

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18405030

研究課題名（和文）強乱流混合海域における力学機構と高生物生産維持機構の解明

研究課題名（英文）Studies on mechanisms of high biological production associated with large turbulence mixing

研究代表者

木村 伸吾（KIMURA SHINGO）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90202043

研究成果の概要：

乱流混合が強い英国メナイ海峡域の干潟では、外部からの浮遊性植物プランクトンの流入よりも底生珪藻による基礎生産が大きく、また、底生生物であるヨーロッパイガイ（ムール貝）は底生珪藻と懸濁態有機物を主要な餌資源とする可能性が示された。しかし、ムール貝は懸濁態有機物中のデトリティスを餌として積極的に利用することはなく、その成長には底生珪藻の寄与が極めて大きいことが分かった。結論として、従来考えられてきた外部からの浮遊性植物プランクトンの流入が、高いムール貝の資源量を維持しているのではなく、乱流混合に伴う底生珪藻の生産が重要であることが明らかになった。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2007年度	3,000,000	990,000	3,990,000
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	4,050,000	17,250,000

研究分野：水産海洋学、海洋環境学

科研費の分科・細目：水産学・水産学一般

キーワード：ヨーロッパイガイ、低次生物生産、乱流、安定同位体、干潟、底生珪藻、懸濁態有機物、潮汐混合

1. 研究開始当初の背景

乱流混合に伴って生物生産が高くなることは、鉛直混合による深層からの栄養塩の供給がそのメカニズムとして考えられ、確立された議論に基づく既往の研究事例として、日本沿岸を流れる黒潮流域における低次生物生産のプロセスが知られている。とくに黒潮前線域では、その蛇行に伴う擾乱で発生する低気圧性の渦が、下層で貯蓄された高濃度の

栄養塩を海面近くの有光層に供給して、基礎生物生産を促進させる。さらに、植物プランクトン量の増加に伴って動物プランクトンの密度も増加し、それらの密度が最大となったところでカタクチイワシの卵と仔魚が濃密に分布することなどが明らかになっている。つまり、渦の生成が動物プランクトンによる二次生産に直接影響するばかりか、それらを餌生物とする稚仔魚の生残までもが、黒

潮前線域における鉛直的な物質の輸送によって支えられていることを示すものである。また、そのような稚仔魚にとって生残の良い海域で、親魚が選択的に産卵する可能性があることも示唆されている。

このように、沖合域では高い生物生産をもたらす海洋の物理的変動現象のメカニズムはかなり明らかにされつつあるといえる。しかし、日本における沿岸生態系研究は、比較的穏やかな流動環境下にある干潟に焦点が当てられ、潮汐混合に代表される物理環境の変動に伴う生物生産過程に関する研究はあまり進んできていないのが現状である。これは、日本においては、強乱流混合海域と高生物生産海域が同所的に存在することが非常に少ないためであり、日本でこの種の海洋生態系研究を推進することは難しいといえる。一方、世界的にみれば、北米の Delaware Bay や Chesapeake Bay、北欧のフィヨルドでの研究が盛んであり、イギリスの Menai Strait (メナイ海峡) もそのような研究海域の一つである。

メナイ海峡は、イギリスの北ウェールズ地方に位置し、1km 程度の幅で約 30km も細長く続く地形を有する。イギリス最大のムール貝の成長率を誇る海域として知られており、高い生物生産の要因としてその特異な海洋環境に注目が集まっている。すなわち、この海峡の両端には広い干潟が広がっているが、干満差が 6 メートルにも達する潮汐による激しい乱流混合が干潟域に起こっているということである。河川の流入は北部の一地域に限られているので、陸上からの栄養塩の供給は極めて乏しく、メナイ海峡におけるヨーロッパイガイ(ムール貝)の高成長率を背景とした高い生産量は、このような潮汐混合と沖合での生物生産に基づく有機物の流入に起因するものと推測されている。

これまでのこの種の研究は、自然環境下での生物生産のメカニズムの実態を評価するというよりも、河川を通じて流れ込んだ多量の有機物の動態に焦点が当てられ、森-川-海といったステレオタイプな議論に終始することが多い。その結果、もともと海洋が保持している環境修復能力や再生産に関する真の議論を覆い隠し、沿岸生態系の潜在的な生物生産能力の評価を難しくさせている。しかし、陸上起源の栄養塩の供給がなくても、沿岸海域における強い潮汐混合は栄養塩類の有光層への供給をもたらすし、また、海底に蓄積された堆積物を攪乱させることで、低次生物生産と、動植物プランクトンや懸濁有機物を餌とする底生生物の成長に大きく寄与する可能性が高い。

イギリスのメナイ海峡は、乱流混合の影響を総合的に評価するには最適な海域であ

り、種苗を干潟域に散布するだけの極めて粗放的な養殖であるにも係わらず、イギリス国内のムール貝生産の 3 分の 2 をこの海域だけで支えていることにもその高い可能性が現れている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、沿岸生態系に焦点を当て、浮遊性や底生性の植物プランクトンを中心とする低次生物生産がそれらを餌とする貝類の成長や生残、そして流動環境の時空間的变化がどのようにそれら生物的要因に影響を与えているのかを定量的に解明することにある。一般的には、流動環境が比較的穏やかな干潟域で生物生産が高くなるものとみられ、そのような海域を対象とした研究は数多い。しかし、潮位差が大きな海域、とくに海峡のような海域では強い潮流が発生し、それに伴う激しい乱流も低次生物生産過程に極めて重要な役割を果たしているものと考えられる。そこで、本研究では海峡域を対象として強い乱流環境下にある沿岸生態系の構造を明らかにし、水産資源の持続的な利用に向けた新たな方策を検討することを目指すこととした。

本研究の特色は、沖合生態系と沿岸生態系での生物生産機構を比較し、その差異を海洋物理学的観点を加えて明らかにしようとした点にある。この観点からみた大きな両者の違いは、成層構造と関連した強乱流混合の有無と、海底を考慮する必要があるか否かという点である。一般に乱流混合は栄養塩を有光層に供給するため、基礎生産にはプラスに働く効果が強いと考えられるが、変動の時空間スケールがあまりにも小さければ生物自体の変動が物理現象の変動に追従していけない可能性がある。また、海底に堆積した有機物の上層への巻き揚げ効果は沖合生態系では考慮する必要がないが、沿岸生態系では重要な要素となっている。つまり、その効果と乱流混合に伴う基礎生産の増加のどちらが二次生産者の成長・生残にとって有効な影響をもたらすのかを検討することは、斬新で意義深い研究といえる。

そこで、メナイ海峡で極めて高い生産性が維持されているムール貝を対象に、その維持メカニズムを摂餌生態と関連させて解明することを最終的な目的とした。本研究の成果は、ムール貝だけでなくカキなど沿岸を生息海域とする底棲の生物資源の維持管理を行うための重要な指針として、大きく貢献できるものと考えられる。

3. 研究の方法

イギリス北西部ウェールズ地方にあるメナイ海峡を対象に海洋観測と試料採集を実施した。この海峡は、ヨーロッパ最大級のムー

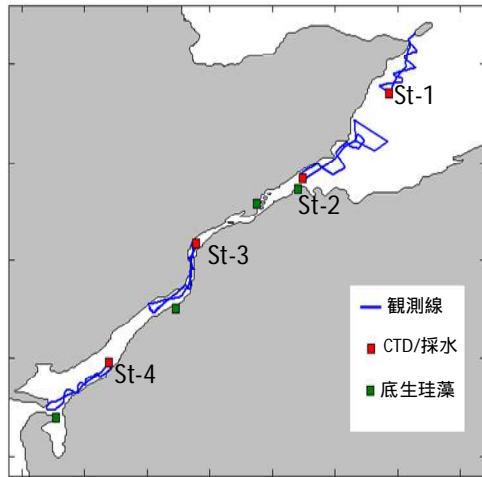


図1 各観測線の位置と底生珪藻の採取地点

ル貝の生産地として知られており、これを対象種として研究を進めた。2006年8月に情報収集と研究協力者であるウェールズ大学バンガー校海洋学部 John Simpson 教授との観測打ち合わせのために現地を訪問し、2007年5月16~23日および2008年7月24~28日に観測と採集を行った。2007年では海峡内に4つの観測線を設定し、それぞれの測線上を観測船で周回しながら、船底に設置した音響ドップラー流速計(ADCP)で1測線あたり連続13時間の流動観測を行った(図1)。また、各測線では1~1.5時間ごとにCTD観測およびバケツによる表層採水も行った。2008年では海峡内の憩流(流れが緩むこと)時刻が場所によってずれてゆくことを利用して1日2回の憩流時にCTD観測および表層と底層の2層の採水を行った。採集した海水からは、懸濁態有機物(POM)の採取とChl.aの抽出を行った。ムール貝は、2007年は海峡内の15点から、2008年は14点から採集し、閉殻筋を切離してCHNコーダ安定同位体比測定用質量分析計による安定同位体比分析へ供試した。底生珪藻は2008年は養殖場1か所を含む海峡内の干潟4か所から採集した(図1)。採取したPOMと底生珪藻からは、POC・PONおよびその ^{13}C ・ ^{15}N を測定した。Chl.aの分析について、2007年の試料は、海水200mlを濾過後、全球海洋フラックス合同研究計画(JGOFS)にて公定された手法に準拠して行い、2008年は、ジメチルホルムアミドを用いて色素を抽出し、Welschmeyer法にて濃度を測定した。

4. 研究成果

ADCP観測の結果(図2)、潮流はほぼ6時間おきに転流を迎え、海峡内の最大平均流速は北向き、南向きともに中央部で観測され、その速さは北流で約 0.8ms^{-1} 、南流で約 1.2ms^{-1} であった。海峡内の干満潮時刻は、海峡北部

から中央部にかけてはほとんど変わらないが、海峡南部では1時間早い。一方で、転流時刻は海峡内で大きく異なっていた。最も早く転流を迎えるのは海峡北口であり、干満潮とほぼ同時に転流を迎えていた。海峡北口から2~7kmの海域では干満潮の約2時間後に転流を迎えていた。北口から10km地点では、それよりも遅れて転流を迎えており、10km地点では干満潮から約3時間後であった。17km地点から海峡南口までの区間では、北口の転流から約5時間遅れて転流を迎えていた。南口付近では、17km地点と同時に転流を迎えるが、干満潮の時刻が1時間ほど早いため、干満潮の時刻とほぼ同期して転流が起こっていた。また、残差流は海峡北部で北向き、南部で南向きと流向が異なっており、中央部を境に流出していくように見受けられた。この流出分は、おそらく干潟域から補給されていると考えられる。図3はそれらの概況を模式的に示したものである。

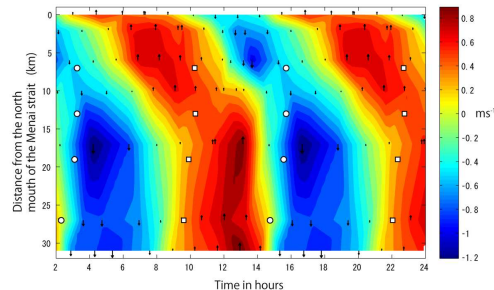


図2 メナイ海峡における潮流の時間変化。北口から31km地点が南口になり、流速の正は北向き、負は南向きの流れを表す。四角印は干潮を、円印は満潮を示す。

海峡内の水温は、5月に $12\sim 14^\circ\text{C}$ 、7月に $16\sim 18^\circ\text{C}$ の範囲で観測された。塩分は両月ともに $32.5\sim 33.8\text{psu}$ であった。5月の観測で、海峡中央部では海峡口付近よりも低い塩分を示し、河川からの淡水流入の影響が認められた。

海峡北部では、低塩分の水塊の流入と同時にChl.aが低下した。その後、塩分の回復と同期してChl.aも回復する傾向を示した。流動観測の結果と照らし合わせると、低塩分水塊は海峡内部由来であり、塩分の上昇に伴うChl.aの回復は、浮遊型植物プランクトンを中心とする外部生産の流入に相当すると考えられる。一方で、海峡南部では、外部水塊の流入に伴う塩分の上昇が見られたものの、それと同期したChl.a濃度の上昇は見られず、明確な外部生産の流入は認められなかった。海峡中央部の観測では、南流時に塩分の上昇と同期するChl.aの上昇が見られたが、その後の憩流時にChl.aが大きく低下した。塩分上昇と同期したChl.aの上昇は海峡北部同様に外部生産の流入に相当すると推察され、憩流時のChl.aの低下は、潮流の流向から付近

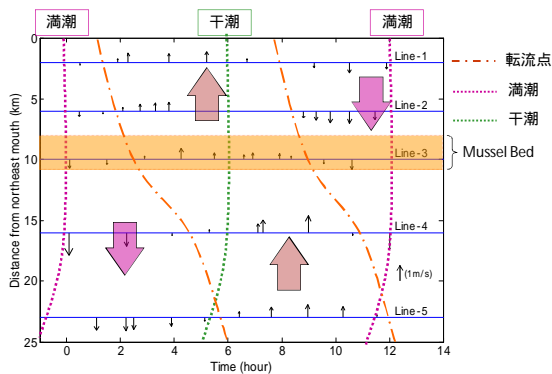


図3 ADCPの結果に基づき模式化したメナイ海峡の流動変化

のムール貝養殖場にて植物プランクトンが消費された水塊の流入に起因すると考えられる。

5月のPOC、PON、Chl.aの平均値は、海峡中央部の養殖場付近で最も高い値が観測され、海峡南部で最も低い値が観測された。一方、7月では海峡南部で高い濃度が観測された。このことは、メナイ海峡では季節によって卓越する一次生産機構が異なる可能性を示している。

夏季のPOMの安定同位体比は春季と比較して低い ^{13}C と ^{15}N を示した(図4)。低い ^{13}C は夏季の栄養塩の枯渇に伴い、植物プランクトンの光合成速度が低下したことに起因し、低い ^{15}N は、硝酸の枯渇に伴って動物プランクトンから排泄された低い ^{15}N を持つアンモニアを窒素源として利用しているためと考えられる。また、養殖場で採集した底生珪藻の同位体比は、他から採集されたものよりも高い ^{13}C と低い ^{15}N を示した。これは底生珪藻の活発な光合成とムール貝から排泄されるアンモニアの利用によるものが考えられる。

栄養段階毎の同位体濃縮率から推定したムール貝の餌の安定同位体比は、底生珪藻とPOMのほぼ中間の値であった(図4)。これはメナイ海峡のムール貝は底生珪藻とPOMを主要な餌資源として利用していることを意味している。

しかし、今回採集したPOMには懸濁された底生珪藻も含まれているはずであり、このこ

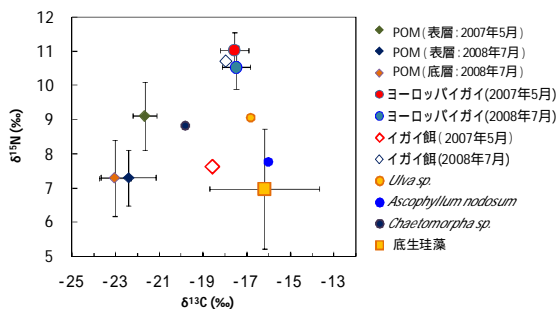


図4 メナイ海峡におけるムール貝とその餌、懸濁態有機物(POM)、底生珪藻、底生大型藻類の炭素・窒素同位体比。

とはメナイ海峡におけるPOMを構成する成分と、ムール貝の餌資源が一致せず、ムール貝がPOMの一部成分のみを同化していることを表している。メナイ海峡のPOMの大半はデトライタスで占められることから、ムール貝がPOMを摂食しても、その中のデトライタスは餌資源として利用されていないものと推察された。ムール貝の餌として推定された同位体比が、POMに含まれる底生珪藻と浮遊型植物プランクトンの安定同位体比と一致すると仮定し、植物プランクトンバイオマス比(RPB:式1)を用いてPOMの同位体比から海峡各部のデトライタスの炭素同位体比を式2から計算した結果、 $-23 \pm 0.1\text{‰}$ と各測点で似通った値となった。式(2)におけるRは植物プランクトンバイオマス比である。

$$\text{RPB} = \frac{\gamma[\text{Chl.a}]}{[\text{POC}]} \times 100 (\%) \quad (\text{式1})$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{detritus}} = \frac{(\delta^{13}\text{C}_{\text{mussel}} - 1) \times R - \delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}}{(1 - R)} \quad (\text{式2})$$

デトライタスが難分解性であること、海峡内の水の滞留時間が数日であることから、デトライタスの同位体比は海峡内では変化しにくいと考えられ、上記の推察は妥当であると思われる。底生珪藻の同位体比と既往研究により得られた浮遊性植物プランクトンの同位体比を用い、ムール貝の餌の同位体比から各採集点の植物プランクトン群集の構成を推定すると、群集に対する底生珪藻の寄与率が海峡中央部で増加していることが示された(図5)。

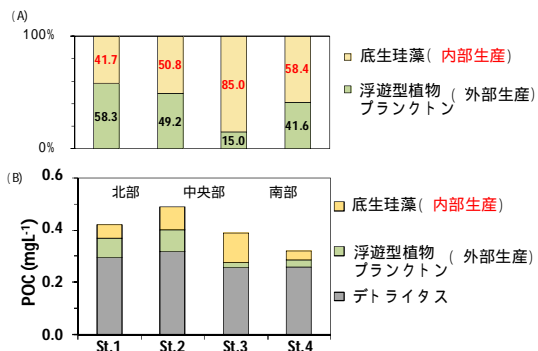


図5 メナイ海峡における浮遊型植物プランクトン(外部生産)と底生珪藻(内部生産)の植物プランクトン群集に占める割合(A)とPOCに占めるバイオマス(B)。

以上より、本研究からメナイ海峡におけるムール貝の餌料は、既往研究において想定されている海峡外部からの浮遊性植物プランクトンの移流に依存しているというよりも、干潟域からもたらされる底生珪藻を主とする海峡内部の生産が、餌料として大きな役割を果たすことが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Akihide Kasai, Tatsuo Yamada and Hiroshi Takeda (2007) Flow structure and hypoxia in Hiuchi-Nada, Seto Inland Sea, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71, 210-217. 査読有

笠井亮秀・杉本亮・赤嶺里美(2007)内湾域における中層クロロフィル極大の形成機構. 海と空, 82, 53-60. 査読有

[学会発表](計4件)

森岡裕詞・木村伸吾・笠井亮秀 英国メナイ海峡におけるムール貝(*Mytilus edulis*)の餌料環境の変動, 2008年度水産海洋学会研究発表大会, 2008年11月11~13日, 東京大学農学部

木村伸吾・森岡裕詞・笠井亮秀 英国メナイ海峡におけるヨーロッパイガイの生産機構の解明 -1. 流動場からの考察-, 2008年度水産学会春季大会, 2008年3月27~31日, 東海大学海洋学部

森岡裕詞・木村伸吾・笠井亮秀 英国メナイ海峡におけるヨーロッパイガイの生産機構の解明 -2. 安定同位体比による餌料環境の解析-, 2008年度水産学会春季大会, 2008年3月27~31日, 東海大学海洋学部

笠井亮秀 安定同位体比から見た河口域の二枚貝による物質利用, 2007年度水産学会春季大会シンポジウム「森、里、川と沿岸域の生物生産」, 2007年3月31日, 東京海洋大学海洋科学部

6. 研究組織

(1)研究代表者

木村 伸吾 (KIMURA SHINGO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 90202043

(2)研究分担者

笠井 亮秀 (KASAI AKIHIDE)
京都大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号: 80263127

(3)研究協力者

森岡 裕詞 (MORIOKA HIROSHI)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程学生

シンプソン ジョン (SIMPSON JOHN)
英国バンガー大学・海洋科学部・教授

ウィルス フィル (WILES PHIL)
英国バンガー大学・海洋科学部・博士研究員

ジョーンズ グウイン (JONES GWYNNE)
英国バンガー大学・海洋科学部・技術専門員

パウエル ベン (POWELL BEN)
英国バンガー大学・海洋科学部・技術専門員