

대청호에서 사상 남조류 포식성 *Asterocaelum* sp.(Protozoan)의 발생에 관한 연구

천세억 · 박혜경* · 한홍의**

국립환경연구원 금강수질검사소 · * 국립환경연구원 수질연구부 · ** 인하대학교 생물학과

A study on *Asterocaelum* sp., a grazer of filamentous cyanobacteria in the Lake Daecheong

Se-Uk Cheon · Hae-Kyung Park* · Hong-Ui Han**

Kumgang Water Quality Research Laboratory, National Institute of Environmental Research,

* Water Quality Research Department, National Institute of Environmental Research,

** Department of Biology, Inha University

Correspondence to : Se-Uk Cheon ; email : cheonag@hanmail.net

Abstract

A milky gray scum was observed at some water area of the lake Daecheong in the summer of 1997 and 1998. To identify a causing organism of scum and affecting factors, we observed the scum material by a phase contrast microscope and surveyed the physico-chemical water quality during the outbreak of scum. The scum was found out to be clogging cysts of amoeboid protozoan, *Asterocaelum* sp.(Protozoa Sarcodina Aconchulinida), grazer of filamentous cyanobacteria, *Anabaena* genus. The protozoan scum appeared during *Anabaena* bloom period, which continued for a while. This protozoan was presumed acting as a regulator of *Anabaena* bloom in the lake Daecheong during the summer season. Moreover this is the first report on *Asterocaelum* sp. a grazing filamentous cyanobacteria occurred in Korean freshwater.

Key words : *Asterocaelum* sp., cyst, Lake Daecheong, *Anabaena*, grazing

I. 서론

대청호는 금강수계 수자원의 다목적 개발을 위해 하구로부터 약 150km 상류인 대전시 대덕구 미호동과 충청북도 청원군 문의면 덕유리 사이에 축조된 대청댐에 의해 형성된 인공호이다. 대청호는 총 저수용량 14억톤, 유효저수량이 7억 9천만톤으로 충청지역의 중요한 용수공급원이며 대전, 청

주 등 충청지역의 상수원수로 이용되고 있다. 그러나 대청호는 1980년대 후반부터 국지적인 조류의 대량증식현상이 나타났고¹⁾ 최근 들어 매년 여름철이면 *Anabaena* spp., *Microcystis* spp., 등의 남조류가 대량증식하여 수면위에 스크임을 형성하는 등 일시적인 수이용상의 장애유발 가능성이 있다^{2), 3)}. 이에 따라 수자원 관리기관 및 학계에서는 대청호의 부영양화를 개선하고, 조류 대량증식을 제어하

기 위해 조류모니터링을 실시하는 등 많은 연구가 이루어지고 있다.

그런데 대청호에서는 부영양화로 인한 녹조현상 뿐만 아니라 대형동물, 민물해파리 등의 기타 생물들이 국지적으로 대량번식한 사례가 최근 몇 년 동안 발생하고 있으며, 그 중에서 특히 여름철 남조류의 녹조현상이 발생하는 시기와 비슷한 시기에 대청호 댐수역을 중심으로 회백색의 부유물이 관찰되어 매스컴 등의 주목을 받고 있다. 이 회백색 부유물은 수표면에 스킴을 형성하며 녹조현상과 마찬가지로 수역 전체에서 작은 알갱이 형태로 부유하기도 하고 바람에 의해 호변에 밀려 두껍고 끈끈한 층을 형성하여 시각적으로 불쾌감을 유발하였다. 1997년 발생 당시 본 연구진의 조사결과 백색조류라고 알려진 회백색 부유물은 남조류를 포식하는 원생동물(Amoeba)의 cyst인 것으로 잠정 판정되었으며, 이후 1998년 발생시에도 동일 원생동물로 밝혀졌다²⁾.

본고에서는 대청호에서 대량발생한 원생동물(Amoeba)의 동정 및 출현시 환경요인에 대하여 조사한 결과를 바탕으로 국내수계에서 남조류 포식성 원생동물의 대량 발생을 최초로 보고하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사시기

대청호 주요 수질모니터링 지점인 대청댐, 문의, 추동, 회남의 4개지점에서 1998년 8월 7일부터 9월 22일까지 수질조사를 하였으며 특히 회백색 부유물이 출현한 1998년 8월 27일부터 9월 7일까지는 원생동물 조사를 위해 시료를 채취하였다. 각각의 시료는 수표면에서부터 50cm 아래에서 채취하였다(Fig. 1).

2. 원생동물의 분류 및 계수

원생동물 동정을 위한 시료는 생시료와 Lugol 용액으로 고정된 시료를 사용하였고, 생물의 동정은 위상차현미경(Axioscope, Carl zeiss, Germany)으로 100배에서 400배까지 형태학적 특성을 관찰하여 小島 등⁴⁾의 방법에 따라 동정하였다. 포자의

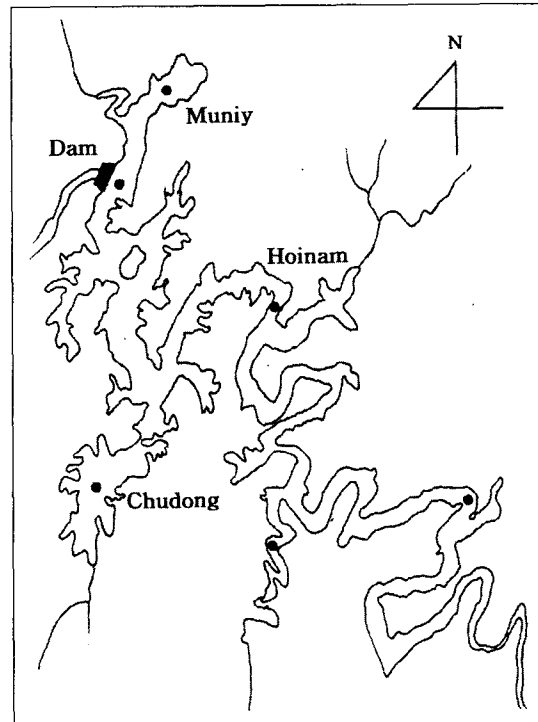


Figure. 1. Map of sampling site in the Lake Daecheong.

계수는 Sedgwick-Rafter chamber에 Lugol 용액으로 고정된 시료 1ml를 채우고 위상차 현미경을 이용하여 100배 시야에서 행하였다.

3. 수질조사

수질조사항목 중 수온, pH, DO는 Check and Mate 90(Coring)을, 투명도는 Secchi Disk를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 일부시료는 조류검경을 위하여 현장에서 Lugol 용액으로 바로 고정하였고, 나머지 시료는 실험실로 옮겨 클로로필 a 농도, 총인, 총질소 등 일반수질항목을 수질오염공정시험 방법에 준하여 분석하였다⁵⁾. 조류의 검경은 원시료를 위상차현미경(Axioscope, Carl zeiss, Germany) 하에서 하였으며, 조류종의 계수에는 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하여 속별로 계수하였다. 정⁶⁾, 廣瀬 등⁷⁾ 및 Komarek⁸⁾에 따라 조류종을 동정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 종의 분류 및 동정

대청호에서 발견된 아메바형 원생동물은 불규칙한 체형으로 위족은 측사가 없으며 포식 후 별 모양의 가시상 돌기가 형성되었으며 후에 불소화물과 분리된 난형의 포자가 형성되었다. 이 난형의 포자로부터 아메바 방출 후 남은 껍질에는 *Anabaena*의 akinet, 혹은 heterocyst등의 불소화물과 갈색의 미 소화된 먹이나 과립이 막에 둘러 쌓여진 형태로 남아 있었다. 이 껍질들은 소화 및 포자 형성과정에서 형성되었던 별 모양의 돌기가 사라지고 이중막과 불소화물만이 남아 서로 영긴 상태로 나타났다. 또한 내구성 cyst는 난형으로 아메바 방출시 이중막의 일부가 깨어지며 아메바가 방출된다. 이때 영양형 세포는 분리되고, 남은 불소화물을 포함한 투명한 막은 껍질로 분리되고 서로 영겨 회백색알갱이를 형성하며, 다량 포식이 일어날 때 수표면에 회백색 스킴이 형성된다. 이러한 형태적 특성들에 근거하여 대청호에서 발견된 아메바형 원생동물을 원생동물문(Protozoa) 육질충강(Sarcodina) 무각목(Aconchulinida)의 *Asterocaelum* sp.로 동정하였다.

이 종의 분류학적 특성을 보면 체형은 불규칙 또는 다양한 형태를 가지며 구형의 경우, 직경 32~75 μ m의 크기이며 또, 아메바상의 융합도 자주 관찰된다. 단핵 또는 다핵이며 위족은 측사가 없고 길이는 45~60 μ m의 사상 혹은 엽상이다. 기부에는 다수의 수축포가 관찰된다. 증식 cyst는 돌기와 점액성 물질로 둘러 쌓여있으며 직경 32~75 μ m의 구상이다. 증식 cyst에서는 1~4개의 아메바가 방출된다. 아메바를 방출한 후, cyst의 중앙부에는 오렌지색 혹은 갈색의 미 소화된 먹이나 과립이 막에 둘러 쌓인 형태로 남겨진다. 이 종의 발생에 의한 수면의 스킴은 아메바 방출후의 cyst 껍질이 대부분이다. 내구성 cyst(resting spore cyst)는 구형이며, 외경은 증식 cyst와 거의 유사하며 내부의 불소화물과 분리되어 이중막의 반월형 내구성 cyst를 형성한다. 중앙부에는 직경 13~40 μ m의 난형 혹은 구형의 원형질이 존재하고 이것이 아메바화 한다. 이 종의 상세한 생활환경은 현재까지 불

분명한 것으로 알려져 있다⁹⁾.

Fig. 2에 대청호에서 발생된 *Asterocaelum* sp.의 현미경 사진을 나타내었다. Fig. 2의 a)는 영양체, b)는 *Anabaena* sp.의 포식장면, c), d), e)는 포자 형성 과정, f), g)는 포자 및 껍질들이 영긴 형태, h), i)는 휴면포자와 이로부터 영양체가 방출되는 과정이다.

대청호에서 발견된 *Asterocaelum* sp.의 생활사는 다음과 같이 추정된다. 먼저 내구포자로부터 발아된 아메바가 방출되어 먹이를 포식한다. 먹이를 포식한 후에는 포식체를 소화하기 위하여 구형으로

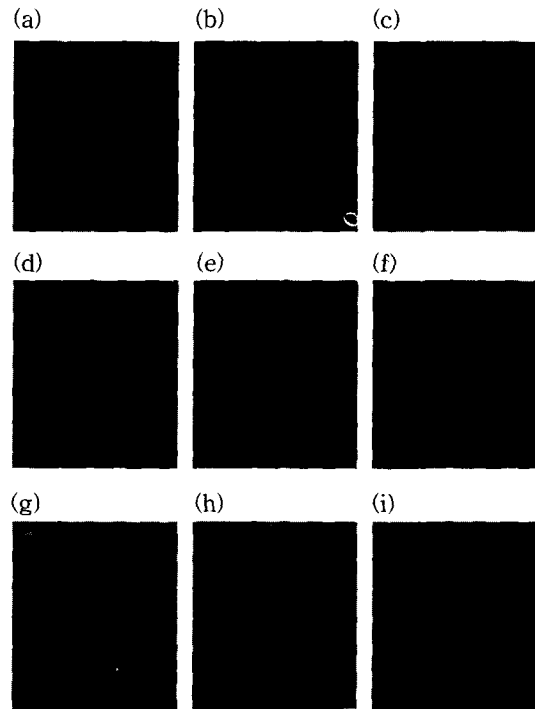


Figure. 2. Microphotograph of *Asterocaelum* sp. at each life stage, a) nutrient organism(x400), b) grazing of *Anabaena* sp.(x400), c)~d) digestion of *Anabaena* sp. and cyst formation steps (x200), e) cyst(x200), f) undigested matter(containing akinet and heterocyst of *Anabaena*) and cyst envelop(x200), g) clogging of cyst envelop(x100), h) resting cyst(x200), i) release of amoeba (x200)

변환된다. 구형으로 변환된 아메바의 체외각에는 투명한 막과 굵고 투명한 가시상의 돌기가 형성된다. 포식세포를 완전히 소화한 후에는 이러한 가시상의 돌기는 사라지고 구형의 투명한 막 속에 난형의 포자가 형성된다. 이 포자는 증식포자 혹은 휴면포자로 되고, 증식포자는 아메바를 방출하여 먹이를 포식하는 과정을 되풀이하는 것으로 추정된다.

2. 대청호 발생 *Asterocaelum* sp.의 발생례

이 종은 미국 조지아주 동북부의 Sidney Lanier 호(1969~1973)에서 처음으로 보고되었다. 발생시기는 초여름부터 가을까지로 발생지점은 하수처리수 유입지점이었으며 호수의 수질 개선 후에는 발생에 대한 보고는 없었다. 그 후 일본 木崎湖(1982~1983)의 연안지역 과 諏訪湖(1981)에 설치한 현장실험시설 내에서 발생되어 수면에 유백색의 스킴을 형성한 보고가 있으며 그 이후 현재까지 이 종에 대한 보고는 없었다⁹⁾. 미국의 Sidney Lanier 호에서 이 종의 먹이원은 사상 남조류인 *Anabaena planktonica*이었으며, 일본의 경우는 *Anabaena macrospora*인 것으로 밝혀졌다.

대청호에서 발생된 종은 위에서 보고된 직선상의 *Anabaena* spp. 이외에도 *Anabaena spiroides*, *Oscillatoria* spp.를 섭식하는 것이 관찰되었다. 남조류 이외에 규조류의 *Aulacoseria* spp.도 섭식하는 것이 관찰되어 문헌상에 나타난 외국의 경우보다도 먹이원이 더욱 다양한 것으로 생각된다.

3. *Asterocaelum* sp.의 cyst 발생량

1998년 대청호 *Asterocaelum* sp. 발생시 회백색 스킴이 형성된 문의 및 댐 지점과 스킴이 형성되지 않았던 회남 및 추동 지점의 수중에서 8월 27일부터 9월 7일까지 발생한 *Asterocaelum* sp.의 cyst 발생량은 Fig. 3과 같다. 1998년의 경우 스킴 형성지역이 좁고 기간이 짧아 스킴지역내의 수중 cyst 발생량이 적었다. 댐 지점에서는 85~594 cysts/ml이었고, 문의지점에서는 19~1,089 cysts/ml 범위로 일시적으로 약한 스킴 현상이 있었다.

일본 木崎湖의 경우는 1981년 9월 중순에서 10

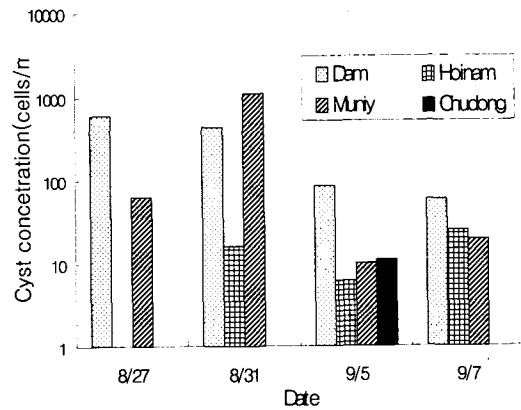


Figure. 3. Cyst biomass of *Asterocaelum* sp. at sampling sites in the Lake Daecheong

월 중순, 1982년 7월 상순에서 10월 상순에 걸쳐 발생하였고 스킴상태에서는 1ml당 100만~500만개 정도로 보고되었다(山本鎔子, 1997).

4. *Asterocaelum* sp. 발생시기의 수질환경

Asterocaelum sp. 발생 전, 후 시기의 대청호 조사지점의 수질경향을 보면 수온은 24.2~30.7°C, pH는 7.1~8.1, DO 농도는 6.8~17.1mg/l, 전도도는 95.5~142.5 μS/cm, 투명도는 0.5~3.7m, 총질소 농도는 0.871~2.867 mg/l, 총인 농도는 0.015~0.062mg/l, 클로로필 a 농도는 4.3~29.6mg/m³의 범위이었다. 여름철임에도 불구하고 수온과 pH는 집중강우로 인하여 낮은 편이었고 질소/인 농도비가 평균 49.1이었으며, *Asterocaelum* sp. 발생시기에는 33.1로 더 낮았다. 빛 이용성과 관련이 깊은 투명도도 낮았으며 우점 조류종은 *Anabaena* spp.이었다. 일반적으로 부영양호에서 여름철 가장 빈번하게 우점하는 남조류로는 *Microcystis* spp.를 들 수 있으며, 대청호에서도 매년 여름 *Microcystis*의 대량발생이 국지적으로 발생되고 있다²⁾. 본 조사시기에 사상 남조류인 *Anabaena* spp.가 우점하게 된 것은 여름철 집중강우로 인해 질소/인 비가 낮아지고 수온이 내려가면서 수환경이 질소고정능을 가진 *Anabaena* spp.의 증식에 유리한 조건이 형성되었기 때문으로 생각되며, 이런 *Anabaena*

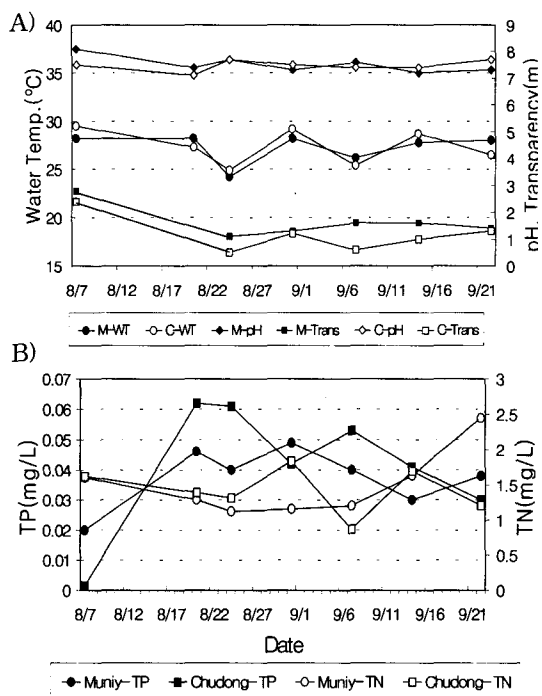


Figure 4. Variation of physiochemical water quality in the Muniy and Chudong sites from August 7th to September 21th 1998 (A: water temperature, pH, transparency, B: TN, TP).

spp.의 우점은 이를 먹이원으로 하는 *Asterocaelum* sp.의 발생을 촉진시킨 것으로 판단된다 (Fig.4).

Asterocaelum sp.가 발생한 시기의 각 수역별 *Anabaena* spp.의 발생량 변동은 회백색 알갱이나 스킴형성이 관찰되지 않았던 회남, 추동지점과 스킴이 관찰된 문의 지점에서 서로 다른 양상을 나타내었다(Fig. 5). 문의지점의 경우는 *Asterioclonium* sp.가 나타나기 시작한 8월 27일 이전에는 회남, 추동지점보다 *Anabaena* spp. 발생량이 높게 유지되었으며, 회남, 추동지점에서는 *Asterioclonium* sp.의 발생이 시작된 시기에 *Anabaena* spp. 발생량이 현저히 낮았다. 문의지점의 *Anabaena* spp. 발생량은 8월 7일부터 높게 유지되고 있으며 *Asterocaelum* sp.의 스킴이 사라진 9월 7일 이후에 급격히 증가하였다.

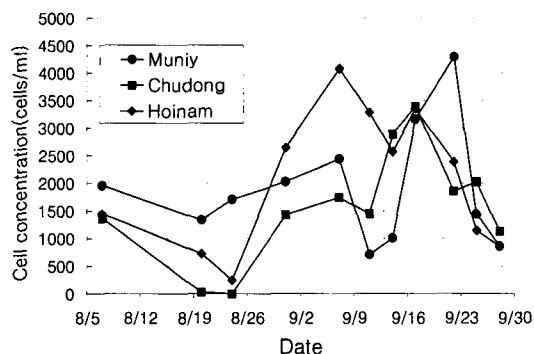


Figure 5. Temporal fluctuation of *Anabaena* sp. biomass at each sampling site

회남과 추동 지점은 대청호 중·하류에 위치한 수역으로 유입유량의 증가시 외부환경요인을 강하게 받는 지점으로서 조류의 증식과 사멸은 주로 외부기원성 영양염의 증감에 따라 조절을 받는 지점이나 문의지점은 이들 두 지점보다는 환경변동이 약하고 외적요인을 가장 늦게 그리고 서서히 받는 지점으로 보고되고 있다^{2), 3)}. 따라서 회남, 추동지점보다 강우 등의 외부 영향을 적게 받아 수질환경적으로 안정적인 댐과 문의지역에서 *Anabaena* sp.의 지속적인 번식이 용이하였고 이는 결국 이들을 포식할 수 있는 포식자들에게 노출될 수 있는 기회를 제공함으로써 이들 두 지점에서 포식성 원생동물의 증식이 많았던 것으로 추정된다. 그러나 문의지점에서 9월 11일 이후 *Anabaena* sp. 세포수의 급격한 증가를 나타내는 것으로 보아 *Asterocaelum* sp.의 강한 포식작용은 일정시기에 한정되는 것으로 보인다.

본 연구로 *Asterioclonium*의 발생과 수질환경과의 관계를 정확히 알 수는 없으나 댐과 문의지점에서 주로 발생된 점과 회남, 추동 수역에서 *Anabaena*의 수적 감소에도 불구하고 이들 *Asterioclonium*의 발생이 포착되지 않은 점으로 미루어 볼 때, 이들은 포식자이기 때문에 수질환경보다는 주 먹이원인 *Anabaena*가 얼마만큼 이들에게 안정적으로 공급되는가하는 것이 *Asterioclonium*의 대량 발생에 중요한 요인인 것으로 추정된다. 즉 수질환경과 이들과의 관계는 두 단계를 거치는 것으로 볼 수 있는데 첫 단계는 먹이원인 *Ana-*

*baena*가 발생될 수 있는 수질환경이고, 다음은 이러한 수질환경이 장기간 유지되어 *Anabaena*가 지속적으로 공급될 때 *Asterioclonium*의 발생이 유발된다고 추정된다. 1999년의 경우 회남, 추동, 문의 지점에서 *Anabaena*가 1,000cells/ml 이상인 기간은 8월말부터 9월초까지 약 2주간의 짧은 시기였고 *Asterioclonium*의 발생 징후는 나타나지 않았다. 따라서 이들이 발생될 수 있는 수질환경은 *Anabaena*의 지속적인 발생환경으로 추정되며 앞으로 이런 포식능에 미치는 환경영향에 대한 연구가 추진되어야 할 것으로 생각된다.

부영양화를 억제할 위한 한 방법으로 *Asterocaelum* sp.의 포식능을 이용하여 남조류 대량발생을 제어하기 위한 시도가 있었으나 현재까지 배양에 성공하지 못하였으며 원생동물 자체에 의한 2차 유기오염문제도 있다. 본 조사 결과 이들의 출현이 일정기간이상 높은 농도의 *Anabaena*의 발생을 필요로 하고 또한 왕성한 포식작용이 지속적이지 않고 일시적인 것으로 추정되며, 또한 이들의 정확한 생리, 생태가 알려져 있지 않기 때문에 수질정화의 실용화를 위해서는 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

IV. 결 론

1997년과 1998년 여름철 대청호 일부수역에서 회백색 스컴이 발생되었으며, 1998년 8월 27일부터 9월 7일까지 발생된 회백색 스컴을 조사한 결과, 사상 남조류 *Anabaena* sp. 포식성 원생동물인 원생동물문(Protozoa) 육질충강(Sarcodina) 무각목(Aco-

nchulinida)의 *Asterocaelum* sp.로 동정되었다. 이 종은 주로 *Anabaena* spp.가 안정적으로 발생하는 시기에 대량으로 출현하였고 출현시기는 일시적이었다.

참 고 문 헌

1. Park, H-K., S-U Cheon, S-I Park, M-H, Lee, J-K Ryu : Seasonal succession of phytoplankton in som artificial lakes of Korea. J. KSWPRC, 8(3), 150-158, 1992
2. 금강수질검사소 : 대청호 영양염류 오염부하량 관리안에 관한 연구(I). 1998
3. 금강수질검사소 : 대청호 영양염류 오염부하량 관리방안에 관한 연구(II). 1999
4. 小島貞男, 須藤陵一, 千原光雄 : 環境微生物圖鑑, 講談社, サイエнтиフィック. 1997
5. 환경부 : 수질오염공정시험방법. 1996
6. 정영호 : 韓國 動植物 圖鑑 제 9 권 淡水藻類편. 아카데미출판사, 1968
7. 廣瀬弘幸, 山岸高旺 編 : 日本淡水藻圖鑑, 内田老鶴圃. 1981
8. Komarek J. : A review of water-bloom forming Microcystis species with regard to populations from Japan. *Archiv Hydrobiologie, Suppl.* Bd. 92, Algological studies, 64, 115-127, 1991
9. 山本鎔子 : 無殼目 In 小島貞男 等 編, 環境微生物圖鑑, 講談社, サイエнтиフィック. pp 492-494. 1997