

化学的観点からみたサケ・マスの生育環境 —沿岸の一次生産力を高める森林の重要性—

松 永 勝 彦*

A chemical view of growing surroundings of salmon : The importance of forests to primary productivity in coastal water

Katsuhiko Matsunaga*

はじめに

現在、北海道では10億尾あまりのサケ稚魚が放流されている。降海時の沿岸域で稚魚の餌は十分存在するのだろうか。私共の調査によると、一般に北海道日本海側の一次生産力は函館湾や、函館から恵山方面にかけての沿岸域に比べ、極めて低いことがわかっている(松永ら未発表)。また、日本海側の一次生産力は数10年前あるいはそれ以前に比べると著しく低下していると考えている。この要因は河川水量の減少や河川水の質的变化によるものと考えている。

私は、陸と海両方から海の一次生産力をいかにしたら高められるかを化学的観点から研究しており、サケ・マスについての知識はほとんどないことをあらかじめお断りしておく。ここではサケ・マスの生育環境を海と河川から考えることにする。

外洋の一次生産における鉄の役割と起源

アラスカ湾において、鉄不足により有光層で栄養塩が一次生産に利用されずに残存することが Martin et al. (1989) によって報告されている。我々の研究グループはアラスカ湾から180°, 49°N にかけて夏季に調査を行ったが、これらの海域では有光層で確かに栄養塩は残存していた。180°線上を39°N-49°N にかけてのケイ酸塩と硝酸塩の鉛直断面図を図1に示したが、栄養塩は南から北へ向かうに従い深層から表層に運ばれていることが明らかとなっている(Matsunaga et al. 1986)。植物プランクトンは鉄を摂取しないと硝酸塩を摂取できない。プランクton中には鉄が存在し、N / Fe のモル比は約 10^3 である。この比を用いて海水中のFe濃度を計算すると、計算上は40 nM程度の鉄が海水に存在することになる。しかし、実測値はそれの1 / 100程度しか

* 北海道大学水産学部水産化学科 (Department of Chemistry, Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan)

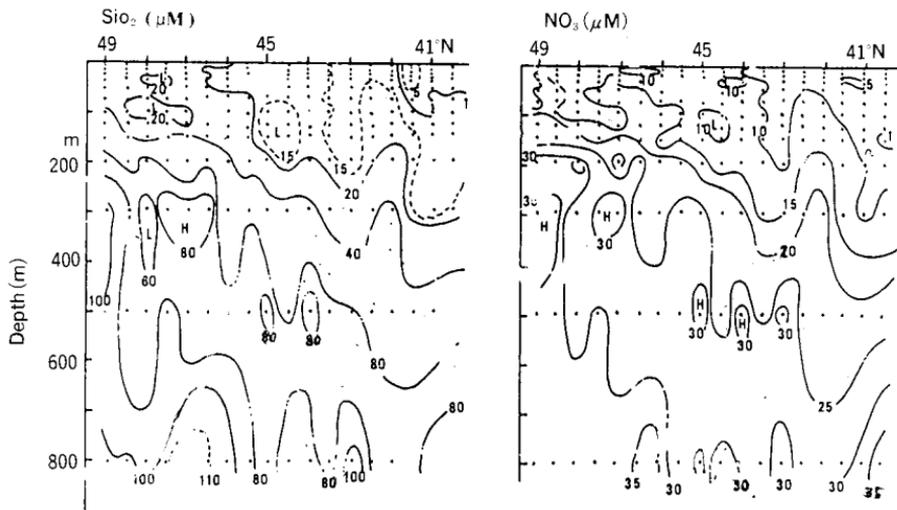


図1 北部北太平洋180°線上におけるケイ酸塩 (SiO_2), 硝酸塩 (NO_3) の鉛直断面図。

い。即ち、鉄の溶解度によって決まる溶存鉄が残っているに過ぎず、残りは鉄が粒子であるため海底に沈降したことを意味する。従って北部太平洋の表層には深層から栄養塩は運ばれるが、鉄は運ばれないのである。有光層の溶存鉄はほぼ0であるため、プランクトンは増殖できないことになるが、厳密にいうと、溶存鉄の有光層下からの拡散、移流により、ほぼほととプランクトンは生きている。なお、180°, 49°Nにおける有光層の栄養塩は少なくとも10年前から夏季でも残存している。

河川起源の鉄は粒子であることから沿岸域で沈降してしまうため、外洋までは運ばれない。外洋の鉄の起源はアジア大陸から海水に沈降したエアロゾルから鉄が溶出したものであり、この起源は黄土とされている。黄土は肥沃で農業に適しているといわれているように、鉍物と枯葉等の有機物に微生物が作用した土壌である。岩石が風化

しただけのエアロゾルでは、海水中への鉄の溶出はほとんどない。即ち、外洋の一次生産は陸の土壌で支えられていると考えられるのである。

一次生産に有用な鉄の存在形態

物理的河川環境については真山(1993)によって詳細に述べられているので、ここでは森林の役割、沿岸域の環境に焦点ををぼることにする。

光合成生物に最も有用と考えられる河川水中の鉄の形態は腐植土で形成されるフルボ酸-鉄である。ふつうに存在する粒状鉄に比べフルボ酸-鉄が有効に作用することを実証するには、鉄の基礎化学が必要であるし、光合成生物がどのような形態の鉄を摂取するかなどについては既にいくつか報告した(Kuma et al. 1992a, b; Kuma et al. 1993; Kuma et al. 1994; Matsunaga et al. 1994; Suzuki et al. 1994; Kuma and Mat-

sunaga 1995; Suzuki et al. 1995a).

フルボ酸-鉄を除くと、光合成生物が摂取する鉄の化学形態は $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ といわれている。これは1994年5月にバミューダーで開催された "Iron Speciation and its Biological Availability in Seawater: A Workshop" において合意されている。一般に光合成生物の培養に EDTA-Fe が用いられているが、EDTA-Fe が直接摂取されるわけではなく、これと平衡に溶存する $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ を利用している。河川水においても粒状あるいはコロイダル鉄が存在しているが (Suzuki et al. 1995b), 光合成生物はこれらの鉄を直接摂取することはできず、平衡で溶存する $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ を利用している。しかしながら、この溶解度は極めて低く、また溶解速度も著しく遅い。これについては先にあげた筆者の文献を参照されたい。

沿岸の一次生産を高める森林の役割

森林の腐植土中では微生物学的ならびに化学的に腐植物質が形成されるが、腐植物質の化学構造は、腐植土によって異なり、一つの化学構造で表すことができない。腐植物質は水に溶ける分子量1000程度のフルボ酸と水に不溶なフミン酸に大別でき、カルボキシル基、カルボニル基、アミノ基、水酸基等の官能基をもつ高分子の有機酸で多座配位子と考えられる。即ち、多種の金属と錯体を形成する機能を有している。鉄は粒子であるために不溶であるが、これらと結合することによってフルボ酸-鉄錯体として水に可溶になる。腐植土からは、これ以外に窒素、リン等の主要栄養塩と同時に多くの元素、化合物を河川、沢水を通し海に

供給している。ちなみに同じ暖流水域とみなせる日本海の熊石と小安 (函館から恵山にかけて) の春から夏にかけての生産力を比較すると、前者は数 $\text{mg C} / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$ に対し、後者は10倍以上も高い。このことは小安は森林の腐植層に起因する栄養素が河川、沢水を通し沿岸に流入していることを意味している。また、函館湾に流入する久根別川河口では50倍以上の高い生産力を有している。なお、河川中におけるフルボ酸-鉄の酸化数、挙動等については、既に報告した (Matsunaga et al. 1980; Matsunaga et al. 1982; Negishi and Matsunaga 1983; Matsunaga et al. 1984; Suzuki et al. 1992) ので参照されたい。

フルボ酸-鉄の重要性

次に河川、沢水の水質変化について考えてみる。フルボ酸の窒素がプランクトンの栄養源として役立っていると報告されているが (Carlsson and Graneli 1993), これによるとフルボ酸のアミノ基がバクテリアで分解をうけ、アンモニアとして摂取されるとしている。筆者は窒素 (硝酸塩) を添加せず、無菌でプランクトンを培養したが、窒素源なしでもプランクトンは増殖した。即ち、天然で造られたフルボ酸は直接プランクトンに摂取される可能性を示唆している。フルボ酸-鉄錯体を摂取すれば、鉄と窒素を同時に摂取することになり、プランクトンにとっては一石二鳥の効果がある。従って、光合成生物は最初にフルボ酸-鉄を摂取するものと推定される。しかし、河川水が1ヶ月もの長時間滞留することになると、フルボ酸-鉄を含めた栄養素が淡水プランクトンに

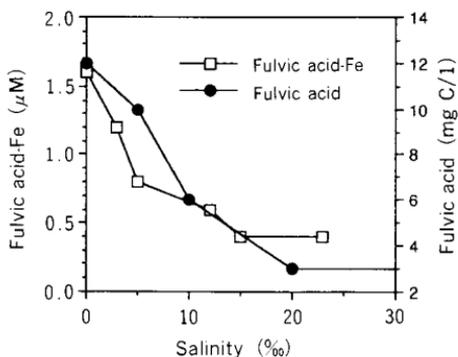


図2 塩によるフルボ酸，フルボ酸-鉄の凝集。

摂取されてしまい，海の光合成生物に不可欠な栄養素を運ばないことになる (Matsunaga et al. 1982)。即ち，蒸留水のような河川水，沢水がいくら海に流れ込んでも，光合成生物には何の役にもたたないのである。

フルボ酸-鉄は海に流入すると塩効果によって，凝集することを報告したが (Matsunaga et al. 1984)，凝集したフルボ酸-鉄が石灰藻の生長を妨げる働きをしていることがわかってきた。図2はフルボ酸，フルボ酸-鉄の塩分による凝集を示している。海への流入河川中のフルボ酸-鉄が $0.5 \mu\text{M}$ 以下では凝集をおこさないで，そのまま海水で溶存していることを意味している。これが凝集し，岩盤上に沈降するには，およそ $0.4 \mu\text{M}$ 以上のフルボ酸-鉄濃度が必要である。なお，この値は以前の報告値 (Matsunaga et al. 1984) より少し高いが，フルボ酸の相違に起因すると考えられる。

これらのことから，沿岸での一次生産力を推定するには，単に河川，沢水の流入水量だけでなく，水質の変化の研究が今後重要になるであろう。

おわりに

森林は水圏の生物の増殖，生育に重要な役割を果たしていると同時に地球温暖化を遅らせるためにも極めて大切な役割を果たしている。私達は植林と同時に河川水や沢水の水質についても自然のサイクルからはずれた変化を起こさせない，即ちできる限り自然を残す努力をしなければ，地球上に生物が住めなくなる日が速まるということ肝に銘じなければならない。

引用文献

- Carlsson, P., and E. Graneli. 1993. Availability of humic bound nitrogen for coastal phytoplankton. *Estuar. Coastal and Shelf Sci.*, 36: 433-447.
- Kuma, K., and K. Matsunaga. 1995. Availability of colloidal ferric oxides to coastal marine phytoplankton. *Marine Biology*. (in press).
- Kuma, K., S. Nakabayashi, and K. Matsunaga. 1994. Photoreduction of Fe (II) by hydroxycarboxylic acid in seawater. *Water Res.*, 27: 651-657.
- Kuma, K., S. Nakabayashi, Y. Suzuki, I. Kudo, and K. Matsunaga. 1992a. Photo-reduction of Fe(III) by dissolved organic substances and existence of Fe(II) in seawater during spring blooms. *Mar. Chem.*, 37: 15-27.
- Kuma, K., S. Nakabayashi, Y. Suzuki, and K. Matsunaga. 1992b. Dissolution rare and solubility of colloidal hydrous ferric oxide in seawater. *Mar. Chem.*, 38: 133-143.

- Kuma, K., Y. Suzuki, and K. Matsunaga. 1993. Solubility and dissolution rate of colloidal γ -FeOOH in seawater. *Water Res.*, 27: 651-657.
- Martin, J. H., R. M. Gordon, S. E. Fitzwater, and W. W. Broenkow. 1989. VERTEX: phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska. *Deep-Sea Res.*, 36: 649-680.
- Matsunaga, K., K. Igarashi, and S. Fukase. 1982. Behavior of organically-bound iron in Lake Ohnuma. *Japan J. Limnol.*, 43: 182-188.
- Matsunaga, K., K. Igarashi, S. Fukase, and H. Tsubota. 1984. Behavior of organically bound iron in seawater of estuaries. *Estuar. Coastal and Shelf Sci.*, 18: 615-622.
- Matsunaga, K., M. Negishi, S. Fukase, and K. Hasebe. 1980. Chemical species of copper in the River Shukunoh and the Lake Ohnuma waters in Japan. *Geochim Cosmochim. Acta*, 32: 199-202.
- Matsunaga, K., K. Toya, K. Masuda, G. Kobayashi, G. Anma, and T. Meguro. 1986. Transport of nutrients from deeper waters in the North Pacific Subarctic Sea. *Bull. fac. Fish., Hokkaido Univ.*, 34: 30-34.
- Matsunaga, K., Y. Suzuki, K. Kuma, and I. Kudo. 1994. Diffusion of Fe(II) from an iron propagation cage and its effect on tissue iron and pigments of macroalgae on the cage. *J. Applied Phycology*, 6: 397-403.
- 真山 紘. 1993. サクラマスのスモルト放流に関する生態学的検討—河川の自然環境とサクラマス資源—。魚と卵。(162): 9-18.
- Negishi, M., and K. Matsunaga. 1983. Organically-bound copper in lake and river waters in Japan. *Water Res.*, 17: 91-95.
- Suzuki, Y., K. Kuma, I. Kudo, K. Hasebe, and K. Matsunaga. 1992. Existence of stable Fe(II) complex in oxic river water and its determination. *Water Res.*, 26: 1421-1424.
- Suzuki, Y., K. Kuma, I. Kudo, and K. Matsunaga. 1995a. Iron requirement of brown macroalgae (*Laminaria japonica*, *Undaria pinnatifida*: Phaeophyta), and crustacean coralline alga (*Lithophyllum yessoense*: Rhodophyta), and their competition in the northern Japan Sea. *Phycologia*. (in press).
- Suzuki, Y., K. Kuma, and K. Matsunaga. 1994. Effect of iron on oogonium formation, growth rate and pigment synthesis of *Laminaria japonica*. *Fisheries Sci.*, 60: 373-378.
- Suzuki, Y., K. Kuma, and K. Matsunaga. 1995b. Bioavailable iron species in seawater by macroalgae (*Laminaria japonica* Areschoug: Phaeophyta) *Marine Biology*. (in press).