

河川生態系における生元素循環と陸一川一沿岸 域間の物質輸送

岩田智也(山梨大学生命環境学部)

Email: tiwata@yamanashi.ac.jp



【岩田】 山梨大学生命環境学部の岩田と申します。加藤先生にもご紹介いただきましたけれども、私、河川と湖の物質循環を最近興味を持ってやっております。今、柿田川のほうも少しだけ見学させていただいたんですけれども、水草の世界だなというふうに感じて戻ってきたところなんですけれども、いろいろおもしろい点も見れたかなと思います。きょうはお時間が限られています……。すみません、私、あした学会がありまして、あしたのほうは欠席させていただきますが、きょうだけということになりますので、簡単に私のやっている研究内容のご紹介をさせていただければと、そのように思います。



群集生態学

安定同位体



栄養塩動態



物質循環というふうには言いましたけれども、私、学生的时候は、実は群集生態学を専門にしておりました。左上のところにありますように、中野先生のところで森と川のリンケージの研究をさせていただいたんですけれども、事故がありまして、その後、京都大学の和田先生にご指導いただきまして、そこで、左下にありますように、少し安定同位体とい

うものもやるようになりました。和田先生が地球研に移られまして、その後、見づらいですけど、右のほうの、東北大学の占部先生にドクターの3年間ご指導いただいたということで、栄養塩のストイキオメトリーですとか物質循環というものに興味を持つようになりました、どれも中途半端なんですけれども、今、そういったところで学んだことを生かしながら、河川と湖の物質循環を研究を進めているという、そういう次第です。

調査はこういったところで、最近は、実は6割ぐらい湖のほうに興味を持ってやっているんですけれども、主に、左側の写真にありますように、富士川水系をインテンシブに調査しています。それから、リバフロさんにもお世話になっているんですけれども、岩木川のほうでも、もう七、八年になるかと思えますけど、十三湖のほうでも調査を続けております。それから、地球研のプロジェクトで、琵琶湖のほうでも今研究をやっている、主にその3つの水系で調査をしているというところです。



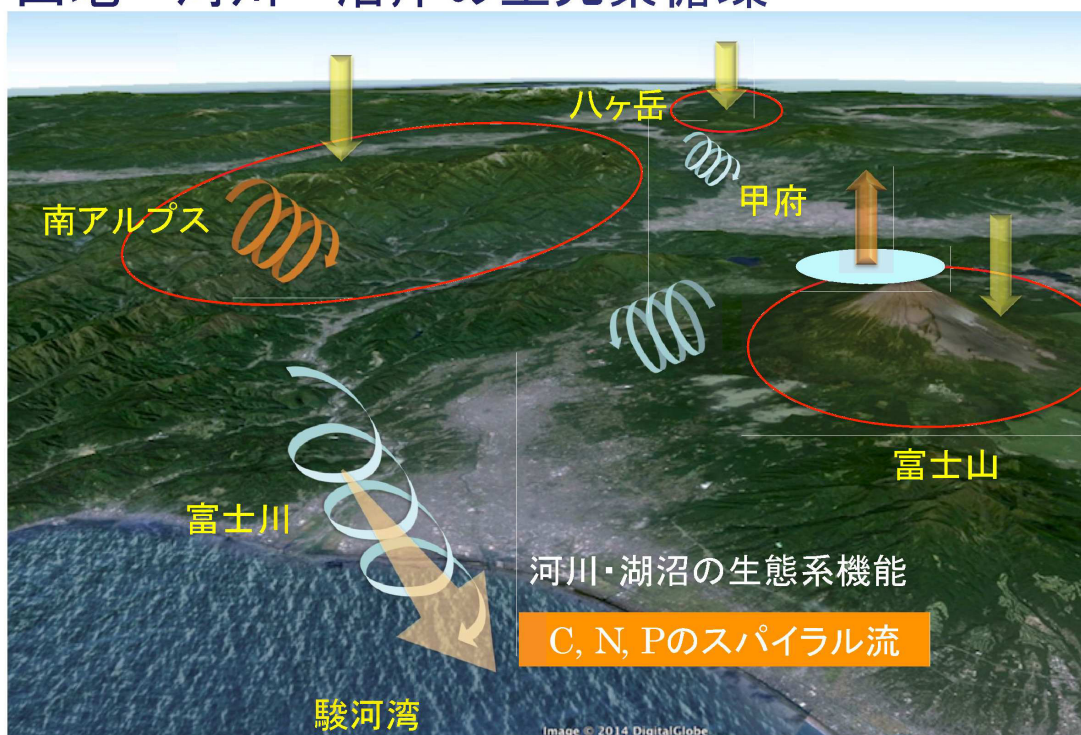
主な興味なんですけれども、これは富士川水系をグーグルマップで上からのぞいたところですけど、物質循環に興味がありますけれども、特に生元素循環、炭素、窒素、リン、それから、その他の微量元素が、源流域から河川ネットワークを通して沿岸域にまでどういうふうに回転しているのかという、その見えない回転を何とか定量化したいというのと、できれば沿岸域までの波及効果を見たいというふうに思っております。

特に、右下に少し書いています、スパイラル流と書いていますけれども、欧米の研究者は、よく河川でスパイラルレングスとかというような形で、川の中の物質循環を定量化するんですけれども、国内ではほとんど例がありませんので、最近では、そういった研究を

中心に一生懸命やっているというところです。

主に川の中の生元素フラックスでも、最初に興味を持ってやりましたのが炭素フラックスで、そこで三島先生の研究なども参考にさせていただきながら、川の中の炭素循環、特に生産と呼吸を定量化するというものを10年ぐらい前にインテンシブにやったことがあります。

山地—河川—沿岸の生元素循環



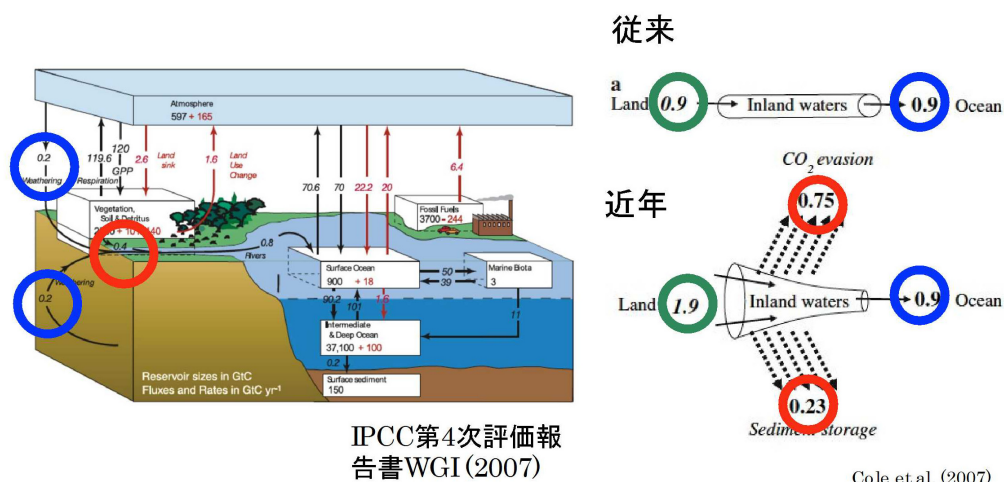
その研究の背景になるのが、ここに書いている図ですけれども、もともとIPCCの第4次評価報告書で見ましても、川の中では炭素は代謝されないと、陸域の光合成で固定された純生産のほとんどは、川の中に流出したとしても、そのまま海に運ばれる物質の通過系だというふうな考えが、少なくとも第4次評価報告書までの間には世界的に一般的に考えられていたという経緯があります。

ところが、それが、右の図の上の従来というものの考え方で、年間0.9ギガトンほどのカーボンが陸域から入ってくるんですけど、そのまま海に抜けていくというような、川は通過系だという考えだったんですけれども、近年という流れのほうに変わってきて、実は、川の中での物質代謝というものがかなりグローバルスケールでも効いているんだと

いう話が、欧米の研究者を中心になされるようになってきました。

実際には、0.9陸から入ってきていたのではなくて、陸からは1.9ギガトンの炭素が入ってきて、水系で0.75、あるいは、0.23の堆砂や堆積物への埋没があって、残りが海に流れているんだという実像が出てきたという、そういうパラダイムの変化が川の研究の中であつたということです。それに興味を持ちまして、日本の川ですと、面積が大きくないですから、大した貢献はないのはわかってはいるんですけども、川の生産、呼吸をはかったという経緯です。

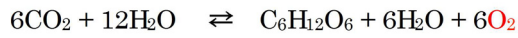
水系の炭素フラックス



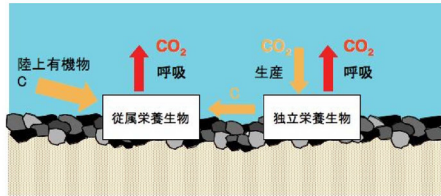
水系は陸域有機炭素の約4割を分解し、CO₂として放出。水系は炭素輸送の導管ではなく、グローバルな炭素循環に寄与。

三島先生のご研究でもよくご紹介いただいていますけれども、川の中の生態系の代謝速度を酸素の変化率で見ると。一番厄介なのが、大気とのガス交換の曝気なんですけれども、そこも何とか、いろいろな方法を使って推定すると。一番は、プロパンを注入して、プロパンの曝気速度から酸素の曝気速度も出すというようなこともやったりしていますけれども、そういったことで川の生産と呼吸を出すというものをやってみたりしております。

河川の生態系代謝速度



$$\frac{dC}{dt} = \frac{\text{GPP} - \text{CR}}{z} + k_2(C_s - C)$$



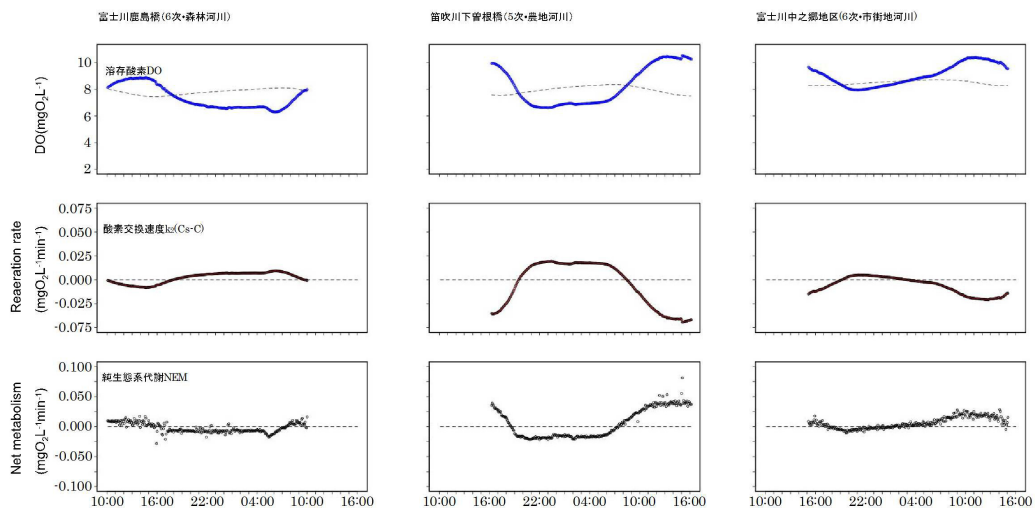
GPP: 総生産
 CR : 呼吸
 k_2 : 再曝気係数 (time^{-1})
 C_s : 飽和DO濃度 (mg/L)
 C : DO濃度 (mg/L)



高精度ウインクラー法により溶存酸素濃度の変化速度 $d\text{DO}/dt$ をモニタリングし、総生産速度 (GPP) と群集呼吸速度 (CR) を推定

実際に、これはごく一日だけのデータですけど、こういったいろいろな河川で川の溶存酸素の日変化速度、それから、曝気速度の日変化を推定して、純生態系生産を出すというようなことを富士川の40河川以上でやっておりました。今はやっていないんですが。

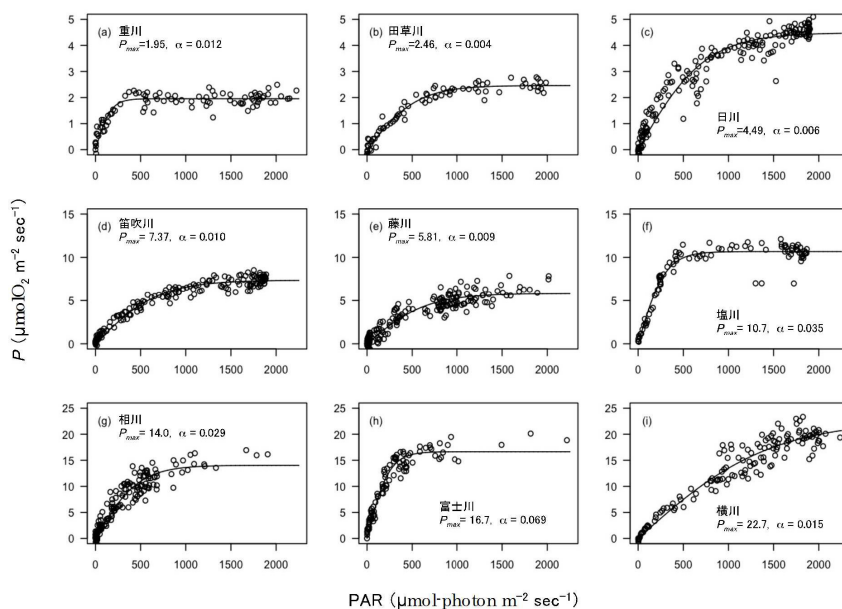
代謝速度の日変化 5~6次河川



そうすると、興味深いことに、陸域の植物が示すような光合成曲線が、実は川の生態系

スケールでも認められるということがわかっていたりしています。横軸が光合成有効放射で、縦軸が生産なんですけれども、ある程度まで線形的に光合成速度が上がって、大体500 $\mu\text{mol photon}/\text{m}^2/\text{s}$ ぐらいを超えてくると下がってくるというようなパターン。ただ、川ごとに、この傾きと V_{max} が違って、それが何で決まっているのかというのは非常に興味を持っていて、おそらく光合成のときの光獲得効率とか、そういったものが関係していたりするんじゃないかということで、またこういった研究を続けていこうと思って、いた矢先に、今回呼んでいただいたというようなところなんです。

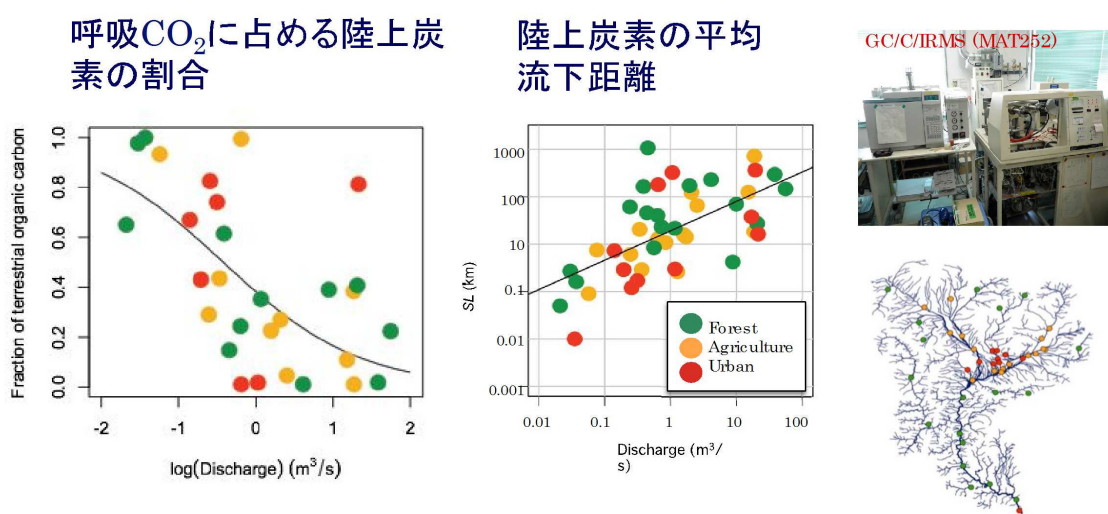
生態系スケールのP-I曲線



それから、酸素の変化だけでなく、安定同位体を使いまして、酸素の変化と同時に CO_2 が発生してきますが、その CO_2 の安定同位体をはかることによって、川の生態系(の生物群集)が何を基質として呼吸をしているかという推定ができます。出てくる CO_2 の安定同位体が陸上有機物に近ければ、陸起源有機物を誰かが代謝して CO_2 が発生していますし、藻体に近ければ、藻類の生産した有機物を誰かが分解して CO_2 が発生しているんだという、そういう推定ができるわけで、そのミキシングモデルで、その川で発生する CO_2 の何割が陸由来なのか、何割が川由来なのかというような推定もやりました。これは、おそらく海外でもこういったことをやっている人はいないと思いますけれども。

それで、横軸に川の流量をとりまして、縦軸に陸起源有機物が代謝された割合をとったりしています。そうしますと、左の図に見えますように、小河川では陸起源有機物由来のCO₂が多数発生していて、大河川ではその割合が一気に下がっていき、自生性の藻類由来の有機物が呼吸に使われているというような、河川連続体仮説に沿った形のパターンが出てくるというようなことももうわかってきております。

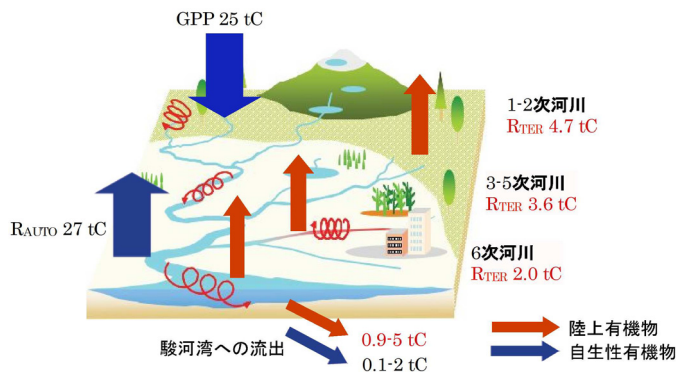
陸上有機物の分解速度



小河川の生物群集は陸上有機物に強く依存しており、短い流下距離で効率的に分解している。

これを流域全体に返すようなことで、大体1次河川、2次河川、3次から6次、富士川の一番末端で6次河川なんですけれども、陸起源有機物がどの川でどれぐらい代謝されているのかという、ざっくりとした見積もりをしております、これも確度は決して高くはないんですけれども、ざっくりとしたこういう推定を出したりというような試みもしています。いずれにしても、この富士川水系というのは、炭素をただ輸送しているわけではなくて、その中でかなりの割合で陸起源有機物、それから、水の中での自生性有機物を代謝して大気に戻しているという回転の場であるということがわかってきたという、そういう1つの結果がこちらでございます。

富士川水系の流域炭素代謝(夏期)



水系の炭素代謝量は海洋へのフラックスを上回っており、水系網(とくに小中河川)は陸上有機物の分解の場として集水域の炭素収支に関与→水系は炭素輸送系ではなく、炭素回転の場

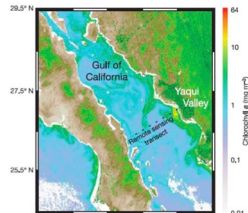
それから、もう一つは、窒素とリンの流れについて興味を持ってやっております。リンにつきましては、下流の湖沼の富栄養化を引き起こす要因でありますし、窒素につきましては、陸域ではさして悪さをしないですけれども、沿岸域、特に閉鎖性の水域では富栄養化の原因となる栄養物質であると。特に、一番右の写真にありますように、海外では、上流域からの硝酸の流入によって塩性湿地が崩壊し始めているというような、そういう例も『Nature』で報告され始めています。これは湿地植物の根圏が窒素が多い関係で短くなることによって、土壌の安定性が失われるとか、そういった仮説が提示されているわけなんですけれども、そういったことで、川の中の窒素やリンの回転を見たいという興味を持って研究をしております。

過剰な窒素とリンの下流生態系への影響

Pによる湖沼の富栄養化 NIによる沿岸域のブルームや塩性湿地の崩壊



Schindler et al. (2008) PNAS

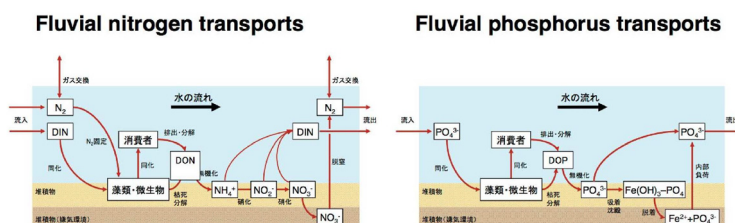


Beman et al. (2005) Nature



ただ、左が窒素、右がリンの循環を模式的に書いたものなんですけれども、実際に複雑で、なかなか川の中での窒素、リンのプロセスを国内で研究した例というのはあまり多くはないという、そういうところで研究を進めているところです。

河川内プロセスによる栄養塩の取り込み



河川内ではさまざまな生物・非生物プロセスにより窒素やリンが水柱から取込まれ、河床に保持されている。しかし、河川の栄養塩取り込み機能を測定した研究は国内には殆どない

先ほどのような複雑な川の中の窒素とリンの動きを記述するのは非常に難しいんですけども、海外の人は、ここをざっくりと、スパイラルレングス(物質循環における連鎖の長さ)とか、取り込み速度とかというような非常にあっさりとした指標を導入することによって、ものすごくシンプルに窒素、リンの循環を記述する方法を1970年代ごろからやっております。それはスパイラルメトリクスというふうに呼んでおりますけれども、U、Vf、Swと言われる、主に3つの指標から、川の中の窒素とリンの循環を定量化してしまうと。Uというのは、川底の生物、あるいは、非生物による栄養塩原子の取り込み速度のことです。Vfというのは、川底の取り込みによって栄養塩原子が川底方向に動いていくんですけども、その鉛直移動速度、ベクトルになります。その結果、栄養塩元素は川底方向に引っ張られるんですけども、川は下流に向かって流れていきますので、その過程である程度流下してしまうと。この栄養塩原子が川底に取り込まれるまでの距離を、スパイラルレングスとか、アップテークレングスという形で、Swというふうに呼んでいるという次第です。これによって川の栄養塩取り込み機能をはかるというようなことは、海外ではもう昔から頻繁に行われているんですけども、それを国内で試してみようというところでやっております。

栄養塩スパイラルメトリクス

栄養塩原子の複雑な生物地球化学的循環を一元的に表現

The measures describe nutrient dynamics in streams

U : Areal uptake ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

v_f : Uptake velocity (m s^{-1})

S_w : Uptake length (m)

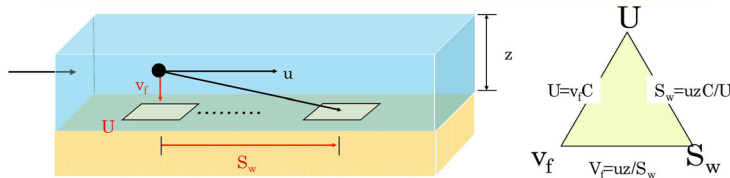


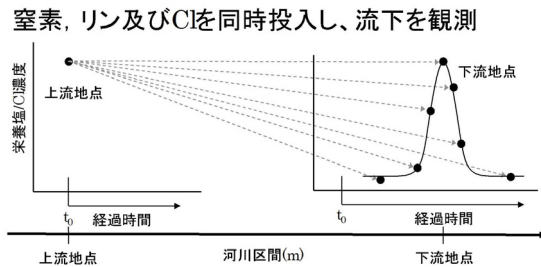
図2.6 栄養塩原子のスパイラルメトリクス。水深 z 、流速 u の河川区間を栄養塩原子(●)が流下している。河床生物による栄養塩の取込み速度 U によって、栄養塩原子は流下しながら鉛直移動速度 v_f の速度で河床方向に移動する。栄養塩原子が河床に到達するまでに流下する平均距離が、取込み距離 S_w である。

トレーサー法による推定というので、川の中に栄養塩原子を入れてやって、どれぐらい下流に向かって減衰するかという方法で測定したりする例を試したりしています。ただ、これはなかなか難しいところがありまして、結果はいろいろ出るんですけども、難しいところはいろいろあります。そもそも、日本の川というのは、窒素、硝酸濃度が非常に高いですので、その河川中の栄養塩濃度をトレーサーで上げてあげようと思うと、相当量の栄養塩を入れないといけないので、それはさすがにできないので、ごく限られた川でしかできないという、そういう問題があります。ただ、いろいろな川でこういったものをはかると、土地利用によって取り込み速度が違ったり、スパイラルレングスが違ったりとか、そういう結果がいろいろ出ております。

最近では、そういうトレーサーによらない方法はないだろうかと思ひまして、ドリフト法というのを考えまして、川をボートで下りまして、水の塊を追跡してやろうと。その中で栄養塩をどんどん数分間隔で採っていきまして、もし川の中で生物、あるいは、非生物反応で栄養塩が取り込まれていくなれば、その減衰過程を追えるだろうということで、富士川の6次河川でボートを出しまして、ずっと下っていくような調査をやっています。そうしますと、今まで海外でも測ったことがないような、流量毎秒50トンクラスぐらいの川でもスパイラルレングスがはかれるということがわかってきたりとか、そういう結果を出したりしています。

トレーサー法による推定

Steady-state injection, Pulse injection,
Isotope injection (^{13}C , ^{15}N , ^{31}P), etc.

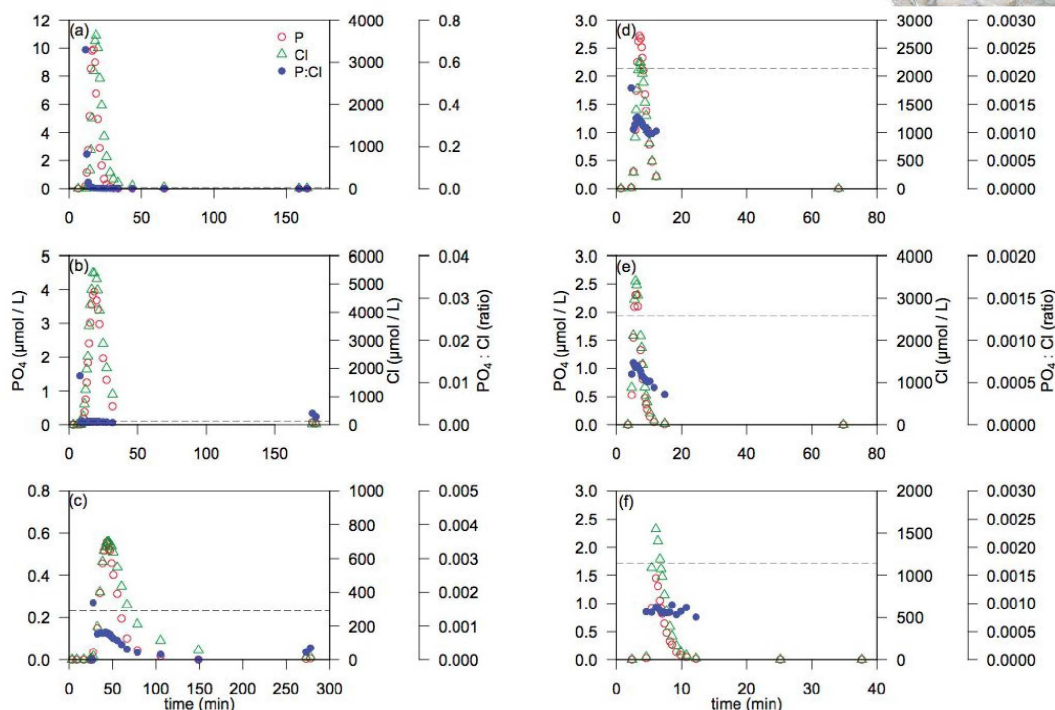


Covino et al. (2010)を改変

これはその1つの結果なんですけれども、横軸に下った距離をとりまして、縦軸に栄養塩濃度のダイナミクスを書いているんですけど、わかりやすいのは、右上のアンモニウムイオンですけど、わずか数キロ下ただけでぐんぐん減少して右下がりになっているんですけど、減少していきます。これが何によるかというのは、なかなかまだ難しいんですけども、おそらく硝化反応によって、このアンモニウムイオンが川の中で取り込まれていっていると。こういったことから、川の中で物質はただ流れているだけではなくて、非常に代謝系として機能しているということがわかっていきたいと思います。

同様に、一番右下のリン酸態リンのダイナミクスも、0キロから20キロ下っていく過程で、どんどんこのリンの濃度が減少していきまして、こちらに関しては、おそらく生・非生物による吸着反応ですとか、あとは生物による光合成による取り込みとか、こういったものによって栄養塩が減衰していくんだらうと。こういったことをもとにして、リン原子、あるいは、窒素原子が取り込まれるのにどれぐらいの距離を要するんだらうかというような推定値を出すことができたりします。

Break Through Curve 森林河川



【加藤】 今の1つ前ので、セグメントごとに初期値が変わっているのは、これは何なんでしょうか。

【岩田】 これは日にちが違ってしまっていて、その間、出水があったりすると、ばーんと跳ね上がったりしてしまっていて3回に分けて測っています。

富士川以外の河川は、今年以降、いろいろ中部地域中心に回ってみようとは思っているところです。

これは海外の河川と比べましても、富士川本流の栄養塩の代謝機能は非常に高いというようなことがわかってきました。ちょっと見づらいいんですけど、こちら辺にAreal uptake rate (U) というのがあるんですが、23.6とか46という数字なんですけど、これはアンモニウムイオンですが、海外と比べると一桁ぐらい高いです。この河川の取り込み機能ということで、日本の川というのは、水質浄化機能が非常に高いということがわかります。

ただ、栄養塩濃度も高いので、取り込み速度は速いんだけど、なかなか除去しきれないという現状があります。それから、流速が海外河川と比べてものすごく速いので、取り込み速度は速いんだけど、取り込むのに要する距離というのが、この一番

右のUptake lengthなんですけど、23キロとか7キロとか書いていますけど、このスパイラルレングスは海外の河川と同程度か、場合によっては長くなるということで、日本の河川は、生物あるいは非生物による栄養塩除去機能は高く、三尺流れれば水清しじゃないんですけれども、そういう非常に高い機能を持つものだけでも、流速が速いがゆえに、沿岸域にまで到達してしまう原子の数が多くなっているということがわかってきたということです。

例えば、この下のリン酸態リンで37キロ、64キロ、29キロというスパイラルレングスの距離が出ていますけど、下っている河川の場所から海まで50キロぐらいしかありませんので、スパイラルレングス60キロということは、もうその場を流れているリンのほとんどは駿河湾まで行ってしまっているという、そういう推定もできるという、こういったことも河川管理に生かせる1つの数値かなと思って研究を進めているところです。

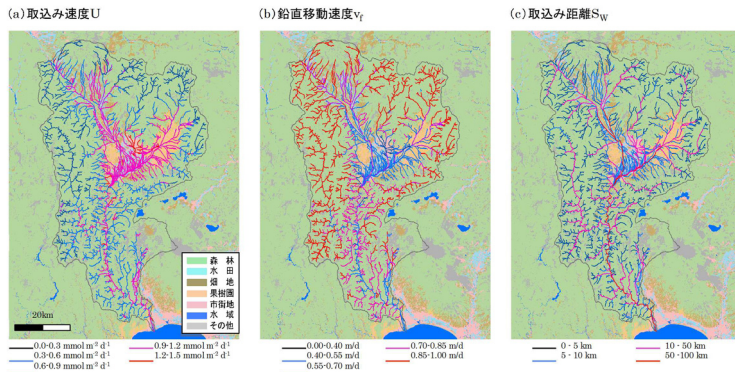
富士川本流のスパイラルメトリクス

	n	Concentration C	Corrected	Areal uptake rate	Uptake velocity	Uptake length S_w
		(μM)	concentration C' (μM) [†]	U ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{min}^{-1}$)	v_r (mm min^{-1})	(km)
NH₄						
Segment 1	26	8.72	8.90	23.6	2.7	23
Segment 2	22	7.66	7.69	46.4	6.0	7
Segment 3	23	7.61	7.95	43.0	5.4	9
NO₂						
Segment 1	26	1.47	1.48	-2.7	-1.8	∞
Segment 2	22	2.87	2.87	0.6	0.2	208
Segment 3	23	4.30	4.51	6.9	1.5	32
NO₃						
Segment 1	26	79.3	80.4	-31.8	-0.4	∞
Segment 2	22	102.6	102.9	-9.6	-0.1	∞
Segment 3	23	103.6	108.1	41.5	0.4	127
DIN						
Segment 1	26	89.5	90.8	-12.9	-0.1	∞
Segment 2	22	113.1	113.5	34.7	0.3	145
Segment 3	23	115.5	120.5	89.1	0.7	66
PO₄						
Segment 1	26	1.63	1.66	2.8	1.7	37
Segment 2	22	1.19	1.19	0.8	0.7	64
Segment 3	23	1.27	1.33	2.3	1.7	29

- NO₃のスパイラルメトリクスは負の値(河床からの放出)
- 取込み速度Uは海外河川より1桁高いが、高い濃度と早い流速を反映し、取込み距離 S_w は同程度か1桁長い。

ちょっと時間がなくなりましたので、この辺は飛ばしますけど、今は本流なんですけど、モデルを使って富士川全域の水質浄化機能、栄養塩取り込み機能をはかろうといったようなことも取り組んでやっていると。こういうふうに、絵で見せるような取り組みも今やっているところです。

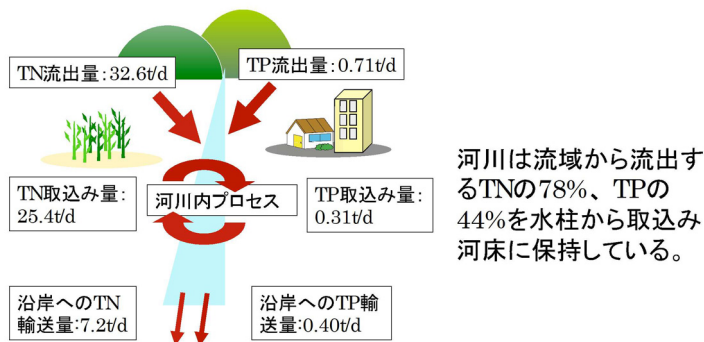
富士川水系のスパイラルメトリクス



- TN・TPともに市街地・農地河川の除去機能が低下。
- 本流の除去効率は低く、大河川に栄養塩を流入させないマネジメントが沿岸海域の保全に重要

実際にどれぐらい川の中で取り込まれているかというようなものを推定して、右の中ほどに書いてございますけれども、川から入ってくる窒素の78%、リンの44%が川の河床に保持されているというような推定もしているところです。ただ、これは大雨でフラッシュがあれば、また下流に流れていくようなものだと思いますので、除去とまでは言えないんですけども、少なくとも川の中で保持されて、下流域の水質形成機能に非常に大きな影響を及ぼしているということで、水系ネットワークの栄養塩代謝というのが重要であるというようなことがわかったんじゃないかと、そのように考えております。

富士川水系のTN・TP取込み量



これまで無視されてきた河川内プロセスが、陸域から海洋への栄養元素の輸送量を大幅に減少させている。

今回、柿田川ということで、富士山の涵養している水源なんですけれども、同じ火山と

いう意味で、岩木山ですとか十和田の火山群が涵養している十三湖の、最後のスライド1枚だけ持ってきたんですけれども、ここで結構おもしろかった研究は、火山地帯が非常にミネラルの供給源として重要な役割を果たしているということがわかりました。特にシリカの濃度が圧倒的に高い。日本列島全部見回しても、やはり火山地帯から流れてくる川のシリカ濃度というのは極めて高いです。世界でもトップクラスの濃度で、山梨県でも、富士山、あるいは、八ヶ岳方面から流れてくる河川のシリカ濃度というのは極めて高い。

この岩木川は、河口域に汽水湖の十三湖というところがありまして、ヤマトシジミの生産で非常に有名なんですけれども、そのヤマトシジミは珪藻類を食べています。安定同位体を見ると、珪藻類であろうという推定ができるんですけれども。じゃ、その珪藻類の生長は何で決まっているのかというのを、いろいろ栄養塩添加試験を占部先生とやったりしたんですけど、結構シリカが効いているんですね。シリカ律速の場合がありまして、シリカを添加すると珪藻類のブルームが起きるといようなパターンがわかってきましたので、火山、河川、それから、河口域の生物生産というリンクが見えてきたかなという、そういう一例です。

富士山も、富士山から出てくる河川は軒並みリンが高いですとか、そういったことも知られていますし、駿河湾でも、結構黒潮に乗って外洋域の魚が沼津、片浜、三保のあたりには、非常に捕食者がたくさん入ってくる有名な地域ですので、ああいう生物生産を涵養している富士山、あるいは柿田川というのは、個人的には非常に興味を持っているところです。

火山からのSi供給と汽水湖食物網



以上で、少し長くなりまして申しわけございませんけれども、自己紹介とさせていただきます。