

課題名 4D-1202 国際河川メコン川のダム開発と環境保全-ダム貯水池の生態系サービスの評価

課題代表者名 福島 路生（独立行政法人国立環境研究所 生物生態系環境研究センター 生態系機能評価研究室）

研究実施期間 平成24～26年度

累計予算額 61,656千円（うち26年度18,717千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード メコン川、ダム開発、生態系サービス、物質循環、淡水魚類

#### 研究体制

- (1)ダム貯水池の物質循環（独立行政法人国立環境研究所）
- (2)メコン淡水魚の基礎生物学的研究（独立行政法人国際農林水産業研究センター）
- (3)メコン淡水魚の回遊生態解明（独立行政法人国立環境研究所）
- (4)ダム建設の生態学的コスト-ベネフィット解析（独立行政法人国立環境研究所）

#### 研究概要

##### 1. はじめに（研究背景等）

メコン川には南米アマゾン川に次いで世界で2番目に多い800種以上の淡水魚類が生息し、世界最大の漁業生産（約260万トン/年）が流域の人口約7千万の人々の食料と生計を支えている。しかし、流域では近年の著しい経済発展に伴い電力需要が急増し、発電用ダムの開発計画が目覚ましい勢いにある。メコン川本流のラオス、タイ、カンボジア領土内に11のダムの建設計画があり、支流を含めると10年以内に数10を超える新たなダム（と広大な貯水池）がつくられることになる。ダム建設は在来の淡水魚、特に回遊魚の絶滅を招くのみならず、養殖や漁業を目的に貯水池に放流される外来魚（ナイルティラピア、アフリカヒレナマズ等）の天然水域における定着により、在来魚の遺伝的多様性の低下を引き起こす恐れもある。漁業生産の低下、漁獲物の小型化、また人口増加に伴う乱獲の兆候はすでに表れており、メコン地域の生物多様性と食糧安全保障は急速に脅かされつつある。しかし一方、広大で水深の浅い、適度に富栄養化したメコン地域のダム貯水池は魚類の養殖にも適している。流域諸国では、貯水池において新たな水産業を確立し、それによる漁業生産、すなわち生態系サービスがダムにより失われる回遊魚を対象とした伝統的漁業がもたらす生態系サービスを埋め合わせる、さらにはそれを上回ることを期待している。メコン川流域のダム開発が計画通りに進行した場合、この川の自然の恵み、いわゆる生態系サービスの行方がどうなるか、それを科学的に理解し解明するために本研究プロジェクトを立ち上げた。



図1. 本プロジェクトの概要。

## 2. 研究開発目的

本研究課題は国際河川メコン川で急速に進むダム開発による生態系への影響、特に淡水魚類の生物多様性と生態系サービスへの影響を予測し、リスクの少ない開発にメコン地域を導くことを最終的な目的としている。具体的には、ダム貯水池生態系の生物生産、物質循環、主要な在来淡水魚の基礎生物学的特性を解明し、ダム建設前の回遊魚の生態、生活史の理解を深めること、またダム開発で失われる生態系サービスを評価することを目的とした。各サブテーマの個別の目的は以下に述べるとおりである。リンの底泥への蓄積と微生物による無機化の定量的評価、水域の物質循環の起点となる植物プランクトンによる一次生産速度の推定とその制限要因の特定、アオコの発生状況と発生要因の特定など、メコン流域におけるダム貯水池生態系の陸水学的特性を把握すること(サブテーマ1)。メコンの淡水魚類の年齢査定の手法を確立するとともに、主要な漁業対象魚種についての生態学的知見(成長、繁殖、食性など)を充実させること。また他のサブテーマにその情報を提供すること(サブテーマ2)。メコンの重要な水産有用魚種について、野生魚を対象にその回遊生態を耳石の微量元素分析から明らかにすること。また既存の、あるいは計画中のダム建設による回遊経路分断の影響を評価・予測すること(サブテーマ3)。ダム建設のコスト・ベネフィット、すなわち淡水魚類の種多様性と現存量のダム建設後の増減についてコンピューターシミュレーションにより評価すること(サブテーマ4)。

## 3. 研究開発の方法

### (1)ダム貯水池の物質循環

メコン川流域の計9つの水界(ダム貯水池と自然湖沼)を対象とした。これらの水界に定点観測地点を定め、2012年以降、3-4か月毎のモニタリング調査および試料の採取を行った。

本調査では水温、pH、透明度、光環境などの現場測定項目に加え、湖水、底泥試料を採取し、水中の窒素、リンなどの栄養塩含量、有機物含量、クロロフィルa量、底泥中のリン、鉄含量、微生物活性などを測定した。植

物プランクトンについては、優占する藍藻類をDNAシーケンス法によって解析した。また、*Microcystis aeruginosa* に特異的なプライマーおよび全ての藍藻類に共通のプライマーを開発し、定量PCR法により湖水中の濃度を測定した。一次生産速度を $^{13}\text{C}$ 炭素安定同位体法により自然条件下で測定した。日中、短時間(1-2時間)の現場観測によって得られた一次生産速度から年間の一次生産量を推定した。食物網構造の解析のために、各水界から淡水魚類、貝類(二枚貝と巻貝)、植物プランクトン、陸上植物の採集を行った。各水界より複数の魚類と貝類を採集し、現地で筋肉組織をエタノール保存(80%)、同位体質量分析計により炭素と窒素の安定同位体比( $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ と表記する)を求めた。

## (2)メコン淡水魚の基礎生物学的研究

メコン川流域で特に重要な水産資源である2種の淡水魚(ギギ科 *Hemibagrus nemurus*とコイ科 *Labeo chrysophekadion*の2種)、さらにダム貯水池において漁獲量の多いニシン科魚類 *Clupeichthys aesarnensis*について、年齢査定的手法を確立し、成長モデルを構築、繁殖生態を明らかにした。年齢査定には前者2種については年輪の視認性の高い鰭棘を利用、また後者については耳石を利用し、それぞれ年輪また日輪を判読した。成長モデルにはvon BertalanffyあるいはGompertzモデルを採用した。採取した魚類の生殖腺熟度指数(GSI)を測定することで繁殖のタイミング(季節)を推定した。サブテーマ3で回遊生態を解明するために対象としたコイ科魚類 *Henicorhynchus siamensis*について、その食性を消化管内容物の顕微鏡観察により明らかにした。ダム貯水池に種苗法流された *H. nemurus*と *L. chrysophekadion*の自然繁殖の状況を把握するため、調査対象の水界のひとつシリントーン貯水池とその流出河川が合流するメコン川支流ムン川において定期的な魚類調査を実施し、稚魚の採集を試みた。

## (3)メコン淡水魚の回遊生態解明

メコン川流域の6地域(タイ北部メコン本流、ソクラム川、ガム川、ムン川、トンレサップ湖、メコン下流本流)から採取した計200尾のコイ科魚類 *Henicorhynchus siamensis*および *H. lobatus*について耳石を摘出し、実験室にて微量元素分析を行い、本種の回遊生態について明らかにし、既存のダムによる回遊行動への影響を検出した。またメコン下流本流の調査地点は、現在建設が進められるドンサホンダムの上下流に位置しており、ダムサイトを通って *H. lobatus*が回遊しているか否かについて検証することで、将来このダムが本種へ及ぼす影響を予測した。耳石サンプルはレーザーアブレーションICP質量分析計を用い元素分析を行い、魚類採集地点から採取した河川水についても同様にICP質量分析計により元素濃度を定量した。

過去から現在、さらに10年後までのメコン流域のダム建設による分断状況をGISにより解析した。高解像度の標高データから開発したメコン川小流域ポリゴンデータに、メコン川委員会が作成したダムデータベースを空間結合した。このデータベースには登録された計135基のうち35基が既存ダム、残り100基が計画中のダムである。35基の既存ダムがこれまでどのように流域を分断し、河川の連続性を喪失させたか、さらに計画中のダムが今後どのようにその状況を悪化させるかについて概観し、回遊魚への影響について考察した。

## (4)ダム建設の生態学的コスト-ベネフィット解析

河川を複数の生態系に分けて扱うメタ生態系概念を用いて、河川生態系の物質循環を再現する数理モデルを開発した。個々の生態系は栄養塩、デトリタス(これには動物の糞、リター(植物の遺骸)、動物の遺骸が含まれる)、動物プランクトン、植物プランクトン、水生植物、水生昆虫などの無脊椎動物、魚類で構成される。本モデルでは、魚食、草食、腐肉食、リター食、動物プランクトン食、植物プランクトン食、無脊椎動物食の他、複数のタイプの餌を利用する雑食も含めて12タイプの食性を導入した。これらの食性タイプには、初期状態でそれぞれ30種ずつ割り当てた。魚種間の捕食-被食関係はニッチモデルにより決定した。生態系内の物質循環はHolling III型の機能反応を用いて記述した。

この仮想的な河川生態系のちょうど中央部、つまり直線上に10個並んだサブ生態系(パッチ)の5番目と6番目の間にダムを建設するとした。本研究では、産卵に伴う回遊を阻害された魚類の死亡率に影響がない場合と、回遊を阻害された魚類が絶滅する場合の2つのケースに分けて120回のシミュレーションを行った。シミュレーション開始後、モデル内の時間で15年後にダムを建設した。その後、同じくモデル時間で5年後の魚類の種多様性とバイオマスの変化について、ダムを建設しない場合と比較した(Mann-WhitneyのU検定)。

## 4. 結果及び考察

### (1)ダム貯水池の物質循環

ダム貯水池の底泥中の全リン含量は、沿岸よりも湖心のほうで高い傾向にあり、湖水の全リンとは逆の傾向が

見られた。また湖岸底泥で有機態リンが卓越するが、湖心底泥ではリンの全量は増えるものの無機態リンの比率が高くなる。つまり、湖岸の有機態リンが微生物により無機化され、次第に湖心に移動し、そこで無機態リンとして堆積している。一方、自然湖であるトンレサップでは大きく異なり、湖心より湖岸の底泥においてリン含量が平均的に高い値を示した。また、貯水池の湖岸-湖心間で認められた有機・無機の形態の違いも、トンレサップでは見られなかった。このようなトンレサップ湖とダム貯水池との間のリンの挙動に関する違いは、周辺に人口密集地が多いトンレサップ湖において農地や生活排水由来の無機態リンが直接湖岸から供給され易いこと、その供給量がタイ、ラオスの山間部にあるダム貯水池と比べはるかに大きいこと、トンレサップの水深が全体的に浅く湖水が攪拌され一様になり易いことが原因であろう。

アオコの原因藻類となるマイクロキスティスはほぼすべての水界から検出された。このうちトンレサップ湖では目視によりアオコと認識できる濃度を超える本種が確認された。そしてマイクロキスティスの増殖速度は全リン濃度の増加にともない指数関数的に増大することが示された。

一方、生物生産の基礎となる一次生産速度も全リン濃度が律速となったが、懸濁物質の多いトンレサップ湖ではこの関係からはずれ著しく一次生産速度は低い値が見積られた。冷温帯の湖沼も含め、多くの水界では一次生産量と漁獲量とは正の相関関係を持つが、トンレサップでは低い一次生産にもかかわらず、きわめて高い漁獲量が記録されている。これは本湖が周囲の氾濫原、またメコン川本流とのつながりが強く、これらトンレサップ外部の環境から有機物や魚類が直接供給されている、いわゆる他生性の生態系であることを示唆する。このことは食物網構造の解明のために調べた炭素窒素安定同位体比の結果からも裏付けされた。

以上、ダム貯水池と自然湖沼トンレサップでは栄養塩循環、アオコの発生状況、一次生産の制限要因、また漁業生産のメカニズムなど、さまざまな面で違いが見られた。なお、ダム貯水池の中に、自然湖由来の灌漑用貯水池が2つ含まれていたが、これらの食物網構造などはトンレサップに非常に近い特徴を示した。

## (2) メコン淡水魚の基礎生物学的研究

*Hemibagrus nemurus*については、成長パターンがvon Bertalanffyモデルで近似され、オスの方がメスより速く大型化することが示された。本種の繁殖年齢は2歳以降(繁殖サイズ全長200 mm以上)、繁殖期は雨季(5-10月)と推定された。また、*Labeo chrysophekadion*についても成長パターンは同じモデルで近似されたが、雌雄間の成長差は認められなかった。本種の繁殖年齢は3-4歳(繁殖サイズ全長400 mm以上)、繁殖期は*H. nemurus*と同様に雨季と考えられた。

シリントーン貯水池および下流のメコン川支流ムン川でこれら2種の稚魚・未成魚の採集を試みたところ、ダム貯水池では両種ともまったく採集されなかったが、ムン川本流からは不定期ながら両種の稚魚・未成魚(1歳未満)が採集された。このことから、シリントーン貯水池とその流入河川では両種の繁殖・再生産は行われていないと推察された。*H. nemurus*および*L. chrysophekadion*の2種は多くのダム貯水池で好んで種苗放流される魚種であるが、シリントーン貯水池以外にも一般に貧栄養、かつ流入河川の流程が短い水界では自然再生産が行われず、きわめて非効率な増殖事業がメコン流域で広く行われている疑念が持たれる。これからのメコン川での水産資源の保全・管理、またそれによる持続的な生態系サービスの供給を保証する上で、重要な知見が得られた。

一方、シリントーン貯水池での最も重要な漁業対象種であるニシン科 *Clupeichthys aesarnensis* の耳石日周輪の観察から、本種については、寿命が最長8ヶ月、繁殖サイズは体長35-40 mmと推定され、ほぼ周年繁殖していることが分かった。

## (3) メコン淡水魚の回遊生態解明

定量した元素のうち、ストロンチウム(Sr)に関して、最も河川水-耳石表面との間での相関が高く、本元素が回遊経路推定の最も有効なマーカーであることが示された。河川水中のMg, Mn, Zn, Sr, Baは6つの地域間で有意な違いがあり、これら5元素を用いた線形判別関数により、メコン下流で100%、ムン川で98%、ガム川で90%など非常に高い正答率(判別能)が得られた。耳石表面の元素ではMg, Mn, Sr, Baの4元素において地域間で違いがあり、同じく線形判別関数はガム川の81%、ムン川71%、トンレサップ湖64%という正答率が得られた。

*Henicorhynchus siamensis*の耳石の元素プロファイルからは次の3つの知見が得られた。

- 1) 各地域内では、個体ごとにプロファイルの形状が似通っており、これらの個体が同じ場所で誕生し、群れをなして同じ経路を回遊すること;
- 2) 6地域間では、回遊の経路と規模が大きく異なることから、複数の個体群が存在し、異なる回遊を行うこと;
- 3) メコン支流ガム川の魚の元素プロファイルは、元素濃度の変化が生涯に渡ってほとんど認められず、他の地域のプロファイルとも重複しないことから、この川に5基ある灌漑ダムによって本種の回遊が著しく制限されていること、またメコン本流との間を行き来しないこと。

ドンサホンダム建設予定地の上下流200km区間から採取した*H. lobatus*については、同じく耳石プロファイルの

特徴からすべての個体が同じ場所で誕生(孵化)し、その後、ダム建設予定地を通過して上流(または下流)に分散していることが示唆された。このことからドンサホンダムは完成後に本種の回遊経路を遮断し、その個体群に甚大な影響を及ぼすことが予想された。

メコン川のダム開発は1960年代から開始されたが、近年、この地域の政情が安定したことにより急速に経済が発展し、電力需要が急増している。現在のダムによる分断流域は、メコン川支流に90年代に建設されたタイのパクムンダムによるものが最も規模の大きなものである。しかし今後メコン本流ダム開発が計画通りに進展し、最下流に計画されたサンポーダムが完成すると、メコン流域の大部分(>80%)がダムによって分断され、海と川との間を回遊する魚類(*Pangasius krempfi*など)には致命的な打撃となる。

#### (4)ダム建設の生態学的コスト-ベネフィット解析

本研究のモデルは、実際のメコン川で見られる上流から下流域に向かって種多様度が増加するという特徴、また上流へ移動して産卵する魚種が多いという特徴を再現することができた。

ダム建設後、魚種の多様性が有意に減少することが明らかになった。多様性が減少するのはダムに近接した生態系だけでなく、それよりも上流の広い範囲の生態系に及ぶことが分かった。回遊魚と非回遊魚に分けて同じ解析を行うと、予想に反して非回遊魚において特にダム上流での種多様性の低下が著しいことが示された。

次にダム建設前後の魚類のバイオマスの変化を調べた結果、ダムによって移動を阻害された回遊魚が即絶滅する条件でも、また絶滅しない条件でも、ダムを建設するとダムに近接した生態系において魚類バイオマスが増加する傾向が認められた。バイオマスが増加する要因としては、回遊魚が生態系間を回遊することが一種のかく乱要因として作用し、すでにその生態系にいた非回遊魚の増加、増殖を抑制するためであろうと考えられた。しかし、ダム直上の生態系は通常ダム貯水池という流水環境から止水環境という極めて異質なものと変化することになる。ここでの魚類が環境変化に適応できず、すべて絶滅するという仮定を設けると、メコン全域の魚類バイオマスは5-6%低下することが示された。

続いて、魚類の食性タイプ別のダムの影響についてであるが、魚類の種数の変化は食性に関係なく一様にダム建設後減少した。しかし、バイオマスについては、植物やリターを餌とする魚類については顕著な増加(30%程度)が認められる一方、動物遺骸、植物プランクトン、無脊椎動物と動物プランクトンなどを餌とする魚類の場合では10-30%程度バイオマスは減少した。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1)科学的意義

メコン川流域のタイ、ラオス、カンボジアの3か国にわたって統一された研究手法によりダム貯水池の生態系サービスを科学的に評価した研究は、世界的にも例を見ない。特に、これまで熱帯湖沼やダム貯水池の一次生産の測定例は極めて少ない。さらに、世界最大のメコンの漁業生産が、河川や湖沼の藻類による一次生産によってのみ支えられているのか、それとも陸域や氾濫原からの有機物供給が寄与しているのかという生態学的に興味深い、また資源管理上も重要なテーマに対してもいくつか重要な知見が得られた。熱帯湖沼、ダム貯水池でのアオコの発生状況についても、これまでの知見は決して多くなく、将来のダム開発で造られる数多くのダム貯水池におけるアオコ発生リスクを予測するうえでの貴重な基礎データが得られた。

水産資源として重要な淡水魚3種をとりあげ、成長、繁殖、食性について定量的な解析を行い、資源管理また保全を実施するうえで有用な情報が数多く集められた。特に、ダム貯水池で盛んに種苗放流されている淡水魚が、魚種によってはほとんど定着しない、再生産を行わないことが示されたことは、貯水池から得られる生態系サービスを評価するうえで貴重な成果である。

耳石の微量元素分析という新しい分析手法を用い、広域スケールでの魚類回遊を特徴づけられたこと、また既にダムの影響が回遊経路の縮小という形で表れていることを明らかにできたこと、さらに現在計画中の大型ダムの潜在的な影響に対し警鐘を鳴らすことができたことは大きな意義を持つ。

現地調査だけでは限界があり、さらに広い空間スケール、また長い時間スケールでのダム開発の影響を評価・予測するためのコンピューターシミュレーションは本研究でも、我々も予測しなかった結果を提示した。メコンのような大河川流域を対象にした研究におけるモデリングとシミュレーションの重要性が示された。

### (2)環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>  
特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

メコン流域国、あるいはそれらに援助を行う我が国にとって、本研究で得られた研究成果は今後、大いに活用されることが期待できる。特に、新たに建造されるダムと貯水池において、アオコ発生リスク、回遊魚への影響を回避あるいは最小限にとどめる適正なダムサイトの選定方法、あるいは水質を良好に保ちつつ漁業生産、あるいは種苗放流の効果・効率を最大化するための魚種の選定など具体的方策は、本研究から得られた成果を論文化し、広く発表、普及しステークホルダーとの間で情報が共有されれば、具体的な提言にもつながることになり、次第に行政にも採用され活用されると見込んでいる。メコン川流域開発ではこれまでも先進的な戦略的環境影響アセスメントが行われているが(メコン川委員会2010)、本研究の成果を活用した更なる戦略アセスも検討されるべきであろう。

## 6. 研究成果の主な発表状況(別添.報告書作成要領参照)

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) M. FUKUSHIMA, T. JUTAGATE, C. GRUDPAN, P. PHOMIKONG and S. NOHARA: PLOS ONE, 9, 8, DOI: e103722 (2014)  
“Potential effects of hydroelectric dam development in the Mekong River Basin on the Migration of Siamese mud carp (*Henicorhynchus siamensis* and *H. lobatus*) elucidated by otolith microchemistry”
- 2) P. PHOMIKONG, M. FUKUSHIMA, B. SRICHAROENDHAM, S. NOHARA and T. JUTAGATE T: Riv. Res. App., DOI: 10.1002/rra.2816. (2014)  
“Diversity and community structure of fishes in the regulated versus unregulated tributaries of the Mekong River”

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) E. BARAN, B. KANG, N. CHUM, M. FUKUSHIMA, T. JUTAGATE, T. HAND, and K. HORTLE: Nakano S., T. Yahara, T. Nakashizuka editors. *In: Biodiversity Observation Network in Asia-Pacific Region: Towards Further Development of Monitoring Activities*, Springer, pp. 149-164 (2012)  
“Fish biodiversity research in the Mekong Basin.”
- 2) M. FUKUSHIMA: Nakano S., T. Yahara, T. Nakashizuka editors. *In: Biodiversity Observation Network in Asia-Pacific Region: Towards Further Development of Monitoring Activities*, Springer, pp. 329-345 (2012)  
“Spatially-explicit models for freshwater fishes for their conservation planning.”

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) 福島路生, 野原精一, T. Jutagate, C. Grudpan: 第45回日本魚類学会 (2012)  
「メコン河におけるSiamese mud carpの回遊生態解明」
- 2) 福島路生: 第2回流域圏学会年会 (2012)  
「北海道とメコン川流域におけるダム開発と淡水魚類」
- 3) 福島路生: 第13回北海道淡水魚保護フォーラム (2013)  
「北海道とメコン川におけるダム開発と淡水魚の保全」
- 4) 福島路生: 北海道魚道研究会 魚道セミナー2013 in 十勝 (2013)  
「ダムや堰などがもたらす淡水魚類の多様性低下」
- 5) 広木幹也、富岡典子、福島路生、村田智吉、Tuanthong Jutagate、今井章雄、小松一弘: 第60回日本生態学会 (2013)  
「メコン川流域湖沼、ダム貯水池の一次生産速度」
- 6) 富岡典子、福島路生、広木幹也、村田智吉、今井章雄、小松一弘、Tuanthong Jutagate: 第47回日本水環境学会 (2013)  
「メコン川流域湖沼、ダム貯水池の藍藻の挙動について」
- 7) 吉田勝彦: 個体群生態学会第29回大会 (2013)  
「川のメタ生態系モデル -国際河川メコン川のダム開発と環境保全-」
- 8) 福島路生, 広木幹也, Tuantong Jutagate: 第61回日本生態学会 (2014)  
「ダム湖は湖か? 魚類の食物網解析による検証」

- 9) 広木幹也, 村田智吉, 富岡典子, 福島路生, Tuantong Jutagate, 今井章雄, 小松一弘: 第61回日本生態学会(2014)  
「メコン川流域ダム貯水池における底泥の無機化、分解機能」
- 10) 村田智吉, 広木幹也, 富岡典子, 野原精一, 吉田勝彦, 福島路生, 今井章雄, Tuantong Jutagate: 日本ペドロロジー学会2014年度大会(2014)  
「メコン川流域ダム貯水池における湖岸, 湖底のリンの蓄積形態」
- 11) M. FUKUSHIMA: Seminar convened by the Department of Fisheries, Bangkok, Thailand (2014)  
“Possible effects of dam development on the fishes in the Mekong River.”
- 12) Murata T., Hiroki M., Tomioka N., Nohara S., Yoshida K., Fukushima M., Imai A., Jutagate T., Srean P., Praxaysombath B.: 20th World Congress of Soil Science (2014) “Sedimentation Processes of Phosphorus in the Catena in Dam Reservoirs in the Mekong River Basin.”
- 13) 広木幹也, 富岡典子, 福島路生, 村田智吉, Tuanthong Jutagate, 今井章雄, 小松一弘: 日本陸水学会第79回大会(2014)  
「メコン川流域ダム貯水池における一次生産」
- 14) 吉田勝彦, 広木幹也, 富岡典子, 村田智吉, 福島路生: 個体群生態学会第30回大会 (2014)  
「ダムによる魚の移動阻害の影響—メタ生態系モデルを用いたメコン川ダム開発の影響評価—」
- 15) 富岡典子, 福島路生, 広木幹也, 村田智吉, 今井章雄, 小松一弘, Tuantong Jutagate: 第30回全国環境研究所交流シンポジウム(2015)  
「メコン川流域のダム貯水池、自然湖沼の水質観測と生態系評価」
- 16) 広木幹也, 富岡典子, 福島路生, 村田智吉, Tuanthong Jutagate, 今井章雄, 小松一弘: 第62回日本生態学会大会(2015)  
「メコン川流域ダム貯水池における生産性とその要因」
- 17) 福島路生, 広木幹也, 富岡典子, 村田智吉, Tuanthong Jutagate: 第62回日本生態学会大会(2015)  
「メコン川流域のダム貯水池生態系における食物網構造」
- 18) 富岡典子, 福島路生, 広木幹也, 村田智吉, 今井章雄, 小松一弘: 第49回日本水環境学会年会(2015)  
「メコン川流域ダム貯水池の *M. aeruginosa* の挙動と栄養塩の関係について」

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 福島 路生

アラスカ大学 School of Fisheries and Ocean Sciences、Ph.D.、現在、国立環境研究所 主任研究員

研究分担者

- 1) 広木 幹也  
東京大学卒業、農学博士、国立環境研究所 主任研究員
- 2) 村田 智吉  
東京農工大学連合大学院連合農学研究科修了、農学博士、国立環境研究所 主任研究員
- 3) 富岡 典子  
千葉大学園芸学部農芸化学科卒業、農学博士、国立環境研究所 主任研究員
- 4) 森岡 伸介  
東京水産大学資源育成学科修了、水産学博士、国際農林水産業研究センター 主任研究員
- 5) 吉田 勝彦  
東京大学大学院理学系研究科修了、理学博士、国立環境研究所 主任研究員

## 4D-1202 国際河川メコン川のダム開発と環境保全-ダム貯水池の生態系サービスの評価

## (1) ダム貯水池の物質循環

独立行政法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター	生態系機能評価研究室	広木 幹也
地域環境研究センター		村田 智吉
		富岡 典子

平成24～26年度累計予算額：24,451千円

(うち、平成26年度予算額：5,485千円)

予算額は、間接経費を含む。

## [要旨]

湖沼では周囲の陸域から様々な物質が流入し、湖水、底泥間を循環しつつ生物生産を支えている。水産資源などの生態系サービスの提供、アオコ発生などの生態リスクを評価もしくは予測し、適切に管理していくには、湖沼生態系における物質循環、特に栄養塩の循環と生物生産の関係を明らかにしていくことが重要である。本サブテーマでは、陸域生態系で特に重要な栄養因子と考えられているリンの湖水-底泥系での形態変化と蓄積機構、湖水中のリン濃度と藻類一次生産および有害藻類発生の関係を明らかにし、さらに、高次の魚類生産に至る食物網構造について貯水池と自然湖沼の違いを明らかにすることを目的としてメコン川流域の9カ所のダム貯水池および自然湖沼において野外調査を行い、以下の結果を得た。

リンは湖岸部の底泥では主として有機態で存在するが、富栄養化が進むにつれて湖心部底泥に無機態で蓄積していく。底泥中の鉄酸化物量がリンの蓄積に関わっている。湖水中のリン濃度が高まると藍藻類、特に*Microcystis* の増加をもたらす。全リン濃度が $0.3 \text{ mgL}^{-1}$ を超えるとアオコの発生のリスクが増す。湖水中の全リン濃度の増加は湖水中の藻類の一次生産を高め、漁獲量の増加をもたらす。一方、ダム貯水池では水界内部の藻類による一次生産（自生性の有機物）が淡水魚など高次の生物生産を主に支えているが、自然湖沼では周囲の氾濫原や沿岸帯と湖内部との間の物質循環が活発に行われるため、陸域由来（他生性）の有機物が漁業生産に大きく寄与することが示された。

## [キーワード]

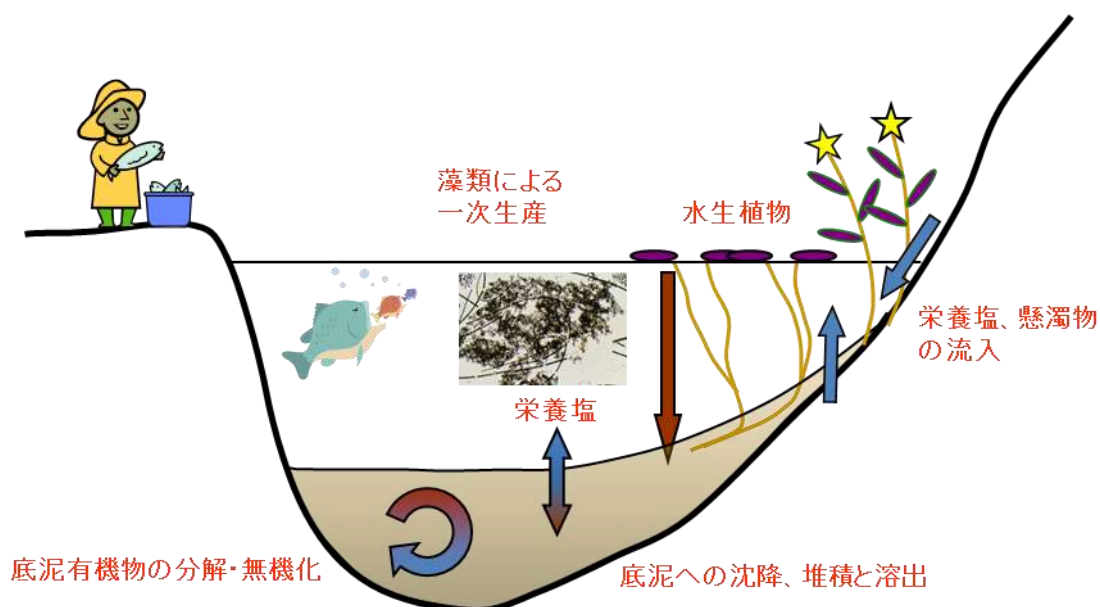
リン、アオコ、一次生産、生態系サービス、食物網

## 1. はじめに

湖沼生態系では、湖沼を取り巻く陸域から流入河川などを通じて土砂や生物遺体、栄養塩など様々な物質が流入し、湖内部で生物に直接利用されたり、あるいは沈殿、分解、溶出回帰するなど様々な物理、化学、生物的プロセスを経た後に間接的に食物網に取り込まれたりといった物質循環が存在する（図(1)-1）。



特に窒素、リンなどの栄養塩類は循環する過程で生態系の一次生産を支え、複雑な食物網を経て高次の生物生産を支えている。漁業資源などの生態系サービスは、このような物質循環の過程で生み出され、その一部を我々人間が自然の恵みとして享受していると言える。しかし一方で、湖沼の栄養塩類濃度の過剰な上昇をもたらす富栄養化は、有害藻類の異常増殖、いわゆるアオコの発生を引き起こし、生態リスクともなり得る。そのため、これら生態系サービスおよびリスクを正しく評価し、予測し、適切に管理していくには、湖沼生態系における物質循環、特に栄養塩循環と生物生産の関係を明らかにしていくことが重要である。しかしながら、これまで熱帯地域で増え続けるダム貯水池における物質循環に関する研究事例は限られている。そこで本サブテーマでは、メコン川流域のダム貯水池および自然湖沼において定期的なモニタリング調査を行い、陸域生態系で特に重要な栄養因子と考えられるリンの湖水-底泥系での形態変化と蓄積機構、湖水中のリン濃度と藻類一次生産および有害藻類との関係、さらに、高次の魚類生産に至る食物網構造について明らかにすることとした。



図(1)-1. 湖沼生態系における物質循環

## 2. 研究開発目的

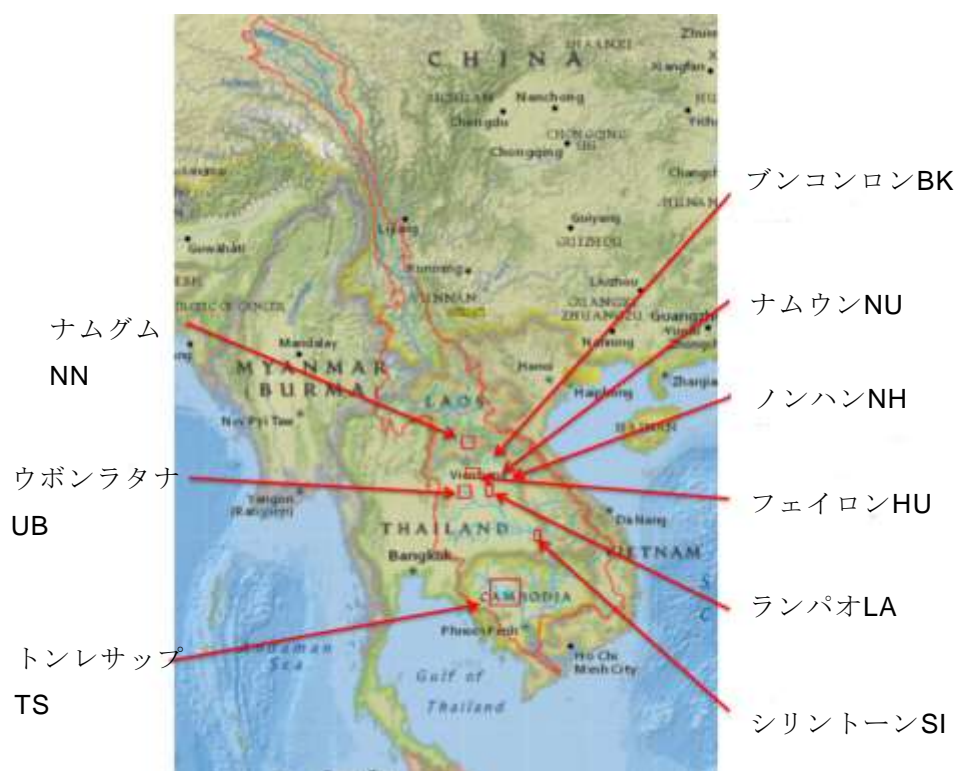
メコン川流域のダム貯水池から期待される生態系サービス（漁業資源）また反対に回避すべき生態リスクを評価するため、既存のダム貯水池および自然湖沼におけるモニタリング調査を基に、1)湖水中のリン濃度に影響する底泥の機能を明らかにする、2)湖水中のリン濃度と一次生産、有害藻類濃度、また漁獲量との関係を明らかにする、そして3)漁業生産の基礎となる炭素源の由来、また食物網構造についてダム貯水池と自然湖沼とを比較し、貯水池での生態系サービスの持続性を評価することを目的とした。

### 3. 研究開発方法

タイの7貯水池（シリントーン、ランパオ、ウボンラタナ、フェイロン、ブンコンロン、ナムウン、ノンハン）、ラオスのナムグム貯水池およびカンボジアのトンレサップ湖の計9つの水界において調査を行った（図(1)-2）。トンレサップ湖は東南アジア最大の自然湖沼、ブンコンロンとナムウンは元来、自然湖沼であったが流出部に堰を設け現在は貯水池として利用されている。他の6水界は1960～70年代にメコン川の支流に建設されたダムにより新たに創出されたダム貯水池である。

表(1)-1. メコン流域貯水池、湖沼の概要

名称	略号	国	建設年	目的	面積 (km <sup>2</sup> )	平均水深 (m)	最深部 (m)
ランパオ	(LA)	タイ	1968	灌漑	230	6.6	11.6
シリントーン	(SI)	タイ	1971	多目的	288	6.8	15.8
ウボンラタナ	(UB)	タイ	1966	多目的	410	5.5	10.6
フェイロン	(HU)	タイ	1973	灌漑	31	3.6	6.6
ブンコンロン	(BK)	タイ	自然湖	灌漑	22	-	3.7
ノンハン	(NH)	タイ	自然湖	灌漑	135	1.9	3.0
ナムウン	(NU)	タイ	1973	灌漑	86	6.4	13.4
ナムグム	(NN)	ラオス	1971	多目的	370	18.9	25.7
トンレサップ	(TS)	カンボジア	自然湖	-	2,700-16,000	-	1-10



図(1)-2. モニタリングの対象としたメコン川流域のダム貯水池と自然湖沼

これらの湖沼、貯水池の湖心部および沿岸部（5～7か所）に定点観測地点を定め、2012年以降（BK, NU, NHでは2013年以降）、基本的に3-4か月毎のモニタリングおよび試料の採取を行った。

現地調査はウボンラチャタニ大学（タイ）、タイ水産局、バットバン大学（カンボジア）、ラオス国立大学およびLARReC（ラオス）との緊密な連携のもとに行われた。9つすべての貯水池また湖沼で共通のプロトコルで調査を行うために、あらかじめ詳細なマニュアルを英文で作成するとともに、現地カウンターパートと観測、試料採取、また分析などを分担し、効率的かつ信頼性の高いモニタリング体制を確立した。

野外調査では水温、pH、透明度、光環境などの現場測定項目に加え、湖水、底泥試料を採取し、水中の窒素、リンなどの栄養塩含量、有機物含量、クロロフィル $a$ 量、底泥中のリン、鉄含量、微生物活性などを測定した。

植物プランクトンについては、優占する藍藻類をDNAシーケンス法によって解析した。また、*Microcystis aeruginosa*に特異的なプライマーおよび全ての藍藻類に共通のプライマーを開発し、特定の微生物種のrRNA遺伝子（rDNA）を高感度（定量限界300 copies/mL試水）で定量的に検出できる定量PCR法により湖水中の藍藻類および*M. aeruginosa*の濃度を測定した。

植物プランクトンによる湖心部での一次生産速度を $^{13}\text{C}$ 炭素安定同位体法により自然条件下で測定した。日中、短時間（1-2時間）の現場観測によって得られた一次生産速度から以下の方法により年間の一次生産量を推定した。

- a. 一次生産の現場測定地点を各貯水池ダムサイト付近の最深部に定める。
- b. 光量子計で消光係数を求め、表層直下から光量が概ね5%に減衰する深度までの5層位において、日中1-2時間、*in situ*条件下で一次生産を $^{13}\text{C}$ 炭素安定同位体法で測定。
- c. bで求めた各層位の光強度と単位クロロフィル量あたりの一次生産の関係をRyther and Yentsch<sup>1)</sup>の式で近似し、光強度-光合成曲線を作成。
- d. タイ東北部のウボンラチャタニにおいて通年測定した日射量の変化から、各月の1日あたりの平均光強度の時間変化を層位ごとに求める。
- e. dの結果をcで求めた光強度-光合成曲線に当てはめ、各層位における各月の1日の一次生産の時間変化を推定。
- f. 各層位で求めたeの値から、その月の日当たり、面積当たりの一次生産を推定。

食物網構造の解析のために、各水界から淡水魚類、貝類（二枚貝と巻貝）、植物プランクトン、陸上植物の採集を行った。魚類の試料は各水界より複数の魚種を採集し、現地で筋肉組織をエタノール保存（80%）、国立環境研究所において乾燥、粉碎、脱脂を行った後に同位体質量分析計により炭素と窒素の安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ と表記する）を求めた。また各魚種においては、あらかじめFishBaseから求めた栄養段階をもとに低次、中間、高次栄養段階生物の3つのグループに分類した。貝類（二枚貝と巻貝）のサンプルは湖心付近ではエクマンバージ、湖岸では手で拾うなどして採集、実験室において魚類試料と同様に $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ を求めた。

## 4. 結果及び考察

### (1) 各貯水池・湖沼の特性

各水界の主な水質を表(1)-2に示した。

表(1)-2. 各水界の水質（湖心部表層の水質について複数回の調査の平均値を示す。NDは検出限界以下）

水界	水深 (m)	透明度 (m)	水温 (°C)	pH	TN (mg L <sup>-1</sup> )	TP (mg L <sup>-1</sup> )	K (μg L <sup>-1</sup> )	Fe (μg L <sup>-1</sup> )	Si (μg L <sup>-1</sup> )
ブンコンロンBK	3.1	1.7	28.3	7.2	0.21	0.006	ND	0.18	0.8
フェイロンHU	6.8	1.2	30.6	8.3	0.72	0.039	4.2	ND	4.0
ランパオLA	11.8	1.9	28.1	8.0	0.38	0.017	2.7	ND	2.7
ノンハンNH	3.4	3.0	28.9	9.1	0.26	0.006	1.4	0.04	2.0
ナムグムNN	25.1	3.5	26.6	8.0	0.11	0.002	ND	ND	3.9
ナムウンNU	13.3	2.9	29.0	8.6	0.37	0.008	2.2	0.02	3.2
シリントーンSI	15.8	4.0	29.0	7.7	0.18	0.004	ND	0.04	2.3
ウボンラタナUB	10.7	2.2	28.3	8.3	0.32	0.009	2.5	ND	4.2
トンレサップTS	4.0	0.5	28.8	7.4	0.64	0.064	1.5	0.35	5.6

天然湖沼であるTS（トンレサップ）や天然湖沼由来の貯水池であるブンコンロン（BK）、ノンハン（NH）は水深が浅いが、その他のダム貯水池は一般に最深部の水深が深い傾向を持つ。フェイロン（HU）は人為的に創出されたダム貯水池であるが、平野部に位置し、大きな流入河川が無い。トンレサップの湖水にはシルト質の懸濁物が多いため、透明度は非常に低く、水位が低下する乾季には10 cm以下にまで低下した。

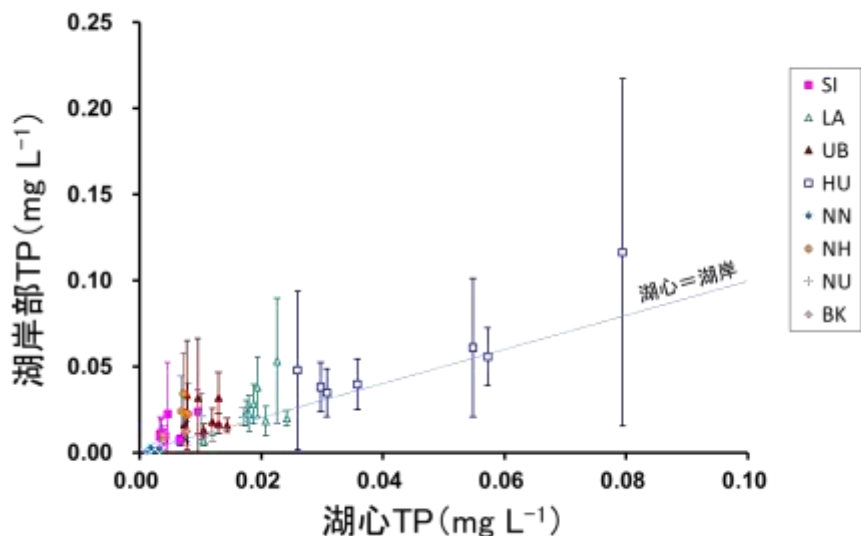
水中の全窒素（TN）、全リン（TP）、カリウム（K）濃度は周辺の人口や農地面積など人為的要因を反映しており、トンレサップおよびフェイロンは富栄養、またシリントーン（SI）、ナムグム（NN）などは貧栄養な水界である。ブンコンロンでは鉄（Fe）含量が高かった。これは、元来、天然湖沼であった本水界の湖底に枯死した水草由来の有機物の堆積層があり、水中の腐食物質含量も高く、鉄がこれら有機物と結合して溶出していると考えられる。

### (2) 栄養塩循環の反応場としての底泥の機能とリンの動態

リンは生物の活動に必須な元素の1つであるが、同時に、湖沼生態系では生物生産の制限因子ともなる。また環境中でリンは有機態、無機態の様々な形態で存在し、その形態によって挙動が異なる。そこで、底泥および湖水中のリン含量を形態別に測定し、リンの各水界における環境中での挙動を調べた。そして関係する環境要因について考察を行った。

#### 1) 湖水および底泥中のリンの形態別存在量

図(1)-3に各水界の湖岸と湖心で同時期に測定された水中の全リン濃度の関係を示した。湖岸のリン濃度は地点間でばらつきがあったが、通常、湖心よりも高い値を示した。これは後背地から湖岸を経て水界にリンが直接供給される、あるいは底泥からのリンの回帰速度が湖岸で高いことを示す。



図(1)-3. 各水界の水中での全リン含量

次に各水界の沿岸と湖心の底泥中における全リン含量と有機態リンの全リンに占める比率との関係を示した(図(1)-4)。ダム貯水池の底泥中の全リン含量は、沿岸よりも湖心のほうで高い傾向にあり、前述の湖水の全リンとは逆の傾向が見られた。さらに、底泥中のリンを有機態、無機態の別で見ると、湖岸で有機態リンが卓越するが、湖心ではリンの全量は増えるものの無機態リンの比率が高くなる。このことは、湖岸の有機態リンが微生物により無機化され、次第に湖心に移動し、そこで無機態リンとして底泥に堆積していくことを示唆する。

一方、自然湖であるトンレサップではリンの挙動が大きく異なり、湖心より湖岸の底泥においてリン含量が平均的に高い値を示した。その値は場所によりダム貯水池よりも2倍以上も高い。さらに、貯水池の湖岸-湖心間で認められた有機・無機の形態の違い(比率の違い)も、トンレサップでは見られなかった。このようなトンレサップ湖とダム貯水池との間のリンの挙動に関する違いは、周辺に人口密集地が多いトンレサップ湖において農地や生活排水由来の無機態リンが直接湖岸から供給され易いこと、その供給量がタイ、ラオスの山間部にあるダム貯水池と比べはるかに大きいこと、トンレサップの水深が全体的に浅く湖水が攪拌され一様になり易いことが原因ではないかと推察される。

なお、水界別にリンの形態を見ると、トンレサップ(TS)以外でも、ウボンラタナ(UB)、ランパオ(LA)、フェイロン(HU)では湖岸においても比較的、有機態リンの割合が低く、無機態リンが多かった(図(1)-5)。これらの水界では周辺集落からの生活排水や農耕地からの肥料の流入量が多いという共通点がある。また、これらの水界は比較的富栄養で、後述のとおりアオコ原因藍藻 *Microcystis aeruginosa* の存在量も比較的多く、底泥の無機態リン濃度が人間活動と密接に関係すること、また有害藻類の発生など水質にも影響し得ることが示唆された。

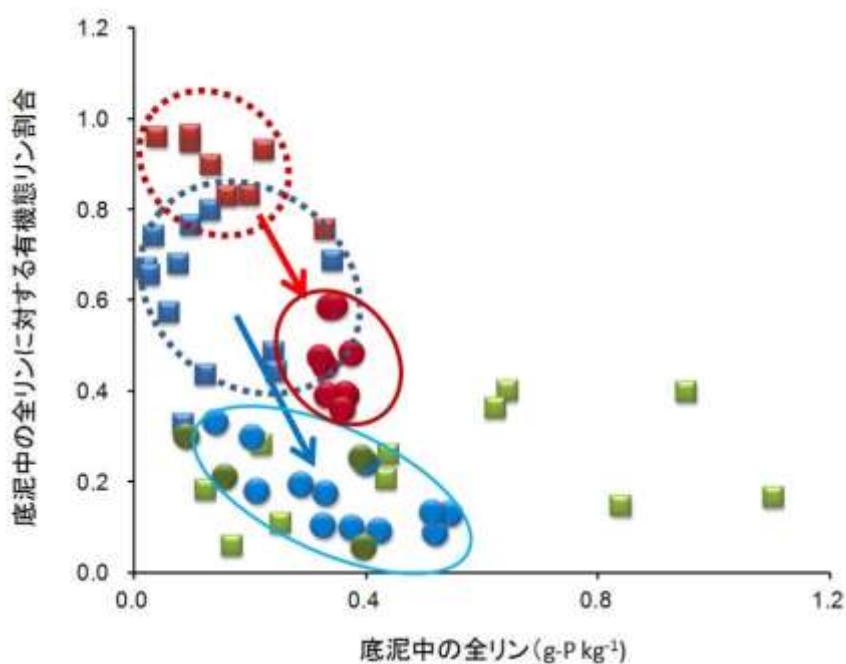
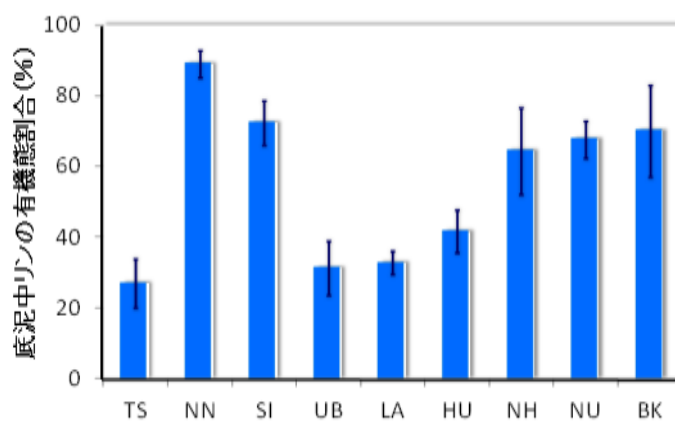


図1-4. 底泥中の全リン含量とそれに占める有機態リンとの関係

タイの貯水池（LA, SI, UB, HU）を■と●、ラオスの貯水池（NN）を■と●、トンレサップ（TS）を■と●で表示。□が湖岸、○が湖心。

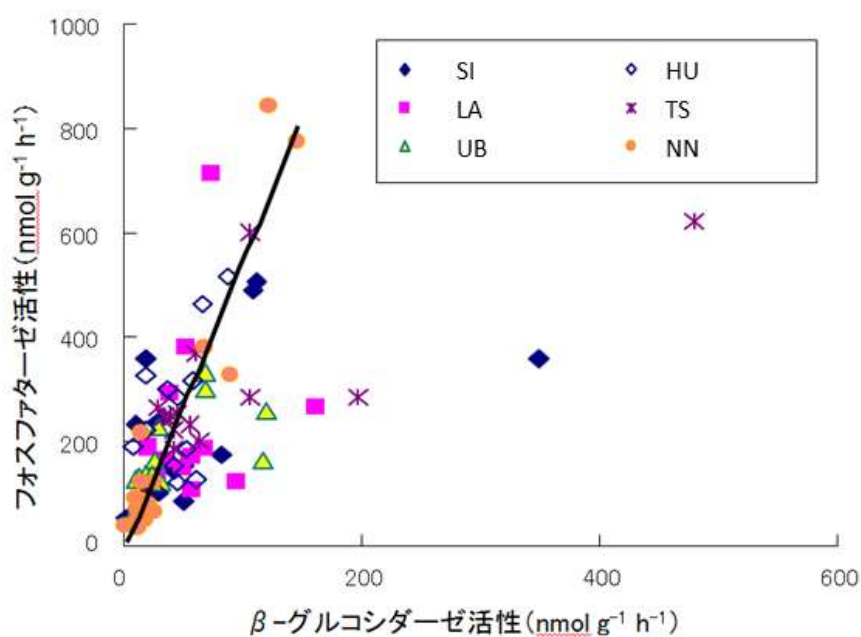


図(1)-5. 湖岸部底泥の有機態リンの割合

## 2) 湖岸底泥におけるリンの無機化

底泥での有機物の分解、無機化機能の指標として酵素活性（ $\beta$ -グルコシダーゼ、フォスファターゼ活性）を測定した。一般に、土壌、底泥の酵素活性は空間的にばらつきが大きい。これは、微生物の分布の不均一性によるものであるが、概して、微生物の基質となる有機物の多い部位で

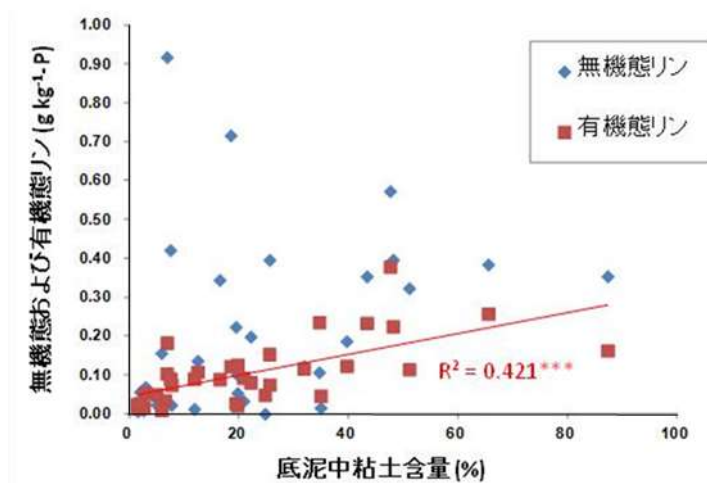
は微生物数も多く、その結果、酵素活性とは正の相関関係を持つことが知られる。一方、微生物の増殖には炭素、窒素、無機リン酸などが必須である。無機リン酸が十分な環境では微生物は有機リンを無機化する必要はないが、無機リン酸が制限となる環境では有機リンを無機化して利用する必要がある。そのため炭素源としてのセルロース分解に関わる $\beta$ -グルコシダーゼに比較して、有機態リンを無機化するフォスファターゼの働きが相対的に重要となる。調査を行った水界では底泥のグルコシダーゼとフォスファターゼの活性にも概ね正の相関関係は認められた(図(1)-6)。ナムグム貯水池(NN)では極めて高いフォスファターゼ活性が認められたが、周辺での人間活動がほとんどない本水界では無機リンの供給が少なく、底泥の分解にともなう有機リンの無機化がリンの循環過程で重要な働きをしているものと推察される。



図(1)-6. 底泥中の $\beta$ -グルコシダーゼ活性とフォスファターゼ活性との関係

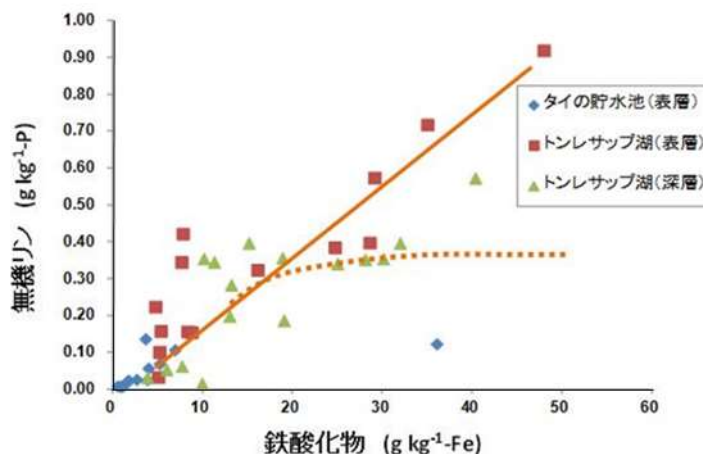
### 3) 底泥へのリンの吸着と溶出の可能性

底泥へのリンの蓄積に関する機構を明らかにするため、底泥の理化学性とリンの蓄積量の間を調べた。その結果、底泥中の有機態リンと粘土含量との間に高い正の相関関係が認められた(図(1)-7)。粘土は無機粒子のうち直径2ミクロン以下のものを指すが、粒径が小さいほど比表面積は大きくなる。有機態リン含量と粘土含量の間に相関関係が見られたことは、有機態リンを含む有機物が粘土粒子と結合しやすいことによるか、あるいは粘土粒子が蓄積しやすい条件の場所に微細な有機物が堆積しやすいことによると思われる。



図(1)-7. 底泥中の粘土含量とリン含量との関係

一方、無機態リンは酸化態鉄含量と密接な関係にあり、特にトンレサップ湖岸の底泥表層の無機態リン含量は鉄含量と明瞭な正の相関関係を示した(図(1)-8)。これは鉄酸化物表面の正電荷が負電荷をもつリン酸を強く吸着することによると考えられる。すなわち、底泥中の酸化態鉄量に応じて底泥は無機態リン酸を吸着し、過剰の無機態リン酸が負荷されたときには底泥はこれらのリン酸を吸着できずに溶出してくる可能性があることを示唆する。この結果から、トンレサップ湖岸には既にリン酸がかなり負荷されていることが懸念される一方で、ダム貯水池底泥では、鉄酸化物に対するリン酸の相対的な存在量は少なく、現時点で底泥からのリン溶出による富栄養化を懸念する要因ではないと判断された。

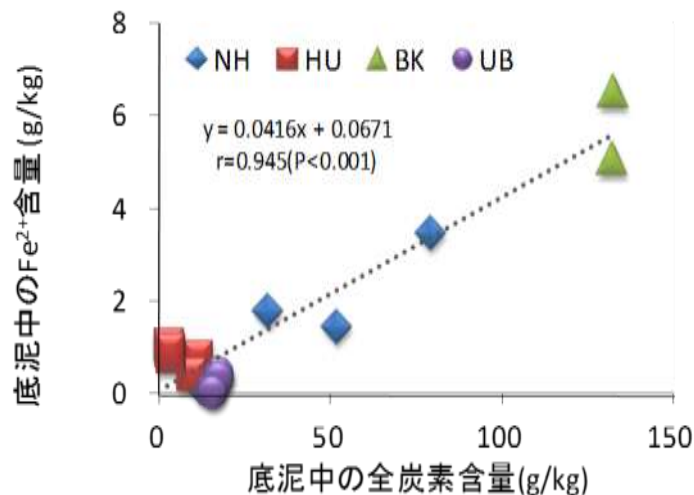


図(1)-8. 底泥中の鉄酸化物量と無機態リン含量との関係

鉄酸化物はリン酸との間に強固な結合形態を築きやすい。ただし、湖心底層のように貧酸素化しやすい環境では、底泥中(特にその表層部)に多量の有機物が供給されると、それらを分解する微生物との反応により、鉄酸化物が還元されることが考えられる。実際、有機物量の多い底泥では鉄が還元されやすいことが示された(図(1)-9)。鉄酸化物が還元分解されると、その表面に



結合していたリン酸は再び遊離し、水中に放出され、植物プランクトンなどの藻類に取り込まれた後、食物網を介して他の生物、また生態系を循環するものと考えられる。浅い貯水池や、水温躍層が消失するような水界では、湖心底泥の巻き上げに伴いリンが直接水中に回帰することも考えられる。



図(1)-9. 底泥中の有機物含量と還元鉄量の関係

### (3) ダム貯水池におけるアオコ発生のリスクと要因

#### 1) 湖水中のアオコ形成藍藻濃度

*Microcystis aeruginosa* は富栄養化した水界でアオコを形成する代表的な藍藻であり、過去の温帯域富栄養湖沼における研究では *M. aeruginosa* 16S rDNA濃度が概ね $10^6$  copies ml<sup>-1</sup>を超えたときに目視でもアオコの発生が確認できるとされている。

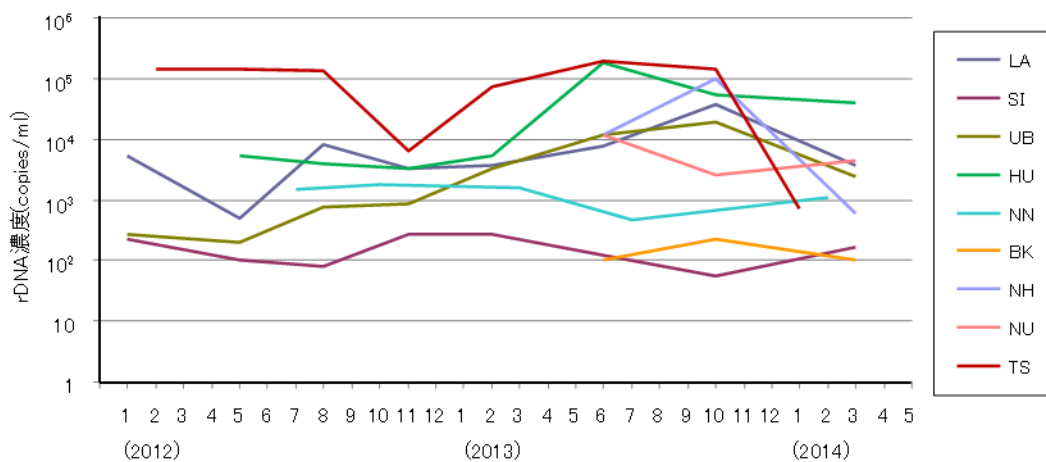
*Microcystis aeruginosa*濃度は、ブンコンロン (BK) やシリントーン (SI) では $10^2$  copies ml<sup>-1</sup>程度、ナムグム (NN) でも $10^3$  copies ml<sup>-1</sup>程度で推移した (図(1)-10)。これらの水界における *M. aeruginosa*濃度は極めて低く、現時点では本種によるブルーム (アオコ) の危険性はないと判断された。ランパオ (LA)、ウボンラタナ (UB) およびフェイロン (HU) においても、アオコ発生の目安とされる $10^6$  copies ml<sup>-1</sup>には達していないが、2012年に比較して2013年は濃度が増加している傾向にあり注意を要する。

トンレサップ (TS) では、概ね $2 \times 10^5$  copies ml<sup>-1</sup>以上の *M. aeruginosa* rDNAが検出され、特に表層ではその濃度が $5 \times 10^5$  copies ml<sup>-1</sup>を超えたことから、本種が表層に集積しアオコを形成する可能性のあることが示唆された。しかし、トンレサップにおいても雨季の増水時 (2012年11月、2014年1月) には  $10^4$  copies ml<sup>-1</sup>以下にまで低下した。この季節にメコン川本流から河川水がトンレサップに逆流するため、*M. aeruginosa*濃度を低下させたものと考えられる。

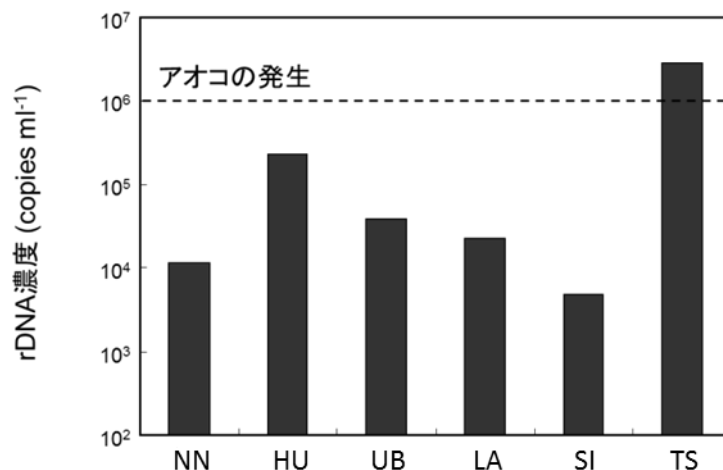
ダム貯水池および湖沼では、沿岸部また流入河川でも数地点において表層水を採取し、*M. aeruginosa* rDNA 濃度の測定を行った (図(1)-11)。その結果、トンレサップ沿岸では最大 $1 \times 10^6$  rDNA copies ml<sup>-1</sup>を超過する値が記録され、地域的には本湖においても *M. aeruginosa* によるアオ

コが既に発生していることが明らかとなった。貯水池では、フェイロンの濃度が $2 \times 10^5$  copies ml<sup>-1</sup>を超え、同じくアオコ発生の可能性が示唆された。

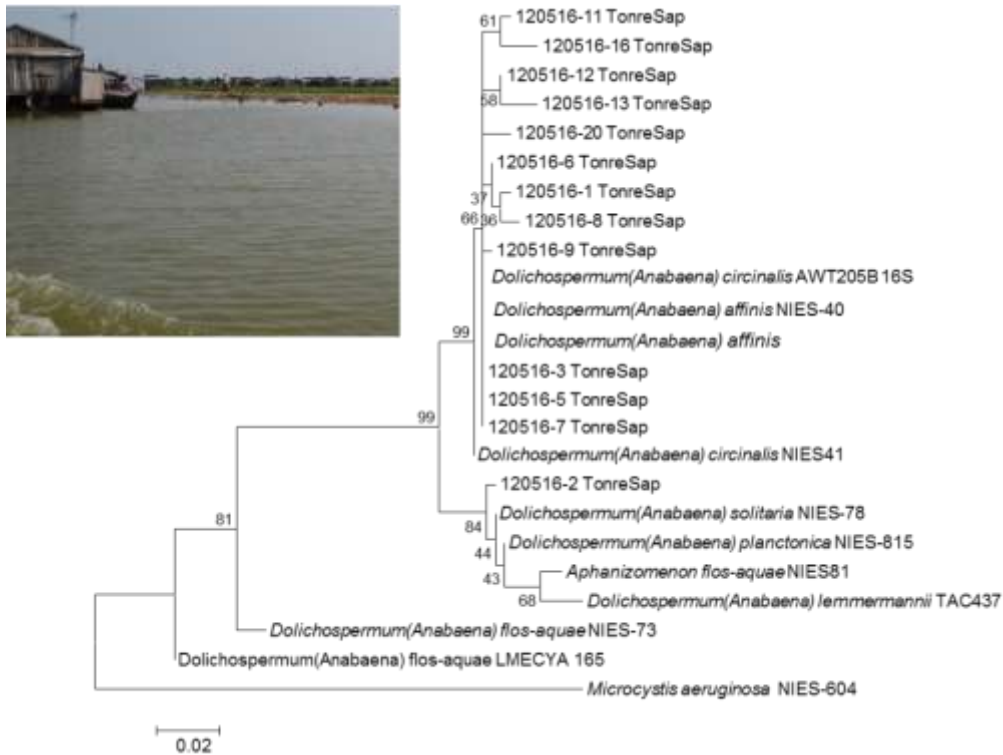
一方、2012年2月にはトンレサップ湖下流部において、表層に濃い緑色を呈する高濃度な藻類の集積が確認されたが、*M. aeruginosa*はアオコを形成するほどの濃度になかった ( $1.7 \times 10^4$  copies ml<sup>-1</sup>)。そのため、優占している藻類種を特定するために現場で採取した湖水について16S rDNAシーケンスに基づくクローン解析を行った。その結果、この湖水試料には*Dolichospermum (Anabaena) circinalis* または*Dolichospermum (Anabaena) affinis*に近縁の藍藻が優占していることが分かった (図(1)-12)。両種には神経毒 (anatoxin-a) 生産菌が含まれていることから、*M. aeruginosa*のみでなくこれら有害藍藻の増減にも目を向けていく必要のあることが示唆された。



図(1)-10. ダム貯水池・湖沼（真光層）におけるミクロシスティス濃度変化



図(1)-11. 各水界の沿岸および流入河川でのミクロシスティス最大濃度  
目視でアオコ発生が認識される濃度を破線で示した。



図(1)-12. トンレサップ湖（下流・表層）の優占藻類種（2012年2月）

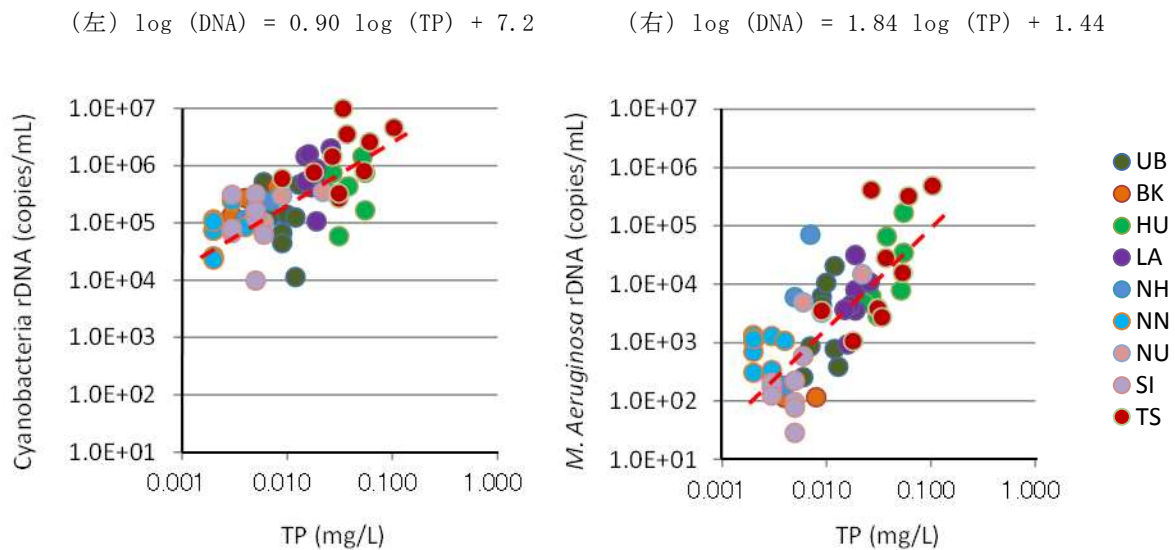
## 2) リン濃度とアオコ形成藻類の優占

上述したように、富栄養化の進んだトンレサップ湖にはアオコを形成する *M. aeruginosa* が高濃度に存在することが示されたが、富栄養化とアオコの発生についての関係をより詳細に検討するため、すべての藍藻に対してPCR増幅を行うことができる藍藻類用のプライマーを開発し、藍藻類濃度を測定し、全リン濃度と全藍藻、および *M. aeruginosa* の濃度（rDNAコピー数）との関係を調べた。その結果、藍藻はリン濃度に比例して増加する傾向が見られた（図(1)-13左）。*M. aeruginosa* についても、全リン濃度との間に直線関係が認められた。直線の傾きは1.84 であるが、独立変数、従属変数とも常用対数により変換されていることから、全リン濃度の増加に伴い *M. aeruginosa* 濃度が急激に増加することが示され、その増加率は藍藻類濃度のそれを上回っていた（図(1)-13右）。

中緯度地域の湖沼は、全リン濃度が  $0.035 \text{ mg L}^{-1}$  を超えるものを富栄養湖沼と定義され、この濃度を境に優占する藻類が珪藻-緑藻からアオコ形成藍藻に変移することが知られている。本研究の結果から熱帯域湖沼においても、リン濃度が上昇するにつれてアオコ非形成藍藻（*Synechococcus* など）からアオコ形成藍藻へと優占種が変化することが予想された。

温帯域の富栄養湖沼の研究では、前述のとおり夏期に *M. aeruginosa* rDNA 濃度が  $10^6 \text{ copies ml}^{-1}$  を超えると目視でアオコ発生が確認できる。本研究で調査したメコン流域の貯水池でも全リン濃度が  $0.3 \text{ mg L}^{-1}$  を超えると *M. aeruginosa* rDNA の濃度は  $10^6 \text{ copies ml}^{-1}$  を超え、アオコが発生する可能性のあることが示された。2012-2014 年度の調査では  $0.3 \text{ mg L}^{-1}$  を超える全リンはトンレサップ湖（TS）の水上集落においてのみ観測された。また  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  を超える全リン濃度はトンレ

サップに加えフェイロン（HU）でも観測された。これらの水界では、局所的ではあるが既に目視でアオコが観察されている。さらにランパオ（LA）の全リンも比較的高濃度（ $0.1 \text{ mg L}^{-1}$ ）を示した。フェイロン、ランパオ両貯水池は、農業用水の確保と取水を目的として建造された灌漑用貯水池であり、周辺には農地や人家が密集している。このように、タイにおける今後の経済発展と肥料の使用を伴う農作物の増産により、貯水池の富栄養化は今後さらに進行する可能性がある。  
新たに建設予定の貯水池に関しても、将来予想される人口、農地化、施肥の状況などについて十分に検討し、深刻なアオコによる被害を回避する手立てが必要である。



図(1)-13. 全リン濃度に対する藍藻類（左）および *M. aeruginosa*（右）の関係

#### (4) 湖水中の一次生産

##### 1) 貯水池の一次生産と関係する要因

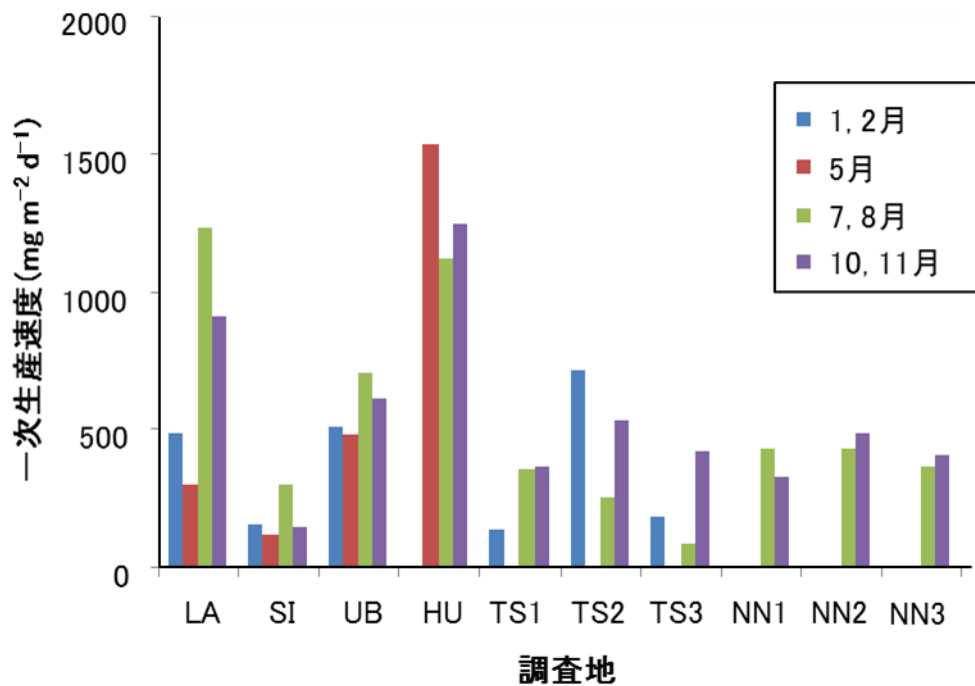
各貯水池および湖沼における一次生産の測定結果を図(1)-14に示した。

トンレサップ湖では、季節によって一次生産の変動が激しく、乾季の末（5月）には一次生産速度は無視できるほどに低下した。本湖では乾季に水位が著しく低下し、底泥の巻き上げによって透明度も極度に低下する（約5 cm）。そのため、光が水中に届かず、光合成は湖水の表面でしか行われなことが、一次生産を妨げている要因と考えられる（図(1)-15）。一方、ダム貯水池ではシリントーン（SI）で年間を通じて一次生産が低く、逆にフェイロン（HU）で高いなど、面積あたりの一次生産速度において2つの貯水池で10倍近い開きがある。

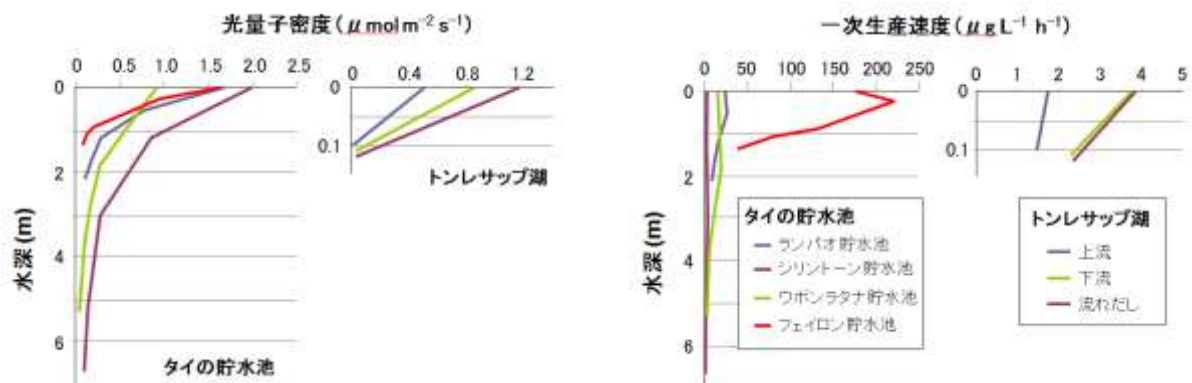
ダム貯水池の一次生産速度は湖水中の全リン濃度（TP）と正の相関を示した（図(1)-16）。しかし、トンレサップでは高いTPにもかかわらず一次生産が低いのは上記の理由による。つまり、ダム貯水池ではリン濃度が一次生産を律速するが、トンレサップなどでは光環境が律速となる。

ところで、シリントーン、ナムグムなど貧栄養な水界では体積あたりの一次生産速度は低い（図(1)-14）、透明度が高く、深層でも光合成が行われていると考えられるため、炭素安定同位体の取り込み量を測定する手法では深層での光合成、また一次生産速度を過少評価する可能性がある。そこで、ナムグム貯水池において一次生産を担う主な藻類である珪藻、緑藻、藍藻の現存

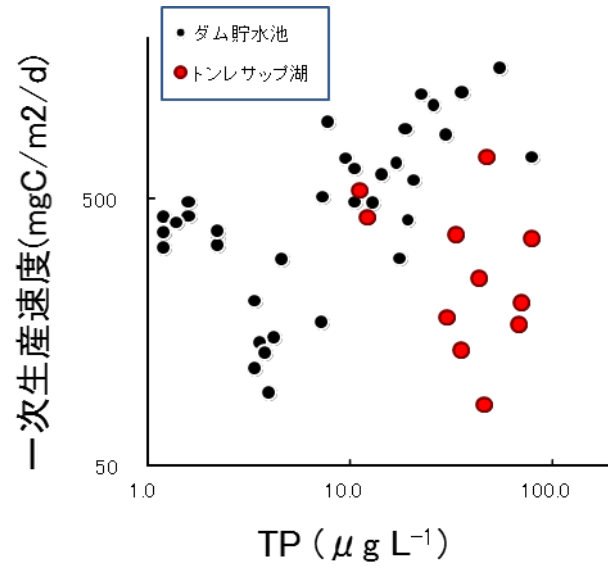
量の深度プロファイルを求めた（図(1)-17）。調査時の補償深度は28 m で測定最深部は25 mであったことから、湖底でも光合成による有機物の生産が可能であったと推測される。クロロフィルa換算の藻類存在量の深度プロファイルから水深10 m付近まで珪藻と緑藻がほぼ一定の密度で同程度存在したことが分かる。緑藻はこれより深いところで急激に密度を低下させるが、珪藻と藍藻については水深約15 mのかなり深い場所で密度のピークを迎えた。全リン濃度は表層0.0041 mg L<sup>-1</sup>、水深17 m で0.0021 mg L<sup>-1</sup> と低かったが、すべての濃度で光に応じて生産が行われていることが示された。貧栄養水界では深層での一次生産が無視できないことに注意が必要であろう。



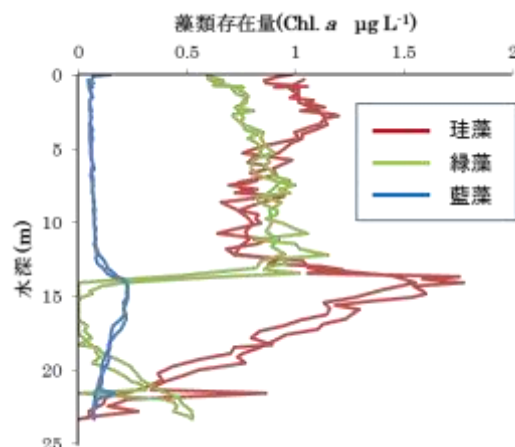
図(1)-14. ダム貯水池と自然湖沼の一次生産速度



図(1)-15. タイ貯水池とトンレサップ湖水中の光条件（左）と一次生産速度（右）（2012年5月）



図(1)-16. 水中の全リン濃度と一次生産速度との関係



図(1)-17. ナムグム貯水池における各種藻類の種別存在量 (2014年11月)

センサーを表層から湖底まで往復させて測定したため各藻類とも2本のラインがある。

## 2) 一次生産と漁獲量

前節から、メコン川流域では、リン濃度の低い水界の一次生産が栄養塩濃度に制限され、リン濃度が高く水深の浅い水界の一次生産が光環境に制限される傾向が示された。しかし、野外における短時間の観測だけでは、測定日時の天候条件によって光環境も変わるため、必ずしもその水界の平均的な一次生産量を評価することはできない。そこで、光条件の季節変化による生産量の変動を考慮するため年間の一次生産を推定し、各貯水池における漁獲量<sup>2)</sup>との関係を求めた。その結果、各貯水池における季節ごとの一次生産速度は $130\sim 1,100 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ と推定され、貯水池間でのばらつき、また季節間での変動が大きかった(表(1)-3)。また、年間の一次生産は $65\sim 340 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ と推定され、水中の全リン濃度が高いほど一次生産も高かった(図(1)-18左)。

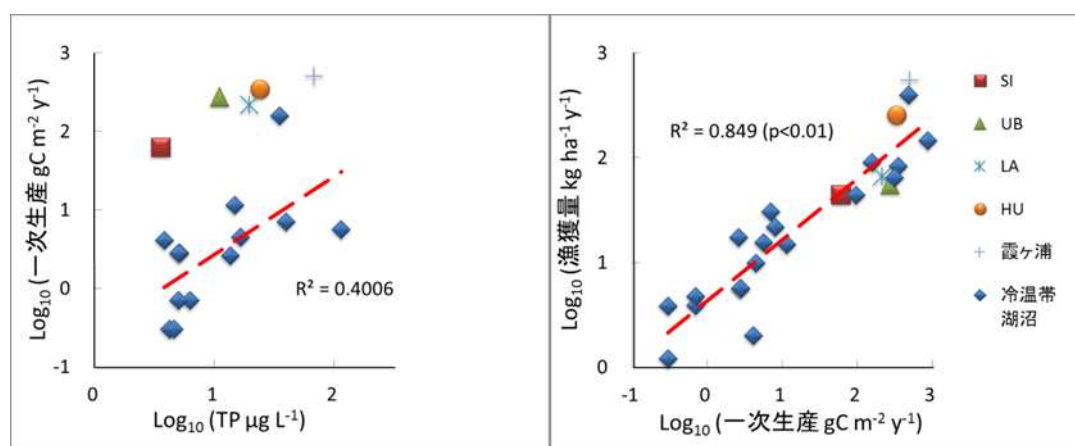
これまで湖沼の漁獲量については、水深、表面積、沿岸域面積などの地形的要因や栄養塩濃度、総溶解固形分などの水質要因との関係について主として温帯、亜寒帯を対象に研究されてきたため、メコン流域に見られるような熱帯湖沼や貯水池についての研究例は極めて少ない。Downing and Plante<sup>3)</sup>は冷温帯と亜寒帯湖沼における漁獲量を説明する要因として全リン濃度と一次生産量があることを見出した。今回の調査結果をDowning and Plante<sup>3)</sup>のデータと比較すると、冷温帯域にある同程度の全リン濃度を持つ湖沼より、メコンのダム貯水池では年間の一次生産が10倍程高い値を示した。これは、冷温域湖沼の一次生産、すなわち植物プランクトンによる光合成が主に夏季に限定されるのに対し、熱帯では年間を通じて光合成が盛んに行われるためだと考えられる。一方、一次生産と漁獲量についてはDowning and Plante<sup>3)</sup>が見出した関係式がメコンの貯水池についても当てはまった(図(1)-18右)。つまり、熱帯地域においてもリン濃度が一次生産を規定し、植物プランクトンによる一次生産が食物連鎖を通じて漁業生産を支えていると推察できる。

なお、トンレサップ湖では乾季の水位低下とともに一次生産が非常に低くなるため、今回の推定方法では年間の生産量は推定できなかった。しかし本湖における植物プランクトンによる一次生産は、ダム貯水池に比較しても決して高くないことは間違いない。一方、一次生産が低いにも関わらず、ここでの漁獲量は極めて高く ( $>100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ )、ダム貯水池また冷温帯湖沼で得られた一次回帰式から大きく逸脱した。このことは、トンレサップ湖の魚類が植物プランクトン

による一次生産以外の有機物（例えば陸上植物や落下昆虫など）によってもその生産を支えられていること、あるいはメコン川本流など系外から移入してくる魚類が漁獲量に大きく反映されていることを示唆する。この可能性については後述する食物網構造の解析結果で詳しく述べる。

表(1)-3. 各貯水池における年間の一次生産量

貯水池	一次生産速度 ( $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )			年間の一次生産 ( $\text{gC m}^{-2} \text{y}^{-1}$ )
	雨季 (5-9月)	乾季 (10-1月)	暑季 (2-4月)	
SI	145	128	231	64.5
LA	654	487	636	220.6
UB	512	643	1107	289.3
HU	1139	809	860	343.1



図(1)-18. 熱帯および冷温帯の貯水池・湖沼におけるリン濃度、一次生産、漁獲量の関係  
熱帯貯水池の漁獲量は文献2に、冷温帯湖沼のデータは文献3による。

### (5) ダム貯水池と自然湖沼の食物網構造

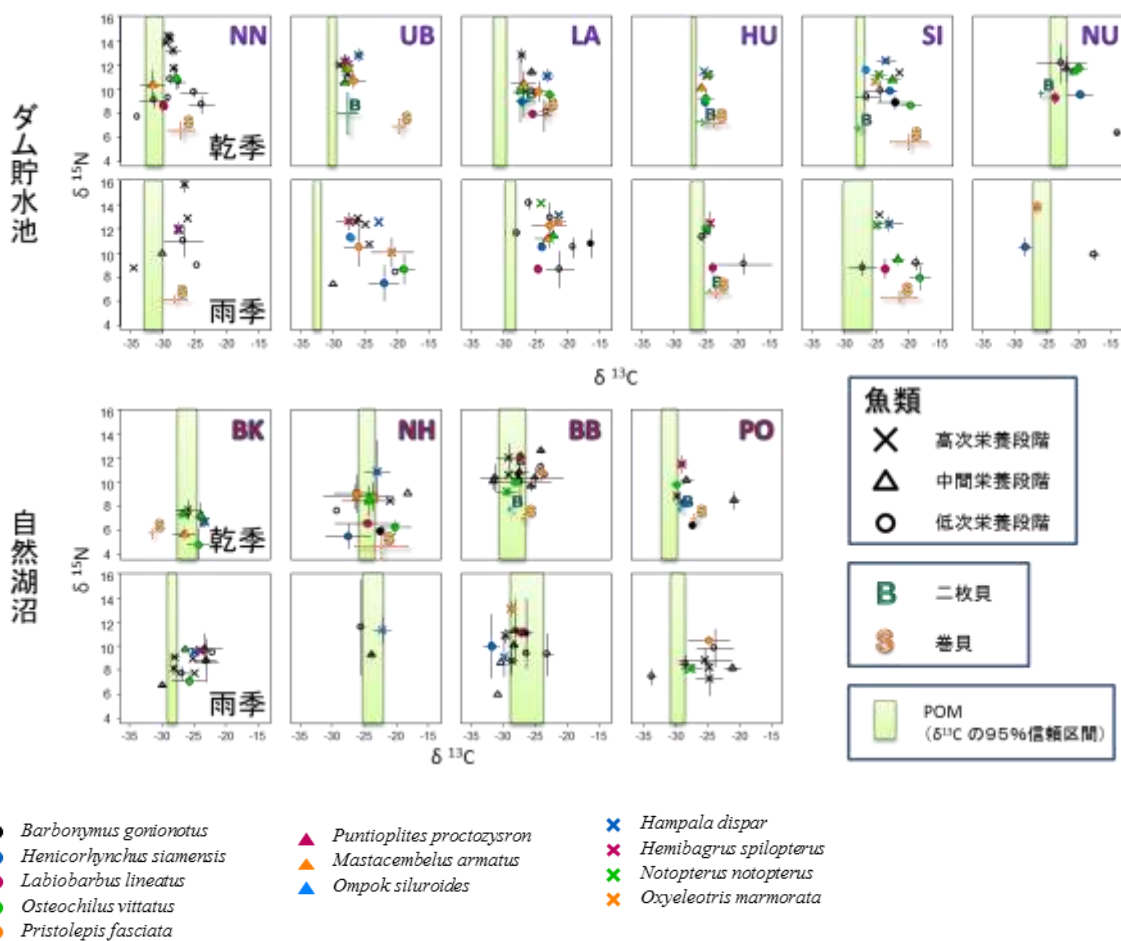
6つのダム貯水池と3つの自然湖沼（2つの自然湖起源の貯水池-BKとNH-とトンレサップ湖の2地点-BBとPO-の合計4地点）から採集した淡水魚を、FishBaseに基づき3つのグループ（低次、中間、高次栄養段階生物）に分類し、水界ごとに筋肉組織から測定した炭素窒素安定同位体比をプロットした（図(1)-19）。3つの栄養段階から多くの水界に共通してみられた淡水魚をそれぞれ1-3種ずつ選び、マップ上のどの位置にプロットされるかを水界間で比較しやすいよう、種ごとに色とシンボルを統一して表示した（注：一部の水界では貝類が未分析。またPOMは $\delta^{13}\text{C}$ のみ分析し、その95%信頼区間で表示した）。

6カ所のダム貯水池では、消費者である貝類も魚類もその $\delta^{13}\text{C}$ の値がPOMよりも大きく、右側にプロットされる傾向のあることが分かる。一方、3カ所の自然湖沼（4カ所の採集地点）ではPOMと貝類、魚類の $\delta^{13}\text{C}$ 値が大きく重複している。縦軸の $\delta^{15}\text{N}$ に目を向けると、ダム貯水池の淡水魚類では栄養段階の高い魚種ほどその値が高い位置にプロットされている。しかし、自然湖沼ではその関係は明瞭ではない。上述の2つの傾向（ $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ のパターン）についてより詳しく検証するために、まずそれぞれの水界、季節で魚類の $\delta^{13}\text{C}$ からPOMのそれを引いた値の頻度分布

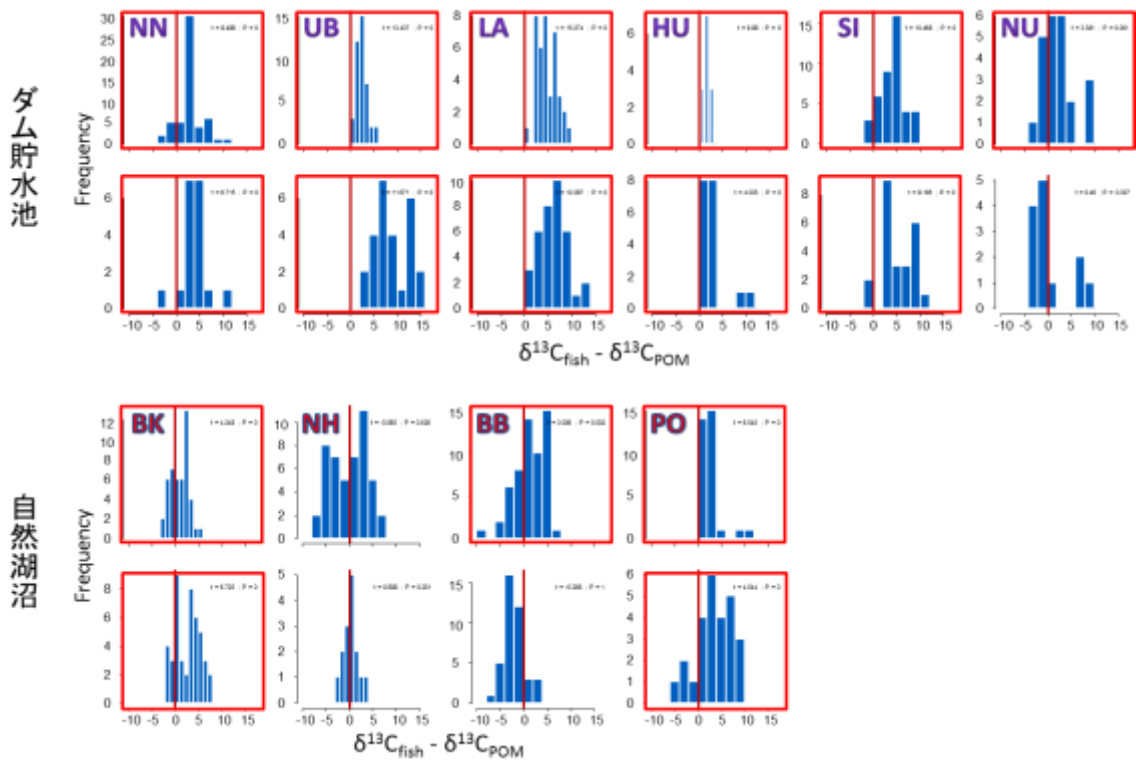


を求めた（図(1)-20）。そしてこの分布が有意に0より大きいものを赤い四角で囲んだ。その結果、ダム貯水池では雨期のナムウン（NU）以外、すべての水界と季節で有意となることが分かった。つまり魚類の方が主に植物プランクトンで構成されるPOMより $\delta^{13}\text{C}$ が大きい。一方、自然湖沼でも $\delta^{13}\text{C}$ に有意な差が認められたが、ノンハン（NH）と雨季のトンレサップ湖のバタンバン（BB）ではPOMと魚類の $\delta^{13}\text{C}$ に違いはなかった。

続いて、魚種ごとの栄養段階をFishBaseから読み取り、それを横軸に、その種に対して実測された $\delta^{15}\text{N}$ を縦軸にとってプロットした（図(1)-21）。そして同様に両者の間に有意な一次回帰が成立するものを赤い四角で囲んだ。ダム貯水池ではすべての水界と季節で有意な関係がみられるが、自然湖沼では乾季にのみ有意性が認められた。つまり雨季には栄養段階と $\delta^{15}\text{N}$ の関係が消失していることが分かった。

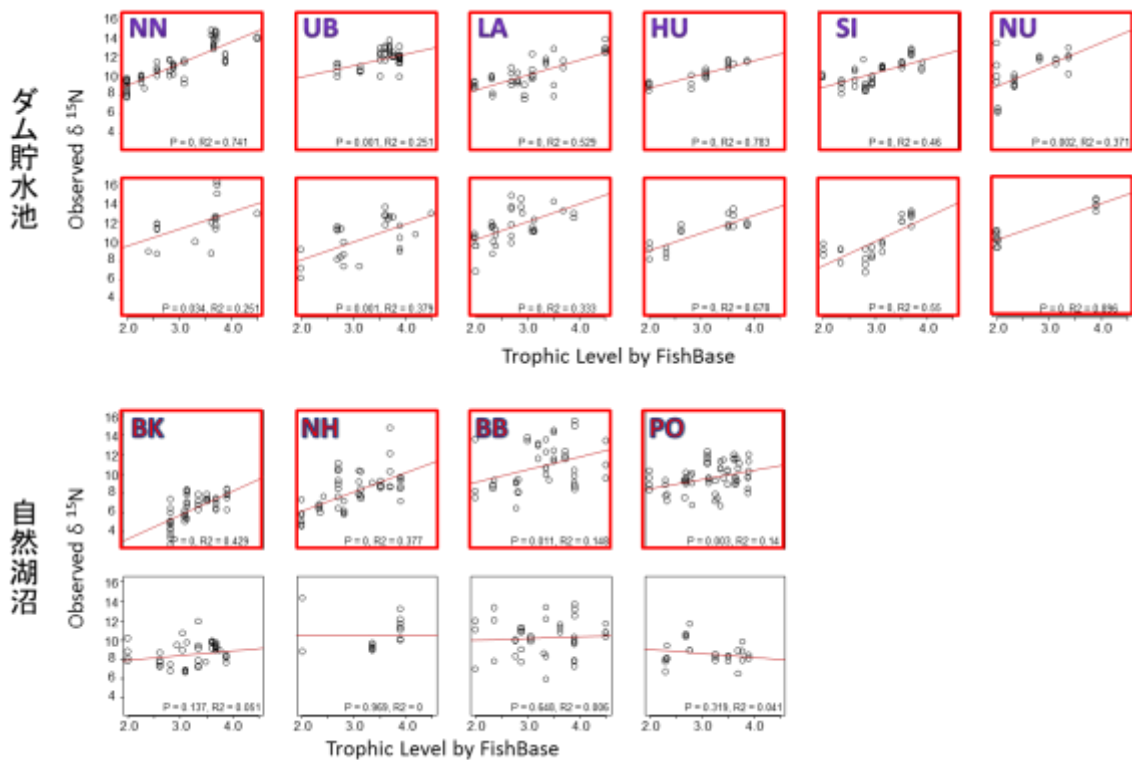


図(1)-19. ダム貯水池（上2段：乾季と雨季）と自然湖沼（下2段：乾季と雨季）の食物網粒状有機物POM（主に植物プランクトン）、貝類（二枚貝および巻貝）、淡水魚類の炭素窒素安定同位体比マップ。エラーバーは1SD。



図(1)-20. 魚類とPOMの $\delta^{13}\text{C}$ 値の差の頻度分布

赤線は差が0の位置を示す。赤四角で囲ったパネルは差が有意に0より大きいもの ( $p < 0.05$ )。



図(1)-21. 魚種ごとの $\delta^{15}\text{N}$ の平均値と栄養段階の関係

一次回帰式の傾きが有意に0より大きいパネルを赤四角で囲んだ ( $p < 0.05$ )。

以上の観察結果から推察されることは、まずダム貯水池ではPOM（粒状有機物）を形成する植物プランクトンより  $\delta^{13}\text{C}$  の低い一次生産者（炭素源）は魚類に餌として利用されていないことである。 $\delta^{13}\text{C}$  値の異なる複数の炭素源を魚が餌として取り込む場合、その魚の筋肉中  $\delta^{13}\text{C}$  は餌の利用配分比率によって変動するが、餌の値のレンジを逸脱しないで必ず中間的な値をとるからである。POM より低い  $\delta^{13}\text{C}$  を示す炭素源としては陸上の高等植物が知られるが、自然湖沼ではこれが恐らく食物網に取り込まれ、一部の魚類の餌資源を支えているものと考えられる。一方で、ほぼ同じ結論が  $\delta^{15}\text{N}$  のグラフからも導くことができる。生物組織の  $\delta^{15}\text{N}$  は餌を消化、吸収する際の同位体分別により、餌と比べて約3.4 ‰その値が上昇することが知られている。ダム貯水池の魚類ではこの同位体分別効果が明瞭に表れており、栄養段階の上昇とともに  $\delta^{15}\text{N}$  値が増加した。このことは貯水池の魚類が（それぞれに特有の  $\delta^{15}\text{N}$  を持つ）複数の一次生産者にほぼ同じ割合で依存していることを示唆する。この関係が自然湖沼では雨期に消失するということは、この季節に魚類の餌資源が変化していることを意味する。それは餌資源の利用配分比率の変化、あるいは（異なる  $\delta^{15}\text{N}$  を示す）新たな餌資源が加わるなどによって生じる。 $\delta^{13}\text{C}$  の結果と照合すれば、陸上の植物が雨季に魚類の餌として新たに加わると考えるのが妥当である。自然湖沼では、雨季に水位が上昇し氾濫原が拡大すること、そしてそれによって陸上の有機物が水中の生物に餌として利用されやすくなるというよく知られたプロセスを考えてみても、上の推理が可能性としては最も妥当である。ダム貯水池は、その食物網とそれを構成する消費者が、ほぼ湖内部で生産された有機物に餌を依存する自生性の生態系であるのに対し、自然湖沼は自生性の有機物に加え、季節的に湖周辺の陸域で生産された有機物、つまり他生性の有機物にも餌を依存する生態系であると言えよう。

低次の栄養段階から高次のそれへと移行するにつれ窒素の安定同位体比が上昇し、炭素の安定同位体比が指標となるエネルギー流路が収束する構造を持つ食物網は、自然湖沼ではなくむしろ人為的に作り出されたダム貯水池の生態系に共通して見られた。トンレサップ湖など自然湖沼の食物網構造は、ダム貯水池と比べるとはるかに複雑である。この水界には、炭素安定同位体比の異なる複数の生産者を起源とする幾筋かの食物連鎖が存在する可能性が高い。トンレサップ湖は、雨季にメコン川本流から水が逆流して数メートル以上も水位が上昇するため、湖面の面積も乾季と比べ5倍程度に膨れ上がる。そのため餌となる有機物が湖の中で生産されるもの（自生性有機物）以外に、周囲の氾濫原やメコン川本流からも供給（他生性有機物）されるはずである。湖内の一次生産が低いにもかかわらず極めて高い漁獲量が維持できるのもこのためである。そもそも多くの魚種が自ら本流と湖との間を季節的に大移動することが知られ、湖に生息する魚種の数も200近くに上り、多くても数十種しか生息しないダム貯水池を大幅に上回る。つまり、トンレサップ湖には独立した複数の食物網が存在し、すべての魚類（またその他の水生生物）が捕食－被捕食のエネルギー流の関係でつながるわけではないようである（図(1)-22）。



図(1)-22. トンレサップ湖の食物網のイメージ

複雑な食物網を持つ生物群集は一般に安定していると考えられる。何かの原因で、その中の1つの食物連鎖が仮に途切れたとしても、高次の栄養段階生物は代替りの連鎖に餌を切り替えることができるからである。言い換えれば、ダム貯水池に見られたピラミッド型食物網とそれを形成する生態系は不安定だと言える。まだダム建設後半世紀ほどの極めて新しい生態系であるため、今後安定して生態系サービス（魚類生産）を供給し続けられるかどうかは分からない。しかし、ダム貯水池と自然湖沼は、その食物網構造、すなわち「食う－食われる」という生物間の本質的な関係がかなり異質である。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

人文社会科学の研究がこれまで多かったメコン川流域のダム開発の影響評価で、タイ、ラオス、カンボジアの3か国にわたって統一された研究手法を用いてダム貯水池の生態系サービスを科学的に評価した研究は、世界的にも例を見ないものである。特に、これまで熱帯湖沼やダム貯水池の一次生産の測定例は極めて少ないが、メコン流域の9つの巨大な水界における3-4か月毎のモニタリングによって、一次生産に関する貴重なデータが蓄積された。さらに、単一の河川流域では世界最大のメコンの漁業生産（約260万トン/年）が、河川や湖沼の藻類による一次生産によってのみ支えられているのか、それとも陸域や氾濫原からの有機物供給が魚類生産に寄与しているのかという生態学的に極めて興味深い、また資源管理上も重要なテーマに対しても安定同位体比の解析によって重要な知見が得られた。熱帯湖沼、ダム貯水池でのアオコの発生状況についても、これまでの知見は決して多くなく、将来のダム開発で造られる数多くのダム貯水池におけるアオコ発生リスクを予測するうえでの貴重な基礎データが得られた。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

東南アジアの水力発電を目的とするダム開発は、今後しばらく更に勢いを増すことが予想される。ダムの建設サイト、規模、工法を決定する際に、本研究プロジェクトの成果が計画段階から戦略的に活用されることが望まれる。上記のアオコ発生の問題については、新たに建造される貯水池の全リン濃度を集水域の土地利用や人口などから事前に推定できれば、我々が求めた関係式からある程度そのリスクを予想することが可能となる。更に貯水池から期待される漁獲量についても、それを推定する関係式を提示することができた。これらがメコン流域国の行政、あるいは日本をはじめメコン地域を経済的に支援する国々の行政が活用できる本研究の成果であろう。

## 6. 国際共同研究等の状況

(タイ・ダム貯水池の環境モニタリング)

カウンターパート: Tuantong Jutagate 准教授、Faculty of Fisheries, Department of Agriculture, Ubon Ratchathani University、タイ王国 (2009年 MOU締結)

(ラオス・ナムグムダム貯水池の環境モニタリング)

カウンターパート: Bounthob Praxaysombath 教授、Faculty of Science, National University of Laos, ラオス

(カンボジア・トンレサップ湖の環境モニタリング)

カウンターパート: Pao Srean 講師、Research and Development Center, University of Battambang、カンボジア

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

1) 広木幹也、富岡典子、福島路生、村田智吉、Tuanthong Jutagate、今井章雄、小松一弘：第60回日本生態学会 (2013)

「メコン川流域湖沼、ダム貯水池の一次生産速度」

2) 富岡典子、福島路生、広木幹也、村田智吉、今井章雄、小松一弘、Tuanthong Jutagate：第47回日本水環境学会 (2013)

「メコン川流域湖沼、ダム貯水池の藍藻の挙動について」

3) 福島路生、広木幹也、Tuantong Jutagate：第61回日本生態学会 (2014)

「ダム湖は湖か？魚類の食物網解析による検証」

- 4) 広木幹也, 村田智吉, 富岡典子, 福島路生, Tuantong Jutagate, 今井章雄, 小松一弘: 第61回日本生態学会 (2014)  
「メコン川流域ダム貯水池における底泥の無機化、分解機能」
- 5) 村田智吉, 広木幹也, 富岡典子, 野原精一, 吉田勝彦, 福島路生, 今井章雄, Tuantong Jutagate: 日本ペドロロジー学会2014年度大会 (2014)  
「メコン川流域ダム貯水池における湖岸, 湖底のリンの蓄積形態」
- 6) Murata T., Hiroki M., Tomioka N., Nohara S., Yoshida K., Fukushima M., Imai A., Jutagate T., Srean P., Praxaysombath B.: 20th World Congress of Soil Science, 2014  
“Sedimentation Processes of Phosphorus in the Catena in Dam Reservoirs in the Mekong River Basin.”
- 7) 広木幹也, 富岡典子, 福島路生, 村田智吉, Tuantong Jutagate, 今井章雄, 小松一弘: 日本陸水学会第79回大会 (2014)  
「メコン川流域ダム貯水池における一次生産」
- 8) 富岡典子, 福島路生, 広木幹也, 村田智吉, 今井章雄, 小松一弘, Tuantong Jutagate: 第30回全国環境研究所交流シンポジウム (2015)  
「メコン川流域のダム貯水池、自然湖沼の水質観測と生態系評価」
- 9) 広木幹也, 富岡典子, 福島路生, 村田智吉, Tuantong Jutagate, 今井章雄, 小松一弘: 第62回日本生態学会大会 (2015)  
「メコン川流域ダム貯水池における生産性とその要因」
- 10) 福島路生, 広木幹也, 富岡典子, 村田智吉, Tuantong Jutagate: 第62回日本生態学会大会 (2015)  
「メコン川流域のダム貯水池生態系における食物網構造」
- 11) 富岡典子, 福島路生, 広木幹也, 村田智吉, 今井章雄, 小松一弘: 第49回日本水環境学会年会 (2015)  
「メコン川流域ダム貯水池の*M. aeruginosa*の挙動と栄養塩の関係について」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国立環境研究所一般公開 (2014年4月19日) にて成果紹介「メコン川での生態学研究-開発と生態系サービス」

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 週刊さんいん学聞 (2015年4月15日、山陰中央新報、11頁、「メコン川流域ダム湖の環境保全を目指す！」)

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) J.H. RYTHER, AND C.S. YENTSCH: The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data. *Limnol. and Oceanogr.* 2, 281-286 (1957)
- 2) T. JUTAGATE: Reservoir fisheries of Thailand. In "Status of Reservoir Fisheries in Five Asian Countries" 99-116 (2009)
- 3) J.A.DOWNING, AND C. PLANTE: Production of fish populations in lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50, 110-120 (1993)

## (2) メコン淡水魚の基礎生物学的研究

独立行政法人国際農林水産業研究センター  
水産領域 森岡 伸介

平成24(開始年度)～26年度累計予算額：9,504千円

(うち、平成26年度予算額：3,092千円)

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

本研究では、タイ国ウボンラチャタニ市周辺のメコン川支流ムン川およびその支流ランドムノイ川の合流点付近にあるシリントーンダムから採取した淡水魚類の年齢 - 成長解析を行うとともに、各魚種の繁殖・食性解析を行い、その基礎生態情報を得ることを目的とした。対象種には在来魚であるギギ科の*Hemibagrus nemurus*およびコイ科の*Labeo chrysophekadion*を選定した。魚類の成長解析には、一般的に耳石や鱗棘、脊椎骨、鱗が用いられるが、この中で適切な年齢形質を上記2種について検討したところ、胸鱗棘の切片が最も適切な年齢形質と考えられたため、これを用いて平成24年10月から同26年9月にかけて標本を採集し、年齢査定に基づく成長モデルを推定した。また、これら2種について、生殖腺解析を実施し、両種の繁殖期・繁殖年齢・繁殖サイズについて検討した。この結果、*H. nemurus*については、成長パターンがvon Bertalanffyモデルで近似され、オスの方がメスより速く大型化するものと推定された。また、同種の繁殖年齢が2歳以降(繁殖サイズ全長200 mm以上)、繁殖期は雨季(5-10月)と推定された。また、*L. chrysophekadion*についても成長パターンはvon Bertalanffyで近似されたが、雌雄間の成長差は認められなかった。同種では、繁殖年齢が3-4歳(繁殖サイズ全長400 mm以上)、繁殖期は*H. nemurus*と同様に雨季と考えられた。また、シリントーンダムおよびムン川本流で上記2種の稚魚・未成魚の採集を試みたところ、前者では両種とも採集されなかった一方で、ムン川本流でからは不定期ながらも両種の1歳未満の稚魚・未成魚が採集された。この結果から、シリントーンダムには両種の稚魚は生息していないものと推察された。また、上記2種とは別に、シリントーンダムでの最重要漁業対象種であるニシン科*Clupeichthys aesarnensis*の耳石日周輪を観察することにより、同種の成長パターンを把握し寿命を推定、また生殖腺の観察を通じて繁殖に関する知見を得た。この結果、同種の寿命は最長で約8ヶ月と推定され、繁殖サイズは体長35-40 mmで、ほぼ周年繁殖しているものと考えられた。

### [キーワード]

在来魚類、年齢、日齢、成長、繁殖

### 1. はじめに

メコン川流域のダム建設により在来の淡水魚、特に回遊魚の生息環境が大きく変化し、これらの資源量に大きな影響を与える懸念がある。さらに養殖を目的に導入された外来魚(ナイルティラピア、アフリカヒレナマズなど)の天然水域への逸散・定着により、在来魚の資源量の低下あ



るいは遺伝的多様性の低下を引き起こす恐れも指摘されている。

こうした背景から、メコン流域各国では、在来魚類の増殖、すなわち資源管理および養殖に関する研究の必要性が強く指摘されてきた。しかし、分類や種の記載に関する知見は豊富に報告されているものの、資源保全・管理に資するような生態的知見については限定的であり、特に乱獲の対象となり得る商業漁業対象種については、その養殖技術開発に資する意味からも、基礎的な生態的知見の収集は極めて重要である。

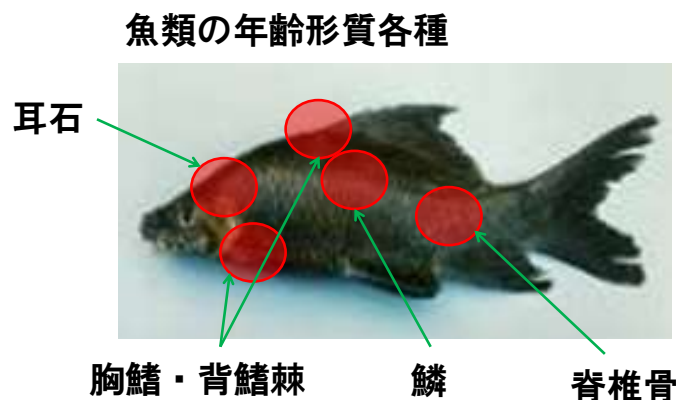
## 2. 研究開発目的

サブテーマ2では、メコン川支流ムン川に注ぐランドムノイ川の合流域に設けられたシリントンダムにおいて、乱獲の可能性が高く懸念される在来魚類2種（ギギ科*Hemibagrus nemurus*およびコイ科*Labeo chrysophekadion*）について、資源保全・管理、およびその養殖技術開発に資することを目的に、対象魚種の年齢査定法を確立し、成長モデルを構築するとともに、繁殖に関する知見を得ることを目的とした。また、これら魚種について、胃内容物から各種の食性解析を行い、サブテーマ1（ダム貯水池の物質循環）への補足的情報を収集することとした。

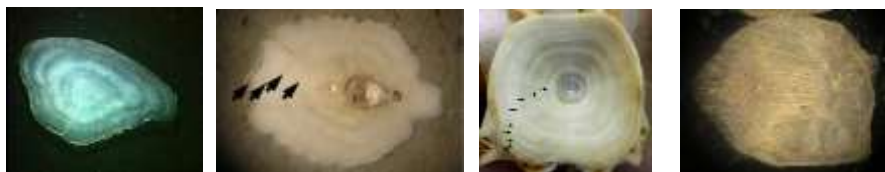
さらに、シリントンダムの重要な漁業対象種である小型ニシン科魚類*Clupeichthys aesarnensis*についても、耳石日周輪解析に基づき成長解析を行うとともに、繁殖に関する知見を得ることで、資源管理に向けての検討を行った。

## 3. 研究開発方法

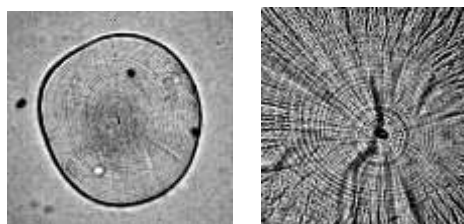
魚類の成長解析に必要となる年齢査定形質については、これまで主に耳石や鰭棘、脊椎骨といった骨形質、あるいは鱗が使われてきた（図(2)-1, 2）。そこで適切な年齢形質を種ごとに選定するため、各魚種複数の個体について年齢査定を行った。また日齢解析は、漁業資源として加入する前の生態情報を得るために行うものであるが、上記の年齢解析対象種の1歳未満の稚魚・未成魚を対象に耳石を用いて行った（図(2)-3）。



図(2)-1. 魚類の年齢形質各種およびその位置



図(2)-2. 魚類の年齢形質各種  
左から耳石、鱗棘、脊椎骨、鱗。



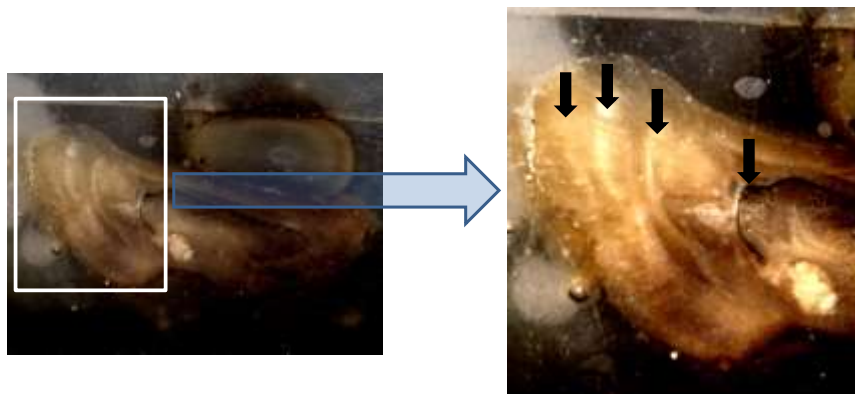
図(2)-3. 耳石の日周輪  
左：耳石の全体像、右：耳石内部に形成された日周輪

2013年には、特に重要な漁業対象種であり、調査に必要な標本の継続的確保が可能な種として、コイ科、ギギ科、パンガシウス科およびタイワンドジョウ科から各1種、合計4種を暫定的に選定したが、2014年以降はギギ科*Hemibagrus nemurus*とコイ科*Labeo chrysophekadion*の2種に研究対象意を絞り込んだ(図(2)-4)。



図(2)-4. 調査地における代表的な漁業対象種  
左：ナマズ目ギギ科*Hemibagrus nemurus*、右：コイ科*Labeo chrysophekadion*

上記2魚種では共通して、耳石に通常見られる年輪構造が不鮮明であることが多く、耳石は有効な年齢査定形質とは言えない。ブレーク/バーン法(耳石を火であぶり年輪を明瞭化する手法)(図(2)-5)の適用により、特に*Hemibagrus nemurus*の耳石年輪の視認性は向上したが、両種とも鱗棘(特に胸鱗)の方が年輪の視認性に優れていることから、2014年以降は鱗棘を用いて年齢解析を行った。



図(2)-5. ブレーク/バーン法により視認性の向上した*Hemibagrus nemurus*の耳石

上記2魚種に加え、シリントーンダムで漁獲される小型ニシン科魚類の*Clupeichthys aesarnensis*についても毎月標本を採集し、耳石日周輪および生殖腺の解析を行い、その成長や繁殖に関する生態的知見を収集した(図(2)-6)。本種は最大でも約70 mmの小型魚であるが、ダム貯水池などに大量に生息することから、現地では乾物や発酵食品などに加工される重要な漁業資源となっている。



図(2)-6. *Clupeichthys aesarnensis*親魚(体長43 mm)

魚類の食性解析は、コイ科の*Henicorhynchus siamensis*と*Labeo chrysophekadion*および*Hemibagrus nemurus*の消化管内容物観察によって行った。*Henicorhynchus siamensis*はカンボジアではトレイリエルと呼ばれ(注:近縁な*H. lobatus*についても同じ名で呼ばれる)、メコン流域国では主に発酵食品の原料として利用され、メコンで最大の漁獲量を持つ極めて重要な魚類である(図(2)-7;サブテーマ3も参照)。本種についてはメコン川中流域を流れる支流ムン川下流に位置するシリントーンダム貯水池で採集した19個体(全長130 - 190 mm)について食性分析を行った。本種は他のコイ科と同様に明瞭な胃を持たないため(無胃魚)、前腸部の膨大部内に残存する餌料についてその組成を観察した。*Labeo chrysophekadion*についても44個体、また*Hemibagrus nemurus*については21個体の胃内容物を観察した。なお、これら魚種の食性解析は、前述の炭素窒素安定同位体比に基づく魚類の食物網解析の検証データを得ることを目的として行った。



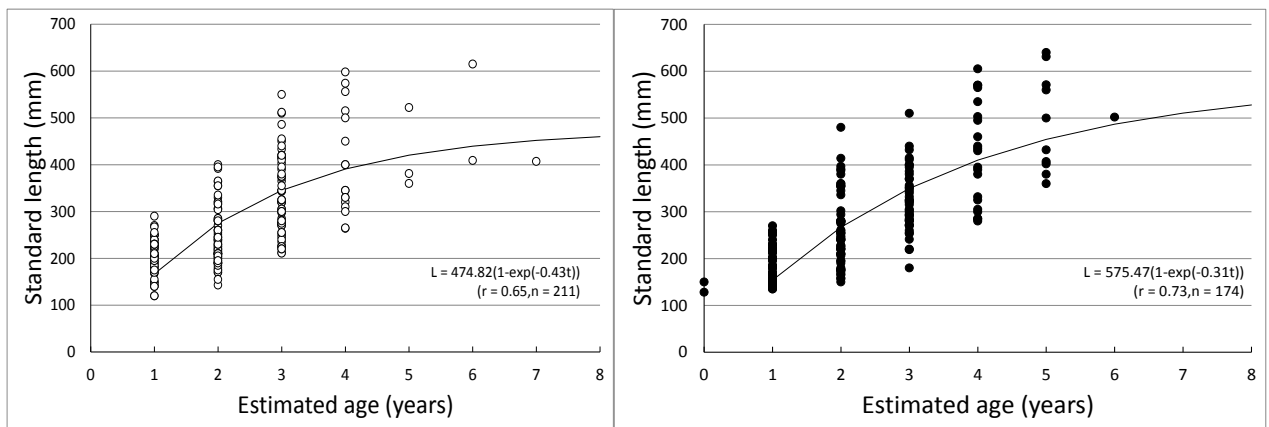
図(2)-7. コイ科*Henicorhynchus siamensis*

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 鱗棘による成長解析結果

上の2種とも鱗棘の切片に最も安定した年齢形質（年輪）が発現することは明らかであったことから、鱗棘を用いた年齢査定を行い両種の成長モデルを推定した。

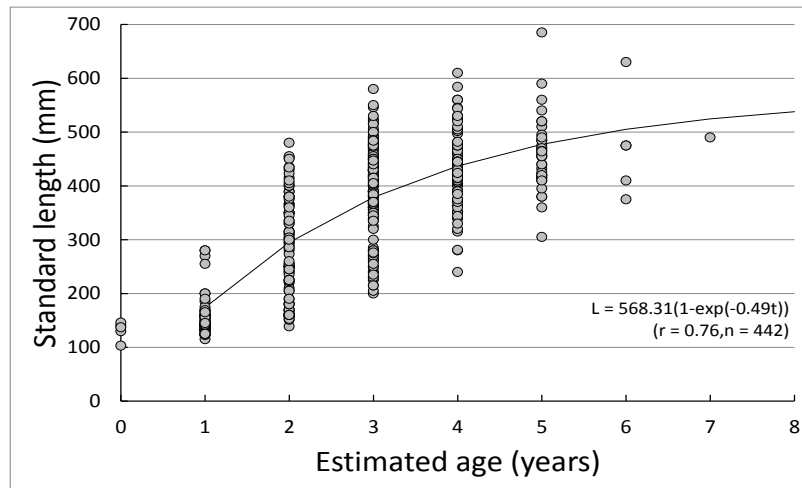
成長解析の結果、*Hemibagrus nemurus*ではオスがメスより成長が速いことが示唆された（図(2)-8）。また、本調査で得られた標本（375個体）のうち、最大体長が約60 cm、推定最長年齢（≒寿命）は7歳であった。既報では、本種の最大体長は80 cm以上とされているが、そのような大型個体は今回確認されておらず、漁獲対象個体としては最大体長60 cm（最長年齢7歳）を想定すべきものと判断された。



図(2)-8. *Hemibagrus nemurus*の成長モデル

左：メス、右：オス

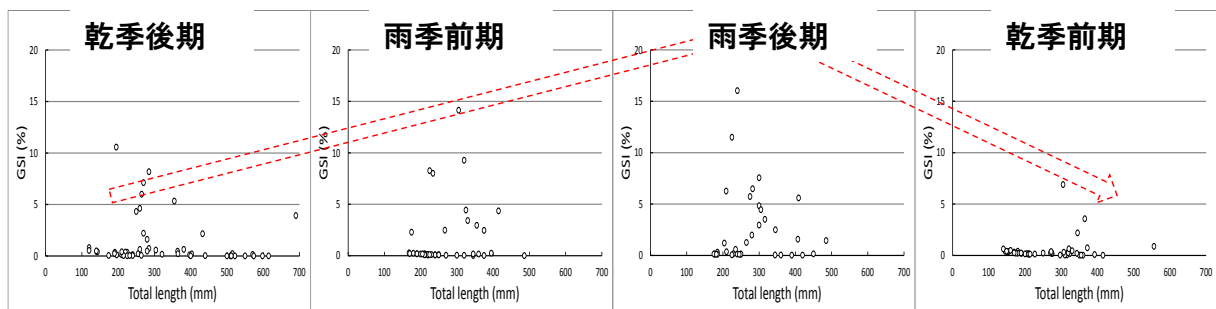
コイ科*Labeo chrysophekadion*についても同様の解析を行った。本種では、雌雄に成長速度の差が見られなかったため、雌雄で同一のモデルを採用した（図(2)-9）。本調査で得られた標本（442個体）では、体長約70 cmが最大で、推定7歳であった。一方、既報によれば、本種の最大体長は90 cmとされるが、本調査ではそのような大型個体が未確認のため、漁獲対象個体としては最大体長70 cmが妥当であると考えられた。



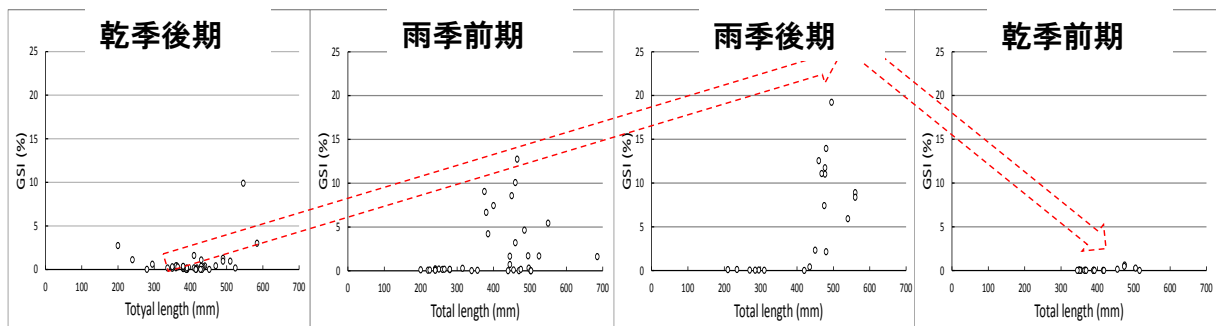
図(2)-9. *Labeo chrysophekadion*の成長モデル

## (2) 繁殖生態

これら2種について、メスの生殖腺熟度指数（GSI、生殖腺重量／体重×100％）を測定し、季節変異および体長との関係を種間で比較した（図(2)-10, 11）。その結果、両種とも繁殖盛期は雨季（5-10月）であることが示された。しかし、*Hemibagrus nemurus*については乾季後期（2-4月）にGSIが10%を超えるメス個体が観察されており、乾季における繁殖の可能性も示唆された。



図(2)-10. *Hemibagrus nemurus*の生殖腺熟度指数季節変異と体長との関係



図(2)-11. *Labeo chrysophekadion*の生殖腺熟度指数季節変異と体長との関係

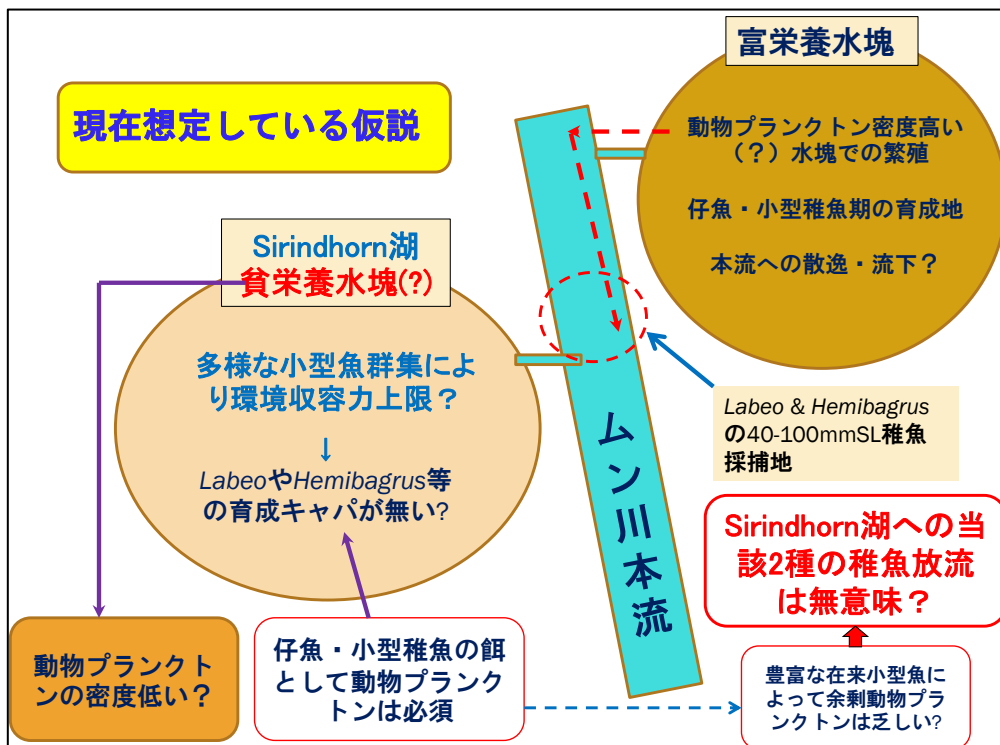
さらに、GSIと体長の関係から、メスの性成熟サイズは*Hemibagrus nemurus*で>20 cm、*Labeo*

*chrysophekadion*で>40 cmと推定された。前述のモデルによる成長速度の結果と照らし合わせると、メスの成熟年齢は*Hemibagrus nemurus*で2-3歳、*Labeo chrysophekadion*で3-4歳と推定された。

### (3) ムン川水系における稚魚の分布

調査期間中、シリントーンダムでは上述の2種 (*Hemibagrus nemurus* および *Labeo chrysophekadion*) について、親魚は周年採集されたが稚魚は一尾も確認されなかった。このことから、同貯水池ではこれら2種は繁殖していない可能性が高いと考えられる。一方、同貯水池が流入するムン川（メコン川支流）での魚類調査では両種の親魚に加え、周年にわたって稚魚も出現しており、日齢から当歳魚（0+歳）と判断されている。したがって、2種の魚類は同川もしくはその周辺で繁殖していると推定される。

シリントーンダムは貧栄養湖に分類され（サブテーマ1参照）、一次生産や動物プランクトンの生産も限定的である。しかし一方で、放流魚を含め他種多様な小型魚が生息し、その捕食圧によって餌資源などの環境収容力は限界に達している可能性がある。現在、タイ水産局は在来種の資源保全を目的に同貯水池と周辺水域に在来魚の種苗放流を行っているが、上記の理由により *Hemibagrus nemurus* と *Labeo chrysophekadion* の2種に関しては、種苗放流が貯水池の資源回復に寄与していない可能性が高い（図(2)-12）。さらに、同湖に流入するランドムノイ川は極めて小規模な細流であり、魚類が同川に遡上し産卵しても、孵化し成長するには不適な環境であると考えられる。



図(2)-12. *Hemibagrus nemurus*および*Labeo chrysophekadion*の稚魚分布に関する仮説

#### (4) 食性解析

*Henicorhynchus siamensis*の食性解析から、本種はデトリタスおよび藻類を主に摂餌することが明らかとなった。藻類では緑藻の*Closterium*、*Cosmarium*、藍藻の*Chroococcus*、*Oscillatoria*、珪藻の*Cyclotella*、*Eunotia*、*Eudorina*、*Auracoseira*、*Cradicula*が優占した。*Labeo chrysophekadion*も同様にデトリタスや藻類（珪藻、藍藻、緑藻）が主な消化管内容物であり、砂粒も多く認められることから、主に底生の有機物を摂食しているものと推察される。*Hemibagrus nemurus*については、小エビや水生昆虫が多く観察され、これらを摂食する際に迷入したと思われる草の破片なども見られるものの、本種が強い肉食性を持つことが示された。また、アリと思われる陸上昆虫も認められたことから、陸棲の流下昆虫も重要な餌生物であると考えられた。

なお、サブテーマ1からはメコン川流域のダム貯水池と自然湖沼から採取した*Henicorhynchus siamensis*の窒素安定同位体比 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) が6-10 ‰、また*Hemibagrus nemurus* (*H. spilopterus*)の $\delta^{15}\text{N}$ が11-13 ‰の範囲で変動していた。このことから、後者が前者よりも栄養段階において1つほど高いレベルにある高次の栄養段階生物であることが示されている。このことが、本サブテーマの食性解析からも裏付けることができた（注： $\delta^{15}\text{N}$ は捕食によって栄養段階が1つあがるごとに約3.4 ‰上昇する）。

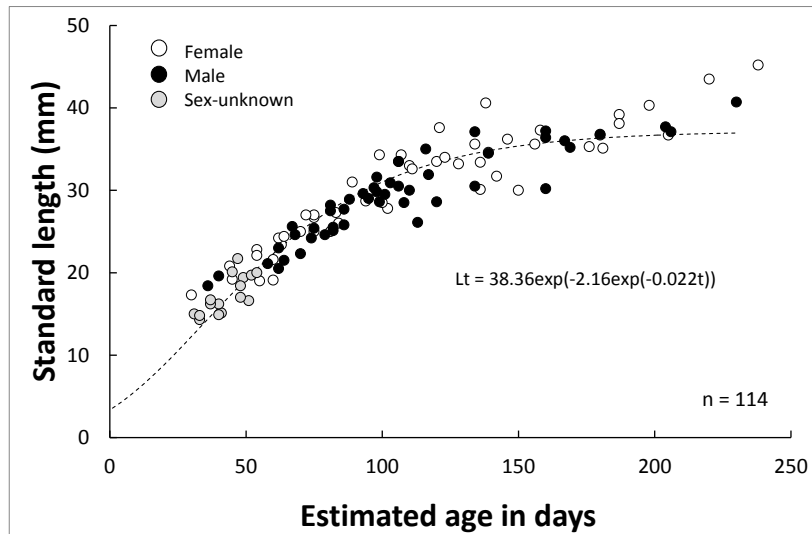
#### (5) *Clupeichthys aesarnensis*の成長と繁殖

本種の耳石日周輪（図(2)-13）の観察から、その成長パターンや寿命を推定、また同時に生殖腺を観察して繁殖に関する知見を得た。



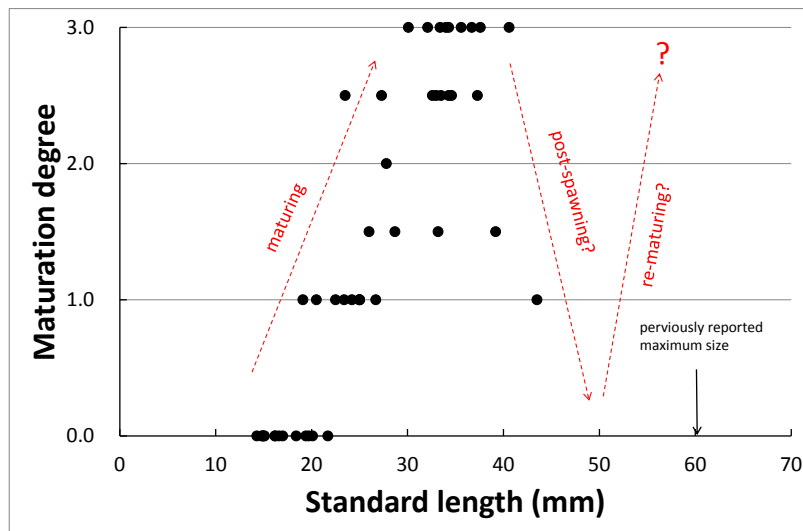
図(2)-13. *Clupeichthys aesarnensis*の耳石（扁平石）の日周輪

本種は雌雄間で成長差が認められないため、雌雄で1つの成長モデル（Gompertzモデル）を適用した（図(2)-14）。既報では最大体長が60 mm以上とされるが、本調査では体長42 mmが確認された中で最大であった。本調査で観察された最長日齢が250日弱であることから、約8ヶ月の寿命を有するものと推定された。



図(2)-14. *Clupeichthys aesarnensis*の成長モデル

本種の生殖腺熟度が最大値となる繁殖時の体サイズは35-40 mmに集中し（図(2)-15）、成長モデルに照らし合わせると繁殖日齢は生後約100日過ぎであると推定された。



図(2)-15. *Clupeichthys aesarnensis*の体サイズと生殖腺熟度

#### (6) 漁業資源の保全に関する提言

*Hemibagrus nemurus*および*Labeo chrysophekadion*の2種に関しては、その親魚の個体群サイズを一定レベルに維持し、その生態系サービスを持続的に享受するために、稚魚や未成魚への漁獲圧を低減することが重要であろう。そのためには、これら2種について地域ごと（特にタイにおけるメコン川最大支流で、パクムダムによって魚類の回遊が制限されるムン川）に繁殖域を特定する必要がある。そして、そこでの繁殖期（主に雨季）の漁獲圧を低減するなど、なんらかの規制が必要であろう。

一方、*Clupeichthys aesarnensis*は短命で周年産卵することから、明瞭な繁殖期が存在せず、季節



的な漁獲規制は有効でない。本種の繁殖場所は未だ明らかにされていないが、今後の調査からシリントーン貯水池での繁殖域が特定されれば、そこでの漁獲規制を通して資源維持を図ることは可能である。このような措置を施しても資源水準の低下が認められる場合、期間限定的な全面禁漁を適応することも必要となる。短命魚であることから、1-2年程度の禁漁でも資源回復は期待できる。

なお*Hemibagrus nemurus*および*Labeo chrysophekadion*については、人工種苗放流による遺伝的かく乱が進行している可能性もある。したがって、マイクロサテライトDNAマーカーによる解析を通じた種内遺伝的多様性なども今後評価してゆく必要がある。また*C. aesarnensis*についても、ダム貯水池などの隔離された個体群では、遺伝的多様性が低下していることが考えられる。よって本種の持続的な漁業を保証するために、ダム建設後の経過年数の異なる複数の貯水池を対象に、広域的に個体群の遺伝的健全性を評価することが望まれる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

これまで基礎生物学的情報がほとんど得られていないメコン川の在来水産有用魚について、その年齢形質を絞り込み成長モデルを構築できたこと、さらに生殖腺の解析から繁殖生態についても一定の知見を得られたことは、これら魚種の持続的な資源管理にむけた施策を講じるうえで貴重な情報となる。特に*Hemibagrus nemurus*と*Labeo chrysophekadion*の2種は、インドシナ半島に広く自然分布する魚種であり、本研究で示された手法と結果は、この地域の個体群の調査や資源保全にも広く応用が利くものであると言える。本研究で得られた成長モデルに基づく両種とも成長が遅く、一般的な商品サイズ（全長20-30 cm）に達するには2-3年を要することから、現時点では養殖による生態系サービスへの寄与は低いと考えられる。これら2種の養殖技術開発には、成長速度向上のための育種および適正餌料の開発が求められる。

*Clupeichthys aesarnensis*に関しては、これまでも資源学的な調査は成されてきたが、日齢に基づく成長解析は、本研究により初めて行われたものである。本種は、研究対象地となったシリントーンダムのみならず、メコン流域に増えつつあるダム貯水池において重要な漁業資源である（例えばラオスのナムグムダム貯水池など）。本研究で示された調査手法や結果についても、より広域的な種また個体群の保全と管理に資するものと考えている。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

タイ国水産局は、これまで在来魚の増殖とそれによる食糧増産を目的に、各地の湖沼や河川へ漁業重要魚種の人工種苗放流を国策として盛んに実施してきた。そしてシリントーンダムでも在来魚の放流が今後も継続されることが予想される。しかし、同貯水池では今回の調査からギギ科*Hemibagrus nemurus*およびコイ科*Labeo chrysophekadion*の稚魚が確認されていないことから、これら2種の人工種苗の放流水域としては不適であると考えられる。さらに、パンガシ

ウス科 *Pangasianodon hypophthalmus* についても、重要放流魚種として同湖に放流されてはいるものの、稚魚が全く観察されないことから、同種についてもシリントーンダム貯水池への放流について再検討が必要であろう。これらの観察結果は、本来河川に生息するこれらメコン川の淡水魚が、ダムで堰き止められた貯水池という止水環境に十分に適応することができないこと、また種苗放流と養殖が失われた生態系サービスの完全な代償になるわけではないことを示すものである。

## 6. 国際共同研究等の状況

(耳石採集)

カウンターパート: Tuantong Jutagate 准教授、Faculty of Fisheries, Department of Agriculture, Ubon Ratchathani University、タイ王国 (2009年 MOU締結)

(現地調査・ロジスティクス)

カウンターパート: ラオス国立水生生物資源研究センター (LARReC) (国際農林水産業研究センターがラオス国において実施している「インドシナ農山村プロジェクト」内の課題の一つである「Low-input and Sustainable Aquaculture and Fisheries」における連携)

## 7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

2012年8月に、タイ国立ウボンラチャタニ大学農学部水産学科において、下記演題でセミナーを実施した。

演題：耳石日周輪を用いた魚類の孵化日推定および成長解析

セミナー講師：森岡伸介

セミナー参加者：タイ国内各地の大学・水産局からの参加者15名

## 8. 引用文献

- 1) G. TSERPES, AND N. TSIMENIDES: Determination of age and growth of swordfish, *Xiphias gladius* L., 1758, in the eastern Mediterranean using anal-fin spines Fish. Bull. 93: 594–602 (1995)
- 2) D.L. BUCKMEIER, E.R. IRWIN, R.K. BETSILL, AND J.A. PRENTICE: Validity of otoliths and pectoral spines for estimating ages of Channel catfish. North Amer. J. Fish. Mgmt. 22: 934–942 (2002)
- 3) M.A. KHAN, AND S. KHAN: Comparison of age estimates from scale, opercular bone, otolith, vertebrae and dorsal fin ray in *Labeo rohita* (Hamilton), *Catla catla* (Hamilton) and *Channa marulius* (Hamilton) Fish. Res. 100: 255–259 (2009)
- 4) D.H. SECOR: Longevity and resilience of Chesapeake Bay striped bass. ICES J. Mar. Sci. 57: 808–815 (2000)
- 5) S.B. IRVINE, J.D. STEVENS, AND L.J.B. LAURENSEN: Comparing external and internal dorsal-spine bands to interpret the age and growth of the giant lantern shark, *Etmopterus baxteri* (Squaliformes: Etmopteridae) Environ. Biol. Fish. 77: 253–264 (2006)
- 6) S. POUNGCHAREAN: Distribution and early-life development of Thai river sprat *Clupeichthys aesarnensis* Wongratana, Larvae, in Pasak Jolasid Reservoir, Lop Buri Province, Thailand. Kasetsart J. (Nat. Sci.) 40: 188–195 (2006)
- 7) T. JUTAGATE, AND S.S. DE SILVA: Yield, growth and mortality rate of the Thai river sprat, *Clupeichthys aesarnensis*, in Sirinthorn Reservoir. Thai. Fish. Mgmt. Ecol. 10: 221–231 (2003)

### (3) メコン淡水魚の回遊生態解明

独立行政法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究領域 生態系機能評価研究室 福島 路生

平成24～26年度累計予算額：26,346千円

(うち、平成26年度予算額：9,370千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

ダム開発が急速に進む国際河川メコン川では、世界一の漁獲量を誇るこの川の内水面漁業という生態系サービス、そしてアマゾン川について淡水魚の生息種数が多い極めて高い生物多様性が、今後どのようにダムによって影響を受け、それをどのように回避・緩和するかについて早急に対策を立てなければならない。そのための研究の第一歩として、この川の漁業を支える回遊魚の生態を解明することを試みた。魚類が頭部に持つ耳石という骨組織には回遊する先々の河川水からその場所に固有な割合、濃度でストロンチウム (Sr) やバリウム (Ba) などの微量元素が取り込まれる。この原理を応用して、ラオス、タイ、カンボジアのメコン流域からトレイリエルと呼ばれるメコンで最も漁獲量の多い魚種を採集し、その回遊生態またダムの影響についての知見を得た。その結果、本種の耳石中SrとBaのプロファイルから1) 同じ地域で捕獲された魚は群れをなして回遊すること、2) 灌漑用ダムによって著しく分断されたタイのガム川では、ダムに魚道が付設されているにもかかわらず、極めて狭い範囲の回遊しか行っていないこと、3) 2014年より建設が開始されたラオス南部のメコン本流ダム、ドンサホンダムの上下流から採集された本種は、すべて同じ地域で誕生した後にダムサイト上下流に分散しており、ダムが完成するとこの個体群の回遊経路は完全に断たれてしまう。今後10年ほどの間に建設が予定されているダムは他にも数10基ほどあり、メコン流域は一層の分断化が進み、生態系サービスと生物多様性への影響も甚大なものになる可能性が高い。

#### [キーワード]

回遊魚、ダム開発、流域分断、耳石、微量元素分析

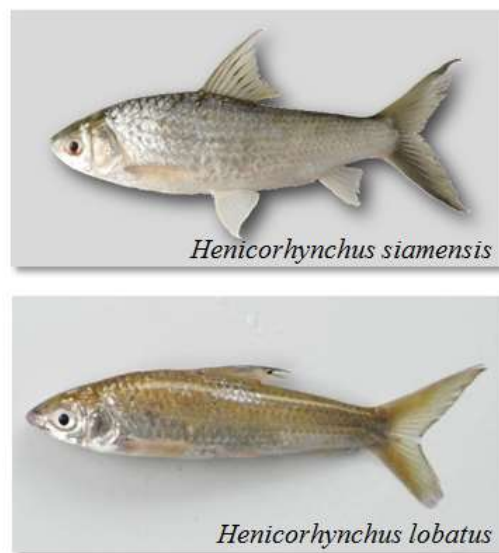
#### 1. はじめに

メコン川は内水面漁獲量 (260 万トン/年) が世界最大の規模にあり、それを支える魚種の多様度もアマゾン川について世界で2番目に高い1200種とも推定される。生物生産と生物多様性がともに極めて高い河川である。その高い漁業生産と魚類の多様性は、広い流域 (日本の国土面積の2倍) を生涯を通じて回遊する、いわゆる回遊魚によって支えられている。

本サブテーマが対象としたトレイリエル 2種 (*Henicorhynchus siamensis* および *H. lobatus*) は、体長15 cmほどの小型のコイ科魚類であるが、両者合わせた漁獲量がメコン川の魚の中で最大 (全魚種の>12%) であり、経済的にも極めて重要な水産資源である (写真1)。本種が回遊魚であることは、地元の言い伝えから古くからわかっていたが、それを裏付ける科学的証拠、また詳し

い回遊の実態についての知見はほとんど得られていない。

本研究では、耳石と呼ばれる骨組織に魚が生存中に河川水から取り込んだ微量元素を分析するという比較的新しい手法を用いて本種の回遊行動を調べた。そして、既に支流に建設されたダムの影響を評価し、同時にメコン本流に建設が進められるラオス南部のドンサホンダムが本種に与える潜在的影響について予測した。



図(3)-1. トレイリエルと呼ばれる*Henicorhynchus*属のコイ科魚類2種

## 2. 研究開発目的

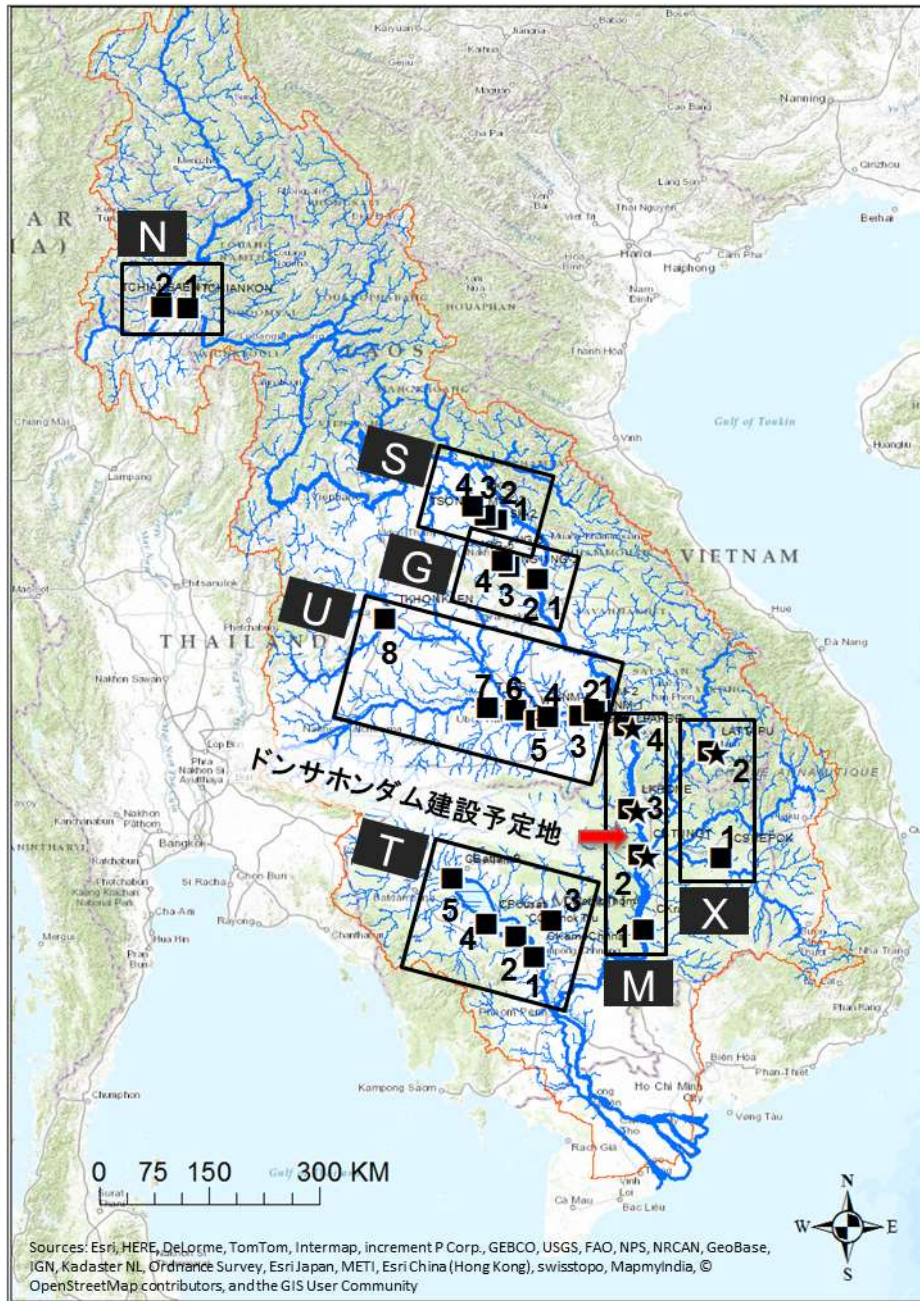
上述の通り、メコン川流域で重要な水産資源であり、大きな生態系サービスである回遊魚、中でも漁獲量の最も多い魚種トレイリエル2種(図(3)-1、*Henicorhynchus siamensis*, *H. lobatus*)について、その回遊生態を明らかにし、可能な限り回遊経路を特定すること。またこれまで、そして将来にわたるメコンダム開発による流域分断化の進行状況を可視化して回遊魚への影響について空間明示的に考察を行う。

## 3. 研究開発方法

メコン流域の6つの地域(タイ北部メコン本流、ソクラム川、ガム川、ムン川、トンレサップ湖、メコン下流本流、図(3)-2)から2007-2010年に採取した計200尾のコイ科魚類トレイリエルを分析の対象とした。メコン下流本流の調査地点は、ラオスが現在建設を進めるドンサホンダムの上流と下流に位置しており、ダムサイトを通過して*H. lobatus*が回遊しているか否かについて検証した。トレイリエルの耳石についてはレーザーアブレーションICP質量分析計(レーザーアブレーションNew Wave Research UP-213, 質量分析計Agilent 7500c)を用い各種の元素分析を行い、魚類採集地点から採取した河川水についても同様にICP質量分析計で元素濃度を定量した。耳石サンプルについては(1)耳石表面と(2)耳石切断面の核から外縁までの成長軸に沿ったプロフィール(図(3)-3)の2種類の元素分析を行った。定量した陽イオンは、 $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{44}\text{C}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,

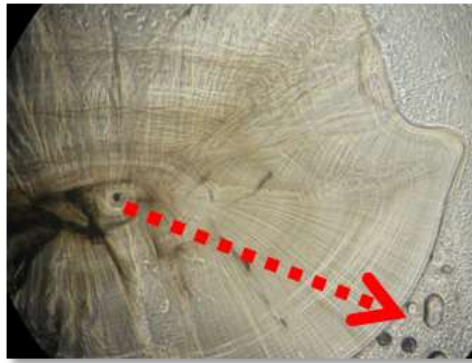
$^{66}\text{Zn}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{138}\text{Ba}$ である。内部標準に耳石中の $^{44}\text{C}$ を用い、外部標準としてNIST612ガラス標準試料を用いた。

河川水と耳石表面の元素濃度の関係は一次回帰分析によって求め、また採集地域間（6河川・湖沼）の元素濃度の違いについては線形判別関数分析によって評価した。判別の精度評価はjackknife法によった。すべての統計解析の有意水準は5%に設定した。



図(3)-2. メコン川のトレイリエル採集地域と地点

■: *Henicorhynchus siamensis* ★: *H. lobatus*. N = タイ北部、S = ソンクラーム川、G = ガム川、U = ムン川、X = セコン川、T = トンレサップ湖、M = メコン川本流。ドンサホンダム予定地を矢印で示す。



図(3)-3. 耳石断面における元素分析の方向

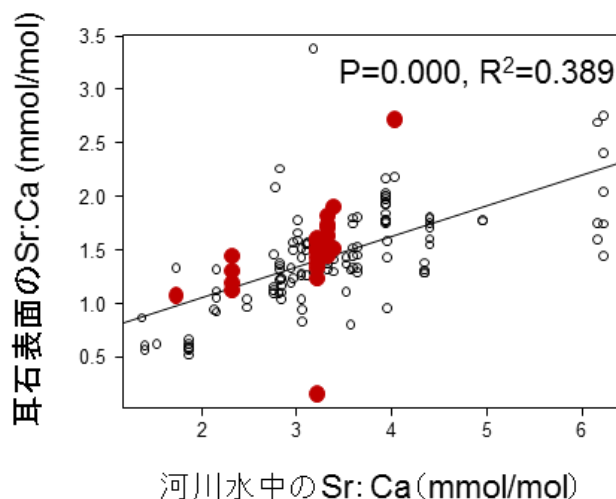
耳石核から外縁までを一定間隔（60 $\mu\text{m}$ ）で元素分析した。耳石は日々周囲の河川水から様々な元素を取り込んで層状に成長する組織である。そのため、矢印に沿った元素プロファイルから、その魚が死ぬまでに暴露された水質の変化を推定することができる。

最後に、ダムによる過去から現在、さらに今から10年後までのメコン流域の分断状況をGISによって解析した。高解像度の標高データから開発されたメコン川小流域ポリゴンデータに、メコン川委員会（Mekong River Commission）が作成したダムデータベース（MRC Basin Development Programme - BDP2 Hydropower Project Database, February 2009）を空間結合した。このデータベースには合計135基の水力発電ダムが登録されているが、そのうち35基が既存のダム、残り100基が計画中のダムである。35基のダムが1960年代から20年間隔でどのように流域を分断し、河川の連続性がどのように失われてきたかを概観し、回遊生態への分断の影響について考察した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 回遊履歴のマーカールとしての微量元素

耳石から定量した陽イオンは、Cu以外すべて定量限界を超えてその濃度を測定できた。耳石表面から測定した元素のうち、Na, Zn, Sr, Ba（のCaとの比）について採集地点の河川水との間で有意な正の傾きを持つ一次回帰式が得られた。特にSrに関しては、河川水—耳石表面との正の相関が最も高く（図(3)-4）、この元素(Sr)が河川中の濃度に比例して魚の耳石表面に取り込まれていることを意味する。つまりSrが回遊経路の指標として有力なマーカールとなることを示す。また河川水—耳石表面との関係はSrに限らずすべての元素においてトレイリエル2種（*H. siamensis* と *lobatus*）の間で有意な違いは認められなかった。



図(3)-4. 魚類採集地点の河川水と耳石表面のSr:Ca比  
(○: *H. siamensis*, ●: *H. lobatus*)

河川水中のMg, Mn, Zn, Sr, Ba (対Ca比) は河川間 (地域間) で有意な違いがあり、これら5元素を用いた線形判別関数からは、メコン下流 (本流) で100%、ムン川で98%、ガム川で90%など、非常に高い正答率が得られた (表(3)-1)。一方、耳石表面の元素ではMg, Mn, Sr, Baの4元素のみが河川 (地域) 間で異なり、これらの元素を変数とした線形判別関数はガム川の81%が最大で、ムン川 (71%)、トンレサップ湖 (64%) と正答率でみる判別能力はやや劣った。つまり耳石の元素情報だけからトレイリエルの採集河川を推定する精度は、河川水から判別するほどは高くなかった (表(3)-2)。耳石表面の元素による線形判別関数のうち、第1判別関数 (LDF1) と第2判別関数 (LDF2) は以下のように求められた。

$$\text{LDF1} = -0.065\text{Mg} - 0.167\text{Mn} + 1.327\text{Sr} - 0.297\text{Ba}$$

$$\text{LDF2} = 0.055\text{Mg} + 0.813\text{Mn} + 0.188\text{Sr} + 0.689\text{Ba}$$

これより、耳石に蓄積した微量元素の地域間の違い (コントラスト) はSrで最も顕著に表れ、次いでMnまたBaが違いが大きかったことが分かる。



表(3)-1. 河川水中のMg, Mn, Zn, Sr, Ba (対Ca比) を変数とした線形判別関数によってメコンの6河川を判別した結果。行方向が各河川の実際のサンプル数、列方向がその河川に判別されたサンプル数を示す。

	ソククラム川	ガム川	ムン川	セコン川	トンレサップ	メコン下流
ソククラム川	20	1	0	0	2	0
ガム川	0	27	0	0	1	2
ムン川	1	0	53	0	0	0
セコン川	0	2	0	10	2	0
トンレサップ湖	2	2	2	3	4	1
メコン下流	0	0	0	0	0	23

表(3)-2. *H. siamensis*の耳石表面のMg, Mn, Sr, Ba (対Ca比) を変数とした線形判別関数によってメコンの6河川(地域)を判別した結果。行方向が各河川の実際のサンプル数、列方向がその河川に判別されたサンプル数を示す。

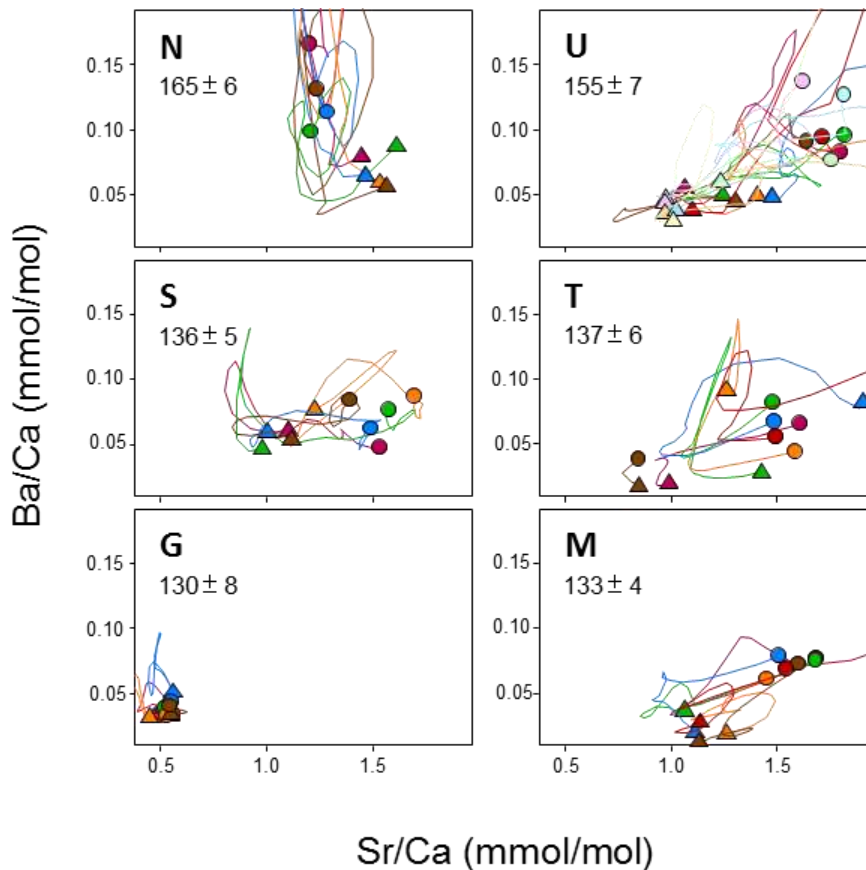
	タイ北部	ソククラム川	ガム川	ムン川	トンレサップ	メコン下流
タイ北部	5	0	2	3	0	0
ソククラム川	1	3	3	25	3	2
ガム川	1	0	17	2	0	1
ムン川	3	5	1	37	3	3
トンレサップ湖	0	0	0	7	14	1
メコン下流	3	1	0	9	4	10

## (2) トレイリエル (*H. siamensis*) の回遊とダムによる影響

採集したトレイリエル (*H. siamensis*) について、耳石に蓄積されたSrとBaの濃度変化(プロファイル)を調べると、以下のことが分かった(図(3)-5)。

- 1) それぞれの地域内では、個体間で元素プロファイルの形状が似通っており、ほぼすべての個体が同じ環境(場所)で誕生し、群れを形成して同じ経路を回遊していた可能性が高いこと。
- 2) しかし6つある地域間では、回遊の経路と規模が大きく異なる。
- 3) 中でもガム川(G)の魚は、比較的大型(>130 mm)の個体であるにも関わらず、耳石中のSrとBaの濃度変化がほとんどなく、グラフの狭い範囲内で完結している。そして他の地域のプロファイルとも重複しない。

このガム川という流れわずか100kmほどの支流(図(3)-2)には、既に灌漑用のダムが5基も建設されており、既に河川は著しく分断されている。これら障害物によりトレイリエルの回遊が大きく制限されていること、そして恐らくガム川からメコン本流への回遊はなく、生涯をこの小さな支流で終えていることが3)の意味することだと考える。

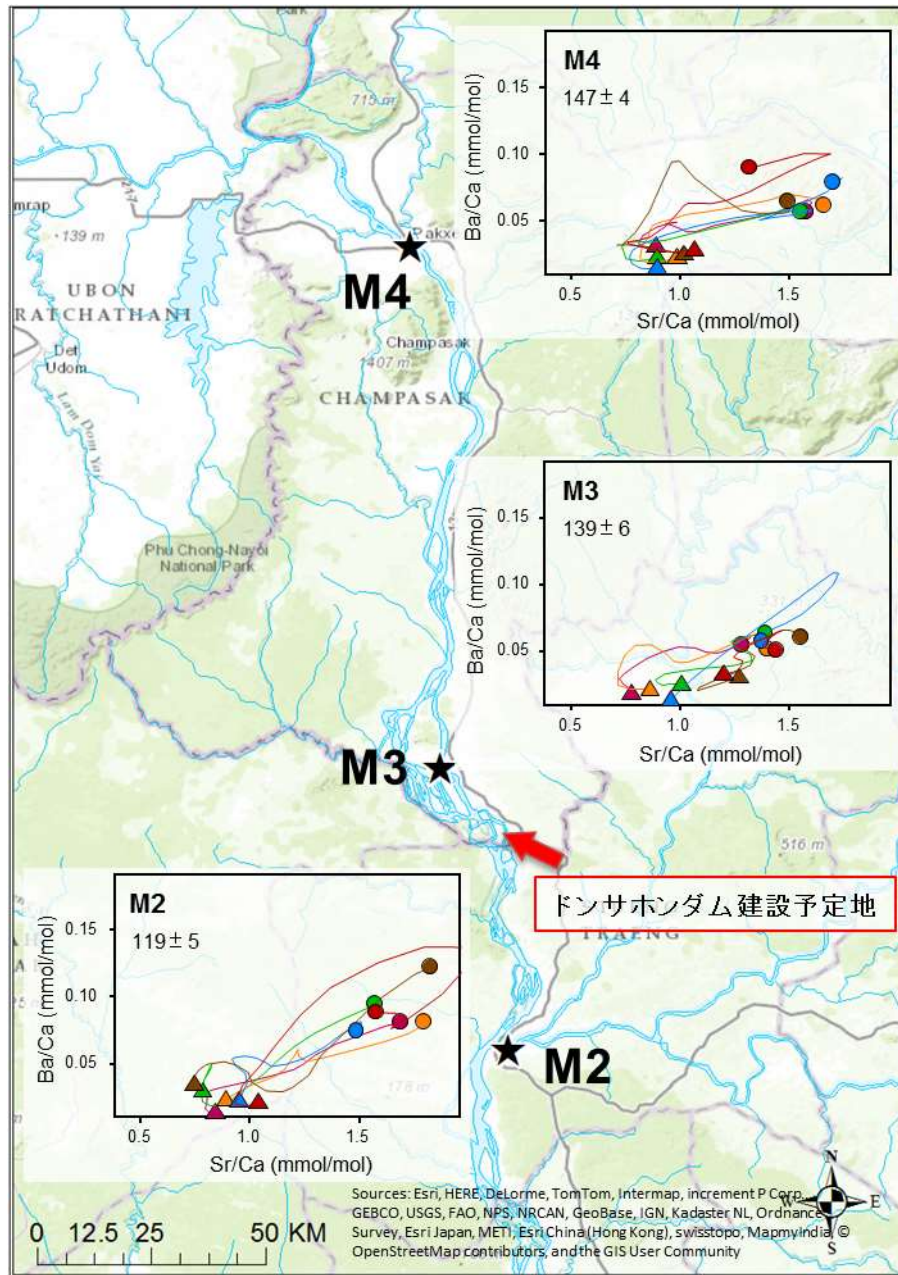


図(3)-5. 6地域で得られたトレイリエル*H. siamensis*耳石のSr-Baプロファイル  
 △: 耳石核. ○: 耳石外縁. 線の色は個体の違いを表す. 各パネル中の数字(165±6など)は、個体の平均体長±標準偏差を示す. 地域記号は図(3)-2を参照のこと。

### (3) トレイリエル (*H. lobatus*) の回遊とダムによる影響

次にドンサホンダム建設予定地周辺で大量に漁獲されるもう1種のトレイリエル*H. lobatus*について得られた回遊生態の知見とダム開発の影響について紹介する。メコン川本流(図(3)-2と5のM)の魚類採集地点は、このダム建設予定地を中心に約200 km区間に3地点(下流1地点と上流2地点)を設けた図(3)-6)。これらの地点で採取された本種のSr-Baプロファイルから以下のことが示された。

- (1) Sr-Baプロファイルが3つの地点間で酷似した。
- (2) 魚が誕生した場所のSr-Baの値に地点間で違いがない(グラフ中の▲印; Pillai's trace = 0.190,  $F_{4, 28} = 0.733$ ,  $p > 0.05$ )。
- (3) しかし、死んだ場所(漁師によって漁獲された場所)のSr-Ba値は、それぞれの地点の水質を反映して異なる(グラフ中の●印; Pillai's trace = 0.811,  $F_{4, 28} = 4.779$ ,  $p = 0.005$ )。

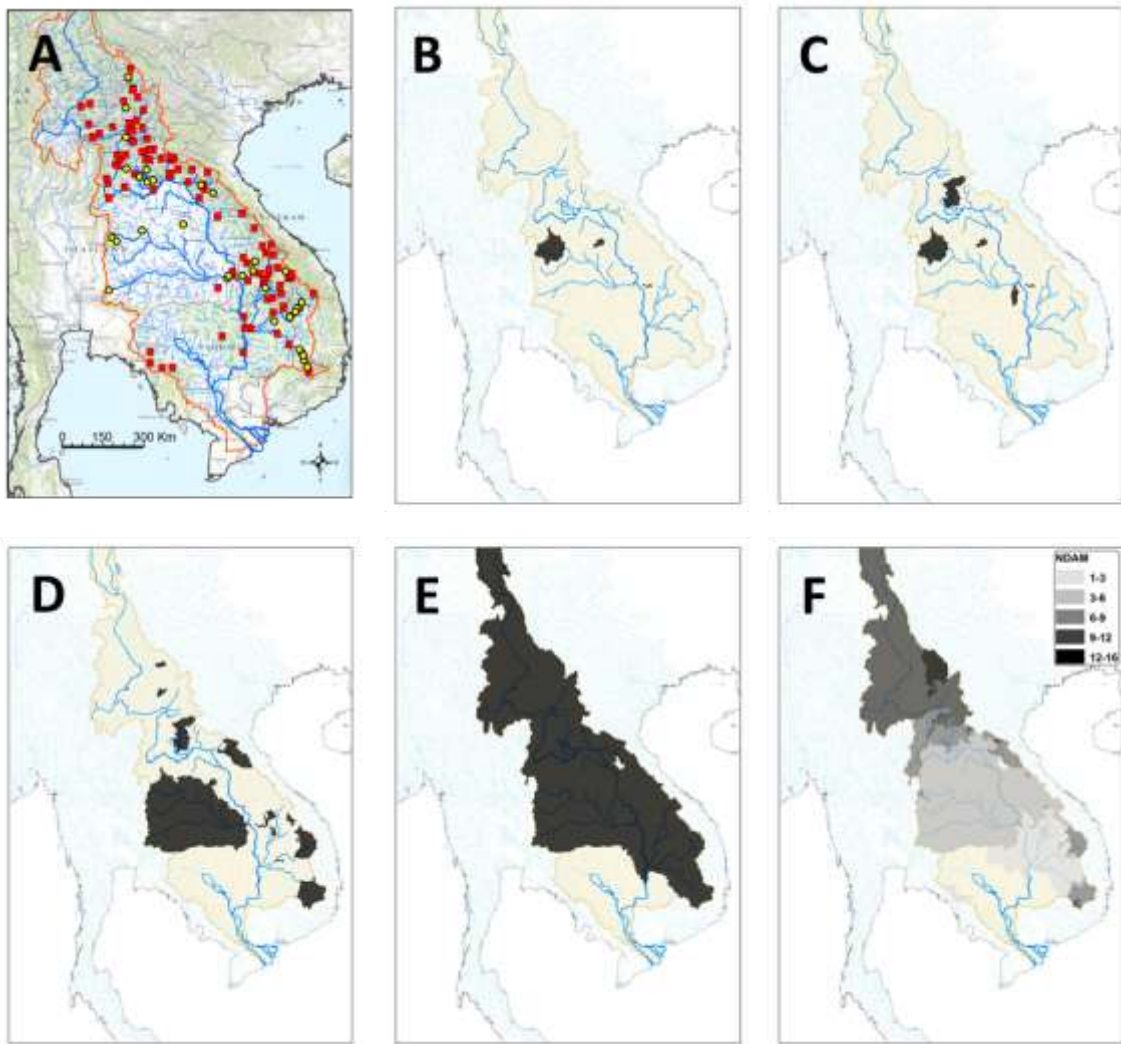


図(3)-6. ドンサホンダム建設予定周辺から採取した*H. lobatus*耳石のSr-Baプロフィール

以上のことは、これら3地点で捕獲されたトレイリエルが、同じ場所で誕生（孵化）し、その後、ダム建設予定地を通過して上流（または下流）に分散していることを示唆する。本種の遺伝的多様性を調べた先行研究<sup>1)</sup>によると、上流に向かうにつれて本種の遺伝的多様度は増しており、これは下流から上流へ遡って分散回遊する可能性の高いことを示している。本研究と遺伝子解析の結果から推察すると、ドンサホンダムは完成後に本種の回遊経路を遮断し、その個体群に確実に甚大な影響を及ぼすことになるであろう。他の回遊魚への影響も合わせて考えると、この地域の漁業また経済全般をも揺るがしかねない大きな問題を抱えたダム開発である。

#### (4) メコン流域のダムによる分断化の履歴と将来

メコン川流域には2009年時点で既に35基の発電用の大型ダムが建設され、今後さらに約100基のダム開発が計画されている。その多くはメコン川左岸、ラオスの山岳地帯に計画されている（図(3)-7A）。現時点で最上流の中国領土内にしか建設されていないメコン本流のダムであるが、下流ラオス、タイ、カンボジア領土内に11の発電ダム開発のプロジェクトが浮上している。メコンのダム開発は、1964年のタイのウボンラタナ(ウボンラット)ダムの建設で開始された（図(3)-7B）。その後、大きなダムとしてはラオス、ビエンチャン近郊にナムグムダムが建設され（1971、図(3)-7C）、90年代にはタイ最大のメコン支流、ムン川下流にパクムンダムが造られることとなる（図(3)-7D）。計画された11基のメコン本流ダムのうち2基（サヤブリダムとドンサホンダム）はいずれもラオス政府によって建設が正式に承認され、現在建設が進められている。2020年までに、本流最下流にカンボジアのサンボ-ダムが完成すると、メコン流域の大部分が（海から）分断された状態となる（図(3)-7E）。結果としてメコン川流域は下流から上流に向かって段階的に流域分断の度合いを増し、回遊魚の移動が次第に困難になることが予想される（図(3)-7F）。例えば、パンガシウス科に属するナマズの仲間など、漁業資源としても非常に価値の高い魚類の中には、海で成長した後に上流のラオスやタイ領土内で産卵する魚類も報じられており、これら長距離の回遊を行う魚類へのダムの影響は極めて甚大となることが予想される。耳石の微量元素分析から明らかとなったコイ科淡水魚トレイリエルへのダムの影響、特に建設が開始されたばかりのラオス南部のドンサホンダムの回遊経路への影響と合わせて考えてみてもメコン漁業にダム開発が与える打撃は極めて大きい。



図(3)-7. メコン川流域のダムとそれによる流域分断状況の変遷

A) メコンに既存の水力発電ダム (●) と計画中的ダム (■)、B) 1960年代の流域分断状況、C) 1980年代の分断状況、D) 2000年代の分断状況、E) 2020年代の分断状況、F) 2020年代までに下流に建設されるダムの分布。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

メコン川のダム開発による魚類を中心とする生物多様性への影響、また漁業を通じて得られる生態系サービスへの影響を予測するうえで、主要な淡水魚類の回遊生態を解明することは極めて重要である。本研究は、メコン流域の3か国にまたがる広大な調査地を対象に、主要な漁業対象魚種の回遊生態を明らかにし、メコン支流においてダムによる分断の影響が回遊行動に既に見られていること、また現在建設が進められているメコン本流ドンサホンダムにより本種の回遊が著しく阻害されることを明らかにした。

1960年代から現在、そして未来に向けて、大型ダムによってどのように流域が分断されてきたか、そして今後の分断化がどのように進行するかをGIS解析によって視覚的に明示した。これまで耳石解析から明らかにした淡水魚の回遊生態とも照らし合わせて考えると、ダム開発の進行とともに回遊魚の生息はますます危険にさらされ、回遊魚で支えられたこの地域の内水面漁業が大きな打撃を受けることは間違いないだろう。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

外務省は平成22年度からメコン地域への総額6,000億円の政府開発援助（ODA）を行っており、その中でグリーン・メコンと呼ばれるイニシアティブを設け、「豊かな生物多様性」と「豊かな国土と水資源」という本プロジェクトに深く関係する目標を掲げている。メコン川委員会などとも連携し、本研究の成果を日本からの開発援助や現地の行政に活用されるよう働きかけてゆきたいと考える。

## 6. 国際共同研究等の状況

### (耳石採集)

カウンターパート：Tuantong Jutagate准教授、Faculty of Fisheries, Department of Agriculture, Ubon Ratchathani University、タイ王国（2009年 MOU締結）

### (耳石採集)

カウンターパート：Pisit Phomikong博士、Department of Fisheries, タイ王国

### (魚類の同定)

カウンターパート：Chaiwut Grudpan、Faculty of Fisheries, Department of Agriculture, Ubon Ratchathani University、タイ王国

### (カンボジア・トンレサップ湖周辺の現地調査)

カウンターパート：Pao Srean講師、Research and Development Center, University of Battambang、カンボジア

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) M. FUKUSHIMA, T. JUTAGATE, C. GRUDPAN, P. PHOMIKONG and S. NOHARA: PLOS ONE, 9, 8, DOI: e103722 (2014)  
 “Potential effects of hydroelectric dam development in the Mekong River Basin on the Migration of Siamese mud carp (*Henicorhynchus siamensis* and *H. lobatus*) elucidated by otolith microchemistry”
- 2) P. PHOMIKONG, M. FUKUSHIMA, B. SRICHAROENDHAM, S. NOHARA and T. JUTAGATE  
 T: Riv. Res. App., DOI: 10.1002/rra.2816. (2014)  
 “Diversity and community structure of fishes in the regulated versus unregulated tributaries of the Mekong River”

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) E. BARAN, B. KANG, N. CHUM, M. FUKUSHIMA, T. JUTAGATE, T. HAND, and K. HORTLE: Nakano S., T. Yahara, T. Nakashizuka editors. *In: Biodiversity Observation Network in Asia-Pacific Region: Towards Further Development of Monitoring Activities*, Springer, pp. 149-164 (2012)  
 “Fish biodiversity research in the Mekong Basin.”
- 2) M. FUKUSHIMA: Nakano S., T. Yahara, T. Nakashizuka editors. *In: Biodiversity Observation Network in Asia-Pacific Region: Towards Further Development of Monitoring Activities*, Springer, pp. 329-345 (2012)  
 “Spatially-explicit models for freshwater fishes for their conservation planning.”

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) 福島路生, 野原精一, T. Jutagate, C. Grudpan: 第45回日本魚類学会 (2012)  
 「メコン河におけるSiamese mud carpの回遊生態解明」
- 2) 福島路生: 第2回流域圏学会年会 (2012)  
 「北海道とメコン川流域におけるダム開発と淡水魚類」
- 3) 福島路生: 第13回北海道淡水魚保護フォーラム (2013)  
 「北海道とメコン川におけるダム開発と淡水魚の保全」
- 4) 福島路生: 北海道魚道研究会 魚道セミナー2013 in 十勝(2013)  
 「ダムや堰などがもたらす淡水魚類の多様性低下」
- 5) M. FUKUSHIMA: Seminar convened by the Department of Fisheries, Bangkok, Thailand, 2014  
 “Possible effects of dam development on the fishes in the Mekong River.”

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

#### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 公開シンポジウムにて成果発表「国際河川メコン川の淡水魚トレイリエルの回遊生態解明」  
(主催：国立環境研究所、2013年6月東京と京都にてそれぞれ参加者約500名)
- 2) 上智大学 公開連携講座にて講演「メコン川のダム開発と魚類への影響」(2014年1月)
- 3) 上智大学 公開連携講座 国境を越えたアジアの環境問題にて講演「メコン川の生態系サービスとダム開発の影響」(2014年11月)

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞(2013年3月21日朝刊 道内14版「ダム必要?研究者が議論」)(北海道淡水魚保護フォーラムでの推進費での研究発表についての記事)
- 2) 報道発表「メコン川の水産有用魚種の回遊生態解明:ダム開発による回遊魚への影響が明らかに」平成26年8月6日(水)独立行政法人 国立環境研究所 生物・生態系環境研究センター

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

#### 8. 引用文献

- 1) D.A. HURWOOD, E.A.S. ADAMSON, AND P.B. MATHER : Evidence for strong genetic structure in a regionally important, highly vagile cyprinid (*Henicorhynchus lobatus*) in the Mekong River Basin. Ecol. Fresh. Fish, doi: 10.1111/j.1600-0633.2007.00278.x. (2007)



#### (4) ダム建設の生態学的コストーベネフィット解析

独立行政法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター	生物多様性保全計画研究室	吉田 勝彦
	生態系機能評価研究室	福島 路生
		広木 幹也

平成24(開始年度)～26年度累計予算額：1,355千円

(うち、平成26年度予算額：770千円)

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

メコン川を想定した河川のメタ生態系モデルを構築し、このモデルを用いてダム建設の影響を評価するコンピュータシミュレーションを行った。このモデルでは、下流に行くほど魚類の多様性が増加するという多様性パターンの再現に成功した。また、上流へ移動して産卵する魚種が多いという回遊魚の生態も再現できた。ダム建設によって魚類の移動が阻害されると、ダムに隣接した地域だけでなく、それより上流の広範囲にわたって魚類の多様性が減少すること、移動阻害の影響を直接受ける回遊魚よりも、回遊しない魚類の絶滅率が高くなること、多様性については食性タイプにかかわらず減少すること、バイオマスについては食性タイプによって反応が異なる(増加するものもあれば減少するものもある)こと、またダム近傍を中心に全体的にバイオマスが増加することなどが明らかとなった。ただし、バイオマスが増加するパッチはダム湖となって消滅するので、それを考慮すると河川全体のトータルバイオマスは減少することになる。そのため、ダム建設後も生態系サービスを維持するためには、ダム湖において少なくとも従前の魚類バイオマスを維持し、他の場所で失われるバイオマスをここで補償する必要がある。また、ダムの上流域と下流域では、生態系の変化の様式が異なるため、場所に応じて細やかな対策を考える必要があることが示唆された。またメコン川生態系は、雨季と乾季の移り変わり、回遊魚の季節移動という攪乱を常に受け続ける不安定な生態系である。よって、これら攪乱要素を組み込んだモデルを用いたシミュレーションでは、結果の分散が非常に大きかった。そのため、事前に予測された平均値から大きく外れることを想定し、コストの見積もりは大きめにする必要がある。

#### [キーワード]

メタ生態系モデル、ダム建設、コンピュータシミュレーション、多様性、バイオマス

#### 1. はじめに

メコン川は世界で二番目に淡水魚の多様性が高く、また世界最大の漁獲量を持つ国際河川である。しかし近年の著しい経済発展に伴う電力需要の増大を受けて、水力発電などを目的としたダムの建設計画が複数進められており、ダム建設による環境変化が漁業資源や生物多様性に対して甚大な影響を及ぼすのではないかと懸念されている。それに対して、ダム建設後に形成される

ダム湖において、魚類の養殖を行うことで失われる漁業生産を補う、という方法が検討されている。しかし、ダム建設でどれだけの魚類の多様性とバイオマスが失われるのかは不明である。もし、ダム建設を行う前に、ダム建設によって失われる多様性、バイオマスを見積もること、ダムの建設の仕方などを工夫し、損失の軽減策を立案することができれば、自然共生、生態系の持続的な利用について大きな貢献となる。そこで、生態系モデルを用いたコンピュータシミュレーションは一つの有効な手段となる。

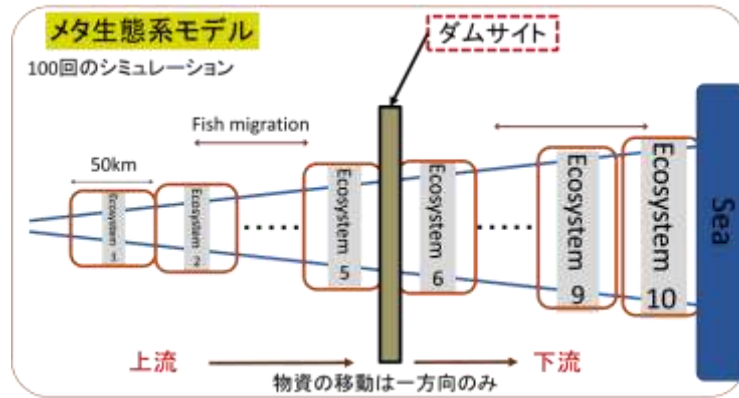
複数のシナリオに基づいてダム建設の影響についてコンピュータシミュレーションを行った先行研究<sup>1)</sup>では、現在メコン川で計画されているダムが全て建設された場合、魚類の多様性とバイオマスに壊滅的な影響が及ぼされることが指摘された。この研究はメコン全域を対象に、数多くの魚類の生態データに基づいた包括的な研究として評価される。しかし、使われたデータが広範に及び網羅的であるのに対して、使用された生態系モデルが単純すぎるという問題もある。もちろん複雑なモデルが良いというものではないが<sup>2)</sup>、過度に単純なモデルでは議論できる内容が限られ、時に誤った結論を導くことがある<sup>3)</sup>。目的に応じた適切なモデルを構築する必要がある。

## 2. 研究開発目的

本研究の目的は、第一にメコン川のように雨季と乾季を繰り返し、回遊魚が広い範囲を回遊するような河川を表現する生態系モデルを構築することである。次に、そのモデルを用いてダムを建設するコンピュータシミュレーションを行い、ダム建設が魚類の多様性、バイオマスに与える最低限のリスク、影響を明らかにすることである。

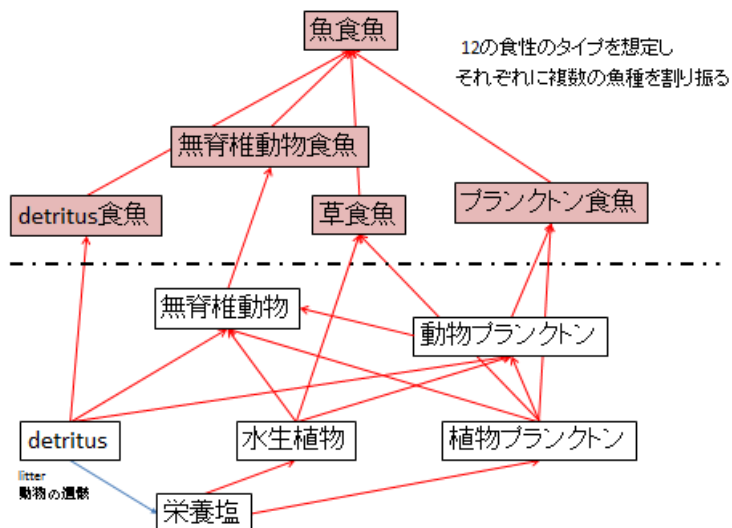
## 3. 研究開発方法

メコン川におけるダム建設の生態学的なリスクを解析するため、雨季・乾季の繰り返しが起こる河川生態系の物質循環を再現する数理モデルを構築した。河川生態系をモデル化するときに留意すべき点は、河川は上流から下流まで、流域毎に環境が異なることと、生息している生物相も異なっていることである。また、生物や物質が流路に従って移動することが可能であるが、それには時間がかかるので、河川全体を単一の生態系として扱うことが出来ない、という点にも留意すべきである。そこで、河川を複数の生態系に分けて扱うメタ生態系概念を用いて、河川生態系の物質循環を再現する数理モデルを開発した（図(4)-1）。本研究では全長500 kmの河川を想定したシミュレーションを行った。この仮想河川を10個のサブ生態系に分け、さらに河川の最下流を海とつなげる改良を行い、実際の河川と同様に、海と川の間での魚類の出入りをモデルに取り入れた。



図(4)-1. 河川のメタ生態系モデル

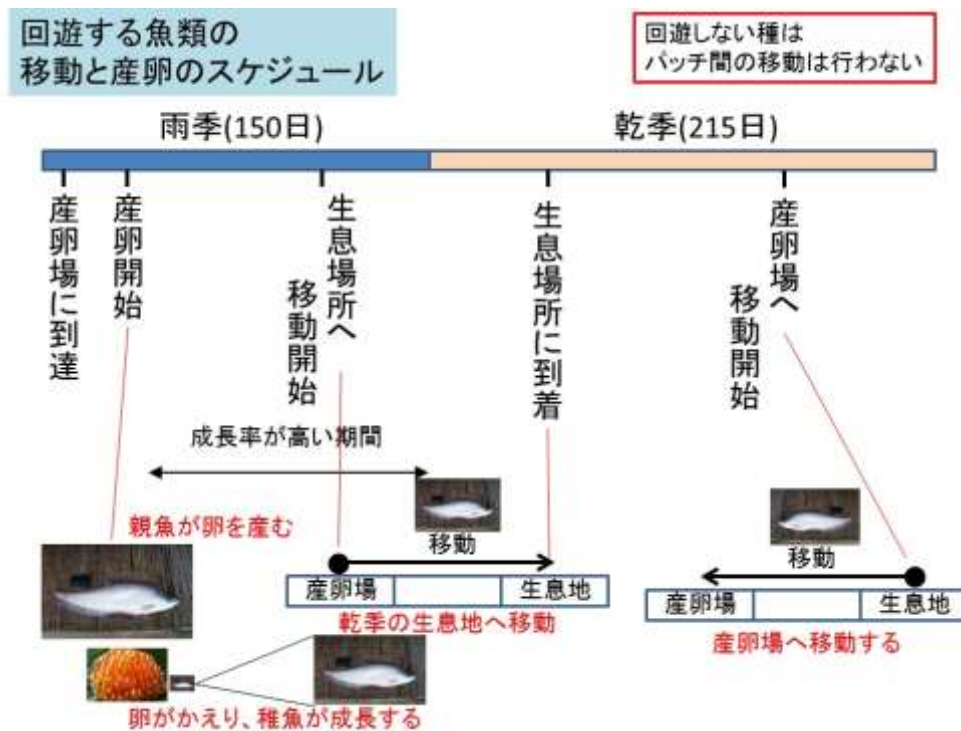
個々の生態系は栄養塩、デトリタス（これには動物の糞、リター（植物の遺骸）、動物の遺骸が含まれる）、動物プランクトン、植物プランクトン、水生植物、水生昆虫などの無脊椎動物、魚類で構成される（図(4)-2）。実際の生態系では、それぞれの構成要素に多くの種が含まれるが、それらについての分類、生態学的な情報が欠如しているため、それらを種のレベルで扱うことは不可能である。そこで、これらの要素についてはひとまとめにして（単一種で構成された場合と同様に）扱うこととした。一方、淡水魚類は本研究課題の重要な研究対象生物であること、また今後、食物網構造のデータが充実することが期待されるため、食性によって細かく分類した。本研究のモデルでは、魚食、草食、腐肉食、リター食、動物プランクトン食、植物プランクトン食、無脊椎動物食の他、複数のタイプの餌を利用する雑食も含めて12タイプの食性をモデルに導入した（図(4)-2には代表的な食性タイプのみ表示）。これらの食性タイプには、初期状態でそれぞれ30種ずつ割り当てた。魚種間の捕食—被食関係はニッチモデル<sup>4)</sup>により決定した。



図(4)-2 食物網の模式図

このようにして構築した個々の生態系内では栄養塩の物質循環を計算する。個々の生態系に必要な栄養塩は、雨季に広がった氾濫原からリターという形で供給されるとした。供給量は乾季に

は100分の1に減少すると仮定する。また上流から流れて来たリターや栄養塩も利用する。植物、植物プランクトンは水中の栄養塩を吸収して増殖する。動物プランクトン、無脊椎動物、魚類の一部がそれを摂食して成長する。さらにそれらを他の魚が捕食して成長する。生態系内の物質循環はHolling III型の機能反応を用いて記述した。動物はそれぞれ食性毎に異なった同化効率を持つ。捕食によって取り入れた物質の内、同化できる分だけを成長、代謝に利用する。同化できなかった分は糞として排出する。動物の糞、動植物の遺骸は、デトリタス食の動物に利用される。また、一定期間を経て分解されて栄養塩となり、再び植物に吸収され、生態系を循環していく。栄養塩、動物の糞、動植物の遺骸、プランクトンなどは川の流れてから上流側の生態系から下流側の生態系に移動する。移動量は川の流速に比例する。流速は下流ほど遅くなるように設定した。また、移動能力の高い魚は流れに逆らって上流、下流へそれぞれ移動できるとする。繁殖に伴う季節移動をするタイプと、季節移動をしないタイプに分ける。季節移動しないタイプは十分に個体数が増加すれば、隣り合う生態系に分散可能であるとする。季節移動するタイプは、雨季に産卵場所となる生態系で産卵した後、乾季の生息場所へ移動する。産卵日が近くなると再び産卵場所となる生態系に戻り産卵する(図(4)-3)。



図(4)-3. 魚類の生活史の概略図

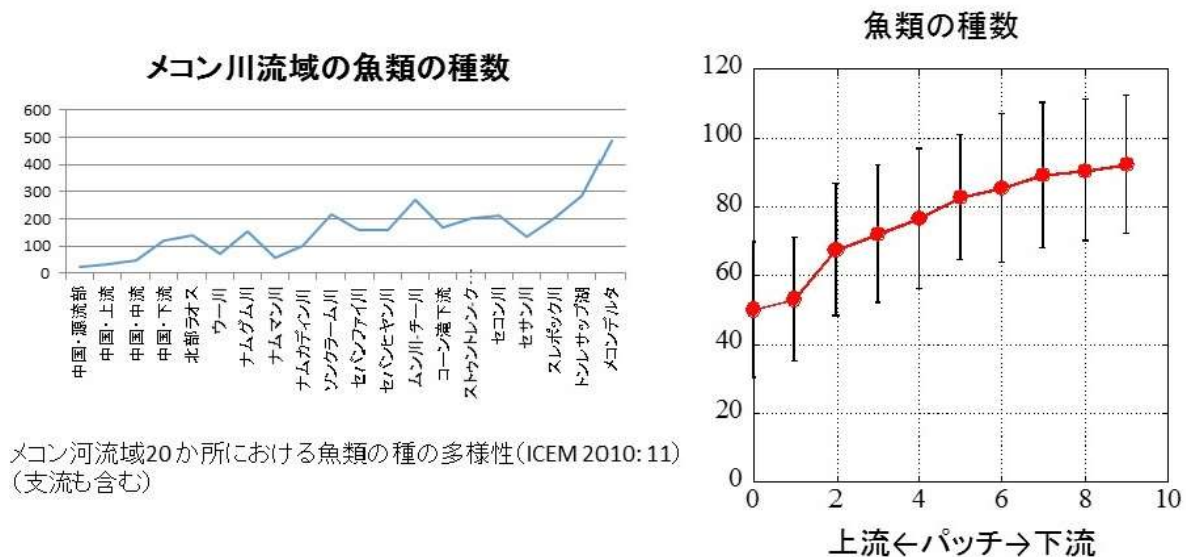
このような河川生態系にダムを構築する。仮想的な河川生態系がちょうど中央部で分断される位置、つまり直線上に10個並んだサブ生態系(パッチ)の5番目と6番目の間にダムを建設する(図(4)-1)。ダムができると、魚を含む生物また物質の移動阻害、ダム湖の創出(流水環境から止水環境への変更)、流量変化の平滑化、氾濫原の縮小などの環境変化が生じる。これらのどれか一つが起こるだけでも生物は絶滅しうるが、個々の変化に応じてどのように反応するか(絶滅する

か、増殖率や成長率が下がるか、影響がないか) については十分に解明されていない。そこで本研究では、産卵に伴う回遊を阻害された魚類の死亡率に影響がない場合と、回遊を阻害された魚類が絶滅する場合の2つのケースに分けてシミュレーションを行った。前者では、ダムは魚の移動阻害のみで、その他の環境変化をもたらさないと仮定した。そして魚は産卵場所が変更されることに対して完全に適応し、それが原因となる死亡は起きないと仮定した。つまり、魚の移動を阻害するだけで、どのような変化(最低限のリスク)が起こるのかを明らかにすることとした。後者では、より魚類の生存に関し厳しい条件として、回遊を阻害され産卵場もしくは乾季の生活場所が変更された時点で即時絶滅すると仮定した。それぞれのケースについて120回ずつのシミュレーションを行った。シミュレーション開始後、モデル内の時間で15年後にダムを建設する。ダム建設後、同じくモデル時間で5年後の魚類の種多様性とバイオマスの変化についてダムを建設しない場合と比較した(Mann-WhitneyのU検定)。

#### 4. 結果及び考察

最初に、モデルの妥当性を検討するために、シミュレーションの結果と実際のメコン川生態系における魚類の多様性のパターンとの比較を行った。

メコン川では上流から下流に向かって魚類の種多様性が増加していくパターンを示すことが知られている(図(4)-4左)。図(4)-4の右図は本研究のモデルでシミュレーションを開始してからモデル内の時間で15年経過したときの、各パッチにおける魚類の種多様性パターンを表している。この図で表されているように、本研究のモデルは、上流から下流域に向かって多様性が増加するという実際のメコン川で観察される特徴<sup>5)</sup>を再現することができた。

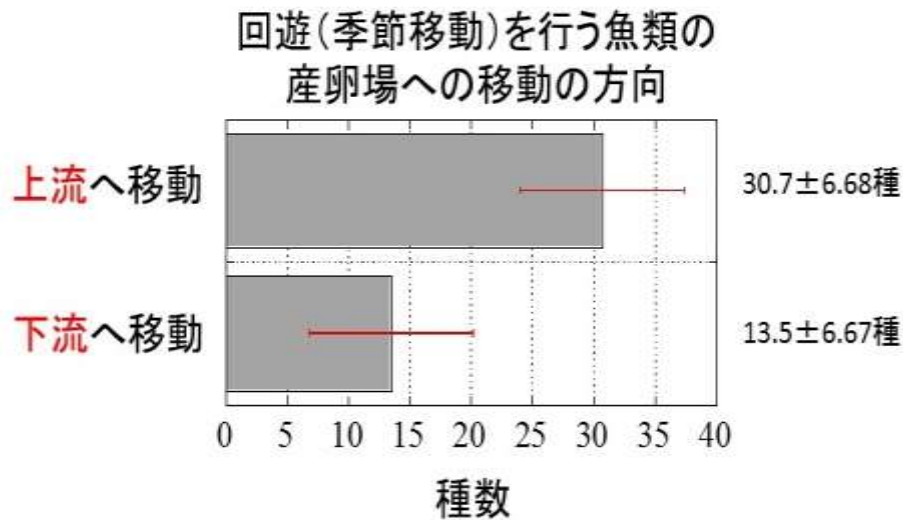


図(4)-4. 流路に沿った魚類の多様性勾配

実際のメコン川のデータとモデルのシミュレーションの結果の比較。エラーバーは1SD。

また、メコン川では産卵のために季節的な回遊する魚類の多くは上流に移動して産卵することが知られている<sup>6)</sup>。本研究のモデルでは、シミュレーション開始後15年経過時に平均759.3種

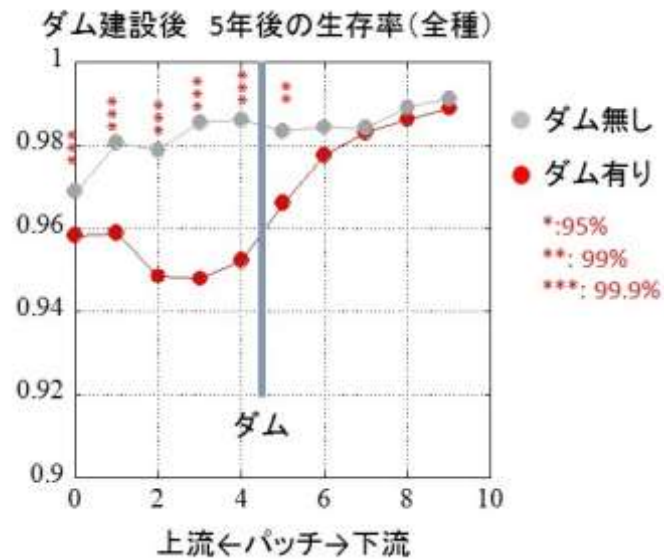
(SD=134.6種)の魚類が生存した。そのうち産卵のために回遊を行う種が平均44.3種(SD=9.82種)であったが、このうち69.3%にあたる30.7種(SD=6.68種)が上流へ移動して産卵する種であった(図(4)-5)。このように本研究の生態系モデルは、上流へ移動して産卵する魚種が多いという特徴も再現している。



図(4)-5. 回遊(季節移動)を行う魚類の産卵場への移動の方向

以上のように、上流から下流に向かう多様性勾配の結果と、回遊魚の産卵場への移動方向の結果から、本モデルはメコン川生態系の本質的な特徴の一面を再現できており、一定程度の現実性を持つと考えられる。

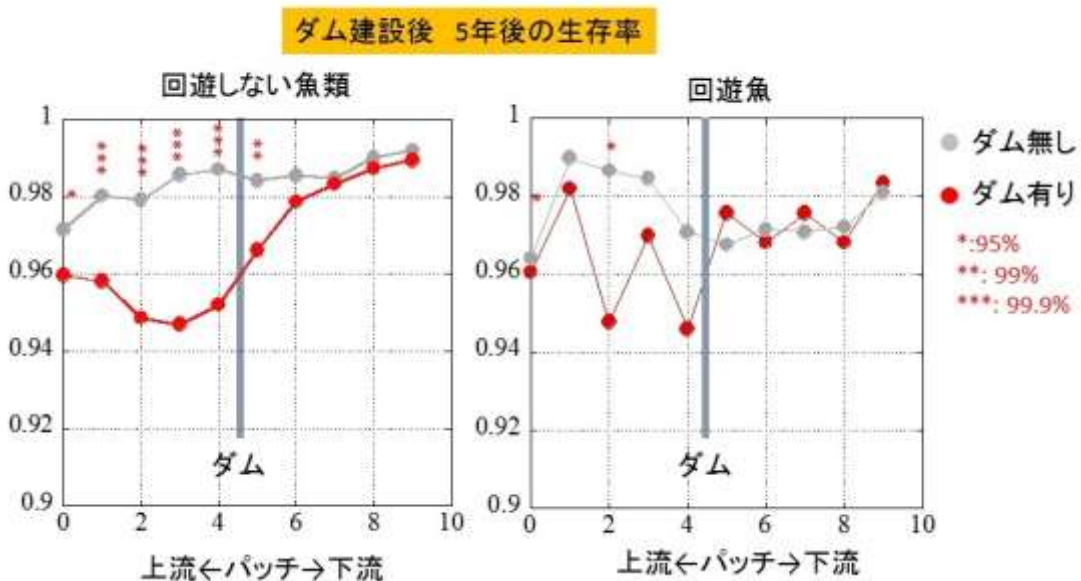
ダム建設後5年経過後の魚種の生存率、すなわちダム建設5年後の魚類の種数をダム建設直前(シミュレーション開始後15年経過時)の種数で割った値の分布を示す(図(4)-6)。これより、ダムを建設すると魚類の種多様性が有意に減少することが明らかである。また、多様性が減少するのはダムに近接したパッチだけでなく、ダムよりも上流側の広い範囲に及ぶこともわかる。



図(4)-6. ダム建設後5年経過後の魚種の生存率

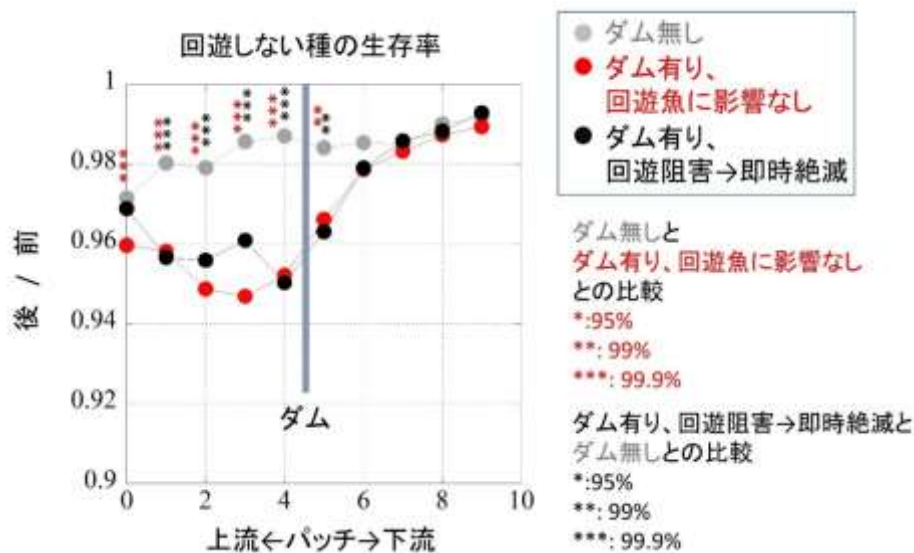
赤点はダムを建設したシミュレーションの結果、またグレーの点はコントロールとしてダムを建設しなかった場合の結果。

図(4)-7は、上の解析結果を回遊魚と回遊しない魚類に分けて比較したものである。回遊しない魚類については、上と同様にダムに隣接するパッチに加えてダムよりも上流側の広い範囲にわたって多様性の減少が見られた。それに対して回遊魚では、ダムより上流で多様性が減少する傾向は見られたが、その差は有意ではなかった。この結果は、ダム建設によって直接回遊を阻害される回遊魚よりも、むしろ回遊しない魚類の方がダム建設の影響をより強く受ける可能性を示唆している。



図(4)-7. ダム建設後5年経過後の魚種の生存率 (回遊しない魚類と回遊する魚類の比較)

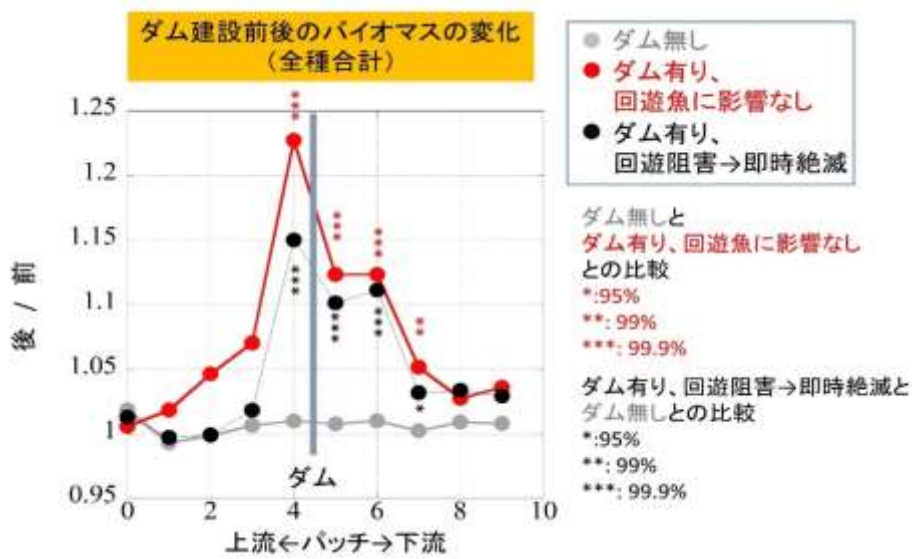
本研究では、ダムで移動を阻害された魚類は即時絶滅する仮定をおいたシミュレーションも行った。回遊魚の生存について逆の仮定に基づくシミュレーションなので、回遊しない魚類に注目し、その結果をダムが無かった場合、ダムを建設するが移動を阻害されても回遊魚は絶滅しないシミュレーションとの比較を行った（図(4)-8）。その結果、ダム直下のパッチと、ダムの上流域の広い範囲にわたって魚類の多様性が減少した。また、移動を阻害された魚類が絶滅する場合としない場合とでは、有意な差が見られなかった。このような結果が得られた原因は、絶滅してもしなくても、移動を阻害された魚類が生態系からいなくなることは変わらないためと考えられる。



図(4)-8. ダム建設後5年経過後の回遊しない魚種の生存率

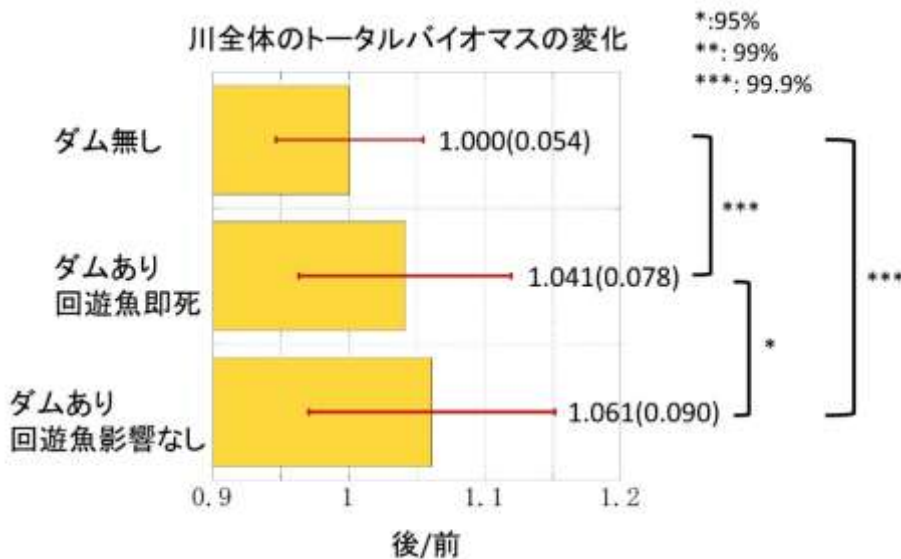
次にダム建設前後の魚類のバイオマスの変化を調べた（図(4)-9）。その結果、ダムによって移動を阻害された回遊魚が即絶滅しない条件では、ダムを建設すると、特にダムに近接したパッチにおいてバイオマスが増加する傾向が認められた。また、下流域ではダムからやや離れたパッチにおいてもバイオマスは増加した。またダムによって移動を阻害された回遊魚が絶滅する条件においても同じ傾向が得られた。即時絶滅する場合には、絶滅しない場合のシミュレーションに比べ全体的に増加率が低くなる傾向が見られたが、両者の間には有意な差はなかった。





図(4)-9. ダム建設前後のバイオマスの変化 (全種合計)

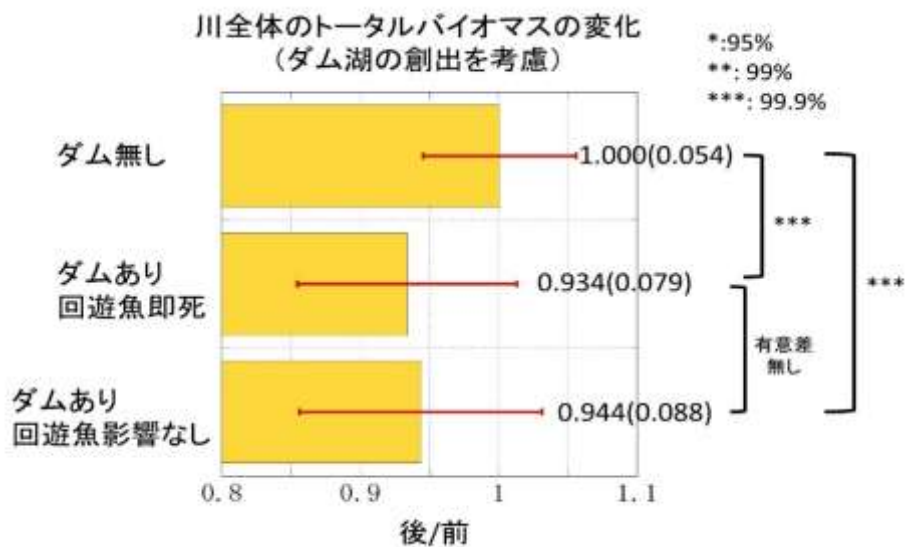
次に、河川全体で魚類のバイオマスの総量がダム建設前後でどのように変化するかを、ダム建設後に回遊魚に影響がない場合と回遊を阻害された回遊魚が即時絶滅する場合のそれぞれについて解析した (図(4)-10)。その結果、ダムによって移動を阻害された回遊魚に影響がない場合では、ダム湖を無視すると、ダム建設後は河川全体で約6%バイオマスが増加することが明らかとなった。ダム建設後に回遊を阻害された回遊魚が即時絶滅する場合においても、ダム建設後に河川全体のバイオマスの総量は増加したが、増加率はわずかに減少した。



図(4)-10. 河川全体でのトータルバイオマスの変化

横軸はダム建設前後のバイオマスの変化率。エラーバーは1SD。数字は平均値と標準偏差。

しかし、方法の項でも述べたとおり、この結果はダム直上のパッチがダム湖に変化しても絶滅する種がないという仮定でのシミュレーションである。ダム湖の創出を考慮していないので、バイオマスの増加率を過大評価している。メコン川流域に実際に建設されたダムでは、ダムの上流側は数十キロメートルの範囲にわたって河川という流水環境がダム湖という止水環境に変化する。本研究のモデルでは一つのパッチの長さが50 kmと設定しているので、ダムの上流側の一区画分がそのままダム湖になる。河川に生息している魚種のすべてがダム湖に適応できるとは考えられないので、これまでその場所に生息していた魚種の多様性もバイオマスも大幅に減少する可能性がある。そこで、本研究のモデルにおいて、ダム建設後にはダム直上のパッチから河川性の魚類がすべていなくなった場合について、河川全体でのトータルバイオマスの変化を解析した（図(4)-11）。その結果、ダムを建設した後、回遊魚に影響がない場合も回遊魚が即時絶滅する場合も、バイオマスの総量が有意に減少することが明らかとなった。



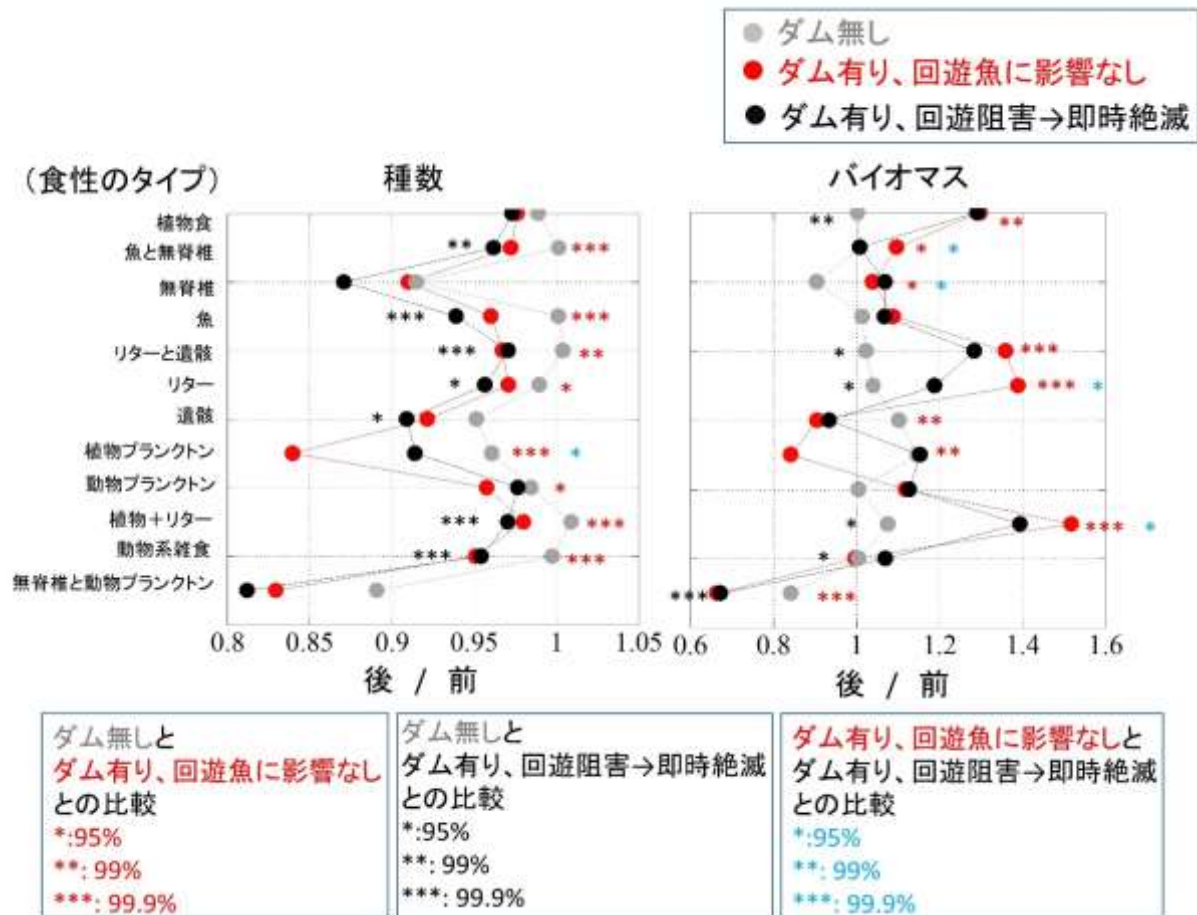
図(4)-11. ダム湖の創出を考慮した場合の、河川全体でのトータルバイオマスの変化

なぜダムが建設されて魚類の回遊が阻害されると種数が減少してバイオマスが増加するのだろうか？ダムが建設される前は、季節ごとに回遊魚がパッチ間を移動する。つまり、それぞれの生態系にとって回遊魚とは、あるときに突然侵入してきたりいなくなったりする攪乱要因の一つとなっている。そのために生態系が常に攪乱を受け続けることとなり、魚類のバイオマスが十分に増加しにくくなっていると考えられる。ダム建設後は回遊魚による生態系の攪乱が無くなるので、その分環境が安定することとなり、他の魚類がバイオマスを増加させやすくなると考えられる。しかし、この結果はあくまでダム湖の創出を無視し、ダム建設後も河川環境が変わらない、という仮定でのシミュレーションの結果である。ダム湖の創出を考慮すると、魚類のバイオマスは減少する可能性もあるので（図(4)-11）、少なくともダム湖になる前のバイオマスは維持する必要がある。

また、ダムによって回遊を阻害された回遊魚が影響を受けない条件よりも、魚類の生存が厳しくなる条件（回遊を阻害された魚類が即時絶滅する条件）の方がバイオマスの増加率は小さかつ

た(図(4)-10)。ダム建設に伴って発生することが想定される環境変化には様々なものが考えられるが、前述のとおり本研究では魚類への移動阻害以外の環境変化は考慮していない。その他の環境変化をモデルに組み込んだ場合、魚類のバイオマスの総量は減少する可能性は否定できない。

続いて、ダム建設の影響が魚類の食性タイプごとにどのように異なるのかについて解析した(図(4)-12)。



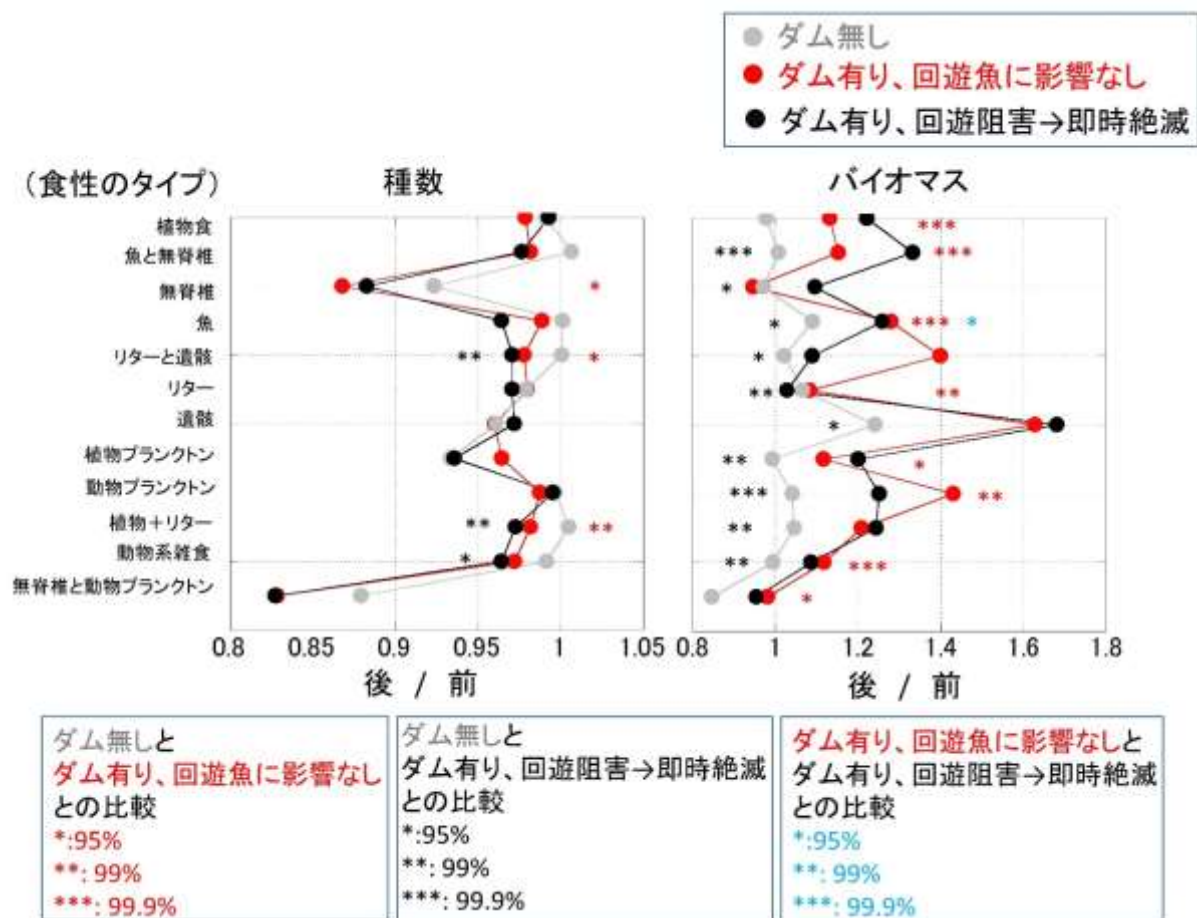
図(4)-12. 魚類の各食性タイプにおけるダム建設前後の種数とバイオマスの変化率(ダム直上の生態系)

種数については、回遊魚に影響がない場合、回遊魚が即時絶滅する場合のどちらについてもほぼすべての食性タイプで減少する傾向が見られた。この結果は、ダム建設は種数については食性タイプに関係なく悪影響を及ぼすことを示している。有意差が見られなかった、もしくは有意水準が低かったのは無脊椎動物食、リター食、遺骸食、無脊椎動物と動物プランクトンの雑食であった。リター食についてはすべての場合のシミュレーションにおいて減少率が低かったために有意差が出なかったと思われる。この結果は、リター食魚はダム建設の影響を受けにくいタイプであることを示している。また、リター食以外で有意差が得られなかったタイプについては、ダム無しの場合でも減少率が大きかった。つまり、ダムに関係なく元々生存が難しいタイプであることが、有意差が出にくい結果となった原因であると考えられる。

その一方、バイオマスについては食性タイプによって増加するものと減少するものの違いが見られた。全体的なバイオマスが増加することは前述の通りであるが、植物やリターを利用する種

はバイオマスの増加が顕著であり、平均して30%以上増加するものが多かった。また、魚食魚や無脊椎動物を利用する魚についても、バイオマスがわずかに増加する傾向が見られた。それに対して、動物の遺骸、植物プランクトン、無脊椎動物と動物プランクトンを利用する種は平均して約10%から30%減少した。ただしバイオマスの結果については種数に比べて標準偏差が大きいので平均値から外れる結果になることが多い点には注意すべきである。このように、ダム建設の影響は魚類の生態のタイプによってダム建設への反応が違うので、特に漁獲対象魚についてはその食性に注意して適切な対応をとる必要があることを示している。

上記の結果はダム直上の生態系についてのものであるが、ダム直下の生態系でも同様の変化が起こるのかを確かめるため、同様の解析を行った（図(4)-13）。

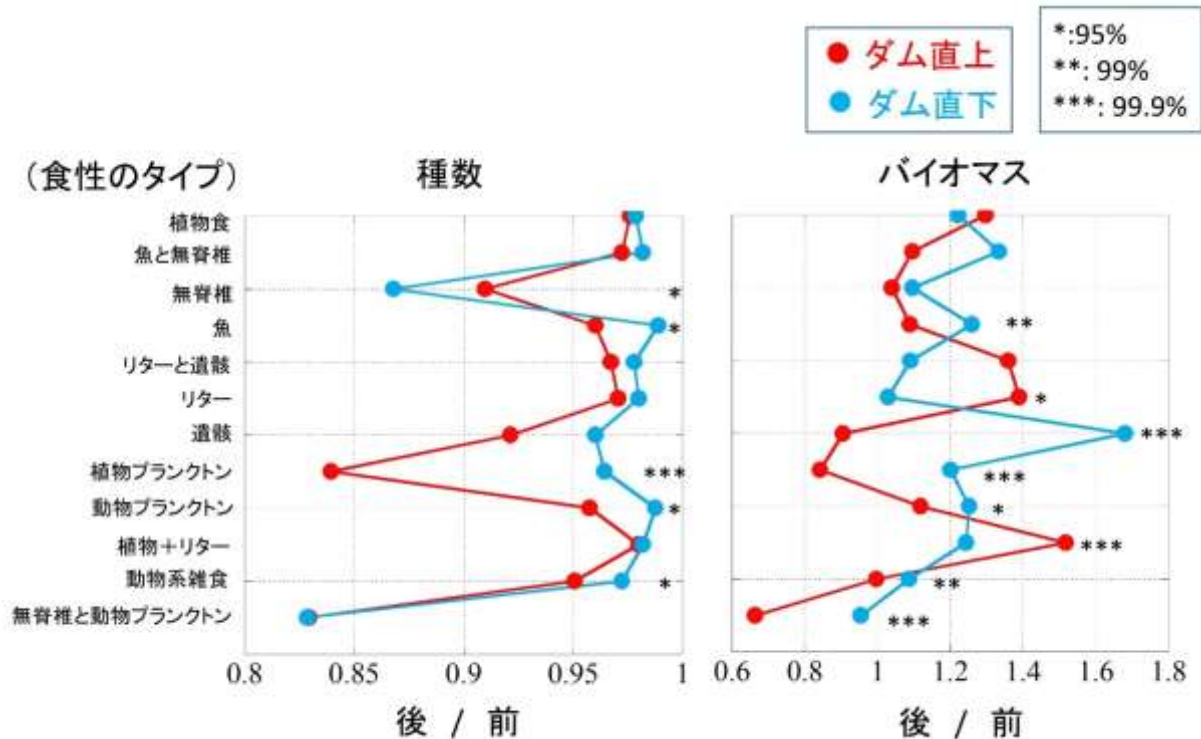


図(4)-13. 魚類の各食性タイプにおけるダム建設前後の種数とバイオマスの変化率（ダム直下の生態系）

ダム直下の生態系について、生態系全体としてはダム建設後に種数は有意に減少しているが（図(4)-8）、個々の食性タイプに分解して見た場合には、リターだけを利用する魚種とリターと植物を利用する魚種を除き、その差は顕著では無かった（図(4)-12、13）。また、バイオマスについては、ダム直上の生態系と違い、ほぼすべての食性タイプで増加する傾向が見られた。また、ダム直上の生態系とは異なり、バイオマスが有意に減少する種は見られなかった。

ダム直上と直下のそれぞれの生態系におけるダム建設後の変化を明らかにするため、それぞれ

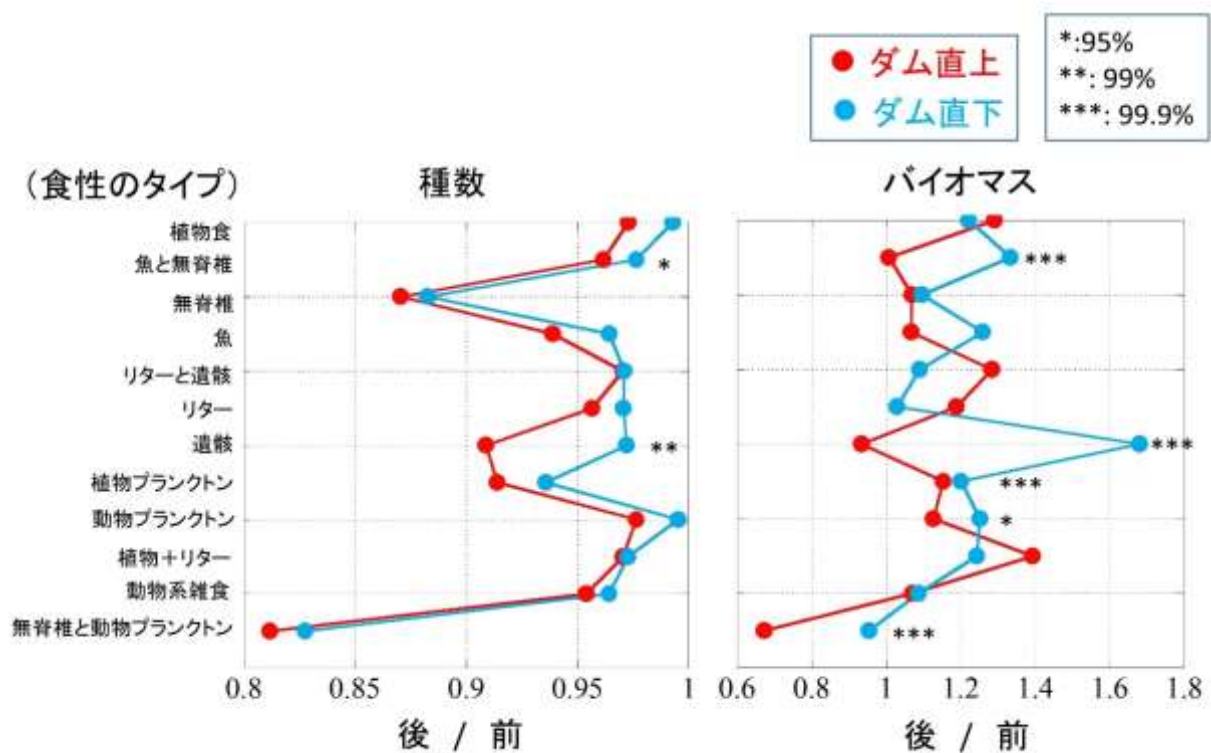
の条件ごと（ダムによって移動を阻害された回遊魚に影響がない場合と即時絶滅する場合の比較）に、各食性タイプの生存率とバイオマスの変化率について比較を行った。



図(4)-14. 魚類の各食性タイプにおけるダム建設前後の種数とバイオマスの変化率をダム直上と直下の生態系で比較した結果（ダムによる移動阻害で回遊魚が絶滅しない条件）

ダムによって移動を阻害された回遊魚が絶滅しない場合、種数については、全体的にダム直上の方で減少が大きく、特に植物プランクトン食魚については、ダム上流で特に絶滅しやすいことが明らかとなった（図(4)-14）。 バイオマスについては、ダム直上の生態系では増加するものと減少するものが混在したが、ダム直下の生態系では、ほとんどの食性タイプでバイオマスが増加した。特に、ダム上流では遺骸食魚と植物プランクトン食魚のバイオマスはダム建設後に減少したが、ダム直下では逆に大きく増加した。

同様の解析を、もう1つの条件（ダム建設によって移動を阻害された回遊魚は即時絶滅する）でシミュレーションを行った（図(4)-15）。



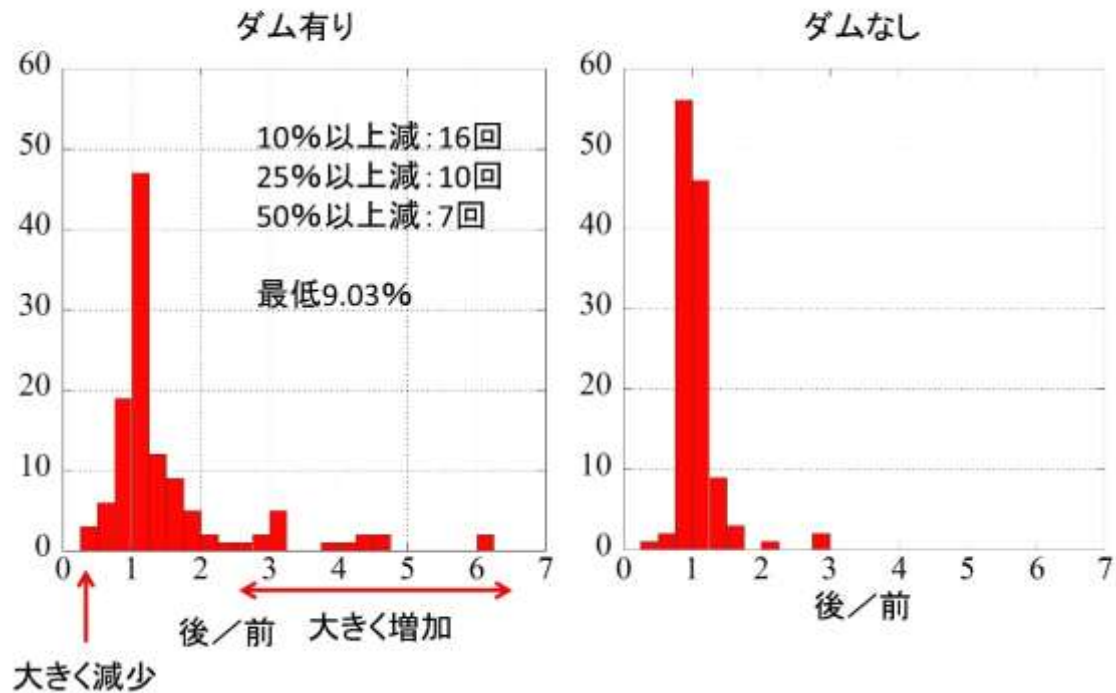
図(4)-15. 魚類の各食性タイプにおけるダム建設前後の種数とバイオマスの変化率をダム直上と直下の生態系で比較した結果（ダムによる移動障害で回遊魚が即時絶滅する条件）

ダム建設によって移動を障害された回遊魚は即時絶滅する条件のシミュレーションでは、種数については、遺骸食の魚種ではダム直上の方が生存率が低かった。しかし、それ以外のタイプでは、全体的に直上において生存率が低いものの、顕著な差は見られなかった。

バイオマスについては、ダム直上において増加するものと減少するものが混在したが、ダム直下の生態系では、ほとんどの食性タイプのバイオマスが増加した。増加する食性タイプのパターンも、魚と無脊椎動物の両方を利用するタイプの魚など一部を除いて回遊魚が絶滅しない条件でのシミュレーションと似ていた。これらの結果から、回遊魚が絶滅してもしなくても、ダムによって回遊しなくなることに変わりはないので、食性タイプごとに被る影響はあまり変わらないものと考えられる。

ダムの直上でも直下でも、全体的には種数が減少しバイオマスが増加する、というパターンは共通していた。しかし、直上と直下では、食性タイプ毎の増減パターンが異なっている。この結果は、ダムの建設後、上流側と下流側では異なったプロセスで生態系変化が起きていることを示している。本研究では非常に複雑な構造を持つ生態系を扱っているので、実際にどのようなプロセスが働き、どの種が影響を受けているかは明らかにできないが、本研究の結果は、ダムの上流側と下流側ではダム建設後の生態系管理について、異なった方策をとる必要があることを示唆している。

ダム建設前後のバイオマスの変化(植物+リター食の魚)  
(後/前)の値のヒストグラム



図(4)-16. ダム建設前後のバイオマスの変化 (植物+リター食の魚)

個々のシミュレーションの結果を詳しく調べると注意すべき点が浮かび上がる。図(4)-12のバイオマスの変化について、平均的に最も大きく増加した植物とリターを餌とする魚類について、ダム建設後にバイオマスが実際に何倍になったのかについて、120回のシミュレーション結果をヒストグラムにした(図(4)-16;右側はコントロール)。最頻値は1よりも少し大きい値であったが、数倍以上に大きく増加する場合もあれば、反対に大きく減少する場合もあり、ばらつきが非常に大きくかつ分布の形状が著しく非対称であった。メコン川生態系では、雨季と乾季の気象変化があり、またそれによって時としてカタストロフィックな水文学的变化(大洪水など)が繰り返される。それはそこに生息する魚類をはじめあらゆる生物によって大規模な攪乱要因である。さらに回遊魚の季節的移動は、非回遊魚にとっては、ある意味で大量の侵入生物、反対に在来種の地域的絶滅に遭遇することに匹敵し、やはり大きな攪乱として作用する。これらの攪乱にさらされたメコン川生態系は非常に不安定なものである。そのことがシミュレーションの結果の大きなばらつきに現れたのであろう。複数の攪乱要因を内包した生態系において、現実では1度しかない(繰り返しが許されない)ダム建設の影響を正確に見積もることは非常に困難である。ダム建設に伴うコストは、平均値にとらわれず常に大きめに想定すること、モニタリングを継続し、バイオマスの低下する兆候が確認された時点で、即時に対応できるような管理体制を整備することが望まれる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究において複雑な食物網構造を持つメタ生態系モデルの開発に世界で初めて成功した。本研究の結果から、魚の移動阻害が生態系に与える影響の一端が解明された。このモデルを用いたコンピュータシミュレーションの結果、ダム建設による魚類の移動阻害が魚類の多様性や生物量に与える影響の一端が解明された。ダム建設の影響がダム近傍だけでなく、上流域の広い範囲に渡って多様性が減少すること、ダム建設によって直接影響を受ける回遊魚よりもむしろ回遊しない魚類の方が強くダム建設の影響を受けること、特にダム近傍で魚類のバイオマスが増加する傾向があること、食性によって生存率やバイオマスの変化の仕方が異なること、また、ダムの上流と下流ではダム建設後に異なった変化が起こることが明らかとなった。これらの結果から、ダム建設後の魚類の多様性保全や漁業資源の確保に際しては、回遊魚に注目するだけでなく、そのほかの回遊しない魚類について、広範囲にわたって対策を講じることが必要であること、ダム湖になる場所では、ダム建設前のバイオマスをダム湖で確保する必要があること、魚類の食性や小さい地域毎の違いに注意して適切な対応をとる必要があることを示唆している。メコン川のように、雨季乾季に伴う環境変動や、回遊による生物学的な攪乱を受け続ける不安定な生態系では、シミュレーションの結果の分散が非常に大きくなるため、コストの見積もりを大きめに想定する必要があることが示された。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

従来は、ダムによって直接回遊を阻害される回遊魚への影響が特に懸念されていた。しかし本研究の結果からは、回遊しない魚類、さらにダム近傍だけでなく、ダムから遠く離れた（特に上流域）の生態系も影響を強く受けることが示された。また魚類の食性タイプ毎に、また地域毎に影響を回避、あるいは軽減するための個別の対応が必要であることが明らかとなった。また、メコン川生態系は非常に不安定であることから、コストの見積もりは大きめにとる必要があること、さらにモニタリングを継続しつつ、バイオマスの減少する兆候が見られたときに、適切な対策を早急にとれるような順応的な生態系管理が必要であることを示した。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。



<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 吉田勝彦：個体群生態学会第29回大会（2013）  
「川のメタ生態系モデル -国際河川メコン川のダム開発と環境保全-」
- 2) 吉田勝彦、広木幹也、富岡典子、村田智吉、福島路生：個体群生態学会第30回大会（2014）  
「ダムによる魚の移動阻害の影響—メタ生態系モデルを用いたメコン川ダム開発の影響評価—」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) G. ZIV, E. BARAN, S. NAM, I. RODRÍGUEZ-ITURBED, AND S. A. LEVIN : Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin. PNAS, 109, 15, 5609–5614 (2012)
- 2) D. LUDWIG, AND C. J. WALTERS: Are age-structured models appropriate for catch-effort data? Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42, 1066-1072 (1985)
- 3) 松田裕之：“利己的な遺伝子が織りなす食物連鎖網” 数理生態学 シリーズ・ニューバイオフィジックス 10, 95-105 (1996)
- 4) R. J. WILLIAMS AND N. D. MARTINEZ: Simple rule yield complex food webs. Nature, 404, 180-183 (2000)
- 5) INTERNATIONAL CENTER FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT (ICEM): Mekong River Commission (MRC) Strategic Environmental Assessment (SEA) for Hydropower on the Mekong Mainstream: Fisheries Baseline Assessment Working Paper. Vientiane, Lao PDR (2010)

- 6) A.F. POULSEN, O. POEU, S. VIRAVONG, U. SUNTORNRATANA, AND N. T. TUNG: Fish migrations of the Lower Mekong River Basin: implications for development, planning and environmental management. MRC Technical Paper No. 8, Mekong River Commission, Phnom Penh. 62 pp. 1683-1489 (2002)

## **Dam Development and Environmental Conservation in the International River, the Mekong – the Assessment of Ecological Services in Reservoirs**

Principal Investigator: Michio FUKUSHIMA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2427  
E-mail: michio@nies.go.jp

Cooperated by: Japan International Research Center for Agricultural Sciences

### [Abstract]

Key Words: Mekong River, Dam Development, Ecological Services, Nutrient Cycling, Freshwater Fishes

To help achieve a balance between the losses and gains of ecological services, specifically fisheries production, through dam development and associated construction of reservoirs in the Mekong River basin was the objective of this study. We monitored 9 large water bodies of reservoirs and lakes for limnological and biological parameters such as nutrients, primary productivity, harmful algae, fish production, and foodweb structure. Growth, reproduction, and migration of commercially important fish species were also investigated. Furthermore, computer simulation assessed the impacts of damming in the river.

Phosphorus cycling differed between reservoirs and lakes. Sediment phosphorus changed from organic to inorganic forms toward a deeper pelagic environment in reservoirs. However, an inorganic phosphorus concentration in the shallow but extremely large natural lake, the Tonle Sap Great Lake, was uniformly high in the lake due to its constant supply from riparian villages and the mixing of lake water by the wind.

We detected *Microcystis aeruginosa* in some water bodies. The algae increased exponentially with an increase in TP, implying a risk of their blooms, given an expected economic growth and increase in nutrient levels.

Primary productivity was positively correlated with TP in all water bodies but Tonle Sap where primary productivity is severely limited by the high concentration of suspended solids. A positive correlation also existed between the primary productivity and fish yield except for this lake. Despite low primary productivity, the Tonle Sap has much higher fish yield than expected. This may be attributable to allochthonous carbon input from floodplains, which was corroborated by a C/N isotope ratio analysis of foodweb.

Reservoir fisheries may not be sustained through the conventional aquaculture practices of stocking fingerlings of common indigenous species such as *Hemibagrus nemurus* and *Labeo chrysophekadion*. Despite intensive stocking and our sampling effort, adults of the species had never been observed in the oligotrophic Sirindhorn Reservoir likely due to their slow growth together with the lack of food or suitable spawning grounds.

Otolith microchemistry of *Henicorhynchus siamensis* and *H. lobatus* indicated that the species in a fragmented tributary by irrigation dams has been constrained from migrating from/to the Mekong mainstem. The species currently migrate extensively through a proposed construction site of the controversial Dong Sahong Dam in Laos. However, computer simulation suggested non-migratory species may be impacted more severely by damming than migratory species. Dams may result in increase or decrease in fish biomass depending on feeding habit of the species.