琉球大学学術リポジトリ

[報文]太陽光・人工光を複合利用した通気攪拌培養システム(光バイオリアクター)による藍藻類の多段式連続生産：第1報 光バイオリアクターの試作と改良

メタデータ	言語:
	出版者: 南方資源利用技術研究会
	公開日: 2014-10-26
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 川崎, 聖司, 小原, 浩, 儀部, 茂八, 金城, 清郎, KAWASAKI, Seisi, OBARA, Hiroshi, GIBU, Sigehachi, KINJOU, Seiro
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/0002016525

報 文

太陽光・人工光を複合利用した通気攪拌培養システム (光バイオリアクター)による藍藻類の多段式連続生産

第I報 光バイオリアクターの試作と改良

川崎聖司*, 小原 浩**, 儀部茂八**, 金城清郎***
(*兵庫県立姫路短期大学, **財団法人 地域産業技術振興協会,***沖縄県農業試験場)

Multistage Continuous Production of Blue-Green Algae by the Stirred Tank Photobioreactor System with Conjugated Utilization of Sun and Artificial Light

(I) Construction and Improvement of the Photobioreactor

Seisi KAWASAKI*, Hiroshi OBARA**, Sigehachi GIBU** and Seiro KINJOU***
* *Himeji College, Himeji, Hyougo* 670, ** *Foundation of Regional Industry and Technology Promotion Associaiion, Matsuyama, Naha, Okinawa* 900, ***Agricultural Experimental Station, Sakiyama, Naha, Okinawa* 903

In order to develop a continuous production system for blue-green algae provided with an in-tank diffuser of natural and artificial light, the trial manufacture and improvement of vertical three-step module plant involving, for example, a sunlight/artificial light conjugated transmitter were conducted.

A sunlight beam collected by a large-scale plane mirror and a concave mirror was transmitted into the tip of quartz rods located in a tank through quartz fibers. However, the damping factor of the light was unexpectedly high. Thus there was room for further study on the application of other devices, e. g., an optical duct to the transmission of the beam into the tank.

Two methods were employed to diffuse artificial light. Namely, one comprised fixing halogen lamps out of the tank and introducing the light therefrom into the quartz rods, while the other comprised directly lighting fluorescent lamps in the culture medium. The latter method seems to be advantageous at present from operational and economical view points.

緒 言

近年，国民一人あたりの摂取カロリーの充足と高齢化社会の到来を迎え，良質蛋白食品を含む栄養バランスのとれた食生活への転換に関心が集まって来ている．その手段の一つとして，我国ではスピルリナ，クロレラなどの微細藻類がいわゆる健康志向食品として従来より利用されており，今後，これらの生理活性化機能・体調調節機能が明かになるにつれて用途はますます拡大するものと期待されている．特に，スピルリナはクロレラと比較して藻体が大きく培養後の回収が容易で，消化・吸収も良いなど利点

* 〒670 兵庫県姫路市新在家本町1-1-12
** 〒900 沖縄県那覇市松山2-2-4
*** 〒903 沖縄県那覇市崎山4-222

が多い．

しかしながら，スピルリナを含む多くの藍藻は偏性光合成生物であるため[7]現在，商業規模での生産様式は湖沼，河川を改修したり人工浅底池を使用した太陽光による屋外培養（オープンプール方式）に依存している．そのため，立地場所の制約，大雨，気温低下，日照時間の変動など自然環境・気象条件の影響を受けやすい他，雑菌の異常繁殖による汚染によって培養の維持管理が容易でなく，同方式での操業安定性・生産性の飛躍的向上は期待できない状況にある．

現在，我国を含めて商業規模で生産されているスピルリナ属（*Spirulina*）は元来エチオピア，メキシコなど熱帯地域の塩湖に自生していたもので*Spirulina platensis*に分類されている．ところで，自生している微細藻群がすべて単一藻種の純粋な集合体とは考えにくい．柳本と斉藤[9]およびVamagimotoとSaitoh[10]はチャド湖より採取された藻から数種類の藍藻を分離して，より大型で増殖速度の速い可食性藻株の検索を行った結果，スピルリナ属と同じ科として分類されている*Oscillatoria sp*の成分が栄養的に*Spirulina platensis*と差がなく，回収も容易であることを報告している．現在，スピルリナ属の詳細な分類についてはいくつかの説があり，いずれも確定的なものではないと考えられる．また，商業規模での生産に関してはスピルリナ属以外の藍藻も検討の余地があろう．以上の事柄を考慮して，本報告では〝スピルリナ，藍藻類〟という名称をスピルリナ属の他に一部でアロスロスピラ属として分類されている藻種を含めて食用として栄養価値が高く安全な藍藻を指すものとする．

食糧源としてのスピルリナの利用は遙か有史以前に遡るとされているが，現在の商業規模での生産につながるスピルリナの再発見は1940年代になってからである．1960年代には世界的な食糧資源の不足に対する関心を背景にフランス国立石油研究所を中心に調査がなされた．以来，スピルリナの近代的培養技術の確立にむけてClémentら[1]，SamsonとLeduy[6]やLeduyとTherien[5]を始めとして多くの研究者が分離・培養を行っている．また，Fredricksonら[3]やlehana[4]は培養の動力学的解析を行っている．Terry[8]やCiferriとTiboni[2]は最近の技術成果および将来への展望について解説をしているが，実用化へ直結する新技術は未だ誕生していない状況である．

著者らは，最適増殖条件の制御が行いやすいタンク培養を基本として，槽内に太陽光・人工光の導入，拡散機構を備えた多段式連続培養システム（光バイオリアクター）を開発し，従来方式に比較して経済的で高効率な生産技術を確立することを目標とした．そのため，これまでに要素技術の検討，モジュールプラントの建設，主要構成機器の試作・改良および培養実験を行ってきたが，ここでは設備の概要および主要装置の製作，性能試験を通して得られた知見について報告する．

装置の試作開発ならびに改良

1）システムの概要

モジュールプラントの組立，建設は3層のステージを骨格として実施し，1階部分に付帯設備を，2階部分には同形の縦型円筒培養槽を段差をつけて3基設置した．配管は流路の変更により3基の培養槽が各々単独で回分・連続培養試験を，またこれらを直列に連結して3槽連続運転が可能なようにした．3階部分には，太陽光（自然光）集光・伝送装置を設置した構造になっている．これらシステムの概要を配管系統を中心にFig.1に示した．なお，当設備が大型の屋外施設であるため，1・2階部分には防雨，防風，防塵対策を施した．

2）自然光集光伝送装置

自然光集光伝送装置は基本的に，太陽の直達日射を採光用反射ミラーによって集光し，凹面鏡で光束を絞り込んだ後，最終的に培養槽内の石英ロッドに導入して光を放散させる機構と，最大光量が得られるように常時太陽を追尾する光センサーおよび反射ミラーの駆動機構とから構成されている．

当初，集光・導入部分には4回の光の反射を

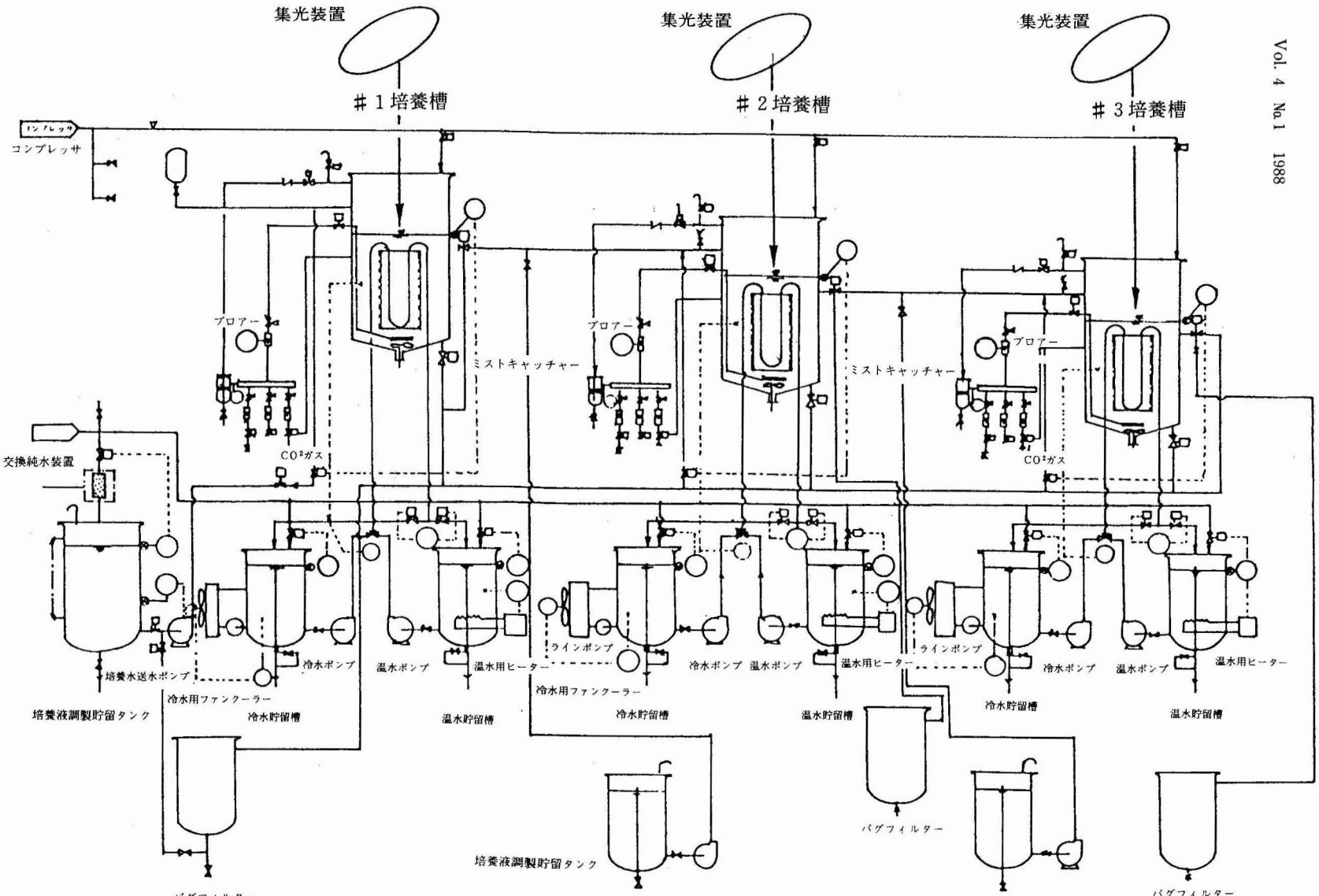

Fig. 1. Flow-sheet of the Module Plant.

経て光束を得る装置を試作したが，鏡面やレンズの僅かなずれが最終的に大きく影響し調整困難となった．また，反射回数の増加により光の累積減衰率が大きくなり，導入側の光量も所期の予想より低下した．そのため，光を2回反射させるだけで槽内に伝送させる装置を新たに製作した．この装置を模式的にFig. 2に示した．平面反射鏡（1,200×1,600mm）からの太陽光を光束までに絞り込むための凹面鏡は放物面の一部をそのまま曲面鏡にしたような楕円形のパラボラ型（長軸1,412mm，短軸1,200mm）でありパラボラ反射鏡の中心から45度の角度の下方約700

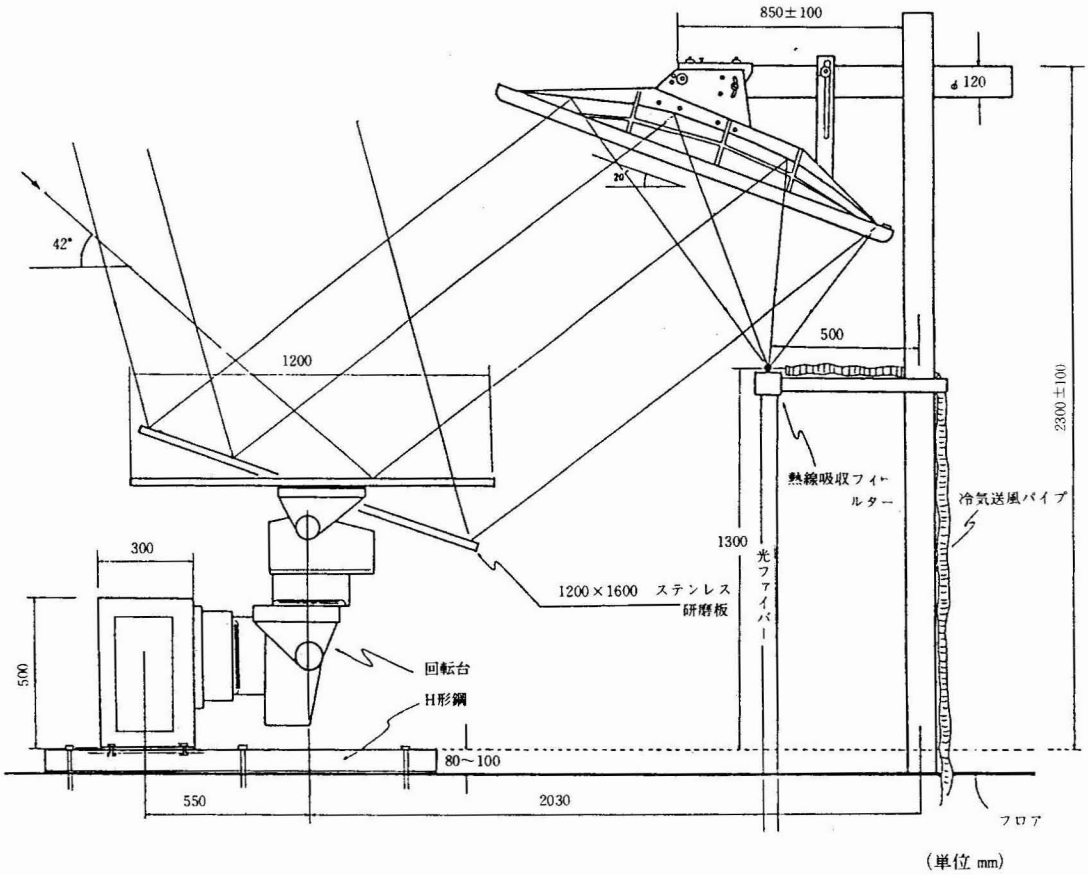

Fig. 2. Sunlight Refraction Collection System.

mmの所に90度の角度で焦点を結ぶので光の減衰率を最小限に抑える点に特徴がある．太陽光は平面反射鏡で反射され焦点に集められるが，その後の光の拡散角も90度と大きくこのままでは培養槽内に光を入れるための光束状態を作り出すことが出来ない．そこで，焦点に近くに，槽内に設置した８本の石英ロッドに対応した８本の光ファイバーの束の上部を固定し，その光ファイバーを通して自然光を石英ロッドに導入した．この機構の最大の問題点は1,000℃以上の熱が焦点に集まることである．そのため，熱線吸収フィルターあるいは類似の仕組みを装着しないと石英性の光ファイバー自身が溶融してしまうことになる．今回の実験では焦点部分にガラス性の熱線吸収フィルターを着装し，さらにその部分を空冷することにより対処した．今後の課題として平面反射鏡や曲面反射鏡の加工に際し熱線吸収性の特殊フィルムを張る方法や他の処理により焦点での温度上昇を極力抑える手段がとられるべきであろう．

また，太陽光の導入法としては他に光ダクト（円筒形の内側に高反射性の塗料を塗布，あるいは同様の処理を施して一端から入射した光を効率よく他端に反射，伝搬する機構）についても検討する必要があろう．

石英ロッドの一端に導入された光は，原理的には種々の方法でロッドより放散させることが可能であるが，一般の照明用として試作・開発されている場合にはそのほとんどが他端のみからであるため，本方式が目標とするように途中から極力均一の光量を得るための検討はなされていない．そのため，ロッドの加工試験を行い，最終的にはロッドに沿って円周の1/8 ～1/10程度の幅の酸化チタン被模を接着し，光をその縦縞の反対方向へ扇状に反射放散させる方法を採用することにより解決した．現在の技術水準ではこの方式が最も放散効率の良いものであろうと考えられる．

3） 人工光集光伝送装置

人工光集光伝送装置は，夜間および昼間直達日光がない曇りの場合などの光源として設置したものである．光源としては，最初ハロゲンランプ（21V，150W）を培養槽の上蓋上部に装着し，その光を対応する槽内の石英ロッドに導入する方式を採用した．しかしながら，槽内での光の放散状況は設計当初の予想値より遙かに低レベルであり，またランプの発熱が問題となったので，新たに蛍光管（32W，28φ×1,198mm）による槽内での光の直接放散機構を付加することとした．

放散部分である石英ロッドは極めて破損しやすく取扱いが困難なため，全てメタアクリル製のパイプに密閉し作業性を向上させた．また，蛍光管も培養液中で直接放散させる方式を採用したので破損，漏電防止のため同パイプ内に完全密封した．石英ロッド，蛍光管の槽内における取付法は，Fig. 3 に示すように支持棒を介し

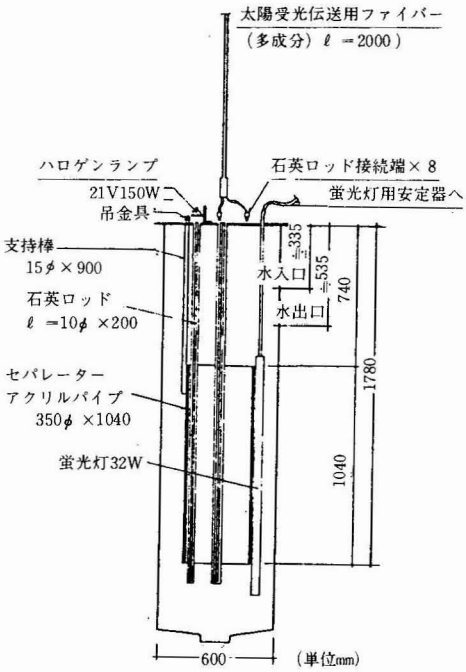

Fig. 3. Light Transmission Emission System in the Vessel.

て上蓋に固定された直径35cmのメタアクリル製ドラフトチューブの円周上に垂直に配置し，必要に応じて着脱，洗浄が容易なようにした．

4） 培養槽

ステンレス製培養槽（600φ ×2,149mm）の内

容積および有効液量は各々約500，400ℓで内部には培養液温調整のための熱交換用の配管をほどこしてあるほかpH計などを備えてある．また，培養状況を把握するための観測窓を8個所設置した．

培養液の攪拌混合には，槽内底部に設置した通気孔から吐出する混合空気によって液を強制循環させるエアーリフト方式を採用した．

5) 熱・冷熱供給装置

実験室規模での培養試験の結果，対象とするスピルリナの至適増殖温度は35～37℃付近であり，40℃以上では急速に増殖速度が低下することが知られた．培養槽内には人工光源や自然光を導入，拡散する石英ロッドを配置しているので熱による液温上昇を防止する必要があり，また冬期の気温低下も考慮しなければならない．そのため，槽内の熱交換パイプに温水・冷水を供給する装置（温水貯留槽，冷水貯留槽，送水ポンプ，切替用電磁弁などにより構成）を各槽独立に設置した．制御精度は設定値に対し±1℃以内である．

6) 計測器類

培養槽内の環境条件を測定・記録して状況を把握するとともに制御機器などにそのデーターを転送し，増殖条件を最適に保つように自動制御することを目的として計測機器を設置した．pH計，温度計，酸素濃度計などは既存の機器を使用した．また，市販の携帯用デジタル照度計も適宜使用した．

7) 制御装置

制御装置は制御盤，制御および管理用コンピューター（PC 9801），各種計測機器，周辺機器などにより構成され，培養槽内の光量，pH，温度，酸素濃度の測定・監視とその制御を目的とした．

要　約

自然光，人工光の槽内拡散機構を備えた藍藻類連続生産システムの開発を目的として，太陽光・人工光複合伝送装置等を有する縦型3段式モジュールプラントの試作・改良を行った．

太陽光集光，伝送には大型の平面鏡および凹面鏡により得られた光束を石英製の光ファイバーを通して槽内に設置した石英ロッドの先端に導入する方式を採用した．しかしながら，光の減衰率は予想値よりも大きく，光束の槽内への伝送部分には光ダクトなど他の方式についても検討する余地が残された．

人工光拡散法には，槽外にハロゲンランプを固定しその光を石英ロッドに導入する方法と蛍光管を直接培養液中で点灯する方法について試験を行ったが，現状では蛍光管のほうがエネルギー変換効率，操作性，経済性の面で有利であった．

今後，本装置での培養試験をとおして性能向上を図りたい．

謝　辞

本報告は，財団法人地域産業技術振興協会等が財団法人機械システム振興協会の委託を受けて実施中の「藍藻類生産システムの開発に関するフィージビリティスタディ」の成果の一環であります．この研究の実施にあたっては同協会の藍藻類生産システム分科会（委員長：軽部征夫東京大学教授）委員各位にご指導をいただきました．

ここに慎んで関係各位に謝意を表する次第であります．

参考文献

(1) Clément, M., Lonchamp, D., Rebeller, M. and Landeghem, H. V. (1980): The Development of Spirulina Algae Cultivation, *Chem. Engineering Sci.*, **35**, 119-126.

(2) Ciferri, O. and Tiboni, O. (1985): The Biochemistry and Industrial Potential of *Spirulina, Ann. Rev. Microbol.*, **39**, 503-526.

(3) Fredrickson, A. G., Magee, R. D. and Tsuchiya, H. M. " Mathematical Models for Fermentation Process " in Advances in Applied Microbiology, vol. 13, Ed. Perlman, D., p.419-466,(1970), Academic Press, New York.

(4) Iehana, M. (1983): Kinetic Analysis of the Growth of *Spirulina sp.* on Continuous Culture, *J. Ferment. Technol.*, **61**, 457-466.

(5) Leduy, A. and Therien, N. (1979): Cultivation of *Spirulina maxima* in Annular Photochemical Reactor, *Canadian J. Chem. Engineering*, **57**, 489-495.

(6) Samson, R. and Leduy, A. (1985): Multistage Continuous Cultivation of Blue-Green Alga *Spirulina maxima* in the Flat Tank Photobioreactors with Recycle, *Canadian J. Chem. Engineering*, **63**, 105-112.

(7) スタニエ, R. Y., エーデルバーグ. E. A., イングラム, J. L. 著, 高橋, 斉藤, 手塚, 水島, 山口 訳: 微生物学 (上) p. 37, 培風館, 昭和61年

(8) Terry, K. L. (1985): System Design for the Autotrophic Production of Microalgae, *Enzyme Microb. Technol.*, **7**, 474-487.

(9) 柳本不勝, 斉藤均 (1981): スピルリナ保存株中に共存するらん藻, 食総研報, 第38号, p. 96-101.

(10) Yanagimoto, M. and Saitoh, H. (1982): Evaluation Tests of a Large Spiral Blue Green Alga, *Oscillatoria sp.*, for Biomass Production, *J. Ferment. Technol.*, **60**, 305-310.