

3. 記念講演

クラゲと戦うークラゲ研究の最前線ー

広島大学

理事・副学長 上 真一

1. 〈はじめに〉

クラゲ類の生物学的特性と大発生の現状は

海洋生物は大きく3つのグループに分けられます。すなわち、魚類や鯨類のように海の中を泳ぎ回る「遊泳生物」、エビ・カニ類や貝類のように海底に生息する「底棲生物」、そして珪藻類やカイアシ類のように海中を漂う「浮遊生物」です。プランクトンとは「浮遊生物」のことを指します。プランクトンには強い遊泳力はありませんから、それらの分布は基本的には海流や潮汐などによって支配されています。海水より密度の高い生物が海水に浮くためにはどのような特性が求められるのでしょうか。一般に海水中に存在する粒子（球形を想定）の沈降速度は、次のストークスの式で与えられます。

$$V=2gr^2(\rho-\rho_0)/9\eta$$

ここで、 V :沈降速度 (cm sec^{-1})、 g :重力 (980cm sec^{-2})、 r :粒子の半径 (cm)、 ρ :粒子の密度 (g cm^{-3})、 ρ_0 :海水の密度 (g cm^{-3})、 η :海水の粘性係数 ($\text{g cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$)、です。

生物が浮くためには、すなわちなるべく沈まないようにするには、まず体のサイズ (r) を小さくすることが求められます。その結果、植物プランクトンは決してコンブなどの海藻のように大きくなく、珪藻類や渦鞭毛藻類のように微細な単細胞生物です。また、代表的な動物プランクトンであるミジンコ類も、虫眼鏡を使って観察しなければならないほど小さなサイズです。ですから、プランクトンの研究のためには必ず顕微鏡が必要なのです。さて、沈降速度を小さくするもう一つの方法があります。それは体の密度 (ρ) を小さくしてできるだけ海水の密度に近づけることです。クラゲ類などのゼラチン質動物プランクトンの体は水分を99%も含みます。そうすることで巨大な体を持った動物プランクトンになることができます。当然



のことですが、巨大クラゲ類の研究には顕微鏡は必ずしも必要ではありません（微細な体の構造や餌生物の観察には必要ですが）。

クラゲ類とは一般に体がゼラチン質で構成される肉食性動物プランクトンのグループを指します。それらは大きく2つの分類群に分けられます。すなわち刺胞動物門と有櫛動物門です。刺胞動物門に属するクラゲ類は毒液と小さな針の入ったカプセルの「刺胞」を持っていることが特徴で、サンゴ類やイソギンチャク類もおなじ仲間です。一方、有櫛動物門のクラゲ類には刺胞はありませんが、動物プランクトンなどの餌を捕るために粘着細胞を持っています。この仲間は体の周囲に小さな櫛状の板が並んだ遊泳器官を持っていることから、一般にクシクラゲ類と呼ばれています。世界の海洋には合計で約2千種類のクラゲ類が存在すると言われています。中には非常に強力な刺胞毒で人を刺して傷つけるカツオノエボシやハブクラゲなど危険なクラゲ類（しばしば電気クラゲと呼ばれる）がいます。中には顕微鏡で観察しなければならないような数mmの小型クラゲ類もいる一方で、人の体重を上回るほど巨大化したクラゲ類も存在します。中でもエチゼンクラゲは傘径2m、体重200kgにも達する世界最大級のクラゲ類です。日本相撲協会のウェブサイトによれば横綱白鵬の体重は151kgですから、体重勝負ではエチゼンクラゲの方に軍配が上がるのです（図1）。

体重ではエチゼンクラゲに軍配

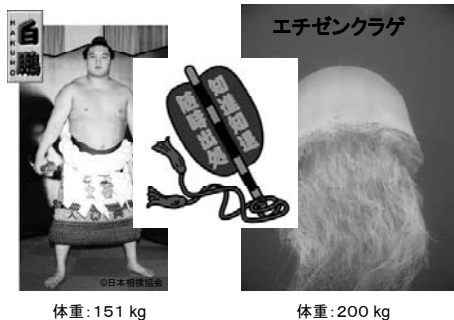


図 1

クラゲ類は約 5 億年前のカンブリア紀に出現し、世界の海洋を席卷していたようです。すなわち、当時の海はクラゲ類の王国でした。その後（約 4 億年前）、デボン紀になると魚類が出現し、次第に海の支配者となって今日に至っています。魚類繁栄の陰でクラゲ類は海の片隅に押しやられていたのですが、現在世界各地の海でクラゲ類の増加や異常発生が頻発するようになりました（図 2）。まず、東アジア海域におけるミ

世界各地のクラゲ類の大量／異常発生

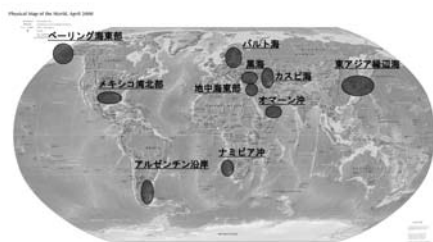


図 2

ズクラゲとエチゼンクラゲの増加・大発生は世界的にも極めて顕著なクラゲ類の大発生現象です。黒海、カスピ海、地中海奥部、バルト海では外来種のクシクラゲ類の 1 種 *Mnemiopsis leidyi* が増加し、生態系の変化をもたらし、漁獲量の低下をもたらしました。メキシコ湾北部沿岸域でミズクラゲやアカクラゲがこの数 10 年間増加し、沿岸のエビ漁業に深刻な被害をもたらすようになりました。湧昇による栄養塩の添加により世界でも有数の優れた漁場であるナミビア沖やオマーン沖の海域もクラゲ類の大発生が顕著となり始めました。また、人間活動の場から遠く離れたベーリング海やアルゼンチンのパタゴニア沿岸でも同様にクラゲ類の増加が起っています。

クラゲ類の増加や大発生は直接漁業の妨げになるだ

けでなく、臨海発電施設の冷却水の取水口を塞いで電力の出力低下を引き起こすなど、人間生活にも直結する被害をもたらします。また、クラゲ類と魚類は餌（主として中型動物プランクトン）を巡って競合していますし、両者は餌-捕食者の敵対関係にもありますから、クラゲ類の増加は魚類生産を支えていたこれまでの海洋生態系を劣化させ、魚類生産の低下に導くことが予想されます。実は水産科学や海洋生態学の分野ではこのような視点でクラゲ類を捉えていませんでした。今日これほどまでにクラゲ類が問題化して初めて、多くの研究者は海洋生態系におけるクラゲ類の機能的役割に目を向け始めた状況です。私自身も本来クラゲ研究者ではなく、魚類の餌として最も重要なカイアシ類と呼ばれる小型の甲殻類動物プランクトンの専門家でした。約 20 年前のことですが、瀬戸内海各地の漁業者から「先生、クラゲが増えてやれん。なんとかして欲しい」との多くの要望が舞い込み始め、それを機に私はクラゲ研究に入りました。今では、クラゲ研究チームを率いて世界をリードする（意気込みだけはそう感じて）研究を展開していますが、クラゲ類にはまだまだ未知のことが多く残っています。本講演では、クラゲ類が大発生する原因を究明し、大発生を予測し、制御することを目的に、私たちが現在行っているクラゲ研究の最前線についてお話ししたいと思います（図 3）。

クラゲと戦う —クラゲ研究の最前線—

（広島大学 上 真一）



図 3

2. ミズクラゲ、エチゼンクラゲの大発生の歴史的経緯と現状

ミズクラゲは本邦沿岸域で最も普通にみられるクラゲ類で、日本最古の歴史書の「古事記」の中に、「日本の国の始まりの様子はクラゲが集群したようだ」と表現してありますから、昔からミズクラゲが集群する

ことは普通の現象だったと考えられます。自然規模の集群の範疇を超えて大規模に発生し始めたのは、1960年代の東京湾でした。大発生により、東京湾沿岸の発電所の取水口がクラゲによって塞がれたために、東京首都圏が停電に陥ったことがありました。当時日本は東京オリンピックを開催するなど高度経済成長期のまっただ中にあり、東京湾の汚染、汚濁は極大に達していました。その当時の最悪環境より回復していますが、東京湾は今でも最もミズクラゲの多い湾の一つです。

瀬戸内海では1980年代からミズクラゲが増加していたことがわかりました。日本ではミズクラゲの出現量の定量的調査を長期間にわたって行った研究者はいませんから、日々漁に出ている漁業者の経験を頼りに溯及的に調査するしかありません。2002年に瀬戸内海全域を対象として漁協へのアンケートや漁村を訪問して漁業者から直接聞き取り調査を行いました。20年以上漁業経験のある1152名の漁業者の回答を解析した結果、瀬戸内海のミズクラゲは1980年代から増加し始め、1990年代に顕著に増加していることがわかりました(図4)。瀬戸内海と似たようなミズクラゲの出現

瀬戸内海のミズクラゲの出現動向(2002年調査)
 質問:最近20年間でミズクラゲは増加しましたか?
 いいえ(35%):20年前(1982年)と変わらない
 はい(65%):特に最近10年間に

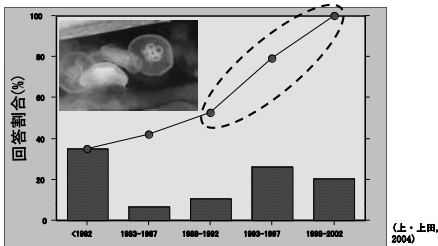


図4

動向は多くの本邦沿岸域に共通していると考えています。詳細な調査を行った訳ではありませんが、全国各地の漁村を訪問する機会がある度に地元の漁業者にクラゲの出現動向について聞いています。ほとんどの場所で「最近ミズクラゲが増えて、漁業の支障となっている」と多くの漁業者が答えます(図5)。

エチゼンクラゲの大発生は、前世紀は1920、1958、1995年に起こっており、約40年に一度の極めて珍しい現象でした。それが今世紀を境として、2002年以降ほぼ毎年のように大発生するようになりました(ただ

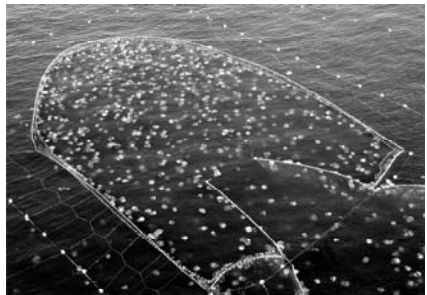
本邦内湾域で増え続けるミズクラゲ



図5

し、2008年は例外的に発生のない年でした)。エチゼンクラゲが日本海を北に向かって運搬されている途中で、沿岸各地に設置されている定置網に大量のクラゲが入網することが起こります(図6)。一般にエチゼンクラゲが大量に入ると魚類の入る量は低下します。

定置網での漁業被害



山陰沿岸の定置網(中国新聞社提供)

図6

クラゲの刺胞毒により魚類は傷付き、市場価値は低下します。クラゲはまた漁業者の肌や目を刺して被害を与えます。エチゼンクラゲが網目を塞ぐことにより水の抵抗が増して、最悪の場合には網は破裂してしまい

定置網での漁業被害



岩手県久慈市小袖漁協のサケ定置

図7

ます。網を守るために漁業者はクラゲ抜きと称してクラゲを網の外に排除しなければなりません(図7)。膨大な時間とコストの浪費です。2005年はこれまでに最大規模に数えられるエチゼンクラゲの大発生が起きました。水産庁に寄せられた漁業被害などの苦情総数は10万件以上にも及びました。水産庁は被害金額を発表していませんが、総額で約300億円になるだろうと推定されます。

3. ミズクラゲ、エチゼンクラゲはどんな生活史を送るのか

ミズクラゲ、エチゼンクラゲは2つの顔(世代)を持っています。一つは水の中を漂う「メデューサ」世代で、私たちが通常見るクラゲ類の表の顔です。そしてもう一つは海底に付着する小型のイソギンチャクのような「ポリプ」世代で、これはクラゲ類の裏の顔と言ってもよいでしょう。

少し複雑になりますがミズクラゲの生活史を図8に

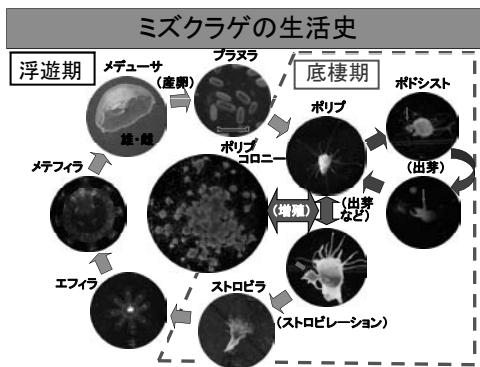


図8

示します。雌雄のメデューサが成熟するとそれぞれ精子と卵を生産し、それらが受精して発生する有性生殖を行います。受精卵はプランナへと発生し、繊毛を使って海中を遊泳し、海底の岩などの固い基質に付着しポリプに変態します。ポリプには雌雄の性がありませんから、ポリプの増殖は無性生殖です。すなわち、ポリプは出芽により自分の分身を作り、条件さえ良ければ指数関数的に増殖します。また、ポリプは休眠能力を持ったポドシストの生産も行います。環境が好適になればポドシストから新たなポリプが出芽して再び出芽などでポリプの数は増えて行きます。ミズクラゲの場合には冬季にポリプはお皿を重ねたような「ストロビラ」に変態し、晩冬や初春にストロビラの先端から

「エフィラ」と呼ばれる幼クラゲを放出します。基本的には1年間にポリプ世代とメデューサ世代がそれぞれ輪廻しますが、メデューサとしての寿命は1年未満です。しかし、ポリプは数年以上も生残が可能です。

エチゼンクラゲの生活史もミズクラゲと良く似ていますが(図9)、ポリプが出芽して増殖することはなく、必ずポドシストを生産し、それからポリプが出芽することで数を増やして行きます。そのためエチゼンクラゲの無性生殖速度は、ミズクラゲのそれに比較するとはるかに低いにもかかわらず大発生します。エチゼンクラゲにはミズクラゲにない特徴があるのでしょうか。

エチゼンクラゲ生活史

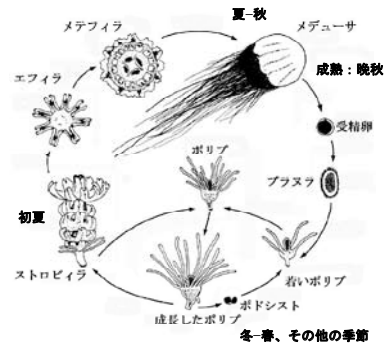


図9

4. エチゼンクラゲの成長と産卵量

エチゼンクラゲの特徴の一つは大きくなれることです。7月の平均体重は約3kgですが、11月には平均体重約108kgになります(図10)。その間の平均成長速度は1日当たり3.1%ですから、これほど大きな生物としては驚異的に高い値と言えます。この成長を支えるには大量の餌を食べなければなりません、体は巨大

日本海におけるエチゼンクラゲの成長

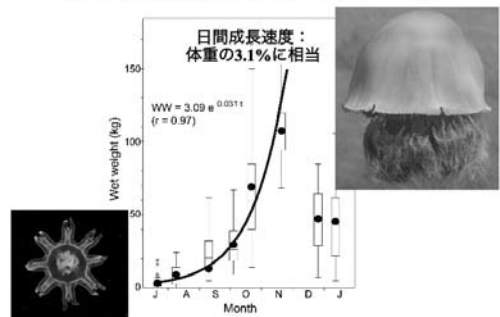


図10

であってもエチゼンクラゲの餌はカイアシ類などの体長数mm以下の動物プランクトンです(図11)。エチゼ

エチゼンクラゲの摂餌

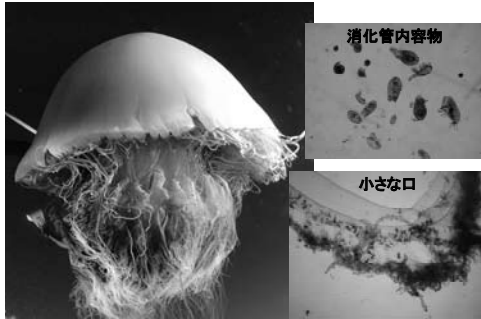


図11

ンクラゲの口腕と肩板には口径が約1mmの口が多数開いています。刺胞の直撃を受け麻痺した餌生物はこの口からクラゲの体内に取り込まれ、傘の直下にある胃腔に運ばれ、そこで消化されます。体重100kgのエチゼンクラゲの成長速度と代謝速度をまかなうには、1日に炭素量として21.3gCに相当する動物プランクトンを捕食しなければなりません。そのためには1日に海水4,260m³を処理してその中の動物プランクトンを捕獲しなければなりません(図12)。この水量はオリ

エチゼンクラゲ(体重:100 kg)の餌要求量

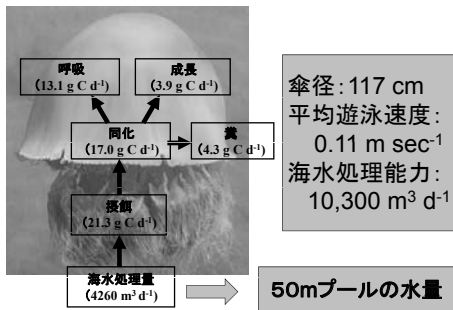


図12

ンピックの水泳プールの水量に匹敵するもの凄い量で、エチゼンクラゲの平均遊泳速度から算出される最大処理水量は10,300m³と推定されますから、もっと大量の餌を捕獲することも可能と考えられます。

エチゼンクラゲが成熟し産卵するのは晩秋～初冬の時期です。しかし、この季節でも元気に泳ぎ回るクラゲの生殖腺は成熟していません。図13に示すように雌の卵巣は全体に白っぽく、顕微鏡で拡大しても卵径は小さく、卵は透明です。このような未成熟の雌を網の

エチゼンクラゲの脅威の再生産能力

未成熟卵巣
(傷ついている元気な個体)

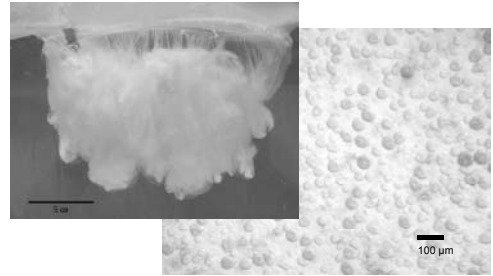


図13

の中に入れて体を傷つけると卵巣は急激に成熟します。すなわち卵は大きくなり、卵黄物質の蓄積が顕著になります(図14)、3～5日で産卵するようになります。雄クラゲを傷つけた場合にも精巣は同様に成熟し、放精します。雌1個体の卵巣には数億から10億を超える卵が存在します。このようにエチゼンクラゲは元気な間は餌を大量に捕食して体を大きくすることに専念し、ひとたび体が傷ついて自分の寿命が危うくなる状態になれば、体内に蓄積したエネルギーを子孫を残すために振り向けるようです。

3～5日で成熟し、放卵・放精

成熟卵巣

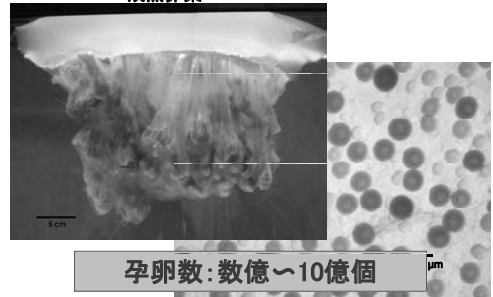


図14

卵が首尾よくポリプに発育すると、ポリプは平均4個の新たなポリプを生産します。そして各ポリプは平均5枚のディスクを持ったストロビラに変態し、エフィラを放出しますから、雌1個体の孕卵数を3億と仮定し、それらの卵が総てストロビラまで生き残ったと仮定すると(実際には起こりえないのだが)、最終的に75億のエフィラを生産することになります(図15)。毎年天文学的な数の卵が日本周辺海域にまき散らされていますが、幸いなことに、それらの卵が生残り翌年の日本生まれのクラゲの発生につながったこと

はありません。全部の卵やポリプが死んでしまうからです。

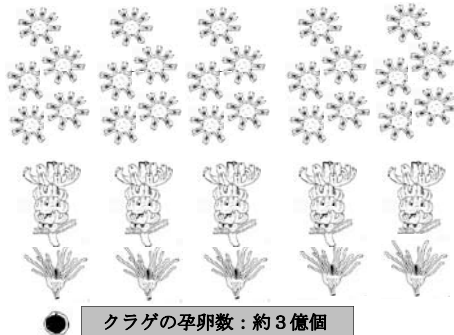


図15

5. クラゲ類が大発生する原因は何か

クラゲ類の増殖において最も重要なのがポリプ期における無性生殖過程です。ミズクラゲのポリプの増殖速度は、水温と餌供給量の増加につれて、それぞれ上昇します(図16)。近年の地球温暖化による水温上昇

ミズクラゲポリプ増殖速度に及ぼす水温・餌供給量の影響

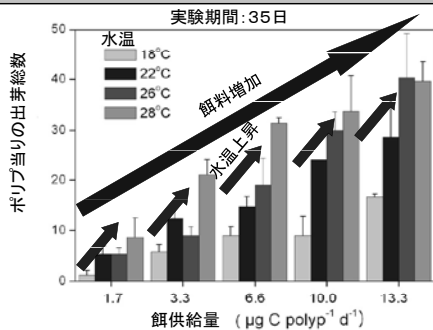


図16

はクラゲ類の増殖を高めることになります。また陸上から栄養物質が海に流されると富栄養化し、植物プランクトンが増え、その結果クラゲ類の餌である動物プランクトンが増えて、クラゲ類が増えることになります。エチゼンクラゲの発生場所は朝鮮半島から中国本土に囲まれる渤海、黄海、東シナ海です。この海域の環境が中国の経済発展に伴い大きく変化していることは良く知られています。地球温暖化や富栄養化に加えて、この海域ではクラゲ類と競合する魚類の資源が乱獲により減少していますし、ポリプの附着基盤になると考えられる人工構造物建造やプラスチックゴミの投棄量の増加もあります(図17)。

黄海・東シナ海の環境・生態系変化

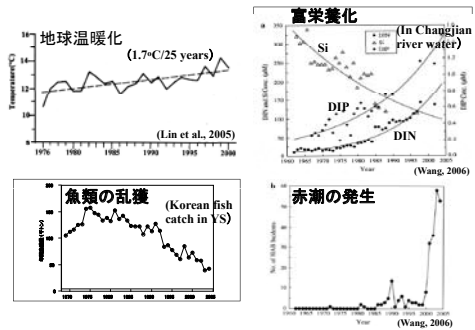


図17

経済発展ただ中にある中国が、直ちに工場廃水や生活排水の規制などを通して沿岸環境管理を強め、エチゼンクラゲ大発生の原因を取り除くための対策を行うことは到底考えられません。また、世界最大の三峡ダムの建設による河川水量と物質輸送量の変化が、今後のエチゼンクラゲの発生量にどのような影響を与えるか不明点も多くあります。いずれにしろ、ひとたびクラゲ類に有利な生態系が形成されるとクラゲ類は次第に増加し続け、逆に魚類資源は次第に減少し続ける「クラゲスパイラル」に陥ると予測されます(図18)。そうするとエチゼンクラゲ大発生は今後も継続して起こると考える方が自然です。



図18

6. どんな予測や対策が可能か

クラゲ類の増加や大発生を引き起こす根本原因は人間活動に由来していますから、エチゼンクラゲ大発生は人災と言うことができます。しかし、現状ではエチゼンクラゲ大発生は防ぎようがありませんから、その点では台風と同じです。エチゼンクラゲの発生場所は

中国沿岸域ですから、クラゲ台風の発生規模や日本への来襲時期の予測は、日本に向かって輸送されている若いクラゲの量を黄海、東シナ海で計数することにより可能です。私たち広島大学のクラゲ研究グループは、2006年から日中間を往来するフェリーを利用したクラゲ目視調査を継続しており、私たちの出す予測は日本の沿岸漁業者にとって不可欠の情報となっています。もし大発生が予測されるなら、漁業者は1～数ヶ月の時間的余裕を持ってクラゲの来襲に備えることができるからです。

現在、私たちは日本と中国を行き来する3ルート（下関-青島、神戸-天津、大阪-上海）のフェリーに乗船して、5月下旬から月1、2度の頻度でエチゼンクラゲの目視調査を行っています（図19）。船の横

フェリーを利用したエチゼンクラゲ目視調査

- 1) Shimonoseki-Qingdao
下関-青島
- 2) Shimonoseki-Taicang
下関-大倉
- 3) Kobe-Tianjin



図19

10m幅の海面付近に出現するクラゲ個体数を5分間隔で係数し、GPSにより船の位置（緯度経度）を15分間隔で測定しています。例えば、昨年（2009年）6月6-10日の調査では、長江河口沖に若いエチゼンクラゲが集中して出現しました（図20）。6月20-24日の調査では、エチゼンクラゲは東シナ海全域から黄海中央

2009年6月6-10日

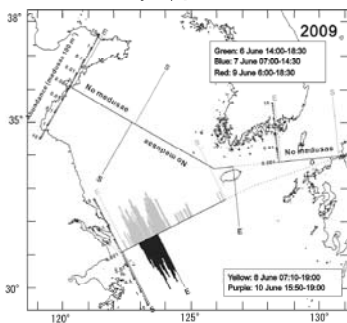


図20

海域にまで広範囲に分布が拡大しました（図21）。この状態から、2009年度は間違いなく大発生であることを予測し、漁業者に警戒するよう注意喚起を行いました。そして7月4-8日の調査では東シナ海、黄海、渤海全体にエチゼンクラゲの出現が確認され、先頭集団は対馬の間近に迫っていました（図22）。いよいよ日本の領海へエチゼンクラゲが侵入して来ます。黄海

2009年6月20-24日

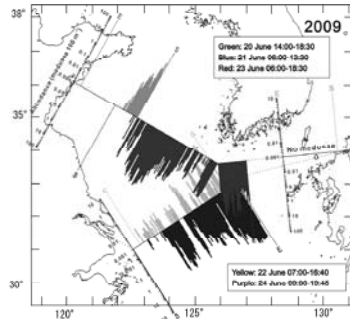


図21

2009年7月4-8日

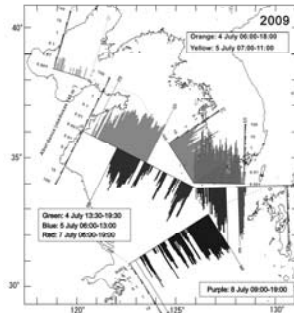


図22

におけるエチゼンクラゲの平均密度は季節的に大きく変動します。2009年は6月から出現し始め、7月上旬に2.29個体/100m²と最高になり、季節の進行とともに密度は次第に低下し、11月にはわずか0.006個体/100m²になりました。夏季にクラゲ密度が急激に減少するのは、次々に日本の方に輸送されるからです。

2006年以降の黄海における7月の平均密度を各年で比較してみましょう（図23）。2008年の密度は0.02個体/100m²と他の年の平均密度の1/100です。そしてこの年のみがエチゼンクラゲの顕著な発生はなく、日本の沿岸漁業に対する被害はありませんでした。一方、2006、2007、2009年はいずれも大発生の年であり、それに伴う大きな漁業被害がありました。今後もフェ

2006～09年7月における黄海でのエチゼンクラゲ平均密度と日本沿岸での大量出現との関係

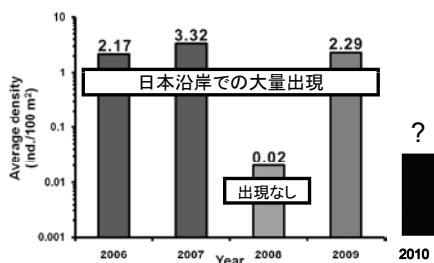


図23

リーによるクラゲ目視調査を継続してデータを蓄積することにより、エチゼンクラゲが日本の領海に到達する前の時点で、その年の発生規模をより正確に予測し、予報することが可能となります。

クラゲ類と漁業者との最後の戦いの場は漁場です。特に定置網はクラゲ類を受動的に受け入れてしまいますので、大発生時には大量のエチゼンクラゲが入網し、クラゲが網に張り付くことで水の抵抗が増し網の破裂などの被害が起こります。大量のクラゲが網に入ると、魚類が網に入って来ませんから、不漁になります。クラゲによる網の被害を防止するために今では幾つかの対策が実施されるようになりました。例えば、道網（魚類の回遊経路を遮断する岸から長く伸びる網）の目合を大きくしてクラゲを通過させるようにすること、定置網の最奥部の落とし網に仕切り網を設置して魚類とクラゲ類を分離させること、運動場（道網から誘導された魚類が遊泳する入口部分）と落とし網の間にある箱網にバイパス網を設置して網内のクラゲを網外に排出させることなどです（図24）。しかし、これらの対策網の設置のためには5百万円から1千万

定置網におけるエチゼンクラゲ対策

- ・道網の大目合化→クラゲを通過（魚類は通過しない）
- ・落とし網に仕切り網の設置→クラゲと魚を分離
- ・箱網にバイパス網を設置→クラゲを網外に排出

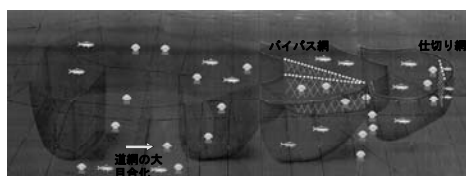


図24

円近くの新たな投資が必要になりますから、業者には大きな経済的負担です。これらの対策を実施したために史上最大規模の発生量であった2009年の漁期を大きなトラブルなく乗り切った業者もあります。一方、対策の遅れた業者では大量に入網するクラゲに対してなす術がなく、時化も加わって完璧に網が破壊された場合もあります。



7. 〈おわりに〉

東アジア縁海域を大里海に

広大な大陸棚の広がる渤海、黄海、東シナ海、日本海を含む東アジア縁海域は世界で最も優れた漁場の一つで、現在でも全海洋の漁獲量の約11%をこの狭い海域で生産しています。本来この海域は魚類が優占する豊かな海でした。しかし、次第に活発化する人間活動に基づき沿岸生態系は次第に悪化し、徐々にクラゲ類が優占する生態系にシフトしているように感じています。ひとたびクラゲ類の増加が始まるとそれらは魚類の卵や仔魚なども捕食しますから、魚類の資源回復は益々困難になります。次第にクラゲ類が増加する一方次第に魚類が減少する現象を「クラゲスパイラル」と名付けました（図18）。中国沿岸域ではこのクラゲスパイラルが進行し、その結果としてエチゼンクラゲの大発生が常態化していると考えています。今日の状況を作り出した原因が多層に折り重なっている上に、根本は経済優先の現社会システムに基づいているので、クラゲ大発生を止める特効薬はありません。日本、中国、韓国の各国政府が、持続的食料生産の場としてこの海域の重要性を十分認識した上で、国際的な理解と協調の中でより強力な環境管理と漁獲管理を押し進めるしかないだろうと考えています。東アジア縁海域を魚類あふれる豊かな「大里海」として創生することが重要です。