バイオスフィア 2

——中から見たその実態——

大野 英一・高倉 直*

アリゾナ大学農学部・* 東京大学大学院農学生命科学研究科

Biosphere 2

——A Close Look from Inside——

Eiichi ONO and Tadashi TAKAKURA*

*Department of Agricultural and Biosystems Engineering, The University of Arizona,
403 Shantz Building Tucson, AZ 85721, U. S. A.*

**Department of Biological and Environmental Engineering, Graduate School of Agricultural and Life Sciences,
The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan*

1996年9月30日受付

1. はじめに

バイオスフィア 2 は、アリゾナ州ツーソン市の市内より車で 40 分程の、オラクルの砂漠地に位置する大規模な閉鎖人工生態系施設である。この人工生態系施設は、五つのバイオームと農業・居住区によって構成されている。1991 年より 2 年間、8 人の人間がこの閉鎖された生態系の中で生活し、世界の注目を集めた。なお、この施設の名前はわれわれの住む地球バイオスフィアをバイオスフィア 1 として、その 2 番目という意味で、命名されたものである。

この世界初の大規模な閉鎖人工生態系施設も、現在、大きな転機を迎えている。最も大きな変化は、閉鎖居住実験を行わなくなったこと、およびコロンビア大学と 5 年の契約をし、地球環境問題を中心とする研究、教育用の施設としてバイオスフィア 2 の利用を進めることになったことである。これに伴い、研究者や学生であれば、バイオスフィア 2 内部に入ることが可能になったことも変化の一つである。今回、アリゾナ大学農学部の大学院レベルの授業であるバイオロジカルシステムシミュレーション（高倉担当）の一環として、このバイオスフィア 2 の内部に入る機会を得たので、そこで得た知見も含めて、その現状について紹介してみたい。

2. バイオスフィア 2 の生い立ち

バイオスフィア 2 プロジェクトは、John Allen や Mark Nelson のアイディアに（たとえば、Allen, 1991）、テキサスの億万長者 Edward Bass が出資しスタートした。この約 200 億円にも上る大規模なプロジェクトについて関連分野の研究者らは、閉鎖居住実験開始前までは一部の専門家を除いて、おおむね好意的に見ていた。しかし、The Village Voice 1991 年 4 月号に掲載された Marc Cooper の記事（Cooper, 1991）を端緒として、バイオスフィア 2 をめぐる論調は一転、懐疑的なものとなった（Stickler, 1993）。特に閉鎖居住実験開始後に起こった、いくつかのトラブル、なかでもその気密性に対する疑い（たとえば、Takakura, 1992 に詳しい）とメディアに対する対応のまずさから、バイオスフィア 2 の科学的信頼性に対する懐疑的な論調が広がった。その一方で、観光施設としてのバイオスフィア 2 は一応の成功を収めているといえよう。たとえば 1995 年には単年度で海外からの観光客を含む、16 万人もの人々がこの閉鎖人工生態系施設を訪れている。この様にバイオスフィア 2 は、アリゾナ州の観光資源の一つとしての位置を着実に占めつつある。また、バイオスフィア 2 自体も、積極的に広報活動を行ってきた。たとえば、ツーソン市内では、テレビ CM も流され、2 人分の入場料が半額となるクーポン券等も容易に手

に入れることができる。もっとも、こうした広報活動の積極さが、逆にその科学的根拠に疑いを持つ人達の考えを強固なものにしてきたともいえる。

バイオスフィア2の第1次閉鎖居住実験は、1991年9月に開始された。この実験開始5か月後に、酸素濃度が予想外に低下しているという重大な事実が判明した。結局、酸素濃度は、閉鎖開始後16か月の間に自然環境レベルの21%から、14%にまで低下した。

これは、人間の健康に影響を与える程であり、バイオスフィア2の建設に先だって実施されたテストモジュールでの実験では、起こらなかった現象である。結局、1993年1月に他の成分に影響を与えないよう、純粋に酸素だけが注入された(Alling and Nelson, 1993)。生命活動によるガス交換では、1 mol の酸素と1 mol の二酸化炭素が等価であるが、この閉鎖施設内では、酸素の消費量が二酸化炭素の発生量を大きく上まわっていた。酸素が一体どこへ消えたのかについては、Lamont-Doherty Earth Observatory の Severinghaus (1994) らにより、詳細に検討された。その結果、1) 酸素の消失は、有機物に富んだバイオスフィア2の土壌中の微生物の呼吸によって、2) また、微生物の呼吸により生じた二酸化炭素は構造物のコンクリートと反応し、炭酸カルシウムを形成している、ということが明らかになった。バイオスフィア2内部のコンクリートの表面付近は、外部のコンクリートに比べて、おおむね10倍の濃度で炭酸塩化していると報告されている。

二酸化炭素濃度は大きく上昇し、4000 ppm にも達した(Alling and Nelson, 1993)。結局、二酸化炭素は、スクラバにより化学的に除去することになった(図1で濃度が大きく減少していることから明らかであろう)。これらに加えて、不運なことに、第1次閉鎖居住実験期間の冬は、アリゾナとしては例年にない天候不順であったこともあって、十分な量の農業生産を維持することができなかった(Luke, 1995)。この様に、閉鎖居住実験はさまざまな困難に直面した。

結局、いくつかの曲折を経て、バイオスフィア2の発案者の一人で、完成後もマネジメントを行っていた John Allen が出資者の Edward Bass によって解任された。この解任劇は、1994年3月に開始された第2次閉鎖居住実験中に行われ、第2次実験は1994年9月に途中で打ち切られた。こうしたバイオスフィア2の、一連のマネジメントの変化の一つとしてバイオスフィア2は、1996年1月より、コロンビア大学との5年契

図1. 二酸化炭素濃度の経時変化 (Severinghaus *et al.*, 1994)。

約を行った。具体的には、コロンビア大学の Lamont-Doherty Earth Observatory が支援を行うことになった。すでに1996年5月より、バイオスフィア2をキャンパスとして利用する最初の学部レベルの授業が行われている。このマネジメントの変化の過程の中で、閉鎖居住実験については、そこから得られる科学的知見は少ないと判断され、第2次閉鎖居住実験が中止されて以来、閉鎖居住実験は行われていない。

コロンビア大学との提携を含む、これら一連のマネジメントの変化は、アリゾナ大学を含め、周辺の研究者から概ね好意的に取られている様である。

3. バイオスフィア2の内部

先述のとおり、1996年6月に、われわれはバイオスフィア2内部に入る機会を得ることができた。案内役は、第2次閉鎖居住実験の参加者で、現在は、IAB (Intensive Agriculture Biome) のマネージャーである Tilak Ram Mahato 氏であった。IAB 外部でブリーフィングを受けたあと、われわれはそろってエアロックに入った。エアロック脇には開閉の時刻表が示されており、少なくとも1時間おきには、開閉されている様である(図2)。エアロックシステム内部は、意外と簡素なものという印象を受けた。

われわれはまず最初に、IABを訪れた。IABでは、これから地球温暖化に関する研究として、二酸化炭素濃度と気温を高く設定しての、作物生育実験が行われる予定であるということで、われわれが訪れた時点では、IAB内部はその実験の準備中であつた(図3)。

その一方、熱帯雨林バイオームは、かなり鬱蒼とした状態であつた。熱帯雨林バイオームでは、LI-COR社の計測器を用いた光合成速度の測定実験も行われてお

AIRLOCK OPENING TIMES—effective 2/12/96	
Weekdays	Weekends/Holidays
0700—Habitat Airlock	0900—Habitat Airlock
0800—Savanna Airlock	1000—Habitat Airlock
0900—Savanna Airlock	1100—Habitat Airlock
1000—Savanna Airlock	1200—Habitat Airlock
1015—Savanna Airlock	1300—Habitat Airlock
1100—Savanna Airlock	1400—Habitat Airlock
1200—Savanna Airlock	1500—Habitat Airlock
1245—Savanna Airlock	1600—Habitat Airlock
1400—Savanna Airlock	1700—Habitat Airlock
1500—Savanna Airlock	
1530—Savanna Airlock	
1600—Habitat Airlock	
1700—Habitat Airlock	

図2. エアロック脇に掲示されている開閉時間。

図3. 農業バイオーム (IAB), 人物は Mahato 氏。

り、樹冠部も含めた光合成速度の計測が行われていた。また、樹液流速の計測実験も行われていた。なお、熱帯雨林バイオームでは、日中は継続的に、夜間は断続的にミストが放出され、湿度のコントロールが行われている。なお、バイオスフィア2では、各々のバイオームの気象は Biome Supervisory Controller と呼ばれる HP9000/375 上で走るエキスパートシステムによってリアルタイム制御されている。このエキスパートシステムの開発環境としては、G2 が採用されている。また、環境モニタリングシステムとしては、Sun Sparc 2 上に、PVMS (the Process Variable Monitoring System) と呼ばれるシステムが開発され、二酸化炭素、光、気温、湿度、気流、水流、気圧や海洋バイオームの水質がモニターされている (Stewart, 1991)。これらモニ

タリングデータ等は、さらに Oracle のデータベースアプリケーションに保存されるシステムとなっている。

居住スペースは、おおむね初期のままであったが、閉鎖実験を行わない現在、不必要となった居住スペースは、今後、研究・教育用のスペースとして順次改造されて用いられるということであった。

砂漠バイオームでは、草本類が優先し、砂漠というよりも、むしろサバンナの様にも見えた。実際、初期に導入された多肉植物は成長が遅いこともあり、多くの小さな多肉植物は枯死している (Inside the Apparatus, 1995)。奇妙なことに、最も空調が効いていたのは、この砂漠バイオームであった。枯死寸前の植物の休眠を、低温処理により打破するためであるという。なお、現在、それぞれのバイオームはビニールシートで区切られており、個々のバイオームは、分断されている。これは各々の実験が、各バイオーム単位で行われているためである。

バイオスフィア2には、二つの巨大な「肺」がある。この肺は、バイオスフィア2内部の圧力を調節するのである。日中に暖められた空気は膨張し、バイオスフィア2の構造物に圧力がかかる。場合によっては、この圧力が、ガラスドームを吹き飛ばす可能性もある。この余分な圧力を、それに耐えるような構造物を造ることによって防ぐのではなく、ゴム風船が膨らむような形で、この体積変化を収縮可能な巨大な部屋を建築することで、バイオスフィア2はその問題を解決している。われわれは、この巨大な肺の内部にも入ることができた。肺の内部はその底部が水の貯蔵タンクにもなっており、管理用のポートまで備えており、壮観である。

海洋バイオームの設計顧問であった、スミソニアン研究所の海洋生態学者 Walter Adey が、「予算上では、

図4. 海洋バイオーム。

工学と建築設計が優先されていた」と指摘しているが (Lewin, 1992), 実際に, 生物学的・生態学的側面よりむしろ工学的な側面に見るべきものが多いというのが, 今回の見学を通しての実感であった。

4. バイオスフィア 2 からの教訓

4.1 二つの人工生態系概念

一般に, 閉鎖人工生態系と言う場合, 以下の二つの概念があると考えられる。

1. 自律的な物質循環, 食料供給等を目的として, 工学的なシステムの一つとして造られる閉鎖人工生態系。いわゆる, 宇宙空間における生態系の構築で, 一般に CELSS (Controlled Environment Life Support Systems) と総称される。この場合, 人工生態系は, 必ずしも地球の生態系の模倣である必要はない。

2. 地球環境のある特定部分を切りだし, その中で物質循環, 生物相互の関係, あるいは動植物の挙動等の科学的な調査を行うことが目的の, 実験生態学的な閉鎖人工生態系。この場合, 人工生態系は, 地球の生態系の一部を切り出したもの, ないしは, 地球の生態系をスケールダウンしたものとなる。

以上の観点から考えると, バイオスフィア 2 では, 上記の二つの閉鎖人工生態系の性格を未整理に混在させていたといえる。たとえば, 閉鎖環境内での物質循環, 自給自足システムの確立という CELSS の構築を当初の主要な目標としていながら, 砂漠を含む地球の既存のバイオームをそのまま人工生態系デザインのメタファとして用いている。しかしながら, たとえば, CELSS の維持という視点から考えると, 生産性の低い砂漠バイオームを維持することは, 目的にあったものではない。また, Zimmerman (1992) の指摘にもあるとおり, なぜ五つのバイオームが選ばれたのかその理由が, 必ずしも明確ではない。さらにまた, はたして CELSS に複数のバイオームが必要なのかという疑問

も生じよう。また, 地球の土壌を CELSS の構成要素として, CELSS が必要とされる様な空間(具体的には宇宙空間であるが)に持ち出すことは現時点で意味があるのかどうか (バイオスフィア 2 では約 30 000 t の土壌が使われている), という点も指摘できよう。その一方で, バイオスフィア 2 では, 閉鎖系内の植物・昆虫の遺伝的研究も企画されていたが (Lewin, 1992), これは実験生態学的な実験であり, CELSS の構築という目的とは何ら関係がない。この様に二つの概念の閉鎖人工生態系実験を未整理なまま同時に行おうとした点だが, 初期のバイオスフィア 2 の運営上の混乱の原因であったといえよう (表 1 参照)。

実際, 現在のバイオスフィア 2 は, 先述のとおり, 初期の主要な目標の一つであった, 閉鎖環境内での物質循環, 自給自足システムの確立という目標を放棄し, 環境・生態系の調査を主眼とする実験生態学的な閉鎖人工生態系にその様相を変えている。バイオスフィア 2 の基本デザインから考えると, この変化は妥当なものであると考えられる。

現在, NASA の JSC (Lyndon B. Johnson Space Center) では Early Human Testing Initiative (EHTI) と呼ばれるプロジェクトが進行中である。このプロジェクトは, 三つのフェイズに分かれており, 最終的なフェイズ 3 では, 4 人の人間を 60 日および 90 日にわたって CELSS に隔離する予定である (Erickson, 1996)。このプロジェクトで用いられる CELSS は, バイオスフィア 2 とは異なり, システムの構成要素を極めて限定した設計となっている。とくに CELSS 型の人工生態系の構築に当たっては, こうしたアプローチが現実的であると考えられる。

4.2 立地条件による制約

バイオスフィア 2 から得られる教訓は他にもある。たとえば, あたりまえのようだが, 日照時間は, 立地

表 1. 閉鎖人工生態系概念。

	CELSS 型	実験生態学型
目 的	宇宙空間での自律的な物質循環食料供給システムの構築	地球環境, 物質循環, 生物相互の関係等の理解
人工生態系モデル	地球の生態系の模倣でなくともよい	地球の生態系の模倣ないしは一部分
人工生態系の構成要素	地球の生態系を構成するものならびに, 工学的なシステム。一般に人間も構成要素となる	地球の生態系を構成するもの。必ずしも人間は構成要素とはならない
システムの閉鎖・気密性	一般に, 高い閉鎖・気密性が要求される	実験・調査の目的による
人工生態系の評尺度価	人間, あるいは生物の継続的生存の可否	人工生態系の再現度の高さならびに再現の合目的性

の環境条件に大きく左右されるということである。強力な補光装置や、遮光シャッターなどを備えない限り、大規模な人工植生の日照時間をコントロールすることは難しい。実際、バイオスフィア2の熱帯雨林バイオームの日長の年変化は、地球上に実在するどの熱帯雨林よりも大きいことを、第1次閉鎖居住実験のクルーで、植物学者の Linda Leigh は指摘している (Leigh, 1995)。これは、実験生態系型の人工生態系では、特に留意すべき問題となろう。

4.3 光環境の重要性

バイオスフィア2の照度は意外と低く、透過率でおおむね45%程度である。これは熱帯雨林の維持には問題がないと考えられるが、砂漠植生の維持や農業生産については、問題となるレベルである。また、屋根素材の制約により、バイオスフィア2内部では、紫外線が欠如している。設計段階でも、価格が安く、紫外線は透過するが、同時に大気に対しても透過性の高いプラスチックを用いるか、プラスチックと比較して価格が高く、かつ一般に紫外線の透過性の低いガラス（紫外線を透過するガラスは極めて高価である）を用いるかという問題について検討が為されたが、結局、プラスチックとガラスを共に用いる方式が取られた (Allen, 1991)。蜂の絶滅（後述）については、この紫外線の欠如も可能性の一つとして指摘されている。

4.4 ある特定種の絶滅・偏った繁殖

バイオスフィア2では、植物ではいくつかの雑草が、昆虫では、アリ (*Paratrechina bruesii*) とゴキブリの繁殖が問題となった。ゴキブリは、熱帯雨林バイオマスの分解者として意図的に導入された exotic *surinam* cockroach ならびに、建設途上に侵入した他のゴキブリが繁殖した (Alling and Nelson, 1993)。その一方で、バイオスフィア2に導入された蜂 (bumble bee, leaf cutter bee, carpenter bee) は絶滅に至った。正確な理由は判っていないが、これには表2に示すようないくつかの理由が指摘されている (Mahato, 1995)。また、蜂（蝶についても絶滅した）が絶滅した結果として、

表2. 蜂の絶滅について考えられる理由。

1. 閉鎖環境であること
2. 紫外線の欠如
3. 高二酸化炭素濃度
4. アリとゴキブリの遍在
5. 導入の時期
6. 高濃度の N_2O (～70 ppm)

人為的なコントロールが為されなければ、長期的には虫媒花植物も絶滅に向かうであろう。こうした特定種の絶滅や偏った繁殖のコントロールは、今後の課題である。

5. おわりに

以上、バイオスフィア2の誕生の経緯と、現況ならびにこのプロジェクトから得られる教訓について、簡単に整理してみた。とくにここで論じた、バイオスフィア2の試みから得られる教訓は、全体のほんの一部に過ぎないであろう。CELSS型、実験生態系を問わず、今後このような閉鎖人工生態系を構築するプロジェクトは増加すると考えられる。そうした中で、先駆的な事例として、今後新たなプロジェクトを企画・設計するにあたって、常に顧みられるべきプロジェクトではないであろうか。

さまざまな批判にさらされてきたバイオスフィア2のマネジメントであるが、科学的な見地から見て、改善が見られることもまた確かな様である。コロンビア大学との協力のもとに行われる、今後の実験生態学施設としてのバイオスフィア2から得られる成果に期待したい。

文 献

- Allen, J. 1991. Biosphere 2; The Human Experiment. Penguin Books, New York, pp 64.
- Alling, A., Nelson, M. 1993. Life under Glass, The Inside Story of Biosphere 2, The Biosphere Press, Arizona.
- Cooper, M. 1991. Busting the biosphere bubble. The Village Voice. April 2, pp 24.
- Erickson, J. 1996. EHTI schedule. <http://pet.jsc.nasa.gov/ehti2>.
- Inside the Apparatus: The Biosphere 2 Desert, 1995. Biosphere 2(2): 16-20.
- Leigh, L. 1995. Biosphere 2 tropical rain forest biome management manual. http://www.netSPACE.org/biosphere2/vir_tour/r_forest/.
- Lewin, R. 1992. Reevaluation of biosphere 2 (バイオスフィアIIの再評価). Sci. J. Kagaku (科学) 62: 476-479.
- Luke, T. W. 1995. Reproducing planet earth?: The hubris of biosphere 2. Ecologist 25: 157-162.
- Mahato, T. R. 1995. Intensive Agriculture Biome. http://www.netSPACE.org/biosphere2/vir_tour/iab/.
- Severinghaus, J. P., Broeker, W. S., Dempster, W. F., MacCallum, T. K., Wahlen, M. 1994. Oxygen loss in Biosphere 2. EOS Trans. 75(3): 33, 35-37.
- Stewart, R. L. 1991. Biosphere 2 nerve system. Commun. ACM 34(9): 69-71.
- Stickler, J. C. 1993. Rebuilding the image of Biosphere 2. Publ. Relations J. 49(2): 5, 28.
- Takakura, T. (高倉 直) 1992. Plants and their environment in closed artificial ecosystems (閉鎖人工生態系における植物と環境). (Japanese text) Environ. Control in Biol. 30: 95-100.
- Zimmerman, M. 1992. Biosphere 2: Long on hype, short on science. Ecology 73: 713-714.