

# 宍道湖におけるヤマトシジミの摂餌，排出と消化に関する研究

大谷修司（島根大学教育学部）

## 背景・目的

ヤマトシジミは汽水域において優占し，宍道湖では最も重要な漁業資源となっている。しかし，ヤマトシジミの宍道湖での資源量は平成 22 年から 24 年にかけて連続して減少傾向にあり，その原因解明を様々な角度から行う必要があった。シジミの資源量が減少した原因として，餌となる植物プランクトン，塩分，水温，貧酸素，硫化水素等の要因が挙げられ，このような環境要因についての研究では様々な研究機関や大学等で調査が行われている。また，ヤマトシジミの摂餌・消化・排出過程の研究についても調査は行われてきているが（大谷ほか 2004，秦ほか 2007），まだ明らかになっていない点が残されている。そこで，宍道湖産ヤマトシジミの排出物と解剖観察から微細藻類を中心としたヤマトシジミの摂餌，排出と消化過程について研究を行った。

## 研究成果

### 1. 宍道湖の代表的な植物プランクトンの増殖実験

平成 25 年度はヤマトシジミの摂餌実験に用いるために，大谷が継代培養していた宍道湖産の藍藻 *Cyanobium* sp., *Microcystis ichthyoblabe*, *Coelosphaerium* sp., 珪藻 *Thalassiosira pseudonana*, *Cyclotella atomus*, 緑藻 *Pseudodictyosphaerium minusculum*, *Monoraphidium circinale* について，20℃，12 時間：12 時間明暗周期，照度 1700～2000lux の条件で培養を行った。培地には 3‰に調整した IMK 培地（和光純薬工業）を用い，本培地 200ml を含む 300ml の三角フラスコで静置培養を行った。なお，*Coelosphaerium* sp.のみ CA 培地 80ml を含む 100ml の三角フラスコを用い，*T. pseudonana* についてはエアレーションを行った。培養期間は平成 25 年 7 月 1 日～7 月 25 日とした。細胞数の計測は，トーマの血球計算盤にて，3 回計測し，その平均値を求めた。

表1. 宍道湖産植物プランクトンの細胞密度（色素分析、同位体比分析用）

種名	培養株名	細胞密度
<i>Cyanobium</i> sp.	ESS-1-2	44.08 x10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Coelosphaerium</i> sp.	G2	9.10 x10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Coelosphaerium</i> sp.	G2	6.76 x10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Microcystis ichthyoblabe</i>	GS-1	13.94 x10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	SC-1	1.53 x 10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Cyclotella atomus</i>	SC-6	0.27 x 10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Pseudodictyosphaerium minusculum</i>	NS-17	10.51 x10 <sup>6</sup> cells/ml
<i>Monoraphidium circinale</i>	SO4-2	4.22 x10 <sup>6</sup> cells/ml

その結果，表 1 に示すようにどの株も 1ml あたり 100 万細胞を超える増殖を確認した。細胞の

径が約 1  $\mu\text{m}$  の藍藻 *Cyanobium* sp. は 1 ml あたり 4400 万細胞まで増殖した。ただし、珪藻の *C. atomus* は 1 ml あたり 27 万細胞と他の種類に比べて細胞密度が低く、見た目も色が薄かった。珪藻の *T. pseudonana* はエアレーションをすると静置培養にくらべてかなり増殖が良くなるが、*C. atomus* は培養液の色が赤褐色になり増殖もよくならなかった。

ヤマトシジミの餌に供するために藍藻の *Cyanobium* sp. について 3% に調整した IMK 培地を 4L 含むプラスチックボトルを用いて、毎日一回の攪拌を行い上記と同じ条件で培養したところ  $1.08 \times 10^7$  cells/ml まで増殖させることができた。インキュベーターの上段と下段に同じように培養を行ったが、下段のほうが増殖がよく、上段は増殖が抑えられていた。本種はインキュベーターから出して、窓のブラインドからもれる弱光の条件でも、増殖をつづけて色が濃くなることから、強光で増殖が抑えられる可能性がある。

## 2. カーミン顆粒懸濁液を用いたヤマトシジミの解剖方法の検討

ヤマトシジミの軟体部はそれぞれの器官が複雑に絡み合っており、また、消化管は細く透明であることから、そのままの状態での解剖は難しい。そこでカーミン顆粒懸濁液を用いて消化器官のみを染色を行い、明瞭に消化器官が観察できる方法の検討を行った。宍道湖西岸より採集したヤマトシジミを実験に用いた。3% に調整した人工海水溶液 1L にカーミン（和光純薬工業；カルミン）0.1 g を入れよく攪拌し、カーミン顆粒懸濁液を作製した。カーミン顆粒懸濁液 150 ml を径 8 cm、深さ 4.0 cm の深底ガラスシャーレに注ぎ、水槽から素手で取り出したヤマトシジミを深底ガラスシャーレ内に 1 個体入れた。2016 年 7 月 8 日～2016 年 7 月 21 日の実験では実験室内で静置し、2016 年 10 月 13 日以降の実験は人工気象器内にて 20°C、暗所で静置した。

実験開始 1 時間半から 5 時間後では、棒状やひも状の腸管を通過したとみられる赤色の糞を排出した。また、シャーレ内の水が透き通っており、ほとんどのカーミン顆粒が取り込まれた結果、ほぼ透明になったと考えられる。カーミン顆粒を摂餌させた場合、口、胃、腸管まで開始 26 分以内に取り込まれ、開始 1 時間半から 2 時間半後には、中腸腺及び桿晶体囊にも取り込まれることがわかった。しかし、個体による時間差はあると考えられた。このように、カーミン顆粒懸濁液は軟体部を死滅させずに、不明瞭であった消化管を鮮明に染色でき、容易に解剖を行うことが出来た。この方法はヤマトシジミの解剖と腸管観察有効であった。

## 3. 野外から採集したヤマトシジミの摂餌・排出・消化過程

大谷ほか（2004）は、神西湖人工池のヤマトシジミの糞は、擬糞、未消化糞、消化糞の 3 種類に分類されることを報告している。擬糞は入水管より排出され、内容物は消化されず、未消化糞は、こん棒状で、消化管を通過するが、内容物は未消化のまま排出される。消化糞は、ひも状であることが多く、内容物は消化され褐色顆粒を含んでいる。また、糞を排出した時間からヤマトシジミに摂餌や消化排泄にリズムがある可能性を示唆している。そこで本実験は、宍道湖産ヤマトシジミの食性を消化管の解剖を行わず、排出物の観察及び時間の記録を行い、宍道湖産でも同様の結果が得られるかどうか調べた。

宍道湖西岸において、平成 26 年 5 月、7 月、8 月及び平成 28 年 9 月、10 月、11 月に殻長約 20 mm のヤマトシジミを採集し、実験室に持ち帰った。宍道湖水を 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターで濾過し、湖水から植物プランクトンを除去し、その水を用いて絶食状態でヤマトシジミに糞を

排出させた。平成 26 年はプラスチック容器(径 7.5 cm, 高さ 6.0 cm), 平成 28 年は径 8 cm, 高さ 4 cm の深底ガラスシャーレを用いた。容器内に濾過底層水 150 ml 加え, ヤマトシジミの排出物を, 暗所で時間経過を記録しながらパスツールピペットを用いて採集した。最初はその都度採集し, その後は約 3 時間おきに排出物を採集し, 排出物の形態, 植物プランクトンの有無, 細菌の有無, 消化の程度などについて顕微鏡観察を行い, 排出物の区分を試みた。排出物は採集後, 数時間以内に顕微鏡で観察したが, 1 - 2 日後に観察した場合もあった。排出物の保存方法は, スライドガラスの上に取りカバーガラスをかけずに, 水で湿らせたキムワイプを敷いたシャーレ内に置き, 冷蔵庫にて保存した。その場合の排出物の形態は, 採集直後の形態と変わらなかった。

神西湖人工池での結果(大谷ほか 2004), 宍道湖(秦ほか 2007)と同様に, 今回の宍道湖西岸から採集したヤマトシジミの排出物は入水管から排出される擬糞と, 出水管から排出される未消化糞, 消化糞の 3 種類に区分された。

### 1) 平成 26 年度

擬糞は実験開始の数分後から排出され, 砂粒を多く含み, 色は濃い茶色で壊れやすく形は様々であった。擬糞内には約 250  $\mu\text{m}$  の羽状珪藻など藻類は原型を留め, アメーバ状細胞や鞭毛虫が観察された。未消化糞は実験開始後の 6 時間後から翌日に見られ, 形は樽型が多く, 稀にひも状も観察された。未消化糞には細菌は観察されず, 羽状珪藻や藍藻 *Coelosphaerium* sp. が多く観察できた。消化糞は開始翌日夕方から徐々に見られ, 形はひも状であった。輪郭に粘膜があり鞭毛を持つ原生動物が多く見られた。消化糞は大部分が褐色顆粒からなり, 生きた細菌も観察された。また, 生きた状態の珪藻 *Cyclotella* がしばしば観察されたが量は多くはなかった。

これら 3 種類の排出物の特徴は, 大谷ほか(2004)と同様であった。しかし, 神西湖人工池に比べると, 宍道湖では, 消化糞に植物プランクトンが混ざりやすい傾向が伺えた。また, これら 3 種類の排出物の経時的な排出順も擬糞, 未消化糞, 消化糞の順で大谷ほか(2004)と同様であった。

### 2) 平成 28 年度

全体の傾向として, 実験開始から擬糞, 未消化糞, 次いで消化糞の順に排出した。擬糞, 未消化糞は時間がたつにつれ排出しなくなり, その後は消化糞のみを排出した。消化糞の排出された時間は, 個体差はあるものの, 開始 4 - 9 時間後に排出されることが多かった。また, 消化糞は夜間に排出することがほとんどで, 少量の未消化の微細藻類を含むことが多かったが, 時間経過毎にその量は少なくなっていく。日中は何も排出しないことが多く, 9 月, 10 月と比較して特に 11 月の実施実験では何も排出しない時間が長かった。糞内に含まれる微細藻類は, 植物プランクトンが多く含まれるが, すべての実施日において底生性藻類の羽状珪藻が多く含まれていた。このようにヤマトシジミは植物プランクトンの他に底生性藻類を取り込んでおり, 排出物が排出される順番や排出時間は大谷ほか(2004)が神西湖人工池で行った実験とほぼ同様の結果となった。しかし, 消化糞には神西湖人工池と比較して, 植物プランクトンが多く含まれる傾向があった。

### 3) ヤマトシジミの排出物の分類

ヤマトシジミの排出物は, 神西湖人工池におけるヤマトシジミの排出物の特徴(大谷ほか 2004)

に今回の観察結果を加え、これまでと同様に擬糞、未消化糞、消化糞に区別した。

### 擬糞

形態は不定形で輪郭は不明瞭、大きさは数 mm. 無機物粒子（径が約 500  $\mu\text{m}$ ）やデトリタス、珪藻の遺骸などを含んでおり、消化作用を受けていない微細藻類を大量に含む。アメーバ状細胞が藻類コロニーに混在しており、アメーバ状細胞は時々植物プランクトンを取り込む場合がある。

### 未消化糞

形態はこん棒状からひも状、糞の縁には薄い膜が有り、太さは 400 - 600  $\mu\text{m}$ 、長さは 750 - 2400  $\mu\text{m}$ 。時々先端が細くなり、消化糞と類似した形態をもつ。未消化糞はカバーガラスをかけて軽く押しつぶすと均一に広がる傾向がある。未消化糞には角のあるデトリタスと消化作用を受けていない微細藻類が多く含まれ、未消化糞中の無機物粒子は径が約 50  $\mu\text{m}$  と擬糞に比較し小さい。

### 消化糞

形態はひも状で（稀にこん棒状）、先端が細くなることが多い。半透明または不透明で褐色から黒褐色、大きさは 100-300  $\mu\text{m}$ 、長さ 1.5 - 9 mm. 消化糞はカバーガラスをかけて軽く押しつぶすと細かい断片に分かれる傾向がある。消化糞内には、excretory spheres (Owen 1955) と類似した形態の褐色小球体（径 6-10  $\mu\text{m}$ ）が含まれ、また、それが分解したと考えられる褐色微粒子（径 0.5-3  $\mu\text{m}$ ）が消化糞の大部分をなす。この報告では褐色小球体と褐色微粒子をあわせて褐色顆粒と表した。角のあるデトリタスは少なく、未消化の微細藻類を含む場合がある。生きた細菌類が多く存在し、中には運動性のない細菌類も観察される。鞭毛を有す原生動物が時々見られる。また、消化糞中には角のある半透明の結晶状の構造物が観察される。

## 4. 植物プランクトン単一種摂餌実験

### 1) 平成 28 年度

宍道湖から分離した植物プランクトン単一種をヤマトシジミに与え、その挙動を解剖実験と直接観察により明らかにした。本実験では宍道湖西岸で採集したヤマトシジミを用いた。採集後、プラスチック容器内にて 1 週間無給食で飼育し、水は 1 日 1 回換水した。1 週間後、3‰に調整した人工海水溶液 150 ml を径 8 cm、深さ 4 cm の深底ガラスシャーレに注ぎ、植物プランクトン単一種培養液を 20 ml 注いだ。その後水槽から取り出したヤマトシジミを深底ガラスシャーレ内に 1 個体入れた。ヤマトシジミの植物プランクトン単一種以外の摂餌を防ぐため、深底ガラスシャーレに入れる前に殻の表面をキムワイプで軽く拭いた。実験は人工気象器内にて 20℃、暗所で静置した。解剖後、中腸腺、桿晶体囊及び桿晶体、腸管を切り取り、プレパラートを作製し顕微鏡で観察を行った。また、ヤマトシジミの排出物を、時間経過を記録しながらパスツールピペットを用いて採集した。排出物の形態、植物プランクトンの有無、細菌の有無、消化の程度などについて顕微鏡観察を行い、排出物の区分を試みた。本実験に用いた藻類は、藍藻 *Cyanobium* sp.(ESS-1-2-8 株, 図 1A)、珪藻 *Thalassiosira pseudonana* (SC-1 株, 図 1B)、緑藻 *Monoraphidium circinale* (SO4-2 株, 図 1C)、の 3 種類で、20℃、12 時間 : 12 時間明暗周期、約 1000-1500 lux の条件で 3‰に調整した IMK 培地を 100 ml~250 ml 含む三角フラスコで約 1 ヶ月静置培養を行った。

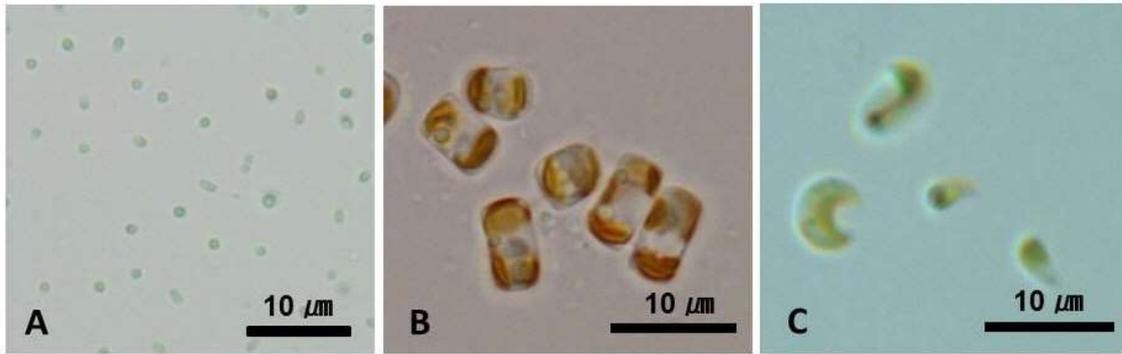


図1. A, 藍藻 *Cyanobium* sp. 細胞は球形から楕円体。細胞の径は約1 µm, 長さ1-2.5 µm。B, 珪藻 *Thalassiosira pseudonana*。細胞は茶筒型で、殻径は約3-5.5 µm, 殻長4.5-7 µm。外殻(細胞壁)の主成分は珪酸質。C, 緑藻 *Monoraphidium circinale*。栄養細胞は三日月型で、先端は細く、細胞全体がややねじれる。細胞の径は1.5-3 µm, 湾曲した細胞全体の長さ約5-6 µmで細胞壁はセルロースからなる。

A. 藍藻 *Cyanobium* sp., ESS1-2-8 株, 2016年11月実施。

開始約1時間後で中腸腺内に多数の細胞が形状を保ったまま入っていることが確認できた。開始後12時間では、暗緑色ひも状の糞を排出した(図2A)。本種の細胞が青緑色のまま消化されず多数含まれていたが、細菌や原生動物は観察されなかった(図2B)。これらのことから未消化糞と判断した。開始約24時間後では中腸腺内は茶褐色の消化細胞が増え、褐色のひも状の糞を排出した。消化糞の特徴である褐色顆粒と原生動物、未消化の本種の細胞を多数含むことから消化糞と未消化糞の混合した糞と判断した(図2C)。



図2. 藍藻 *Cyanobium* sp. を摂餌した場合の糞。2016年11月実施。A, B, 実験開始12時間後の未消化糞。全体はひも状で、暗緑色。拡大すると未消化の青緑色の細胞が多数観察された。C, D, 実験開始24時間後。未消化糞と消化糞の混在した糞。全体は褐色ひも状。内容物は褐色顆粒と未消化の細胞が混在していた。

B. 珪藻 *Thalassiosira pseudonana*, SC-1 株, 2016 年 11 月実施.

開始約 1 時間後では中腸腺内には珪藻の殻は見られず, 細胞内容物のみが取り込まれていた. 桿晶体に付着していた細胞は殻のみのものを多数確認することができた. 実験開始 7 時間後には褐色ひも状の糞を排出した. この糞には消化糞に特徴的な褐色顆粒が多かったが (図 3A), 未消化の細胞を多数含み, 緑色励起光では未消化の細胞の葉緑体のクロロフィル自家蛍光が残っていた (図 3B). これらのことから消化糞と未消化糞の混ざったものと判断した. 実験開始 24 時間後に褐色のひも状の糞を排出した. 内容物は褐色顆粒からなり, 原生動物が周囲に存在したことから消化糞と判断した.

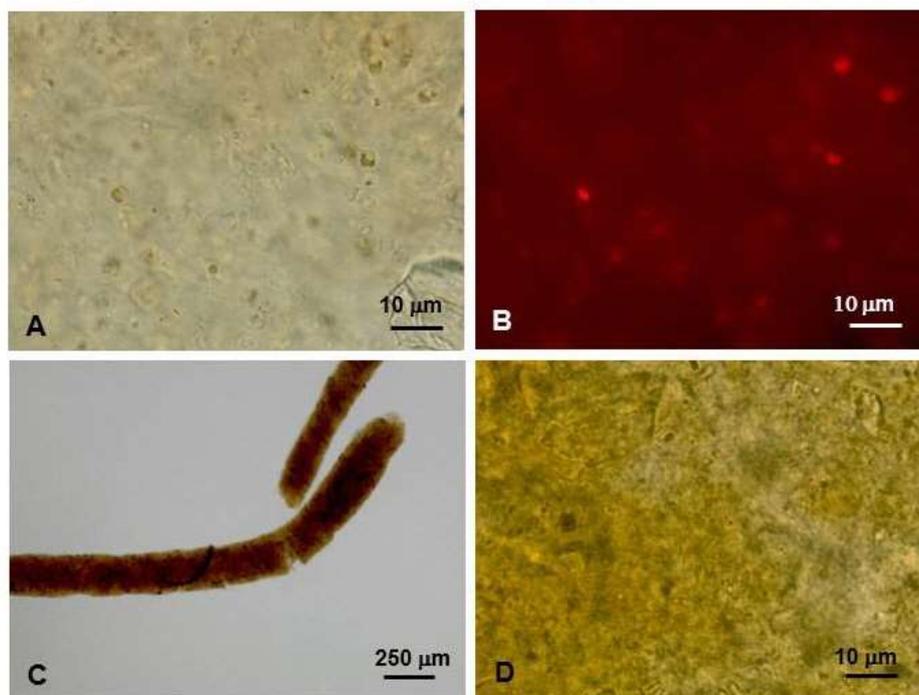


図3. 珪藻 *Thalassiosira pseudonana* を摂餌した場合の糞. 2016年11月実施. A, 実験開始7時間後の消化糞と未消化糞の混在した糞. 褐色顆粒が多く, 未消化の細胞を多数含んでいた. B, Aに緑色励起光を照射した像. 全体は蛍光が弱い, 未消化細胞の葉緑体クロロフィル自家蛍光が残っていた. C, D, 実験開始24時間後の消化糞. 内容物は褐色顆粒からなり, 原生動物が周囲に存在した.

C. 緑藻 *Monoraphidium circinale*, SO4-2 株, 2016 年 11 月実施.

開始約 30 分後で中腸腺内に多数の細胞が形状を保ったまま入っていることが確認できた. 中腸腺内では, 透明球形の細胞に本種の細胞が取り込まれており, また, 時間が経過するにつれて細胞が消化されたと考えられる褐色顆粒が増加することから, この透明細胞内で消化がおこなわれていることが推察された. 実験開始 7 時間後では濃緑色ひも状の糞を排出した. これは未消化の細胞を多数含んでいたが (図 4A), 原生動物が観察されたことから, 未消化糞にわずかに消化糞が混ざった糞と判断した. 緑色励起光を照射すると葉緑体のクロロフィル自家蛍光が強く残っていた (図 4B). 開始約 24 時間後では中腸腺内の消化細胞は茶褐色になり, 細胞の形状は見られなかった. 排出物は 24 時間後でも未消化糞だった. 実験開始 26 時間半後, 褐色顆粒と未消化の細胞を多数含んでいた (図 4C). 緑色励起光を照射すると葉緑体のクロロフィル自家蛍光が強く残っていた. これらのことから未消化糞と消化糞の混ざったものと判断した. (図 4D).

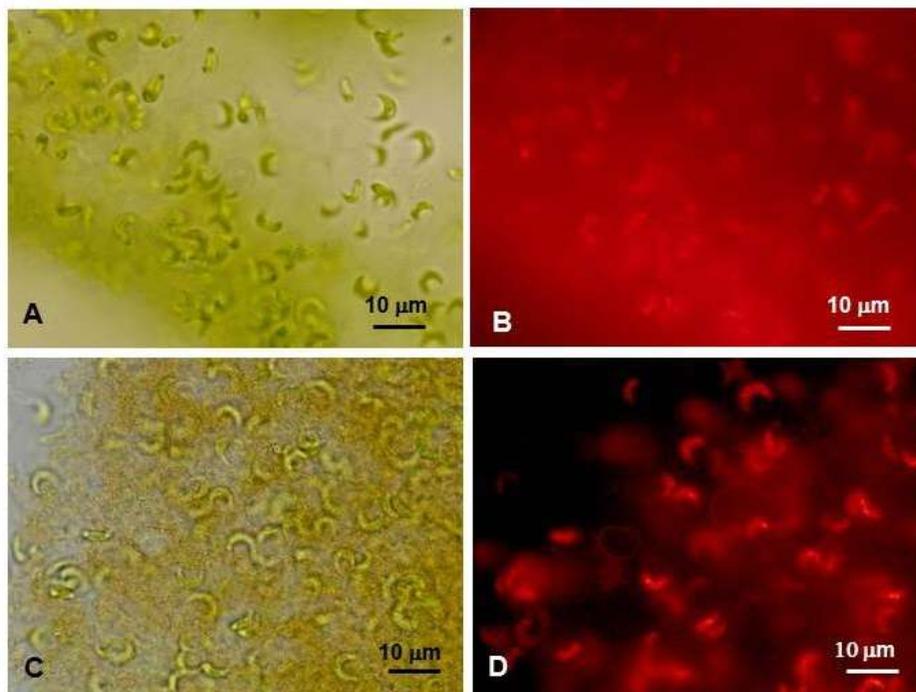


図4. 緑藻*Monoraphidium circinale*を摂餌した場合の糞。2016年11月実施。A, 実験開始7時間後。未消化糞にわずかに消化糞が混ざった糞。B, Aに緑色励起光を照射した像。葉緑体のクロロフィル自家蛍光が強く残っていた。C, 実験開始26時間半後の未消化糞と消化糞の混在した糞。褐色顆粒と未消化の細胞を多数含んでいた。D, Cに緑色励起光を照射した像。葉緑体のクロロフィル自家蛍光が強く残っていた。

以上の結果より、ヤマトシジミは藍藻，緑藻，珪藻ともに消化できると考えられた。緑藻が形状を保ったまま中腸腺内に取り込まれたことから，ヤマトシジミの消化細胞ではセルロース分解酵素を分泌することが示唆された。一方，珪藻は細胞内容物のみ取り込まれていたことから，桿晶体で珪藻細胞のすりつぶしが行われること，ヤマトシジミは中腸腺に取り込む際に有機物・無機物を選択して取り込むことが示唆された。

中腸腺への取り込まれた時間経過は，緑藻 *M. circinale* の場合は実験開始 30 分以内，藍藻 *Cyanobium* sp. の場合と珪藻 *T. pseudonana* の場合は実験開始 1 時間後であった。しかし，消化糞を最も早く排出したのは珪藻 *T. pseudonana* の場合であり，実験開始 7 時間後には，未消化の細胞を中量含む消化糞を排出した。実験開始 24 時間後には消化糞が排出された。藍藻 *Cyanobium* sp. の場合では実験開始から 24 時間後に消化糞と未消化糞が混在した糞を，緑藻 *M. circinale* の場合で実験開始から 26 時間後に消化糞と未消化糞が混在した糞を排出した。今回の実験結果からは，3 種の植物プランクトンの中で珪藻が最も消化速度が速く，利用しやすいのではないかと推察された。

## 2) 平成 29 年度

今年度はこれまで摂餌した数  $\mu\text{m}$  サイズの種類とは異なり，中海から分離した殻径約 180  $\mu\text{m}$  サイズの珪藻 *Coscinodiscus* sp.を摂餌したのでその結果を報告する。

2017 年 5 月 17 日に中海白鳥海岸から採集された湖水試料から，珪藻 *Coscinodiscus* sp.を 5 月 26

日にピペット洗浄法により分離し、クローン培養株 (NCD-5 株) を作成した。培地には IMK 培地を用い、人工海水は人工海水 SP を用いた。この人工海水は約 30% であり、これを 1/2 (約 15%) に希釈し培地を作成した。培養条件は 20°C, 12 時間 : 12 時間明暗周期, 約 1500 lux とした。摂餌実験のため約 15% の IMK 培地 100 ml を含む三角フラスコ 2 本で同様の培養条件で約 1 ヶ月培養し、細胞を集め、50 ml に集積した。この培養液を良く攪拌し 20  $\mu$ l を採取し細胞数を 3 回計測した。細胞数の平均は 1700 cells/ml であった。実験に用いたヤマトシジミは 2017 年 10 月 10 日に宍道湖から採取し実験までの約 1 週間絶食させた。10 月 23 日摂餌実験のため、内径 8 cm, 深さ 4 cm のガラスシャーレに 150 ml の 5.7 mS/cm 人工海水を加え、同じものを 7 個用意し、そこにヤマトシジミ 1 個体ずつを入れた。ピペットを用いて培養液 1 ml を 4 回与え合計 4 ml を摂餌した (No.7 のみ 3 ml)。*Coscinodiscus* sp. の細胞ははすぐに沈降するのでパストールピペットで適宜水流を起こして攪拌した。実験は培養室の直射光が当たらない場所 (約 300 lux) で行い、実験開始時の水温は 20.9°C であった。

### 実験開始当日 (10 月 23 日)

摂餌開始約 2 時間後、16 時 20 分、7 個体の内、6 個体が不定形の排出物を排出していた。No.3 個体の排出物は褐色、不定形で *Coscinodiscus* sp. の細胞は全く消化を受けておらず、また殻が破壊された細胞はなかった。中には葉緑体が残った細胞や、原形質分離をおこした細胞や、原形質が細胞外に出た細胞があった。これらのことからこの排出物を擬糞と判断した。

16 時 53 分に糞を No.3 と No.4 個体が排出した。No.4 個体が排出した糞を図 5 に示す。No.4 個体は 15 時 10 分に摂餌開始なので摂餌後約 1 時間 40 分後の糞で、褐色ひも状で、外側に粘膜が

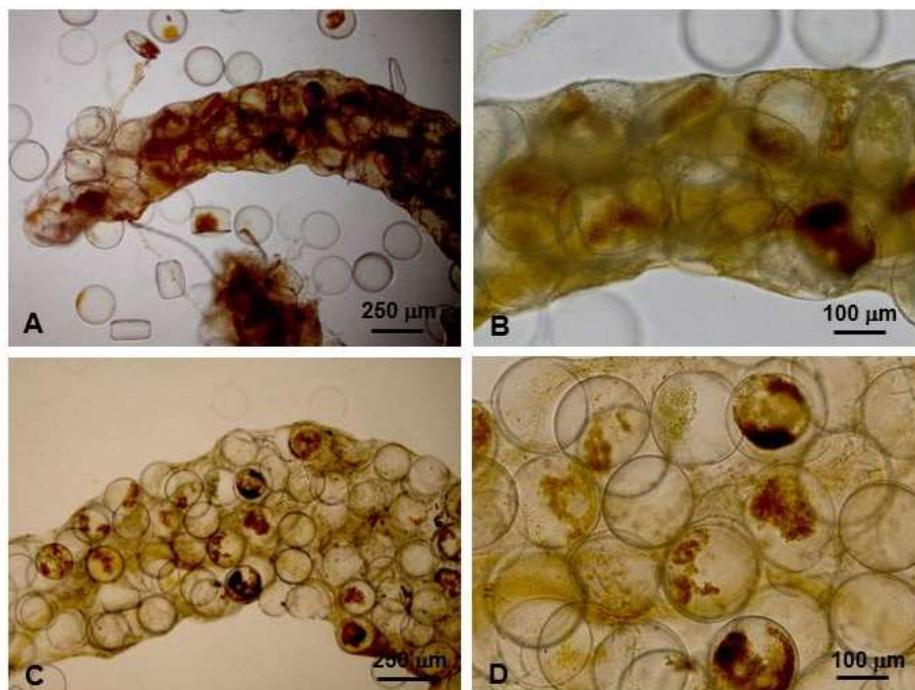


図5. ヤマトシジミ No.4 個体が排出した未消化糞 (2017 年 10 月 23 日, 16 時 53 分)。太さ約 500  $\mu$ m。A, B, カバーガラスなし。周囲に膜があり、殻が破壊されていない細胞が多数密集していた。C, D, カバーガラスのため細胞間隙が少し広がった未消化糞。細胞の内部に原形質を有す細胞が多く存在した。

あり、太さ約 500  $\mu\text{m}$  であった。内側には *Coscinodiscus* sp.の細胞がぎっしりと詰まっており、消化管を経由したにもかかわらず、*Coscinodiscus* sp.の殻はまったく破壊されていなかった(図 5A-D)。このように消化作用を受けず、糞の外側に粘質の膜があることから未消化糞と判断した。

実験開始約 5 時間後 (19 時 25 分) No.6 個体が長さ 4.2 mm、太さ 200  $\mu\text{m}$  の暗褐色の糞を排出した(図 6A)。この糞は No.4 個体が 16 時 53 分に排出した未消化糞と大きく異なり、*Coscinodiscus* sp.の殻は細かく破壊され、糞内部には褐色の葉緑体の分解物と考えられる粒子も多く含んでいた(図 6C, D)。桿晶体解剖の結果、桿晶体に *Coscinodiscus* sp.の殻が付着していたことから、これらは桿晶体で破壊された *Coscinodiscus* sp.と判断した。また、消化糞に存在する細菌や原生動物を含んでいないことも未消化糞と判断した。20 時 15 分に No.7 個体が不定形の擬糞を排出した。実験開始 6 時間半後いずれの個体も排出がなく、観察を終了した。



図6. ヤマトシジミNo.6個体が排出した未消化糞(2017年10月23日, 19時25分)。暗褐色で長さ 4.2 mm, 太さ200  $\mu\text{m}$ 。A, カバーグラスなし。未消化糞の周囲には薄い膜があった。B-D, カバーグラスあり。B, カバーグラスのため少し広がった未消化糞。C, D, 細かく破壊された殻と茶色の原形質からなり、消化糞に存在する細菌や原生動物は観察されなかった。

### 実験開始二日目 (10月24日)

No.6 個体が 8 時 24 分、暗褐色のひも状で先細となる、長さ 4 mm、幅 140  $\mu\text{m}$  と長さ 2.3 mm、と太さ 170  $\mu\text{m}$  の糞を 2 本排出していた。いずれも褐色の顆粒とともに *Coscinodiscus* sp.の破片が多く観察された。消化糞に特徴的な細菌や原生動物を含まないことから、中腸腺で消化されることなく、桿晶体で破壊された未消化糞と判断した。

No.6 個体が実験開始後約 22 時間 (12 時 15 分) に褐色ひも状の長さ 2.5 mm、太さ 180  $\mu\text{m}$  と長さ 3 mm、太さ 200  $\mu\text{m}$  (図 7A) の糞を排出していた。どちらも約 1  $\mu\text{m}$  の褐色顆粒からなること(図 7C)、細菌や原生動物を含むこと(図 7D) から消化糞と判断した。

No.6 個体が 17 時 50 分に褐色ひも状の長さ 8mm、太さ 170  $\mu\text{m}$  の糞を排出した。褐色の顆粒からなること、細菌を含むこと、白色半透明の破片を含むことから消化糞と判断した。まれに *Coscinodiscus* sp.の破片が混ざることがあった。

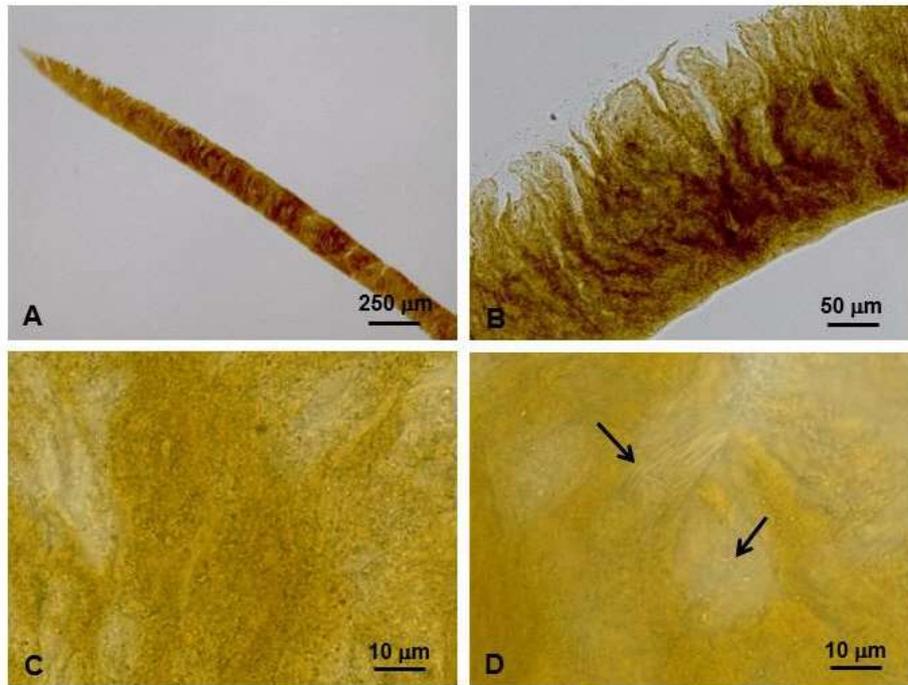


図7. ヤマトシジミNo.6個体が摂餌約22時間後(2017年10月24日12時15分)に排出した消化糞。褐色で長さ3 mm, 太さ200  $\mu\text{m}$ 。A, カバーガラスなし。褐色の細長い棒状で先細。B-D, カバーガラスあり。B, カバーガラスのため少し広がった消化糞で粘液が縞状に観察された。C, 拡大すると褐色の約1  $\mu\text{m}$ の顆粒からなっていた。D, 原生動物(上左側矢印)や細菌(下右側矢印)が観察された。

### 実験開始3日目(10月25日)

No.6 個体が8時45分褐色のひも状, 長さ1.4 mm, 太さ270  $\mu\text{m}$  と長さ1.9 mm, 太さ100  $\mu\text{m}$  の糞を排出した。褐色の径1-2  $\mu\text{m}$  の顆粒があること, 細菌を含むこと, 白色半透明の破片を含むことから消化糞と判断した。昨日の昼から続けて消化糞が確認されたことから実験を終了した。

*Coscinodiscus* sp.を与えた実験では, これまでのヤマトシジミの摂餌実験(大谷ほか 2004)と同様に, 摂餌開始後最初に排出されたものは不定形の消化作用を全くうけていない擬糞であった。入水管から取り込まれた *Coscinodiscus* sp.の細胞の一部は消化管に取り込まれることなく, 擬糞として入水管から排出された。

続いて全く未消化の *Coscinodiscus* の細胞が粘液質に包まれ排出されたが, これまでの報告(大谷ほか 2004)と同様に周囲に粘膜で包まれて, 細胞が消化されておらず未消化糞と判断された。その後粘液質に包まれ, 桿晶体によってすりつぶされたと考えられる *Coscinodiscus* sp.の破壊された殻, 破壊された葉緑体等, 原形質からなる糞を排出した。これは, 細菌や原生動物を含んでおらず, 消化作用をうけていない未消化糞と判断した。 *Thalassiosira pseudonana* は殻径が3-5  $\mu\text{m}$  と小さく, このような殻が破壊された糞を見逃していた可能性がある。今回は *Coscinodiscus* sp.の細胞が約170-190  $\mu\text{m}$  と大きいため, 今まで認識されることのなかった桿晶体で破壊された殻を含む排出物を容易に観察することができたと考えられる。これまでには桿晶体ですりつぶされた珪藻は殻を除く原形質が中腸腺に移動し消化されることを報告してきたが, 今回の結果は, 破壊された消化可能な原形質も一部が中腸腺に入ることなく, 破壊された殻とともに排出されることが示された。

今回 *Coscinodiscus* sp.摂餌後約22時間で消化糞がヤマトシジミから排出され, *Thalassiosira pseudonana* 摂餌実験の約24時後とほぼ同じ結果が得られた。緑藻の *Monoraphidium circinale* の場

合は 24 時間後でも未消化糞が排出されており、26 時間後も消化糞に未消化の細胞が混ざっていた。*M. circinale* の場合、細胞壁はセルロースでできており、桿晶体ですりつぶされることなく中腸腺に取り込まれ、消化細胞で細胞ごと消化されたことが推察された。緑藻はそのため消化に時間がかかり、珪藻に比べ消化糞の排出が珪藻よりも遅いことが推察される。*Coscinodiscus sp.* のように大型種であっても珪酸質の殻は桿晶体で破壊され、原形質のみが中腸腺に取り込まれることから、植物プランクトンの細胞壁の組成がヤマトシジミの消化吸収に影響を与えていることが考えられる。

ヤマトシジミの消化管に取り込むことができる最大の大きさは、神西湖の人工池の調査から大谷ら (2004) は排出物中の最大の生物が 150  $\mu\text{m}$  長のワムシであったことから 150  $\mu\text{m}$  と報告していたが、今回の実験で *Coscinodiscus sp.* は径が 170 -191  $\mu\text{m}$  あり、少なくともこのサイズまでは取り込むことが今回の実験で示された。このサイズの珪藻の消化過程を解剖による中腸腺や桿晶体、排出物の顕微鏡観察から明らかにしたのは我々の知る限り初めてである。報告者の一人である勢村は 2012 年~2013 年にかけて宍道湖水の塩分が 7-8psu で推移したとき、*Coscinodiscus* 属の種が宍道湖でも観察されたこと、そのときにヤマトシジミの現存量が増加したことを報告している。自然界でもヤマトシジミは約 200  $\mu\text{m}$  サイズの浮遊珪藻を利用しているかもしれない。今後、宍道湖で植物プランクトンの種組成をモニタリングし、同時にヤマトシジミの解剖や排出物の観察から、宍道湖におけるヤマトシジミの食性を明らかにし、資源管理に研究成果を活かしていきたい。

## おわりに

本研究によって得られた知見は、1) 消化管の観察には、カーミン顆粒による染色が有効であること、2) 宍道湖の野外から採集したヤマトシジミの食性を、季節を変え時間経過毎に明らかにしたこと、3) 植物プランクトン単一種を摂餌させ、中腸腺や桿晶体の直接観察で植物プランクトンの消化過程を観察し、それぞれの植物プランクトンの消化の特性を明らかにしたこと、があげられる。特に 3) の研究は我々の知る限りこれまで知られていない初めての試みである。今回の研究により、ヤマトシジミの摂餌、排出と消化過程で明らかになった点がいくつかあるが、今後も実験する植物プランクトンの種類を増やし、さらに研究を続ける必要があると考える。

【研究担当者・連絡先】 大谷修司・e-mail : ohtani2458@edu.shimane-u.ac.jp

(共同研究者) 石橋圭子 (島根大学教育学部), 大木智世 (島根大学教育学研究科)

南里敬弘 (東京大学大学院新領域創成学研究科), 勢村均 (島根県水産技術センター)