻学的研究 -V: 津屋崎沖合の流れ藻量の季節的变化. 九州大学農学部学芸雑誌, 17(4): 437-441.
- 千田哲雄(1965) 流れ藻の水産的効用. 日本水産資源保護協会, 56pp.
- 瀬藤聡, 清水学, 宮澤泰正, 小松幸生, 奥野章, 黒田寛, 吉成浩志, Joo-Soo Lee, 亀田卓彦, 安倍大介, 青木一弘, FRA-JCOPE グループ(2009) FRA-JCOPE 海洋予測システム, 理論応用力学講演会講演論文集, 58.
- Shao, K. T. (2009) Catalogue of life in Taiwan. Web electronic publication. version 2009 <http://taibnet.sinica.edu.tw>, 2016 年 6 月 20 日.
- 庄島洋一 (1981) 九州近海・東シナ海におけるサンマ卵の採集について. 昭和 55 年度漁業資源研究会議 第 13 回浮魚部会議事録, 89-102.
- 宍道弘敏, 水野紫津葉, 小松輝久(2012) 鹿児島県海域における春季流れ藻及びモジャコ来遊量変動. 水産海洋学会研究発表大会講演要旨集, 77.
- 宍道弘敏, 水野紫津葉, 小松輝久(2015) 鹿児島県海域における流れ藻とモジャコの来遊量の近年の傾向. 月刊海洋, 47(5): 248-252.

- 庄島洋一・植木喜美彦(1964) 流れ藻に関する研究・流れ藻に伴う稚仔魚-II. 日本水産学会誌, 30(3): 248-254.
- Smith, S. D. (2002) Kelp rafts in the Southern Ocean. *Global Ecology and Biogeography*, 11(1): 67-69.
- Sun, J., Chew, W., Zhauang, D., Zheng, H. & Pang, S. (2008) In situ ecological studies of the subtidal brown alga *Sargassum horneri* at Nanji Island of China. *South China Fisheries Science*, 4(3): 58-63.
- 田中敏博, 吉満敏, 今吉雄二, 石賀好恵, 寺田竜太(2013) 鹿児島湾における藻場の分布と特性. 日本水産学会誌, 79(1): 20-30.
- Thiel, M., & Gutow, L. (2005) The Ecology of Rafting in the Marine Environment. I. the Floating Substrata. *Oceanography and marine biology*, 181-263.
- Thomas, L., Buckland, S.T., Rexstad, E.A., Laake, J.L., Strindberg, S., Hedley, S. L., Bishop, J. R. B., Marques, T. A. & Burnham, K. P. (2010) Distance software: design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology*, 47: 5-14. (<http://www.ruwpa.st-and.ac.uk/distance/>).
- 内田恵太郎・庄島洋一. (1958) 流れ藻に関する研究・流れ藻に伴う稚仔魚-I. 日本水産学会誌, 24(6-7): 411-415.
- Umezaki, I. (1984) Ecological studies of *Sargassum horneri* (TURNER) C. AGARDH in Obama Bay, Japan Sea. *Bulletin of the Japanese of Scientific Fisheries*, 50(7): 1193-1200.
- 許敏 (2016) Studies on attachment *Sargassum horneri* C. Agardh to the substrate and its dislodgement forces from the substrate. 東京大学大学院農学生命科学研究科水圏生物科学専攻博士後期課程学位論文. 100pp.

- 山本敏博, 井野慎吾, 久野正博, 阪地英男, 檜山義明, 岸田達, 石田行正(2007) ブリ  
(*Seriola quinqueradiata*) の産卵, 回遊生態及びその研究課題・手法について. 水  
研センター研究報告, 21: 1-29.
- 八谷光介, 西垣友和, 道家章生, 和田洋藏(2005) 若狭湾西部海域で採集された流れ藻の種  
組成. 京都府立海洋センター研究報告, 27: 13-18.
- Yatusya, K. (2008) Floating period of Sargassacean thalli estimated by the change in density.  
Journal of Applied Phycology, 20: 797-800.
- 吉田吾郎(2005) 広島湾における褐藻アカモクのフェノロジーとその個体群間文化に関す  
る研究. 水研センター研報, (15): 27-135.
- 吉田忠生(1963) 流れ藻の分布と移動に関する研究. 東北水研研報, 23: 141-186.
- 吉田忠生(1998) 新日本海藻誌. 内田老鶴圃, 東京, 1222pp.
- Zeigler, B. (1990) Object-oriented Simulation with Hierarchical. Academic Press, Modular  
Models, SIGART Bulletin, 1(3): 21-22.
- 郑元甲, 陈雪忠, 程家骅, 王云龙, 沈新强, 陈卫忠, 李长松(2003) 東海大陸架生物資源与環境.  
上海科学技術出版社, 上海, 835pp.

## 論文の内容の要旨

水圏生物科学専攻

平成 24 年度博士課程 進学

氏名 水野 紫津葉

指導教員 小松 輝久

論文題目 東シナ海沖合域における流れ藻の分布、起源、輸送に関する研究

海では、さまざまな藻類や海草が塊をつくって表層を浮遊している。それらは流れ藻と呼ばれ、潮目に集まり大きな塊をしばしば形成する。流れ藻は、世界の海で見られ、大西洋の Sargasso Sea（藻海）の流れ藻はホンダワラ属海藻で構成されていることで有名である。日本沿岸の流れ藻も、ホンダワラ科海藻が優占し、長いものでは数か月の間、海面を浮遊する。流れ藻は、サンマやトビウオのようなダツ目魚類の産卵基質となるだけでなく、マアジ・メバル・ブリなどが生活史初期の一時期を随伴して過ごす生息場の役割を果たし、外洋域において重要な独自の生態系をつくっている。

日本における流れ藻の研究は、1960 年代から本格的に始まり、日本全国の沿岸の流れ藻の分布、種組成、それらの季節変化が調べられた。東シナ海における流れ藻の研究では、ブリ稚魚を流れ藻ごと採捕するモジャコ漁業の盛んな九州沿岸域を対象とした研究がほとんどで、これらの一連の研究をもとに、東シナ海の沖合に形成される黒潮と大陸沿岸水との潮境域において大量の流れ藻が見られることはないと報告された。それ以降、東シナ海沖合域について、流れ藻の研究はされなかった。しかし、2002 年 5 月と 2004 年 3 月に研究船を用いた東シナ海沖合の流れ藻調査が初めて行われ、ホンダワラ属海藻のアカモク

(*Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh)だけで構成される流れ藻が両年とも沖合域に分布することが明らかになった。東シナ海におけるブリ産卵場は沖合域で、産卵は 1-2 月頃から始まり、1 か月程度で稚魚は流れ藻に随伴し、3-4 月頃から九州沿岸に輸送され、モジャコ漁業で採捕される。したがって、ブリ資源およびモジャコ漁業の持続的な開発のためには、晩冬から初春の東シナ海における流れ藻の分布や、それらの起源を明らかにする必要がある。

このような背景から、本研究では、2010-2011 年 2-3 月期の東シナ海沖合において学術研究船による流れ藻分布調査を行い、生物量と構成種を明らかにすることにした。さらに、流れ藻の分布情報と海流のシミュレーションを用いた粒子追跡実験により、起源と考えられる沿岸域を推定するとともに、流れ藻の輸送される海域について検討した。

学術研究船淡青丸を用いて、2010 年 2-3 月、2011 年 2 月に東シナ海沖合域における流れ藻の分布目視調査と採集調査を行った。調査定線を、大陸棚から黒潮流軸に向けて、等深線および黒潮流軸に直交するように設定した。また、乗船港から東シナ海に向かう間、東シナ海から下船港までの移動の間も、分布目視調査と採集調査を行った。その結果、流れ藻構成種は、東シナ海では、2010 年の五島列島南部沖合、本州南岸域では徳島県室戸岬沖にアカモクやヨレモクモドキ(*Sargassum yamamotoi* Yoshida)など複数種の海藻が出現したが、沖合で採集された流れ藻はすべてアカモクのみであった。これらの結果は、3 月中旬と 5 月に行われた東シナ海沖合流れ藻の分布に関する先行研究の結果と一致した。

学術研究船淡青丸を用いる流れ藻目視調査では、流れ藻発見時に、研究船舷側からの正横距離、流れ藻塊の面積を円に近似した等価円直径、時間を記録し、調査終了後に時間をもとに船の位置を流れ藻の位置とした。これらのデータから、流れ藻塊数の分布密度(raft km<sup>-2</sup>)と単位面積あたりの生物量(kg WW km<sup>-2</sup>)を、Buckland *et al.* (2001)の Distance Sampling を用いて密度を求めた。この方法では、研究船舷側からの正横距離に対する流れ藻分布に適合する最適な密度関数を決定し、密度関数から有効探索幅を求める。有効探索幅が求まるので、有効探索幅と調査定線の距離から得られる面積で目視した流れ藻の塊数を除し、流れ藻の密度を得た。海況条件が目視調査時ごとに異なるので、調査定線ごとに探索面積を求めた。さらに、2010 年 2 月と 2011 年 2-3 月の調査で採集した流れ藻塊の等価円直径と湿重量のデータをプールして、直径と湿重量の関係式を求めた。この式と流れ藻の等価円

直径から、流れ藻の湿重量を推定した。その結果、石垣島北部の黒潮フロントより大陸側の北緯 26-30 度、東経 124-128 度の大陸棚縁辺部から大陸棚上で多く、アカモク湿重量は、2010 年 3 月に  $100.4 \text{ kg km}^{-2}$ 、2011 年 2 月に  $504.1 \text{ kg km}^{-2}$  であった。また、黒潮流路より東側に位置する調査定線上では流れ藻は見られなかった。

流れ藻の起源および輸送経路を調べるために、九州大学応用力学研究所で開発された高空間分解能海流シミュレーション（東西方向 1/12 度、南北方向 1/15 度）の表層 (0-4m 深) の一日平均流速と、Filippi *et al.* (2008) の開発したラグランジュ的粒子追跡シミュレーター Jeosim を用いて粒子追跡実験を行った。黒潮流軸のように流速の大きい場所に粒子がある場合に計算格子をスキップしてしまう問題を回避するため、Jeosim では粒子位置の計算に用いる時間間隔  $\Delta t$  を固定せず、粒子の移動距離が空間分解能の距離を超えないように空間距離を設定し ( $\Delta q$ )、各粒子について  $\Delta t$  を個別に計算する。拡散係数を  $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $\Delta q$  を 500m とし、Jeosim を用いて、各採集点に流れ藻に見立てた粒子を 1000 個配置し、採集日から時間を遡る粒子逆追跡実験を行った。海岸に粒子が漂着した場所を仮の起源藻場とし、各漂着点から再度 1000 個の粒子を配置して放流し、時間に沿って粒子順追跡実験を行った。計算期間は、粒子逆追跡については (1) 採集日から前年の 11 月まで、粒子順追跡については、11 月上旬から 3 日おきに 3 月下旬まで放流し、(2) 流れ藻採集日までと、(3) 各放流日から 140 日後（流れ藻浮遊期間）までの、それぞれの期間について実験した。(3) のケースの計算をもとに、九州薩南海域において行われるモジャコ漁業に晩冬から初春の東シナ海沖合の流れ藻が寄与するか検討した。

2010 年 2-3 月、2011 年 2 月の流れ藻採集点からの (1) の粒子逆追跡実験の結果、北緯 32 度以北の流れ藻採集点から放流した粒子は一部が当年 2 月に九州西岸と五島へ着岸し、北緯 32 度以南の大陸棚上の採集点から放流した粒子は前年 11 月から当年 2 月の間に台湾の海岸へ、また、前年の 11 月から当年の 1 月上旬に中国浙江省と福建省の海岸へ着岸した。中国沿岸、台湾沿岸、九州西岸のうち、アカモクの生育が報告されているのは中国浙江省、福建省沖合の島嶼海岸と九州西岸であることから、これらの海岸のアカモクの分布が報告されている領域に  $1/4$  度格子を設け、アカモクの分布域を考慮した格子上の位置に再度粒子を配置し、(2) の粒子順追跡を実施した。その結果、九州西岸を起源とする粒子は、東シナ海大陸棚上の流れ藻分布域に到達せず、東シナ海沖合域流れ藻の起源とはならなかった。中国浙江省と福建省沖合の島嶼海岸を起源とする粒子は大陸棚上を輸送され、黒潮辺縁か

ら北緯 32 度に広がって分布し、黒潮フロントより内側の大陸棚縁辺部から大陸棚上の北緯 27-30 度、東経 124-128 度に集中し、目視採集調査で得られた流れ藻生物量の多い海域と一致した。これらの結果から、流れ藻の起源は、中国沿岸の浙江省から福建省沖合の島嶼であると結論づけられる。2010 年 2-3 月及び 2011 年 3 月の調査で得られた流れ藻の採集位置に流れ藻に見立てた粒子を各 1000 個置き、(3)の粒子順追跡を行った。4 月上旬にモジャコ漁が行われる薩南海域に、当年の 3-4 月に輸送され、東シナ海沖合域の流れ藻が鹿児島県のモジャコ漁に寄与することが示された。

以上、東シナ海を産卵場としているブリ資源にとって、ブリ稚魚のハビタットとしての流れ藻供給の面で、また、流れ藻ごとブリ稚魚を採集するモジャコ漁業の面で、中国沿岸からのアカモク流れ藻の供給とその維持が不可欠である。今後、流れ藻に依存するブリなどの漁業資源の持続的な利用の上だけでなく、流れ藻に依存するその他の海洋生物の種多様性を確保する上で、中国沿岸の島嶼部のアカモク藻場の保全を国際的な協力で進める必要がある。経済発展の急激な中国沿岸部の埋め立てや海洋環境の悪化、長江における三峡ダム建設による東シナ海における栄養塩や淡水供給の変化が、流れ藻に及ぼす影響を知るためにも長期的な視点からの東シナ海沖合域における流れ藻分布のモニタリングが望まれる。