

招聘研究者による講演:「数値河川生態系の構築～工学的視点での河川生態系把握に向けて～」

戸田 祐嗣（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

令和元年5月12日 柿田川生態系研究会

数値河川生態系の構築 ～工学的視点での河川生態系把握に向けて～

戸田 祐嗣

名古屋大学 大学院工学研究科 土木工学専攻

ytoda@cc.nagoya-u.ac.jp

0

【戸田】 今回、柿田川生態系研究会にお声がけいただき、ありがとうございます。

湧水河川・柿田川ということで、その名前は土木の分野でも非常に有名なんですけれど、実際に土木の分野で柿田川をフィールドにして研究されている先生というと、なかなかなくて、玉井先生とか、知花先生とか、本当に少ないメンバーしかいないという状況かと思えます。

ということで、実際に土木系の学会で柿田川の話聞いたことというのもあまりなくて、今回、宮本さんから声をかけていただいて、ぜひ柿田川見てみたいし、いい機会だから参加しようということで、参加させていただきました。

この研究会のしおりが届いて、それを開いたときに、まずびっくりしたのが、大先生方がこんなに集まられている会だったんだというふうに、後でちょっと冷や汗かきましたけれど。今日は、工学分野の視点で、どういうふうに河川生態系を捉えようとしているのかというところについてお話ししたいと思います。

演題に関しては、「数値河川生態系の構築」ということで、サイエンスというよりは、ど

ちらかという技術開発、テクノロジーみたいな側面があると思うんですけど、ここ数年取り組んでいることについてお話ししたいと思います。

こちら、簡単な目次になっています。メインのところは、この話ですね。今後の課題を最後に少しお話しするのと、あと、実際、これまで柿田川みたいな湧水河川で研究したことがない中で、そういう河川を考えると、まだどんなことを考えなければいけないだろうかみたいなところを考えて、最後にスライドでつけてきました。昨日、現地を見る前に考えていたスライドがあったんですけど、昨日現地を見て、懇親会でいろいろ話をしていく中で、ちょっと変えたくなったので、お手元にハンドアウトでお配りしているスライドと、最後の3枚ぐらいのスライドは、微妙に変わっています。ご容赦ください。

目次

◆簡単な自己紹介

◆研究の動機

◆数値河川生態系の構築

◆今後の課題：流域と河川の結合に向けて

◆湧水河川・柿田川を考える

1

まず簡単な自己紹介なんですけれど、私、高知県出身で、高知市内ですね。鏡川の近くで育って、よく台風が来たときに、あふれそうになって、市内の風景が映るんですけど、あの本当すぐ近くに住んでいました。鏡川で泳いで、釣りに行くときには、ちょっと頑張って自転車で仁淀川とかに釣りに行ったりしていました。大学で土木に入ったんですけど、河川に行くか、地盤に行こうか、結構悩んでいたんですけど、小さいころの経験があっただけで、河川の研究室に配属されました。配属して、それから、10年間ぐらい東京のほうで研究していて、そこから名古屋大学、辻本哲郎先生がおられた研究室に移ってきて、今に至るというふうな状況です。

自己紹介

高知県出身

鏡川の近く(高知市筆山町)で育つ。
鏡川で泳ぎ、仁淀川に釣りに。

1991年:東工大・土木入学

1994年:河川の研究室(池田研)に配属

2004年:名古屋大に異動

2

ちょうど私が大学生生活とか、研究室を選んだり、あるいは、大学院、研究者生活みたいなことを始めたころの時期というのが、90年代の前半になるんですけど、そのころというのは、土木の分野で河川の話題としては、近自然工法とか、多自然型川づくりとか、そういったものの事例集とかを見たり、現場を見にいたりとか、そんなことが話題になって、土木分野でも環境のことをきちんと考えてやりましょうという気運が高まっていた時代かと思います。

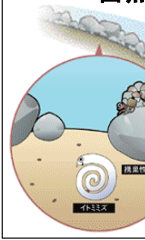
それから数年後に河川法が改正されて、河川の目的の中に、治水・利水に加えて、環境の保全と再生というのが加わったのと、あと、学会の動きとしても、工学分野と生態学分野が連携した分野として、応用生態工学会が設立されたりというのが、このころです。

研究の動機①

1991~94年頃(研究室配属のころ)

ダム上流

自然共生研究センターHP



個別・局所の環境劣化・解決策から研究生活をスタート

治水・利水? (配慮)? 環境

**このままだといつまでも
配慮の枠組みから抜けられない?**

流域・水系システムとしての環境



鑓川(利根川支川)

	平瀬	旱瀬
水深	浅い	浅い
水面	しわのような波	白波がたつ
速度	やや速い	速い
底質	沈み石	浮き石



3



代から
繁茂

そういう時期に研究を始めたわけですが、やり始めたのは、最初は、土木の水工学の河川工学の研究室に行ったので、それまでの研究というのは、基本的に流れの力学的な研究だったわけですね。ということで、その中で少し環境方向の研究をしようということで、瀬とか淵が水理的にどんな特性を持っているかということ进行现场に行って調べたりとか、そんなところから始めました。

それから、もう少し経ってからは、川の中に樹木が生えて、それで、樹木が洪水のときに流下阻害になってということで、樹林化問題というものを取り扱ったり。

あと、名古屋に移ってからになりますけど、今日、現場でもカワシオグサの話が出ていたんですけど、名古屋大学の近くの矢作川でも、同じようなカワシオグサの繁茂の話があって、そこではダム下流の、上から土砂が流れてこないところでカワシオグサが生えたり、あるいは、河床の礫をくっつけて生息するような水生昆虫がすんだりと、こういったものを、砂を上から流して剥離するにはどうしたらいいのかといったことを研究していました。

これ、もうちょっと下流の豊田市ぐらいまで行くと、砂河川なんですけど、人が水をたくさん利用していて、河川の流量が減っているんで、砂河川でも糸状緑藻が生えているみたいな状況を研究していました。

そういう研究をしていたんですけど、ローカルに問題になっていることについて、工学分野から何らかの解決策とかというものを見出せないかということで、個別河川とか、あるいは、局所的な環境劣化とかを解決するような方法に帰するような研究をやってしまし

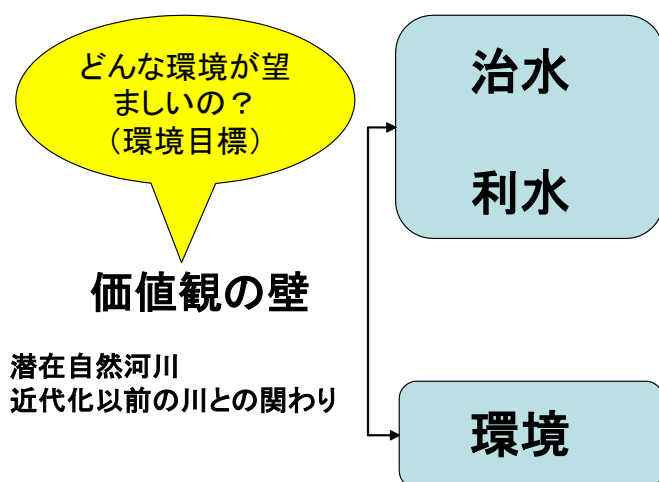
た。

だけど、そういう形で研究していく中で、少しイライラとを感じるものがあった、それがどうしても治水とか利水というものというのは、流域とか水系の中で全体で計画を立てるわけですね。下流のまちを守るために、上で水をどれだけ貯めるかとか、あるいは、流域の中でどうやって水を使うかという形で、水系・流域スケールで決めてくると。そういうもので、川の水の流し方とか使われ方みたいなものが決まったところで、そのローカルな場所で環境がどう変わっているのかというふうなことを研究したり、あるいは、それに対する対策を立てたりとかというふうなやり方だと、いつまでも環境は配慮という枠組から抜けられないのではないかと感じました。

そこで、今回お話しする数値河川生態系の話なんですけど、何を目指したかという、流域とか水系のシステムとして環境を記述できるような技術をまず開発するというのが大事なのではないかというのが、研究の動機の1番目です。

研究の動機②

河川環境研究の必要性



4

あともう一つの動機があって、それが、環境目標みたいな話です。河川工学の分野でも、川的环境について考えるようになってから、いろんな研究が始まったんですけど、当初からすごく議論されていたのが、治水とか利水だと、例えば、安全度を上げるとか、水の利用量みたいなものを決めるみたいな形の目標設定をするわけなんですけど、環境目標としてどういうものを考えればいいのかというふうなことが、90年代から議論されていたと思います。玉井先生がリードされて、潜在自然河川という言葉が出てきたり、それについ

て議論したりとか、あるいは、人と川との距離感をどう置くかということで、どれぐらい前の年代の環境が望ましいのかみたいなことを議論したりとか、こういった話が盛んに議論されていました。

これは今も引き続き大事なことだと思うし、議論は続けているんですけど。でも、治水とか利水の目標というの、環境の目標の立て方を対比して考えるとどうなっているのかなということで、少し考えました。

河川環境目標の階層構造		
(河川環境目標への科学的アプローチは可能かー考え方と実際 報告書(H17), 河川環境目標検討委員会監修, 藤田光一氏スライドの一部を抜粋)		
価値判断に起因する難しさ		
項目	治水	環境 (比較的単純な例を想定して)
①ビジョン, 大局的目標の設定	国民の生命・財産を守る/既往最大洪水でも被害が出ないように	50年前の環境に近づきたい/健全な生態系を取り戻す
②目標にどの程度到達したかを図る軸(尺度)の設定	安全に流せる洪水流量/安全に処理出来る豪雨規模	代表的な生物種の復活具合
③軸(尺度)上の目標(値)の設定	1/**年確率洪水or豪雨まで安全に処理出来る	10種の内9種まで復活/特定の生物種の復活
④アクション, 施策, 事業と軸(尺度)上の到達具合との関係把握手法	河床掘削, ダムなどが流下能力(安全に流せる流量、豪雨)をどのくらい上げるかを表現	河川に戻す流量と復活する種の関係を表現/攪乱の度合と植物生育状況との関係を表現
⑤軸(尺度)上の到達具合が人の暮らしにどう関わるか?	自分の命や財産に危害が及ぶ可能性が減る	???
定量性(現象の複雑さ)に起因する難しさ		

これは多分谷田先生も出られていた会議ではないかなと思うんですけど、河川環境目標検討の会議があって、そのシンポジウムで藤田光一さんが発表されていたスライドから拝借してきたんですけど、河川の、例えば、治水とか環境に対する目標を立てるのに、幾つかの階層があるでしょうと。それを治水と環境で比較して示してくれたスライドがありました。

例えば、一番最初にはビジョンとか大局目標の設定と書いているんですけど、これは治水でいくと、生命とか財産を守りましょうというのが大きい目標になります。それを、ここは環境のほうがわかりやすくということで、とりあえず書いた、それに相当するようなものを書いたということで、これが正しいという意味で書いているわけではないと思うんですけど。環境のほうだと、先ほどの何年前の河川がいいとか、あるいは、潜在自然河川とか、そういったゴールとしての環境というのがあると思うんですけど。でも、実際、その下にもいろんな目標設定の段階があって、例えば、ビジョンが決まったら、その次に、

ビジョンに向かって、どの程度到達したかを測る尺度というんですか、それを次の段階として設定しましょう。その次に、尺度の上の目標値を設定しましょう。その次に、実際に何かしたときに、その尺度には到達度合いがどういうふうになるかということ把握しましょう。それで、最終的にどれぐらい到達したかということが、人の暮らしとどう関わるのかということの評価するというぐらいの、5段階ぐらいのステップがあるでしょうと。

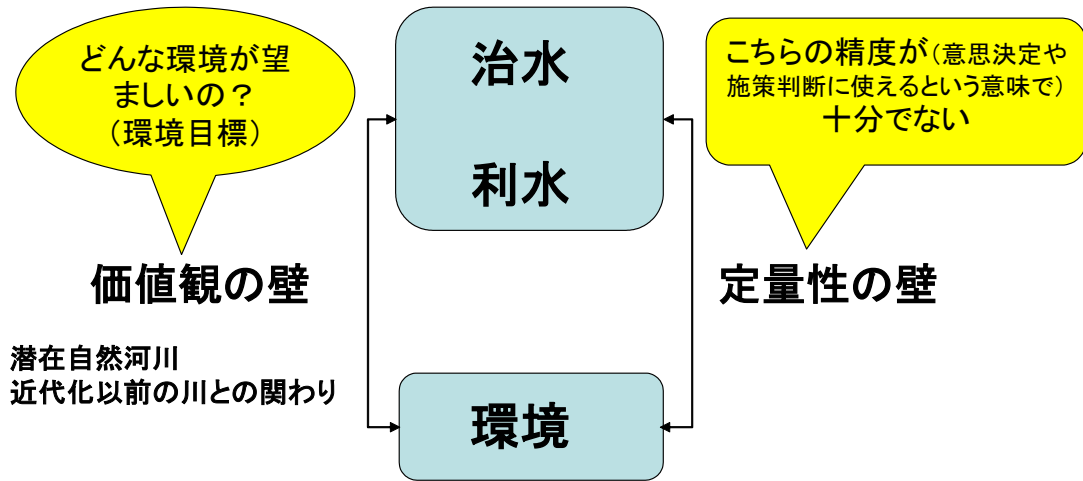
そう考えると、大局的なビジョンの次の階層として、例えば、治水の分野だと、安全に流せる洪水流量とか豪雨規模みたいなもので目標への到達度を測りましょう。その尺度が決まると、次に、100年に1回の雨、200年に1回の雨に耐えられるところまでやりましょう。それに到達するために、どんなアクションをとればどうなるかということを設定しましょうというふうな形になります。環境についても、それを何がしか対応関係をつけて、代表的な種の復活具合であったり、あるいは、どれぐらいの数値的な目標にするか。今度はアクション、事業との関係というふうな話になるんですけど。

ここでよくよく考えると、①のビジョンの設定とか目標の数値の設定というのは、治水や利水の分野でも、別に科学的に決まっているわけではなくて、社会的に決まっていると思うんですね。例えば、どこかの河川が100年に1回とか200年に1回でいいかどうかというのは、単純に科学的な答えがあるわけではなくて、社会的に議論して決めているという状況かと思います。

それに対して、②とか④というのは、ある程度定量的な技術があって決まってくる話、どういう尺度で測ればいいのかとか、尺度と実際の人間が起こすアクションとの関係を決めるのは、技術的、定量的に予測するという話かと思います。そう考えたときに、環境目標として潜在河川とか何年前の河川環境みたいな話も大事なんですけど、この定量的に評価する技術が、まだ工学分野からの環境の技術として弱いのではないかというふうに感じました。

研究の動機②

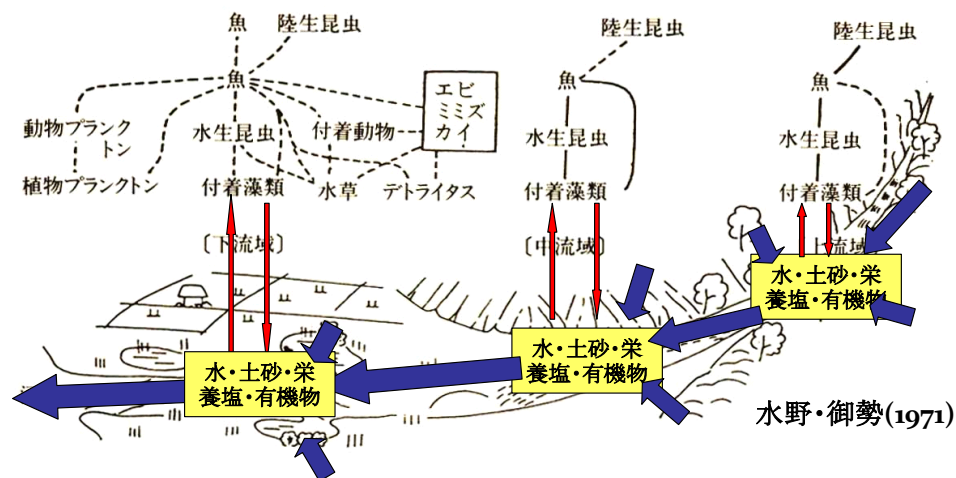
河川環境研究の必要性



6

例えば、治水・利水だったら、この部分には水文学、水文解析というものがあるが、こちらの人間のアクションと川の流せる流量みたいなところには、河川工学とか水理学とかというものがそういう技術を提供しているわけなんですけど、環境分野でもきちんと定量判断できるようなツールを、工学部で環境をやる分野として提供する必要があるだろうということで、まずこの定量性の壁を何とか取り払えないかと。こちらの精度が今のところ意思決定とかいろんな判断をするという意味で十分でないことが、しっかり目標を立てにくくなっているところの一因ではないかと考えて、そういう技術をつくりたいと思いました。

河川生態系と物質循環



まさに水野・御勢に描かれているくらいのスケールで(流域・水系システムとして)河川生態系を定量記述できる技術を開発したい！

機能群レベルで記述. 物質循環(物質保存則)を満足.

7

これは大学生のときに河川的环境を勉強し始めたときに、河川の生態学という水野先生・御勢先生の本を読んで、その中にあった、河川の生態系の上流・中流・下流でこんなふうに変わりますというふうな図なんですけれど。私たち工学分野だと、この付着藻類とか水生昆虫とかと書いている中にいろんな種類がいるわけなんですけど、種類まで分けて分析できるわけではないので、これぐらいの食物網みたいなレベルで河川の生態系を捉えられないかと。

さらに、人間との関係を考えると、我々、生態系に直接ダメージを与えるようなことをしたいと思ってやっているわけでもないですし、何がしか、例えば、水を人が使ったりとか、あるいは、流域に人が住むことで、水とか土砂とか栄養塩、有機物とかのフローを変えることで、生態系に影響を与えているという状況かと考えています。

そういった意味で、イメージとして、これぐらいの水系に沿ったスケールぐらいで河川の生態系を定量記述できるような技術を開発したいと。さらに、生物については、あまり種レベルまでやることは、自分たちの能力から考えても難しい話なので、機能群のレベルで物質循環を満足するような形で数値生態系モデルを開発しようということで、研究に取り組んでいます。

河川生態学で提唱されている概念を記述可能

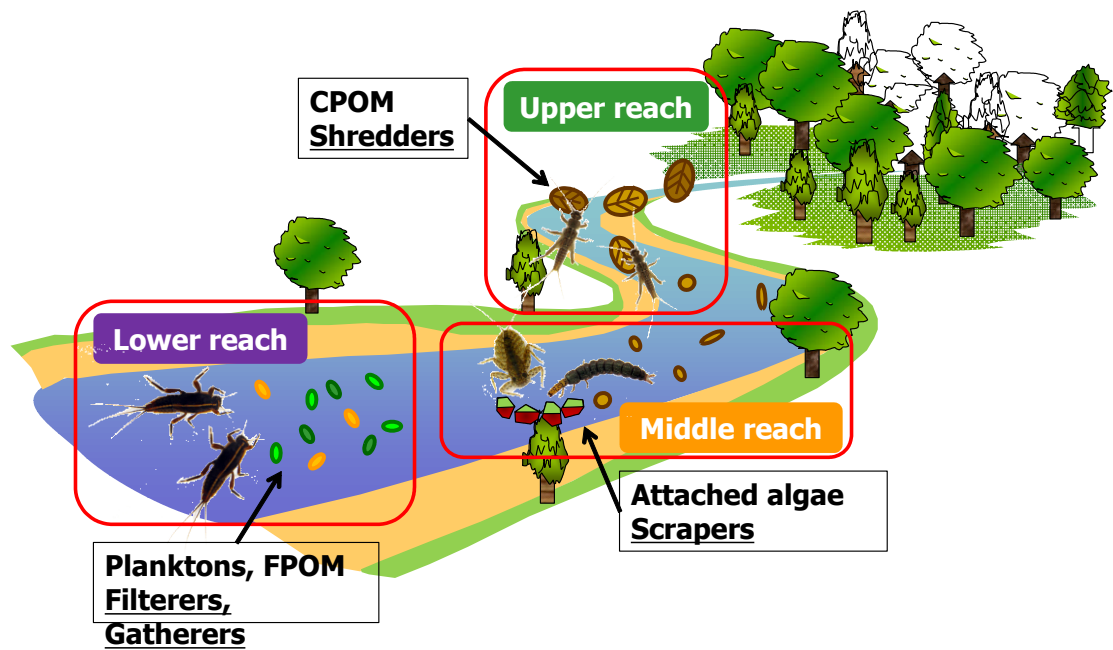
・河川連続体仮説

・洪水パルス仮説

8

ということで、ここから本論の数値生態系の構築という話なんですけれど、まず私が取り組み始めたときに最初に思ったことが、これまで河川生態学で提案されてきた概念があるので、それを数値的に表現できるようなものをつくりましょうと。そこで、河川連続体仮説と洪水パルス仮説という、この2つの仮説を記述できるようなものを開発しましょうというふうに考えました。

河川連続体仮説(Vannoteら, 1980)

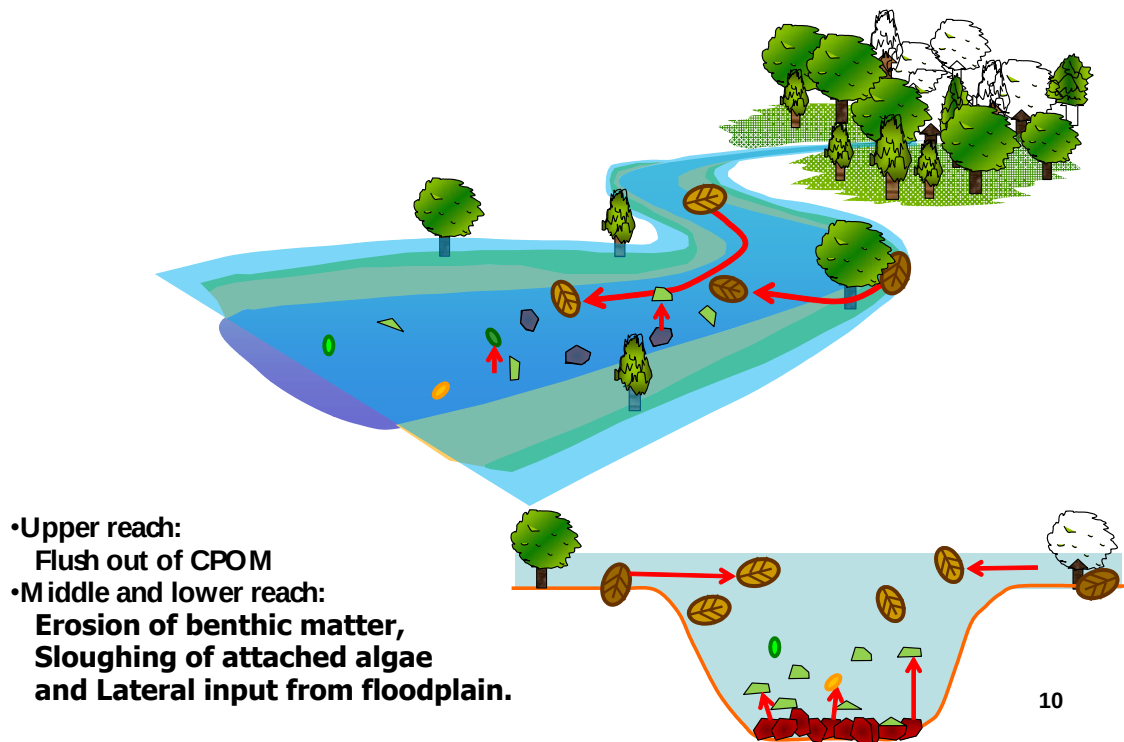


9

Pictures, <http://www.epcc.pref.osaka.jp/afr/index2.html>

この辺は私が説明するなんて、本当に釈迦に説法だろうし、間違った説明をするとあれなんですけど、ごく簡単にだけお話しすると、上流から下流に向けて、上流では陸生由来の有機物を食べるような水生昆虫がすんで、中流では付着藻類を食べるようなものがすんで、下流ではそれが流れてきたものを捕捉するような生物がすんでというふうな形で、河川の上流から下流に向かった方向の有機物のエネルギーフローと、それによる底生生物の構成の関係を示したような概念かと思っています。この河川連続体仮説をまず一つ再現できるようにしましょうと。

洪水パルス仮説(Junkら,1989)



あともう一つが、河川では洪水が起こるので、洪水のときには高水敷の上に水が乗り上げて、横断方向に水が混合するので、連続体仮説で縦方向、縦断方向の物質輸送を考えるのと同時に、洪水パルス仮説という横方向の物質のフローをきちんと表現できるようなものにしようと考えました。

数値河川生態系の構築 ～要求性能～

河川生態学で提唱されている概念を記述可能

物質の保存則を満足

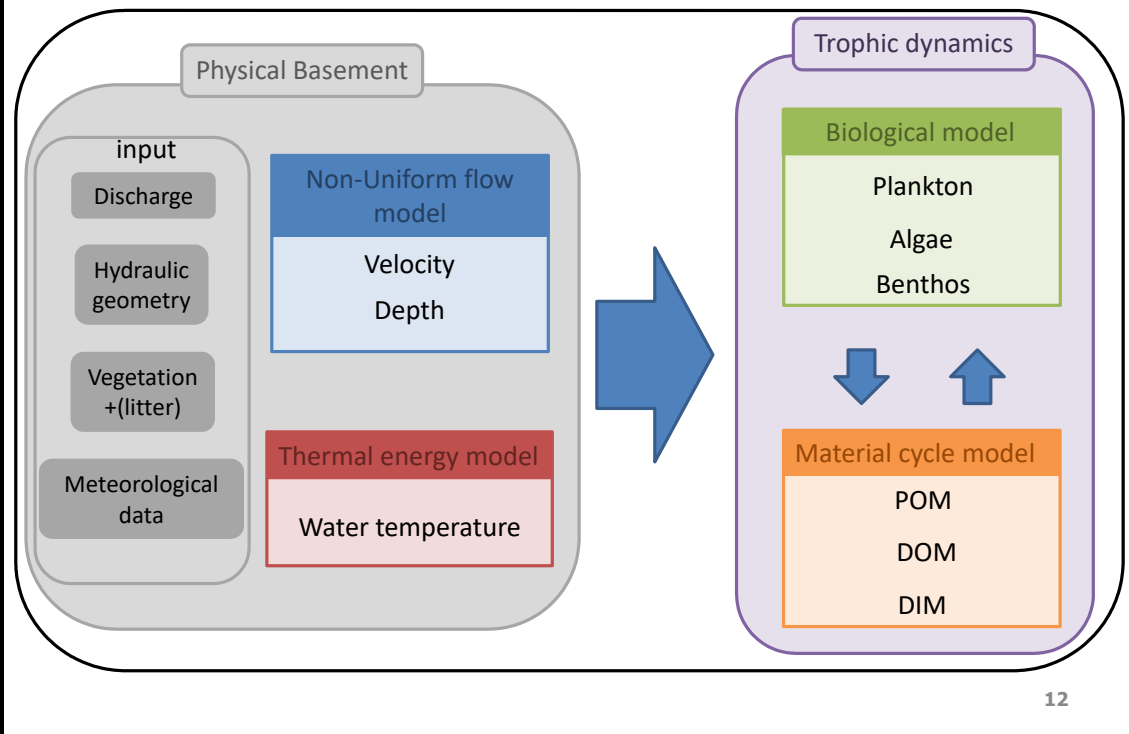
上・中・下流など各景観の専用モデルではなく、一つのモデルで上流から下流までを記述可能であること

11

あと、幾つか開発する上でこだわった性能があります。要求性能と書きましたが、まず1つ目が、河川生態学で提唱されている概念を記述可能であること。

2つ目が、物質の保存則を満足すること。これは、もちろん、流域から栄養塩が負荷されてきたり、そういったことが川の水質とか生態系に影響を与えるということをきちんと表現できるように、物質の保存則を満足できるようにしましょうというのが、2つ目のこだわった点です。

モデルのアウトライン



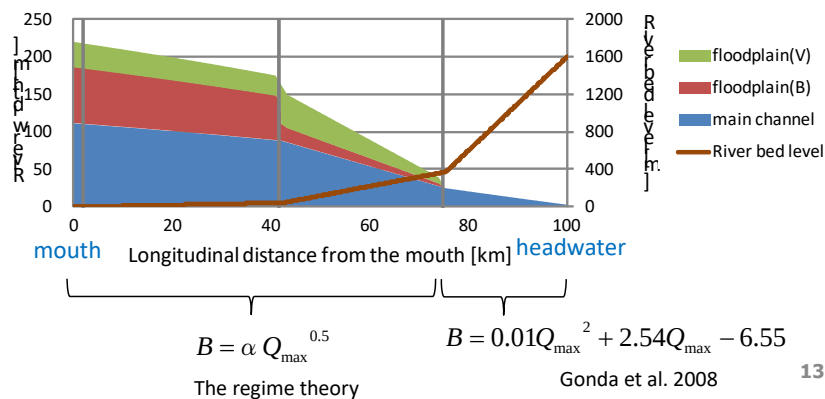
3つ目が、おそらく工学部っぽい考え方ではないかなと思うんですけど、上・中・下流のそれぞれの川の景観用の専用モデルをくっつけて一つのモデルをつくるのではなくて、モデルとしては一つのモデルしかなくて、物理場が上流・中流・下流で変わるんで、それによって自動的に中の生物が変わっていくというモデルでないと工学的に意味がないだろうと思って、これを3つ目の要求性能にしました。

これは何でかという、例えば、山地の領域の中にダムとか堰みたいな横断工作物をつくと、それまで急勾配で流れていた河川の間に、突如停滞性の水域ができたりするわけですね。そこでどんな生態系ができて、どんな物質循環が起こるかということを、専用のモデルで切り分けて解析するのであれば、答えを知っていないとできないのと一緒にじゃないかと。モデルの内部でそのことが自動的に説明できるようなものにしないといけないのではないかと。ということで、各景観の専用モデルではなく、一つのモデルで解析できるようにしようというのが、3つ目のこだわりです。

モデル河川での開発

	Segment 3	Segment 2	Segment 1	Segment M
Physiographic division	delta	natural levee	alluvial fan	intermountain
River bed gradient	1/5000	1/1000	1/100	1/20
Representative grain-diameter (mm)	0.5	5	50	250
Span length (km)	2	40	33	25
Manning roughness coefficient	0.035	0.040	0.045	0.050

taken from Yahagi River

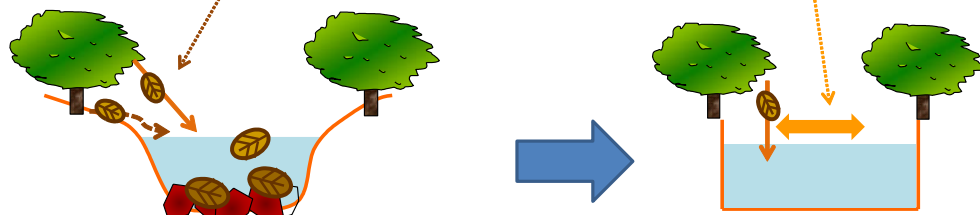
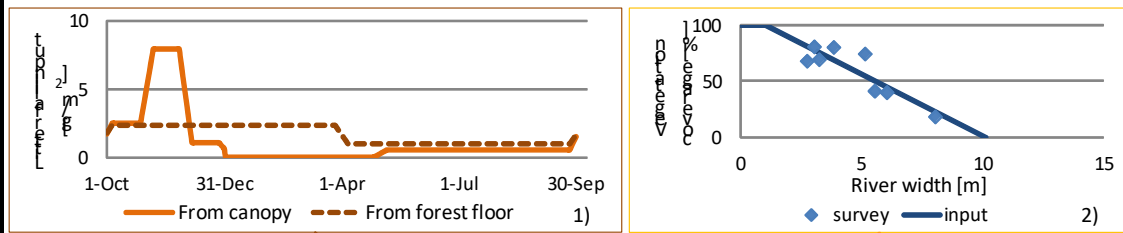


13

なので、上流・中流・下流それぞれですんでいる生物の種類を特定してきちんと立てた専用モデルでないとできないようなことがあるはずなのに、一つのモデルで川の上から下までやろうとしているので、このやり方で再現できる限界は絶対あるんですけど、技術としては、工学的な観点としては、一つのモデルで記述できるほうがいいだろうということで、こういうモデル開発にこだわりました。

モデルの中身はかなりマニアックなところもあるので、さっと思いたいと思いますけれど。やっているのは4つのモデルで計算をしていて、流れ場を解析する水理モデルと、あと、水温を解析するための熱収支モデルというのがあります。これで基本的に水温、流速、水深とかといった物理場が決定される。その中で、生物相と物質循環のモデルがぐるぐる回っているというモデルの形になっています。

系外(陸)からの有機物供給 林冠および林床からのリター



Seg. M: Simple rectangle channel

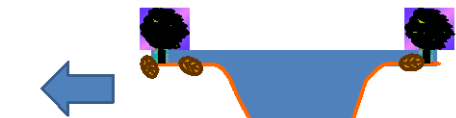
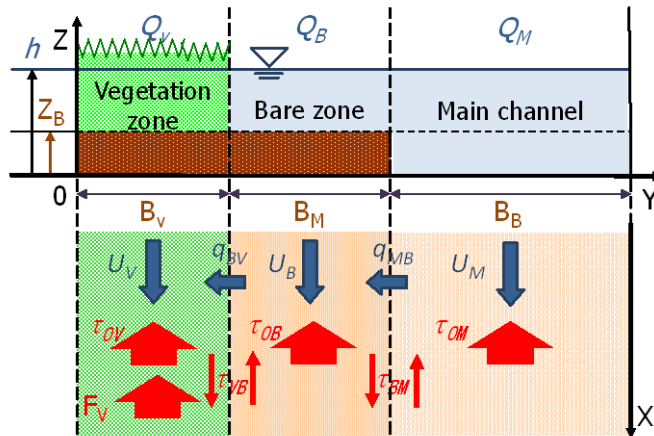
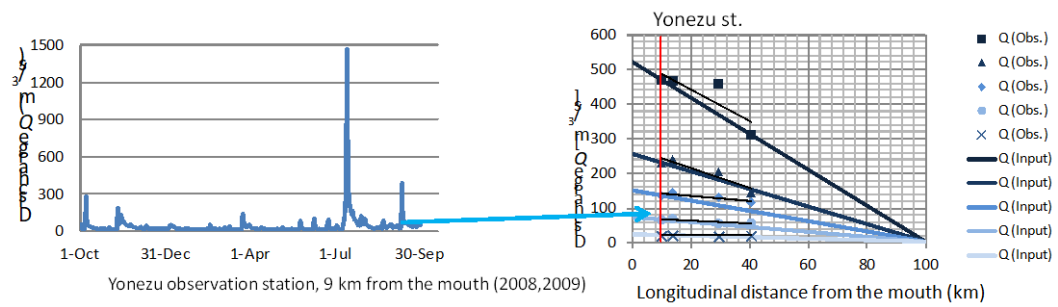
1) Hashizume Hayato : Litter fall in Deciduous Broad-leaved Forests of the Hiruzen Experimental Forest of Tottori University, Kouyogyu kenkyu, 6, pp.1-15, 1991
2) Shirou Sagawa, Spring fish habitat choice in small mountain streams in southern Hokkaido, Japan, Journal of Ecology and Civil Engineering, 5(1), pp.85-102, 2002

14

まず、複雑な実際の河川を対象にしてモデル開発すると、もう途中でどんどん支川が入ってきて、何を解析しているのかよくわからないので、最初に思ったのが、河川連続体仮説の、絵に描いてあるとおり、河川の本川に沿ってだんだん川幅と流量が広がっていくようなモデル河川を考えましょう。ということで、矢作川の河口から源頭部に向かって、本川に沿ってさかのぼっていったときの川幅とか、高水敷の幅とか、高水敷の上の植生の幅とか、あるいは、地形みたいなものを考えて、本川に沿った一本のラインでモデル開発をしましょうということで、河床材料、勾配、流量みたいなものを設定しています。

あと、上流に行くと、溪畔林からのリターの供給という、川の系外からのリター供給がありますけど、そういうものについても、測られたデータがあるものについては、計測データを用いて季節ごとにインプットとして与えて、あと、川幅が狭いと直接落ちてくる割合が大きくなりますので、川幅によって植生のカバー率を実測データから推定して、リターを系外から供給しています。

流れの解析

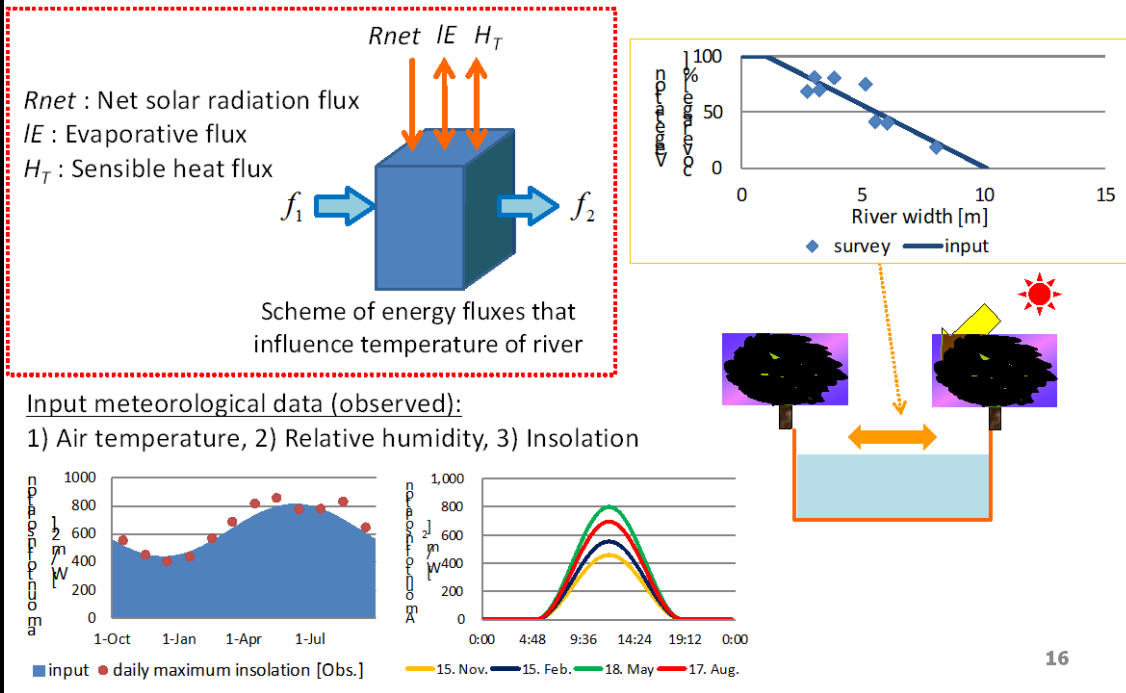


Seg. 1, 2, 3: Compound channel

15

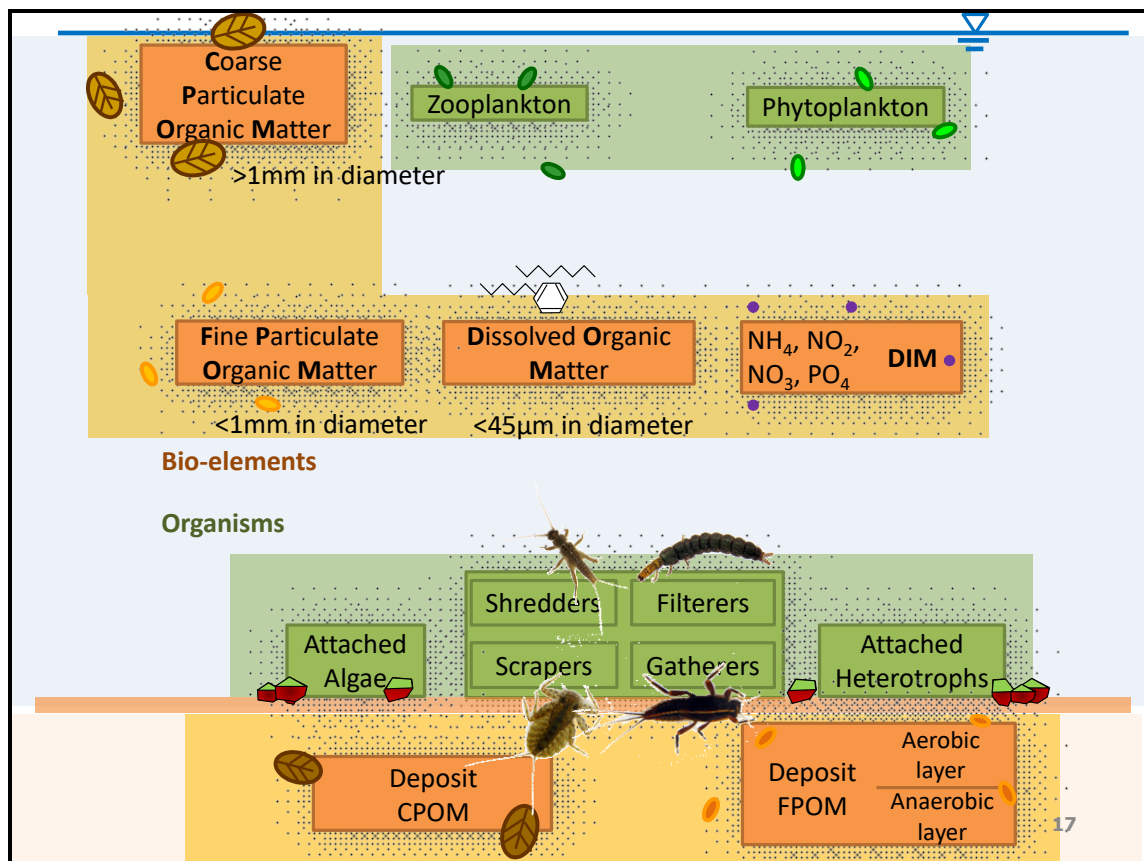
流れの解析は、普通の水理学的な解析なので、ふだん水が流れている主流路と、洪水のときに水が乗る高水敷のところで、それが裸地と植物のところがありますというモデルになっています。

水温解析 ～熱収支～

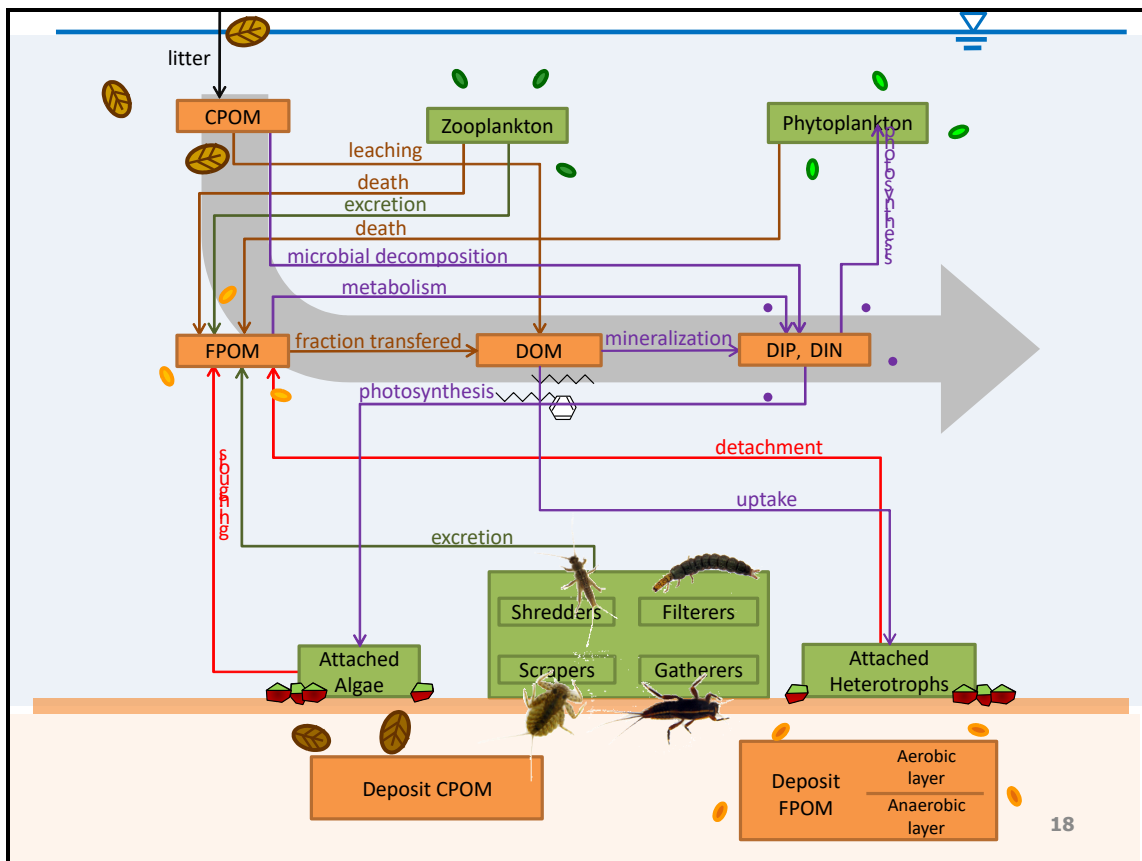


あと、熱収支ですね。水表面から熱のエネルギーが入ってきて、それが潜熱・顕熱に振り分けられて水温を決めていくと。もちろん、河川の上流のほうに行くと、日射そのものが溪畔林にさえぎられる効果があるので、入射エネルギーが減ってくることを取り入れた熱収支解析をやっています。

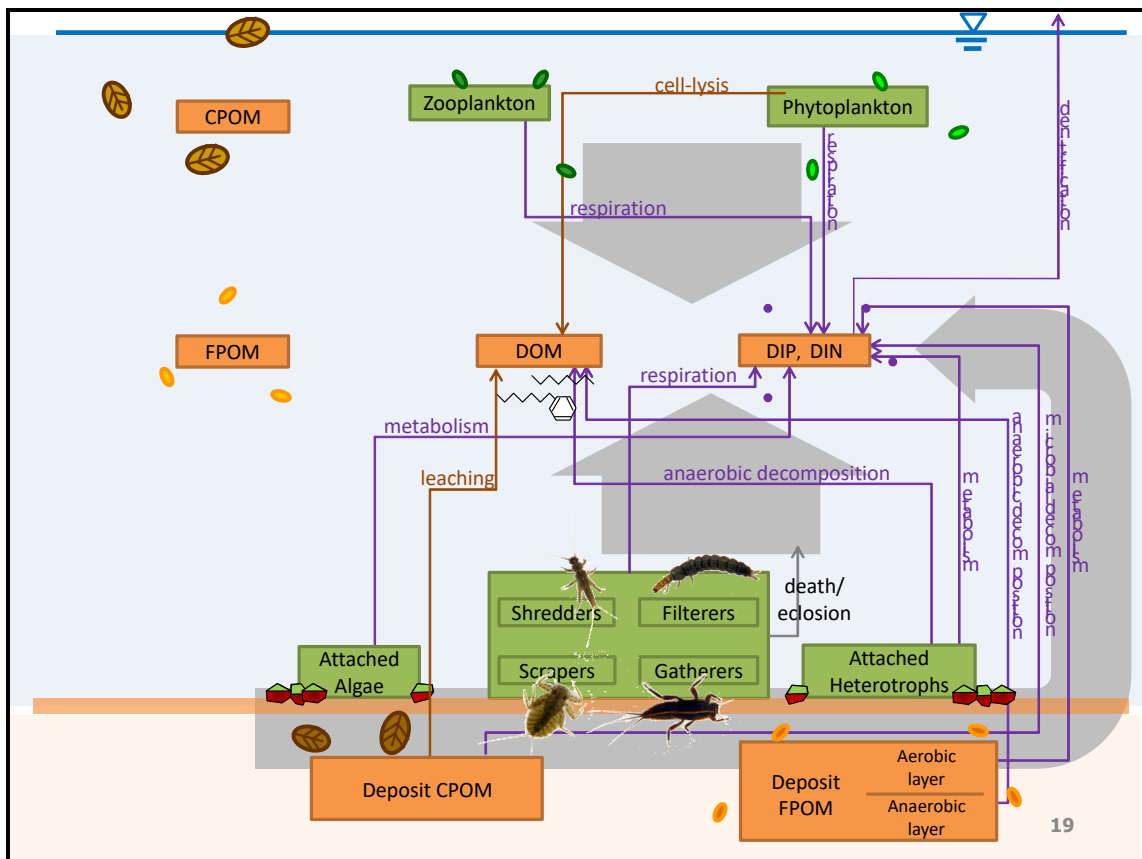
物理場がそれで決められるんですけど、ここからが生態系のモデルの話で、ここに書いてあるようなものを計算で取り扱いたししょうと。有機物に関しては、粗いものから細かいもの、溶存態を扱いたししょうと。無機の栄養塩を取り扱いたししょうと。こいつらは、粒子態と有機物とかに関しては、川底にも溜まりますので、川底に溜まったものもきちんと取り扱いたししょうとといった形で、有機物と栄養塩を扱っています。



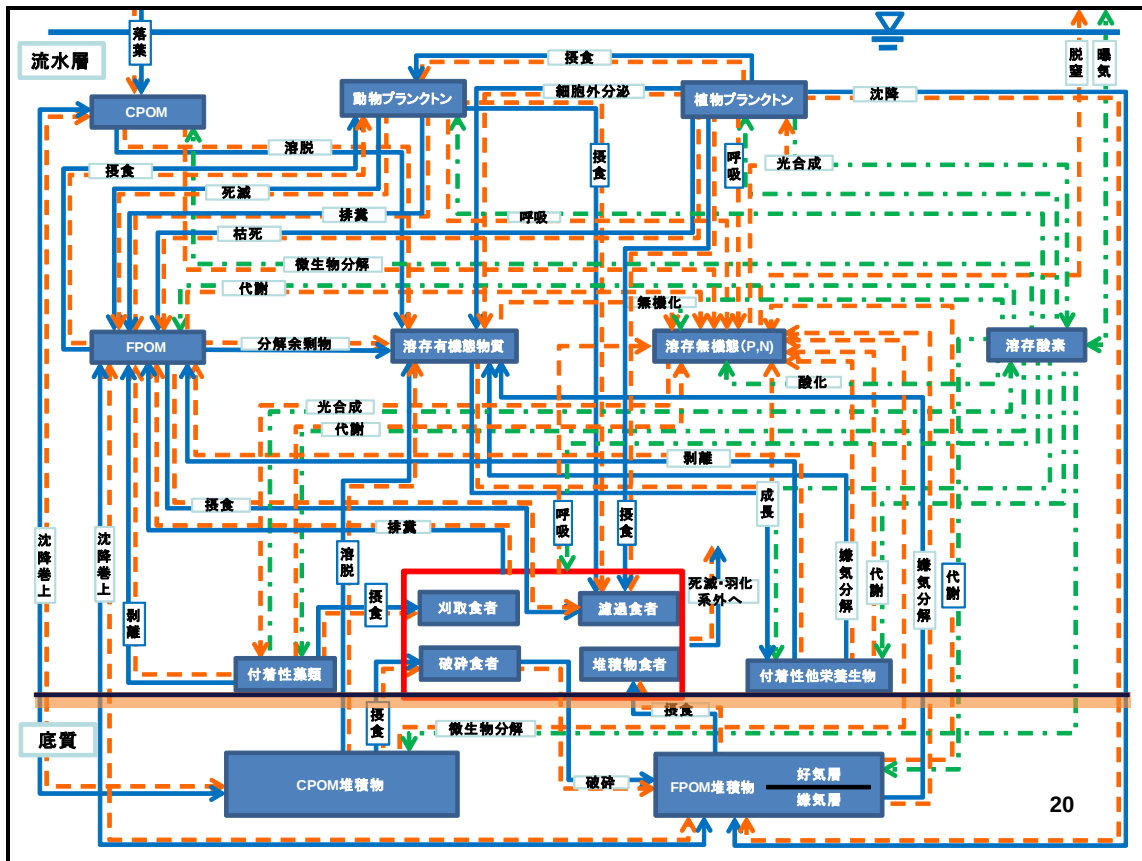
生物に関しては、動物プランクトン、植物プランクトン、付着藻類と、水生昆虫と、バクテリアみたいな分解者を考えました。水生昆虫に関しては、摂食機能群、エサ資源のタイプによって4つの違うものを考えました。このモデルを川の上流から下流までに一気に適用しようというのがモデルのフレームです。非常に猛烈なお叱りを生態学の先生から食らうのでしたら覚悟はしていますが、一応こう考えましたということです。



こういうふうに、まず計算の中で何を取り扱うかというプレーヤーを決めて、ここからはもう本当に地道な作業で、例えば、有機物が粗いものからだんだん小さくなっていくときに、どんなプロセスが関わっていますかということを、いろんな矢印で結んでいきます。



こういうことをほかにも、例えば、有機物が無機化するプロセスにはどんなものが関わっていますかみたいなことを組み上げていきます。そういうことをやっていると、こんな地獄絵図みたいな状態になって、こんな感じのボックスと矢印ができます。



結局、こういうふうなフレームができて、これがモデルの概ねの性質をもう決めているようなもので、あとは、このボックスの数だけ増減を表すような式を立てて、その式の中には、この矢印の数だけ増えたり減ったりというやりとりの項が現れますということになるので、この絵をつくるのが一番の大事な仕事になりますし、この絵に間違っているところがあれば、これを変えていかなければいけないとは思っているんですけど、こういうふうなものを立てましたということです。

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

$$G_A = \begin{cases} \mu_A A & : A \leq A_S \\ \mu_A A_S & : A > A_S \end{cases} \quad L_b = L \exp[-(0.28SS + 0.68)H]$$

藻類の比増殖速度 (s^{-1}) 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 $[g/m^3]$

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

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 $[s^{-1}]$

ここからはもう少し技術的な話なので、さっと飛ばしますが、ちょっと特徴だけ。モデル開発のときにこだわった話で、物質がきちんと保存しているようにということなので、例えば、付着藻類が光合成で増えれば、その分だけ無機栄養塩が減ることが、プラスマイナス同じ形で表れることで、量がきちんと保存されています。

物質循環モデル

生物モデル 付着性藻類現存量 $A(g/m^2)$

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

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 $B_{SC}(g/m^2)$

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

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/m^2)

$$C_{SC} = \frac{A}{Se_{CP} + Se_{FP} + A + (FPOM + P + Z) \frac{C_{Bent}}{2}}$$

あるいは、付着藻類が刈取食者に食べられると、食う・食われるの関係がプラスマイナス別個に表れているので、物質の保存性が満足された形で計算されます。そんな形でモデルを立てます。

物質循環モデル

物質循環モデル アンモニア態窒素 $NH_4-N(g/m^3)$

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

ϕ_A : 付着性藻類の無機窒素分割係数

ϕ_P : 植物プランクトン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} : バイオマス中N含有量

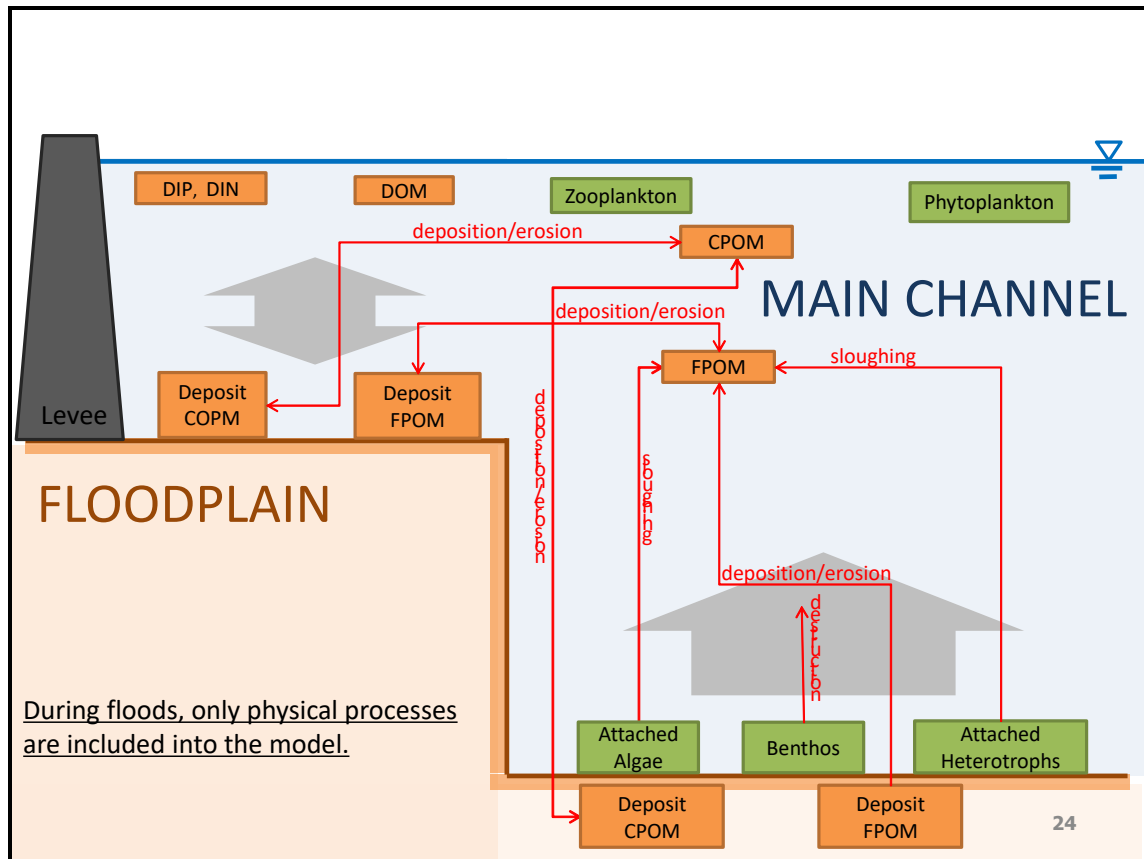
刈取食者による排泄

生物モデル 底生動物(刈取食者)現存量 $B_{SC}(g/m^2)$

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

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 $[s^{-1}]$

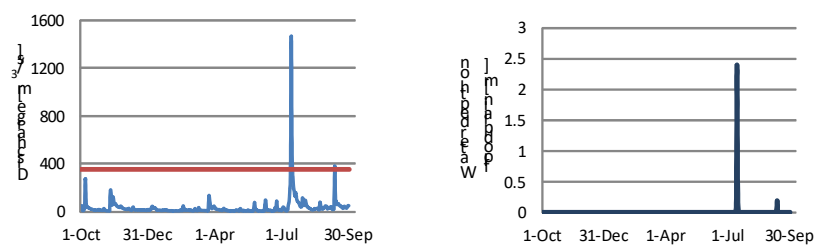
もう細かいので、この辺は割愛したいと思いますけれど。



あと、もう一つが、洪水パルス仮説ということで、洪水のときは、通常、日本の河川だと期間が短いので、このときに生物モデルとかを回し出すとわからなくなるので、もう単純に粒状態有機物とか、生物相が物理的にはがされたり、堆積したり、巻き上げられたりとか、そういう物理プロセスだけを解析するモデルになっています。

計算結果の例

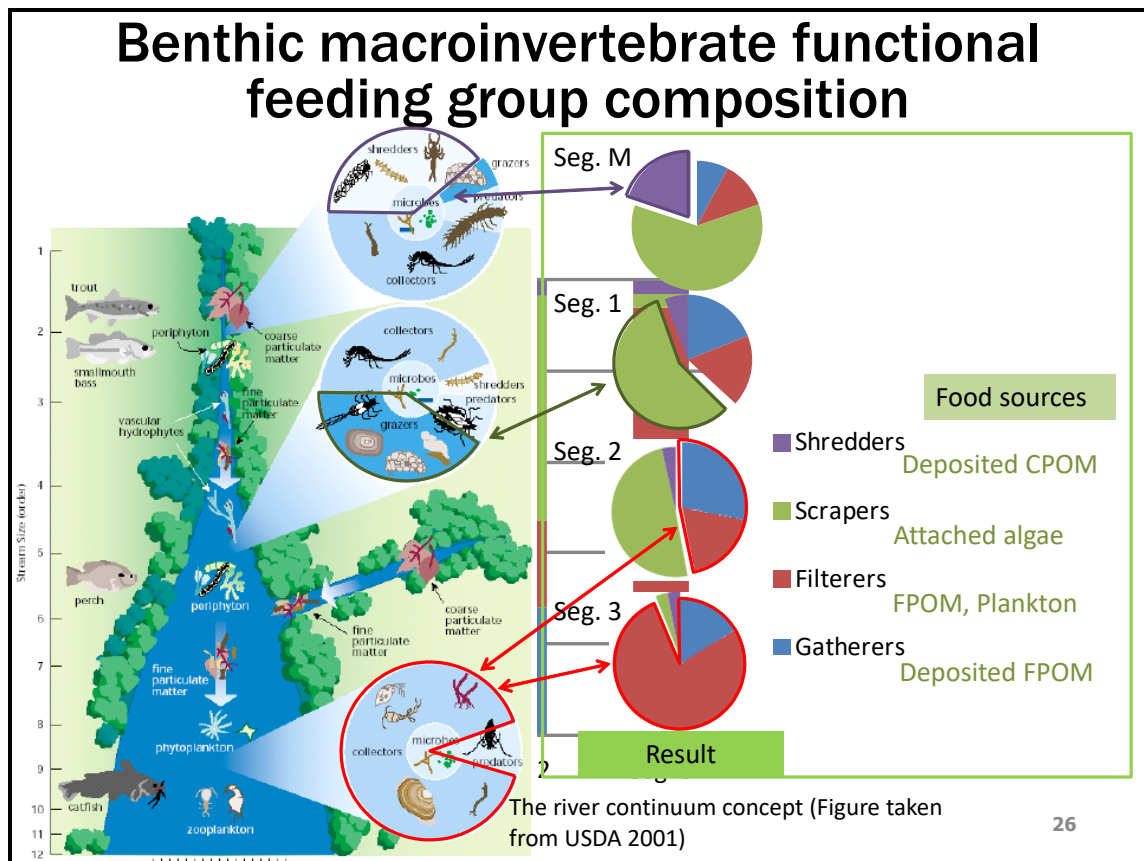
- 底生昆虫の流程分布
- 有機物収支と洪水の役割 (Case of 2007)



25

at 9km from the mouth (Yonezu obserbation station)

そういうモデルをつくって、計算結果の一例なんですけど、矢作川の本川に沿って開発したので、矢作川のある1年間のハイドログラフを使って計算をしました。ちなみに、ここを書いてあるところが高水敷に乗る高さの閾値になるところで、この年だと、例えば、2回高水敷まで冠水しているので、横方向のやりとりが2回だけあったような年に相当する状況です。



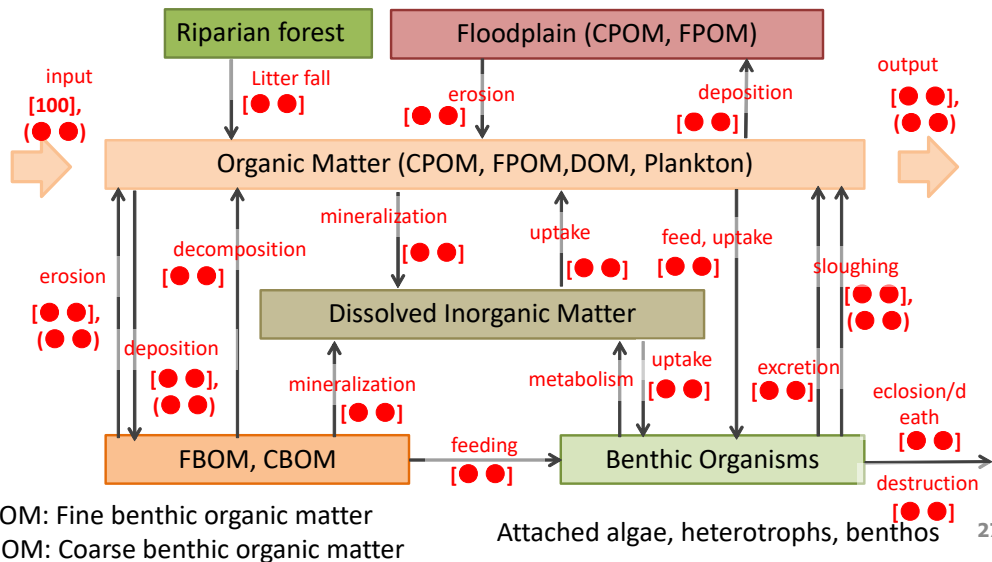
はっきり言って、比較するデータがあまりないので、何と比較していいのかもよくわからないので、まず基本的な性能として要求した連続体仮説みたいなものが計算の中で出てくるのかということで、アメリカの農政局のほうとかに載っていたヴァノートさんの河川連続体仮説の図と比較して、こちらが計算結果なんですけど、山地のところでは破碎食者がいたり、セグメント1、礫床部とかになると、はがし取るタイプのやつが増えてきたり、そこから下流のほうに行くと、フィルターとかギャザラーとかというのが増えていくというふうな傾向は何となく計算でも出ますねということをまずは確認しました。

実際の河川への適用の話はこの後にお話ししますが、まずこういうモデルをつかって、どうしたいのかというところがあって、数値はいろいろ出てくるんですけど、そんな精度があるわけではないですね。なので、どんなことに着目してこのアウトプットを見ていけばいいのかということで、こういうふうな整理の仕方があるんじゃないかということでつくってみたのが、次のスライドです。

年間の有機物収支

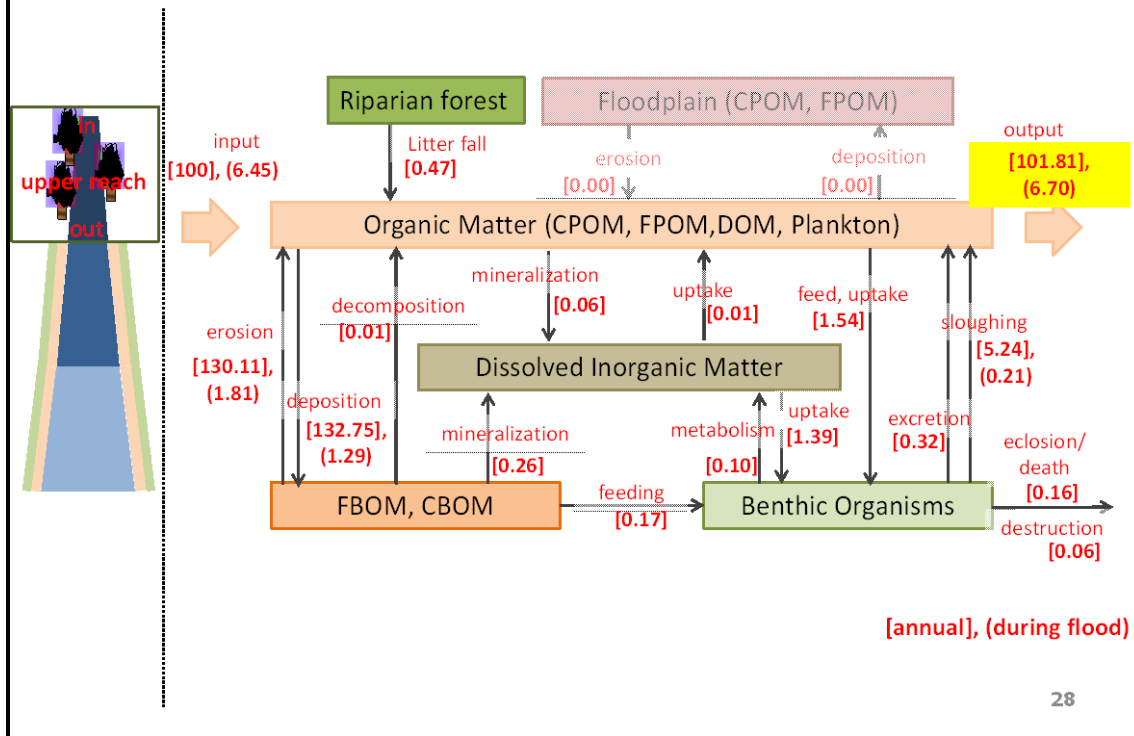
流入を100としたときの内訳

[年間総量], (うち, 洪水時)



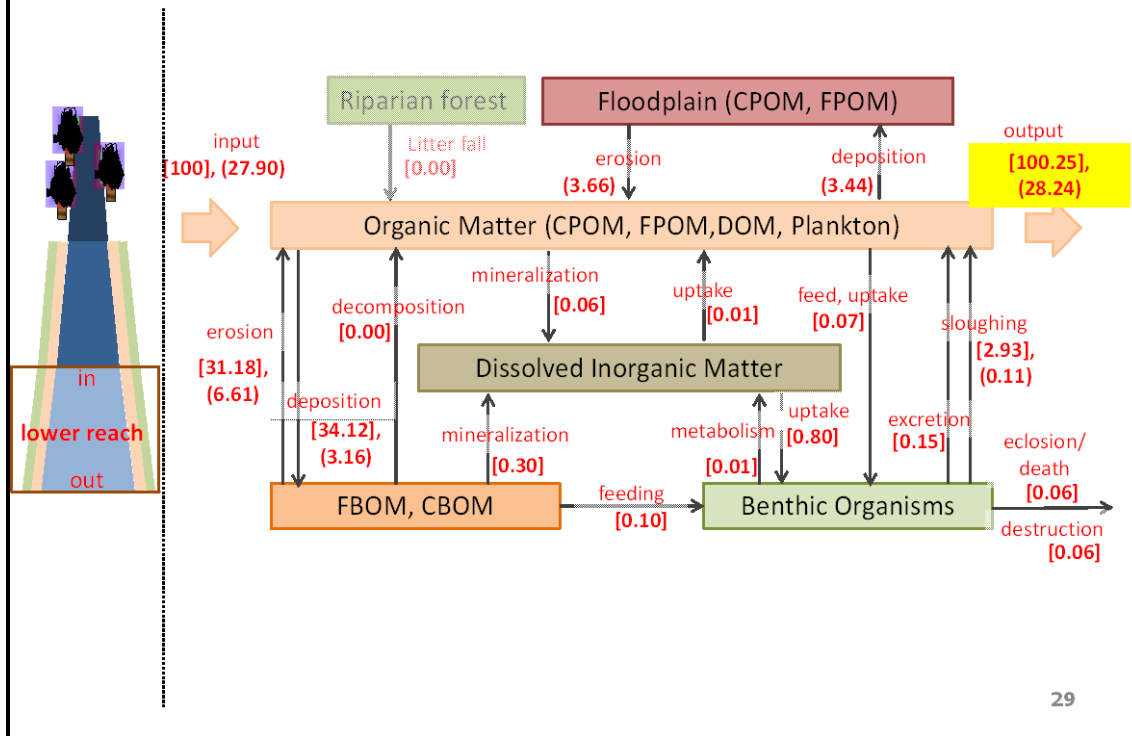
例えば、これはある河道の山地河川部分とか、中流域とか、下流域とかで、5キロとか10キロぐらいの区間を切り出して、年間にどれだけの有機物のインプットがありますか、そのうち、洪水のときにはどれだけのインプットがありますか、それらがどういうふうに振り分けられて下流に出ていきますかみたいなものが数値として計算上は出てくるわけですね。

Annual organic matter budget (Seg. M)



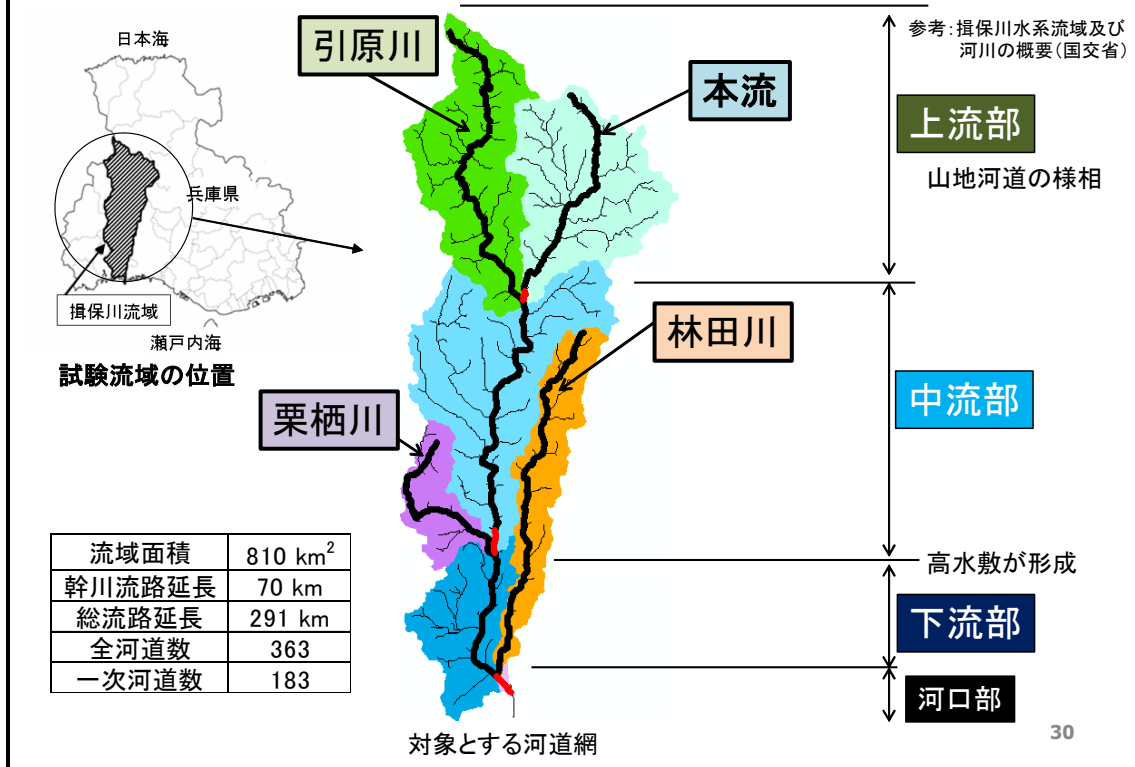
そういうのが出てくると。その中で、そもそも大した精度がある計算をやっているわけではないので、例えば、山地河川領域だと、100のうち圧倒的にそのまま出ていく部分が多いので、100入ってきたら101出ていくような計算になっているわけなんですけど、そのうち、年に2回あった洪水が、6%とかって書いているので、1割ぐらいの程度で効いているという話になるわけなんです。それが下流に行くと、同じ年で計算しても、30%ぐらい洪水のコントリビューションがあると。少数点以下の高い有効数字はないですけど、何割ぐらいの変化で、どういう大きい変化が起こるのかというのをセグメントごとに見ていくと。

Annual organic matter budget (Seg. 2)



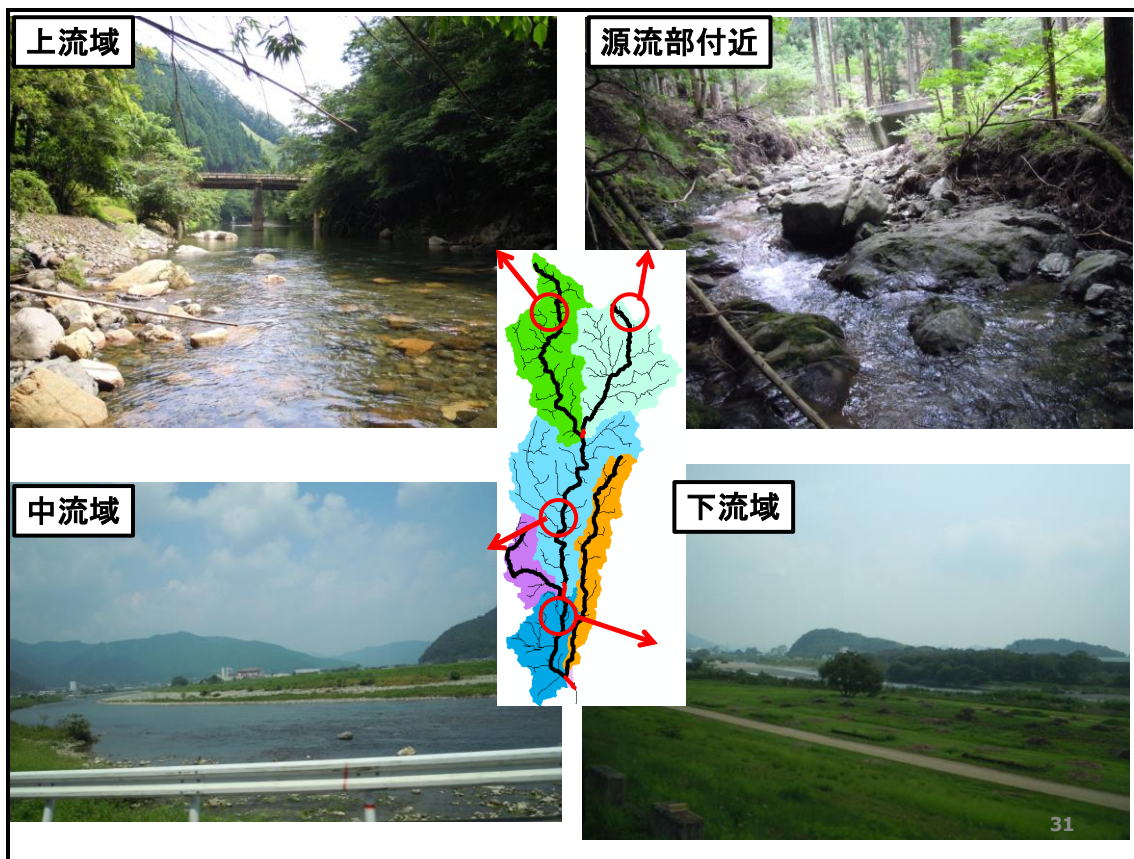
例えば、洪水の効き方だと、やっぱり下流のセグメントのほうがコントリビューションとして大きい。一方で、河床とのやりとりを見ると、上流のセグメントのほうでは130とか、流入に匹敵するぐらい河床とやりとりをしているわけなんですけれど、それが下流のほうに行くと、そいつらは比較的、相対的に上流と比べて小さくなっていくような傾向が見てとれます。

流域河道網への展開(揖保川を対象として)



なので、こういうものを使って、その河川河川の各景観で大体どのような大きいやりとりがされているのかというのを、太いラインとして答えを引いておいて、そこに、例えば、上流側で横断工作物をつくったときに、どの程度の効き方をするのかみたいなことを下流側で見てやるとか、そういうふうな、数値の細かな精度を見るというよりは、大きな収支の構図みたいなものに変化が表れるようなことが起きないかということを見る道具として使えないかと考えています。

ただ、あくまでも理想河川ということなので、実際の河道網で計算したらどんなことになるのかということで、頑張って実際の河道網に適用してみました。ただ、源流からの流量とか水温とかを測っている河川というのがなかなかなくて、たまたま揖保川で神戸大学の先生が測られていたので、揖保川流域を対象にして、モデルを適用してみました。ここに書いてあるような支川まで含め、全部一つのモデルで解析してみるとどうなるかということで、やってみました。

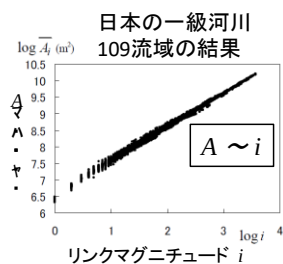


こちらが実際の揖保川の写真です。

解析条件 ～流量(Q)～

◎流量全域における流量の推定

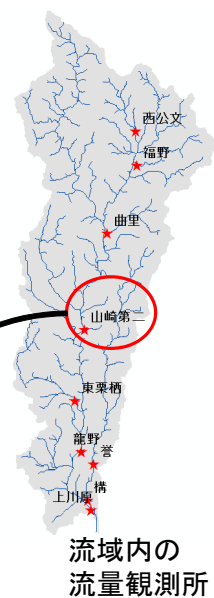
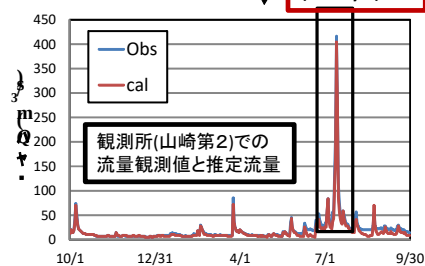
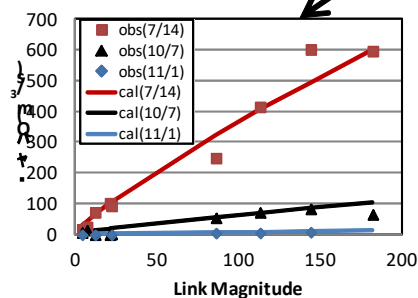
・流域内観測所の流量観測値
流量の関係(宮本ら2010) } 各河道の流量を推定



レジム則 $Q \sim A$ $\Rightarrow Q_i = \bar{Q}_1 \cdot i^{b(\ln R_a / \ln R_b)}$

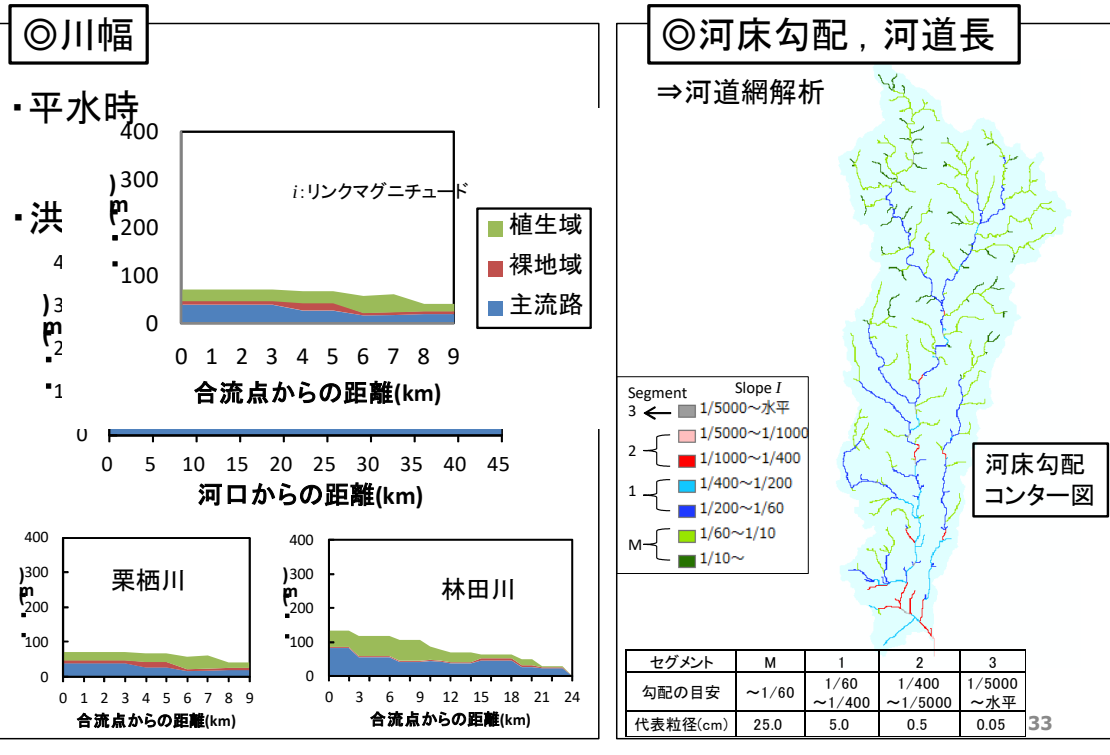
Q_1 : 一次河道流量
 b : 流量指数

観測値から
・一次河道流量 Q_1
・流量指数 b
をフィッティング



条件としては、実際に観測された流量を使って、各支川でも流量を与えています。

解析条件 ～川幅, 河床勾配, 河道長～



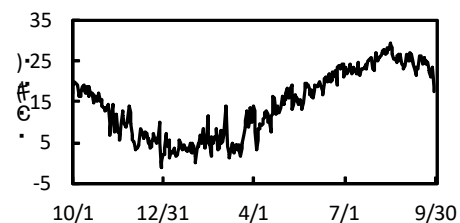
あと、川幅、水深とかに関しては、レジーム則を使って与えたりとか、そういった形で物理条件を与えています。

解析条件 ～気象条件～

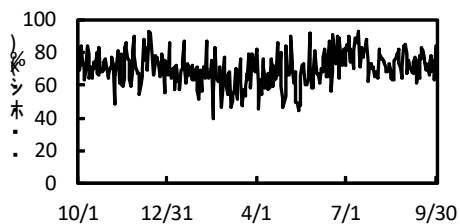
2006年10/1～2007年9/30における

- ・気温・風速 : 気象庁一宮観測所
- ・相対湿度 : 気象庁姫路観測所
- ・日射量 : 大阪地方気象台

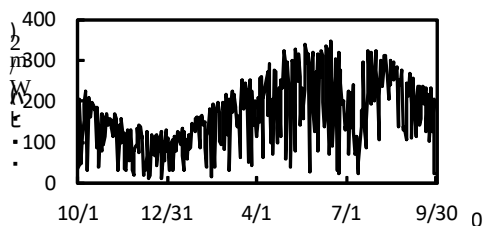
◎気温(℃)



◎相対湿度(%)



◎日射量(W/m²)



34

気象条件も、水温を解析するために必要になるので、近くの気象観測所で観測されている

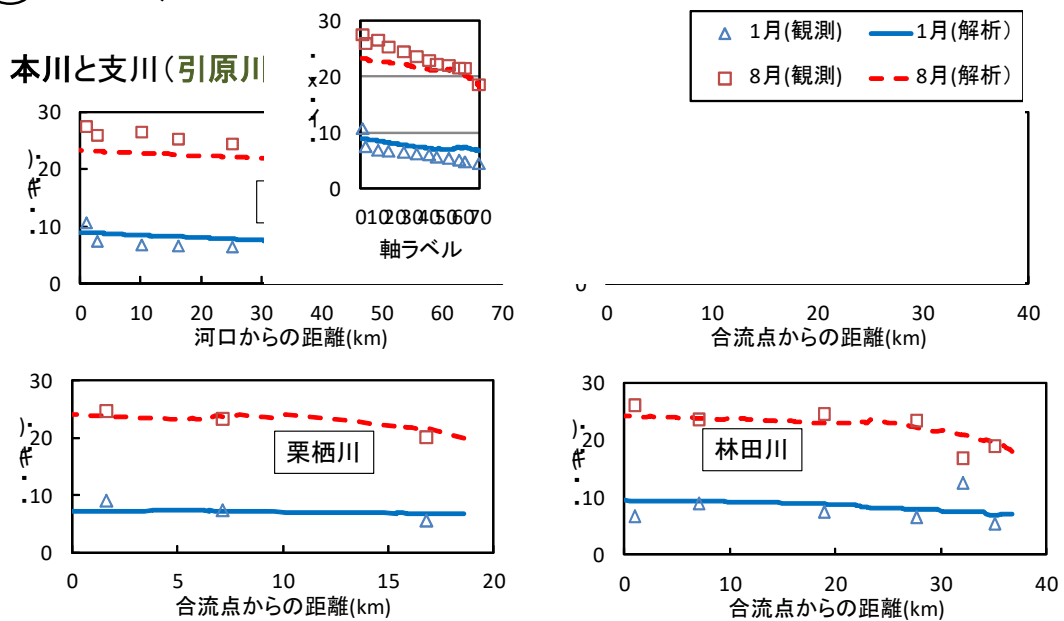
日射量とか気温とか湿度みたいなものを使って解析すると。

解析結果

- ① モデルの検証
- ② 感度分析
- ③ 底生動物群集構造
- ④ 有機物の収支
- ⑤ 河川連続体仮説との比較

35

① モデル



流域河道網全域の水温構造を, 大局的に再現できている
⇒ 物質循環の考察

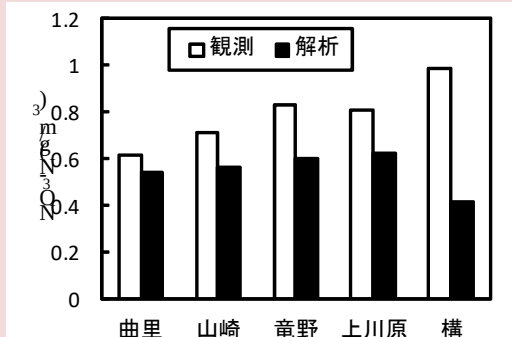
36

そういうことをやると、といっても、それでも測られている量は少なく、水温は、神戸大の先生がしっかり測っているの、本川とか支川でそれぞれデータがあって、熱収支

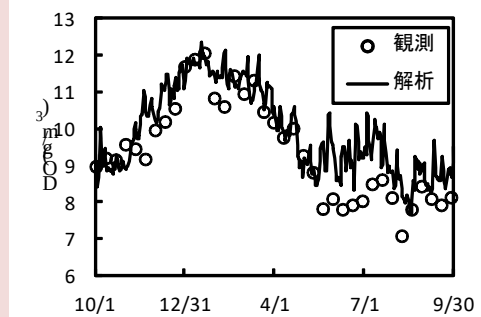
解析しても、本川でも支川でも熱収支の構造は大体再現できそうだと。

① モデルの検証 ～栄養塩, DO～

年間平均硝酸態窒素濃度(各観測所)



溶存酸素濃度(上川原観測所)



栄養塩: 過小評価の傾向
DO: ほぼ再現

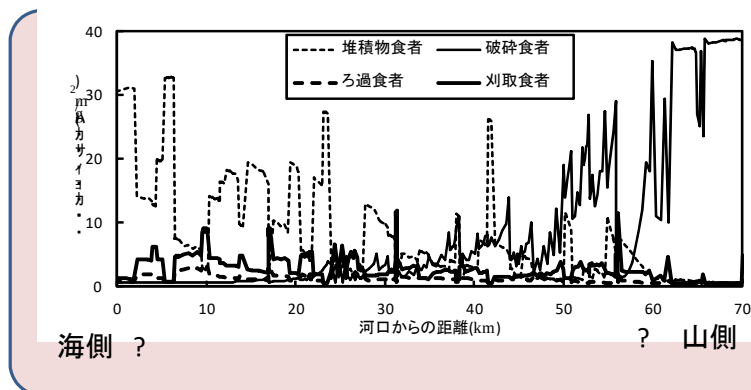
⇒ 河道内のプロセスが卓越するものは再現性が高いが、流域負荷が支配的なものについては、再現性が十分でない

⇒ 流域からの負荷モデルとの結合が必要

37

ただ、かなめの物質循環とか生態系モデルに関するところのデータというのはなかなかなくて、溶存酸素濃度はあるんですけど、溶存酸素濃度はまあまあ合います。ただ、問題なのは、栄養塩濃度みたいなものは、観測がこの白いバーですけど、観測に比べて解析とは合わないと。これは実際に観測すると、やっぱりどんどん流域から負荷が入ってくるので、川の中のプロセスとは別に、流域からの負荷で水質、栄養塩濃度は上がってくるんですけど、河道内だけのプロセスを引っ張り出してきたモデルなので、この辺は、モデル上の精度もあるんでしょうけど、そもそも前提条件として流域のことをきちんと考えていないので、流域負荷のモデルと結合することが絶対的に必要だろうと考えています。

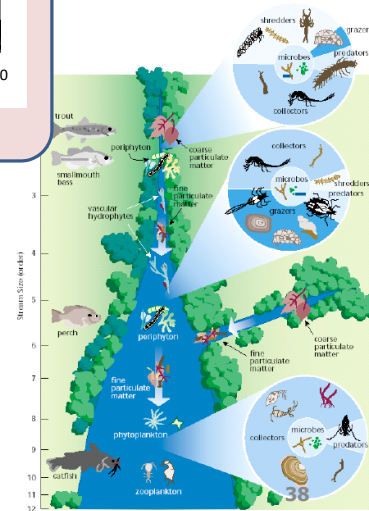
③ 底生動物群集組成



上流 ? 破碎食者
中流 ? 刈取食者
下流 ? 堆積物食者

河川連続体で提唱されている底生動物の群集変化が現れる

The river continuum concept (Figure taken from USDA 2001)



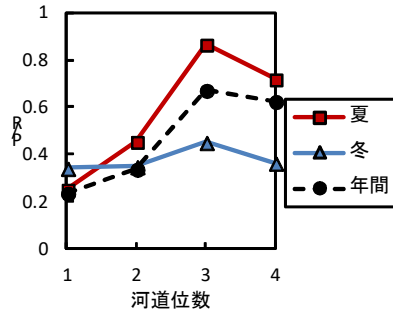
本当は、もしこういうデータがあるところがあれば教えてほしいなと思っているところで、海から山に行くところで、水生昆虫がどういうふうに分布しているのかみたいなものが、特に計算だと、バイオマスみたいなもので計算するので、量としてどこかデータがあるといいなと思いながら、まだ比較ができていないんですけど、流域の河道網みたいなものを考えても、上流で破碎食者が多い状況から、下流側で堆積物食者みたいなものになってしまうような傾向が計算上は出ているというふうな状況です。

⑤ 河川連続体仮説との比較

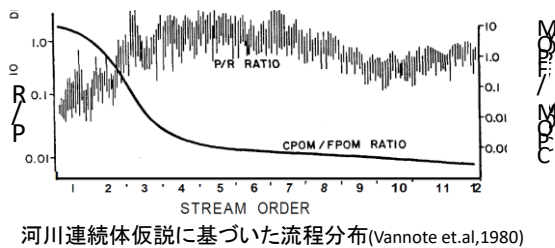
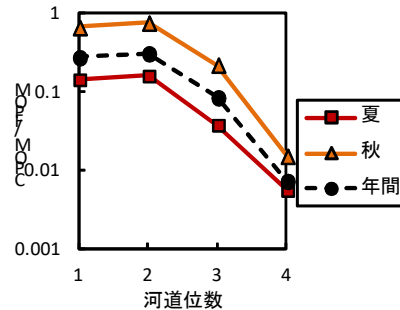
流域河道網の地形的・幾何学的構造と流域全域での生態系特性との関係

◎生物生産代謝構造

Production / Respiration



◎有機物のダウンサイジング



流域全域における

- ・生物生産・代謝構造 (Production/Respiration)
 - ・有機物のダウンサイジング (CPOM/FPOM)
- の特徴を表現

39

あとは、何か比較できるものはないかなといういろいろ考えるんですけど、もともとのヴァノートの論文にある河川連続体仮説と比較してみたらどうなるんだということで比較したんですけど、ヴァノートの論文を見ると、河川次数が1 2 ぐらいまであるんですけど、掛保川でやると3とかぐらいまでしかいかないので、ここの最初のちょこっとしたところだけ比較しているような状況ですけど、生産・代謝比みたいなものが上がっている状況のゾーンになりますけど、大体上がっているような状況で、あと、有機物のダウンサイジングみたいなものも下がっていると。ただ、ここのところだけなので、これをもって合っているかどうかというのも難しいところではあるんですけど、そういったものと比較しながらやっていると。

ここまでがモデルの中身のお話です。今日持ってきた数値生態系のモデルの話としてはここまでなんですけど、流域の負荷ときちんとくっつけなければいけないというのは当然大きい課題なんですけど、モデルそのものとしてやっぱり決定的に足りていないと思うところは何かという、魚を考えていないというのと、土砂を考えていないというのがだめだろうというふうに関係開発当時から思っています。それについては、実は、若手で、この研究と一緒にやってくれていた、今は埼玉大学に行かれている溝口君という、埼玉大で助教をされている方が、魚とか土砂を組み込んだらどうなるのかということを頑張ってやってくれています。

ただ、魚と土砂を組み込むと、一気に複雑になります。なぜかという、瀬とか淵とか

の構造を入れなければいけないということと、あと、礫の間に砂がトラップされていくことで、浮き石とか、そういった状況によってエサ環境が変わってくるみたいなものを入れないと、土砂を入れた意味がなくなってくるんですけど。なので、面的に解析をしなければいけない部分が出てくると、あと、河床の中でも、河床材料のテクスチャーみたいなものをしっかり表現できなければいけないということで、非常に複雑化の方向をたどりつつあって、どこでやめるのかというのが結構悩ましい状況になりつつあります。

今後の課題：流域と河川の結合に向けて

- 数値河川生態系：河道内で生じる現象に着目
- 流域と河川のつながりを定量記述するには、降雨－流出モデルとの結合が必要
- 伊勢湾プロジェクト(科学技術振興調整費, 2006～2010年度, 代表:辻本哲郎)での取り組み

40

そういう状況なんですけど、モデルそのものの開発以外に、やっぱり大きい問題としては、流域ときちんとつないでやらなければいけないでしょうと。これまでやってきたのは、河道の中で生じる現象をやっていたので、降雨－流出系のモデルと結合が必要でしょうと。

流域分割

ソフトBASINSを用いて流域を分割

- ・源頭部の面積を2km²とし、河道網を作成
- ・河道の合流点で流域を分割

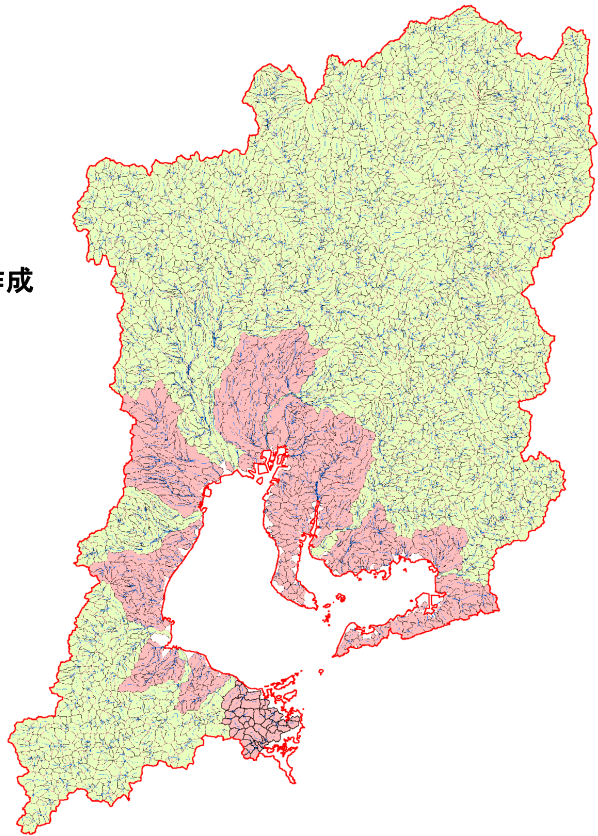
小流域数

一級水系:3669

それ以外:794

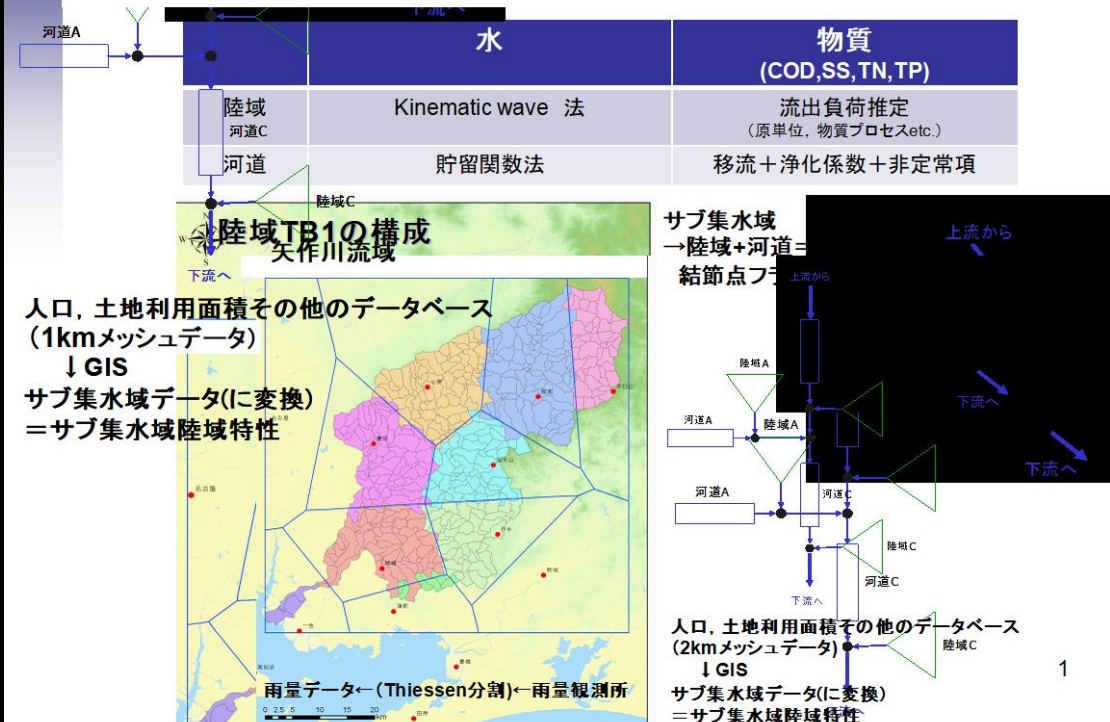
合 計:4463

総流域面積:17,655km²



これは、流出に関するモデルみたいなものは、違う研究プロジェクトで伊勢湾流域圏ということで開発したことがあって、そこで開発したモデルなんかとうまくくっつけようかなというふうに今考えているんですけど、まだやっていないので、一応今後の課題ということで、伊勢湾流域圏のプロジェクトのときには、伊勢湾流域に流れ込んでくる河川を、2キロ平方ぐらいを目途として、全部小流域に分割して、この分割した流域の中で水とか物質の動きを、いわゆる流出解析モデルというやつで解析しました。

陸域TB1の作成？ 基盤は自然流出モデル+人工系+景観とのやりとり



このときには、まだ川の中は細かな数値生態系モデルみたいなものは入れていなくて、非常に単純なモデルでやっていたんですけど、これ自体は、伊勢湾での青潮の原因になっている貧酸素水塊をどうやって減らすことができるか、陸側でどんな努力ができるかという研究プロジェクトだったので、やっぱり一番のアウトプットの目標は、海の出ていく負荷がどれだけ減るかみたいなことを頑張って推定するような研究プロジェクトでした。

計算条件 ～過去からの環境変遷と将来シナリオ～

Case	土地利用, 人口分布	降雨	備考
1960	1960	1999	
2000	2000	1999	
2030	2030 (予測値)	1999	既に計画されている施策は含む
α	2030 (予測値)	1999	インフラ整備中心型施策シナリオ
β	2030 (予測値)	1999	市民参加型施策シナリオ
γ	2030 (予測値)	1999	自然共生型 (生態系サービス享受型) 施策シナリオ
Vision	2030 (予測値)	1999	α 型, β 型, γ 型のハイブリッド

そのときには、1960年とか、2000年とか、これから2030年ぐらいの人口とかの予測値みたいなものを使って、どういうふうに負荷が変わるか、さらに、2030年後の人口とか土地利用に加えて、……

a型(インフラ整備中心施策)

下水道高度処理	下水処理場からの排水水質を計画処理水質設定で取り込み
合流改善	合流式の下水処理場の雨天時越流が発生する条件(Qmax)の設定で取り込み
透水性、保水性舗装	市街地メッシュの流出パラメータを変更(道路面積)することで取り込み
河川浄化構造物の設置	設置箇所にて浄化量を設定することで取り込み

β型(市民参加型施策)

環境保全型農業の実施	水田、畑地における面源負荷原単位を減じる
家畜し尿の利用(農地還元、エネルギー利用等)	家畜に関する原単位を減じる
環境配慮型ライフスタイルへの変 ●生活排水対策	家庭用雑排水に関する原単位を減じる
環境配慮型ライフスタイルへの変換 ●節水型社会	上水道からの取水量を一律削減
雨水貯留浸透施設の設置	市街地メッシュの流出パラメータを変更(道路以外を対象)
小規模事業所での排水対策	工業系からの排出負荷量の一律削減

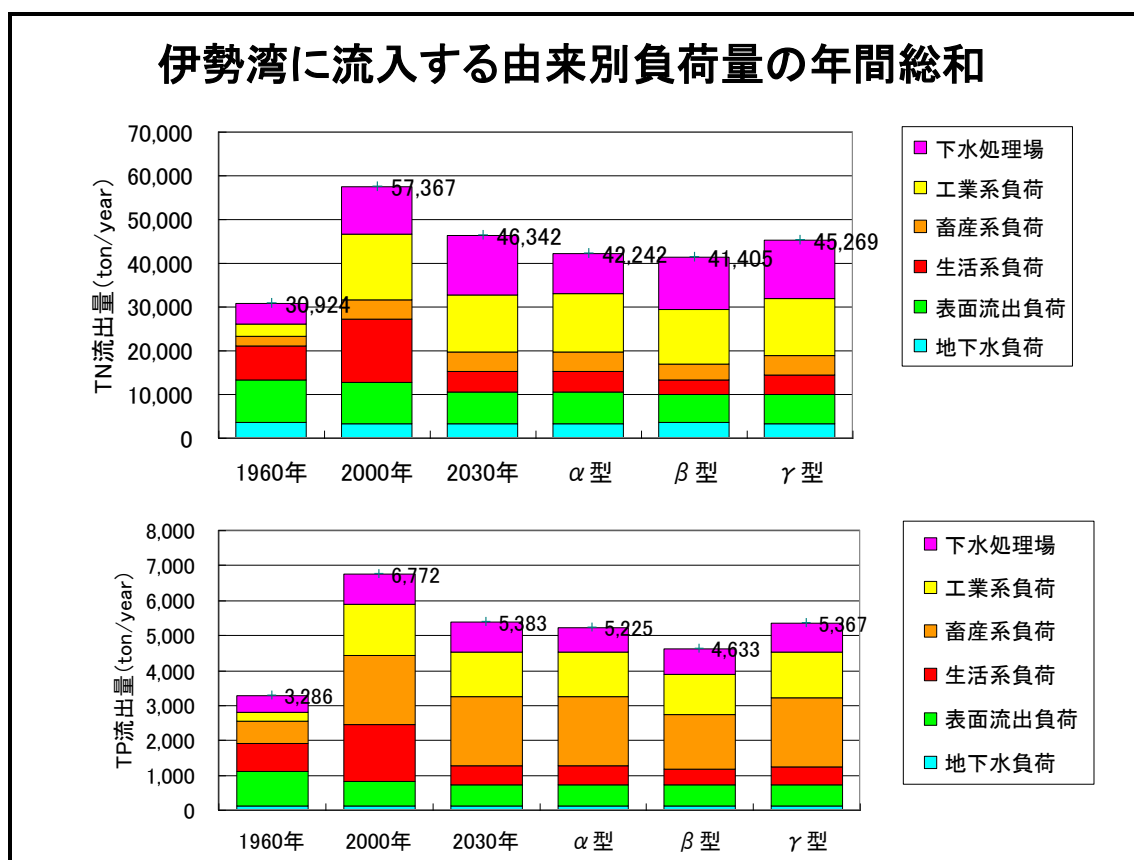
45

γ型(自然共生型施策) (TB2を用いて評価)

	場 (類型景観)	計算対象とするES
人工林の天然林化と、転換困難が人工林の管理徹底	森林	水質(N)、(炭素固定、水源涵養機能)
調整池の造成と水田灌漑への利用	農地	水質(N、P)
用排兼用水路区間の保全・創出	農地	ふれあい(メダカ、ドジョウ、フナ)
水田ネットワークの保全・創出のための冬季取水、湧水利用	農地	ふれあい(ミゾレヌマエビ)
塩水制御による底泥からの溶出の抑制	汽水性滞水域	水質(COD、N、P、SS)
流量変動による付着藻類の水質浄化機能の回復	河川	水質(N、P)
ダム下流における土砂還元によるアーマー化の抑制	河川	水質(COD、N、P) ふれあい(アユ)
瀬淵環境創出のための河川改修	河川	炭素固定、水質(N、P) ふれあい(底生生物) 46

……さらにインフラを整備したらどうなるのかとか、自然共生型の施策を打ったらどうなるのかみたいなことをいろいろやって計算しましたがけれど、こういったものにうまく数値生態系みたいなものをくっつけられないかなと思っています。

一応この将来シナリオでいろんなシナリオを考えたんですけど、そこはどんな内容かというのは、この後にスライドでつけていますので、今日は細かく説明しませんが、参照いただければと思います。



そういうことをやると、人口とか土地利用みたいな流域側のインパクトが物質濃度にどんなふうな影響が出てくるのかみたいなものは出てくるので、そういったものと、川の中のモデルをつないでいきたいというのが、今後の課題の一つとして挙げています。

湧水河川・柿田川を考える

48

ここから最後になんですけど、湧水河川・柿田川を考えるということで、名古屋でこのスライドを準備しているときも難しいなと思いながら考えて、それで、昨日現地を見て、懇親会で大分酔っぱらった頭を振り絞りながら考えても、やっぱり難しいなと思いながら、いろいろ悩んだんですけど。答えとかというよりは、率直に、悩んで、このままの研究の方向性では出来ないだろうと思うことを書きました。

湧水河川・柿田川を考える

フレームの組み直し

工学分野(今日, 紹介した数値生態系を含め)でよく使われる手法では..

『水・(溶存)物質動態』 小流域分割を基本単位とした手法

『水温』 水表面からの入射エネルギーを主たるエネルギー源とした熱収支

『土砂』 表面流出による土砂生産(比流量と比生産土砂量にある程度
の関係性を想定)

⇒

地下水流動をベースにした水・物質・熱(水温)動態を捉えられるフレームへ

比流量と比生産土砂量に大きなアンバランスがある河川での河床環境形成機構

(河川連続体仮説も, フレームからの見直し?)

49

そもそもなんですけど、工学分野でやってきた手法に関して、柿田川を解析しようと思ったら、フレームの組み直しが必要だろうと。そもそも流域のモデルは、小流域に分割して、それを基本単位とした水の動きをやっています。さらに、温度の解析も、水表面からの入射エネルギーを主たるエネルギー源とした熱収支解析をしています。もっと決定的によくわからないと思っているのが、基本的に土砂の動きに関しては、比流量（河川の流量を流域面積で割ったもの）と河川からの生産土砂量にある程度の関係性があるということ想定してやっているわけですね。だけど、全部だめじゃないかということですね。なので、地下水流動、地下水でつながった流域を何という言葉で、専門的にいう適当な言葉があるのかもしれないですけど、そちらの流動をベースにして、水と物質と熱の動態を捉えられるフレームに枠ごと変えないと無理だろうと。

あとは、やっぱり土砂に関しては、生産土砂源がどこなんだということがまずわかることが大事だろうということを思ったのと、そういった流量と生産土砂量にアンバランスがあるところで、どういうふうに河床環境が維持・形成されているのかということも大事だろうと思いました。

あと、ちょっと自分の専門からは外れるんですけど、そもそも数値生態系の構築のときに、河川連続体仮説みたいなものを念頭に置きながらやったわけなんですけど、あるところで上流がない状況で、ぽこっと水が出てくるようなところを対象に、そもそも生態系モデルの参照として考えた仮説自体も見直さなければいけないだろうと。ということで、考

えると言いながら、ほとんどこれまでやってきたことを全否定されたかなみたいな感じのことをまず感じたというのが1つです。

あと、もう一つ思ったのは、そうは言いながら、非常に流況、水質、水温が安定していると。かなり特異な特徴なので、この結果をもってほかの河川にどうということは難しいと思うんですけど、数値生態系モデルを検証することができないとかと言っていたんですけど、それに関して言うと、柿田川というのは、かなり安定した環境条件で流れていますので、そこでしっかり数値生態系モデルのどこの部分が再現されていて、再現されていないかみたいなものを絞り込んで調査することはやりやすい場ではないかと感じました。ただ、河川の流路延長が短いので、この中でどれぐらいのことが起こるのかというのがよくわからないなと思いながらですけど、ただ、そういう理想的な調査をするような場としておもしろいなと思ったというのがもう一点です。

湧水河川・柿田川を考える

安定した流況・水質・水温

多くの河川では、

『平水と洪水』、『季節』、『流域(土地利用)特性』など、『変動』や『インパクト』を整理・大別しやすい視点がある

⇔ 湧水河川・柿田川：流況，水質，水温が安定

- 極めてユニーク
- 安定した環境条件下で基礎プロセスを調査できる場
- 「変動」，「インパクト」が分かりやすいあるいは支配的な河川で報告されてきたメカニズムとの相違から何を見出すのか

50

あと、もう一つ思ったのが、地下水から表流水にぽつと出てくる、そのところで光環境、流動環境が急激に変わるわけなんですけど、これ自体は、そもそも通常の河川でも、瀬とか淵とかの河床構造に対応して、砂州の前半で伏流して、それが後ろ側で湧き出したりみたいな交換をしているわけなんですけれど、ただ、通常の河川でそれを観測しようとすると、結構難しいですね。まず1つは、川を流れている総流量のボリュームと比較すると、交換しているボリュームはそんなに大きくないので、川の表流水の水質の変化として検出しようとする、難しい。さらに、伏流と湧出が両方ありますので、なかなか捉えに

くい。例えば、濁りみたいなものがフィルタリングされたりとか、そういう粒状有機物みたいなものがトラップされたりとか、そういうのはある程度できるでしょうし、竹門先生とかは実際にそういうのをしっかりやられているんですけど、ただ、やっぱりあくまでも上を流れている総ボリュームはかなり大きいですけど。

湧水河川・柿田川を考える

地下水・表流水インターフェイス層でのマイクロプロセス

地下水⇒表流水へと移るごく薄い層で『光環境』、『流動環境』などの急激な変化

通常の河川でも伏流水・表流水のインターフェイスは大事だが、
河川を流れる総流量ボリュームに対する交換量は、あまり大きくない。
浸透・湧出の両方向

柿田川全体の調査から**インターフェイス層での微細プロセス**を見ることが出来るのでは？

51

柿田川に関して見ると、流量のほとんどが湧水起源だし、そのインターフェイスでのプロセスも一方向が支配的なので、潜り込むほうは、浸透のほうはとりあえず考えないとしても、湧水のところで何が起きているのかということクローズアップして見るというのがおもしろいのではないかなと思っています。

例えば、私、もともとは水理学とかって物理系の分野出身ですが、通常の河川では小さい層で湧水が起こって、河床の近傍の物質のやりとりなんて、流速も小さく、じわじわと拡散のような形態で起きているのが、柿田川ではそれなりの流速、乱れ、乱流みたいなものを持って物質が地下水から河床に出てくると。そういったところのプロセスなんかを調べるのにおもしろいんじゃないかなと思いつつ昨日見学していました。

ということで、最後は、十分まだよくわかっていない状況の中で、柿田川を私なりに考えてみたときに感じたことというぐらいのお話になってしまいましたけれど、こういうことを感じました。

ご清聴ありがとうございました

52

駆け足でしたけど、以上で発表を終わりたいと思います。どうも、ご清聴ありがとうございました。(拍手)

【加藤 憲二 研究会代表(静岡大学 名誉教授)】 戸田先生、どうもありがとうございました。膨大なお仕事を45分にまとめていただいて、多分、ご本人にとっても不本意なところがありかと思うんですけれども、10分少々は大いに意見交換をしたいと思います。質問をどうぞ、どちらからでも。

竹門さん。

【竹門 康弘(京都大学防災研究所 准教授)】 3つほどあるんですが、1つは、生態系のモデルを構築する際の検証プロセスをどうするかというところなんですよ。通常のベースだとか水のモデルでも、検証でモデルの設定条件を修正し、アジャストメントするというのは当たり前にはやることですが、この生態系モデルの場合は、そのプロセスをどのようにするのかというのは、多分、ご本人も大きな問題だと思うんですが。

一般的な形状として、例えば、河川生態の連続体もパターンに質的に合っていますよというのだと、モデルのバリデーションにはまだ未成熟ですよ。要するに、数値的にモデルとしての妥当性というのを検証するためには、何を使って数値計算の結果を改善していくのか。これが1つ目の質問なんですけど、一遍に言っちゃったほうがいいですか。

【加藤】 どちらがよろしいですか。

【戸田】 まずストレートには、やっぱり生物のデータと有機物のデータかなと思って

いて、底生昆虫とかのデータが、例えば、流程ごとに川の単位面積当たりのバイオマスみたいなものでもしデータがあるんだったら、やっぱりそれと比較できると、一番直接的な比較だと思っています。

結局、溶存態の栄養塩とか、今、計測データがあるから、ちょっと比較はしたんですけど、あつちは圧倒的に流域とのやりとりのほうが効いてきそうな気がして、このモデルの特徴として再現したいことを検証するんだったら、川の中の底生昆虫とか、そういう生物相の値がどれだけ再現できるかという視点でやるべきだろうなというふうに感じています。

【竹門】 2つ目は、1つ目にも関係するんですが、今ご自身もおっしゃっていただいたように、何を目的にするかによって、当然ながら、モデルの形状だとか、精緻化の目標も変わってくると思うんですね。一番初めには、河川管理にこれを生かすためにというような大目的があったかと思うんですけど。ただし、管理にもいろんな視点があるんで、やはり生態系モデルを使って何をしたいのかという、その部分をもう少し明確にお答えいただければありがたいなと思います。

【戸田】 まず、モデルができて、その後、一緒に溝口君とかと、土砂とか魚をきちんと入れましょうねというのをやり始めたのは、やっぱりダムからの土砂還元をきちんと評価できることをしたいと。ダム下流河川のアーマー化したところに細かい砂が入っていつて、底生昆虫が回復するかみたいなところをやってみたいと。それが一番わかりやすい例かなと思っていて、そこまで今やっているということです。

【竹門】 ありがとうございます。

これはアドバイスになるんですが、底生動物に限らず、植物にせよ、ある生命体が増えるか減るかというのを支配している要因というのは、あまりにもたくさんあるので、全てをオールマイティ的に表現するのは無理だと初めから思ったほうがいいんじゃないかと思うんですね。その意味では、土砂還元の効果を生態系モデルで評価するというのは、土砂還元によって変わる条件というのはある程度制限されますので、それがどう生態系に影響するのかという、その筋道であれば、多分できるんじゃないかと思うんですね。

そういう意味で、最初に説明していただいた目的というのは茫漠とし過ぎているので、今お答えいただいたような使い方をされるのがいいんじゃないのかというのは、私なんかの意見ですね。

今度、こと柿田川の場合にどうするのかということになるんですけど、これは3つ目の質問なんです。柿田川の場合に、今日最後にご指摘いただいた、アップウェリングかダウンウェリングかで、アップウェリングばかりというのは、私も今回ここで調査する目的として、そういう系では水生動物がどう応答するのかというのを見るために今回調査していたので、極めて整合性の高いテーマなので、いいなと思ったんですけど。その場合に、

このモデルとして何を見るのかがもう一つ明確ではなくて、系としての特徴が、地下水が出てくる一方であるということであるとすると、生態系モデルとしてはどういう結果が予測されるのかというところで、一種の仮説が必要だなと思いましたね。

それについての今日私が見てきた結果をちょっとだけ言わせていただきますと、私も1.2キロのほとんどが湧き出るものだというふうに思っていました。だとすれば、底生生物のうち、間隙生物というのは、結構アップウェリングになるような連中が多いんじゃないかなと思っていたんですけども、場所によって全然違うということが今回見えまして。場所によっては、目詰まりしちゃっていて、全然疎通性がないような環境のほうがたくさんあって、柿田川の中にも、スポット的に湧き出るところと、そうでないところというのが分布しているというのが事実のようですので、その意味では、ほかの川のケースに比べて、地形条件がダウンウェリングとアップウェリングじゃない。つまり、砂州のような、地形に応じたダウンウェリングとアップウェリングというのが柿田川では通用しないというのは確かですけれども、そのヘテロジェニティがどうなっているのかというのは、また視点としては持っておかないとまずいかなと。これは私自身に対するテーマでもありますけど。

【戸田】 ありがとうございます。

【加藤】 じゃ、ほかに、どうぞ。

【志賀 隆（新潟大学 准教授）】 すみません、素人なので、素人っぽい質問なんですけど。このモデルの中に組み込んでいるやつ、簡単にしているのはわかるんですけど、一応植物をやっているんで質問なんですけど、植物が入っていないのは何でかなというのと、バイオマスとしてはかなりの部分を占めているのと、流速とか、熱効率とか、光の反射とか、そういうのを考えると、結構な割合を占めているのではないかなと個人的には思っているんですけど、河川工学から見るとあまり関係ないという感じなんですかね。

【戸田】 いや、そういうわけではないと思うんですけど。どれぐらい効いているかというのを実際に調べようとしてこのモデルをつくったというよりは、むしろ、これまでに生態学分野で言われていたストーリーに乗ったときに、どんなモデルが組めるのかというふうにやったので、むしろそういうことはぜひ教えていただいて、上流から下流まで一気通貫で組むモデルでも、やっぱり植物は、こういうものはしっかり入れていかなければいけないよみたいなものをアドバイスいただけるといいかなというふうに私は考えています。

【志賀】 教科書的には、やっぱり中流域から下流域になると水草とかが出てきたりとかいうのは、さっきお示しいただいた資料にも書いてあったと思うんですけど、下流のところかな、水草が出てきましたけど、中流域から下流域で水草が大繁茂したりとか、停滞

している部分で結構あったりして、そこで土砂がトラップされたりというのは普通かなと思っていたんですが。昔の1970何年の日本語の教科書のやつには、ちょっただけ出ています。ほんのちょっただけですけど、出ていました。

【加藤】 あと、じゃあ。

【浅枝 隆（埼玉大学 名誉教授）】 いいですか。数理モデルで、すごくお気持ちわかるんですけど、今、全部を同じレベルで評価されていますよね。その必要、まずはないんじゃないかなって。だから、大きく影響するのだけ、3つか4つかぐらい取り出して、それでまずやって、それから、もう少し細かいところかなという気が何となくしてしまして。

今の水草の話。私、だから、西日本のカナダモのところを山ほど調査していて、あそこは、昔はもう完全な礫河川だったんですね。そうすると、そこで主要な要素というのと、今、水草が山ほど生えちゃって、それで、主要な要素が全然違うんですよ。

ということは、まずは、だから、そういった主要な要素を取り出した形で、全体系の大まかなところをやって、それから次に、そのバックグラウンドのもとで、細かい、さっきの水生昆虫とかぐらいに入っていっていったほうがやりやすいんじゃないかなと、聞いていて思いました。いかがですかね。

【戸田】 私は、このモデルで全部できるということはあまり思っていなくて、ただ、水文流出解析に相当するようなものの生態系バージョンをつくれなかつたということなんです。だから、これで正確に合うというよりは、こういう考え方をもって、例えば、ある河川の流域を一回計算してみると。それで、実際にいろんな事業をしたりモニタリングしたらずれているんで、そうすると、ここの辺の調査はもっとやらないといけないといった、考え方を見直すリファレンスの数値計算みたいなものがあると、冒頭にお話しした治水とか利水が流域スケールから計画を決めていくのに対して、環境側にも、そのためのツールみたいなものがあるといいんじゃないかなと思っています。そのためのモデルとしては複雑過ぎるということのかもしれないです。浅枝先生言われるみたいに、それぐらいのことがしたいんだつたら、もっとざっくりとしたもので水系流域の評価をしておいて、個別のところでは細かいことをやったほうがいいという話もあるかもしれないんですけど、ちょっと考えたいと思います。

【加藤】 岩田さん、どうぞ。

【岩田 智也（山梨大学 准教授）】 興味深い話、ありがとうございました。

途中で硝酸が増えてくるようなデータがありまして、それが流域からの負荷という話をされていたんですけど。私も中流・下流で川をボートで下りながら測っていくと、数キロ区間で硝酸というのが増えてきていて、結局、アンモニアの減少と対応していて、それをモデルで解析すると、ほとんどアンモニア酸化で説明されてしまうような感じになるので、

このアンモニアの消費と硝酸の生成は連結されているんですか。

【戸田】 はい。

【岩田】 それでも、アンモニア酸化では硝酸の生成が説明できなくて、流出、流域からの負荷というような解釈になるということなんですか。

【戸田】 そうですね。というか、観測のほうは観測なので、解析の中では出てきていないんですけど。解析側は、むしろご指摘のとおりかもしれない。あんまり変わらないとか、黒い棒のところになってくるので、あんまり河道の中で大きく変化がないような状況になっていて。実際の現場として増えていっているのがあって、そこは実際の観測データのほうを見てみないとよくわからないんですけど、揖保川でも下流のほうで都市域が広がっているんで、流域負荷ではないかなというふうに、単純に思っていたところですけど、ちょっと見てみます。

【岩田】 あとは短い質問で、有機物というものの扱いが、炭素、窒素、リンと元素レベルで考えたときは、どれを想定されているのがちょっとわかりにくかったんですけども。

【戸田】 計算上、Cの量として計算しているんですけど。生物でとか、有機物全体に標準的な組成式みたいなものを設定しておいて、Cがどれだけ有機体として増えると、窒素とかリンはこれぐらいのコンポジションで含まれて変化していくという、標準的組成式みたいなものをつくって解析しているという。

【岩田】 ありがとうございます。

【加藤】 ほか、もう少しだけ時間があります。

なければなんですが。スライドで言うと、真ん中あたりの式のところをきっちりお聞きして、ここを議論しないと、とても失礼だというふうに思うんですが。

それから、感想です。後のほうで非常に感激して、同じ方向へ行くのかなとも思ったんですが、我々、生物系の人間が明らかにしたいことと、それに向かったの戸田先生からのアプローチというのは、やっぱりかなり距離があると。

ただ、聞いてみて、一番私が知りたいと思ったのは、日本の川って何なのということの世界のモデルの中できっちり示していただけたら、我々の河の生態系の構成のいろんな議論が非常にインパクトを持つかなという、そういう気がしたんですが、いかがですかね。

そういう、先生がやられた今までの段階のモデルの仕事で、世界のそういうモデルと比べてこうだということも勉強はなさっていますか。あまりそういうことはご興味ないですか。

【戸田】 そうですね。どうなんでしょう。浅枝先生のほうが詳しいかもしれないんですけど。あんまり物質循環、生態系モデルをくっつけてやろうとかというのは、私の知る

限りだとなくて、浅枝先生が先ほど言われたみたいに、どちらかというと、主要なプロセスとか、主に予測したい水質項目とか、そういうものにターゲットを絞って、そういうモデルが多いんじゃないかなと思いますね。

【加藤】 そうですか。私はちょっと浅枝さんとは違って、大ざっぱでいいから、日本の川はこうだでいいんじゃないかなと思います。それで、やはり日本の川を位置づけていただけたらいいというのが、私の極めて個人的な感想です。

【浅枝】 そのときに、今だから、その背景にあるのが河川連続体仮説ですよ。あれって大丈夫なんですか、日本の川で。

【加藤】 誰か責任取らなアカんじゃないですか。その点、どうですか。

【川那部 浩哉（京都大学 名誉教授）】 それは、本人が言っているみたいに、仮説としてはおもしろいですね。ただし、実は何を言っているのかよくわからない。

それから、例えば、今お考えになっている生態系モデルとおっしゃったのは、非常に正しい使い方なんです。つまり、1930年代の一番初めに生態系モデルというのを考えたときのやり方なんです。それは物質循環の問題ですね。現在使われている生態系モデルというのは、何かよくわからない。少なくとも私には全くわからない。生態学の人ほとんど言葉の生態系モデルなんかがわからない。という意味で、つまり、やっぱりどういうモデルでも、そのモデルをもう少し、大変申しわけない、自分で、どの程度まで正しくて、どこが間違っているのかということをお考えいただいたほうがいいのではないかと。

それから、そんなして当てはったから余計なことを言うと、今日はものすごくおもしろかった。というのは、何がおもしろかったかというと、60何年前やろな、私、数学がものすごく好きだったんだよね。全体像をつくるのに、いろんなことを考えてね。そのとき途中でやめてしまったのは、解析学的方法では、僕、やっていけないと思い出したんです。当時の言葉で言ったら、抽象代数学の言葉でやろうと。だから、集合、位相、図形というようなものでやるということになるとどうなるかということ、隣に何があるかということのほうが先なんですね。全体がどうであるかとかというよりは、隣に何があって、そこでどういうことが起こっているかということが先で、それをずっと積み重ねていくとどういふふうになっていくかということを追っていたので、そのとき以来こういう考え方をしなかったもので、今日はある意味ではものすごくおもしろく拝聴して。その立場ではものすごくおもしろいんですが、やっぱり全部ああいう式が出てくるので、みんなが微分方程式とか偏微分方程式なんですね。

その限界というものが河川工学でも、それから、もっと極端に言ったら、物理科学全体において、もはや明らかになっている世代でしょう。そういう点では、河川工学の中に、そうではないような問題をどうやって入れていくかというのが、お若いあなた方には、若

うないかしらんけど、一番大事なところで、そこのもっとすごい面白いモデルなんかを考えていただけると、少なくとも、ぱっと開くことはないにしても、どこかのところが少し変わっていくということが起こってくるんじゃないか。それ自身も、やっぱり従来の河川工学的な考え方の中にそういうのが入ってくると、もっと面白いんじゃないかと思って、今日はすごくおもしろく、しかし、私は全く賛成しないだろうなと思いつつ、それは別にして、ものすごくおもしろく拝聴しました。ありがとうございました。

【戸田】 ありがとうございます。

【加藤】 じゃ、どうもありがとうございました。(拍手)

了 ——