

平成23年12月15日 流域圏シンポジウム

河川連続体仮説の水工学的記述と 河川生態系での有機物・栄養塩動態

戸田 祐嗣

名古屋大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻

背景

高度経済成長期(1950年代)以降

人間活動

都市部への過度な人口集中・活発な産業活動
河川から河口域・閉鎖性水域への物質負荷の増大



水環境問題

植物プランクトンの異常増殖など水質悪化(赤潮・青潮等)
富栄養化・貧酸素化

生息環境の劣化 漁業資源の減少



河川における物質循環の動態把握の重要性

1. 河川上・下流域の連続性
2. 各々の河川景観における物質循環

河川の上・下流連続性

上流域

1. 河川上・下流域の連続性

- ・河川下流域における栄養塩の動態は、上流から運搬される物質の量や質の影響を受ける。(五味, 2007)
- ・河川下流域における43~87%の硝酸態窒素は、最上流に起源をもつ。(Alexander *et al.*, 2007)

下流域

Flow

海域



上流域

河川連続体仮説

2. 各々の河川景観における物質循環

外来性有機物(落葉・落枝等)

底生動物(破碎食者)

粗粒状有機物の破碎

中流域

下流域

有機物: 河畔林・底生動物

日射量<小>(河幅小)

生物種: 破碎食者・収集食者が卓越

上流域

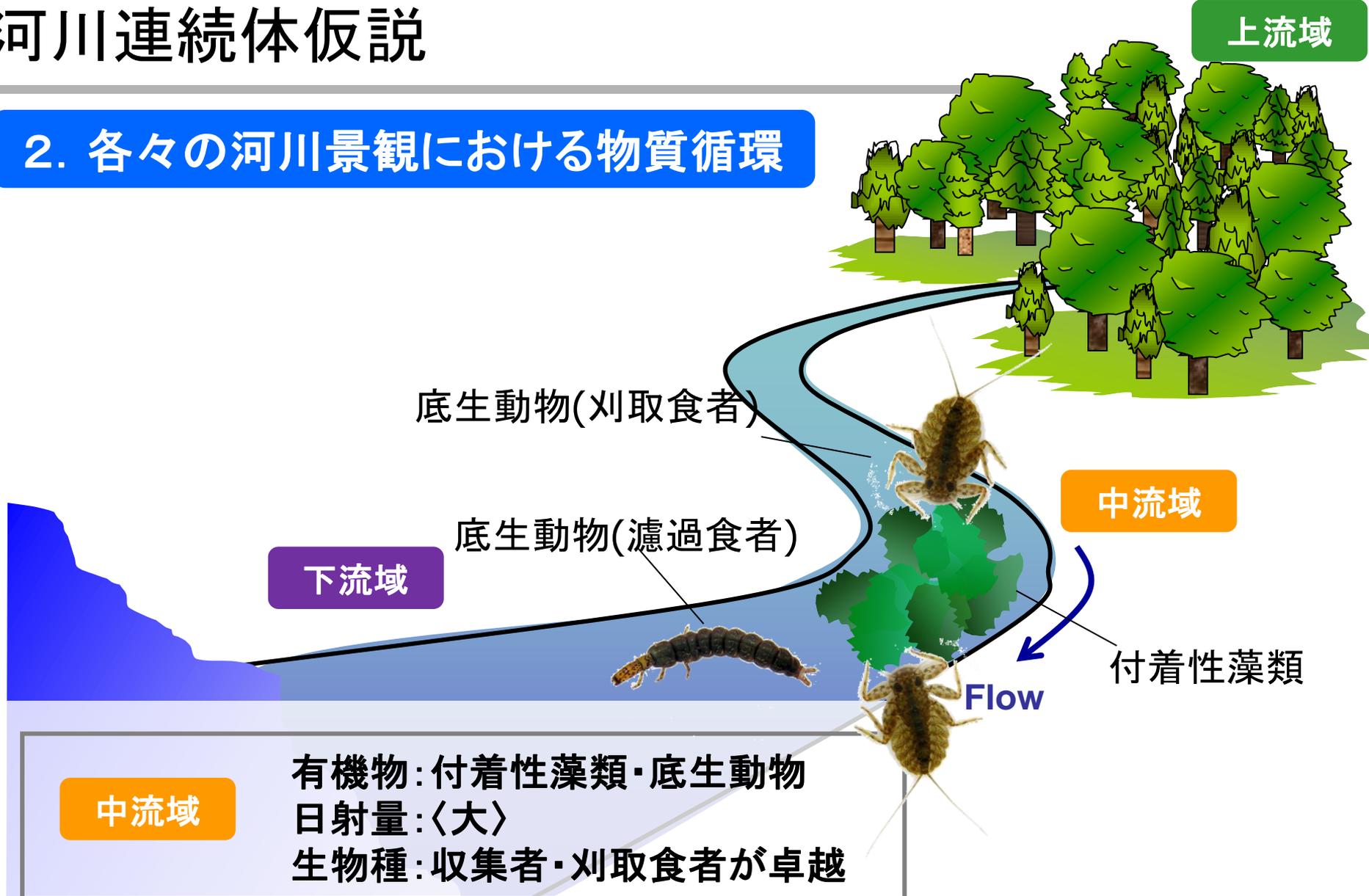
Flow

- ・河畔林が茂り、水辺に迫るため外来性有機物(落葉など)の供給が多い
- ・河床への光量が少ないため、付着藻類や水生植物群落は発達しない

海域

河川連続体仮説

2. 各々の河川景観における物質循環



- ・川幅が広がり河床への日射量が大きくなる。付着藻類や水生植物の生産量が大きくなる。
- ・付着藻類や水生植物の剥離が主な有機物源

底生動物:大阪府環境農林水産総合研究所HPより, <http://www.epcc.pref.osaka.jp/afr/index2.html>

河川連続体仮説

上流域

2. 各々の河川景観における物質循環

下流域

有機物: 動植物プランクトン・付着性藻類・底生動物
日射量: <大>
生物種: 収集者が卓越

・水深が大きくなり, 河床へ到達する日射量は減少する. 付着藻類に代わり植物プランクトンによる生産も一次生産に寄与する.

中流域

下流域

Flow

底生動物(堆積物食者)

植物プランクトン

研究目的

これまでの物質循環モデル→各々の景観に特徴的な物質循環を抽出
(礫床河川・湖沼・汽水域など)

景観毎の物質循環のモデル化

各々の景観の特徴を考慮した
物質循環モデルを構築

上流域・・・溪畔林からのリター，破碎食者
中流域・・・付着藻類，刈取・濾過食者
下流域・・・植物プランクトン，堆積物食者

粒状有機物・底生動物を考慮

セグメントの連結

上流から下流のセグメントを連続的に
取り扱うモデルを構築

セグメントM(水源から)
↓
セグメント3(河口まで)

両者を考慮した物質循環モデル

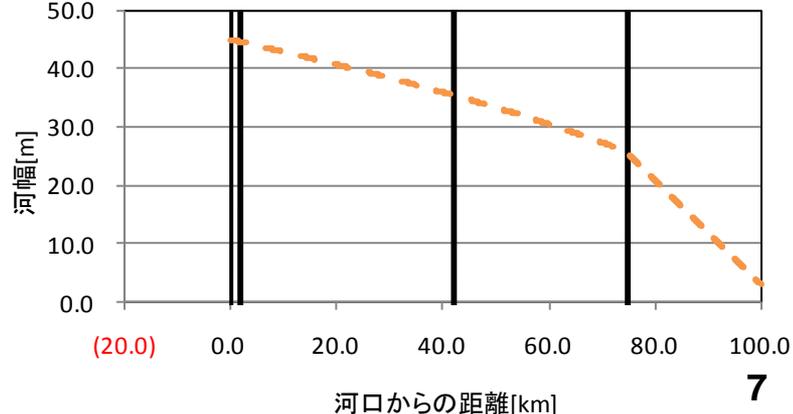
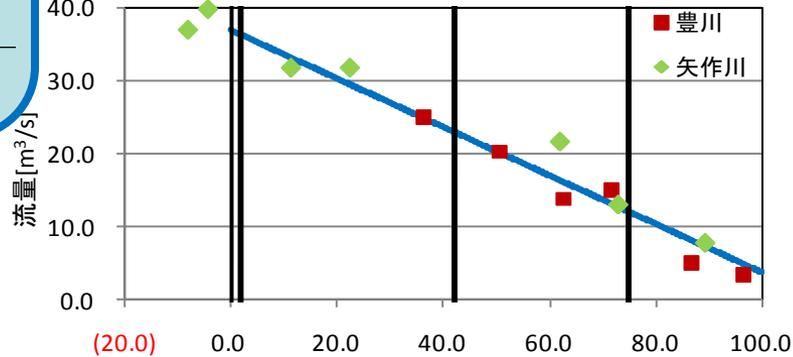
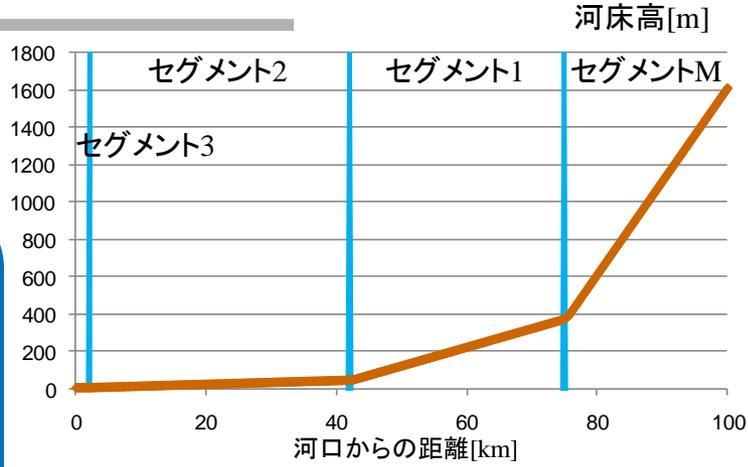
- ①景観毎に異なる物質循環を表現
- ②上流から下流まで一貫して扱えるモデル

モデル河川

河川縦断地形

矢作川・豊川のセグメント長を参考に設定

	セグメントM	セグメント1	セグメント2	セグメント3
河川区分	山地河川	扇状地河川	自然堤防帯河川	感潮区間
河道勾配	1/20	1/100	1/1000	1/5000
区間長[km]	25.0	33.0	40.0	2.0
代表粒径[cm]	25.0	5.0	0.5	0.05



流量

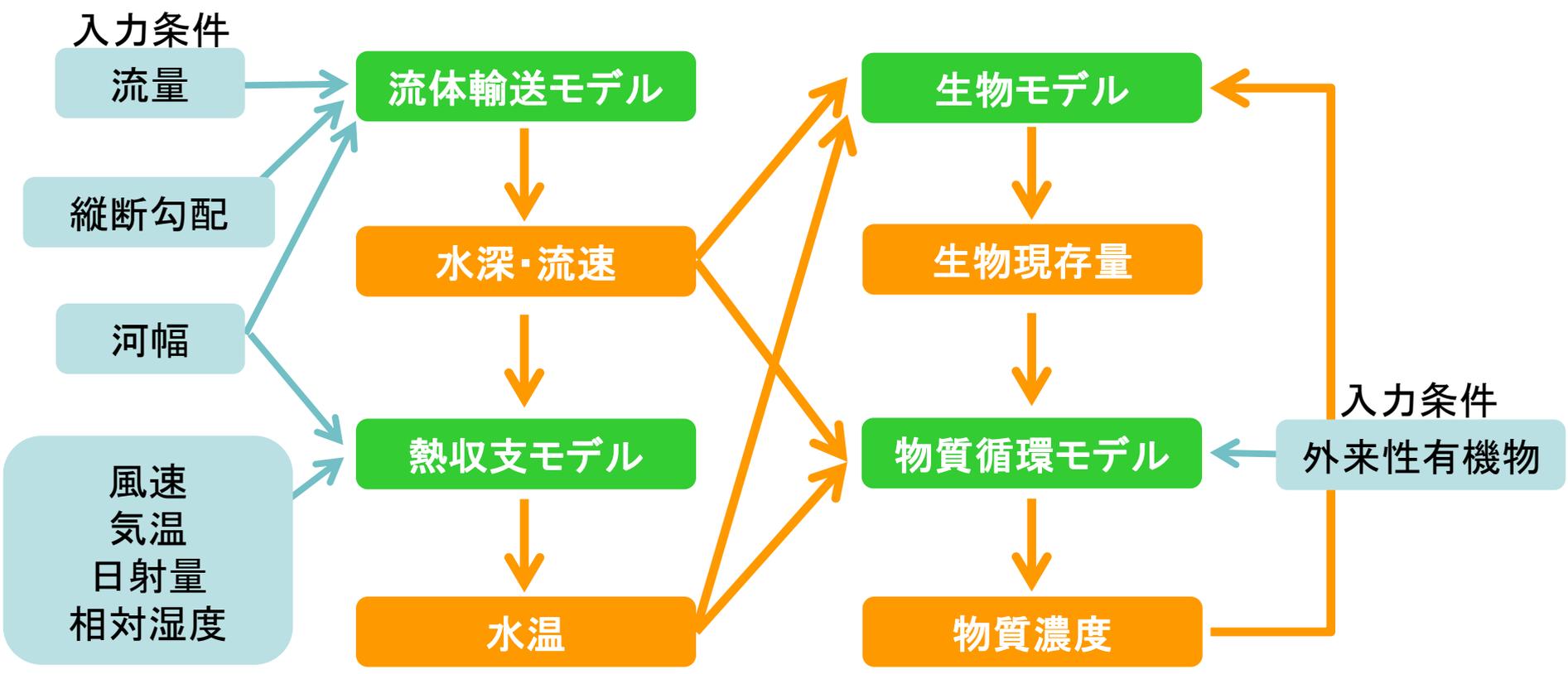
矢作川年平均流量・豊川年平均流量

河幅

セグメントM $B = 0.01Q^2 + 2.54Q - 6.55$

セグメント1～セグメント3 (レジーム則) $B = \alpha Q^{1/2}$

モデルの構造



○生物項目
底生動物(破碎食・刈取食・濾過食・堆積物食), 付着性藻類, 付着性他栄養生物, 動植物プランクトン

○水質項目
有機物(粗粒状有機物・微粒状有機物・溶存態有機炭素, 溶存無機態(窒素三態・リン酸態リン), 溶存酸素

流水層

CPOM

動物プランクトン

植物プランクトン

生物項目

底生動物(破碎食者・刈取食者・濾過食者・堆積物食者)
付着性藻類・付着性他栄養生物
動植物プランクトン

FPOM

溶存有機態物質

溶存無機態(P,N)

溶存酸素

付着性藻類

刈取食者

濾過食者

破碎食者

堆積物食者

付着性他栄養生物

底質

CPOM堆積物

FPOM堆積物

好気層

嫌気層



流水層

CPOM

動物プランクトン

植物プランクトン

FPOM

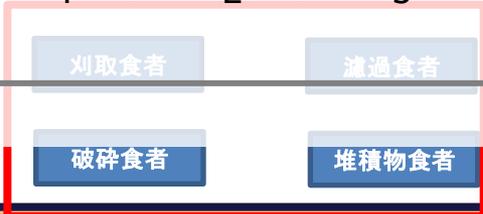
溶存有機態物質

溶存無機態 (P,N)

溶存酸素

水質項目

有機物(粗粒状有機物CPOM・微粒状有機物FPOM・溶存態有機炭素DOC
溶存無機態(窒素三態NH₄-N/NO₂-N/NO₃-N・リン酸態リンPO₄-P)
溶存酸素DO



付着性藻類

付着性他栄養生物

底質

CPOM
堆積物

FPOM
堆積物
好気層
嫌気層

物質循環モデル

生物モデル 付着性藻類現存量 $A(g/m^2)$

$$\frac{dA}{dt} = G_A - h_A A - k_{ae} A - G_{SC}$$

光合成による増殖

河床日射量

$$G_A = \begin{cases} \mu_A A & : A \leq A_S \\ \mu_A A_S & : A > A_S \end{cases}$$

h_A : 藻類の剥離速度 [s^{-1}]

$$L_b = L \exp[-(0.28SS + 0.68)H]$$

L : 水中に透過する日射量 [W/m^2]

H : 水深 [m] SS : 懸濁態物質濃度 [g/m^3]

藻類の比増殖速度 (s^{-1})

$$\mu_A = \frac{L_b}{L_S + L_b} \min \left\{ \frac{(NH_4 + NO_3)}{N_S + (NH_4 + NO_3)}, \frac{PO_4}{PO_{4S} + PO_4} \right\} \mu_{Amax} 1.047^{(T-20)}$$

A_S : 生産層内藻類量 [g/m^2]

N_S : 飽和硝酸態窒素濃度 [g/m^3]

μ_{Amax} : 藻類の最大比増殖速度 [s^{-1}]

L_S : 飽和日射量 [W/m^2]

P_S : 飽和リン酸態リン濃度 [g/m^3]

硝酸態窒素の吸収

物質循環モデル 硝酸態窒素 $NO_3-N(g/m^3)$

$$\frac{\partial NO_3}{\partial t} + U_S \frac{\partial NO_3}{\partial x} = k_{NO_2} NO_2 - \frac{\alpha_{ND}}{H} k_{dn} (Het - Het_A) - \frac{\alpha_N}{H} (1 - \phi_A) G_A$$

$$- \alpha_N (1 - \phi_P) \mu_P P + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial NO_3}{\partial x} \right\} + \frac{q_S}{BH} (NO_{3S} - NO_3)$$

α_{ND} : 脱窒に伴う硝酸態窒素消費率 k_{dn} : 脱窒速度 [s^{-1}]

物質循環モデル

生物モデル 付着性藻類現存量A(g/m²)

$$\frac{dA}{dt} = G_A - h_A A - k_{ae} A - G_{SC}$$

h_A : 藻類の剥離速度 [s⁻¹]

刈取食者による摂食

生物モデル 底生動物(刈取食者)現存量B_{SC}(g/m²)

$$\frac{d(B_{SC})}{dt} = G_{SC} - (1 - e_{SC})G_{SC} - (e_{SC} - g_{SC})G_{SC} - D_{SC}(B_{SC}) - E_{SC}(B_{SC})$$

e_{SC} : ベントス同化効率 g_{SC} : 総成長率 D_{SC} : 死亡速度 [s⁻¹] E_{SC} : 羽化速度 [s⁻¹]

成長による増加

$$G_{SC} = \mu_{SC} B_{SC}$$

刈取食者の比増殖速度(s⁻¹)

$$\mu_{SC} = \mu_{SCmax} \frac{A}{k_{SC} + A} \left\{ -\ln \left(\frac{B_{SC}}{C_{SC}} \right) \right\}$$

破碎食者の環境容量(g/m²)

$$C_{SC} = \frac{A}{Se_{CP} + Se_{FP} + A + (FPOM + P + Z)} C_{Bent}$$

物質循環モデル

物質循環モデル アンモニア態窒素NH₄-N(g/m³)

$$\begin{aligned} \frac{\partial NH_4}{\partial t} + U_s \frac{\partial NH_4}{\partial x} = & -\frac{\alpha_N}{H} \phi_A G_A + \frac{1 - \sigma_{Het}}{\sigma_{Het}} \frac{\alpha_N}{H} G_H + \frac{\alpha_N}{H} k_{ae} (A + Het + FPOMH) \\ & + \frac{\alpha_N}{H} k_{an} (Het - Het_A) + \frac{\alpha_N}{H} r_{dec} + \frac{\alpha_N \alpha_{DNP}}{H} k_{mic} (CPOMH + Se_{cp}) + \alpha_N (k_{pe} - \phi_P \mu_P) P \\ & + \alpha_N k_{ze} Z + \frac{\alpha_N}{H} (e_{SR} - g_{SR}) G_{SR} + \frac{\alpha_N}{H} (e_{SC} - g_{SC}) G_{SC} + \frac{\alpha_N}{H} (e_{FC} - g_{FC}) G_{FC} \\ & + \frac{\alpha_N}{H} (e_{GC} - g_{GC}) G_{GC} + \alpha_{NC} k_{DOC} DOC - k_{NH_4} NH_4 + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ Dis \frac{\partial NH_4}{\partial x} \right\} + \frac{q_s}{BH} (NH_{4S} - NH_4) \end{aligned}$$

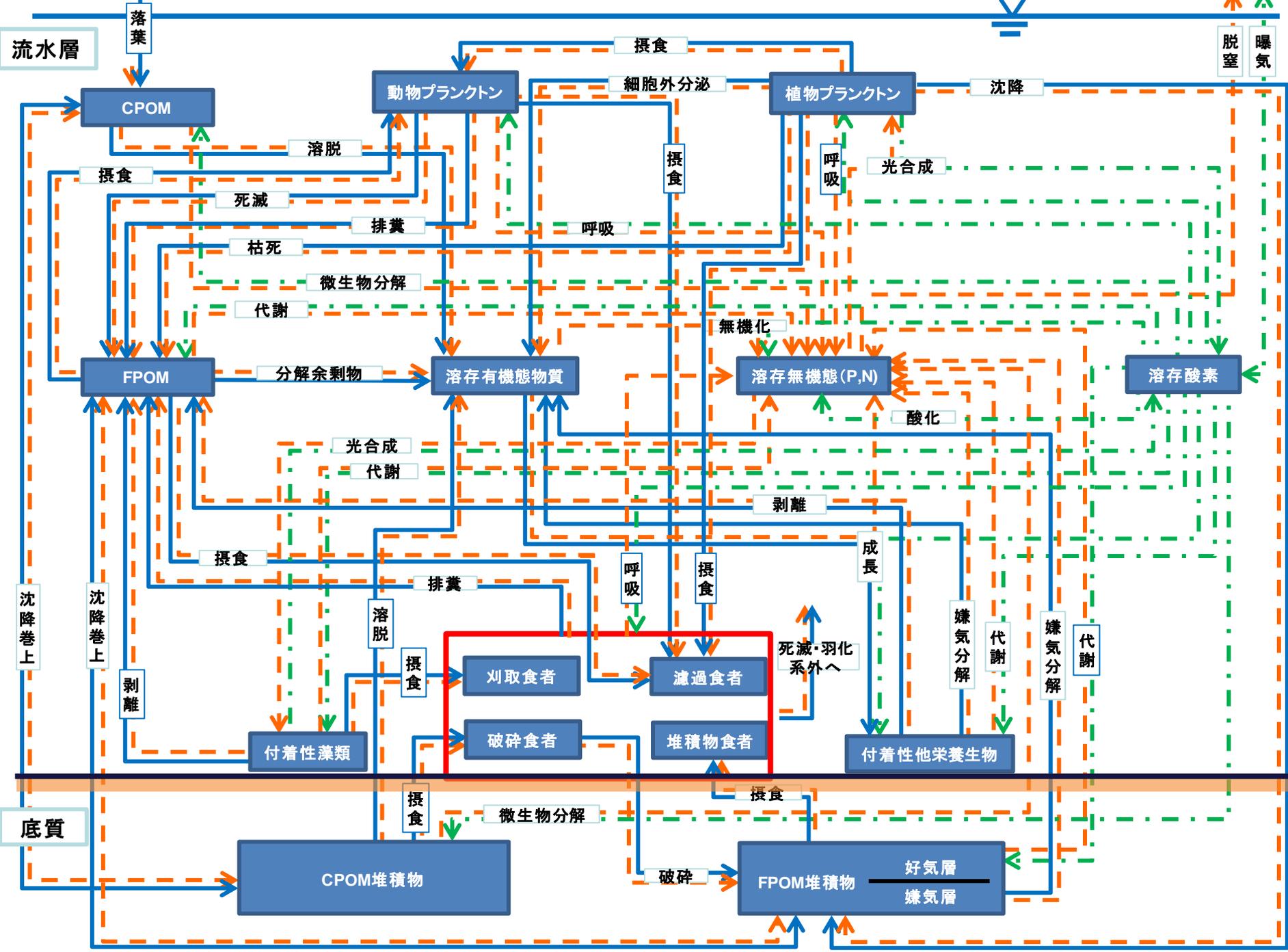
ϕ_A : 付着性藻類の無機窒素分割係数 k_{NH_4} : アンモニア態窒素の硝化速度[s⁻¹] α_{NC} : N/C [gN/gC]
 ϕ_P : 植物プランクトンの無機窒素分割係数 α_N : バイオマス中N含有量

刈取食者による排泄

生物モデル 底生動物(刈取食者)現存量B_{SC}(g/m²)

$$\frac{d(B_{SC})}{dt} = G_{SC} - (1 - e_{SC}) G_{SC} - (e_{SC} - g_{SC}) G_{SC} - D_{SC} (B_{SC}) - E_{SC} (B_{SC})$$

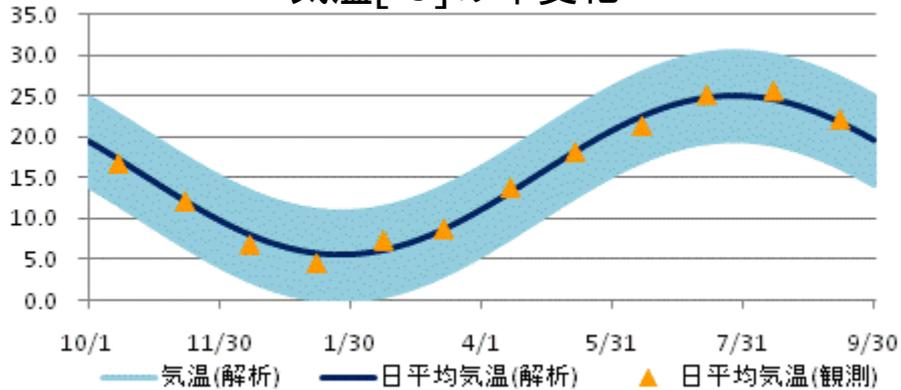
e_{SC} : ベントス同化効率 g_{SC} : 総成長率 D_{SC} : 死亡速度[s⁻¹] E_{SC} : 羽化速度 [s⁻¹]



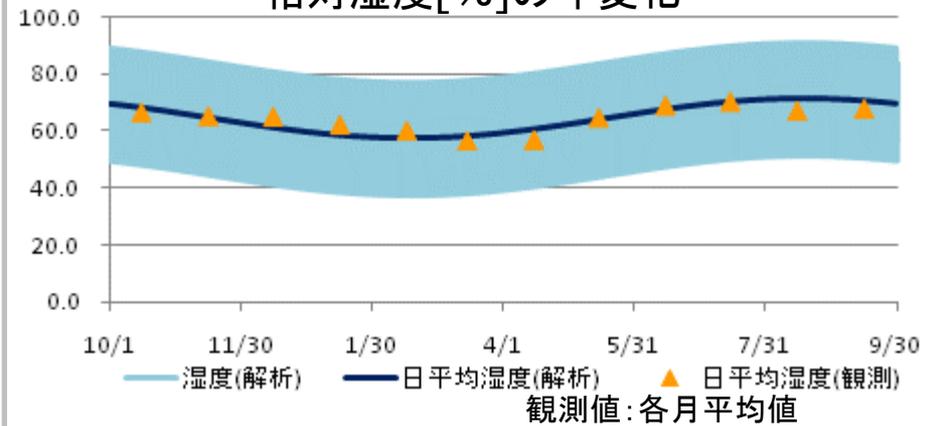
解析条件

- 気象(連続的に変化)
 - 気温・風速: 気象庁新城観測所(2009)
 - 相対湿度・日射量: 名古屋地方気象台(2009)

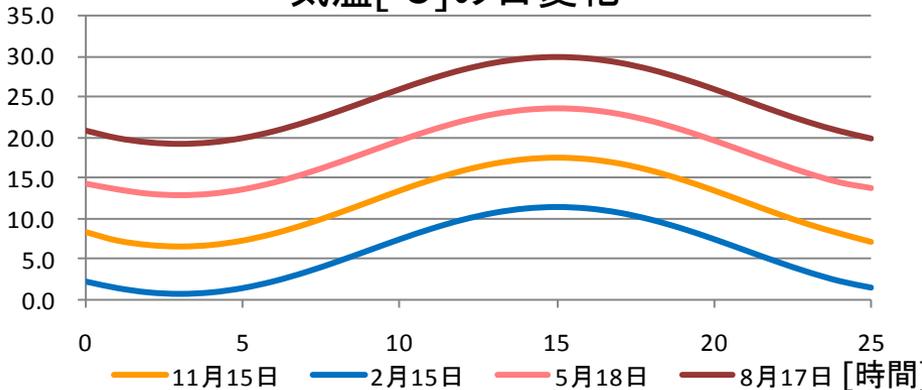
気温[°C]の年変化



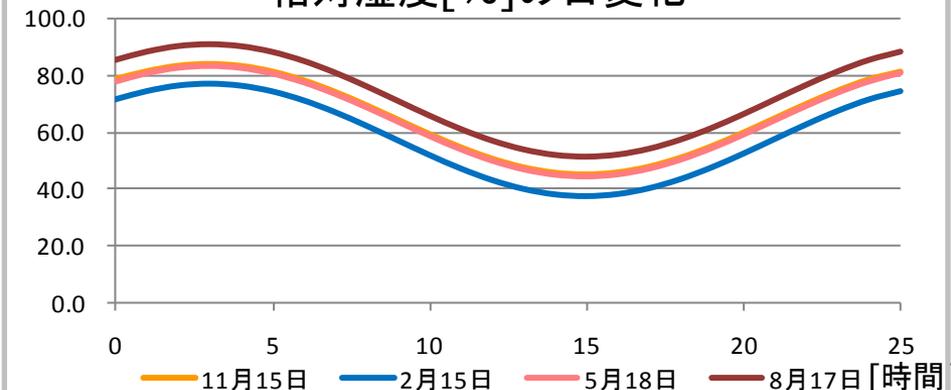
相対湿度[%]の年変化



気温[°C]の日変化



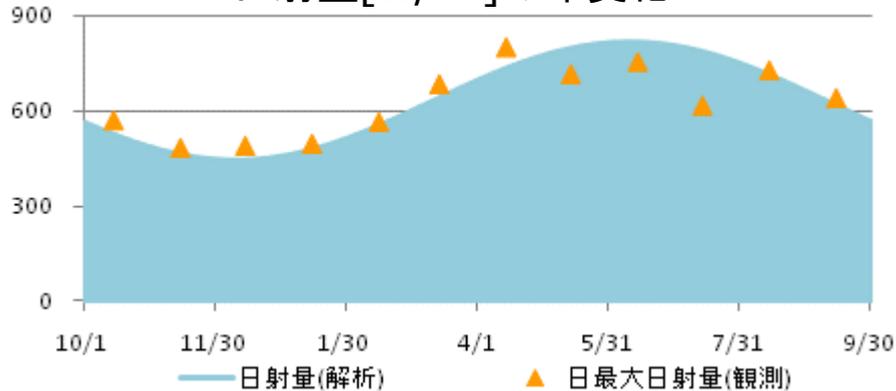
相対湿度[%]の日変化



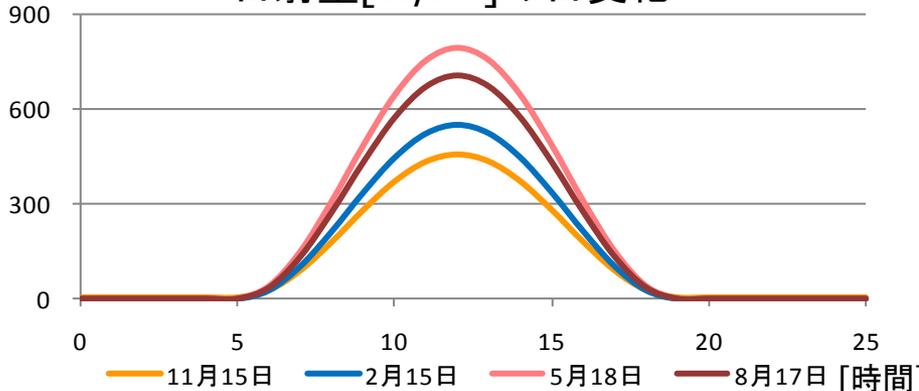
解析条件

- 気象(連続的に変化)
 - 気温・風速: 気象庁新城観測所(2009)
 - 相対湿度・日射量: 名古屋地方気象台(2009)

日射量[W/m²]の年変化



日射量[W/m²]の日変化



解析結果

上流域

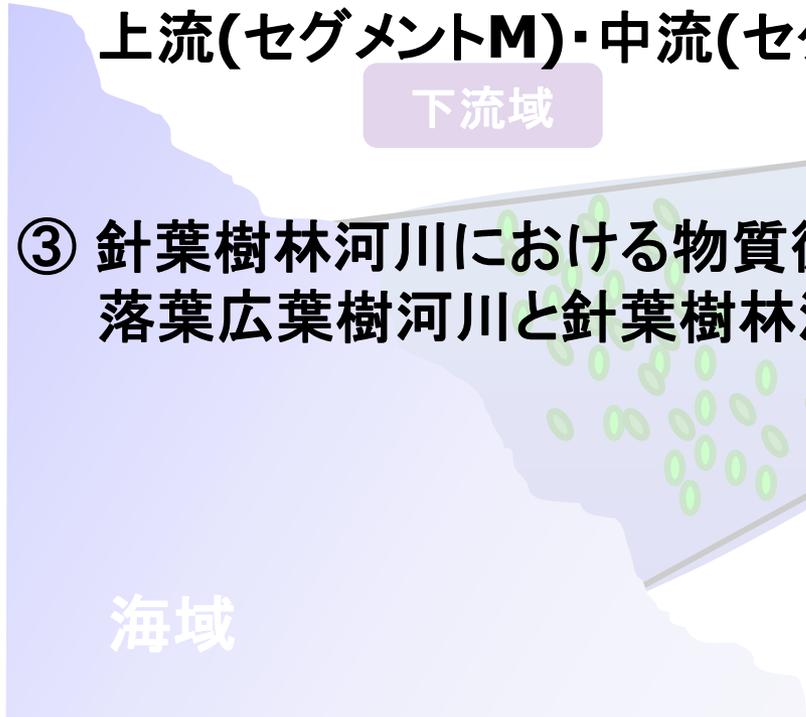
① 底生動物とその餌資源の流下方向分布

② 河川における物質循環
有機物の年間収支における、
上流(セグメントM)・中流(セグメント1)・下流(セグメント2)の違い

下流域

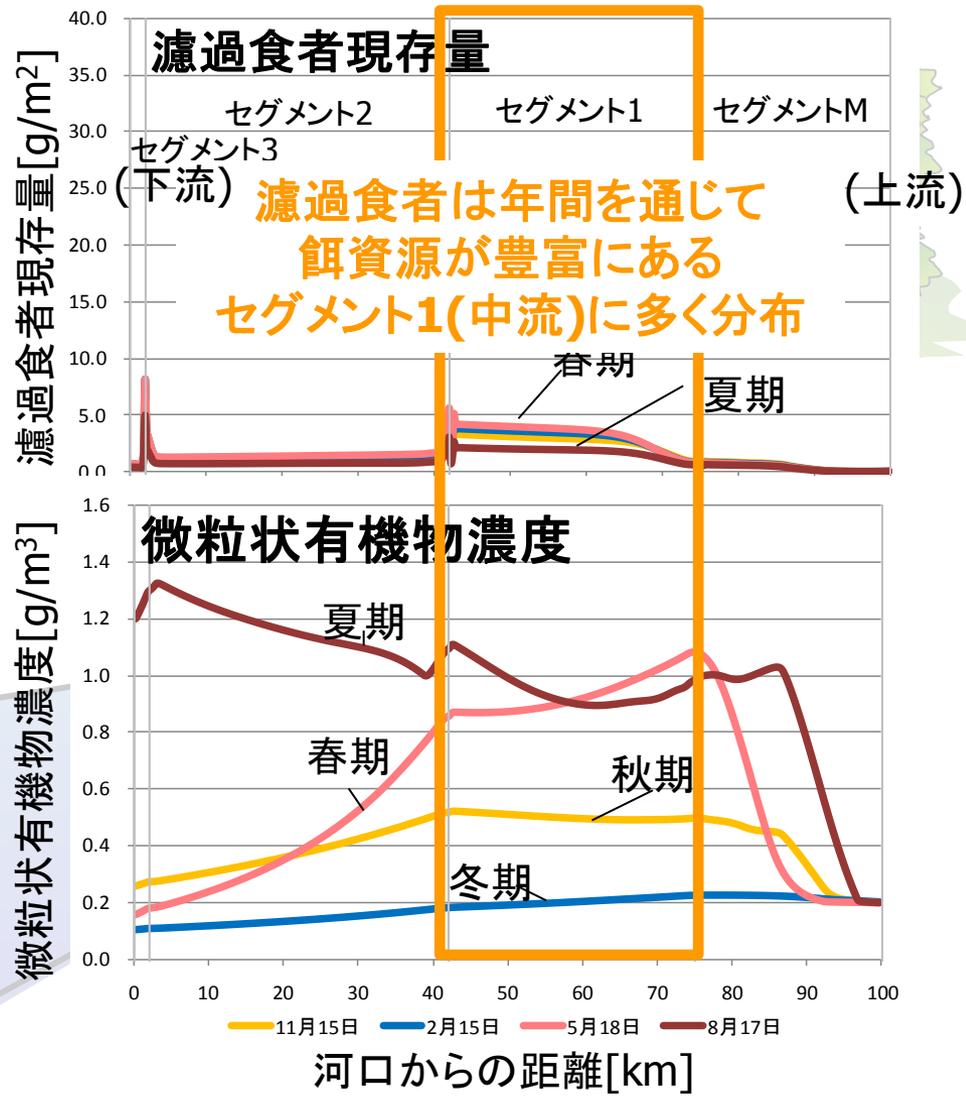
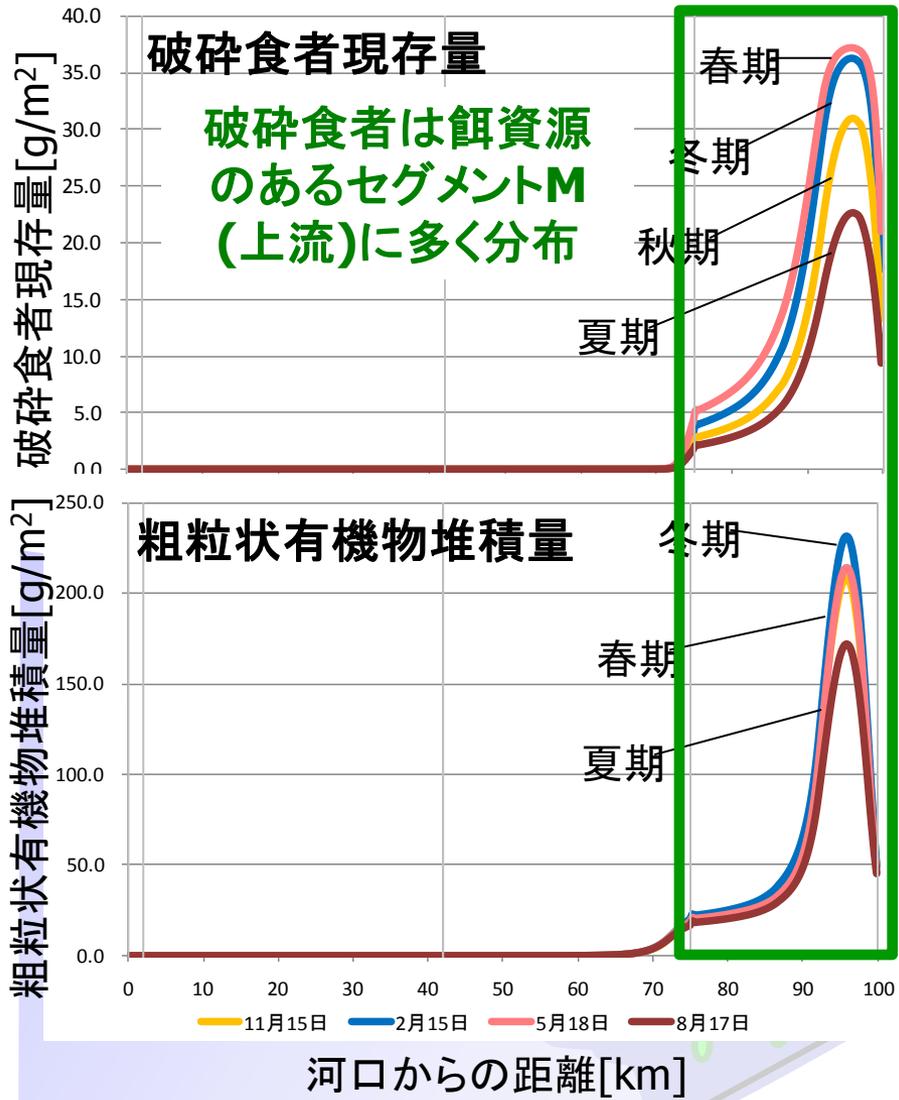
③ 針葉樹林河川における物質循環(粗粒状有機物が供給されない河川)
落葉広葉樹河川と針葉樹林河川との比較

海域



中流域

解析結果①



底生動物は餌資源に応じて河川内に分布する←河川連続体仮説の底生動物分布を再現

碎屑食者(粗粒状有機物):セグメントM
 濾過食者(微粒状有機物):セグメント1

刈取食者(付着性藻類):セグメントM~2
 堆積物食者(微粒状有機堆積物):セグメント2~3

解析結果

上流域

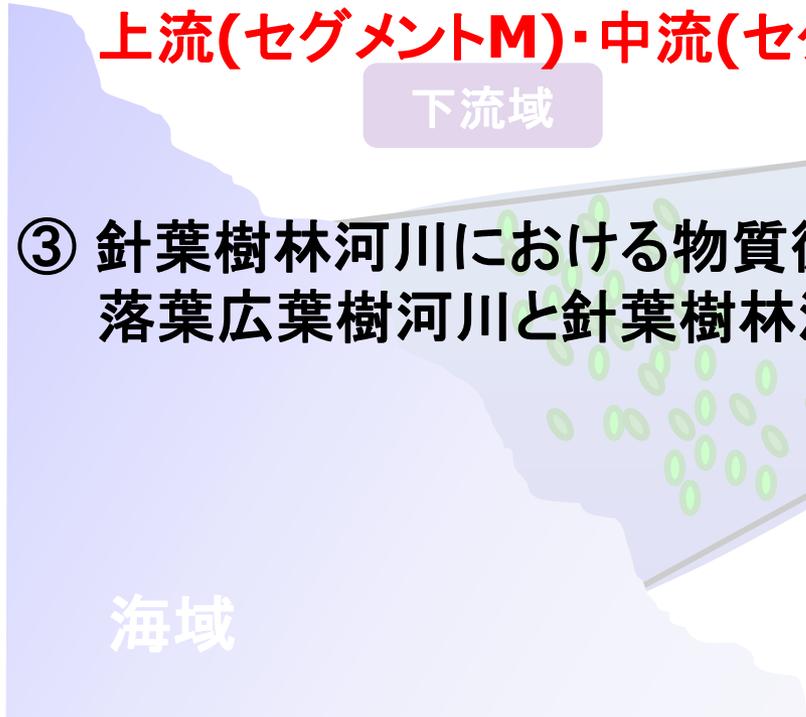
① 底生動物とその餌資源の流下方向分布

② 河川における物質循環
有機物の年間収支における,
上流(セグメントM)・中流(セグメント1)・下流(セグメント2)の違い

下流域

③ 針葉樹林河川における物質循環(粗粒状有機物が供給されない河川)
落葉広葉樹河川と針葉樹林河川との比較

海域

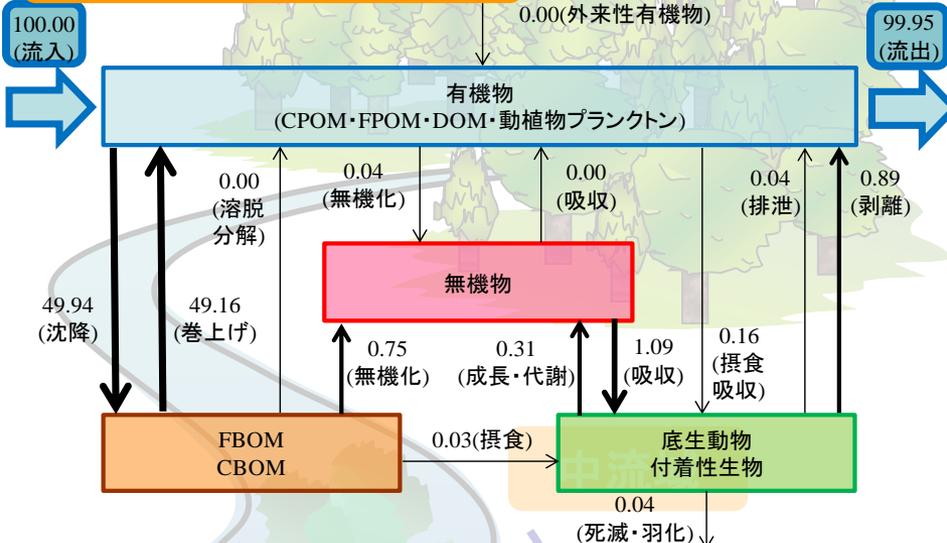
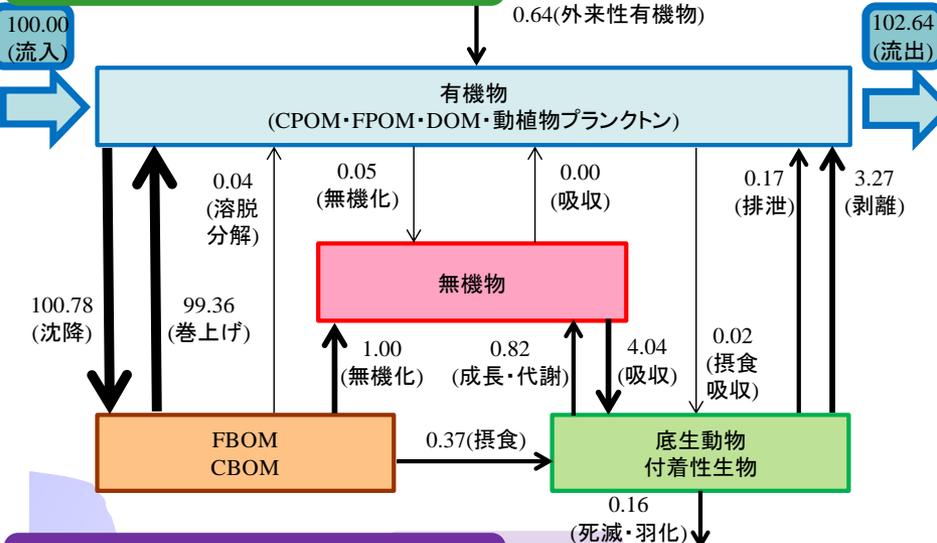


解析結果②

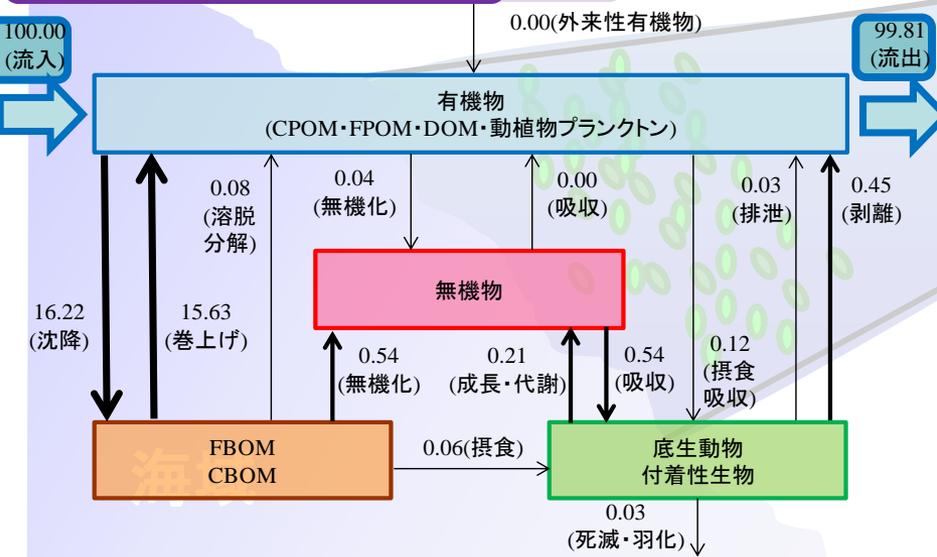
有機物の年間収支(各セグメント20 kmあたり)

セグメントM(上流域)

セグメント1(中流域)



セグメント2(下流域)

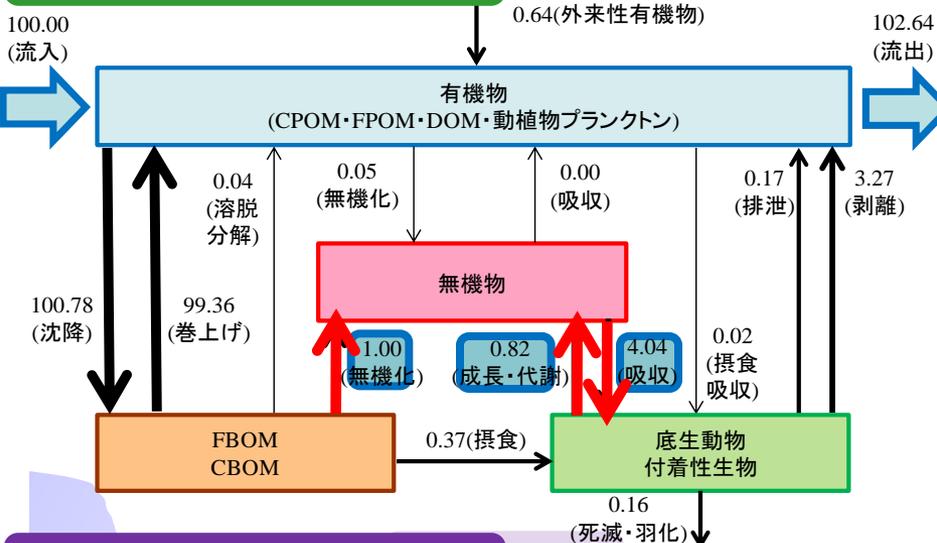


Flow

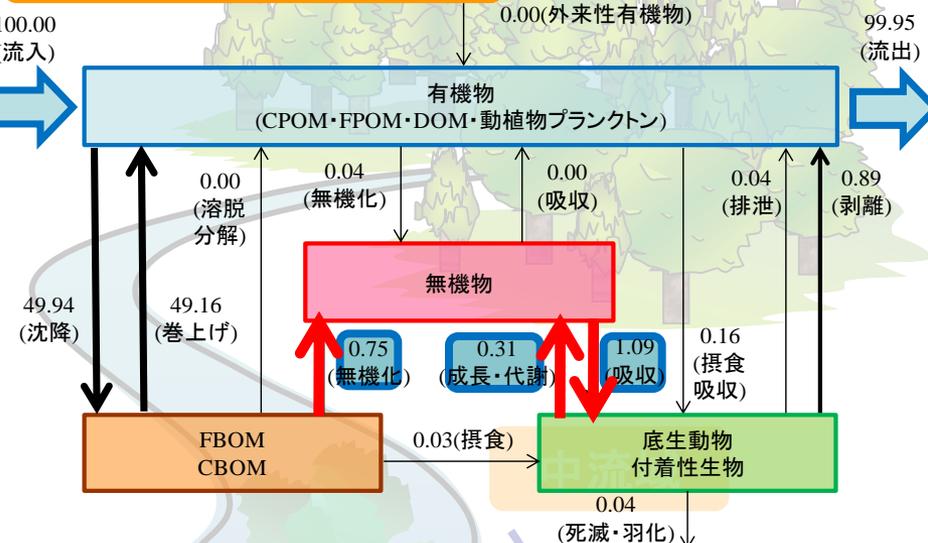
解析結果②

有機物の年間収支(各セグメント20 kmあたり)

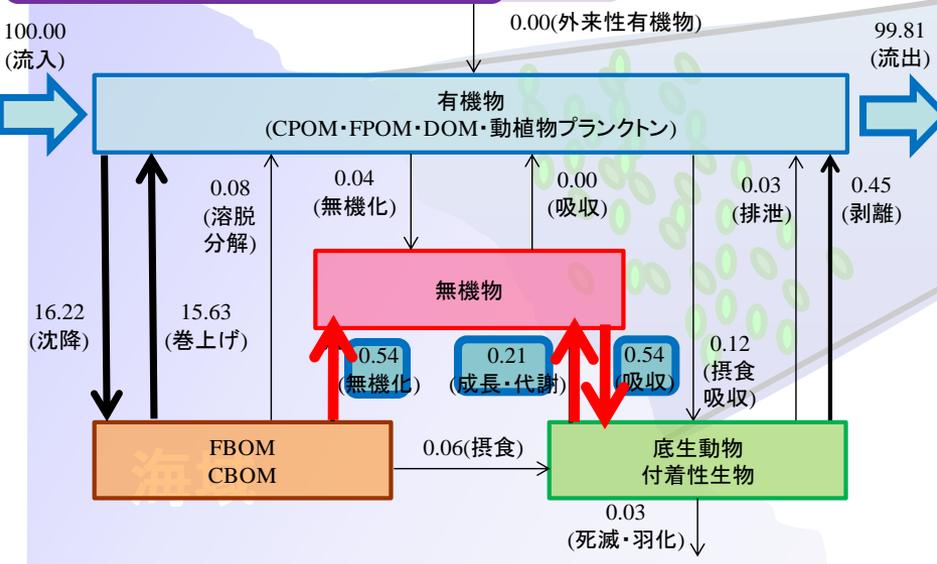
セグメントM(上流域)



セグメント1(中流域)



セグメント2(下流域)



解析結果

上流域

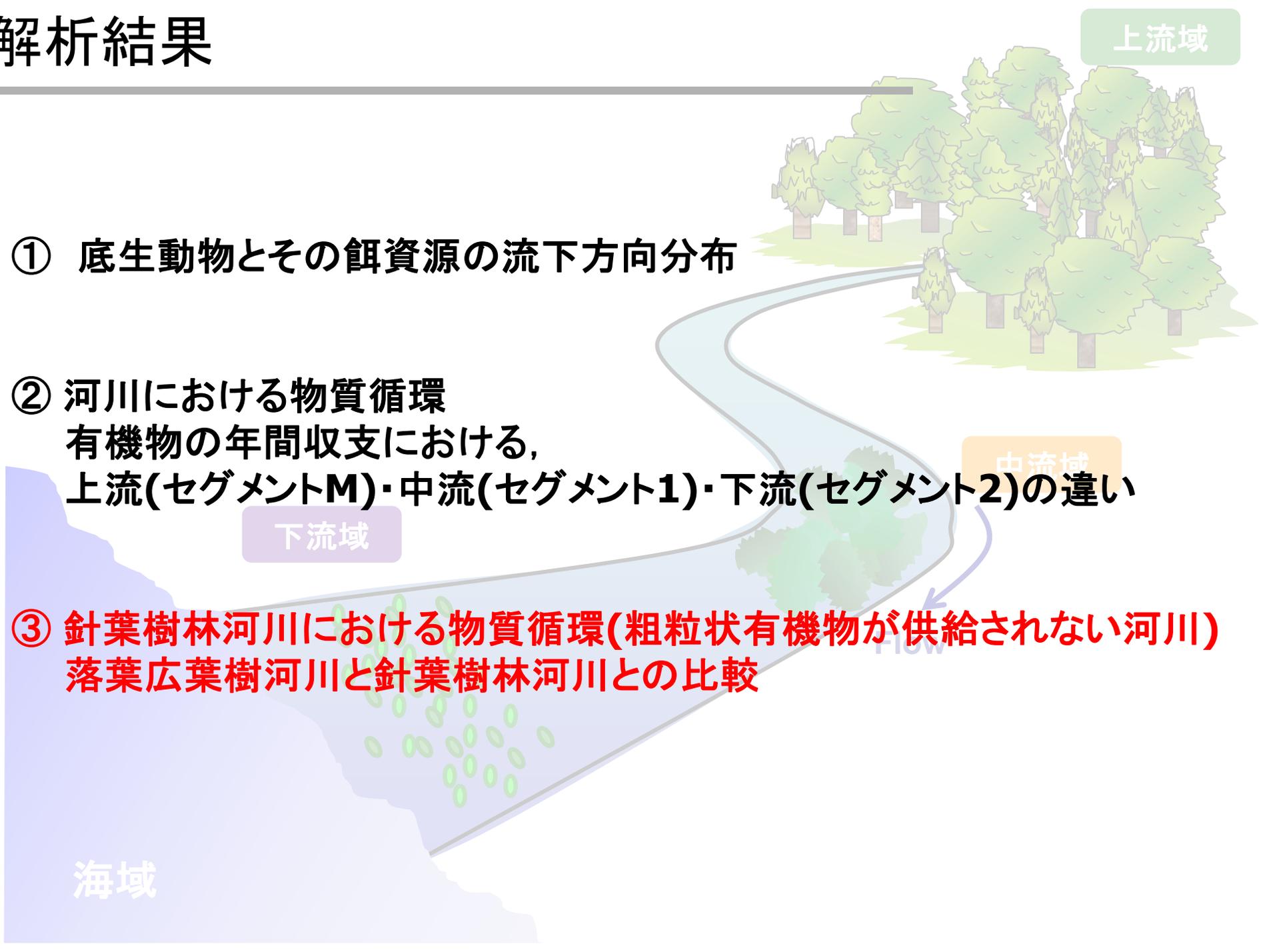
① 底生動物とその餌資源の流下方向分布

② 河川における物質循環
有機物の年間収支における、
上流(セグメントM)・中流(セグメント1)・下流(セグメント2)の違い

下流域

③ 針葉樹林河川における物質循環(粗粒状有機物が供給されない河川)
落葉広葉樹河川と針葉樹林河川との比較

海域



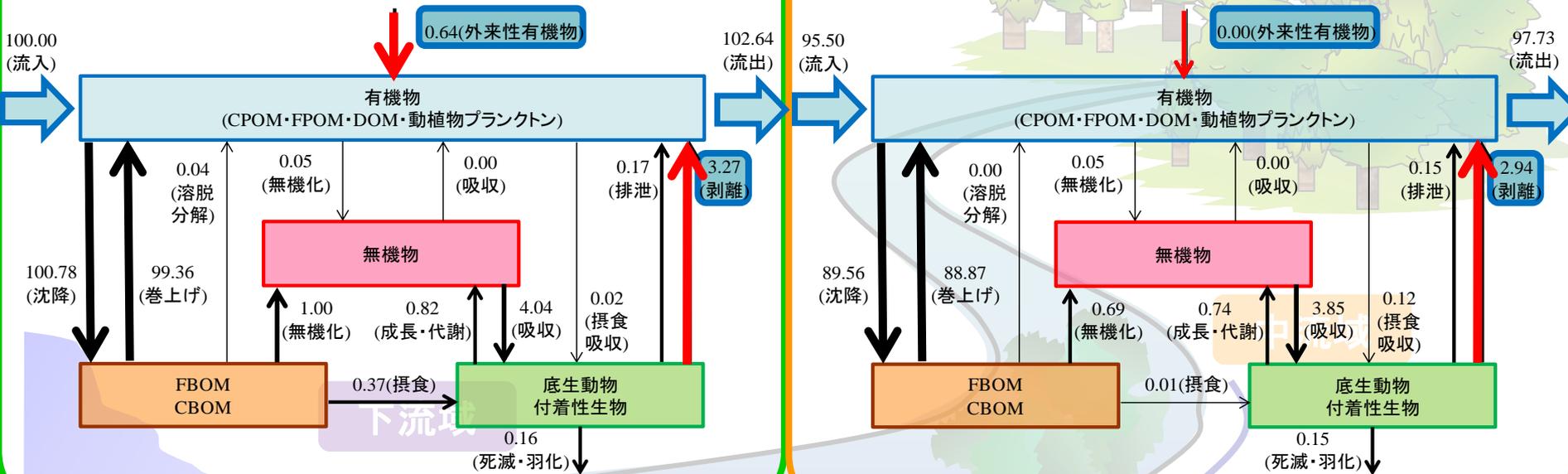
解析結果③

有機物の年間収支(セグメントM 20 kmあたり)

セグメントM(上流域)

広葉樹林河川

針葉樹林河川



下流域

Flow

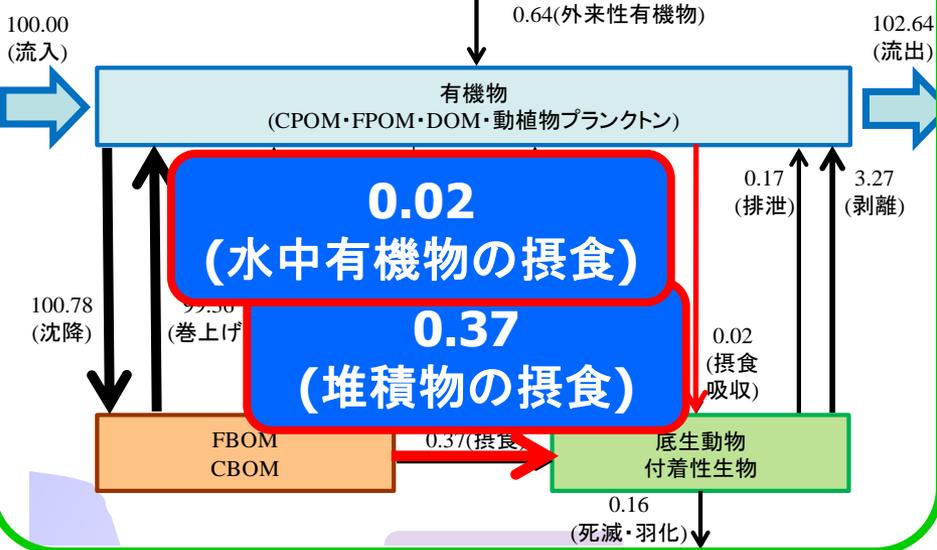
海域

解析結果③

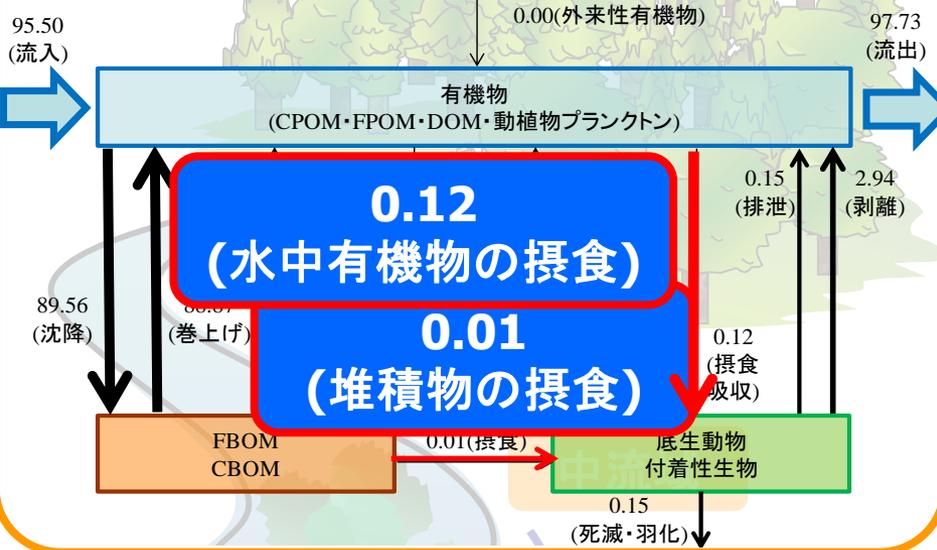
有機物の年間収支(セグメントM 20 kmあたり)

セグメントM(上流域)

広葉樹林河川



針葉樹林河川

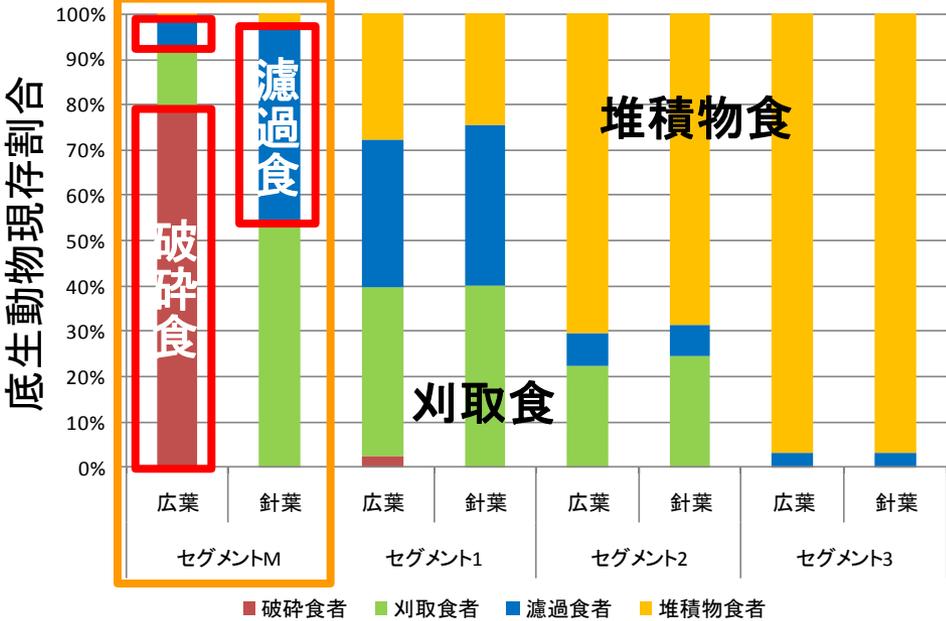


底生動物

○破碎食者(粗粒状有機堆積物)
広葉樹林河川 > 針葉樹林河川

○濾過食者(水中微粒状有機物)
針葉樹林河川 > 広葉樹林河川

○刈取食者(付着性藻類)
針葉樹林河川 > 広葉樹林河川



結論

粗粒状有機物

- ・セグメントMで陸域から供給された粗粒状有機物の大部分は、河川上流域で堆積する。

底生生物

- ・底生動物の餌資源である粗粒状有機物はセグメントM, 付着性藻類はセグメントMから2, 微粒状有機物はセグメント1, 微粒状の堆積有機物はセグメント2から3に多く分布した。また, 本研究で考慮した4つの摂食機能を持つ底生動物は、この餌資源に応じて河川内に分布し、河川連続体仮説で指摘されている底生動物の流程分布を再現することが出来た。

結論

有機物の物質収支

- ・有機物の年間収支に着目すると、最も卓越する物質循環は沈降・巻上げであった。また、各セグメントへの有機物の流入量と流出量の関係は、セグメントMでは増加、その他のセグメントでは減少した。
- ・無機物から有機物への付着性藻類による生産はセグメントM, セグメント1で卓越した。セグメント2, セグメント3では、有機物から無機物を生成する物質循環が卓越するようになる。

針葉樹林河川との比較

- ・針葉樹林河川では、破碎食者の餌資源が存在しないことから、生息出来なかった。また、破碎食者が生息しないセグメントMでは、刈取食者と濾過食者の現存量が増加した。
- ・粗粒状有機物の分解による栄養塩の供給により、付着性藻類の生産・剥離量が増加することが、水中の微粒状有機物濃度に差を生じさせた。また、底生動物による粗粒状有機物の破碎作用も同様に、微粒状有機物濃度に差を生じさせた。