

カイアシ類ノープリウス期幼生の炭素量の見積りに関する検討

新村 陽子

1. はじめに

プランクトン分析の目的の1つに、一次生産者によって固定された光エネルギーが食物連鎖を通じ、魚類など高次の生産者に転送される物質の流れを定性・定量的に把握することがある。また、溶存有機物をエネルギー源として増殖するバクテリアを起点とする微生物食物連鎖から (Azam *et al.*, 1983)、古くから提唱されてきた生食食物連鎖への物質の流れもあり、中・大型動物プランクトンはこの2つの食物連鎖をつなげる役割を持つ。海洋の中・大型動物プランクトンにおいて、カイアシ類は一般的に総個体数の7~8割を占めるために重要な構成群である (大塚, 2006; 上, 2010)。

カイアシ類は体長数 mm 程度の小型の甲殻類で、海では動物プランクトンとして最も生物量が多く、魚類の餌として重要な役割を果たしている (Hidaka *et al.*, 2016; 山田ら, 2016)。特にノープリウス期幼生はそのサイズの小ささも相まって稚仔魚期の消化管から多く確認された事例が報告されている (Nishiyama & Hirano, 1983)

これらカイアシ類のノープリウス期幼生の高次生産者への転送効率を考える上で、その現存量を推定する必要がある。現存量の推定は、顕微鏡下で生物の各部位を測定し、既報の計算式によって炭素量を見積もる手法は現状では不可欠であろう (例えば Uye & Shimazu, 1997; 中田ら, 2001)。しかしながら、1つの式を用いて概ね良好な値が

得られると、他の計算式を使った場合との差について検討する機会があまりない。

カイアシ類のノープリウス期幼生の炭素量換算については、例えば Mullin (1969)、Uye (1988)、Uye *et al.* (1996) のファクターや換算式がある (表1)。Uye (1988) の式②は *Calanus sinicus* 固有の換算式であり、計測部位が測定しやすい頭胸甲長であることに特徴がある。一方、Uye *et al.* (1996) の式④における計測部位は体長である。その為、体長:体幅比が大きい分類群、例えば *Eucalanus* 属などで炭素量が過大評価となる問題をはらむ。その問題点を補完できると考えられるのが、単位容積当たりの炭素量を用いる方法であり (Mullin, 1969 の式①)、この場合は体積の換算方法が結果に影響する。一般的にノープリウス期幼生の体積は楕円球体とみなして頭胸甲長または体長・体幅・厚みを計測して見積もる。さらに腹部が付属する場合はそこを円柱とみなして加算する (Nishiyama & Hirano, 1983)。

カイアシ類のノープリウス期幼生の炭素量の換算において、分類群を問わずオールマイティに使える式は知る限りでは存在しない。その為、現行の業務においては便宜的に汎用性の高い手法を用いている。そこで本稿では、様々な計算方法で求めた値を比較し、カイアシ類ノープリウス期幼生の、より適切な換算手法を分類群ごとに検討することを目的とした。

表1 ノープリウス期幼生の炭素量の見積りに使われる式

換算式	引用文献	式番号
Copepod nauplius: $Cc (\mu g) = 0.05(\text{pgC } \mu m^{-3}) \times 10^{-6} \times V(\mu m^3)$	Mullin, 1969	式①
<i>Calanus sinicus</i> : $\text{Log } Cc (\mu g) = -6.827 + 2.588 \text{ Log } CL (\mu m)$	Uye, 1988	式②
<i>Oithona similis</i> : $Cc (\mu gC) = 5.545 + 10^{-8} BL^{2.71} (\mu m)$	Sabatini & Kiorboe, 1994	式③
Copepod nauplius: $Cc (\text{ng}) = 1.51 + 10^{-5} BL^{2.94} (\mu m)$	Uye, 1996	式④

Cc: carbon content; V: Volume; CL: carapace length; BL: body length

2. 材料と方法

試料は、兵庫県立農林水産技術総合センター 水産技術センターが播磨灘の地点 H5 (北緯 34.370, 東経 134.500) において、2018 年 12 月 21 日から 2019 年 4 月 4 日にかけて採取した 12 検体を用いた (図1)。

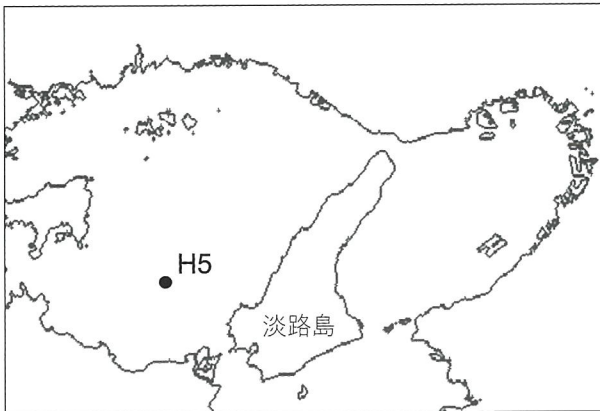


図1. 調査地点

試料は改良型北原式定量プランクトンネット (目合: 40 μ m) を用いて水深 10m から海面までの鉛直曳により採取した。

上記の試料は 1/10 量を分割したものをサブサンプルとし、その全量または 1/2 量中の全てのノープリウス期幼生を拾い出して、計数した。そのノープリウス期幼生を分類群別に分け、特に *C. sinicus* と *Oithona* 属のノープリウス期幼生はステージ別に可能な限り振り分けた (Björnberg, 1972; 古賀, 1984)。 *C. sinicus* は体長 (BL)、頭胸甲長 (CL) および体幅 (BW) を、その他のノープリウス期

幼生は体長および体幅をそれぞれ測定した (図2)。体長等の測定は、光学顕微鏡に接眼マイクロメーターを装着して行い、サンプルあたり一分類群ごとに 50 個体を上限とした。その測定値をもとに、体積を便宜的に楕円球体とみなして算出すると共に、個体あたりの炭素量を表 1 の換算式およびファクターに従って換算し、分類群別・ステージ別に比較した。 *C. sinicus* と *Oithona* 属の炭素量は、それぞれ Uye (1988) の式②と Sabatini & Kiorboe (1994) の式③による結果を対照とした。

また、調査日ごとに分類群別の個体数と単位個体あたりの炭素量の平均値を求め、これらに乗じて分類群ごとの現存量を見積もった。

3. 結果および考察

3.1 カイアシ類ノープリウス期幼生の組成

各調査時に出現した分類群ごとのノープリウス期幼生の全個体数に占める割合 (以下、組成比) と個体数の変動を図 3 に示した。

カイアシ類ノープリウス期幼生の全個体数は 542 inds.m⁻³ (2018 年 12 月 12 日)~5,871 inds. m⁻³ (2019 年 4 月 4 日) の範囲で推移した。調査期間を通じたノープリウス期幼生の個体数平均は 2,164.4 \pm 1,320.3 inds.m⁻³であった。分類群ごとにみると、2019 年 1 月 4 日を除くすべての調査において *Oithona* 属のノープリウス期幼生が最も多く、その組成比の平均は

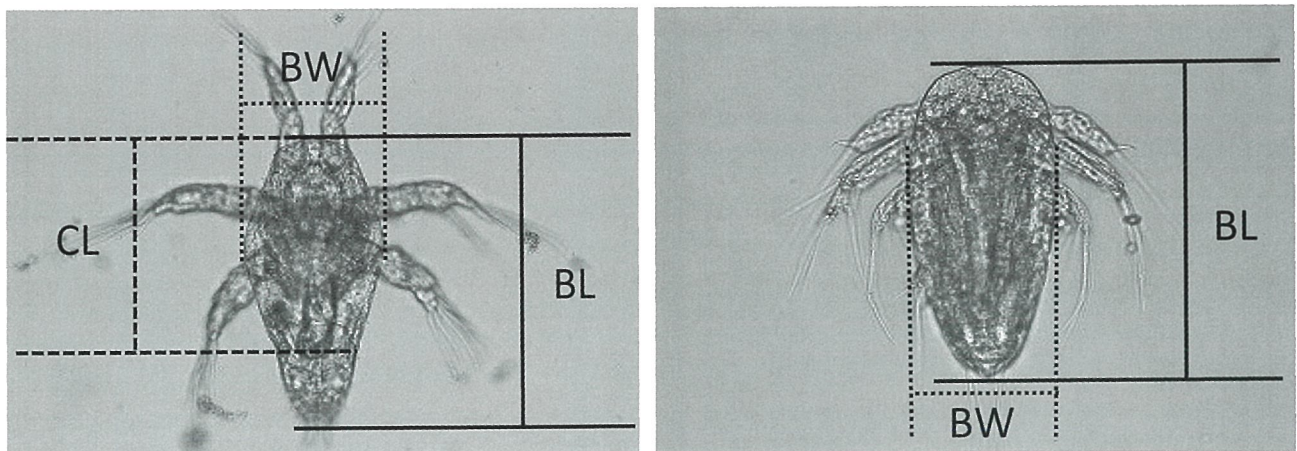


図2. *C. sinicus* (左) と *Oithona* 属 (右) ノープリウス期幼生の計測部位

BL: 体長; CL: 頭胸甲長; BW: 体幅

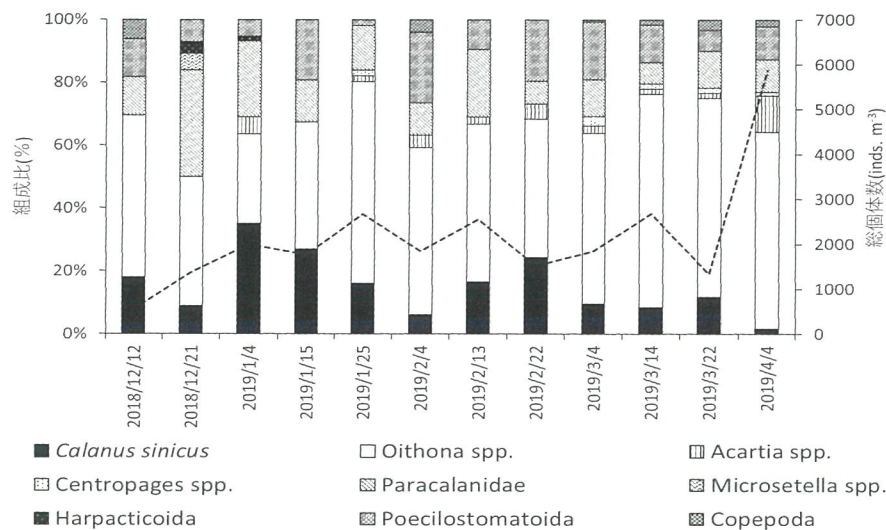


図3. カイアシ類ノープリウス期幼生の個体数および組成比の変化

表2. *C. sinicus* のノープリウス期幼生のステージ別の頭胸甲長、体長および個体あたり炭素量の平均値

ステージ	n数	サイズ 体長 (μm)		頭胸部長 (μm)		炭素量 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$)		式④		式①	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
I	16	198.4	11.8	193.4	16.0	0.125	0.026	0.087 **	0.015	0.057 **	0.010
II	16	238.1	14.7	202.8	21.6	0.142	0.041	0.148	0.025	0.085 **	0.014
III	33	351.2	21.1	260.6	19.6	0.269	0.051	0.465 **	0.085	0.254	0.038
IV	8	406.3	38.1	301.3	38.0	0.399	0.119	0.722 **	0.200	0.462	0.107
V	12	453.3	47.2	341.7	32.1	0.546	0.136	1.002 **	0.289	0.689 *	0.168
VI	17	566.8	29.8	397.1	27.6	0.800	0.149	1.893 **	0.288	1.142 **	0.169
	102	361.8	124.9	276.5	74.8	0.358	0.252	0.677	0.635	0.412	0.391

・表中の "*" は式②の結果と比べた場合の有意差判定を示す (t -test, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)

51.7±11.8%であった。2019年1月4日は *C. sinicus* のノープリウス期幼生が優占し 35.2%を占め、2018年12月12日、2019年1月15日、1月25日、2月22日、および3月22日には優占第2位であり、調査期間を通じた組成比の平均は 15.3±9.7%であった (図3)。これらの他に、調査期間を通じて組成比の平均が 10%を超えた分類群は Paracalanidae (パラカラヌス科: 14.8±7.9%) と Poecilostomatoida (ポエキロストム目: 12.1±6.5%) の2群であった。本稿では特にサイズが大きく個体数が多かった *C. sinicus* と優占頻度が高かった *Oithona* 属の2群のノープリウス期幼生における個体あたり炭素量とその現存量について、以下、検討を加えた。

3.2 *C. sinicus* のノープリウス期幼生の炭素量

C. sinicus のノープリウス期幼生の体サイズおよび個

体あたりの炭素量の平均値をステージ別に表2に示した。なお、本文中の "NI期" "NV期" 等はノープリウス期幼生のステージを示す。

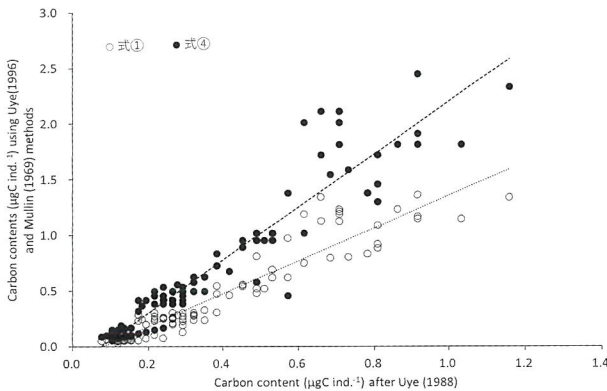
本調査におけるノープリウス期幼生の頭胸甲長は Uye (1988) の結果に比べて (例えば NII期では約 240 μm 、NV期では約 380 μm)、全体にやや小さかった。水温が高い環境下でのサイズの小型化が Uye (1988) には示されており、冬季の高水温化 (樽谷, 2007) が体サイズに影響しているかもしれないが、餌環境や種の系統が異なる等の可能性もあり、ここでの断定は避けたい。

炭素量の全個体平均は、式②で見積もった場合は 0.358±0.252 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$) であったのに対し、式④で見積もった場合は 0.677±0.635 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$)、また、式①では 0.412±0.391 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$) であった。個体あ

表3. *Oithona* 属のノープリウス期幼生のステージ別の体長および個体あたり炭素量の平均値

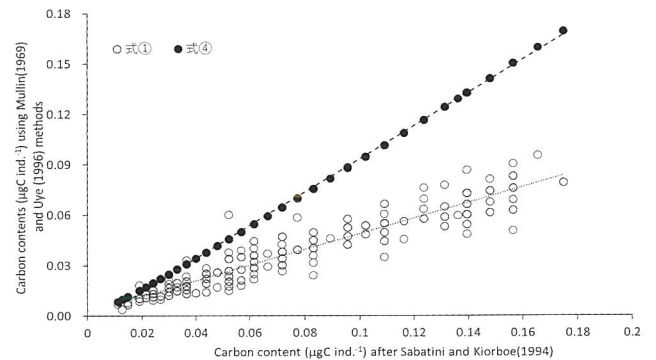
ステージ	n数	体長 (μm)		炭素量 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$)		式④		式①	
		平均	標準偏差	式③ 平均	式③ 標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
I	16	115.0	8.0	0.022	0.004	0.017 **	0.003	0.011 **	0.002
II	67	131.3	12.4	0.031	0.007	0.026 **	0.007	0.016 **	0.007
III	68	155.2	14.4	0.049	0.011	0.043 **	0.010	0.024 **	0.007
IV	65	175.5	12.6	0.068	0.013	0.061 **	0.012	0.036 **	0.008
V	41	200.9	13.2	0.097	0.016	0.090 *	0.016	0.050 **	0.009
VI	87	229.3	11.4	0.139	0.018	0.132 *	0.019	0.066 **	0.011
	344	176.7	40.0	0.076	0.044	0.070	0.043	0.038	0.022

・表中の "*" は式③の結果と比べた場合の有意差判定を示す (t -test, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$)

図4. *C. sinicus* ノープリウス期幼生における炭素量の式間の関係

たりの炭素量は、式②<式①<式④となり、それはステージ別に比較しても概ね同様であった(表2)。式②と式④それぞれの計算式で見積もった *C. sinicus* のノープリウス期幼生の炭素量 (Cc : carbon contents) の関係は、 Cc (式④) = $2.379 \times Cc$ (式②) - 0.174 ($r=0.94$, $p < 0.01$) で表わされた。同様に、式②と式①それぞれの計算式で見積もった *C. sinicus* のノープリウス期幼生の炭素量の関係は、 Cc (式①) = $1.473 \times Cc$ (式②) - 0.115 ($r=0.95$, $p < 0.01$) であった。これらの関係式は式②に比べて、式④や式①ではそれぞれ約2.4倍、1.5倍過大評価になることを示す(図4)。

なお、*C. sinicus* のNI期における頭胸部の判別が難しく、ほぼ体長を測定した。Uye (1988) にもNI期の記載がない為、比較ができなかった。一方、ステージがNV期・

図5. *Oithona* 属ノープリウス期幼生における炭素量の式間の関係

NVI期になると腹部が明瞭に伸長する為、体長：体幅比が大きくなる。式④と式①の両手法では体長を測定して炭素量を見積もる為、特に大きな値となった。

3.3 *Oithona* 属のノープリウス期幼生の炭素量

Oithona 属のノープリウス期幼生の体長および個体あたりの炭素量の平均値をステージ別に表3に示した。

本調査で出現した *Oithona* 属のノープリウス期幼生の体長の平均は115~229 μm であり、Sabatini & Kiorboe (1994) の体長範囲と概ね同じであった。

炭素量の全個体平均は、式③で見積もった場合の 0.076 ± 0.044 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$) に対し、式④と式①ではそれぞれ 0.070 ± 0.043 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$)、 0.038 ± 0.022 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$) であった。平均値を比較すると、式③と式

④の値では全てのステージにおいて有意差がみられた (t -test, $p < 0.05$)。一方、式①では式③の50%程度に見積もられ、全てのステージにおいて有意差がみられた (t -test, $p < 0.05$, 表3)。そこで式③と式④の計算式で見積もった *Oithona* 属のノープリウス期幼生の炭素量の関係は、 $Cc(\text{式④}) = 0.986 \times Cc(\text{式③}) - 0.005$ ($r = 0.998$, $p < 0.01$) で表わされた。同様に式③と式①で見積もったノープリウス期幼生の炭素量の関係は、 $Cc(\text{式①}) = 0.466 \times Cc(\text{式③}) + 0.002$ ($r = 0.95$, $p < 0.01$) であった。これらの関係は *Oithona* 属のノープリウス期幼生の炭素量の見積りに関して、式③と式④の値はほぼ等しいのに対し、式①では0.47倍過小評価となることを示す(図5)。

一般的にカイアシ類のノープリウス期幼生を種レベルでソーティングすることは難しい為、式④は複数種の体長 - 炭素重量の関係式である(上, 私信)。しかし、上記の結果から式④における試料の主要構成群は *Oithona* 属であったと考えられる。なお、今回の試料では、調査期間を通じて、NI期の計測個体数がNII期~NVI期の計測個体数に比べて著しく少なかった(表3)。NI期の個体群は、採集ネットの目合いが40 μm でも、おそらく多くが抜け落

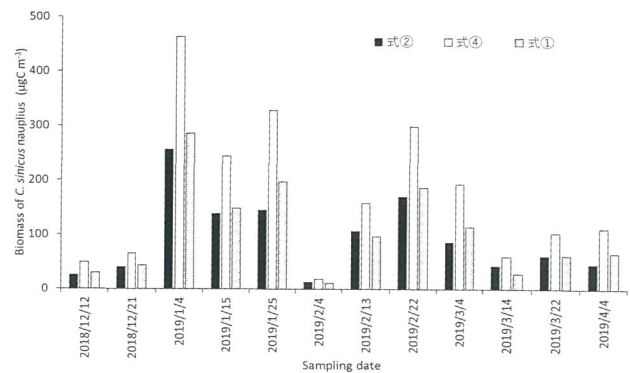


図6. *C. sinicus* ノープリウス期幼生の現存量の経時変化の換算式による差

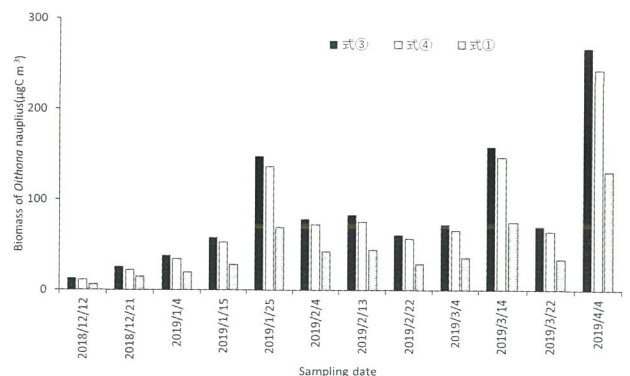


図7. *Oithona* 属ノープリウス期幼生の現存量の経時変化の換算式による差

表4. 調査日ごとの *C. sinicus* と *Oithona* 属のノープリウス期幼生の個体数、サイズおよび炭素量の平均値

調査日	<i>C. sinicus</i>					<i>Oithona</i> 属				
	個体数 (ind. m ⁻³)	頭胸部長 (μm)		炭素量 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$) 式②		個体数 (ind. m ⁻³)	体長 (μm)		炭素量 ($\mu\text{gC ind.}^{-1}$) 式③	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差		平均	標準偏差	平均	標準偏差
2018/12/12	98	255	41.4	0.263	0.106	279	149	28.4	0.040	0.021
2018/12/21	122	272	66.9	0.328	0.202	561	147	32.1	0.040	0.026
2019/1/4	703	277	80.6	0.365	0.276	568	168	42.0	0.061	0.041
2019/1/15	475	254	74.8	0.291	0.220	712	184	31.0	0.074	0.035
2019/1/25	429	273	71.2	0.338	0.219	1714	186	39.0	0.080	0.044
2019/2/4	113	188	7.6	0.115	0.012	981	180	40.6	0.074	0.046
2019/2/13	424	251	33.9	0.250	0.080	1273	167	36.9	0.059	0.039
2019/2/22	370	309	73.6	0.459	0.312	667	188	46.0	0.085	0.051
2019/3/4	176	317	74.9	0.489	0.272	1000	173	39.3	0.066	0.043
2019/3/14	227	225	35.0	0.189	0.076	1818	186	42.2	0.081	0.045
2019/3/22	156	284	91.1	0.392	0.299	844	181	44.9	0.077	0.051
2019/4/4	97	313	83.3	0.470	0.273	3677	176	34.1	0.066	0.037

ちていると思われる。

3.4 式の違いがもたらす現存量への影響

C. sinicus と *Oithona* 属のノープリウス期幼生の現存量 ($\mu\text{gC m}^{-3}$) を換算式ごとに比較し、経時的な変化をそれぞれ図6, 図7に示した。

調査回ごとに見ていくと、*C. sinicus* は1月4日に個体数が多かったが、サイズが大きかったのは3月4日であった。サイズが大きくなると当然、現存量における1個体あたりの"おもみ"もまた大きくなる。実際、3月4日の平均サイズは1月4日の1.1倍であるのに対し、個体あたり炭素量の平均は1.3倍となった(但し、式②の換算による)。その結果、3月4日の個体数はピーク時の約1/4であった

ものの、現存量は約1/3であった。また、3月14日の個体数は3月4日より1.4倍と多くなったが、平均サイズが約0.7倍になった。そのため、個体あたりの炭素量の平均は0.4倍と小さくなり、3月14日の現存量は落ち込んだ(表4, 図6)。一方、*Oithona* 属のノープリウス期幼生は個体あたりの炭素量の変動が *C. sinicus* に比べ小さく、現存量はむしろ個体数の増減を顕著に反映していた(表4, 図7)。

C. sinicus の現存量は、単位個体あたりの炭素量を大きく反映する為、式④の換算式で突出し、式②で見積もった場合の1.8倍であった。一方、式①で見積もった現存量では1.1倍であった。*Oithona* 属の現存量は、式①では明らかに小さく、式③で見積もった場合の0.48倍であった。一方、式④では0.92倍であった。

全てのノープリウス期幼生の現存量は、調査ごとに式④で66.8~546.7 ($\mu\text{gC m}^{-3}$) と見積もられるのに対し、式①では38.7~326.7 ($\mu\text{gC m}^{-3}$) と前者の概ね50~60%であった。分類群別の炭素量においても多少の増減はあるものの、組成比でみるとその傾向に大きな違いは見られなかった(図8a,b)。現存量の推定方法が混在するとどうなるか。*C. sinicus* と *Oithona* 属は既知の式②、式③で、その他の分類群は体積ベースの式①でそれぞれ現存量を見積もると、組成比は *C. sinicus* では微減したのに対し *Oithona* 属では約1.5倍大きくなった(図8c)。

以上の結果をまとめると、1) カイアシ類のノープリウス期幼生の個体あたりの炭素量は計算式によって0.5~2.4倍のレンジで変化する。したがって、2) 正確な現存量を把握する為には可能な限り分類群ごとに最適な計算式を用いるのが望ましい。3) 今回の検討で、*C. sinicus* では式①または式②、*Oithona* 属では式③または式④をそれぞれ用いるのが妥当である事が示された。また、4) 特に *C. sinicus* ではステージ組成が現存量に大きく影響する為、目的に応じ、ステージを考慮した分析が必要である。

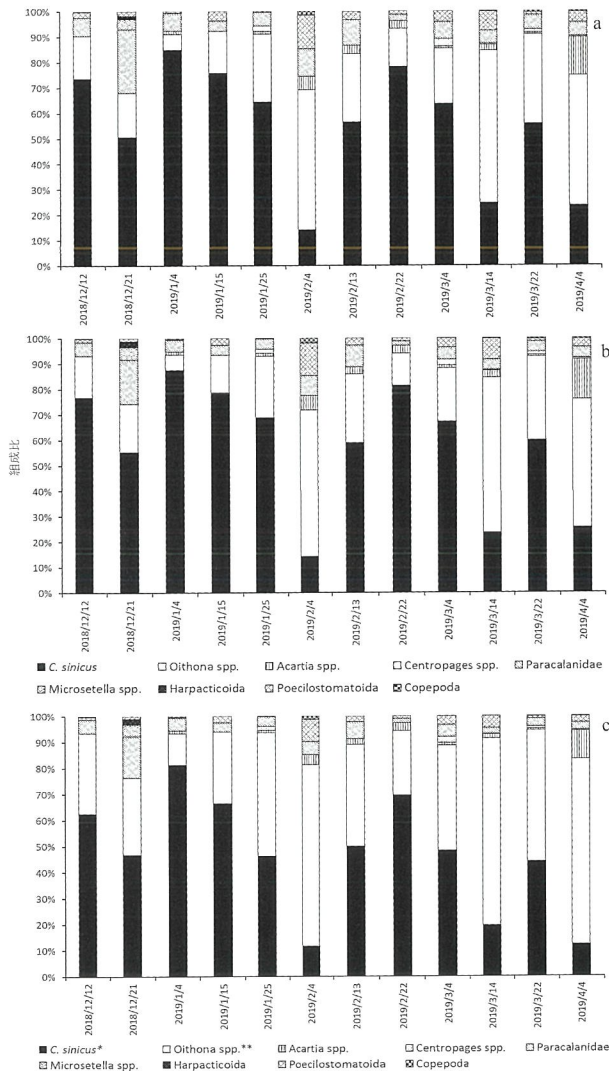


図8. 現存量における組成比の換算式ごとの比較

a: 式④; b: 式①; c: *C. sinicus** は式②、

Oithona 属** は式③、他の分類群は式①をそれぞれ用いた

4. 謝辞

本稿の為に、サンプルを快く貸して下さった兵庫県立農林水産技術総合センター 水産技術センターの西川哲也博士および関係者の皆さまに心より御礼申し上げます。

参考文献

- Azam, F., Fenchel, T., Field, J. G., Gray, J. S., Meyer-Reid, L. A. and Thingstad, F. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10 : 257-263.
- Björnberg, T. K. S. 1972. Developmental stages of some tropical and subtropical planktonic copepods. *Studies of the Fauna of Curacao and other Caribbean Islands*, 136 : 185pp.
- Hidaka, K., Itoh, H., Hirai, J. and Tsuda A. 2016. Occurrence of the *Paracalanus parvus* species complex in offshore waters south of Japan and their genetic and morphological identification to species. *Plankton and Benthos Research*, 11 : 131-143.
- 古賀文洋. 1984. 橈脚類ノープリウスの形態、生態、分類ならびに分化に関する研究. *南西海区水産研究所業績*, 138 : 95-229.
- Mullin, M. M. 1969. Production of zooplankton in the ocean : the present status and problems. *Oceanography and Marine Biology-An annual Review*-, 7 : 293-310.
- 中田薫・松川康夫・下田徹・市川忠史. 2001. 1996 年春季の沖縄本島周辺亜熱帯海域におけるカイアシ類現存量、生産力およびサイズ組成. *中央水産研究所研究報告*, 16 : 75-92.
- Nishiyama, T. and Hirano, K. 1983. Estimation of zooplankton weight in the gut of larval walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *Bulletin of Plankton Society of Japan*, 30 : 159-170.
- 大塚攻. 2006. カイアシ類・水平進化という戦略—海洋生態系を支える微小生物の世界. *日本放送出版協会*, 3-9.
- Sabatini, M. and Kiorboe, T. 1994. Egg production, growth and development of the cyclopoid copepod *Oithona similis*. *Journal of Plankton Research*, 16 : 1329-1351.
- 樽谷賢治. 2007. 瀬戸内海の変化の 30 年間の環境—水産の環境モニタリング “浅海定線観測調査” のとりまとめ. *日本ベントス学会誌*, 62 : 52-56.
- Uye, S. 1988. Temperature-dependent development and growth of *Calanus sinicus* (Copepoda: Calanoida) in the laboratory. *Hydrobiologia*, 167/168 : 285-293.
- Uye, S., Nagano, N. and Tamaki, H. 1996. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan. *Journal of Oceanography*, 52 : 689-703.
- Uye, S. and Shimazu, T. 1997. Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of meso- and macrozooplankton in the Inland Sea of Japan. *Journal of Oceanography*, 53 : 529-538.
- 上真一. 2010. 沿岸海洋生態系における動物プランクトンの機能的役割に関する研究. *海の研究*, 19 : 283-299.
- 山田智・柳橋茂昭・武田和也・広海十朗・鈴木輝明. 2016. 三河湾におけるメソ動物プランクトン生物量とカイアシ類群集の長期変動—特に貧酸素水塊との関係について—. *日本プランクトン学会報*, 63 : 1-7.

