シオミズツボワムシ *Brachionus plicatilis* の摂餌活動と代謝

山崎 繁久, 平田 八郎

(1989 年 10 月 19 日受付)

Relationship between Food Consumption and Metabolism
of Rotifer *Brachionus plicatilis*

Shigehisa Yamasaki* and Hachiro Hirata*

Profile of food consumption and filtration rate of rotifer in relation to food *Nannochloropsis* sp. density was observed. In addition, the feeding activity was analysed on the bases of balance of energy supply by food consumption and energy consumption by metabolism, especially at lower food density.

Food consumption rate increased in proportion to food density at the density below 3×10^6 cells/ml. The rate was maintained at higher densities. Maximum filtration rate was observed at the food density of about $0.3 \times 10^6 \sim 0.5 \times 10^6$ cells/ml, with accelerated and gradual decreases at food density below and above this level, respectively. Rapid decrease of filtration rate at food density below 0.3×10^6 cells/ml is closely related to the equilibrium between energy supply and consumption.

シオミズツボワムシ (以下ワムシと略称) は、ろ過性の動物プランクトンであり、その摂餌率は餌料密度に大きく影響されることが知られている。^{1,2)} しかし、摂餌率やろ水率の詳細はまだ知られていない。また、摂餌は外部からのエネルギー供給であり、そのエネルギーはワムシの様々な活動に使用されている。様々な活動で消費されるエネルギーは代謝エネルギーでまかなわれるので、代謝エネルギーは体の生理的活動状態を示す。従って、摂取エネルギーと代謝エネルギーの均衡状態が変化すればワムシの活動状態も異なることが考えられる。そこで本実験では、ワムシの摂餌率およびろ水率と餌料密度の関係を明らかにするとともに、エネルギーの需給の面から餌料密度とワムシの摂餌活動の相互関係の検討を試みた。特に、摂取エネルギーと代謝エネルギーが切迫する低餌料密度でのエネルギーの需給とろ水活動の関係を詳しく検討した。また、ワムシの代謝エネルギーを求める際の酸素消費量の測定にあたっては、ワムシの飼育状態に近い状態で測定できる装置を工夫した。

材料および方法

材料のワムシは大型 (L 型) 株を用いた。

ワムシの摂餌率の測定 農耕用肥料を主体とした栄養塩を用いて屋外で培養したナンノクロロプシス (*Nannochloropsis* sp.: 通称海産クロレラ) を餌料として使用し

た。指数増殖の終わりに達したナンノクロロプシスは遠心分離によってペースト状とし、それを $0.45 \mu\text{m}$ 孔径のグラスファイバーフィルターでろ過した海水に懸濁させて $0.01 \times 10^6 \sim 15 \times 10^6$ cells/ml の範囲で 8 段階の餌料密度を作製した。ワムシは、あらかじめそれらの餌料密度で約 6 時間予備飼育した後、プランクトンネットで濃縮しておよそ 200 indiv./ml の密度になるよう別に用意したそれぞれの餌料密度の飼育水 (1 l) に移し入れた。その後、1 時間おきに 2 回餌料密度を計数し、その間の餌料密度の減少から摂餌率およびろ水率を算定した。摂餌率は 1 時間に減少した餌料密度をワムシの密度で除して、1 時間、1 個体あたりの細胞数として求めた。また、ろ水率は 1 時間に減少した餌料密度をその測定時間内の平均餌料密度並びにワムシ密度で除して、1 時間、1 個体あたりの水量として求めた。その平均餌料密度は、測定開始時および終了時における餌料密度の対数値の平均値として算出した。測定期間中は 20 分おきにガラス棒でゆるやかに飼育水を攪拌して餌料の懸濁とワムシの拡散をはかった。餌料密度の計数は血球計算盤を用いて行った。その際、1 試料あたり 6 回計数を繰り返した。餌料密度が 0.2×10^6 cells/ml 以下の場合には密度の計数に先立ち試料を遠心分離濃縮した。ワムシ密度の計数は、吸い口を広くした 1 ml のピペットで試料を動物プランクトン計数盤上に移し入れ、ホルマリンで固定した

* 鹿児島大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Shimoarata, Kagoshima 890, Japan).

Fig. 1. Schematic diagram of the equipment for continuous determination of rotifer oxygen consumption.

後解剖顕微鏡下で行った。計数は5回繰り返した。なお、照度および温度は200 lx および $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 、塩分濃度は20‰に設定した。

ワムシの酸素消費量の測定 ワムシの飼育は、180 l 容量の水槽で行い、ワムシの密度は収穫によって毎朝100 indiv./ml に調整した。餌料はナンクロロプシスおよび食用生酵母を乾重量比で9:1の割合で混合し、0.48 dry- $\mu\text{g}/\text{indiv.}/\text{day}$ の給餌率で投与した。給餌は、1日につき午前10時と午後6時の2回行った。ワムシの飼育は、1,000 lx, 15L:9Dの光条件、および $21 \pm 1^\circ\text{C}$ の温度に設定した恒温室内で、64日間継続した。塩分濃度は20‰とした。

酸素消費量は間欠流水式酸素消費測定装置³⁾を用いて測定した(Fig. 1)。測定装置は、およそ90度の角度で往復回転する振盪装置に設置された呼吸室、記録装置、呼吸室内の試水の採集保存装置から構成されている。振盪装置は、呼吸室内の試水を適度に攪拌することにより、酸素電極膜面における水の交換を促してその感度を維持するために用いた。測定の順序は、ワムシを含む飼育水を2分間の換水によって200 mlの呼吸室に取り込んだ後、止水状態で呼吸室内の溶存酸素量の減少を約56分間測定した。次に空試験として、プランクトンネットワムシを除いた飼育水を同様に呼吸室に取り入れた後、溶存酸素量の変化を測定した。これらの試水の取り入れの際、呼吸室内の試水の交換を促すためにポンプの流量を2分間で呼吸室の容量のおよそ5倍になるよう調整した。各試水の酸素減少の測定後には、2分間の定量ポンプの作動により、呼吸室内の試水の1部をフラクションコレクターのガラス瓶に採取した。試料の保存のためガラス瓶にはあらかじめホルマリンを分注しておいた。試料は随時ワムシ密度および餌料密度の計数に用いた。これら一連の測定はタイマースイッチに定量ポンプ、電磁弁、フラクションコレクターを連動させて自動的に繰り返した。測定は1回の観察につき24時間継続し、観察

は飼育期間中6日おきに行った。

ワムシの酸素消費量は、次式に従って算定した。

$$(a - (b + c)/2)/d$$

- a: ワムシを含む飼育水の酸素消費量
- b: aの前の空試験の酸素消費量
- c: aの次の空試験の酸素消費量
- d: aの試水のワムシ密度

なお、本報中の計算には以下の基準値を適用した。ナンクロロプシスの重量およびカロリー値はそれぞれ 3.9×10^{-12} dry-g/cell²⁾ およびボンブ熱量計(吉田製作所L300-X型)で測定した値の5,149 (± 102 , $n=5$) cal/dry gを適用した。また、酸素消費量から熱量への換算の係数は4.83 cal/ O_2 ml⁴⁾とした。

結 果

ワムシの摂餌率とろ水率 ワムシの摂餌率は、 $0.01 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$ cells/mlの範囲の餌料密度では、およそ 0.3×10^6 および 0.03×10^6 cells/mlの餌料密度付近で変化がみられたものの、全体としてはほぼ餌料密度に比例して変化し、Yをワムシ1個体1時間あたりの摂餌細胞数、Xを1 mlあたりの餌料細胞数とすると $Y = 6.29 \times 10^{-3} X + 89$ ($r = +1.0$)の回帰式が得られた(Fig. 2)。餌料密度がおよそ 3×10^6 cells/ml以上になると摂餌率は安定し、約 16×10^3 cells/indiv./hのほぼ一定した値を示す傾向がみられた。

摂餌率をもとに算定したろ水率はおよそ $0.3 \times 10^6 \sim 0.5 \times 10^6$ cells/mlの餌料密度で 7×10^{-3} ml/indiv./hの最大値を示し、餌料密度がそれより高くなっても、また低くなってもろ水率は減少する傾向を示した。 0.5×10^6 cells/ml以上の餌料密度では、餌料密度が高くなるにつれてろ水率はゆるやかに減少し、およそ 15×10^3 cells/mlにおけるろ水率は極大値の約15%の値となった。それに対し、 0.3×10^6 cells/ml以下の餌料密度におけるろ水率の減少は急激であった。その中でも、 0.2×10^6 およ

び 0.03×10^6 cells/ml の餌料密度付近では特に急激なる水率の変化が認められた。

ワムシの酸素消費量 Fig. 3 に 24 時間の観察におけるワムシの酸素消費量と餌料密度の移り変わりを示した。ワムシの酸素消費量および餌料密度とも給餌とともに増加し、その後時間の経過とともに減少した。その減少傾向は、酸素消費量の場合には時間の経過にはほぼ反比例したのに対し、餌料密度の場合は指数関数的に減

少した。その結果、ワムシの酸素消費量と餌料密度の対数値は正の相関関係を示した。

全体の測定では、ワムシの酸素消費量は $1.2 \times 10^{-6} \sim 6.3 \times 10^{-6}$ ml/indiv./h の範囲の値を示した (Fig. 4)。餌料密度に対する酸素消費量の傾向は、およそ 0.04×10^6 cells/ml の餌料密度を境に、餌料密度が高い場合と低い場合で異なった。前者の場合の酸素消費量は餌料密度の対数値に比例し、Y を酸素消費量、X を餌料密度の対数

Fig. 2. Food consumption rate (bottom) and filtration rate (top) of the rotifer at different food densities.

Fig. 3. Profiles of rotifer oxygen consumption determined with automated respirometer, and the food density in 24 hours' observation.

Fig. 4. Oxygen consumption of rotifer in relation to the food density.

Fig. 5. Relationship between feeding activity and energy balance of food ingestion and metabolism of the rotifer. Solid line with spot shows assimilated food energy, which was estimated with assimilation rate of 0.74 after Droop and Scott.²⁾

値とすると, それらの関係は $Y=2.11X-7.66$ の回帰式で表わされた。一方, 0.04×10^6 cells/ml 以下の餌料密度における酸素消費量は, 平均 2.07×10^{-6} ml/indiv./h のほぼ一定した値を示した。

考 察

Fig. 5 は餌料密度に対するワムシの摂餌率, ろ水率, および代謝量の関係を簡略に示したものである。摂餌率またはろ水率の傾向が変化する時点の餌料密度としておよそ 3×10^6 , 0.2×10^6 , および 0.03×10^6 cells/ml の3段階の餌料密度があげられる。すなわち, 3×10^6 cells/ml を境にそれ以下の餌料密度では摂餌率と餌料密度が比例関係を示すのに対し, それ以上の餌料密度ではワムシの摂餌率がおよそ 16×10^3 cells/indiv./h の一定した値で飽食状態を示した。また, 0.2×10^6 および 0.03×10^6 cells/ml では, その前後でろ水率の傾向の変化がみられた。これら, 0.2×10^6 および 0.03×10^6 cells/ml の餌料密度における摂餌エネルギーと代謝エネルギーを算定し両者を比較してみた。前者の場合には, 餌料密度と摂餌率の関係式から, 摂餌率は $1,347$ cells/indiv./h と算出され, そのカロリー値は 27.0×10^{-6} cal/indiv./h となる。一方, その餌料密度における酸素消費量は餌料密度と酸素消費量の関係式から 3.5×10^{-6} ml/indiv./h と算出され, そのカロリー値は 17.0×10^{-6} cal/indiv./h と算定される。シオミズツボワムシの炭素の同化率を求めた Droop and Scott⁵⁾ の報告では, その同化率として $0.64 \sim 0.74$ の値が示されている。このうち最も高い同化率である 0.74 をこの餌料密度における同化率の算定に用いた場合でも, 摂取エネルギー量は 20×10^{-6} cal/indiv./h となり, 代謝によるエネルギー消費量に近い値となる。これらのエネルギーの均衡を考慮すると, この餌料密度以下のろ水率の減少は, 摂取エネルギーが代謝エネルギーを下回る結果生じるものと推察される。

また, 0.03×10^6 cells/ml の餌料密度では, 摂餌率は 278 cells/indiv./h で, そのカロリー値は 5.6×10^{-6} cal/indiv./h と算定された。ワムシの酸素消費量は 2.07×10^{-6} ml/indiv./h で, カロリー値では 10×10^{-6} cal/indiv./h となった。同化率を考慮すると, この場合の摂取エネルギー量は代謝量の半分に満たない。一方, この餌料密度は, ワムシの酸素消費量が減少して 2.07×10^{-6} ml/indiv./h の値で安定化する時点の餌料密度に近い値でもある。このように摂取エネルギーが代謝エネルギーを大きく下回ると, ろ水等の摂餌活動にさらに大きな制約が加わり,

その結果ワムシの代謝量が最少要求エネルギーの基礎代謝に近づくものと推察される。Cornor *et al.*⁶⁾ の *Calanus helgolandicus* のろ水率においても本実験と同様に餌料密度が上昇するにつれて急激に上昇し, 最大値に達した後指数関数的に減少する傾向が得られている。

摂餌率およびろ水率についてはこれまで特に橈脚類を対象に数多く研究され, それらの結果が Marshall⁷⁾ および Omori and Ikeda⁸⁾ にまとめられている。前者では主としてろ水率について述べられ, $20 \sim 8,500$ ml/mg dry wt/day の値が示されている。また, 後者では摂餌率について, $1 \mu\text{g}$ の乾重量の個体の場合, はば最大値で1日に体重の約2倍の量の餌を摂取することが示されている。本報のL型のワムシの平均乾重量はおよそ $0.40 \mu\text{g}$ であり,²⁾ 今回測定したワムシの最大ろ水率である 8×10^{-3} ml/indiv./h の値を上述したろ水率の単位で表わすと 480 ml/mg dry wt/day となる。一方, ワムシの最大摂餌率の 16×10^3 cells/indiv./h の値を1日あたりの摂餌率に直すと 1.5 dry μg となる。この摂餌率は体重の約3.8倍である。従って, ワムシのろ水率は橈脚類の低い値に属するが, 摂餌率は同等なものと判断できる。このろ水率の相違の一因として, 橈脚類が海洋の表層等の栄養塩類の低い, すなわち餌料密度の低い水域に棲息するのに対し, ワムシは汽水域或いは沿岸域の栄養塩濃度が高い, すなわち餌料密度の高い水域に棲息するという習性の違いが挙げられよう。

文 献

- 1) K. Hirayama and S. Ogawa: *Nippon Suisan Gakkaishi*, **38**, 1207-1214 (1972).
- 2) 山崎繁久, 平田八郎: 水産増殖, **34**, 137-140 (1986).
- 3) H. Hirata and S. Yamasaki: *Hydrobiologia*, **147**, 283-288 (1987).
- 4) V. S. Ivlev: *Usp. Sovrem. Biol.*, **19**, 98-120 (1945).
- 5) M. R. Droop and J. M. Scott: *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **58**, 749-772 (1978).
- 6) E. D. S. Cornor, R. N. Head, and C. C. Kilvington: *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **52**, 847-861 (1972).
- 7) S. M. Marshall: *Aav. Mar. Biol.*, **11**, 57-120 (1973).
- 8) M. Omori and T. Ikeda: "Methods in Marine Zooplankton Ecology", Jhon Wiley & Sons, New York, 1984, pp. 152-157.