

蜉蝣目幼虫数種の鰓のビート数と溶存酸素量の関係

The relationship between the number of gill beats of some mayfly larvae (Ephemeroptera) and the oxygen concentration in the water

武 藤 敦 彦*

Atsuhiko Mutoh

水域の生物相から水質を判定しようとする生物学的な水質判定は、汚水生物学の応用分野として従来から検討されながら今日に至っている。

この判定の基礎となる汚水生物系列は、多くの調査をもとに経験的に作成されている。このため、多くの汚濁物質のうち、何がどのように生物体に作用する結果、生物相が変化するののかについては、ほとんど明らかではない。

著者は、水質汚濁の生物の生息に対する制限要因のうち、有機汚濁にともなう溶存酸素量の減少に着目し、数種の蜉蝣目 (Ephemeroptera) 幼虫を用いて、様々な溶存酸素量下で、これらの昆虫の行動的反応を観察した。この観察で、著者は主として鰓のビート数が溶存酸素量と密接な関係にあることを見出し、これを指標として種々の実験を行った。

実験材料及び方法

供試昆虫

この実験では、鰓の動きが観察しやすい以下に示す3種の蜉蝣目幼虫を用いた。

ミットゲマダラカゲロウ *Ephemerella trispina*
Uéno 体長9~10.5 mm のものを、1試験に6頭供試

クロタニガワカゲロウ *Ecdyonurus tobiironis*
Takahashi 体長7.5~7.7 mm のものを、1試験に3頭供試

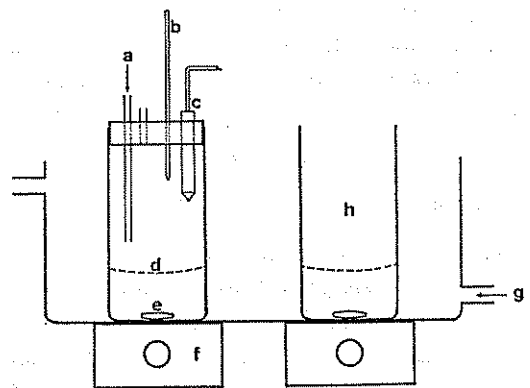
フタスジモンカゲロウ *Ephemera japonica* Mc-Lachlan 体長12.5~21.5 mm のものを、1試験に6頭供試

実験装置及び方法

* 日本環境衛生センター環境生物部
Department of Environmental Biology, Japan
Environmental Sanitation Center

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。供試昆虫を入れた容器は直径約5 cm、容量約200 ml である。

採集直後の供試昆虫を1~2個体ずつ昆虫受網 (d) 上に置き30分間放置し、まず、溶存酸素が飽和の状態での鰓のビート数を計数する。その後攪拌子 (e) で、供試昆虫が流されない程度に攪拌しながら a から窒素ガスを吹き込み、2~3分で溶存酸素量を1 mg/l 程度低下させる。そして、*E. tobiironis* 及び *E. japonica* の場合には、攪拌子を止め、30分後にビート数を計数する。なお、*E. japonica* は、とくに冬期に鰓の動きを30秒以上にわたって止めることがあるが、この場合の値は除外した。*E. trispina* の場合は、攪拌子を止める (流れを止める) と、たとえ溶存酸素が豊富であっても、鰓のビート数が非常に多くなるため、攪拌子を作動させたまま同様の作



- a : N₂ gas
- b : Thermometer
- c : DO sensor
- d : Insect receiving net
- e : } Magnetic stirrer
- f : }
- g : Cooling water
- h : Control

Fig. 1 Experimental apparatus

業を行った。なお、鯉のビート数は、虫が活動状態の時と静止状態の時では大きく異なるが、本実験では、原則として静止時のビート数を計数し、60秒以上同じ速度が継続した場合のみ、これを有効値とした。なお *E. japonica* については、一部、活動時のビート数の計数も行った。

別に対照区 (h) を設け、溶存酸素量以外を処理区と同様の条件にして、適宜、溶存酸素が飽和状態におけるビート数を計数し、異常がないことを確認した。なお攪拌時には供試虫が活動状態になるが、対照区では、どの種においても、攪拌後2分程度で平常のビート数にもどった。しかし、実験設定上すべての区の計数を30分後とした。

溶存酸素量と鯉のビート数に関する実験に付随して、*E. japonica* を用いて、水温と鯉のビート数に関する観察を冬期に行った。この実験では、一方の容器に溶存酸素4 mg/l の実験水、一方には溶存酸素飽和水を入れた。この実験の場合、水はほとんど攪拌せず、温水を注入することにより冷却水の温度を10分間にほぼ1°Cずつ上昇させ、各温度における鯉のビート数を計数した。

以上の実験は、*E. japonica* については夏期と冬期(水温差約10°C)、他の2種については夏期のみに行い、運搬などによって供試昆虫が損傷しないように、供試虫を採集した場所近くで行った。また、実験に用いた水は、供試昆虫が生息していた河川の水を用い、実験中の水温は水温に関する実験以外は、その河川水と3°C以上の差がでないようにした。

溶存酸素量は、東芝ベックマン製のDOメータを用い測定するほか、ウィンクラー法により適宜測定を行った。

結果

実験結果は、Fig. 2, 3, 4, 5 に示した。

E. japonica における結果 (Fig. 2)

夏期における実験 (Fig. 2 中○印で示した) では、静止時では、溶存酸素量が7 mg/l 付近からそれ以下に向かって (X軸左方向) ビート数が急激に上昇し、3 mg/l 付近でピークに達し、さらにそれ以下では、次第に下降した。しかし、夏期の活動時 (Fig. 2 中に×印で示した)、すなわち、この種が掘潜型の生活型をもつために見られる穴掘り行動時には、ビート数は静止時に比べ、溶存酸素が多い場合でもかなり高かった。

一方、冬期における実験 (Fig. 2 中に●印で示した) では、溶存酸素量4 mg/l 付近からそれ以下に向いビート数の急激な増加がみられ、2 mg/l 付近でピークに達

した。また、全般に夏期に比べビート数が少ない。しかし、ビート数が増加する溶存酸素量付近と、減少する付近とでビート数のばらつきが大きい点、及びビート数がピークに達する付近でばらつきが小さい点では夏期における実験と同様の傾向を示している。

次に、冬期に行った水温と鯉のビート数の関係についての結果を Fig. 3 に示す。

これによると、水温の上昇にともないビート数は増加し、とくに溶存酸素量が少ない (4 mg/l) 区では、温度が高まるにつれて増加の程度が溶存酸素飽和区に比べ著しく、20°C 以上では値のばらつきも大きくなった。

上記の一連の実験中、鯉のビート数以外の他の行動の

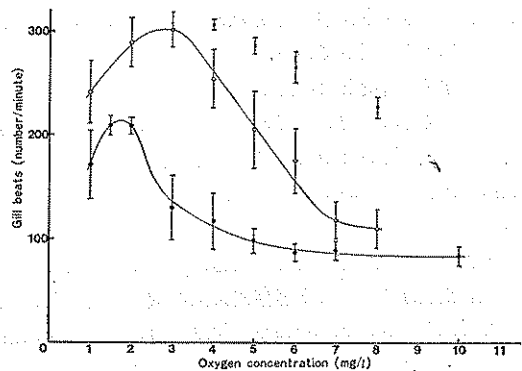


Fig. 2 Relationship between gill beats and oxygen concentration of *Ephemera japonica*. × : Insect in moving (20~23°C), ○ : Insect in resting (20~23°C), ● : in resting (10~12°C), I : Standard deviation.

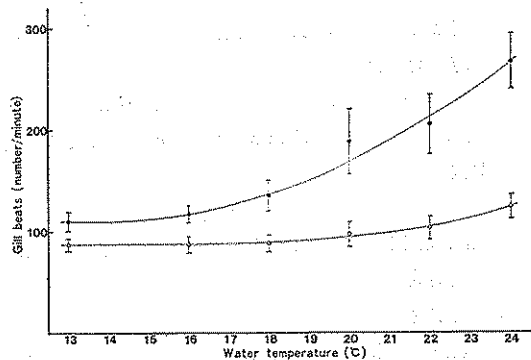


Fig. 3 Relationship between gill beats and water temperature of *Ephemera japonica* in different oxygen concentration. ● : 4 mg/l in oxygen concentration, ○ : Satiation in oxygen concentration, I : Standard deviation.

変化についてもあわせて観察した。その結果、鯉のビート数が急激に増加する溶存酸素量（夏期：6 mg/l、冬期：3 mg/l）以下では鯉の振幅が非常に大きくなった。また、穴掘り行動は、夏期、冬期ともビート数がピークに達する溶存酸素量付近以下から観察されなくなる。さらに、溶存酸素量が2～3 mg/l以下でビート数が減少するような領域においては、脚の把握力が衰え、攪拌子による水流によって流される個体が多くみられた。

なお、いずれの実験においても、個体の大きさによる結果の差異は認められなかった。

E. trispina における結果 (Fig. 4)

この種も *E. japonica* 同様、溶存酸素量が7 mg/l 付近からそれ以下に向って急激なビート数の増加がみられ、値のばらつきも大きくなる傾向がある。しかし、ビート数のピークが溶存酸素量4 mg/l に現われる点、あるいはピーク時においても値のばらつきが大きい点では前者と異なる。

この種については、流速が異なる条件下でビート数を観察した。Fig. 4 中の○印は流速を通常（●印：30 cm/sec 程度）の2倍程度にし、また、△印は攪拌子（流れ）を止めてビート数を計数したものである。その結果、流れが速い場合のビート数は、通常におけるそれよりもかなり低い。また、流れがない場合溶存酸素量が豊富な条件下では、ビート数は通常時の3倍近くまで増加するが、溶存酸素量が少ない条件下では逆に著しく低下する。

この種においても、実験中の行動変化を観察した。その結果 *E. japonica* 同様、ビート数の低下がみられる溶存酸素量下では、脚の把握力が衰え、水流に流される個体のみられた。この種は後脚で鯉をこする行動が特徴的であるが、この行動は、ビート数の急激な上昇がみら

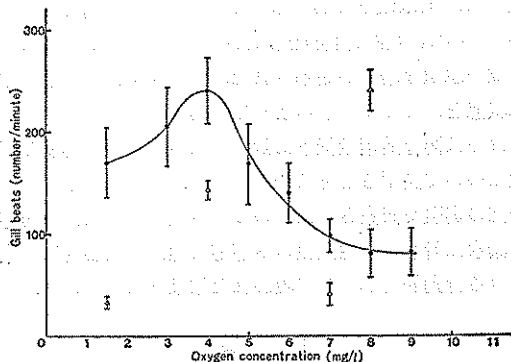


Fig. 4 Relationship between gill beats and oxygen concentration of *Ephemerella trispina* (17°C). △: Current speed 0, ○: Double of ●, I: Standard deviation.

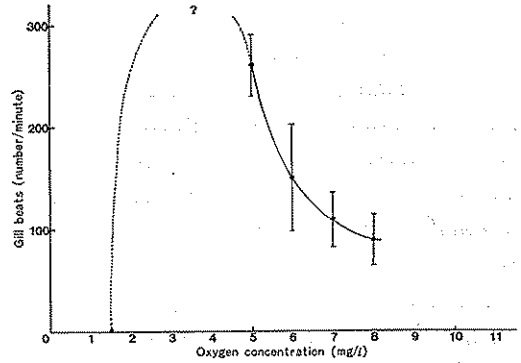


Fig. 5 Relationship between gill beats and oxygen concentration of *Ecdyonurus tobiironis* (23°C). I: Standard deviation.

れる6 mg/l以下の溶存酸素量下で頻りに観察された。また、6.5 mg/l 付近まで摂食行動が観察された。

E. tobiironis における結果 (Fig. 5)

この種では、溶存酸素量7 mg/l 付近からそれ以下に向って鯉のビート数が急激に上昇し、値のばらつきも大きくなる。これらの点は前2種と同様である。この種は鯉の動きが非常に速く、また、不規則であるため、溶存酸素量が5 mg/l以下ではビート数を計数することは困難であった。しかし、4.5 mg/l以下では鯉を非常に規則的に休みなく動かすので、ビート数は4.5 mg/lでピークに達すると思われた。また、溶存酸素量1.5 mg/lではいずれの個体も10～15分でビート数がゼロ、すなわち仮死状態となった。

考 察

水生昆虫をとりまく環境要素の一つである溶存酸素についてとり上げ、溶存酸素量の低下とそれに伴う蜻蛉目3種の行動的反応の変化について観察を行った。その結果、鯉のビート数が溶存酸素量と密接な関係にあることが明らかとなった。

Eriksen (1963) は、著者が供試した *E. japonica* と同じ生活型をもつ *E. simulans* Walker と *Hexagenia limbata* Serville を用いて実験を行い、鯉のビート数の上昇が観察される間は、供試虫の酸素消費量に変化がみられないことを報告している。また、Nagel (1973) は、蜻蛉目及び襃翅目の数種について溶存酸素量と酸素消費量との関係について実験を行い、ある程度までの溶存酸素量の低下では酸素消費量に変化がないことを報告している。したがって、著者が行った実験において観察された鯉のビート数の増加は、溶存酸素量の低下を鯉を通過する水量を多くすることによって補おうとする行動的反

応の表われと考えてよいだろう。

Nagel (1973) は、水生昆虫数種について、活動量の増加により酸素消費量が増加することを報告している。今回の *E. japonica* に関する実験において、活動時には、ビート数が静止時に比べ、かなり増加することを観察した。以上のことから、鰓のビート数と溶存酸素量及び酸素消費量は密接な関係にあることは明らかであろう。

E. japonica に関する実験では、夏期(水温20~23°C)と冬期(水温10~12°C)では、ビート数の急激な増加がみられるようになる溶存酸素量の臨界はかなり異なり、夏期は7mg/l以下、冬期は4~5mg/l以下であった。また、ビート数は、ピーク時をはじめとして、全般に冬期に比べかなり低い。

これは冬期(低水温時)に活動性が低下することを示唆する結果であろう。水温に関する実験では、水温の上昇に伴いビート数の増加が観察された。多くの生物について、温度の上昇が呼吸量増加をまねくことが知られている。(Odum: 1975, 渡辺: 1970他)。今回の実験でも、これらを裏付ける結果が得られている。また、溶存酸素量4mg/l区では飽和溶存酸素区よりも、水温の上昇に伴うビート数の増加が顕著であった。これらの結果は、水温が上昇するほど溶存酸素量低下による影響が大きく現われることを示唆しているのかもしれない。

Jaagら(1964)は、流速が数種の水生昆虫の酸素消費量と生存に必要な最低酸素量に対して大きく影響することを報告している。すなわち、流速が小さくなるにしたがい、酸素消費量は低下し高い溶存酸素量下でも死亡するようになり、また、この現象は急流に生息する種ほど著しいという。今回の *E. trispina* に関する実験で、流速が変わると鰓のビート数に大きな変化が認められた。すなわち、鰓のビート数のピークが観察される溶存酸素量までは、流れが速いほどビート数は少なくなる。また、停滞水では、溶存酸素が豊富な条件下においても、流水条件下よりもビート数は多い。しかし、同じ停滞水でも、流水条件下においてビート数の減少がみられるような溶存酸素量下では、そのビート数は著しく低下する。これは、流れが酸素供給に関与し、ビート数の変化として現われることを意味する。Eriksen (1963) は、水生昆虫は呼吸を鰓のみではなく体表からも行うことを報告している。鰓のビートは、体表に新鮮な水を送る行動でもあるわけである。すなわち、流れが速ければ、ビート数は少なくとも呼吸が円滑に行われることを示している。*E. tobiironis* に関する実験は全く流れがない状態で行った。しかし、この種の microhabitat は緩やか

な流れのある部分である。したがって、この種についても *E. trispina* と同様、流水状態で実験を行えば、異なる結果が得られたであろう。*E. japonica* は砂泥中に潜伏しており、したがって通常は、この種の体表面の流速はほぼ0と考えてよく、この点では実験設定上の問題はないと思われた。しかし、砂泥中に潜伏させず開放した状態で実験を行った点では、本来のこの種がもつ micro habitat の条件と異なった。Eriksen (1973) は、*E. japonica* と同様の habitat をもつ種の酸素消費量が潜伏状態と開放状態では異なることを報告している。したがって、*E. japonica* についても潜伏状態のちがいに由来する鰓のビート数に変化が生ずることが十分考えられる。

Nagel (1973) 及び渡辺 (1969, 1970) は、水生昆虫数種について、体長(令期)のちがいに由来する単位体重あたりの酸素消費量が異なることを報告している。鰓のビート数は、供試したいずれの種においても、ビート数の急激な増加が観察される溶存酸素量下でばらつきが大きくなった。しかし、今回の実験では供試数が少ないこともあり、体長のちがいによる明らかな傾向は認められなかった。

以上のように、鰓のビートは、呼吸と密接な関係があり、さらにビート数は溶存酸素量と密接な関係があるが、これらは流速及び水温にかなり左右されることが明らかとなった。

今回実験に用いた3種の蜻蛉目昆虫は、河川における分布調査において、いずれも汚濁が進んだ水域には生息せず、溶存酸素飽和、あるいはそれに近い水域に生息する。また、水温が25°C以上になるような水域にもほとんど生息しないようである。水温25°Cにおける飽和溶存酸素量は一気圧で約8mg/lである。著者が行った実験では、低水温下における *E. japonica* は例外であるが、いずれの種も溶存酸素量が7mg/l以下で鰓のビート数の急激な増加が観察された。この結果は、自然の生息状態と、よく符合するよう思われた。しかし、これだけでは溶存酸素量低下に対する水生昆虫の対応及び耐性について論ずることはむずかしい。いずれにしても、今回の実験で観察された鰓のビート数の増加は、低溶存酸素水に対する水生昆虫の不応答状態が、肉眼的に観察できる行動的反応として現われた結果と考えている。

摘 要

水質汚濁が水生昆虫に及ぼす影響を行動的反応からとらえることを目的として、水質汚濁にともなう溶存酸素の減少に着目し、異なる溶存酸素を含んだ水に *Ephemera japonica*, *Ephemerella trispina*, *Ecdyonurus*

tobiironis の蜉蝣目 3 種を入れ、鰓のビート数の変化を中心に観察を行った。

その結果、今回用いた清流域に生息する蜉蝣目の鰓のビート数は、溶存酸素量の低下にともなって増加し、これが呼吸と密接に関連するように思われた。さらに、このような反応は、低溶存酸素水に対する不適応状態が行動的反応として現われた結果と考えられた。

本研究を進めるにあたり、種々御助言いただいた東京農業大学昆虫学研究室立川周二講師、ならびに御校園いただいた当部長次田中生男博士に厚く感謝の意を表す。

文 献

- 1) Eriksen, C. H.: The relation of oxygen consumption to substrate particle size in two burrowing mayflies. *J. Exp. Biol.*, 40: 447~453, 1963.
- 2) Eriksen, C. H.: Respiratory regulation in *Ephemera simulans* Walker and *Hexagenia limbata* Serville (Ephemeroptera). *J. Exp. Biol.*, 40: 455~467, 1963.
- 3) Jaag, O. and H. Ambühl: The effect of the current on the composition of biocoenosis in flowing water stream. *Advances in Water Pollution Research*, 1(1): 31~49, Pergamon Press, London, 1964.
- 4) 森下郁子: 生物からみた日本の河川, 193pp. 山海堂, 東京, 1978.
- 5) Nagel, B.: The oxygen consumption of mayfly (Ephemeroptera) and stonefly (Ple-

coptera) larvae at different oxygen concentration. *Hydrobiologia*, 42 (2): 461~489, 1973.

- 6) 日本生態学会環境問題専門委員会: 環境と生物指標, 2, 水界編, 153~154, 共立出版, 東京, 1975.
- 7) Odum, E. P.: 生態学の基礎, 下 (三島次郎訳): 615~616, 培風館, 東京, 1975.
- 8) 津田松苗: 汚水生物学, 258 pp. 北隆館, 東京, 1964.
- 9) 津田松苗: 水質汚濁の生態学, 240 pp. 公害対策技術同友会, 東京, 1972.
- 10) 津田松苗: 生物による水質調査法, 238 pp. 山海堂, 東京, 1974.

Summary

In order to establish the effect of water pollution on aquatic insects from the standpoint of their behavioral response, three mayfly larvae, *Ephemera japonica*, *Ephemerella trispina*, *Ecdyonurus tobiironis* were observed concerning their gill beats in water containing various oxygen concentrations.

Numbers of gill beats of the mayflies which were known to breed in an unpolluted clean water system increased as the oxygen concentration decreased. This phenomenon was assumed to relate closely with their respirations. Moreover, such a response might show their behavioral responses which indicated their inability to adapt to unfavorable conditions such as low oxygen levels.