

# 沿岸域の基礎生産に着目した 光環境に関する研究

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム ○三森 繁昭  
大橋 正臣  
三上 信雄

港湾・漁港等の沿岸構造物は、魚類の生息空間、稚魚の隠れ場や産卵場機能がある。しかし、河口域周辺に位置する港湾・漁港では、河川から流入する栄養塩や土砂等により水域環境が大きく変化する。特に濁水による光量低下は生息環境に大きく影響を及ぼす。本稿は沿岸の光環境に着目し、浮遊物質等と有光層深の関係について整理・検討を行った。この結果は海藻繁茂や基礎生産量を生態系モデルによる解析手法として有効である。

キーワード：自然環境、光環境、生態系モデル

## 1. はじめに

港湾・漁港等の沿岸構造物は、港内の静穏域を確保し、船舶が安全に停泊できる等の基本的な機能の他に、構造物に海藻が繁茂することで、稚仔魚等が外敵から身を守るための隠れ場機能、餌場機能や産卵場機能等の様々な機能を有している。近年、防波堤や護岸等への藻場造成機能を付加した環境共生型沿岸構造物などが整備されてきた。しかし、河口域周辺に位置する港湾・漁港は写真-1のとおり、河川から流入する土砂等により、水域環境が大きく変化する。特に濁水による光量低下や浮泥の堆積などは生息環境に大きく影響を及ぼすと考えられる。

本報では沿岸域（港湾・漁港水域を含む）の光環境に着目し、浮遊物質等と有光層深の関係について整理・検討を行い、報告するものである。



写真-1 出水状況 (2012. 4. 25 撮影)

【撮影：土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム】

## 2. 沿岸水域における生態系モデルの適用

港湾・漁港を含む沿岸域の生物生息環境を評価するためには、現地観測による物理、生物環境の把握が基本となる。しかし、現地観測で得られるデータは、期間、観測点、予算が有限であるため、数値解析を導入し現地観測と組み合わせて評価することが有効である。特に数値解析を導入するメリットは、現地観測だけでは網羅できない空間範囲、期間の再現・試算が可能となり、想定される対策の効果検証が出来ることである。

海藻の繁茂や植物プランクトンの増殖など基礎生産量を再現・試算するためには、一般に生態系モデルが用いられる。生態系モデルの概要とモデル中で用いられている光環境に関する理論について以下に述べる。

### (1) 生態系モデルの概要

生態系モデルとは「海洋環境中の生態系構成要素の関係と動態を単純化した数理モデル」である。生態系を構成する多様な生物や物理環境要因をモデル化している。図-1に生態系モデルの概要を示す<sup>1)</sup>。

モデルの基本式は(1)式のように拡散方程式である。

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -u \frac{\partial B}{\partial x} - v \frac{\partial B}{\partial y} - w \frac{\partial B}{\partial z} + K_h \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + K_v \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^* \quad (1)$$

ここで $B$ は生態系構成要素、 $u$ 、 $v$ 、 $w$ は流速、 $K$ は拡散係数を示す。生態系構成要素 $B$ の内、有機態のものは植物プランクトン $PHY$ 、動物プランクトン $ZOO$ 、懸濁態有機物 $POM$ 、溶存態有機物 $DOM$ である。無機態は、リン

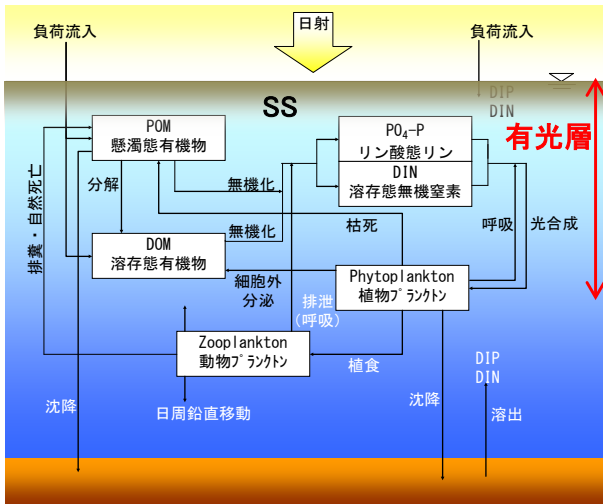


図-1 生態系モデルの概念図<sup>1)</sup>

酸態リン $PO_4\text{-P}$ 、溶存態無機窒素 $DIN$ （硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素）であり、その他として溶存酸素 $DO$ 、化学的酸素要求量 $COD$ がある。

$(\partial B / \partial t)^*$ は生物化学的変化項を示しており、例えば $B$ として植物プランクトン $PHY$ の場合、(2)式となる。

$$\frac{\partial PHY}{\partial t} = B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6 \quad (2)$$

ここで $B_1$ は光合成による増殖、 $B_2$ は細胞外分泌、 $B_3$ は呼吸、 $B_4$ は動物プランクトンによる摂食、 $B_5$ は枯死、 $B_6$ は沈降を表している。(2)式のような生物化学的変化項は各構成要素 $B$ の数だけあり、構成要素間の相互作用が計算される。具体的には、 $B_4$ の「動物プランクトンによる摂食」は、植物プランクトン $PHY$ は減少され、動物プランクトン $ZOO$ は同量増加される。また、 $B_5$ の「枯死」の場合は、懸濁態有機物 $POM$ が増加される。

このモデルを使用することにより各生態系構成要素 $B$ の時間、空間的な変動を再現・予測することが可能となる。しかし、上述のとおり生物化学的変化項は、対象となる種や生息環境に即したものが必要であり、また、複雑で多くの知見やパラメータが必要となることに留意しなければならない。

### (2) 光環境に関する理論

生態系の中で生産者は重要な構成要素のひとつであり、これは光合成による増殖によって支えられている。光合成による増殖は、栄養塩や光が必要となるが、ここでは光環境に着目する。水中の光は懸濁物質等により散乱され水深ともなって減衰する。光合成による増殖が可能な層が有光層であり、その下端の水深を補償深度と呼ぶ（一般に海表面光量の1%の位置）<sup>2)</sup>。

この水中での光減衰については一般にLambert-Beerの法則で記述できる。

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(-k \cdot z) \quad (3)$$

Shigeaki Mimori, Masami Ohashi, Nobuo Mikami

ここで $I_0$ は海面での光強度、 $k$ は消散係数、 $z$ は鉛直下向きを正にしている。

(3)式は、海洋における低次生態系モデルに用いられ、消散係数 $k$ は光の減衰度合いを示すパラメータであり、これにより補償深度が決定される。

消散係数 $k$ は一般に(4)式に示すRileyの式<sup>3)</sup>が用いられ、これは以下に示すようにクロロフィル $a$  (Chl- $a$ ) の関数として与えられている。

$$k = 0.04 + 0.0088 \cdot Chl-a + 0.054 \cdot Chl-a^{2/3} \quad (4)$$

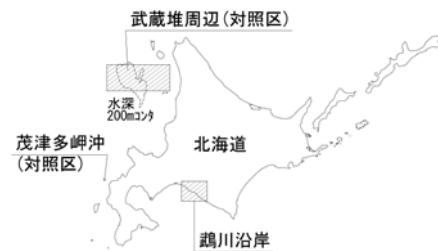
上式は陸域からの影響の小さい沖合域で用いられるものであり、沖合域の補償深度は主に植物プランクトンによる光の散乱で決まることを示している。

しかしながら(4)式では、河口沿岸域で見られるような濁水によって透明度が低下し、有光層が小さくなる現象を解析できないことを示している。このことから、河口沿岸域における光環境を解析するにあたっては、河川出水時等で移流拡散する浮遊土砂の影響も考慮した消散係数 $k$ の定式化が求められる。そこで、著者らは鶴川沿岸と武蔵堆の調査結果を用いて定式化を行った<sup>4)</sup>。次章で定式化の過程を示す。

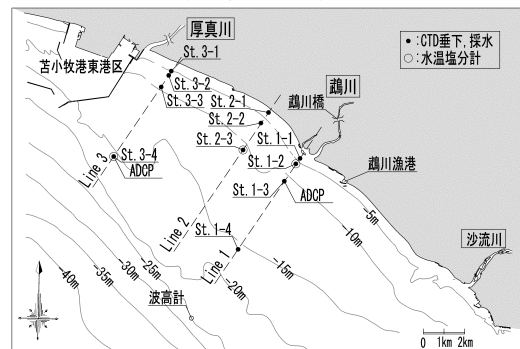
### 3. 光環境に関する調査結果と定式化

#### (1) 定式化に用いた観測データ

沿岸域の現地調査として図-2に示すように北海道の鶴川沿岸の各測点において平水時（2011年8月、2013年8月）、夏季出水時（台風1112号：2011年9月）、融雪出水時（2012年5月）に観測を実施した<sup>5), 6)</sup>。また、対照区として河川出水の影響の小さい沖合域である日本海北部の武蔵堆周辺および茂津多岬沖で観測されたデータを用



(a) 鶴川沿岸と武蔵堆周辺



(b) 鶴川沿岸の調査位置図

図-2 調査位置図

いた。武蔵堆の調査地点は北緯44度30分～45度00分、東経139度40分～141度30分に28地点、水深は60 m～900 mである。

鵜川における観測項目は SS、Chl-a などの水質、光量子量、植物プランクトンであり、方法は光量子計 (JFEアドバンテック社製 COMPACT-LW) による観測を行った。

## (2) 消散係数に関する観測結果

図-3は対照区である沖合域の武蔵堆周辺および茂津多岬沖 (水深450 m、3月観測) における平均Chl-aと消散係数 $k$ の関係を示したものである。ここで平均Chl-aは補償深度以浅のChl-aの平均値である。武蔵堆周辺のデータは観測年は異なるが、四季の観測を行っており<sup>7, 8, 9</sup>、春季に対して夏季、秋季、冬季はChl-a、消散係数 $k$ が小さい。これに加え茂津多岬沖は春季ブルーム時に観測され、Chl-aは9.18  $\mu\text{g}/\text{l}$ で消散係数 $k$ は0.27  $\text{m}^{-1}$ であった。茂津多岬沖はRileyの式と比較して小さいが、沖合域の消散係数 $k$ はChl-aの関数であるRileyの式で表すことが出来る。

一方、沿岸域である鵜川沿岸は、図-4に示すように夏季出水時、融雪出水時ともに消散係数 $k$ が大きく、Rileyの式では当海域の消散係数 $k$ を表現出来ないことがわかる。また、沖合域では消散係数 $k$ が最大で0.3  $\text{m}^{-1}$ 程度であった (図-3) が、鵜川沿岸では消散係数 $k$ が最大で3.5  $\text{m}^{-1}$ 程度まであり、かつChl-aが5.0  $\mu\text{g}/\text{l}$ 以下ではバラツキも大きいことがわかる (図-4)。これは濁水中に含まれる土粒子の影響が大きいと考えられ、浮遊物質SSを勘

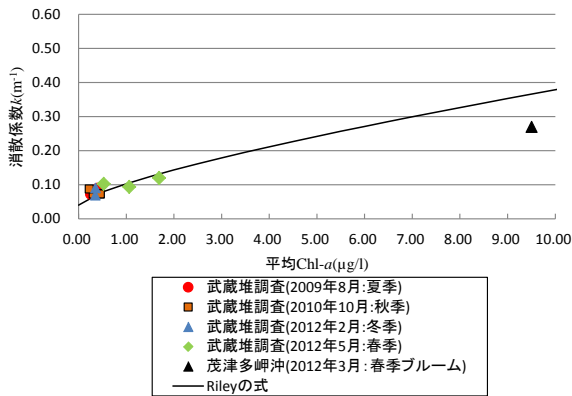


図-3 消散係数  $k$  と Chl-a の関係 (武蔵堆調査)

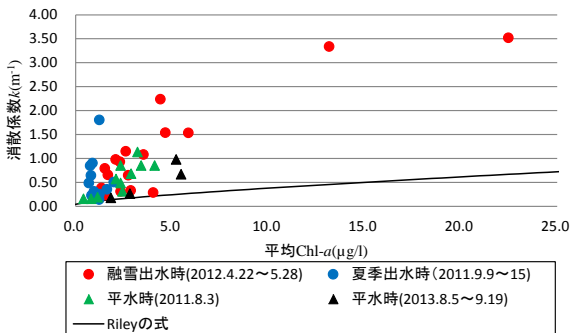


図-4 消散係数  $k$  と Chl-a の関係 (鵜川沿岸)

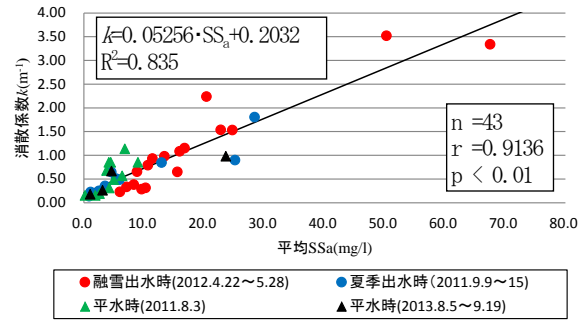


図-5 消散係数  $k$  と SSa の関係 (鵜川沿岸)

案して消散係数 $k$ をモデル化する必要があると考えられる。ここで浮遊物質SSはChl-aを内包していることから、浮遊物質SSを植物プランクトン量PHY (Chl-aより算出) とそれ以外SSa (主に土粒子と考えられる) に分離して整理することとした。植物プランクトン量PHY ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) の算出方法は、Chl-a ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ) にC/Chl-a比<sup>10</sup>として一般的な50を乗じ、炭素量Cとほぼ同程度の酸素量も含む化合物からなるとして2倍した。SSaは浮遊物質SS ( $\text{mg}/\text{l}$ ) から単位を $\text{mg}/\text{l}$ とした植物プランクトン量PHYを差し引いて算出した。

$$PHY = Chl-a \times [C / Chl-a] \times 2 = Chl-a \times 50 \times 2 \quad (5)$$

$$SSa = SS - PHY \quad (\text{mg}/\text{l}) \quad (6)$$

このように得られた平均SSaと消散係数 $k$ は図-5に示すように相関係数 $r$ が0.9136であり、当海域の光環境にSSaは大きく寄与していることがわかる。また、一次関数で回帰可能であると考えられる。

## (3) 消散係数 $k$ の定式化

当海域の光環境について低次生態系モデルにおける現況の再現や予測計算の精度向上に資するため、浮遊物質の影響を反映した消散係数 $k$ について予測式を導くことを考える。

生物生息環境の評価対象は港湾・漁港水域を含めた沿岸海域であることから、予測式は①空間的に沿岸から沖合まで連続的に使用できること、②出水時の濁水による影響を考慮できること、そして、③沿岸域における融雪出水前の春季ブルームのような植物プランクトンによる自己遮蔽についても適用できる必要がある。

これらのことから(7)式のように変数はSSaとChl-aの2つとし、関数形については図-4よりSSaと消散係数 $k$ の相関が良いため線形的に増加する一次関数とし、Chl-aはRileyの式と同様とした。比較として図-5の回帰式 ((8)式) を用いた。(7)式の各係数( $C_1 \sim C_4$ )については、鵜川沿岸および武蔵堆周辺の観測値 (計60データ) を用いて、RMSE (二乗平均平方根誤差) が最小となるようトライアル計算を行い設定した。

$$k = C_1 + C_2 \cdot SS_a + C_3 \cdot Chl-a + C_4 \cdot Chl-a^{2/3}$$

$$C_1 = 0.0461$$

$$C_2 = 0.0441$$

$$C_3 = 0.0054$$

$$C_4 = 0.1127$$
(7)

$$k = 0.05256 \cdot SS_a + 0.2032$$
(8)

図-6は、(4)式 (Rileyの式)、(7)式および(8)式の予測精度について観測値と比較したものである。(7)式と(8)式の決定係数 $R^2$ は0.888と0.835であり、若干ではあるが(8)式がより精度良く予測可能であることが分かった。

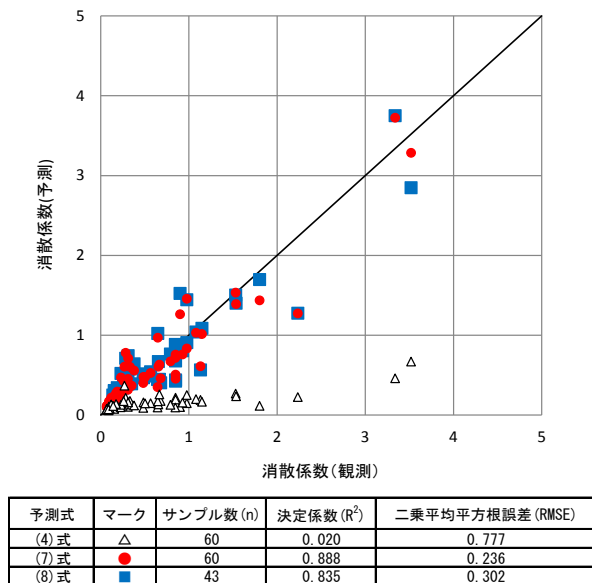


図-6 消散係数の予測

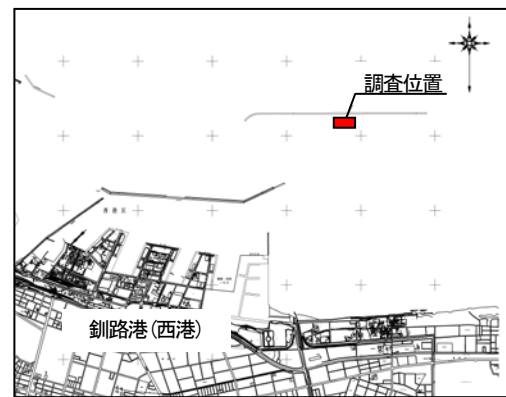
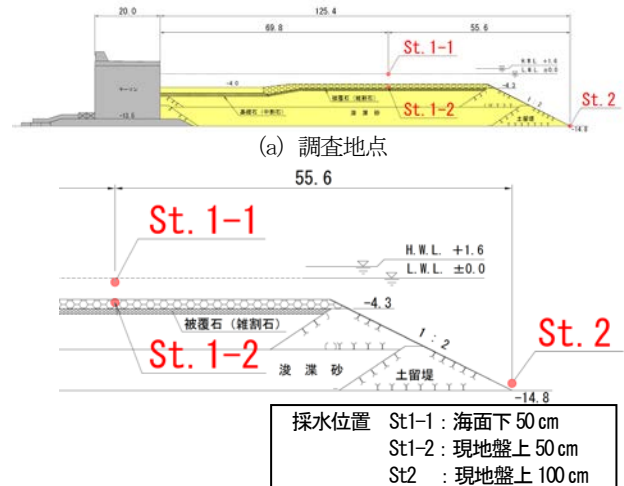


図-7 調査位置図



(a) 調査地点

(b) 調査地点拡大図

表-1 主な調査項目

調査項目	方法	観測内容
水質(2測点)	CID垂下	水温、塩分、濁度、Chl-a
	採水 各測点1~2層	SS, COD, NH <sub>4</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N NO <sub>3</sub> -N, PO <sub>4</sub> -P, SiO <sub>2</sub> -Si, Chl-a
光量子	光量子計	光量子量

#### 4. 予測式の港湾・漁港水域への応用と検証

上述した予測式について、港湾・漁港水域へ応用し、その妥当性の検証を行った。

##### (1) 観測内容および方法

港湾・漁港水域への応用として、河川に近接し、出水時には濁水の影響が想定される釧路港(西港)の島防波堤背後の小段(図-7)において調査を行うこととした。

この防波堤はエコポート事業により島防波堤背後に水深の浅い背後盛土の造成し、藻場の創出を図ることで自然環境調和機能を付加させている。観測地点は、図-8に示すとおり、小段上(St. 1-1、St. 1-2)と法尻部(St. 2)の3地点で調査を行った。観測時期については浮遊物質の影響に対する検証を行うため、荒天時の翌日である2014年10月31日に調査を行った。主な調査項目は表-1に示すとおり、水質(栄養塩など)、動植物プランクトン、光量子、波浪・流況観測とした。観測方法は船上より多項目水質計を垂下し、水温・塩分、Chl-a等の鉛直観測の他に、小型メモリ光量子計による測定、バンドーン型採水器を用いた採水により水質分析を行った。

##### (2) 釧路港の現地観測結果

釧路港における水質分析結果を表-2に示す。St. 2のSSは13 mg/lであり、St. 1-1、St. 1-2より大きい。これは底層の浮泥を採取したことによると考えられる。一方、Chl-aは測点間で大きな差はないと考えられる。

次にSt. 1、St. 2における光量子量の鉛直分布を図-9に示す。◆のプロットは光量子計で測定された観測値である。また、実線は前述した(3)式(Lambert-Beerの法則)を用いた回帰式を示している。

結果としてSt. 1、St. 2の消散係数は0.391、0.359であり、補償深度は11.8 m、12.8 mであった。

表-2 SS、Chl-aの観測結果

項目	St. 1-1	St. 1-2	St. 2
SS(mg/l)	5	4	13
Chl-a(μg/l)	23	35	26

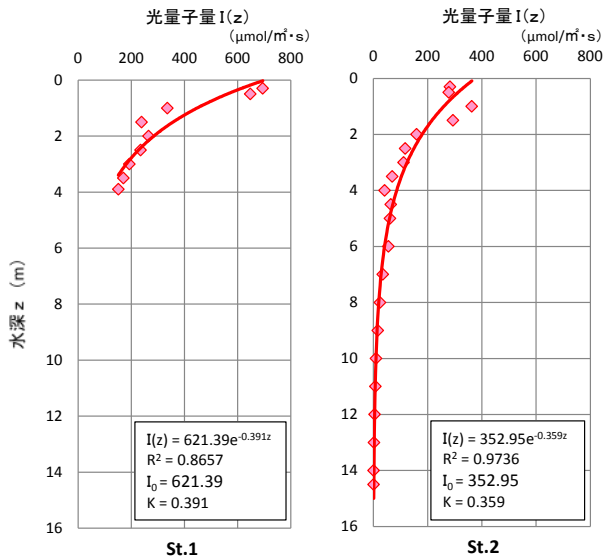


図-9 光量子量と消散係数の実測値

### (3) 実測値と予測式の比較

現地観測結果を予測式に適用する場合、補償深度以浅の平均SS、Chl-aが必要であるため、観測結果を用いて測点別に荷重平均を行った(表-3)。St.1はSt.1-1、St.1-2の観測結果を荷重平均した。St.2については底層のみの観測であるため表層はSt.1-1、St.1-2のデータで補完した。

これら平均SS、Chl-aを予測式(7式)に代入することで消散係数 $k$ 、補償深度 $D$ 及び光量子量 $I$ を算出した。結果を表-4、表-5、図-10に示す。なお、比較のためにRileyの式(4式)も記載している。図-10は光量子量 $I$ を海表面光量子量 $I_0$ で無次元化している。

Rileyの式(4式)により算出された消散係数 $k$ は実測値に対して小さい。特にSt.1、St.2ともに $0.17 \text{ m}^{-1}$ であるのは、Chl-aのみを変数としたことに起因する。これにより補償深度 $D$ は実測値に対して約2倍大きい。

これらのことから、Rileyの式を河口沿岸域における光環境を解析に用いた場合、特に浮遊土砂を多く含んだ水域では有光層を大きく見積もることを意味しており、生態系モデルで基礎生産量の算出すれば過大評価することが懸念される。

一方、予測式(7式)で算出された消散係数 $k$ は実測値よりも大きい。測点間の違いとしては、St.1がSt.2に対して消散係数 $k$ および補償深度 $D$ ともに実測値に近い値となっている。このことは図-10からもわかるようにSt.1の予測式は、実測値より光量子量を小さく算出されるものの、観測値のパラツキを勘案すれば概ね再現できているものとする。しかし、St-2の予測式では、光量子量の減衰が大きく実測値との差が大きくなることわかる。これは予測式(7式)に使用するパラメタとして、平均されたChl-aは、St.1とSt.2ではほぼ同値であるのに対し、平均SSはSt.2が約3 mg/l大きい(表-3)ことが

表-3 地点別荷重平均結果

項目	St.1	St.2
平均SS(mg/l)	4.5	7.4
平均Chl-a(μg/l)	2.9	3.0

表-4 予測値との比較結果 (St.1)

水深	実測値	予測式	Riley式
消散係数 $k \text{ (m}^{-1}\text{)}$	0.391	0.477	0.175
補償深度 $D \text{ (m)}$	11.8	9.7	26.3

表-5 予測値との比較結果 (St.2)

水深	実測値	予測式	Riley式
消散係数 $k \text{ (m}^{-1}\text{)}$	0.359	0.609	0.178
補償深度 $D \text{ (m)}$	12.8	7.6	25.9

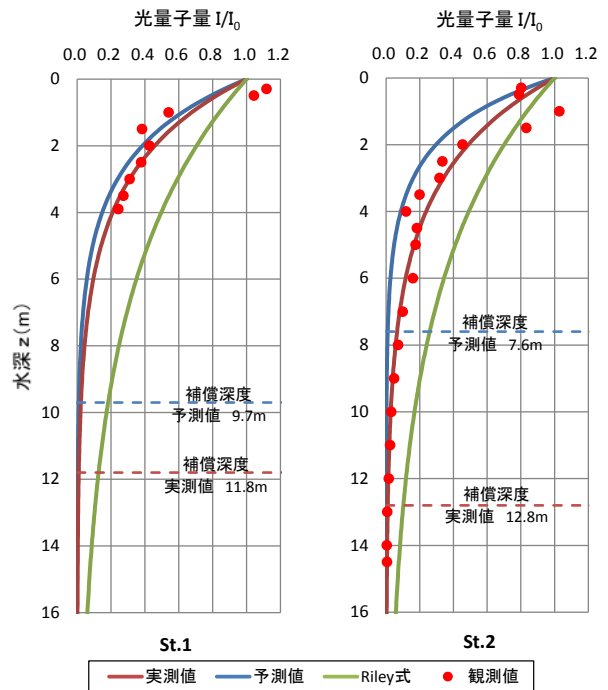


図-10 消散係数 $k$ の比較

要因であると考えられる。換言すれば、St.2で底層の浮泥を採取したため、水域の平均値が大きくなり、結果的に光環境の解析に誤差を生じさせたと考えられる。Rileyの式と比較すれば予測式はSt.1、St.2のどちらも実測値に近く予測式の妥当性が確認できた。

### (4) 予測式の今後の課題

予測式(7式)を釧路港に応用した場合、St.1のように比較的良好に光環境を再現できることがわかった。しかし、St.2のように平均SSが大きいところでは誤差が生ずる可能性があることがわかった。この予測式を用いる場合は平均SS、Chl-aの2つの変数が必要になるが、平均する前にSS、Chl-aの鉛直分布について検討を行う必要があると考えられる。

この予測式(7式)は鵜川沿岸および武蔵堆のデータを解析して定式化したものであり、本報ではじめて他

の海域への適用を検討したものである。上述のように平均SSが大きい海域（濁度が大きい水域）での適用性について課題点があるものの、今後の検討で汎用性をもった予測式と成り得るものと考えている。今後は港湾・漁港水域を含む河口沿岸域のデータをより多く用いて、(7)式の各定数 ( $C_1 \sim C_4$ ) や関数形について再検討する予定である。

## 5. まとめ

陸域からの濁水の影響が小さい沖合域では、消散係数  $k$  はChl- $a$ の関数であり低次生態系モデルで一般に使われるRileyの式で表現出来るのに対し、濁水に起因する土粒子成分を多く含む河口沿岸域では、消散係数  $k$  を精度良く表すことが出来ない。このため河口沿岸域に適した予測式を提案するとともに港湾・漁港水域に応用を試みた。

予測式の作成にあたっては、生物生息環境の評価対象は港湾・漁港水域を含めた河口沿岸域であることから、以下の3つを考慮してSSaとChl- $a$ の2変数および関数形を設定した。

- ①空間的に沿岸から沖合まで連続的に使用できること
- ②出水時の濁水による影響を考慮できること
- ③植物プランクトンによる自己遮蔽についても適用できること

予測式を釧路港に応用した結果、St. 1では比較的良好に光環境を再現できる。しかし、St. 2では平均SSが大きく誤差がSt.1に比べ大きい。このように平均SSが大きい海域で適用性に課題点があるものの、今後の検討で汎用性をもった予測式と成り得るものと考えている。

また、これにより港湾・漁港を含む沿岸域の生物生息環境を生態系モデルを用いて評価し、想定される対策の効果検証がより精度良く効率的に実施することが可能となると考える。

**謝辞：**本研究にあたり釧路港湾事務所の斎藤課長には現地観測のアドバイスおよび各種資料を提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 中田喜三郎：生態系モデル—定式化と未知パラメータの推定法—, *Journal of Advanced Marine Technology Conference*, Vol.8, pp.99-138, 1993.
- 2) 杉森康宏, 坂本亘：海洋環境光学, 356p, 1985.
- 3) Riley, G. A.: Oceanography of long Island Sound 1952-54 II. Physical Oceanography, *Bulletin the Bingham Oceanographic Collection*, Vol.15, pp.15-46, 1956.
- 4) 大橋正臣, 河合浩, 三上信雄, 水垣滋, 大村智宏, 山本潤, 門谷茂：鵜川沿岸の基礎生産に及ぼす光環境の影響に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第70巻, pp.1032-1037, 2014.
- 5) 大橋正臣, 山本潤, 須藤賢哉, 水垣滋, 門谷茂, 田中仁：鵜川沿岸の漁場環境に及ぼす河川出水の影響, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第68巻, pp.1121-1125, 2012.
- 6) 大橋正臣, 山本潤, 須藤賢哉, 水垣滋, 門谷茂：鵜川沿岸の基礎生産に対する融雪出水の効果について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第69巻, pp.1191-1195, 2013.
- 7) 有田正光, 池田祐一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上和男：水圏の環境, 404p, 1998.
- 8) 山本潤, 渡辺光弘, 林田健志, 峰寛明, 坂本和佳, 西田芳則, 田中仁：日本海北部海域での漁場整備の実現にむけた観測の試み, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第66巻, pp.1291-1295, 2010.
- 9) 山本潤, 渡辺光弘, 林田健志, 峰寛明, 坂本和佳, 西田芳則, 田中仁：日本海北部漁場における表層冷却期の基礎生産構造に関する現地観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第67巻, pp.1026-1030, 2011.
- 10) 山本潤, 河合浩, 大橋正臣, 林田健志, 西田芳則, 田中仁：水産生物の生活史に対応した北方海域の基礎生産構造に関する Lagrange 的な現地観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第69巻, pp.1376-1380, 2013.
- 11) Kawamiya M., M. Kishi and N. Sugihara: An ecological – physical coupled model applied to Station Papa, *Journal of Oceanography*, Vol.51, pp.635-664, 1995.