

学 位 論 文 題 名

Bacterial production and biomass in the subarctic coastal waters -the role of bacteria in the carbon cycle-

（亜寒帯沿岸域における従属栄養バクテリアの生産量と
生物量に関する研究－炭素循環におけるその役割）

学位論文内容の要旨

海洋における従属栄養バクテリアはこれまで分解者として位置づけられてきたが、近年従属栄養バクテリアは、単なる分解者ではなく、溶存有機物を利用することによる自らの生産量がそれを捕食する原生動物を介して高次栄養段階へとエネルギー輸送されることから生産者であるとの認識が深まり、この食物網は微生物食物網と呼ばれている。本研究は、亜寒帯沿岸域である噴火湾においてこの従属栄養バクテリアの現存量と生産量の時空間変化を測定することにより、亜寒帯生態系における従属栄養バクテリアの生産者としての役割とその変動をもたらす要因について明らかにし、さらには標泳区生態系の炭素循環におけるバクテリア生産量の役割を解明することを目的とした。調査は噴火湾の中央部Stn30 (42° 16.2' N, 140° 36.0' E, 水深92m) において、1998年3月から1999年12月までおこなわれた。

バクテリア現存量とバクテリア生産量に影響を与える要因

バクテリア現存量は 2.6 から $9.1 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$ であり一年を通して変動が小さく安定していた（1998年および1999年：CV = 30%；1999年のみ：CV = 20%）。このバクテリア現存量の変動は植物プランクトンの生物量の指標になるクロロフィル a (Chl a) 濃度の変動（1998年および1999年：CV = 180%；1999年のみ：CV = 130%）やバクテリアを捕食する従属栄養性微小鞭毛虫 (HNF) 量の変動（1999年：CV = 90%）と比べて小さかった。バクテリア生産量は放射性同位元素でラベルしたチミジンの取り込み速度から求められた。バクテリア生産量は、 $0.1 \sim 22.9 \mu\text{g C l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ の範囲を変動し、3月に最高値、12月に最低値を示した。全期間を通して

のバクテリア生産量の平均値 ($\pm$ SE) は $4.9 \pm 1.3 \mu\text{g C l}^{-1} \text{d}^{-1}$ であった。また全水柱でのその積算値は $0.04 \sim 0.79 \text{ g C m}^{-1} \text{d}^{-1}$ の範囲を変動した。バクテリアの生産量の変動(1999年: CV = 100%)はバクテリア現存量のそれと比べ大きかった。バクテリアの成長速度は $0.001 \sim 0.107 \text{ h}^{-1}$ の範囲を変動し、平均値 ($\pm$ SE) は $0.026 \pm 0.007 \text{ h}^{-1}$ であった。バクテリアの平均世代交代時間は1.6日であった。また全バクテリア生産に対する付着バクテリアの寄与率は16~93%, 平均値 ($\pm$ SE) は $54 \pm 12\%$ であった。

全調査期間を春季植物プランクトンブルームを挟んだ前期(1999年2月から5月)と比較的植物プランクトン現存量が低くかつ一定している後期(1999年6月から12月)の2つの期間に分けて、バクテリア現存量と生産量に影響を与える要因について考察した。一般にバクテリア生産は基礎生産者である植物プランクトンからの有機物質によって支えられているため、長期間の比較においては、バクテリア生産量とChl a濃度の間には良い正の相関関係があることが報告されている。本研究においても、両期間ともバクテリア生産量は、Chl a濃度と正の相関が認められた(前期: $R^2 = 0.24$, $n = 35$, $p < 0.025$; 後期: $R^2 = 0.07$, $n = 49$, $p < 0.05$)。また懸濁態有機炭素濃度(POC)との間にも正の相関関係が認められた(前期: $R^2 = 0.30$, $n = 35$, $p < 0.001$; 後期: $R^2 = 0.09$, $n = 42$, $p < 0.025$)。バクテリアの成長速度は、後期である夏季から秋季にかけて水温と有意な正の相関を示したが($R^2 = 0.26$, $n = 30$, $p < 0.01$)、前期における相関は有意ではなかった($R^2 = 0.01$, $n = 21$, $p < 0.25$)。一方で、バクテリア生産量とHNF現存量が有意な正の相関を示したことから(前期: $R^2 = 0.18$, $n = 20$, $p < 0.05$; 後期: $R^2 = 0.20$, $n = 28$, $p < 0.01$)、HNFがバクテリアを捕食していることが示唆された。また後期では前期に比べてHNF現存量が低かった。このことは、この時期最大量を示すマイクロおよびネット動物プランクトンによるHNFの捕食の影響を反映していたものと思われる。

以上のことからバクテリアの成長速度及び生産量は、水温と植物プランクトンからの溶存有機物質の供給に依存して変動するが、バクテリア現存量についてはバクテリアを捕食する従属栄養性微小鞭毛虫(HNF)による捕食圧により比較的一定したバクテリア現存量が維持されていたと結論づけられた。

溶存酸素の変化に及ぼすバクテリア呼吸の寄与

夏季の底層水中では、成層化により表層からの溶存酸素供給が弱まり底層付近

での有機物の分解に伴い溶存酸素濃度は低下した。しかし、秋季に入ると鉛直混合が始まり、津軽暖流水も流入することにより底層の溶存酸素濃度は増加した。夏季における現場の溶存酸素量の変化から算出した溶存酸素減少速度は、1998年3月から8月までの底層(80m以深)において $1.8 \pm 1.9 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($F = 39.1$, $df = 5$, $p < 0.005$)であり、1999年4月から7月までは $13.6 \pm 1.2 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($F = 139.6$, $df = 3$, $p < 0.01$)であった。一方、実験室内で試水を培養することにより見積もられたバクテリア呼吸量(BR)は、1999年4月から7月の10mにおいて $0.6 \sim 9.3 \text{ } \mu\text{M O}_2 \text{ d}^{-1}$ の範囲であり90mにおいては $0.8 \sim 5.0 \text{ } \mu\text{M O}_2 \text{ d}^{-1}$ の範囲で変動した。3月から8月までの80~90m層でのバクテリア呼吸量の積算値は、 $2500 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ period}^{-1}$ で、同時期の酸素減少速度の積算値 $1100 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ period}^{-1}$ よりも高い値を示した。このことは夏季の底層における溶存酸素減少は、バクテリアの呼吸によって説明されることが明らかとなった。また現場での低い溶存酸素消費量は、拡散と移流による酸素供給の影響を反映しているものと思われた。

バクテリアの炭素要求量

1999年の噴火湾における水柱積算年間バクテリア生産量は $140 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。この値は噴火湾で以前報告された基礎生産量の値よりも高い値を示していた。そのためバクテリア生産量と基礎生産量の比は1以上であり、噴火湾の炭素循環におけるバクテリアと微生物食物網の重要性が示唆された。このバクテリア生産量は呼吸による炭素の損失を含んでいないため、培養により求めた呼吸量とバクテリア生産量からバクテリア増殖効率(BGE)を算出した。水深10mおよび90mのBGEはそれぞれ $1.6 \sim 17.2\%$ 、 $1.4 \sim 23.6\%$ の範囲を変動した。BGEの平均値($\pm$ SE)は10mにおいて $8.4 \pm 2.0\%$ 、90mにおいて $8.1 \pm 3.3\%$ であった。しかしこのBGEの値は $0.7 \text{ } \mu\text{m}$ 以下の画分から得られた値で、遊離バクテリア(バクテリオプランクトン)のみを考慮しているが、バクテリア生産の平均54%が付着バクテリアによって得られた事を考慮に入れるとBGEは過少評価され、これより算出される従属栄養バクテリア炭素要求量(BCD)は、逆に過大評価となる可能性がある。そこで、これまで報告されている海域におけるBGEの平均値の30%を用いて見積もられた噴火湾におけるBCDは、 $470 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。このBCDは植物プランクトンの総基礎生産量(1999年： $340 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ；植物プランクトンの細胞外代謝を50%と仮定)の値を上回り、バクテリアが利用できる炭素の総量が植物プランク

トンによる基礎生産によるものだとする、本研究で得られたBCDを満たすには不十分である。この不足分は河川から供給される陸起源のDOMと微生物食物網内で循環しているDOMが担っていると推論された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	松永勝彦
副査	教授	角皆静男
副査	教授	久万健志
副査	助教授	築田満
副査	助教授	工藤勲

学位論文題名

Bacterial production and biomass in the subarctic coastal waters -the role of bacteria in the carbon cycle-

(亜寒帯沿岸域における従属栄養バクテリアの生産量と
生物量に関する研究－炭素循環におけるその役割)

本研究は、亜寒帯沿岸域である噴火湾において従属栄養バクテリアの現存量と生産量の時空間変化を測定することにより、亜寒帯生態系における従属栄養バクテリアの生産者としての役割とその変動をもたらす要因について明らかにし、さらには標泳区生態系の炭素循環におけるバクテリア生産量の役割を解明することを目的として行われた。調査は噴火湾において1998年3月から1999年12月までおこなわれた。

バクテリア現存量は、 2.6 から $9.1 \times 10^5 \text{ cells ml}^{-1}$ であり一年を通して変動が小さく安定していた。この変動は植物プランクトンの生物量の指標になるクロロフィルa (Chl a)濃度やバクテリアを捕食する従属栄養性微小鞭毛虫 (HNF) 量の変動と比べて小さかった。放射性同位元素でラベルされたチミジンの取り込み速度から求められたバクテリア生産量は、 $0.1 \sim 22.9 \mu\text{g C l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ の範囲を変動し、3月に最高値、12月に最低値を示した。バクテリアの生産量の変動はバクテリア現存量のそれと比べ大きかった。また全バクテリア生産に対する付着バクテリアの寄与率は16～93%であった。全調査期間を春季植物プランクトンブルームを挟んだ前期(2月から5月)と比較的植物プランクトン現存量が低くかつ一定している後期(6月から12月)の2つの期間に分けて、バクテリア現存量と生産量に影響を与える要因に

ついて考察した。バクテリア生産量は、両期間ともChl a濃度と正の相関が認められた。このことはバクテリア生産は基礎生産者である植物プランクトンからの有機物質によって支えられていることが示唆された。バクテリア生産量は、後期に水温と有意な正の相関を示したが、前期においての相関は有意ではなかった。一方で、バクテリア生産量とHNF現存量が有意な正の相関を示したことから、HNFがバクテリアを捕食していることが示唆された。

以上のことからバクテリアの成長速度及び生産量は、水温と植物プランクトンからの溶存有機物質の供給に依存して変動するが、バクテリア現存量についてはバクテリアを捕食する従属栄養性微小鞭毛虫 (HNF) による捕食圧により比較的一定したバクテリア現存量が維持されていたと結論づけられた。

夏季の底層水中では、成層化により表層からの溶存酸素供給が弱まり底層付近での有機物の分解に伴い溶存酸素濃度は低下した。実験室内で見積もられたバクテリア呼吸量 (BR) の積算値は、 $2500 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ period}^{-1}$ で、同時期の現場の酸素減少速度の積算値 $1100 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ period}^{-1}$ よりも高い値を示した。このことから夏季の底層における溶存酸素減少は、バクテリアの呼吸によって説明されることが明らかとなった。

噴火湾における水柱積算年間バクテリア生産量は $140 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。この値は同時に測定された基礎生産量 ($170 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) の値に匹敵した。このことから噴火湾の炭素循環におけるバクテリアと微生物食物網の重要性が示唆された。バクテリア呼吸量と生産量から算出されたバクテリア増殖効率(BGE)は、水深10mおよび90mでそれぞれ1.6~17.2%, 1.4~23.6%の範囲を変動した。BGEの平均値 ($\pm \text{SE}$) は10mにおいて $8.4 \pm 2.0\%$ 、90mにおいて $8.1 \pm 3.3\%$ であった。このBGEの値は浮遊バクテリア (バクテリオプランクトン) のみを考慮しているが、バクテリア生産の平均54%が付着バクテリアによって得られた事を考慮に入れるとBGEは過少評価され、これより算出される従属栄養バクテリア炭素要求量(BCD)は、逆に過大評価となる可能性がある。そこで、これまで報告されているBGEの平均値の30%を用いて見積もられた噴火湾におけるバクテリア炭素要求量(BCD)は、 $470 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。この値は植物プランクトンの総基礎生産量 ($340 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$; 植物プランクトンの細胞外代謝を50%と仮定) の値を上回り、バクテリアが利用できる炭素の総量が植物プランクトンによる基礎生産によるものだとすると、本研究で得られたBCDを満たすには不十分である。この不足分は河川から

供給される陸起源のDOMと微生物食物網内で循環しているDOMが担っていると推論された。

よって、審査員一同は申請者が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。