

森から生まれた魔法の鉄で海も人の心も豊かに・・・

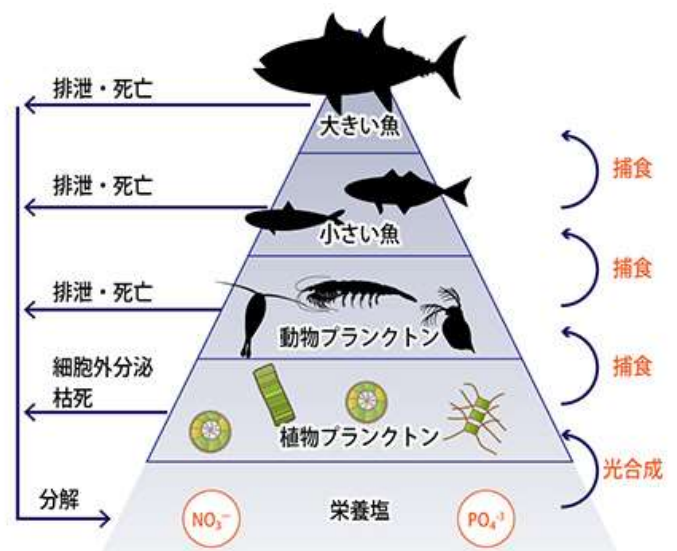


<恵み豊かな海と植物性プランクトン>

海や湖、池の中の水を採って顕微鏡で覗いてみるとたくさんの微細な生物が見える。その中の一つに植物性プランクトン（陸上植物と同じように光合成を行う）がある。クロレラという名は皆さんも健康食品とかで、お聞きになったことがあると思うが、植物性プランクトンの代表的なものの一つである。一つの個体は直接肉眼では見ることはできないが大量に増殖すると個体特有の色が現れるので存在は確認できるものである。赤潮プランクトンによる海水が赤く染まるのも同様の現象である。そもそもプランクトンとは浮遊するという意味の生態学的な用語だが、植物性プランクトンは水中で浮遊する陸上植物と同様に光合成を行う仲間ということになる。一般的には微細なものである。

まずは、右図をご覧くださいませ。この図は皆さんも今までに何回となく目にされたことがあると思うが、植物性プランクトンが動物プランクトンに食われ、動物プランクトンは小型の魚に食われるという海の生態系ピラミッドを単純化して示している。なお、図には示されていないが細菌が原生動物に食われ、それを動物プランクトンが食うという微生物食物連鎖も存在する。

海釣りでは狙う魚を集めるために動物プランクトンを撒き餌に使うことが多い。対象魚がアジなどの小型魚ならばアミ類を、またブリなどの大型魚ならオキアミ類やイワシの生餌を使う。これはまさに生態系ピラミッドの階層構造（栄養段



海の生態ピラミッド

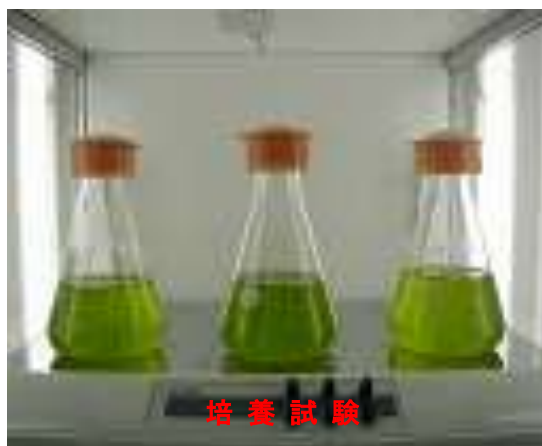
JAMSTEC（海洋研究開発機構）HP より

階) を利用している。撒き餌は効果がある反面、上手に使わないとエサ取りの小魚に悩まされる。時にはこれに一日中イライラさせられることがある。しかし、よく考えてみれば、エサ取りが多いのは豊かな海の証拠である。

大きな、大きな海、そこにはイワシに代表される小さな魚からマグロや巨大なクジラまで実にたくさんの魚などが生息する。四方を海に囲まれた日本に住む我々はこの海から魚を始めどれほどたくさんの恵みをいただいているか計り知れない。実はその多くの恵みがいただけるために根本に存在しなければならないのがこの植物性プランクトンなのである。つまり、植物性プランクトンは海の命を支える「基礎」の部分となるものである。また、光合成によって無機物から有機物を作ることから「生産」という見方もできる。つまり基礎の生産であることから、この植物性プランクトンの増える力を基礎生産力という。この力が強いほど豊かな海となるのである。

<植物性プランクトンの増殖に必要なもの>

ところで、この植物性プランクトンは何を栄養にして増えていくのだろうか。それを確かめるにはすべて既知の物質で調合した培養液で育てればよい。ミクロの世界の生き物なので、この実験には大きな器具や装置は不要である。小さなフラスコと植物性プランクトンは陸上の植物と同じように光合成を行うので太陽光の代わりに照明装置、それに蒸留水に各種の元素を添加した培養液があれば事足りる(右図参考)。色々な植物性プランクトンをフラスコの中に入れてみて、その増え方を細胞の数やクロロフィル量で評価すればよい。その結果、増殖に必要な物質の種類と



その最適な量がわかってくる。今までに、酸素(O)、炭素(C)、水素(H)、窒素(N)、カルシウム(Ca)、リン(P)、硫黄(S)、カリウム(K)、マグネシウム(Mg)などは多く必要とされ、また鉄(Fe)、ホウ素(B)、亜鉛(Zn)、銅(Cu)、マンガン(Mn)、モリブデン(Mo)、ナトリウム(Na)、塩素(Cl)、コバルト(Co)、ヨウ素(I)などは微量ながら必要とされることがわかってきた。面白いことに必要とされる元素は人体を構成している元素組成(右図)ともよく似ている。また、植物性プランクトンの中でケイ藻は他の植物性プランクトン違って細胞がケイ酸で守られているのでケイ素(Si)が別に必要となる。

培養について一つ大切なことがある。栄養を全体に行き渡らせるためにフラスコを振とうすることが必要だ。プランクトンは浮遊性といっても、風や潮汐が無く、波一つ立たない小さなフラスコの中では底に沈殿してしまう。これを沈殿しないように振とうすることによって個々の細胞を培養液中で均質に

人体を構成している元素組成

元素	重量(g)	体重に対する重量(%)
酸素	43,000	61
炭素	16,000	23
水素	7,000	10
窒素	1,800	2.6
カルシウム	1,000	1.4
リン	780	1.1
硫黄	140	0.20
カリウム	140	0.20
ナトリウム	100	0.14
塩素	95	0.12
マグネシウム	19	0.027

[出典] ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man (1974), p.327

存在させる必要がある。というのは、植物性プランクトンは小さな一つの個体（細胞）の周りから栄養を取り込むからだ。逆に培養液からみればその成分は培養液中に均質に分散しなければならない。つまり栄養成分は溶存している必要がある。栄養成分がフラスコの底に沈殿してしまうような不溶物であれば多くの細胞に届かない。

このようにして実験を積み重ねると実験レベルではあるが増殖に対する理想的な培養液の濃度組成がわかってくる。また、色んな海域の分析データが集められると、理想的な培養液と比較してそれぞれの海域で何が欠乏しているのかもわかる。今までに調べられた結果では窒素 (N) やリン (P) とともに鉄 (Fe) も増殖を制限する因子となる海域が多いことがわかってきた。

外洋では鉄 (Fe) の欠乏している海域が多いという。それは、鉄は陸上からの供給（風や水を介して）に依存しており、しかも水に溶けにくい性質があるので外洋までは届きにくいからだ。それを示唆する実験がある。赤道太平洋東部や南極海の湧昇（深層水が湧きあがる）域には窒素 (N) やリン (P) の栄養塩類は十分にあるにもかかわらずクロロフィル濃度が低い海域「高窒素低クロロフィル (HNLC)」があるらしい。この海域に鉄 (Fe) をまくと植物プランクトンの大発生を誘発し、また、この海域での上記の現象を実験レベル（現場海水に鉄を添加しての室内実験）でも実証した研究報告も出されている。この発見は、1980年、海水中における溶存鉄濃度を正確に測定する技術を開発したジョンマーチン博士によるところがあり、20世紀後半の海洋科学史におけるもっとも重要な発見の一つらしい。

なお、制限因子の反対で過剰因子になり環境に悪影響を及ぼした場合もある。高度成長期に大阪湾をはじめ東京湾、伊勢湾、瀬戸内海には河川を通して窒素 (N) やリン (P) が人為的に過剰に流入し植物性プランクトンの大発生が起り、赤潮等は大きな社会問題になった。その後は工場排水規制や生活排水対策、下水道整備に相当な努力が払われたことで赤潮はじめ危機的な富栄養化問題は沈静化した。動物プランクトン等が食べきれないほどに増え過ぎて食物連鎖がうまく機能しなくなり生態系のバランスを壊してしまったのでは元も子もない。なお、当時の沿岸域では鉄は制限因子にはなっていなかったのかも知れない。魔法の鉄といったものの制限因子になっている水環境での話である。

<もう少し鉄のことを調べてみよう>

鉄は、人にとっても重要なもので不足すると貧血などを起こすが、植物においても不可欠な微量必要元素である。たとえば、農作物の場合はアミノ酸合成に必要な窒素源は硝酸イオン (NO_3^-) にも依存しており、根から吸収された硝酸イオン (NO_3^-) は硝酸還元酵素と亜硝酸還元酵素の触媒を受けてアンモニウムイオン (NH_4^+) に還元された後にアミノ酸へ同化される。つまり、硝酸態や亜硝酸態として吸収された窒素源は、それらが還元されなければその後のアミノ酸への変換が不可能だ。その還元に生理的役割を果たしているのが鉄イオンであるという。この他にも鉄は多くの酵素やたんぱく質中に含まれ、①光合成系、②呼吸系における電子伝達、③クロロフィルの生合成、④活性酸素の濃度調整など多様な生理的役割を担っている。

鉄は自然水中での溶存態としての存在形態は第一鉄イオン (Fe^{2+}) とこれに比べて水に溶けにくい第二鉄イオン (Fe^{3+}) がある。なお、第一鉄イオン (Fe^{2+}) は酸素に触れるとすぐに酸化されて第二鉄イオン (Fe^{3+}) となり水酸化鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ のような不溶物となって沈殿する。溶存態としてはこのほかに自然有機リガンド（配位子）と錯形成した錯体化合物がある。これは外洋に於いては圧倒的に多い存在形態である。そもそも鉄は地球の地表において4番目に多く存在する元素であるにも関わらず植物性プランクトンにとって欠乏しやすいのは前述したように溶存態として存在しにくいからである。

酸素の存在しない還元状態にあった原始地球環境においては、鉄イオンは溶存性の高い Fe^{2+} として存在し、生物にとって非常に利用しやすいイオンであった。そのため、呼吸などによるエネルギー獲得、電子移動、などの生体内の主要な反応だけでなく、他の様々な反応においても利用されてきた。しかしながら、地球が光合成生物（植物）の産物である酸素分子の出現により可溶性の Fe^{2+} の酸化が起こり、現在の地球環境下では、不溶性の水酸化鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ として存在するようになった。すなわち、現在の地球環境においては、鉄は豊富に存在するものの、多くの鉄は生物にとって利用しにくい Fe^{3+} の状態にある。例えば有馬温泉の金泉は茶色っぽい色をした温泉である。地下深く（還元状態）からくみ上げた鉄の溶けた無色透明な温泉水が大気中の酸素に触れてたちまち酸化し茶色の水酸化鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ になり沈澱してしまうのである。この一連のプロセスが川や海の水環境でも起こる。川から沿岸、さらに外洋に向かうに酸化されて水酸化鉄として沈澱してしまうのである。つまり、海に浮遊している植物性プランクトンの周りには存在しにくくなるのである。

<森から川を通じて流れる水には魔法の鉄が含まれる>

森の中に足を踏み入れると歩道から少し外れた周囲には落ち葉がたくさん積もっている。そのふかふかの落ち葉の感触を確かめながらその上を歩かれたことがある方も多いと思う。いわゆる分厚い落ち葉の絨毯である。この絨毯を掘ってみると下層になるほど、葉っぱの原型が崩れた塊（腐食物質）が増えてくる（右写真）。園芸店などで、腐葉土と銘記されて土壤改良剤として売られているものはこれと同じようなものである。森の落ち葉は、最初にミミズなどの土壤動物によって食われて粉碎され、その粉碎された有機物やミミズの糞をさらに微生物が分解していく。このようなプロセスで分解され、腐熟した有機物のことを腐植物と呼んでいる。これが周囲の土と混ざり合うことで団粒構造が発達し、その土壌にはさまざまな大きさの隙間が生まれるために保水性や排水性の優れた土壌となる。我々は園芸店で購入した腐葉土に山土や砂と混ぜると庭木によい培養土ができることを知っている。



この腐食物質を酸・アルカリ処理をして成分を人為的に分けてみる。まずアルカリ条件下では可溶部と不溶性のものに分けられる。さらに可溶部は酸性条件で可溶性のフルボ酸と沈澱性のフミン酸などの腐植酸に分けられる。つまり、フルボ酸は溶存性であることが分かる。



フルボ酸は負電荷をもっているために、土壌中にある二価鉄イオン (Fe^{2+}) はフルボ酸にひきつけられて結合する。もし、鉄イオン (Fe^{2+}) が結合をしなくてそのまま流出した場合はその過程で酸素によって酸化されて結局は水酸化物として不溶化してしまう。しかし、フルボ酸と鉄イオンの結合したフルボ酸鉄は安定的なキレート化合物として、溶存状態で河口まで運ばれる。さらに海域でも窒素やリンと同じように溶存した状態で拡散されるので植物性プランクトンにとってはこの上なく利用しやすいものとなる。森の中の腐葉土の存在がいかに大きいのか！表題に魔法と付けたのはこの理由からである。

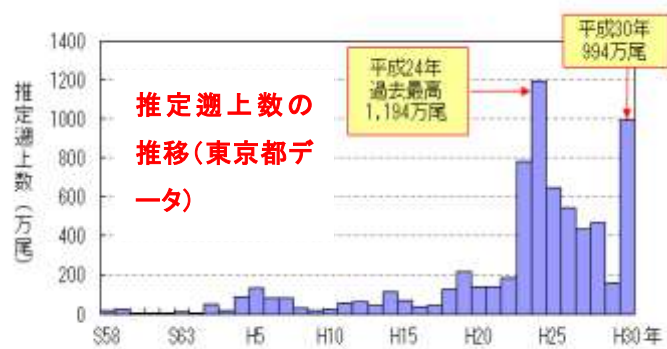
今までの研究で、このフルボ酸鉄は実は北の湿原にも多いということが知られている。その理由は、北方の湿原は気温の低さもあって、枯れた植物の分解が遅く、その過程で酸素が消費されていることから、常に鉄が水に溶けやすい還元状態の環境になっている。北大の白石先生によれば極東ロシア・アムール水系の溶存鉄は広大な森と湿地があるので日本の平均的河川より一ケタ以上高い濃度であるという。この水が親潮に混ざり北海道の海の恵みを支えているという。調査結果ではこの地域の鉄濃度は、湿地>水田>自然森林>火災を受けた森林>畑の順に高いとのことである。森林以上に濃度が高い所もあるようだが、広大な森林（日本でも森林面積は国土の70%近くもある）からの絶対量は多く、また陸域からこのような形態の鉄が生まれ川に入ることは非常に重要なことである。

<鉄が起爆剤となり森川海の繋がり認識が高まった>

ところで、鉄がもたらした大きなインパクトがもう一つある。実は私はこちらの方をお伝えしたいのである。この鉄（フルボ酸鉄）は植物性プランクトンの増殖に欠かせないだけでなく、もっとスケールの大きな課題に対して我々の背中を押してくれたのである。それは、劣化が進んでいる日本国土の自然環境の基盤である森、川、海を再生するにあたっての取組みの方法論を示唆したことである。

そもそも、川と海に対する森の重要性は、鉄のような栄養分等を供給する機能だけではない。森の最大の貢献は濁りの少ない、清浄な水を安定して供給することだ。黄河や長江の薄茶色っぽい水は、伐採で森を消失したからであり、沖縄では森をつぶしたことで大雨の時に赤土を含む大量の濁水が海に流れ込む苦い経験もしている。手入れされず放置された人工林の林床は下草に乏しく森に雨が降るとたちまち土砂が川に流れ海洋生物に大きな影響を与えたことなど多くの事例が今までに報告されている。このようなことは今までに知られていたことであり、ごく一般的というか当たり前のこととして認識されてきたことであり、それがきっかけで社会運動が起こるようなことはなかった。ところが、北大の松永先生と共同で森と川と海の間を調査していた宮城県気仙沼のカキ漁師である畠山さんが、山の腐葉土に含まれる鉄が海の恵みであるカキの養殖に効果があることを確信し、カキ養殖場に流れ込む川の上流の山に広葉樹の森造りのために植林活動を実践したことや、その一連の活動記録などを書籍（森は海の恋人）にまとめて全国に発信したことで大きな共感と反響を呼び、漁師などの山関係者以外の人々も多く加わっての植林活動が社会運動として全国的に展開していった。従来の自然保護運動は森川海をそれぞれ個別に捉えて行われていたが、畠山さんの活動を機に森も川も海もつながった一体的なものとして捉えた保護運動に確実に転換していった。国や地方の政策も確実にこれを取り入れたものになってきている。もはや海の恵みには豊かな森が必要だとの認識は、ごくごく当たり前と言われるようになってきた。実際に一体的にとらえないと解決できない、または改善できない環境が多々あることに気づき始めている時期でもあった。そのような事例を川と海との関係の中で一つ紹介しましょう。

かつての東京多摩川は汚濁河川の代表格として関西の大和川と並び東の横綱格でした。そのため色んな水生生物が川から消えたが、1990年代から多摩川の水質の改善が進み、それらの復活とアユの遡上まで目だって多くなってきた。そして、2012年には1194万匹、2018年は994万匹と今では驚くほどのアユが遡上している（右図参考）。しかし、これほどまでに遡上しだした



のは、単に川の水がよくなった理由からだけではなかった。アユは川の魚と思われがちであるが実は、生まれたての仔魚そして稚魚期は沿岸域で過ごすのである。

一年足らずの一生で半年近くは海で過ごすことになる。多数の遡上を可能にしたのは海での生活場が整備されたからだという。海で見つかったアユは東京湾内の浅海にいたことが東京都の実態調査でわかった。おそらく、仔稚魚期は天敵に襲われにくい浅場が必要だったのだろう。ちょうどそ

の頃と前後して東京湾には失われた海辺環境を取り戻すために人工の浅場（羽田沖やお台場、葛西臨海公園人工干潟など）が造成され始めていた。驚くことにこの人工の浅場でアユの稚魚が多数見つかった。この事例を知った時につながり的重要性をつくづく実感した。川の魚、アユの復活には海の再生、特に海と陸との接点である水際が必要だったのである。森川海を一体的に捉えた自然再生が重要なことを思い知った事例であった。



<目に見えない繋がりに気づく心がけ>

格安のピーチが閑空に就航して以来、私は飛行機で旅をする機会が増えた。機内の窓から下界に目をやると見えてくるのは町や水田、畑地など人の活動場。他には森と川と海である。それは北海道であれ、九州であれ同じである。そして、この森と川と海こそが国土の自然環境の基盤であることを実感する。「森は海の恋人運動」を知ってからはこの景色を見ると山の木々がもたらす腐葉土が海からの恵みに大きな影響を与えることが想像できるようになった。今までには意識になかったつながりが見えてくる。この気づきは、目に見えない関係性を知ることの重要性をも教えてくれた。日常生活でもこのようなことは経験する。「大変申し訳ありませんでした。全くお世話になっていたことに気が付きませんでした」と・・・。そう考えると、森川海のつながりを理解することは自然科学の領域にとどまらず、現代社会にも相通じて考えさせられるものがあるように思える。

「地方がその価値を認められずして疲弊しているのでは？」と思ったこともその一つである。私は10年ほど前からJR全線乗車を目指して鈍行列車の旅を続けている。全国の地方の路線に乗車して気づいたことだが、放置農地がどんどん広がっている。駅前の商店街はほとんどシャッター通りとなっている。道路の整備も遅れ、鉄道も廃線が進む。災害に遭い被害を受けた路線は復旧費用（10～100億円規模）の目途が立たず、あきらめざるを得ないところが多いという。JR北海道は経営状態が厳しく特にそうだ。これから先も廃線化が進み、乗車しなくても全線制覇をしてしまうのではないかという錯覚に落ちるほどだ。少し前になるがそんな状況の中で耳にした小池東京都知事の「東京ファースト」という言葉が非常に気になった。ちょうど東京の日本一の魚市場、豊洲市場のベンゼン等による土壌汚染問題が連日テレビで放映されていた。豊洲（東京ガス跡地）移転は6,000億円という莫大な費用（その内、土壌汚染860億円）がかかったものの何とか完了した。東京にはそれだけの資金力があるからできた。

かつての築地、今はその移転先である豊洲に行けば日本各地からの水産物が大量におそらく一番たくさん集まっている。全国の海から集められている。和歌山の勝浦でマグロを食べた時に「お客さん、ここ

のマグロはUターンした品物なので高いですよ」と言われた。地方で水揚げされた人気ある水産物は一直線で東京豊洲市場へ。そこからまた地元に戻ってくるそうだ。この水産物は東京都だけで用意できるのは皆無だろう。それは水産物だけでなく農産物もそうだと思う。生きるために最も重要である東京の食は地方の生態系サービスを楽しむことで何とか維持できているのである。その農林水産物の主な供給元である地方はどうか言えば上述の印象だ。



大都市にある築地・豊洲は地方とのつながりの中で成り立っていることを認識する事例である。東京の食を確保するためにも地方の疲弊を都市がサポートしなければならないのは当たり前のように思える。大都市は地方を恋人にしなければ成り立たない。地方からの供給が切れたら見捨てて海外に求めるのではなく、そこから持続的に長く送り届けられるように日本一の資金力の一部でも地方の活性化の支援に回してほしいものである。

「東京ファースト」は、どういう思いで発言されたものか知らないが、つながりを軽視したものであれば悲しいことである。某大統領の協調性のない一国主義と同じ次元だ。東京ファーストやトランプの自国第一主義はまさに関係性に気づいていないことを象徴する言葉のように思う。

<そして、森は海だけではなく大気の恋人でも・・・>

昨年（2018年）は今までに経験したことのない酷暑、豪雨が発生した。この原因には地球温暖化と都市部ではそれに加えヒートアイランド現象が大きく関与していることは疑いのないことだろう。すでに熱中症などの生存基盤を脅かす事態が多発しているのであるからこのまま放置するわけにはいかない深刻な問題となっている。温暖化対策としてCO₂（二酸化炭素）を抑制するには、経済活動への規制はもとより個人にも日常生活（電気、ガス、ガソリンの使用制限、その他もろもろ）の質を落として排出量を抑えることが求められる。しかしそんなに容易くできるものでないと思う。実際のところほとんどできていない。ところで、今までに人為的に大気中へ放出された温室効果ガス（温暖化の原因）のうち、約3/4は「化石燃料」を燃やしたことが原因であることはよく知られているが、残りの大部分は、土地の使い方が変化したこと、特に森林を農地や住宅に変えたことなどが原因とされていることはあまり知られていない。裏を返せば、自然環境を守っていれば温暖化のスピードは今ほどではなかったと言うことだ。人工林の手入れ不足などで全体として日本の森は劣化しているが、人工林を含めた森林は国土面積の70%近くもある。植林を含めた森林環境の整備やCO₂が固定できる国産材の積極的な利活用が得策だと思う。森林のCO₂吸収能力を再評価して、今一度原点に戻り自然の力を利用することはその解決に大きく貢献するのではないだろうか。木を植えることや自然保護は個人のライフスタイルの変更や経済活動に規制をかけることよりも負担が少なく一歩が踏み出し易いように思う。まさに、森・川・海とのつながりはもとより、さらに大気へのつながりまでも十分に意識したうえでの自然保護政策の展開が求められる時代になっていると感じている。



そして、森は大気の恋人にまで……

<参考資料>

- ・ 森は海の恋人 畠山重篤 北斗出版 1994
- ・ 「森は海の恋人」に出会った町に思いを寄せて 船本浩路 シニア自然大学地球環境自然学講座 2017
- ・ 平成 29 年度 地球環境『自然学講座』第 13 回「海の基礎生産—鉄の果たす役割」講師 県立広島大学准教授 内藤佳奈子先生 認定 NPO 法人・シニア自然大学（平成 29 年 10 月 28 日）
- ・ 自然水中における鉄の化学種と生物利用性—鉄と有機物の導体からみる森・川・海のつながり— 水環境学会誌 Vol.39No6pp197-210（2016）夏池真史他
- ・ 腐食性土壌において形成されるフルボ酸鉄について 寒地土木研究所月報 No715 2012 年 12 月（資源保全チーム）
- ・ 微生物が産生する金属キレート化合物の医学的利用 田畠健治 第一薬科大学研究年報 32 号 2016-03-31
- ・ 北海道大学低温科学研究所 Research Frontiers case 1 准教授 白岩孝行
- ・ アユ百万匹がかえってきた（いま多摩川でおきている奇跡） 田辺陽一 著 小学館 2006