6

筑波大学 4 年　長井　春雅

くらら 生命の種

生命の種

研究の目的

38 億年の試行を経て、環境への適応力の獲得に成功した生物は、時に人類が達成した最先端技術よりも優れた能力を有している。このような生物特有の能力を模倣する、自然から着想を得る (=Bio-inspired) という視点は、デザインだけでなく、工学、経済学、AI、医療など多岐にわたる分野で活かされ、様々な取り組みがなされてきた。
本案は、卒業論文「Bio-inspired デザインの可能性：人類の極限環境への適応を目指して」の研究成果をもとに、生物の環境適応の仕組みを応用した建築の新しい在り方を提示しようとするものである。
「人類がいかに生態系サイクルに適応し、循環に参加するべきか」という Bio-inspired デザインの課題に対する建築提案の試みである。

研究の計画

ナミブ砂漠において、本研究作品「生命の種＝生態コロニー」の半永続的な自立を目指す計画である。人間が手を加えたり、人工的な保水構造で、生態コア部分の温湿環境を保ち、水や養分を投与することで、砂漠の草原への遷移プロセスを援助し、生態系の成立と循環を生み出すことを目指す。水源には雨水、霧、露があり、生物から発想を得た集水装置が担う。コア部分を覆う外構が、日射を部分的に遮り、温湿度の維持をサポートする。生態系の成熟に応じて、人間の補助や人工的な機構から自立するために、段階的に養分獲得能力や保水力を生物に置き換えていく。最終的にコア部分では、集水装置や生物自体の保水機能により水を保ち、光合成する生物が不足する炭素養分を空気中から固定する。さらに、人間が排出する廃棄物が窒素養分を供給することで、半自立した生態系を内包する建築となる。

１：生態コア部の形成

炭酸カルシウム法（MICP法）

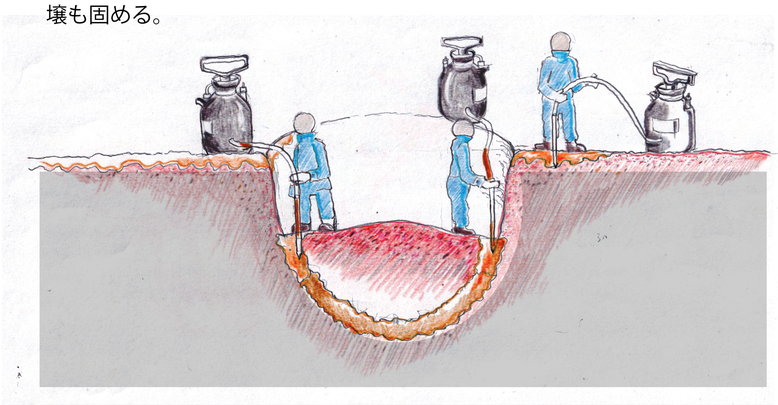
炭酸カルシウム法とは、Sporosarcina pasteurii などの細菌が、尿素を加水分解する過程で炭酸カルシウムが生じ、接着剤のように砂粒を結合させ、砂岩に変化させる方法である。施工方法として実現した事例はないが、コンクリートのヒビを微生物の技術によって塞ぐ技術は実用化され、新千歳空港などで使用されている。ナミブ砂漠での実設計に向けて、適切な方法を今後の研究や実験によって明らかにしたい。

砂を固める目的は３つ。
１. コア部分や貯水槽の形を保つ
２. 砂の移動を防ぐ
３. 炭酸カルシウムは土を微アルカリに保ち、植物が育ちやすい環境を保つ

この製法は、地下水汚染をしない点と大量にある砂を建材として利用することで、現地に運ぶ必要のある材料が少ない点で優れる。

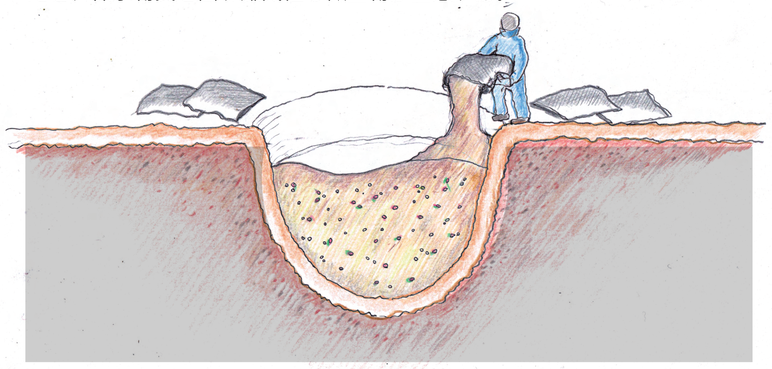
１−１ コア下部の形成・土台形成

はじめに、砂漠に穴を掘り、コア下部を炭酸カルシウム法によって形成する。砂を被せながら数センチずつ固めることで、3d プリンターのように積層させて形作る。固まる速度について、初期の砂岩表面を約 28 時間で形成でき、1 週間で最適な構造強度に達する。また、砂の移動を防ぐため、周辺の土壌も固める。



１−２ コア下部に材料を投入

コア内部には、
上半分：「生ごみ」「休眠状態の好気性微生物」「種子」
下半分：「保水剤」「粘土」「休眠状態の嫌気性微生物」を入れる
最終的にコア下部は、低酸素状態になるため、主に貯水と保水の役割を持たせ、保水物質を出す嫌気性の微生物が生息する。

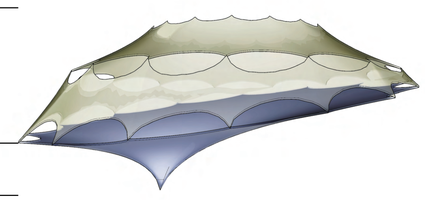


２：集水装置の組み立て

集水装置

集水装置は、木組のドーム内に、２種類の布を張った構造になっており、それぞれの布の性質により、霧や雨水を収集する。

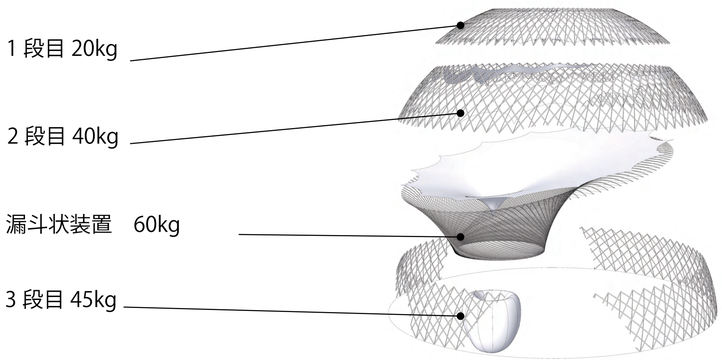
上半分：
キリアツメゴミムシダマシから発想を得た集霧装置
下半分：
ハスから模倣した、撥水性の漏斗状の集雨装置



また、これらの装置は半透明の白い布製で、日射を和らげる機能を持つ
灌漑農法の１日あたりの消費水量を参考に、生態コア部分の日消費水量を 5mm/d として試算した結果、維持にはコア部分の 30 倍の集水面積が必要だと分かった。

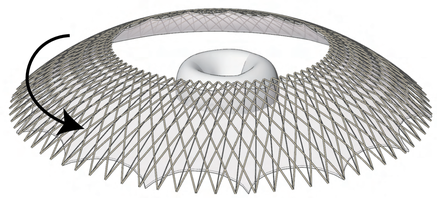
人力で組み立て可能

集水装置は、人力で組み立てることができるように工夫されている。
１段目と２段目は、折り畳むことができる。

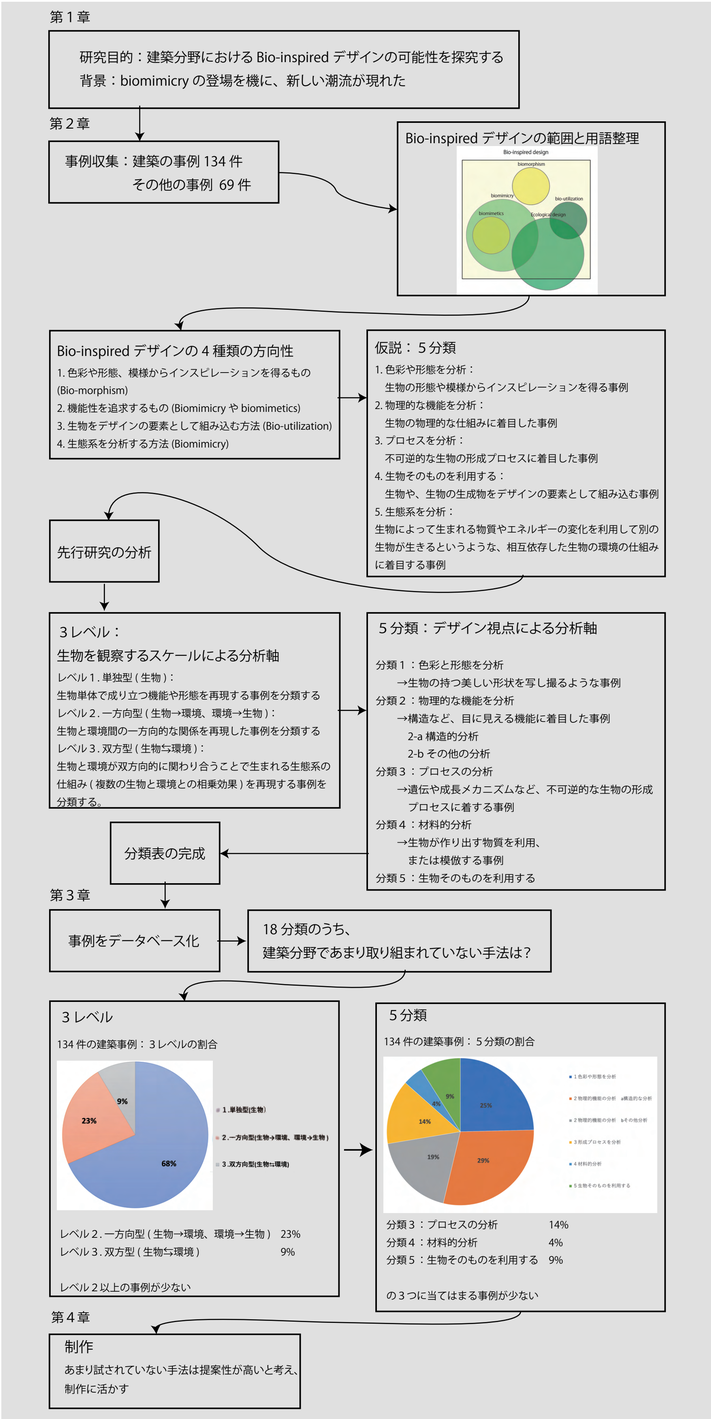


２−１ 集水装置の組み立て

生態コア部を囲むように、１段目を展開する。



卒業論文とのつながり



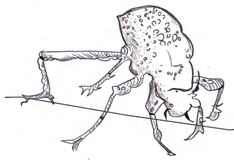
卒業論文では、現状で確認可能な Bio-inspired デザイン事例を広くデザイン・建築分野から収集し、整理と分析を試みた。収集事例を比較考察することで、複雑化する Bio-inspired デザインの取り組みに関する全体像と各分野の特徴を把握することで、建築分野の今後の展開に有益な知見を獲得できた。

先行研究を参考にしながら、収集事例を区別するための分類項目について考察した結果、左表のように、3 レベル 5 分類に項目を区別する独自の分類法を確立した。
134 件の建築分野の Bio-inspired デザイン事例を、3 レベル 5 分類法の 18 種の組み合わせごとに集計し数値化し、取り組みの傾向や偏り、特徴について考察した。レベル 1 で分類 1 と 2 に当てはまる事例は非常に多く、レベル 2 とレベル 3 の分類 1 に当てはまる事例は全く無かった。レベル 2 の分類 4 と 5 及びレベル 3 の分類 2、3、4 の事例は少ないことがわかった。

これらの分析を踏まえて、本研究作品では、レベル 2、3 で、事例がほぼ検出されなかった分類 4「材料的分析」と分類 5「生物そのものを利用する」、分類 2「物理機能 2—b/ 生物の物理的な機能を分析」及び分類 3「プロセスの分析」のデザイン視点を複合的に活かした Bio-inspired デザインの設計アイデアを展開することにした。

集水装置(霧)

レベル 2 , 分類 2 -b
砂漠の生物は、キリアツメゴミムシダマシのように、霧から水分を得ることで命をつないでいる。ここから発想を得た集霧装置。



集水装置(雨)

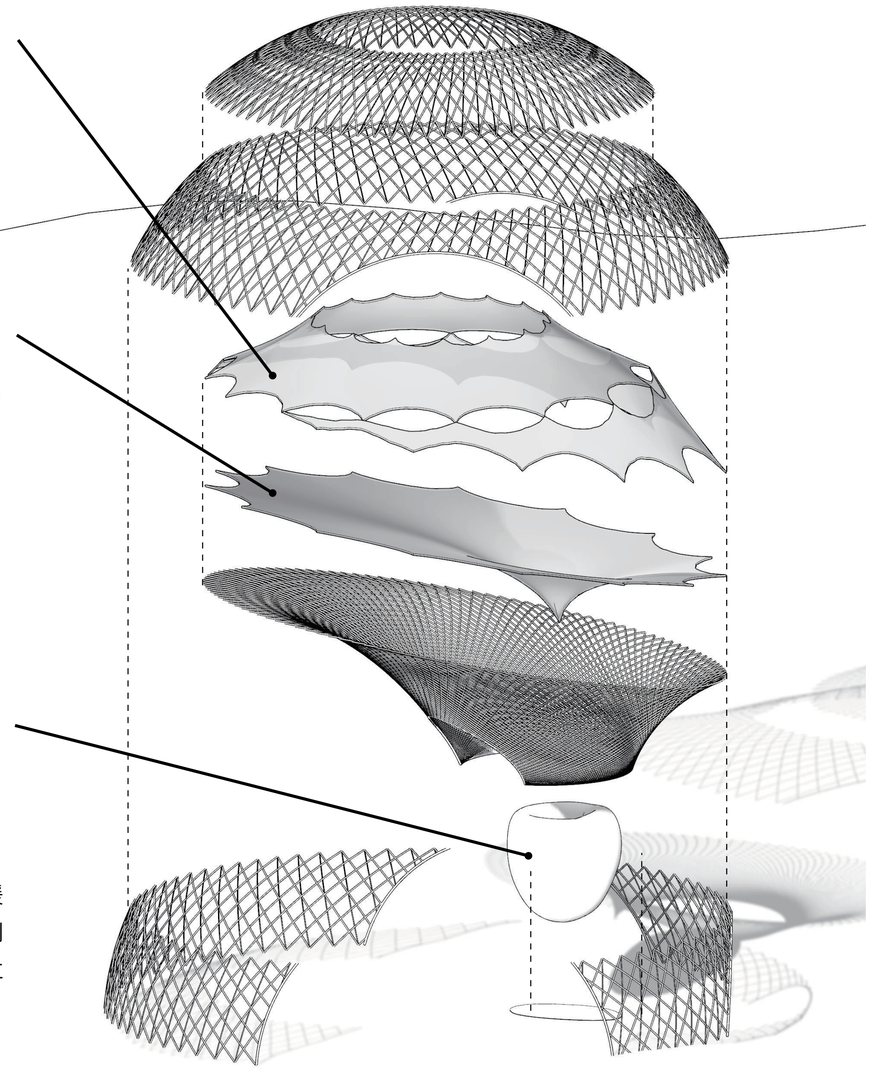
レベル 2 , 分類 2 -b
ハスの葉から発想を得た撥水生地を漏斗状にすることで効率よく雨水を集める。

生態コア部分

レベル 3 , 分類 3 ・分類 5
コア部の役割は 2 つ
1. 貯水機能
2. 生態コロニーの中枢
遷移プロセスを模倣した人工的援助をしながら、生物そのものを利用することで生態コロニーの成立を目指す。

炭酸カルシウム法

レベル 3 , 分類 4
微生物が生成する炭酸カルシウムにより砂を接着し、建材とする。



3：生物の定着

遷移システム

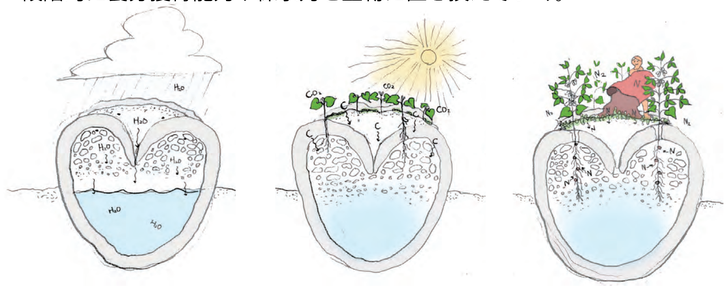
生物がほとんど生息しない裸地に、新たに生物が侵入し、定着する現象を一次遷移と言う。その後、次第に複雑な植生が定着し、最終雨的には安定した状態 (＝極相) に至ることで砂漠では草原が生まれる。本計画では、ここまでのプロセスを補助する。
遷移システムにおいて、土壌生態系の充実は基盤となっている。本計画の生態コア部分は、必要量の水を貯水し、乾燥や風化から土壌を外殻で保護する機能を持ち、安定的に遷移を補助し、最終的には自立した生態コロニーの成立を目指す。

土壌の移植

生態コロニー成立までの過程で、砂漠に適応した土壌生態系ができる。生きた土を移植することで、砂漠での土壌改良に応用することができる。

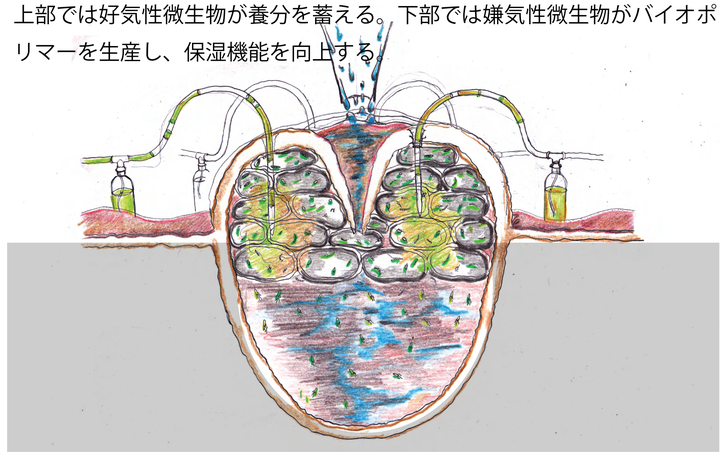
肥料の投与

生物が生きていくには、水と C(炭素)、N(窒素) が必要である。人間が手を加え、人工的な集水装置や保水構造で、コア部分の温湿環境を保ち、水や炭素養分、窒素養分を投与することで、砂漠の草原への遷移プロセスを援助し、生態系の成立と循環を生み出すことを目指す。
生態系の成熟に応じて、人間の補助や人工的な機構から自立するために、段階的に養分獲得能力や保水力を生物に置き換えていく。



3－1 土壌の改善

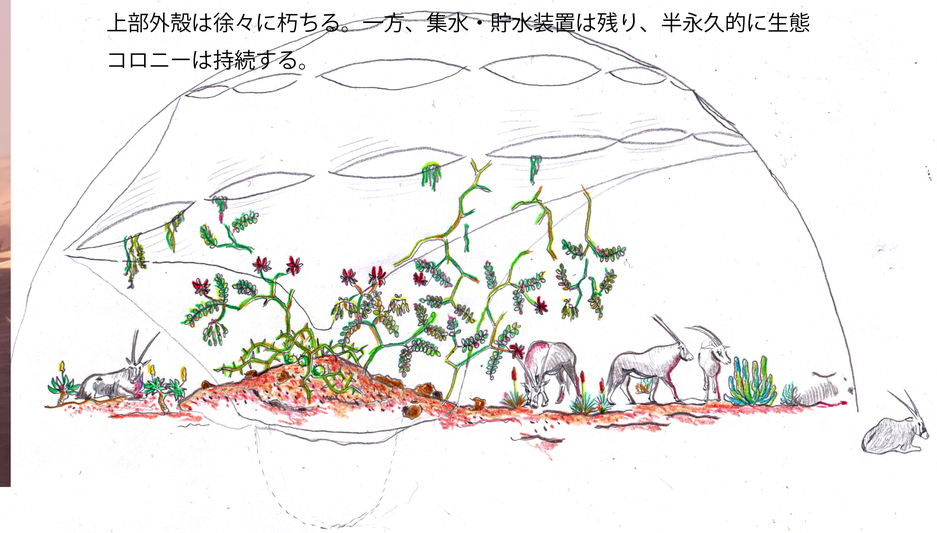
降雨や霧によって水が得られると、生物が活動を始める。最初の段階では、少ない養分で生きることができ、生産能力の高い微生物が活躍する。コア上部では好気性微生物が養分を蓄える。下部では嫌気性微生物がバイオポリマーを生産し、保湿機能を向上する。



肥料投与スケジュール

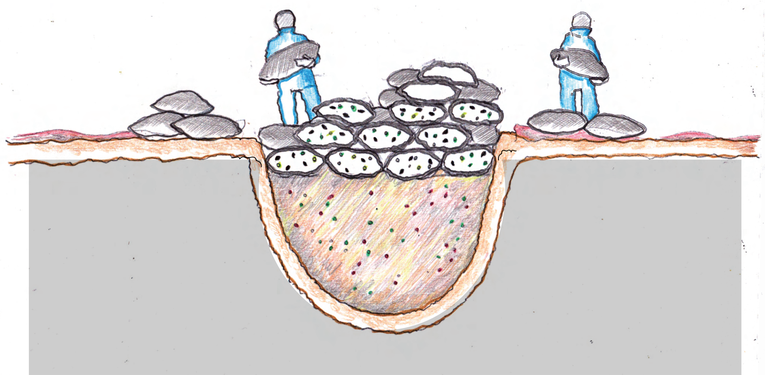
3－5 朽ちる

生物の種計画では、自立した生態コロニーが成立した後、生態コア部分の上部外殻は徐々に朽ちる。一方、集水・貯水装置は残り、半永久的に生態コロニーは持続する。



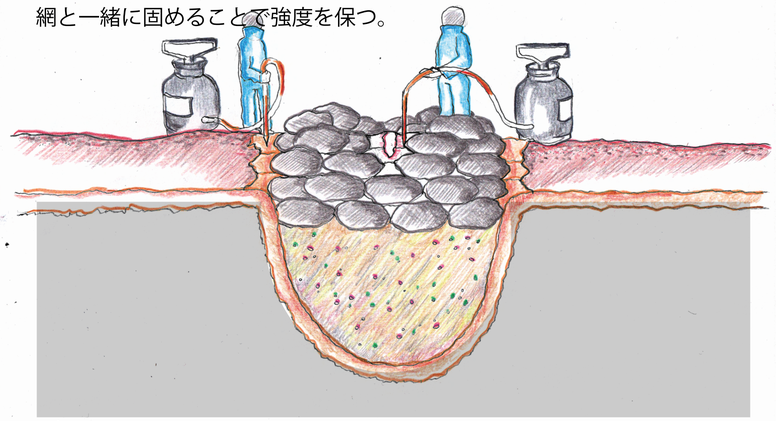
1－3 土嚢を積む

コア上部は、酸素や日光が届くため、生物が活動して新たな生命や養分を生産する役割を持たせる。材料を詰めた土嚢を積み、次の工程の型とする。



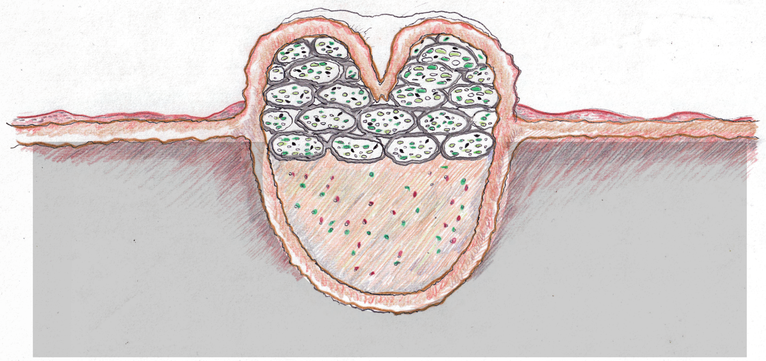
1－4 コア上部を形成

炭酸カルシウム法によってコア上部を形成する。砂を土嚢に被せ、固まった砂を数センチずつ積層させながら形作ることで、目的の形状に建設することができる。コア上部は、水や酸素が浸透するよう、スカスカにしつつ網と一緒に固めることで強度を保つ。



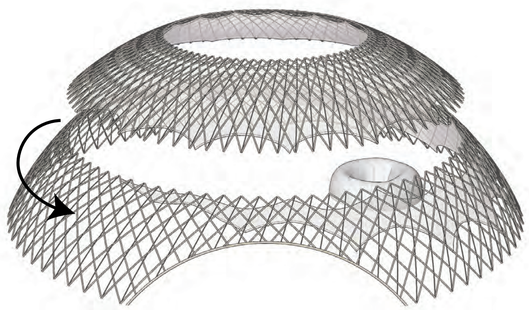
1－5 コア完成

以上の工程で１ヶ月ほどの時間をかけてコア部分が完成する。
水が得られると、コア内部の微生物が活性化し、遷移プロセスが動き出す。



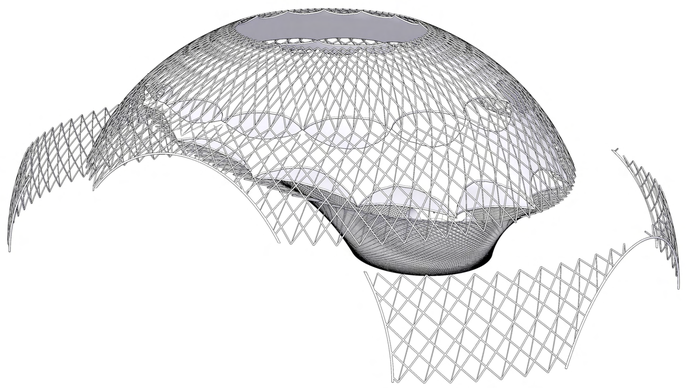
2－2 集水装置の組み立て

１段目を持ち上げ、折りたたまれている２段目を展開する。次に、１段目と２段目を紐で結び、固定する。



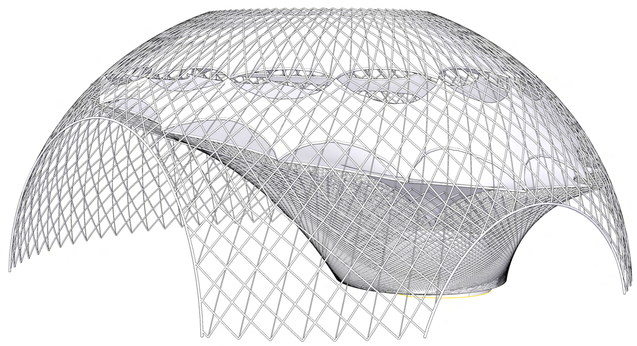
2－3 集水装置の組み立て

最後に、１段目と２段目を持ち上げながら、漏斗状装置と３段目のパーツを差し込み、固定することでドーム構造が完成する。



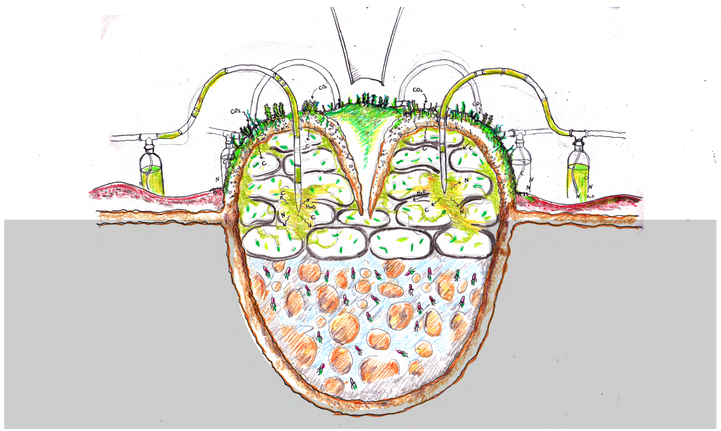
2－4 集水装置完成

ドーム構造は、風を迂回させ、生態コア部分へ砂の侵入を防ぐ役割を持つ。



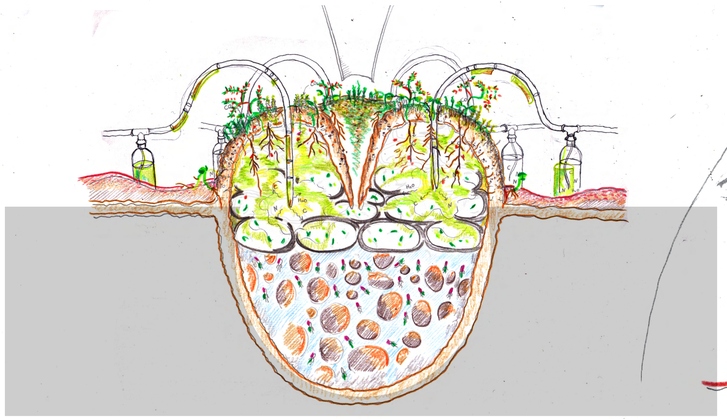
3-2 地衣類・コケ類の侵入

微生物によって生産された養分をもとに、コア上部上層に地衣類やコケ類が定着する。光合成が始まり、C 養分を一部自給できるようになる。



3-3 一年草の定着（C 養分自立）

一年草が定着し、光合成による本格的な炭素固定が行われるようになる。この時点で C 養分は自立する。また、根粒菌やバイオクラストによる窒素固定の働きで、N 養分を一部自給できるようになる。



3-4 人類と共存（N 養分半自立）

人間が住むことで、窒素が含まれる廃棄物が供給されるようになり、自立人工構造物は布や網でできており、隙間があるため、状態が良い時には、屋根の外まで植物が進出する。

注) 本研究は、筑波大学、微生物サステイナビリティ研究センターの指導のもとで進めた。

参考文献

1)『点滴灌漑による灌漑水量と消費水量 および灌漑効果 』駒村正治 , 中村貴彦 , 藤川智紀 , 伊川 綾 , 谷藤祥子 , 中村好男　2010 年
2)『Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture』Ordinary Ltd　2010 年
3)『微生物機能を活用した次世代地盤改良技術に関する研究』佐々木 哲也，加藤 俊二，稲垣 由紀子　2013 年
4)『Mapping past, present and future dew and rain water resources for biocrust evolution in southern Africa』Marc Muselli, Daniel Beysens　2021 年
5)『ナミブ砂漠のクィセブ川沿いの植生遷移と環境変化に伴う植物利用』水野一晴 , 山形浩太郎 2005 年
6)『特集「乾燥地の生態系とその課題」2. アフリカ・ナミブ砂漠の自然と保全　ナミビアにおける植生衰退と地形・地質条件 』山縣耕太郎　2013 年
7)『ナミブ砂漠の驚異の自然とその歴史』水野 一晴　2018 年
8)『微生物の産生する 高機能性バイオポリマーの産業応用』倉根隆一郎　2015 年
9)『現地調査と室内実験によるビーチロック形成メカニズムの検討』山木 克則 , 茅根 創 , 大葉 英雄 , 洪 永勲 , 山本 将史 , 田中 昌宏 , 林 文慶 , 上野 嘉之　2016 年
10)『バクテリアにおけるシリコンの役割』廣田隆一，池田 丈，黒田章夫　2011 年

ナミブ砂漠の環境

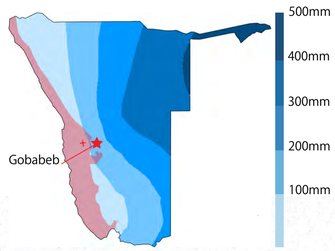
●気温
ナミブ砂漠の年間最高気温は40℃、最低気温は 0℃、日較差30℃程度
●降雨
11 月から 4 月にかけて雨季
内陸に行くほど降雨量は増加する
・平均降水量は沿岸部で 15mm
東部砂漠で 100mm
・一方、さらに内陸の国内では大陸性台地が対照的で、降水量が多い（500mm 以上）。
●霧
霧の年間降水量は海岸から 40km で最大である (200mm)。フォーゲルフェーダーベルグなどの山にも霧が溜まる。

●露
海岸に近づくほど、得られる梅雨の量が増加する。
●地下水
・クイセブ川に近い場所
水脈が地下 13m 程度の位置にあり、比較的利用しやすい。
コア部分を地下水まで伸ばすことで、水資源を余裕を持って安定的に得ることができる。
・クイセブ川から離れた場所
水源が地下深くなり、獲得が難しくなる。

水資源の分布図

●Gobabeb の水環境
年間降雨量：約 27mm
霧の降水量：約 31mm
露の年間量：約 20mm
(日本の年間降水量は 1718mm)

年間降水量の分布



出典：「Mapping past, present and future dew and rain water resources for biocrust evolution in southern Africa」Marc Muselli, Daniel Beysens　2021 年

年間降霧量

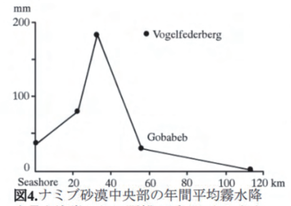
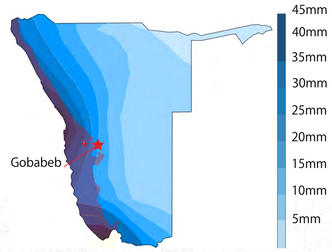


図4.ナミブ砂漠中央部の年間平均霧水降水量を海岸からの距離でプロットしたもの (Lancaster *et al.* , 1984).

出典：「ナミブ砂漠のクィセブ川沿いの植生遷移と環境変化に伴う植物利用」水野一晴 , 山形浩太郎

年間露量の分布

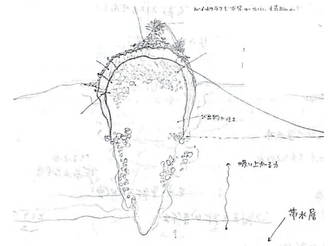


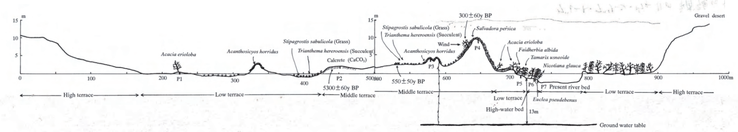
出典：「Mapping past, present and future dew and rain water resources for biocrust evolution in southern Africa」Marc Muselli, Daniel Beysens　2021 年

集水装置の規模

地下水の獲得が難しい場所では雨や霧、露を集める集水装置に頼る必要がある。
しかし、Gobabeb 周辺では、降水量が 100mm に満たない。そのため、本提案では、集水装置の面積を、コア部分の 30 倍にすることで必要量を獲得する。

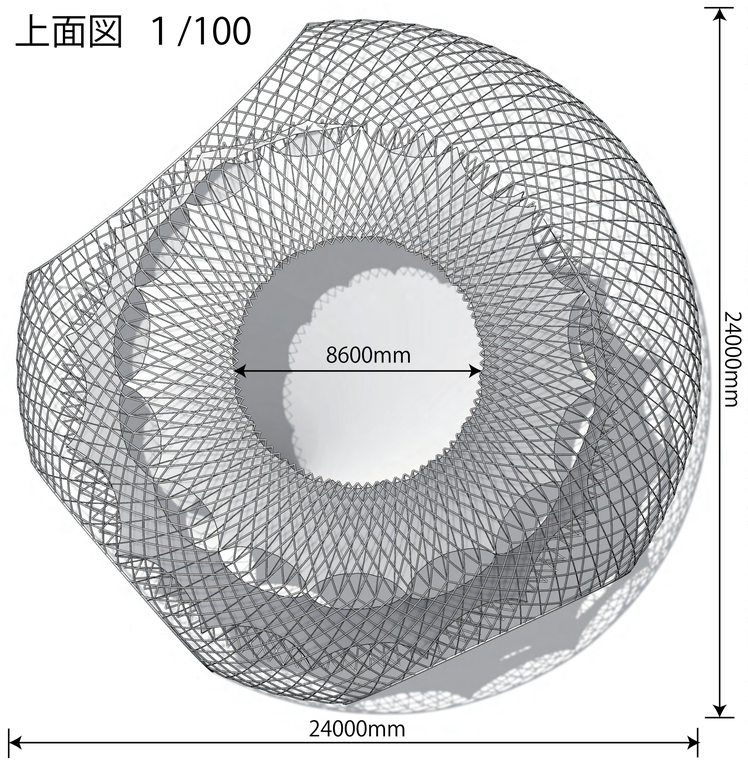
建築の展開位置によって集水戦略が変わる。地下水が得やすい場所では地下水から直接集水する。

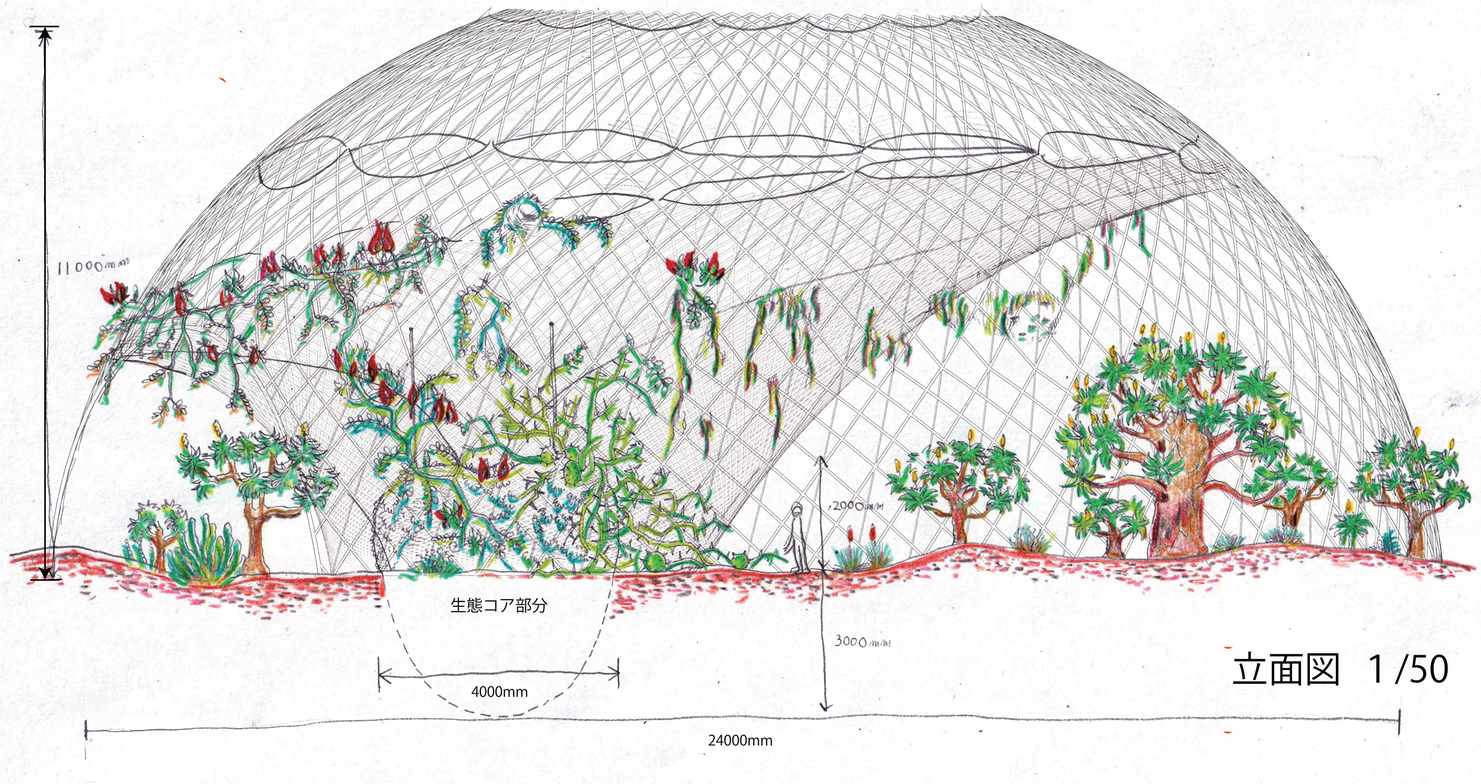




出典：「ナミブ砂漠のクィセブ川沿いの植生遷移と環境変化に伴う植物利用」
水野一晴 , 山形浩太郎　2005 年

図6-図6 地形と植生（図1）。P1～P7: 土壌分布(Fig.14).

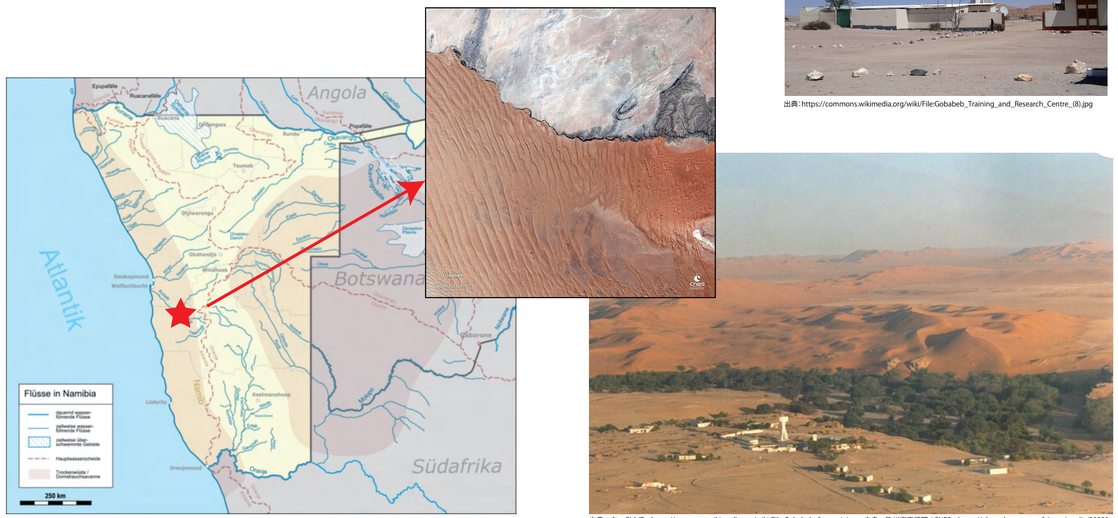




設計敷地：Gobabeb（ナミブ砂漠）

地理的な特徴

アフリカ、ナミブ砂漠の中心部に位置するゴバベブは、南には砂砂漠、北の礫沙漠、その境界にある数年に一度、水が流れるクイセブ川河畔の森林地帯という、３つの生態系に接する地域である。また、霧と雨の降水量のエコトーン (移行帯) に位置しており、多様でユニークな生態系を持つ。



出典：右　GbbIT　https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gobabeb_from_air.jpg　中央　欧州宇宙機関 / CNES　https://phototheque.cnes.fr/cnes/media/39590

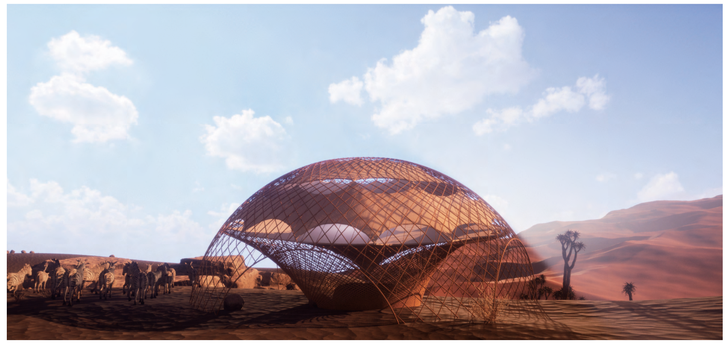
ゴバベブ・ナミブ研究所

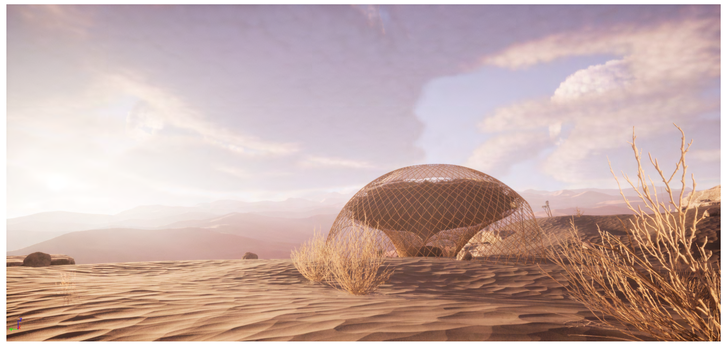
出典：https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gobabeb_Training_and_Research_Centre_(8).jpg

人の活動

●研究施設：
ゴバベブ・ナミブ研究所
このような地理的利点を生かし、ゴバベブ・ナミブ研究所では砂漠に関する様々な研究が取り組まれている。また、年間合計 1,000 人以上が参加する、環境教育や実践的な科学訓練も実施している。
しかし、近隣の都市 (ウォルビスベイ) から 120km 離れた陸の孤島である。

●先住民：トプナール (Topnaar)
何世紀にもわたってクイセブ川河畔にナマ族 (先住牧畜民) のトプナールが暮らしている。ヤギを放牧している。



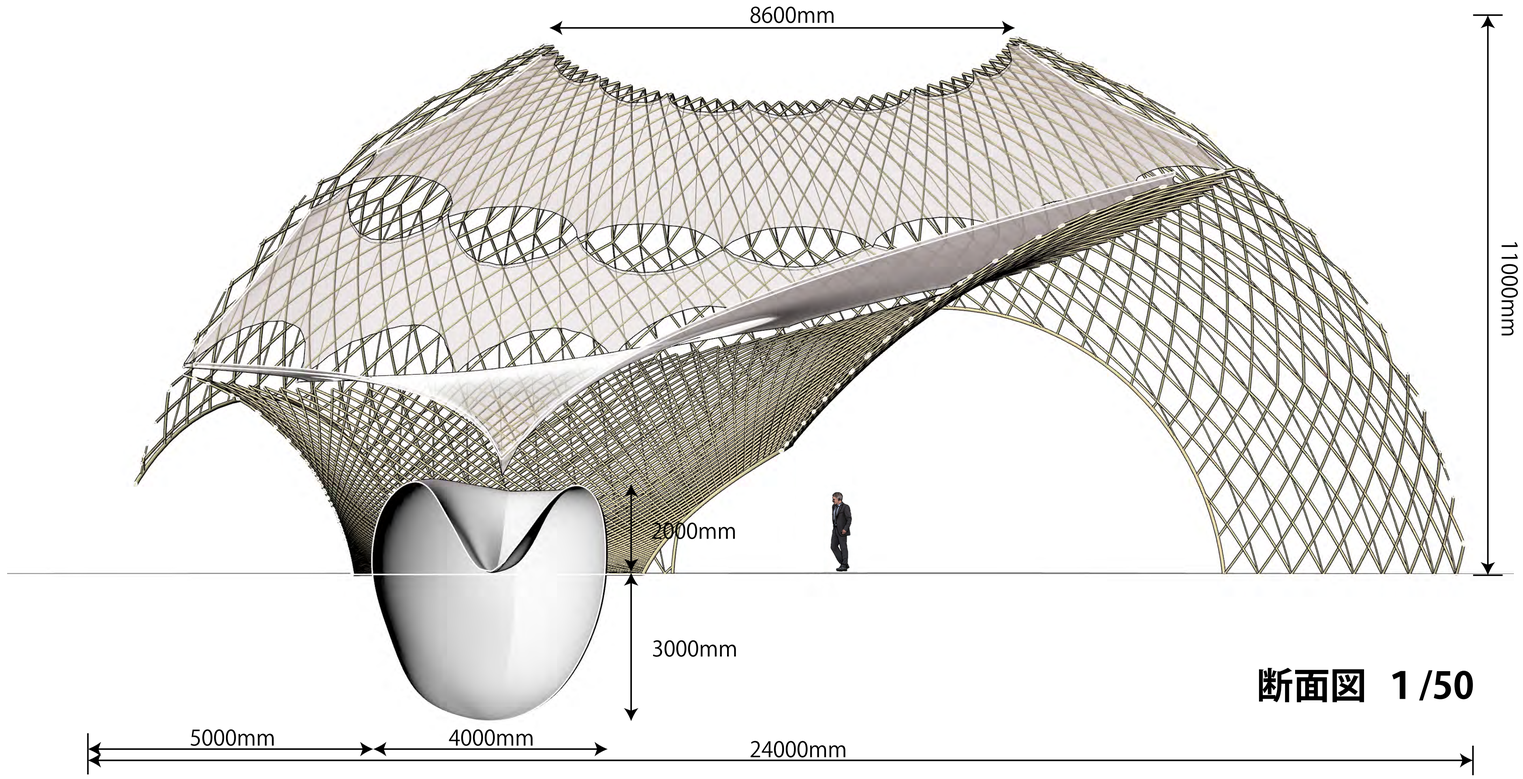


本建築の役割

１. 土の生産
砂漠が極限環境である要因は、水不足や養分が飛ばされてしまうことにより、生態系の基盤である土壌が育たないことにある。本計画では、乾燥や風化から土壌を保護することで自立した生態系コロニーの成立を目指す。
２. 研究活動の場
生態コア部分を維持すること自体が研究となり、修復生態学の研究活動や、インターン生の体験実習のテーマとなる。
３. 休憩場
建築は、砂漠の中での過ごしやすい微気候を生み出し、現地の生物や人々に休憩の場を与える。

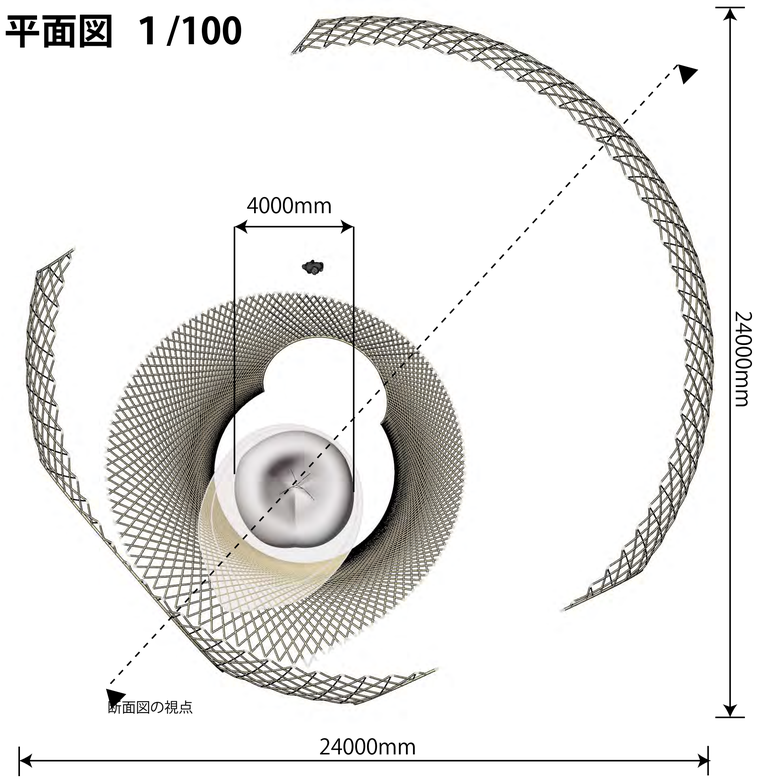
この構造物が砂漠の中にいくつも発展的に展開していくことで、生物圏や研究範囲を拡大していく。オアシスのように拡大することで生物にとっては生息地が広がることになり、人間も暮らし易くなる。

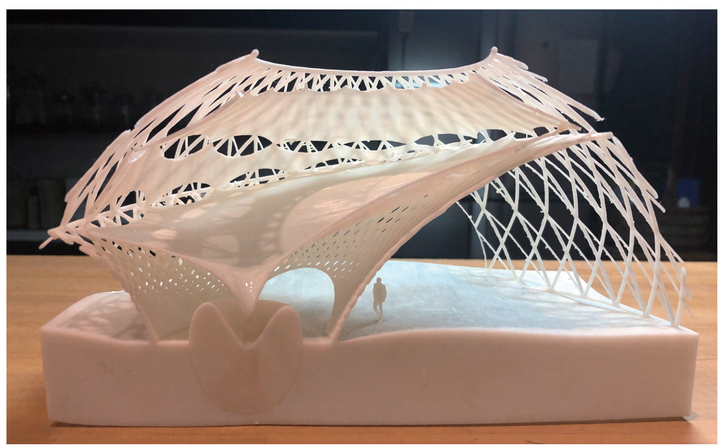
図面

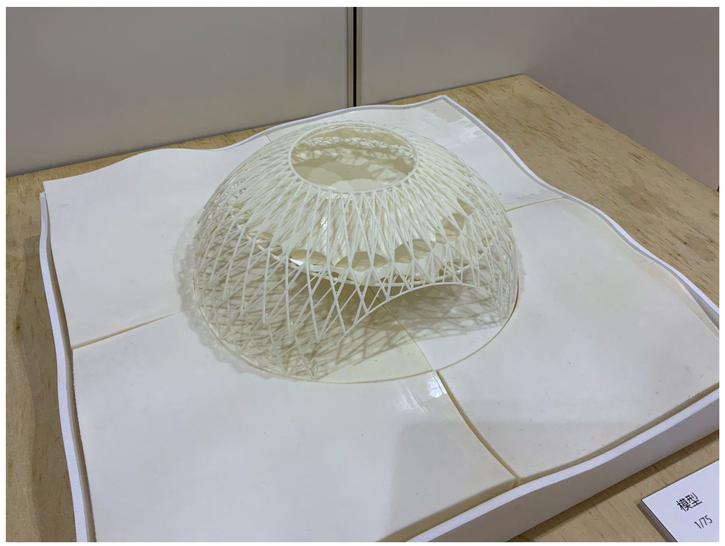


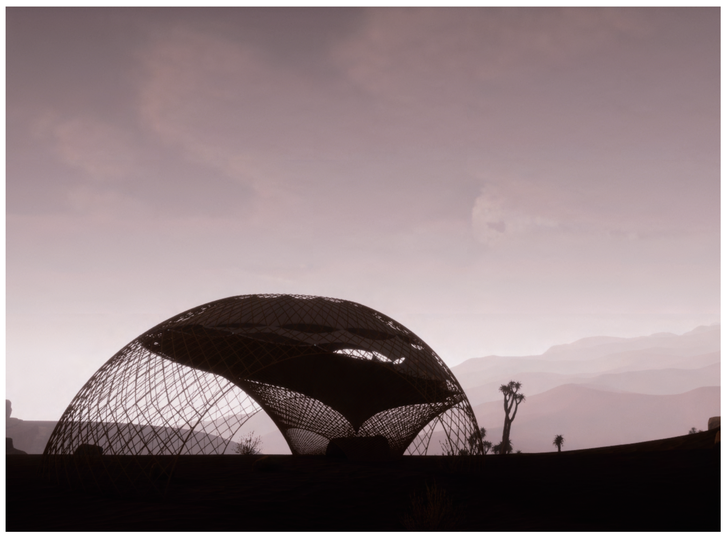
断面図　1 /50

平面図　1 /100









炭酸カルシウム法に関する実験

砂砂漠に建築を設置する場合、砂の移動で地盤に埋没してしまうことが課題となる。本研究の建築形状を半球状に設計したのは、設置する砂漠の地盤が歪み、建築が埋まったり傾いくことがあっても、集水機能を継続的に維持するための工夫の１つである。
さらに、炭酸カルシウム法により、同建築を設置する地盤の砂を接着硬化させることで、砂の移動を防ぎ、建築の安定と機能運用を目指している。
また、生態コア部分は、水資源を最大効率で利用するために、給水部分は安定感のある回転体形状と砂より堅牢な建材である必要があると考えた。
よって外殻を硬化させるために、地盤同様に炭酸カルシウム法を採用することとした。

実験内容：炭酸カルシウム法（MICP 法）
目的：砂を接着し建材とするために、微生物による炭酸カルシウムの生成を確認する。

尿素活性を持つ細菌（Sporosarcina pasteurii）を用いた研究が主だが、他の微生物でも最終的に炭酸カルシウムが発生すれば砂同士を接着することは可能なはずである。
そのため、相応しい菌の種類は複数あり、今回実験で用いる乳酸カルシウムから炭酸カルシウムを生成する好アルカリ性芽胞形成性の Bacillus 属は、そのうちの１つである。
この細菌を利用してコンクリートのヒビを埋める補修液が半実用化されている。同様の方法でナミブ砂漠の砂を固めることができないか確認するために、2022 年 12 月 27 日から実験を開始している。

コンクリートの補修には A 剤と B 剤を２：１で混ぜ合わせて使用する。
A 剤：細菌・細菌胞子・グルコン酸ナトリウム、ケイ酸ナトリウム Basilisk BasisB2(培地)
B 剤：酢酸ナトリウム

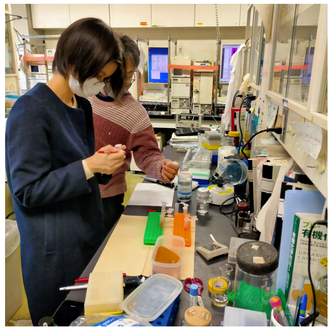
本実験では、まず A 剤と B 剤の分量を下記のように固定し、
A 剤：0.5ml
B 剤：0.25ml
そこにナミブ砂漠の砂を 10 通りの分量で加え、それぞれの混合で、砂が固まるかどうか、砂の量に対しどの分量が適しているかを探る。

３週間ほど経ち、反応が終了した後に乾燥させ、砂がどのように変化したか確認する。現在実験中である。

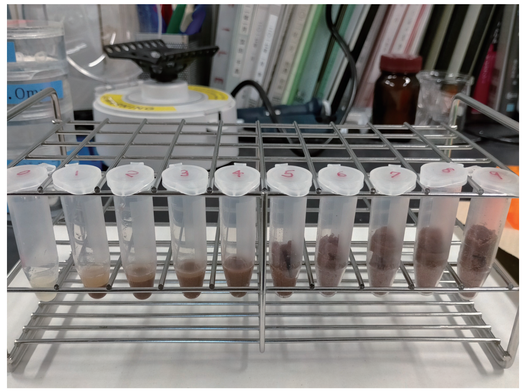
試験管 0
A 剤＋B 剤
試験管 1
A 剤＋B 剤＋砂 0.2ml（0.45g）
試験管 2
A 剤＋B 剤＋砂 0.4ml（0.9g）
試験管 3
A 剤＋B 剤＋砂 0.6ml（1.35g）
試験管 4
A 剤＋B 剤＋砂 0.8ml（1.8g）

試験管 5+：
A 剤＋B 剤＋砂 1.0ml（2.25g）
試験管 5-：A 剤のみ投入した
A 剤＋砂 1.0ml（2.25g）

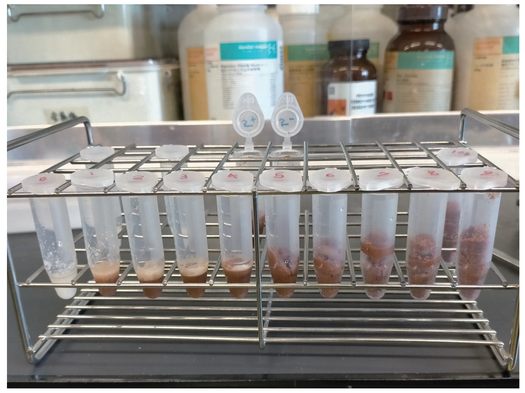
試験管 6
A 剤＋B 剤＋砂 1.2ml（2.70g）
試験管 7
A 剤＋B 剤＋砂 1.4ml（3.15g）
試験管 8
A 剤＋B 剤＋砂 1.6ml（3.60g）
試験管 9
A 剤＋B 剤＋砂 1.8ml（4.05g）
試験管 10
A 剤＋B 剤＋砂 2.0ml（4.50g）



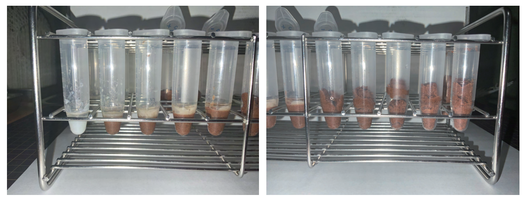
12 月 27 日
A 剤 B 剤投入直後



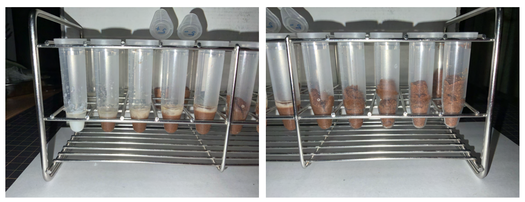
12 月 27 日
A 剤 B 剤投入
40 分後



12 月 29 日

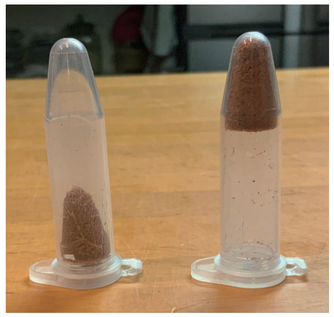


1 月 2 日



1 月 9 日

結果
1 月 9 日に試験管を上下反転させ、砂の固着を確認した。
試験管 5 までは砂が均等に固まったが、試験管 6 以降は固まり方にムラがあり、下部が固まったのに対し、特に上部がうまく固着されずに崩れた。
条件を変えて実験した試験管 5 の２つについて、
+：A 剤 B 剤を投入した砂
-：A 剤のみ投入した砂
の両方が固着した。
上下反転させた結果、試験管 5 - は、チューブの形に固まった砂が丸ごと落下したのに対し、試験管 5 ＋の砂は上部にとどまった。



（左：試験管 5 -　　右：試験管 5 ＋）

この結果について、試験管 5 ＋は、B 剤によるゲル化により蒸発が抑えられ、水分を多く含んでいたからだと考えられる。

微生物サステイナビリティ研究センターとのセミナーの日程

第 1 回セミナー 5 月 30 日
第 2 回セミナー 7 月 26 日
第 3 回セミナー 11 月 4 日
第 4 回セミナー 11 月 28 日