

水工学シリーズ 11-B-7

日本周辺における大型クラゲの出現過程と その予測技術手法の現状

(独) 水産総合研究センター 西海区水産研究所 特任部長

秋山 秀樹

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2011 年 8 月

The Appearance of Giant Jellyfish *Nemopilema nomurai* around Japan
and the Forecasting Technique of Its Transfer Process

秋 山 秀 樹
Hideki AKIYAMA

1. はじめに

近年、日本沿岸各地で海の異変を知らせる特異現象が現れるようになってきている。その典型例として、大型クラゲ（学名：*Nemopilema nomurai* Kishinouye, 和名：エチゼンクラゲ）の大量出現が挙げられる。

図1に示すとおり、大型クラゲは2002年、突然日本海に大量出現した。その後、毎年のように大型クラゲが日本海沿岸を中心とした日本沿岸の広域に來遊するようになり、定置網やまき網等の漁業に甚大な被害をもたらしている。日本沿岸域における大型クラゲの出現状況は、2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009年が出現年で、2004, 2008, 2010年が非出現年である。出現年のうち、2005, 2006, 2009年は出現量が非常に多かった。特に、2009年は過去最高の出現量となった。

日本周辺海域での大型クラゲの大量出現に対処するため、国は図1に示した各種事業等を立ち上げるとともに、図1最上段に示したような日中韓三国による国際会合や国際ワークショップを開催している。我々が担当している「大型クラゲ国際共同調査事業」も水産庁が実施する「有害生物漁業被害防止総合対策事業」の一部である。大型クラゲ国際共同調査事業では、大型クラゲの発生源の特定や我が国沿岸への出現過程を解明するため、東シナ海及びその隣接海域等において大型クラゲモニタリング調査及び出現予測技術の高度化等を行い、大型クラゲによる漁業被害の防止・軽減に万全を期すことを目的としている。また、中国・韓国の水産研究機関と連携し、黄海～東シナ海～日本海における大型クラゲの出現に関する情報交換を迅速に行うとともに、日中韓で国際ワークショップを開催し、毎年の調査研究の結果について意見交換している。

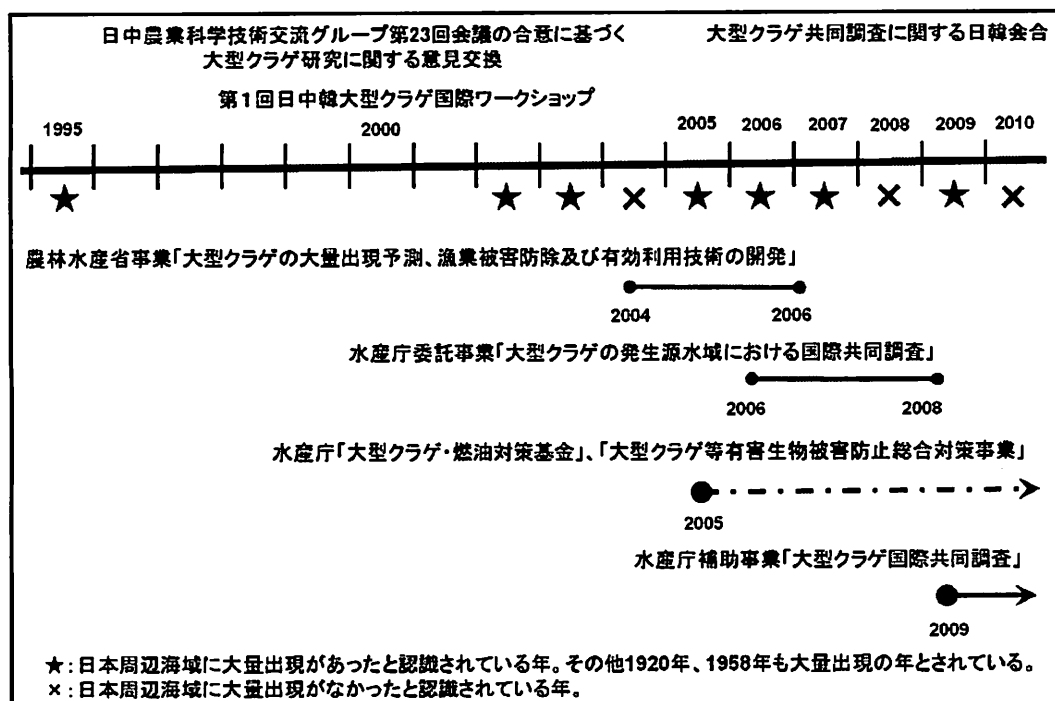


図1 日本周辺海域における大型クラゲの出現状況と大型クラゲ・プロジェクトの経緯

本講演では、まず大型クラゲとは一体どのような生物であるか、その実体と生活史を紹介する。次に、我々が大型クラゲ国際共同調査として取り組んでいる事業の概要を紹介する。そして、その事業の成果として得られている現段階の大型クラゲの出現過程に関して説明する。さらに、大型クラゲによる漁業被害の防止・軽減に万全を期すために実施している出現予測手法の現状を紹介する。

2. 大型クラゲの実体と生活史

2-1. 大型クラゲの実体

まず初めに、大型クラゲの実体を知ってもらいたい。写真1は、実際に日本周辺海域に出現した大型クラゲである。不気味な形をした浮遊生物である。何と驚くことに、日本周辺海域で見つかった最大の大型クラゲは傘径（お椀状の頭部の直径）が約2m、頭先の先から足（触手）の先までの長さが5m近くもあり、重量は約200kgにも達していた。通常的大型クラゲでも傘径0.5～1m、重量50～100kg程度はある。

したがって、大型クラゲが大量出現すると、日本海沿岸や東日本太平洋岸の定置網や沖合のまき網を中心に、このような巨体が大量入網することになり、網が破れたり、一緒に捕獲された漁獲物が損傷を受けたりする。また、海水浴場付近に出現すると、人が刺されて重傷を負うことがあり得る。

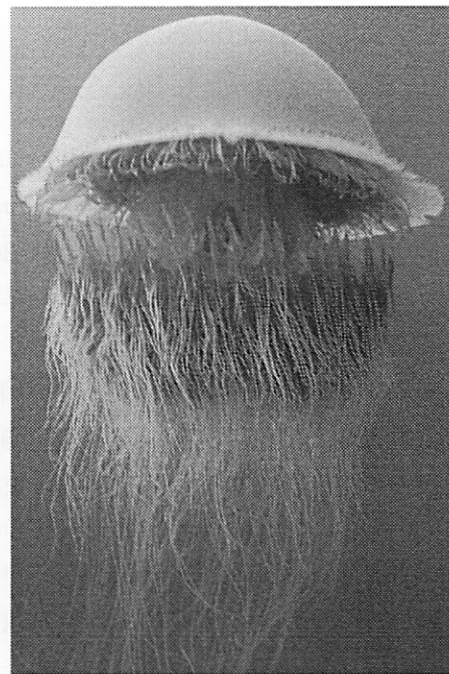


写真1 大型クラゲ (*Nemopilema nomurai* Kishinouye)

2-2. 大型クラゲの生活史

次に、大型クラゲの生活史（一生）を簡単に説明しておく（ジェーフィッシュ、2006：安田 徹、2007：図2参照）。

夏～秋季、成熟した雌雄異体の大型クラゲは、それぞれ卵と精子を海中へ放出する。受精卵は卵割を重ねていき、「プラヌラ幼生」となる。浮遊していたプラヌラ幼生は、しばらく浮遊した後、海底の岩や砂礫、貝殻などの上に付着して着底する。着底したプラヌラ幼生はイソギンチャクのような「ポリプ」に変化する。ポリプは「ポドシスト」という足跡を残しながら海底を移動することができる。そして、このポドシストからは無性生殖によって新たなポリプが増殖される。ポリプとして冬季を過ごした大型クラゲ（まだ超小型である）は、春季になって増殖条件が整うと横分裂をはじめ、小さなクラゲ体「エフィラ」の塊である「ストロビラ（横分体）」を形成する。ストロビラから発芽して分離されたエフィラ幼生一つ一つが稚クラゲとなって、その後海中を浮遊することになる。大型クラゲの成長は早く、浮遊し始めたエフィラ幼生は1～2ヶ月で傘径10～50cm程度の若いクラゲへと成長すると推定されている。ただし、幸いにも、大型クラゲの寿命は1年未満と考えられる。

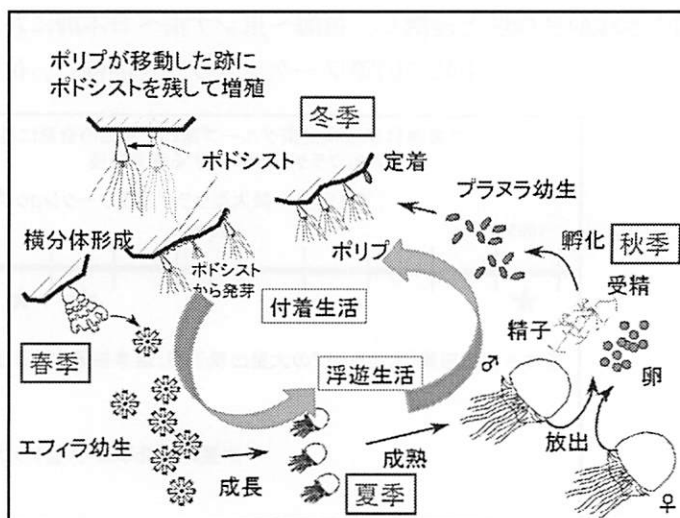


図2 大型クラゲの生活史の概要

(西海区水産研究所 豊川雅哉 博士 作)

3. 大型クラゲ国際共同調査事業の概要

大型クラゲ国際共同調査事業は水産庁補助事業として実施されている「有害生物漁業被害防止総合対策事業」の一角を構成する事業である。有害生物漁業被害防止総合対策事業の全体像は図3に示すとおりである。

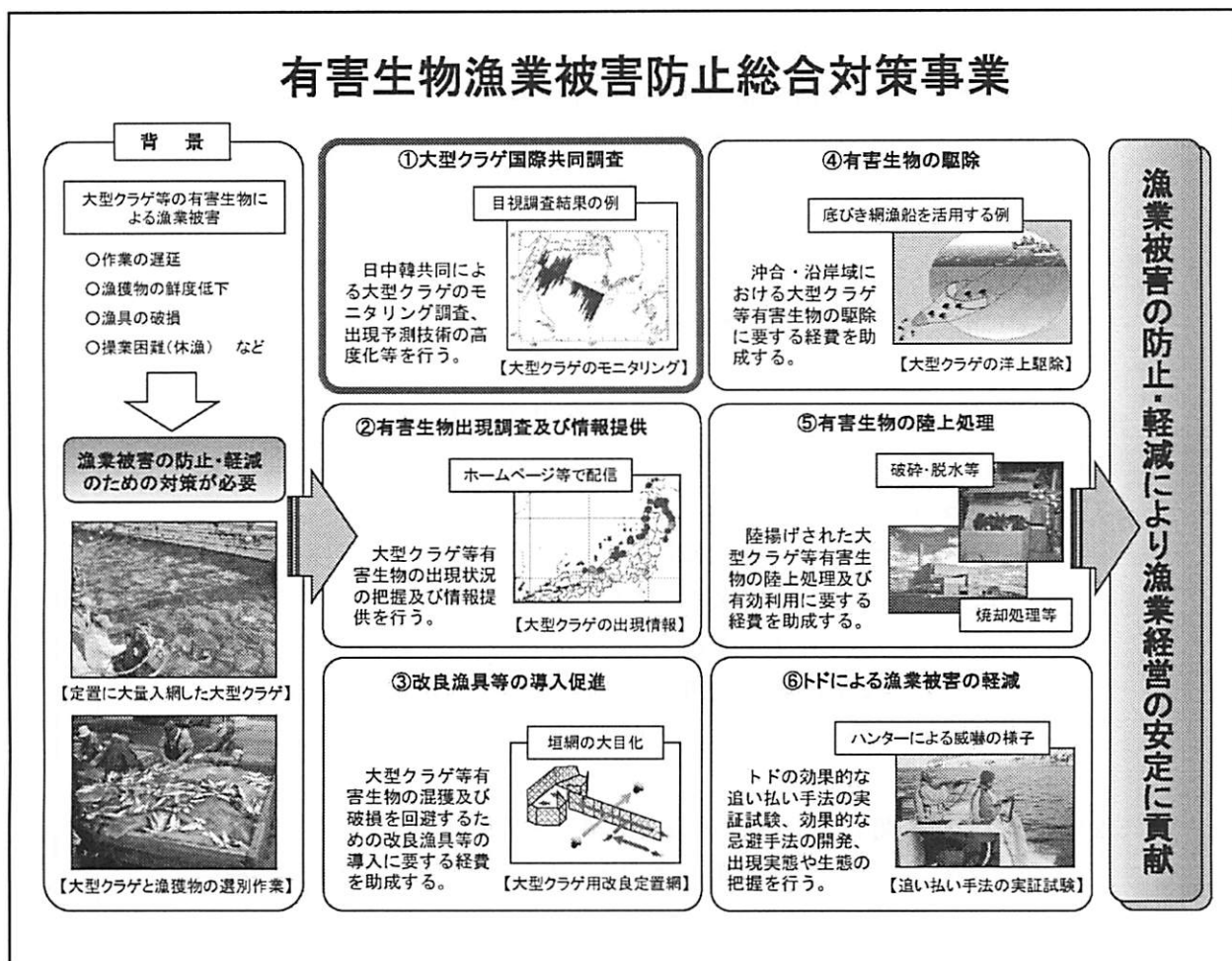


図3 有害生物漁業被害防止総合対策事業（水産庁）

我々は、平成23（2011）年度から水産庁補助事業「大型クラゲ国際共同調査」を共同連帯して実施することを目的に、独立行政法人水産総合研究センター（以後、水研センター）、独立行政法人水産大学校（以後、水産大学校）、国立大学法人広島大学（以後、広島大学）、国立大学法人山形大学（以後、山形大学）、国立大学法人名古屋大学（以後、名古屋大学）の5機関から構成されたジョイント・ベンチャー「大型クラゲ国際共同調査共同研究機関」を組織した。大型クラゲ国際共同調査共同研究機関では、大型クラゲの発生源の特定や我が国沿岸への出現過程を解明するため、東シナ海及びその隣接海域等において大型クラゲモニタリング調査及び出現予測技術の高度化等を行い、その結果を有害生物漁業被害防止総合対策事業により実施される大型クラゲ関連事業に速やかに反映させ、大型クラゲによる漁業被害の防止・軽減に万全を期すことを目標としている。

大型クラゲ国際共同調査事業に係わる各課題と組織体制（担当機関・代表者）を簡単に以下に示す。なお、次章以降で説明する内容は本事業の成果報告に基づくものである。各課題の詳細については、平成21（2009）年度及び平成22（2010）年度の「大型クラゲ国際共同調査事業報告書」を参照されたい。

平成 23 年度大型クラゲ国際共同調査事業

事業ア．日中韓共同による大型クラゲモニタリング調査事業

1) 東シナ海及びその隣接水域等における大型クラゲモニタリング調査

＜東シナ海域＞（西海区水産研究所・長谷川 徹）

＜中国水域＞（西海区水産研究所・秋山秀樹）

＜中国沿岸域＞（西海区水産研究所・豊川雅哉）

＜韓国沿岸域＞（水産大学校・上野俊士郎）

2) 国際フェリー目視調査

＜黄海～東シナ海域＞（広島大学・上 真一）

＜対馬海峡域＞（日本海区水産研究所・井口直樹）

事業イ．日中韓共同による大型クラゲの出現予測技術の高度化等事業

1) 日中韓共同による大型クラゲの出現予測技術の高度化等

①出現予測技術の高度化

＜黄海～東シナ海域＞（中央水産研究所・清水 学）

＜日本海域＞（日本海区水産研究所・渡邊達郎）

＜対馬海峡域＞（水産工学研究所・高尾芳三）

②大型クラゲのDNA分析による集団構造解析等（山形大学・半澤直人）

③海色衛星リモートセンシングによる環境変動と大型クラゲ出現状況との関係把握 （名古屋大学・石坂丞二）

2) 大型クラゲに関する日中韓の科学者会議等の開催

①大型クラゲに関する日中韓の科学者会議（西海区水産研究所・秋山秀樹）

②推進検討会の開催（西海区水産研究所・秋山秀樹）

③基金事業の補助事業者への情報提供（日本海区水産研究所・加藤 修）

4. 大型クラゲの出現過程

4-1. 大型クラゲモニタリング調査

大型クラゲの発生水域の探索、発生・成長及び沖合への移動過程の把握、対馬近海域への出現量の把握、大量発生の背景となる環境や海域生態系の変化等の把握のために、東シナ海及びその隣接水域等における大型クラゲモニタリング調査（分布調査、海洋環境調査、漂流ブイ追跡調査等）を、中国・韓国の研究者と共同で実施している。また、中国や韓国の EEZ 水域内にあると推定される大型クラゲの発生源水域付近における大型クラゲの分布量とその時空間変動を把握することは、日本周辺水域における大型クラゲ出現量の予測に重要である。そこで、日本－中国間及び日本－韓国間を航行する国際フェリーに乗船し、定期的に大型クラゲの出現状況を確認する目視調査を行っている。

(1)大型クラゲ分布調査

漁業調査船を用いて大型クラゲ分布調査を実施したときの大型クラゲの分布状況及び 10m 深の水温・塩分分布の一例を図 4 に示す。2010 年 6 月から 7 月にかけて、東シナ海北部海域で大型クラゲの出現が確認された（図中の●丸印）。図 4 下図の塩分分布を見ると、大型クラゲが出現した海域を境にその西側は塩分が低く、その東側は塩分が高いことがわかる。このように、大型クラゲが分布する水塊は周りの水塊より低塩分であることが多い。

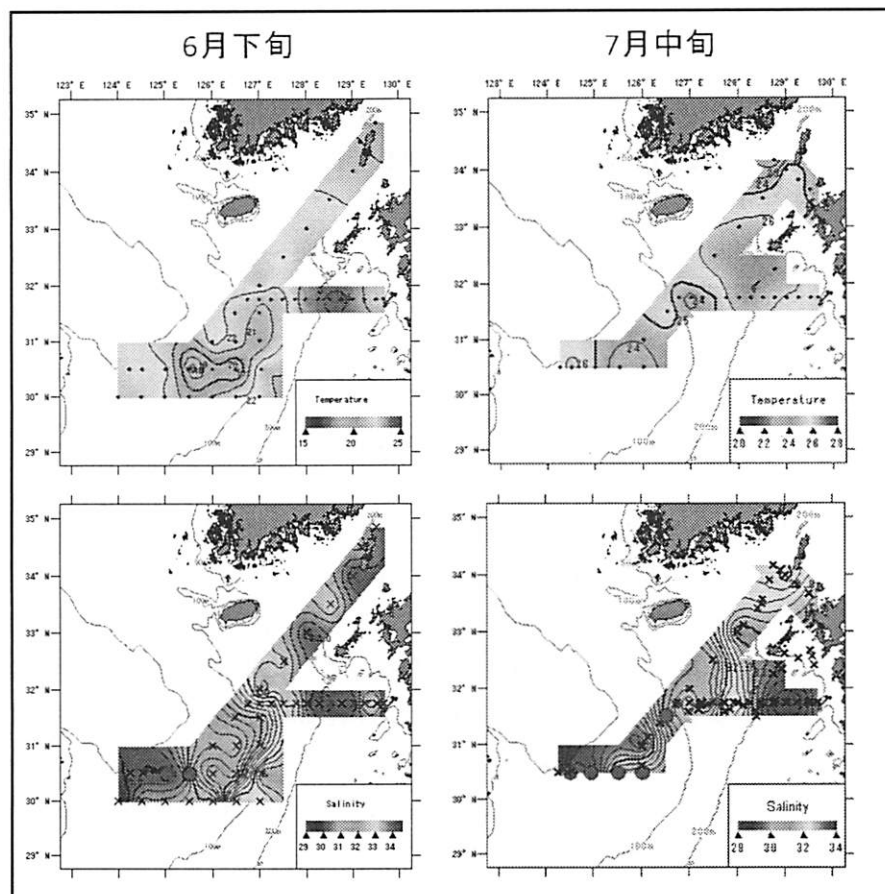


図4 2010年6月（左）及び7月（右）の大型クラゲ分布調査海域の10m深の水溫（上）、塩分（下）の水平分布と大型クラゲの出現地点（下図、●印）

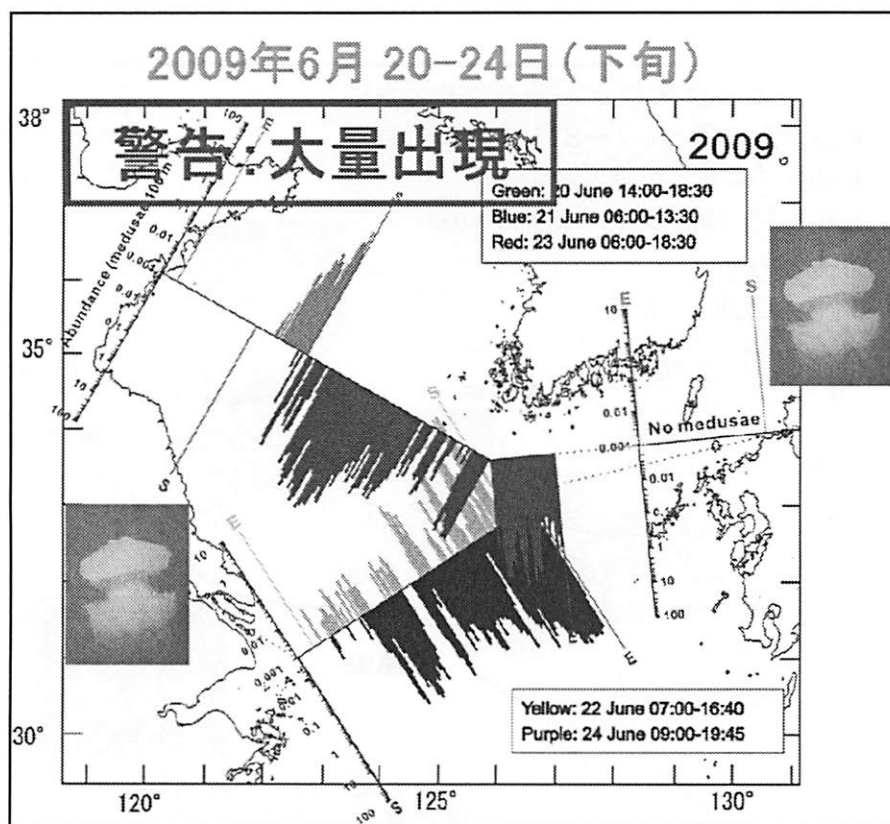


図5 日本－中国間を航行する国際フェリーを利用した大型クラゲ目視調査の結果（2009年6月下旬の例）

(2)国際フェリー目視調査

国際フェリー目視調査は、2006 年以降 6～11 月の間、月 2 回程度の頻度で実施されている。図 5 には 2009 年 6 月 20～24 日の調査結果を一例として示した。黄海及び東シナ海北部の広い範囲で大型クラゲが確認され、100 m²あたりの密度は最大 21.16 個体であった。2009 年は 2005 年を上回る大型クラゲの大量出現となり、その結果日本沿岸海域の漁業は甚大な被害を受けた。過去の国際フェリー目視調査の結果と日本沿岸の定置網への大型クラゲの入網状況とを比較すると、7 月の黄海～東シナ海における大型クラゲの出現量は日本沿岸の定置網への入網量と密接な関係があることが明らかとなった。

4-2. 出現過程

図 6 は、これまでの調査結果を基に、日本沿岸における大型クラゲの出現過程を模式的に示したものである。日本周辺海域における大型クラゲの出現過程のシナリオは次のとおりである。

4～5 月、黄海沿岸域で大型クラゲが発生すると推定される。6 月以降、長江起源水等の低塩分水が沖合へ張り出すに連れて、大型クラゲは断続的に東シナ海北部へ運ばれると推定される。対馬暖流との潮境に沿って済州島～対馬近海へと輸送され、7 月に対馬海峡を通過する。日本海に流入した大型クラゲは、対馬暖流の三分枝によって広域へ移流・拡散される。7～9 月、日本海沿岸では対馬暖流等の接岸に伴って大型クラゲが定置網等へ流入し、大きな漁業被害を引き起こす。10 月、津軽海峡で分岐した群れは大半が津軽海峡を通過するが、一部は北海道日本海沿岸を北上する。11～12 月、津軽暖流に取り込まれた大型クラゲは三陸沿岸を南下し、遠くは本州南岸まで輸送される。1 月以降は海水温の低下に伴って死滅するものと考えられる。大型クラゲの寿命は 1 年未満と考えられている。

なお、図 6 に示した黄海～東シナ海西部の発生源水域と推定される海域における大型クラゲの分布特性や現存量などはまだ全くわかっていない。今後は、日中韓三国の協力の下、より正確な大型クラゲの発生過程を解明することが必要であると考えられる。



図 6 日本沿岸における大型クラゲの出現過程（推定図）

5. 出現予測の現状

ここでは、我々の事業で用いている大型クラゲの出現予測手法の現状を紹介する。基本的には、大型クラゲモニタリング調査等で得られた出現情報を初期値として、数値モデルの最新予測結果を用いて大型クラゲ（仮想粒子）を漂流追跡する方法である。これまでの数値モデルによる出現予測技術の高度化の結果、日本沿岸での大型クラゲの出現時期をかなり正確に予測できるようになってきた。

水研センターでは、日本周辺に出現する大型クラゲの移動過程を迅速かつ的確に予測するため、大型クラゲの出現海域別に区分して、出現予測を実施している。

5-1. 東シナ海～黄海

中央水産研究所が開発した大型クラゲ輸送モデルは、目視調査などにより東シナ海北部海域で大型クラゲが出現した場合、その出現海域から対馬海峡への到達時期を大略推定することが可能である。潮汐や長江流量を数値モデルに考慮することで、黄海冷水の張り出しや長江流量の年々変動に伴う現象を表現できるようになった。この改変された黄海～東シナ海の数値モデル及び現行の海況予測システムの予測・再解析計算結果を基に、粒子輸送実験を実施して、大型クラゲ出現状況の正確な把握及び年々変動をもたらす物理的要因の把握を行うことを目標としている。

(1) 大型クラゲの輸送経路の推定実験

日本周辺海域で大型クラゲの出現が多かった 2009 年を対象として、東シナ海における輸送過程について数値モデルを用いた実験を行った。大型クラゲの発生源は東シナ海及び黄海の沿岸付近とし、また計算開始の粒子投入時期は 4 月 1 日と限定した。図 7 は、計算開始 60 日後と 90 日後における粒子位置と 10m 深の塩分及び水平ベクトル図を示している。60 日後の 6 月 1 日の粒子位置は長江流域北部にあり、90 日後の 6 月 30 日の粒子位置は済州島付近にも到達している。これらの大型クラゲを模した粒子の位置は、国際フェリー目視調査の 2009 年の結果に見られる大型クラゲ分布と似ている。計算結果の特徴は、長江起源水の低塩分な領域は、春季から夏季になるに従い、河川流量増大と季節風の影響によって、その低塩分水が占める面積は長江沖西部領域から北部へと広がる。6 月になると、その低塩分である長江起源水の北縁における潮目（フロント）の流れに沿って、済州島北側を通して対馬海峡へ進入してくることがわかった。

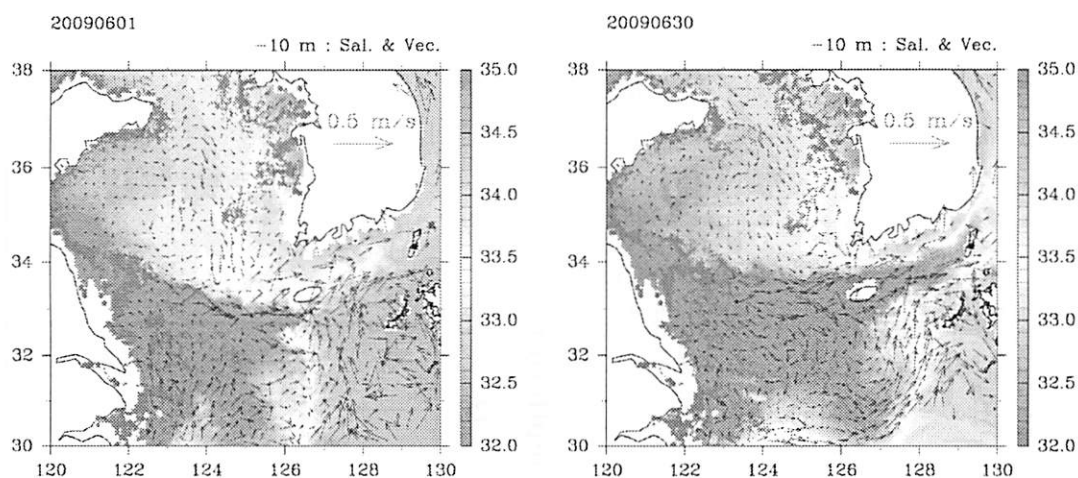


図7 2009年春～夏季にかけての粒子追跡実験結果の一部

2009年6月1日[左図]と6月30日[右図]を示す。

緑色の点が大型クラゲを模した粒子。

背景のカラーは海面下10m深での塩分分布、矢印は同水深における流速ベクトルを示す。

(2)大型クラゲの輸送経路の検証実験

図8は、対馬海峡を通過した日付毎にモデル粒子を判別し、それぞれの日付に同時に到着した粒子全ての出発場所からの軌跡を描いたものである。対馬海峡を通過した粒子の7月と8月の粒子の出発場所が異なることが確認できる。7月は長江北部の沿岸域をいったん北上した後、その進路を東方向へ偏向し、対馬海峡を通過し、そして対馬海峡へ通じる軌跡を示した。7月中旬は7月上旬と同じ傾向を示すが、それ以外に済州島南側を東向きに進む軌跡を示し、これらの多くは数値実験内では五島列島へと達した。8月中旬に対馬海峡を通過したモデル粒子は済州島南部でかなり南側を北上するものが見られた。7月中旬以降に五島列島へ漂着するなど現場海域での調査情報にはみられない点もあるが、7月と8月の2つの軌跡が示されたことは興味深い。

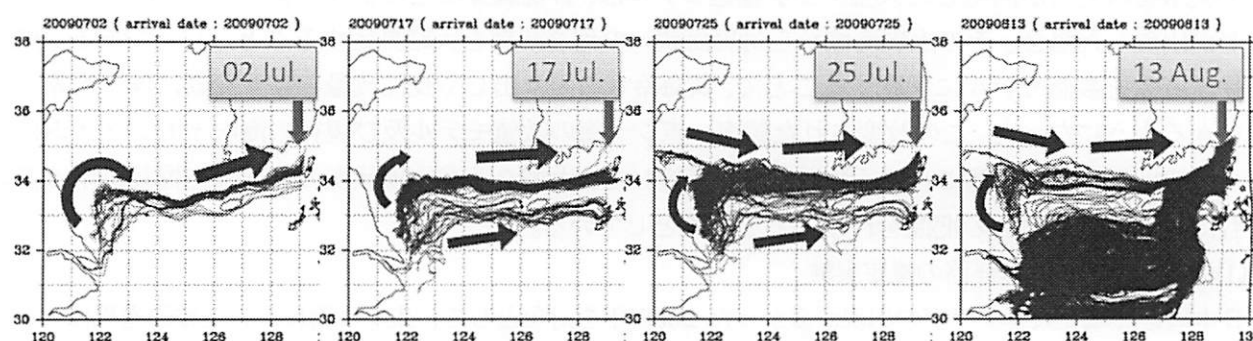


図8 水温生残を考慮した時のクラゲを模した実験粒子の軌跡
各図に記載した日付は対馬海峡を通過した日付を示し、
その日付に通過した粒子のみを抜き出して出発場所からの軌跡を作画。

5-2. 日本海

日本海に來遊する大型クラゲはすべて対馬海峡の東西水道を通過して流入し、対馬暖流によりほぼ受動的に輸送され、日本海を北上していると考えられている。しかし、対馬暖流の流動構造は非常に複雑であり、これまでの知見では、①対馬海峡東水道から流入し、日本沿岸に沿って北上する第一（沿岸）分枝、②西水道から流入し、日本陸棚付近を北上する第二（沖合）分枝、③西水道から流入し、韓国東岸を北上する第三分枝（東韓暖流）、の3つの分枝流構造が指摘されているが、それらは時空間的に大きく変動するため、大型クラゲが日本海をどの経路で移動し、日本沿岸のどこに何時出現するのかを予測することは非常に難しい。そこで、日本海の流動場を再現・予測する数値シミュレーションモデル（日本海海況予測システム：JADE）を用いて大型クラゲの分布・移動予測実験を行い、日本沿岸での出現予測を行う。

(1) 大型クラゲの日周鉛直移動を考慮した輸送実験

図9は大型クラゲの日周鉛直移動観測結果と簡略化した鉛直移動を示している。本実験では、大型クラゲが1日のうち15時間8.75m深に分布し、9時間42.5m深に分布するように設定した。

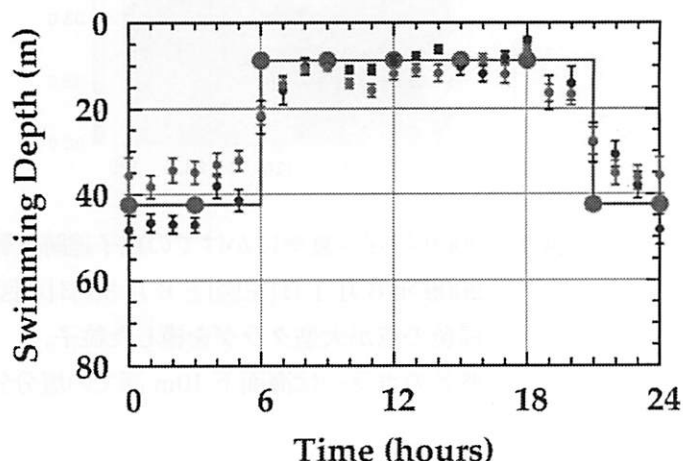


図9 アルゴリズムに組み込んだ
大型クラゲの日周鉛直移動

大型クラゲ分布調査の結果を基に、対馬海峡からの大型クラゲの分布・移動計算を行った（図 10）。西水道から流入した大型クラゲは、当初第三分枝に沿って韓国沿岸を北上し、離岸後多くが大和堆付近の沖合域を経由して極前線に沿って東に移動し、津軽海峡付近に接近した。一方、東水道から流入した大型クラゲは、第一分枝に沿って日本沿岸を北上した。津軽海峡には、西水道～沖合域を経由した大型クラゲの方が早く到達した。

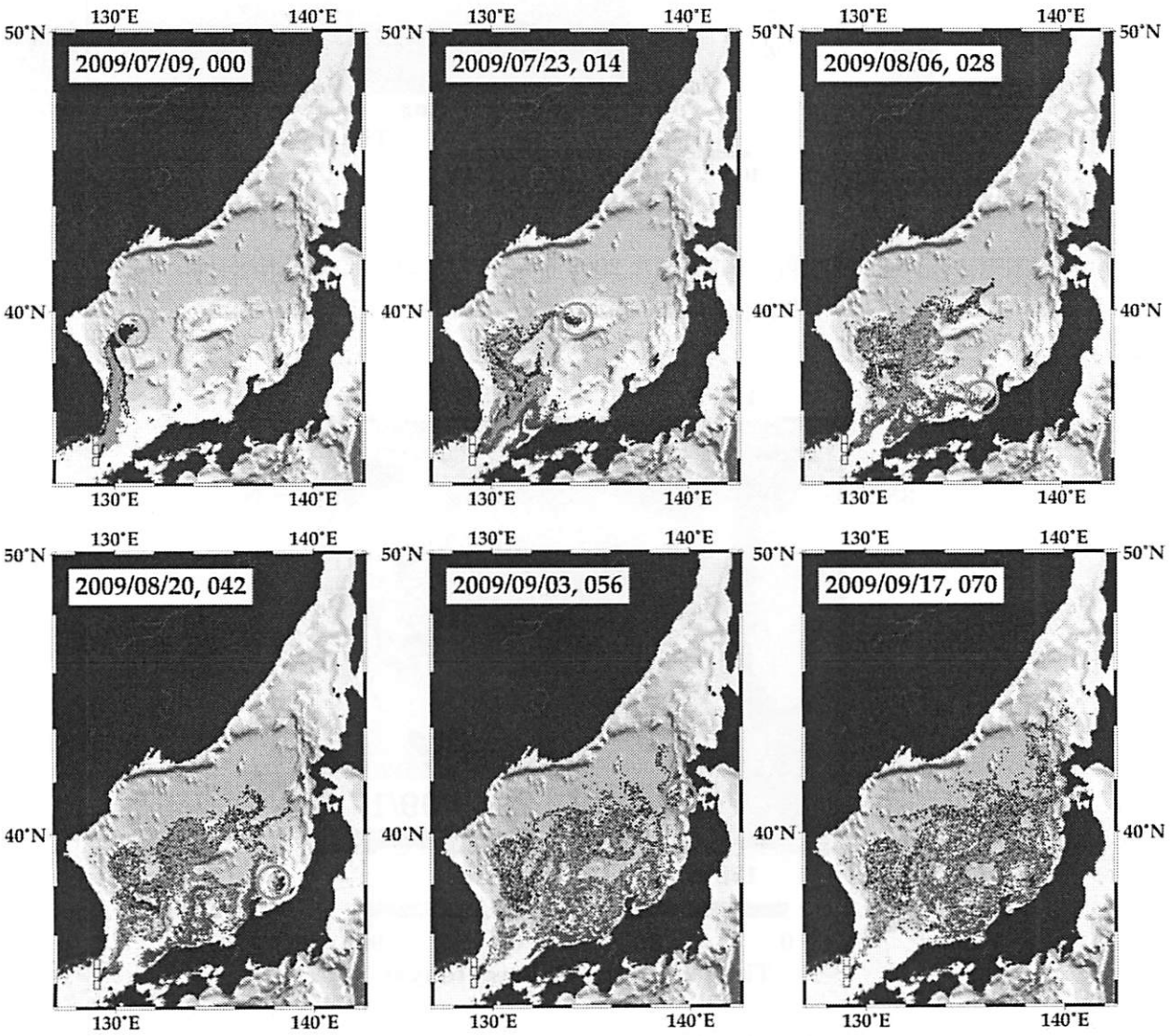


図 10 大型クラゲの分布・移動予測計算の結果

(2)大型クラゲの大量出現の再現実験

定量的な分布・移動予測の手法を検討するために、博多―釜山間の国際フェリーで観測した目視結果を基に、流入密度を時空間的に変動させる実験を行った。

大型クラゲが大量に出現した 2009 年の観測結果を例に解析を行った。対馬海峡から流入する大型クラゲの個体数の時空間変動を図 11 のように推定し（滞留域は除外）、これに基づいて粒子放流条件を定めて追跡計算を行った結果が図 12 である。山陰沖においては、沿岸付近は経過日数の小さい粒子がわずかししか分布せず、対馬暖流沖合分枝付近に経過日数の大きい粒子が高密度に分布していた。一方、隠岐諸島東方では、流動構造を反映して渦状に粒子密度の濃淡が見られ、経過日数も大きめの粒子が多く見られた。これらの結果は、実際の調査船調査による結果と良く一致していた。

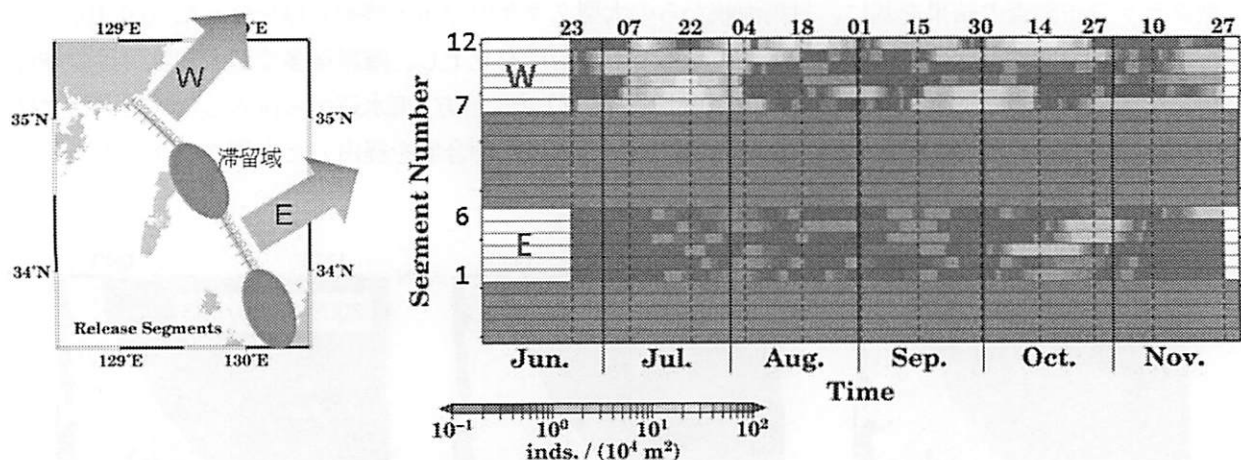


図 1 1 国際フェリー目視観測から推定した 2009 年 7～11 月における対馬海峡（東・西水道）から流入した大型クラゲ個体数の時空間変動。（W：西水道、E：東水道）

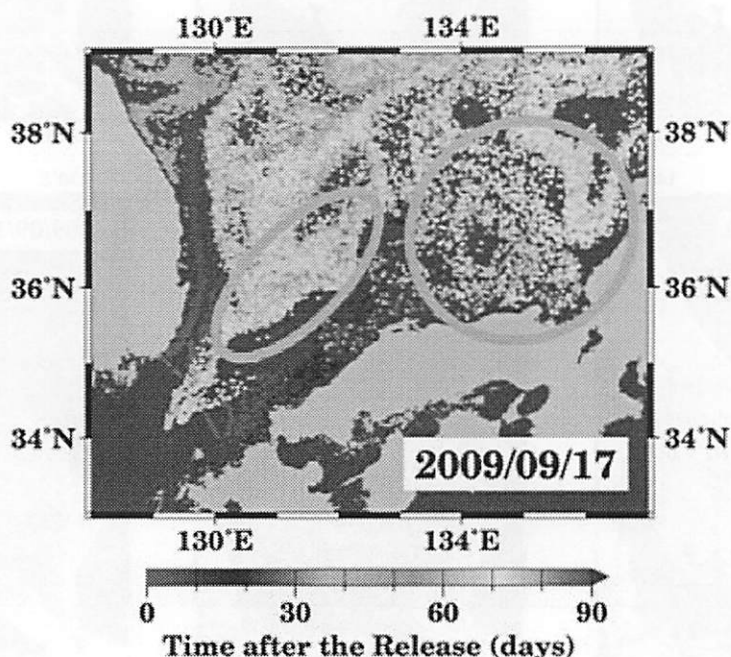


図 1 2 2009 年 9 月 17 日における大型クラゲ粒子の分布と経過日数。
山陰沖合域（左円）に高密度分布が見られ、隠岐諸島東方海域（右円）に渦状に密度の濃淡が見られる。

6. おわりに

本講演では、ここまで大型クラゲの実体と生活史、大型クラゲ国際共同調査事業の概要、その事業の成果として得られた大型クラゲの出現過程に関して説明してきた。さらに、大型クラゲによる漁業被害の防止・軽減に万全を期すために実施している数値モデルを用いた大型クラゲの出現予測手法の現状を紹介してきた。

本講演を聴講された皆様は、すでにお気づきのことと思われるが、今回紹介した大型クラゲは一体どこで、どのようにして発生するのか、未だにその発生源は不明であり、その生態も謎に包まれている。その原因として次の点が挙げられる。1) 大型クラゲの発生源と推定される海域が、日本が調査することができない海域であること、2) 大型クラゲは日本と韓国にとっては「有害生物」であるが、中国にとっては「水産資源」であるという認識の違いがあること、3) 大型クラゲは 2002 年以降、突如として大量出現したかと思うと、翌年

は全く出現しないというように、非常に極端な変動の様相を呈していること。

1, 2)に関しては、日中韓三国による国際的な連携と相互の共通理解が必要である。大型クラゲ国際共同調査事業の中でも「大型クラゲに関する日中韓の科学者会議等の開催」が盛り込まれていて、我々はすでに 7 回の日中韓三国による国際ワークショップを開催するとともに、中国や韓国の水産研究機関とは毎年大型クラゲに関する情報収集と意見交換の会議を設定している。日中韓三国の担当者間では、すでに共通の理解と連携協力の絆は出来上がっている。今後、日中韓三国の研究者による国際共同調査を実施することや最新の調査研究の成果を多面的に検討することにより、発生源と推定される東シナ海及びその隣接海域における大型クラゲの分布や生態解明が進展するよう、鋭意努力する所存である。そして、日中韓三国が大型クラゲの最新情報を迅速に交換することにより、早期に大量発生を感知し、より正確な出現予測ができる体制を構築していきたいと考えている。

次に、3)に関しては、地球温暖化の影響や海洋生態系の変調などが関係しているのではないかと指摘されているが、今のところ確固たる証拠がないというのが正直なところである。地道な調査研究の積み重ねで対応していくしかない、筆者は覚悟を決めている。

ここで紹介したすべての成果は、大型クラゲ国際共同調査事業に携わる各課題の研究代表者をはじめとする総勢数十名にのぼる課題担当者の努力と英知の賜物である。筆者は、事業推進リーダーとして、大型クラゲ国際共同調査事業を広く一般に公表することによりのみ努力した。大型クラゲ国際共同調査共同研究機関に参画する各位に深く感謝する。

最後に、本講演を聴講された皆様と、講演の機会を与えていただいた公益社団法人 土木学会 海岸工学委員会の皆様に深くお礼申し上げます。

引用文献

- ジェーフィッシュ (2006) : クラゲのふしぎー海を漂う奇妙な生態ー。ジェーフィッシュ著、久保田 信・上野俊士郎監修、技術評論社、255p.
- 水産総合研究センター (2010) : 平成 21 年度大型クラゲ国際共同調査事業報告書。87p.
- 水産総合研究センター (2011) : 平成 22 年度大型クラゲ国際共同調査事業報告書。85p.
- 安田 徹 (2007) : エチゼンクラゲとミズクラゲーその正体と対策ー。安田 徹著、成山堂書店、172p.