

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2019 年 9 月号



Space Camp at Biosphere 2 (SCB2) in 2019 活動報告

佐藤啓明（工学部 B4）・久保朋美（農学部 B3）・橋本亜美（農学部 B3）・平井颯（理学部 B2）・宮下裕策（医学部 B1）

1. SCB2 の概要

有人宇宙学実習：Space Camp at Biosphere 2 (SCB2)が 2019 年 8 月 5 日より 8 月 10 日までアリゾナ大学が運用管理している Biosphere 2（図 1）で実施された。京都大学生 5 名、アメリカ人大学生 5 名が 5 つのチームを作り（表 1）、5 泊 6 日で火星ミッションを模擬した合宿実習に参加した。



図 1 Biosphere 2 の全景

表 1 SCB2 クルー

チーム 1	平井颯	Noel Rojas, Glendale Community College, コンピュータサイエンス
チーム 2	久保朋美	Diana Ramirez, Arizona State University, 微生物学
チーム 3	佐藤啓明	Daniel McConville, University of Arizona, 材料工学
チーム 4	宮下裕策	Christopher Yurgel, Phoenix College, 航空工学
チーム 5	橋本亜美	Anastasia Martinez, Estrella Mountain Community College, ロボット工学

SCB2 クルーとしての活動は 5 月 31 日、NASA ゴダード宇宙センターの Vladimir Airapetian 博士との昼食会から始まった。この時、博士から地球外の生命を考えるにはまず太陽系の生命について理解しなければならないということを学んだ。今となって考えればこの言葉こそが SCB2 の根底をなすものだった。SCB2 では、火星での有人宇宙ミッションを疑似体験するというテーマのもと、ミッションゴールとして

火星基地 Biosphere 3 (B3) を設計することを目指した。火星での生命維持を考えるにあたって、人工の環境を再現、維持しようとしている Biosphere 2 は実習を行うのに相応しい場所だった。

B3 では 10 人のクルーが 50 年間生きることを想定し、それに耐えうる B3 の設計を考えるため以下の 5 つの課題に取り組んだ。日本人クルーそれぞれが一つの課題を担当し、キャンプまで約二か月の間調査を進めた。

チーム 1: 火星環境の調査 B3 の建設場所を考える

チーム 2: 10 人が生きるのに必要な物資を考える

チーム 3: B3 の概念設計を考える

チーム 4; 吉田キャンパスの放射線マップを作る

チーム 5: ストレス検査



図 2 SCB2 クルー

4 回のオリエンテーションや iCeMS science festival 2019 summer での発表を経て、8 月 3 日にアリゾナ州ツーソンへと向かった。8 月 5 日、日米の SCB2 クルー全員が集合し(図 2)、世界で初めての Biosphere 2 を使った学生によるスペースキャンプが開始された。スペースキャンプ中は、Biosphere 2 敷地内に作られている研究者寮にチーム毎に宿泊した。



図 3 Biosphere 2 研究者寮

1 日目は主に講義が行われた。Biosphere 2 の副所長である John Adams さんから施設の紹介を受けた後、土井隆雄先生からこのキャンプについて、寺田昌弘先生から閉鎖環境や宇宙空間における健康について、最後に山敷庸亮先生から宇宙放射線についての授業をしていただいた。2 日目には火星の環境について Timothy Swindle さんのお話を聞いた。10 年後には火星の土壌のサンプルを地球に持ち帰ることができるとおっしゃっていたことが衝撃的だった。火星の土壌を収集、保管をするミッションとそれを持ち帰るミッションが考えられているそうである。また、2 日目から 4 日目までは熱帯雨林、海、砂漠に関する講義、実習を行なった。また、夜には Astronaut night と称して油井亀美也さん、Rick Linnehan さん、土井隆雄先生の三人の宇宙飛行士に講義をしていただいた。宇宙での貴重な経験を聞くことができ、宇宙好きにはたまらない時間となった。油井さんの「宇宙飛行士になりたいければ常にベストを尽くせ」という言葉は今後大切にしていかなければならないと感じた。5 日目には宇宙放射線に関する計算を行い、最終日の発表に向けた準備を行なった。夜には Student night として、アメリカのクルーと日本文化を用いて交流し、書道やけん玉を楽しんだ。最終日は SCB2 で学んだこと、それぞれの課題の発表を行なった。(佐藤啓明 記)

2. 8/6 Biosphere 2 Tropical Forest での実習内容について

Space Camp 2 日目は熱帯雨林での実習を行なった。Biosphere 2 の熱帯雨林は 44m×44m の広さを持ち、施設全体の約 15%を占める。建設当初は 315 種、1890 個体の植物が存在していた

そうであるが、現在は 25 種、57 個体にまで減少しているという。種数、個体数は現在まで減少を続けており、これがどこかで止まるのか、それとも減少し続けるのかは興味深いと感じた。動物はほとんどおらず、私が確認できたのは蟻だけであった。閉鎖環境で生態系を維持していくことは地球上でも難しいことを実感した。

さて、火星をはじめとする他の惑星に森林を創り出そうとしたとき、木々のメンテナンス、状態評価の方法を習得することは重要である。特に、閉鎖生態系においてヒトが持続可能な生活を送るためには、樹木に含まれる炭素量を見積もることは大切である。なぜなら、植物も含めた炭素の流れを知るとは、森林が大気組成に与える影響を推定する一助となるなど、物質循環を考えることにつながるからである。以上のことから熱帯雨林の実習では、樹木に含まれる炭素量に焦点を当て、その見積もり方を学び、講義では炭素量を変化させる要因について理解を深めた。実習では以下の測定を行なった。まず、地表 1.3m における木々の幹回りを測定し、直径を計算した。次に樹木から一定の距離離れた地点から樹木の根本と頂点を見たときの仰俯角をクリノメーターを用いて測定し、高さを概算した。これらの値と樹種に対応する密度を用いて、先行研究の方程式によって樹木に含まれる炭素量を推定した。測定した樹種と位置を図 4、Biosphere 2 内の熱帯雨林を図 5 に示す。

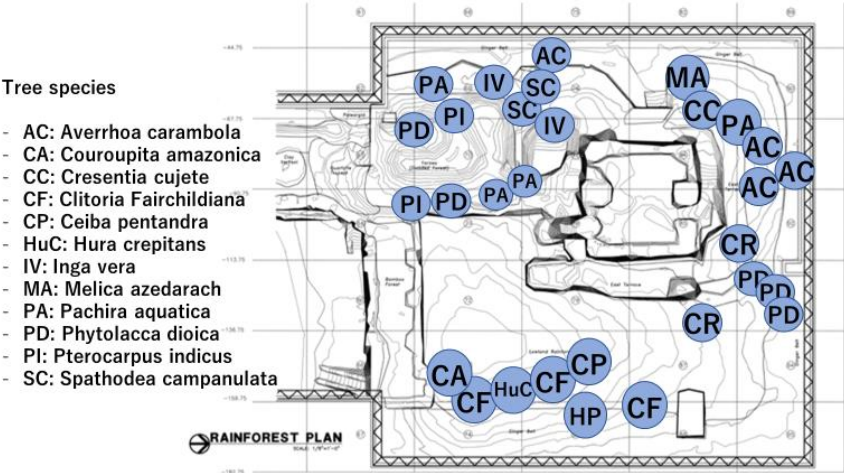


図 4．測定した樹種とその位置

炭素量の推定には以下の 2 つの方程式を用いて比較した。
 方程式 1： $\ln(\text{炭素量}) = -0.37 + 0.33 \ln(\text{直径}) + 0.933 [\ln(\text{直径})]^2 - 0.122 [\ln(\text{直径})]^3$
 方程式 2： $\ln(\text{炭素量}) = -2.994 + 2.135 \ln(\text{直径}) + 0.824 \ln(\text{高さ}) + 0.809 \ln(\text{密度})$
 計算結果の一部を下の表に示す。

表 2 炭素量結果

樹種/ID	炭素量（方程式 1）[kg]	炭素量（方程式2)[kg]	直径[cm]
CF/6543	317.69	110.38	26.67
HC/ no ID	6.73	2.6	6.21
CP/6585	654.86	262.8	35.97
CF/6575	434.47	176.19	30.27
HuC/6593	1169.35	253.53	46.76
CF/6632	27.63	11.27	10.63
CA/6638	44.99	15.8	12.73

表 2 から方程式 2 の結果は式 1 に比べて小さくなっているが、私たちは方程式 2 のほうが正確な結果であると考えた。なぜなら、式 1 がもつパラメータは直径のみであり、成長が一定でない樹木について考えるには不十分であるといえるからである。また、異なる樹種を比較するには密度のパラメータも含んだ式 2 が適当であることも考えた。

本実習では閉鎖環境の中で熱帯雨林を維持することの難しさを学んだ。気温や湿度を調整するだけでなく、水や炭素、栄養物質の循環など様々な条件を考える必要があることが分かった。熱帯雨林の実習を担当して下さった Jason によれば、Biosphere 2 の熱帯雨林は実際には完全な閉鎖系ではなく、水の再利用率は 10%にも満たないのではないかという話であった。火星に森林を創る場合は完全な閉鎖系にする必要があると考えるが、その場合にはさらに循環についてシビアに検討する必要があると考える。(平井颯 記)



図 5 Biosphere 2 熱帯雨林

3. 8/7 Biosphere 2 Ocean での実習内容について

午前中に B2 の海を管理している Katie Morgan さんから地球における海の役割、大気中の二酸化炭素濃度の上昇がサンゴの生活に与える影響について講義を受けた。さらに、自身が排出する二酸化炭素が水質にどのような影響を与えるのかを簡単な実験で実感したのちに、B2 で行われているサンゴの研究と B2 海洋環境についての説明を受けた。午後からは、メンバーを 2 つのグループに分けて 2 つの実習課題を行った。1 つ目は二酸化炭素供給器と pH メーターを用いて二酸化炭素供給速度と海水の pH 変化速度の関係から「B2 の海の pH を 1 日に 0.5 上昇させるための二酸化炭素供給速度を計算せよ」という問題を解くことであった。この課題では Katie からの一切の指示はなく、どのようにすればより正確な結果を一度の実験で得られるかをグループ間で十分に話し合い、実験方法や手順等の段階から学生たちが考案して行った。これまでのレクチャーや実習は、専門家や講師に指示されたとおりに行うものが多く、このようなディスカッションを交えた課題は私たちにとって非常に新鮮であり、かつ国際的な共同研究の場を感じられる良い機会となった。

2 つ目の課題は B2 の海洋環境の垂直分布調査であった。小舟に乗って一人がオールでボートを動かし、もう一人が機器を沈め、担当する地点における塩分濃度や水温、藻類の密度や溶存酸素濃度を測定した。これらのデータを分析すると B2 では十分すぎるほどに海水が循環しており、B2 の海全域で諸要素の垂直的な分布変化が存在していないことが分かった。白浜における海洋調査で得られたデータと比較して、B2 の海の環境は現実の海とは大きく異なっていることが分かった。これらのことから、現実の海で起きていることを再現しながらその環境や生息する生物の生命を維持することがいかに困難であるかを知った。またこれらの結果は、火星に我々が移住した際に地球での生活に不可欠である海を、B3 につくるかどうか検討する際に非常に参考になった。(久保朋美 記)



図6 (左)二酸化炭素供給器と pH メーターを用いて実験している様子
(右)B2 の海洋環境の垂直分布を調査している様子

4. 8/8 Biosphere 2 Desert での実習内容について

砂漠バイオームでは、John Adams さんと Kyle Rine さんから他の生態系と同様にまずバイオームに関する講義をうけ、その後バイオーム内でのフィールドワークを行なった。講義では主に、B2 の砂漠バイオームの建設当時の流れや、現在の管理方法について学んだ。また、火星の土壌の性質についての講義も受け、火星移住の際に立ちはだかるとされる種々の問題についても学んだ。砂漠土壌には、多様性を持たせるためにアメリカおよびメキシコの砂漠の土を集めてきており、実際に砂漠バイオームに入ると色の違いからも様々な地域の土が使用されていることが目視できた。また、閉鎖環境という性質から湿度が高くなりやすく、その水分が天井のガラスにつき、雨のような形で土壌に降り注いでしまうため、自然ではありえない雑草や植物が生えてしまうことがある。これを防止するために空気を循環させ、空気中の水分を少なくする管理をしていた。自然界の砂漠では水分を確保する方法が求められているが、閉鎖環境で砂漠を表現するためには水分を除去しなくてはならないという、全く逆の状況が個人的にとってもおもしろいと思われた。

火星の土はとても乾燥しており、またダストストームと呼ばれる大規模な砂嵐が発生する。このダストストームは砂や塵をまきあげるため、人体に有害であるだけでなく、移住した際の主要な電力供給源と考えられている、太陽光発電にも影響を与える。巻き上げられた砂がソーラーパネルに落ちてしまうことで、発電効率が低下してしまうためである。この影響を観測するために、実際のソーラーパネルを用いて、直射日光下や影、また砂を載せた状態での発電状態を観察し、実際に砂を置いた際の能力低下を観察した。



図7 Biosphere 2 砂漠バイオーム

フィールドワークでは、大きく分けて 3 つの観察を通して砂質土壌の性質、そして火星移住に必要な知識を学んだ。まず、専用の機械を用いて、砂漠バイオームとサバンナバイオーム、それぞれの空気中に含まれている砂粒子の大きさが異なっていることを観察した。次に、各グループが砂漠バイオームとサバンナ

バイオームの土を採取してきたのち、各バイオームの土ごとに大きさの異なる数種類の網で分けた。これにより、どのくらいの大きさの粒子が、どれくらい含まれていたかを視覚的に比較することができ、いかに砂漠の土の粒子が細かく巻き上げられやすいかがわかった。(写真参考)以上の観察から、火星の土壌の粒子がどれくらい小さいか、いかに巻き上げられやすいかと理解できた。

さらに、砂漠土壌を高温で熱し、質量変化を見ることで砂漠土壌に含まれている水分量を計算し、1kgの水を土から得るには何 kg の土が必要かを算出した。これは、砂漠土に似ている火星土壌レゴリスからの水採取が念頭に置かれた実習で、大変興味深かった。また Dr.Kyle が使われている機材を実際に見せていただき、観察方法を実演していただいた。砂がどの風速で舞い上がり始めるかという観測だったが、流体力学の側面からかなり詳しく説明していただき、とても勉強になるものであった。(橋本亜美 記)



図 8 粒子の大きさの比較（左側ほど粒径が大きい）

5. Biosphere 2での放射線被曝シミュレーション

私たちは、今回の Space Camp の間、高い宇宙放射線にさらされる火星上を想定し、各クルーメンバーで自分の被曝した放射線量をモニタリングすることで、実際火星上だと合計どれくらい被曝するのかについて評価した。評価方法としては、主にバックグラウンド放射線量と太陽風によって地球に到達するSEP（太陽エネルギー粒子線）、GCR（銀河宇宙放射線）の3つの指標を用いた。

まず、バックグラウンドの放射線量については、各自、常に放射線測定器の一種であるシンチレーション検出器を持ち歩き、移動する度に、その場所依存的なバックグラウンドの放射線量を検出器で測定するという手法を用いた。図9は、各自測定したデータをも作成した Biosphere 2 の放射線マップである。このように放射線マップを作成することで、放射性物質の分布や土壌等の放射化の程度を知ることができ、バックグラウンドの高い場所に行く際は事前に防護服を着るなどの対策をたてることが可能になる。

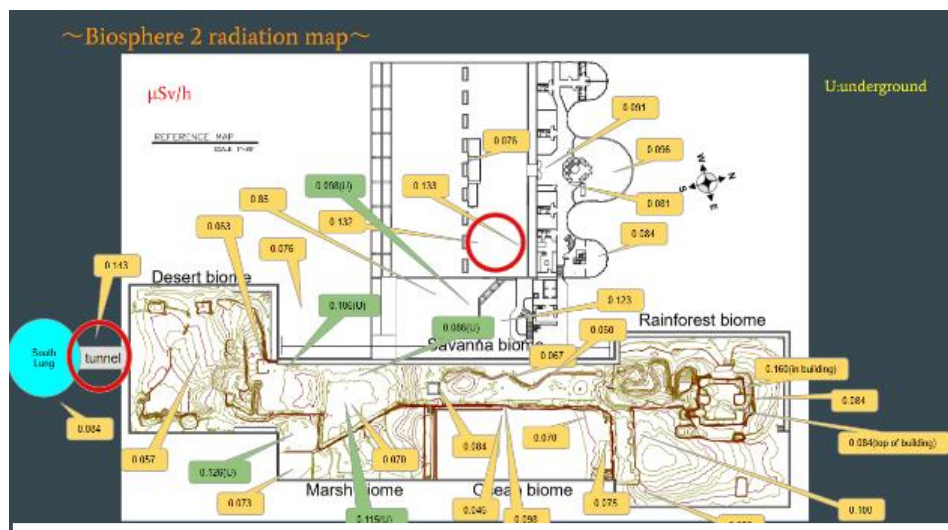


図 9 Biosphere 2 における放射線マップ

SEP については、CME（コロナ質量放出）が発生した時（今回の Space Camp では先生が任意に決定）にフォーカスし、京都大学山敷先生らによって発明された EXOKyoto（図 10）というアプリを用いて、SEP の火星への到達時間や屋外や教室、バイオームといった場所依存的な被爆量を計算した。

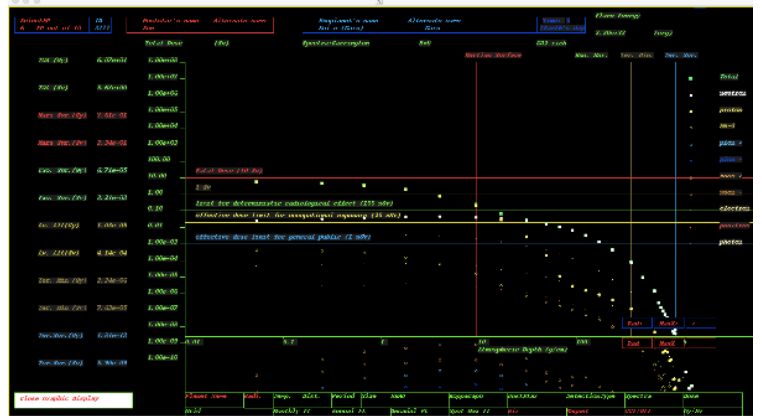


図 10 惑星表面における放射線量（山敷庸亮提供）

また、GCR のような遠方の銀河からくる恒常的な放射線については、建物（Biosphere 2）外にいるときのみ被曝すると考え、算出した。

表 3 火星表面における模擬被爆量の計算結果

Biosphere 3 Crew Member Radiation Levels
August 5th to August 9th

Crew Member	Background Dose	SEP Dose	Total Dose
Hiroaki Sato	0.0000	5.6300	5.6300
Daniel McConville	0.0100	5.2600	5.2700
Ami Hashimoto	0.0200	18.82	18.84
Hayate Hirai	0.0100	6.8	6.81
Yusaku Miyashita	0.0200	8.81	8.83
Tomomi Kubo	0.0210	6.526	6.547
Diana Ramirez	0.0630	6.44	6.503
Anastasia Martinez	2.9800	6.09	9.07
Noel Rojas	0.0100	6.8	6.81
Chris Yurgel	0.8300	9.44	10.27

* all doses are measured in mSv

表 3 は上記の 3 つの指標を用いて各個人の被曝した総放射線量を算出した結果である。表から考察できることとして、まず、Ami Hashimoto のうけた総放射線量が 18.84mSv とメンバーの中で極端に高いということである。彼女曰く、CME により発生した SEP が火星にちょうど到達したときに、屋外を散歩していたそうである。CME がいかに危険かを痛感すると同時に、CME による SEP が火星に到達する時間帯には建物内に避難するなど十分な防御策をこころじる必要があるとひしと感じた。また、上の表から総放射線量のほとんどが SEP によることがわかった。このことから火星で生活するにあたって、CME への対策が必要不可欠であることは明らかである。

今回の火星での放射線被曝のシミュレーションはすごく臨場感があり、自分なりに人類の火星移住を見据えることができた。火星移住にあたって最重要課題ともいえる放射線被曝をどうすれば解決できるか議論していなくてはなりません。（宮下裕策 記）

6. ストレスチェック

SCB2 中にクルーのストレス状態がどのように変化するかを調べるため、ストレスチェックを行なった。測定方法としては、①唾液中のアミラーゼ濃度測定、②自分の心理状態に最も合う表情を選ぶフェイススケ

ール、③心理状態に関する質問に答える POMS、④瞳孔の大きさ変化の測定の4つを用いた。アミラーゼ濃度測定はストレス状態で交感神経系が活性化すると唾液中のアミラーゼの濃度が上昇するという事実に基づいている。また、交感神経系が活性化すると瞳孔が大きくなるので、測定機器を用いると瞳孔の大きさからもストレス評価ができる。キャンプ中には4つの測定を朝と夜の1日2回行なった。ここではアミラーゼ濃度の測定結果とフェイススケールの結果について取り上げる。

図11は2つの測定結果を表している。縦軸は被験者ごとに測定データの平均値を出して測定データを割ったのち、時間帯ごとに全員の平均をとった値を表している。1に近いほどキャンプ中の平均的なストレス状態に近いことが推定される。アミラーゼ濃度は8/6夜と8/8夜が比較的高くなっている。6日は熱帯雨林での実習、8日は砂漠での実習を終えた後であり、みな疲れが出ていたのだと考えられる。「放射線被曝シミュレーション」のセクションにもある通り、私たちは太陽のコロナ質量放出の発生を想定し、それによる太陽エネルギー粒子線の到着は8/7深夜から1日ほど続くと考えた。この想定がストレスとなりアミラーゼ濃度は上昇すると考えていたが、実際は大きな上昇はみられなかった。クルーは冷静に対処できていたものと考えられる。また、最終プレゼンテーションに向けてより強いストレス反応が見られると予想していたが、8/9朝の結果からわかるように、そのような傾向は見られなかった。

フェイススケールは値が低いほどストレス度が高いと考える測定方法であるが、夜に高くなり、朝に低くなる傾向がみられた。朝は前の日からの疲れや、その日のタスクについての心配により値が下がったのだと考えられる。夜はその日やるべきことが一通り終わったという安心感からリラックスした状態になり、値は上がったのだと考えられる。また、astronaut nightで宇宙飛行士による講演を聞くことで気分が高揚していたとも考えられる。

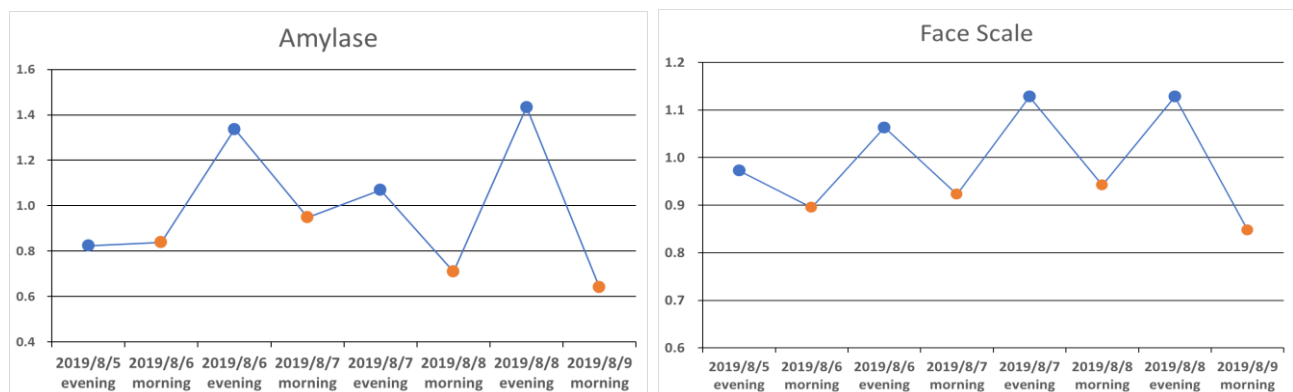


図11 アミラーゼ濃度（左）とフェイススケール（右）の時間変化

7. Student night

Student night 1 (8/5)について

プログラム初日の夜は Student night 1 が開催され、日本人学生五人が担当する課題に関して SCB 2 前に調査した内容について口頭発表を行った。各担当課題は、SCB 2 のミッションゴール「火星に B3 を建設する」をさらに細分化した以下の5つである。①火星の環境を調査し、諸要素を考慮・取捨選択して B3 建設の候補地を決定する。②大気構成や水・食糧の持続的な供給方法を調査し、火星における人類の生活に何が必要か検討する。③B3 の建設技術を調査し実現可能かつ望ましい形態、維持のためのエネルギー供給方法を検討して B3 をデザインする。④京都大学吉田キャンパス内全建築物の内と外側の放射線量を測定し、火星移住時に宇宙放射線から身を守る方策を検討する。

⑤2 週間ストレス調査を実施し、ストレス要因と測定された数値との関係を考察することで、宇宙ミッションという強ストレス環境下でのグループダイナミクスやパフォーマンス能力を評価する。これらの口頭発表に関して米国学生と教職員を交えた質疑応答を行い、これまでの調査内容を共有しミッションゴールの担当分野における大きなモデルを提示することができた。事前調査にあたって「調査内容の共有と新たな調査内容・振り分けを検討する会議、担当者へ調査内容の提出」を週 1 ペースで行い、ご指導いただいた先生方の前での事前発表や一般高校生向けに口頭発表するイベントに参加した。これらはなかなかハードなタスクであったが、同時に自身の学びならびに調査とその考察をより深いものとし、学術的な発表に必要なスキルを習得する機会となった。さらにプログラム本番では、事前に担当分野に関して十分な調査を行い英単語も習得していたことで言語の壁にひるむことなく米国学生とディスカッションを行うことができた。また我々日本人学生も、これらの課題を分担して担当し、共通のタスクを乗り越えていくうちに結束が強まってきたように感じる。



図 12 Student night 1 (課題 5 担当 橋本さん発表時)の様子

Student night 2 (8/9)について

プログラム最後の夜には Student night2 が開催された。米国学生に日本文化について楽しく知ってもらうという趣旨で、「書道・お茶・けん玉」を持参し、手順や遊び方を教えながら日本人学生も教職員も共に楽しんだ。どのブースも米国学生に大好評で、日本文化と米国文化の話にも花が咲いた。文化の体験や共有を通して学生間の距離もさらに近付き、10 人のクルーの結束力が強まり、この日は最後の夜を惜しむ気持ちで寮に帰った。(久保朋美 記)



図 13 (左)書道で「お手本」を見せる宮下君と習得のために手元を見つめる Chris Yurgel, (右)お茶のたてかたを見せる佐藤さん



図 14 (左)付箋を使って折り鶴を作成する学生たち
(右)学生に見守られながらけん玉に挑戦する土井先生

8. 所感

スペースキャンプの準備期間、本番を通して周りの皆さんの知識量や効率の良さには驚かされてばかりで、刺激の連続だった。どのような活動も一人でできることは限られていることを学び、チームで協力して物事を成し遂げることの大切さを実感することができた。今後宇宙探査に携わっていくために、英語の勉強を熱心に行なうべきではないと感じ、専門の壁を越えた幅広い知識をつけていきたいと強く感じた。また、アメリカの学生は論理立てて説明することが上手だったので、議論する力もつけていく必要があると思った。初めての経験ばかりで、様々な課題を見つけられた、充実したスペースキャンプであった。ご指導くださった先生方、宇宙ユニットの皆様、本当にありがとうございました。（平井颯）

各バイオームにおける実習から閉鎖環境下での生態系の変化と、維持するために要している設備やコストについて学ぶことができた。そして我々が生きている地球上の環境を人工で再現することがどれほど困難であるか実感した。またプログラム中には宇宙飛行士の方々と対話する機会が多く設けられており、彼らが宇宙へと飛び立って感じたことや考えたこと等を共有していただく機会に恵まれた。特に印象深かったのは土井先生の超新星爆発の話であった。これまで地球における生命の誕生が起点であった私の世界観が、宇宙規模の壮大な時間軸にまで一気に開けた瞬間であった。今回実習で得た知識と経験は、火星への移住案を検討するディスカッションに役に立つだけでなく、私たちが住む地球の環境維持の困難さ、それゆえの自然保護の大切さを痛感する貴重な機会となった。（久保朋美）

SCB2 を通して、心技体すべての面で成長していかなければならないということを実感しました。英語でのコミュニケーションスキルや、課題への取り組み方など「技」の部分はもちろん更なる勉強の必要性を感じました。特に議論をする状況になると言語の壁を大きく感じました。また、ストレスがかかる環境の中、初対面で言葉の壁もある人とすくすくあたって「心」、時差ボケや睡眠不足の中ハードスケジュールをこなすにあたって「体」を強化していかなければならないと気付くことができました。このキャンプで自分のことを客観的に振り返ることができ、とても良い経験となりました。（佐藤啓明）

今回の Space Camp を通して学術的な知見はもちろんたくさんの刺激を受けることができました。その中でもやはり僕にとって一番の収穫であったのは、アリゾナの学生（パートナー）と同じ釜の飯を食べ、英語でコミュニケーションをとりつつ、共同でタスクをこなすという経験そのものでした。この体験はまさしく ISS（国際宇宙ステーション）での宇宙飛行士の活動に類する部分が多く、「宇宙」という分野は、特に国際的かつ学際的性質の強い研究分野であるということを改めてかみしめることができました。また、Biosphere 2 での実習で一番印象に残ったことは、火星に Biosphere 3 を設置するうえで、地球の生態系への十分な理解が必要不可欠であるということでした。このような学問の二面性は特に宇宙学で顕著であると感じました。今回の Space Camp で得た知見や経験を生かして宇宙を目指していきたいと思います。（宮下裕策）

今回のスペースキャンプではとても貴重な経験をさせていただきました。日本での2ヶ月間の準備期間を通し、宇宙開発の可能性や難しさ、他のメンバーの知識の深さに驚かされました。B2 での実習で様々な実習を通して思ったことは、機械での管理は時に均一すぎて行きすぎになってしまい、自然が長年をか

けて作ってきた小さなゆらぎ、不均等な部分を人口で作ることはかなり難しく、自然のすごさを実感しました。また 3 名の宇宙飛行士からお話を伺い、宇宙への憧れが日に日に増していくことを感じました（図 15）。さらにアメリカのテレビにインタビューしていただくという、なかなかできない体験もさせていただきました。今回の経験を通し、今後の宇宙ユニットの活動、果ては宇宙開発に少しでも尽力できたらと思います。（橋本亜美）



図 15 SCB2 集合写真 油井亀美也宇宙飛行士を囲んで

大学院分野横断型講義「有人宇宙学」のご案内

授業科目名：有人宇宙学

対象学生：大学院生、学部生（聴講可）

曜日限：水曜日 5 限

場所：総合生存学館大講義室（2F）

概要・目的：有人宇宙活動を宇宙に恒久的に人類社会を創造する活動であると定義する時、人類が宇宙に展開するための新しい総合科学：人間－時間－宇宙を繋ぐ有人宇宙学が必要となる。有人宇宙学は、宇宙－時間（宇宙の進化）、時間－人間（生命の進化および文明の進化）、人間－宇宙（宇宙開発の進化）の 4 つの進化過程を司る学問である。それは、宇宙に人間社会を創ろうとする試みが、自然科学分野のみならず、人文社会科学分野にも幅広く関係していることによる。この講義では、人類が宇宙における持続可能な社会基盤を構築するために何が必要なのか、自然科学的・人文社会科学的に解説する。理工系ばかりでなく人文社会系学生が、宇宙における持続的社会的構築という命題の中に、自分の研究分野との接点を見つけ、自分の研究の新たな意義と新しい方向性を見出すことをめざす。

授業計画：

【第 1 回】 10 月 2 日 有人宇宙学 1（土井隆雄・山敷庸亮・田口真奈）

【第 2 回】 10 月 9 日 有人宇宙学 2（土井隆雄）

【第 3 回】 10 月 16 日 宇宙環境工学（山敷庸亮）

- 【第4回】 10月23日 宇宙探査工学（清水幸夫；JAXA）
- 【第5回】 10月30日 有人宇宙学演習1（土井隆雄）
- 【第6回】 11月6日 宇宙生命科学（保尊隆享；大阪市立大学）
- 【第7回】 11月13日 宇宙生物学（辻祥子）
- 【第8回】 11月20日 宇宙医学（寺田昌弘）
- 【第9回】 12月4日 有人宇宙学演習2（土井隆雄）
- 【第10回】 12月11日 宇宙霊長類学（湯本貴和）
- 【第11回】 12月18日 宇宙人類学（岡田浩樹；神戸大学）
- 【第12回】 12月25日 宇宙法（青木節子；慶応大学）
- 【第13回】 1月8日 宇宙居住学（稲富裕光；JAXA）
- 【第14回】 1月15日 有人宇宙学演習3（土井隆雄・山敷庸亮・田口真奈）
- 【第15回】 1月29日 フィードバック

* 講師の都合により、授業日程が前後する可能性がある。

大学院分野横断型講義「宇宙学」ご案内

授業科目名：宇宙学

曜日限：木曜日1限

場所：総合生存学館大講義室（2F）

授業計画：

第1回(10/3) 人間の宇宙観の変遷 Cosmology: from myth to modern science (山敷・磯部)

第2回(10/10) 人類の宇宙観の変遷 Physical history of the universe (伊藤和行先生・文学研究科)

第3回(10/17) 人類生存圏としての太陽地球環境 Solar-Terrestrial environment (浅井)

第4回(10/24) 地球外生命、宇宙人、宇宙文明 Extraterrestrial lives and civilizations (山敷)

第5回(10/31) 太陽系外惑星 Extrasolar Planets (山敷)

ペルーフレア監視望遠鏡(FMT)によるモートン波観測

Denis P. Cabezas (理学研究科附属天文台 D3)

浅井 歩(理学研究科附属天文台 准教授)

・CHAIN プロジェクトとペルー-FMT 望遠鏡

京都大学理学研究科附属天文台では、24 時間連続で太陽 H α 線全面画像を取得することを企図して、CHAIN (Continuous H-alpha Imaging Network) プロジェクトを推進してきました (<https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/CHAIN/index.html>)。太陽を全面で H α 線(1 万度の水素が発する波長 656.3nm の赤い光)で観測することにより、太陽の彩層という大気層で起きる現象、

突発的に発生する太陽面爆発(フレア)やプロミネンス/フィラメントといった太陽大気に浮かぶプラズマの噴出現象を捉えることができます。加えて、CHAIN プロジェクトでは、H α 線の線中心だけでなく少し波長をずらした観測を行うことで、光のドップラー効果を利用して、運動する彩層プラズマの速度を取り出すことも可能です。

CHAIN プロジェクトの一環で、南米ペルーとの国際共同研究が進められ、飛騨天文台にかつてあったフレア監視望遠鏡(Flare Monitoring Telescope; FMT)が 2010 年にイカ大学に移設されました(図 1)。人的交流も積極的に進められ、現地に講師を派遣したり、ペルー人学生を京都大学に招いてワークショップを開催したりしています。CHAIN プロジェクトは、国際共同研究プロジェクト CAWSES、ISWI をはじめ、国立天文台、九州大学、宇宙ユニットなど国内外の様々な機関からご支援を頂き、さらにサウジアラビアにも新たに望遠鏡を設置するなど順調に大きく展開されており、飛騨天文台 SMART 望遠鏡との 3 望遠鏡体制により、24 時間連続観測も可能になっています。

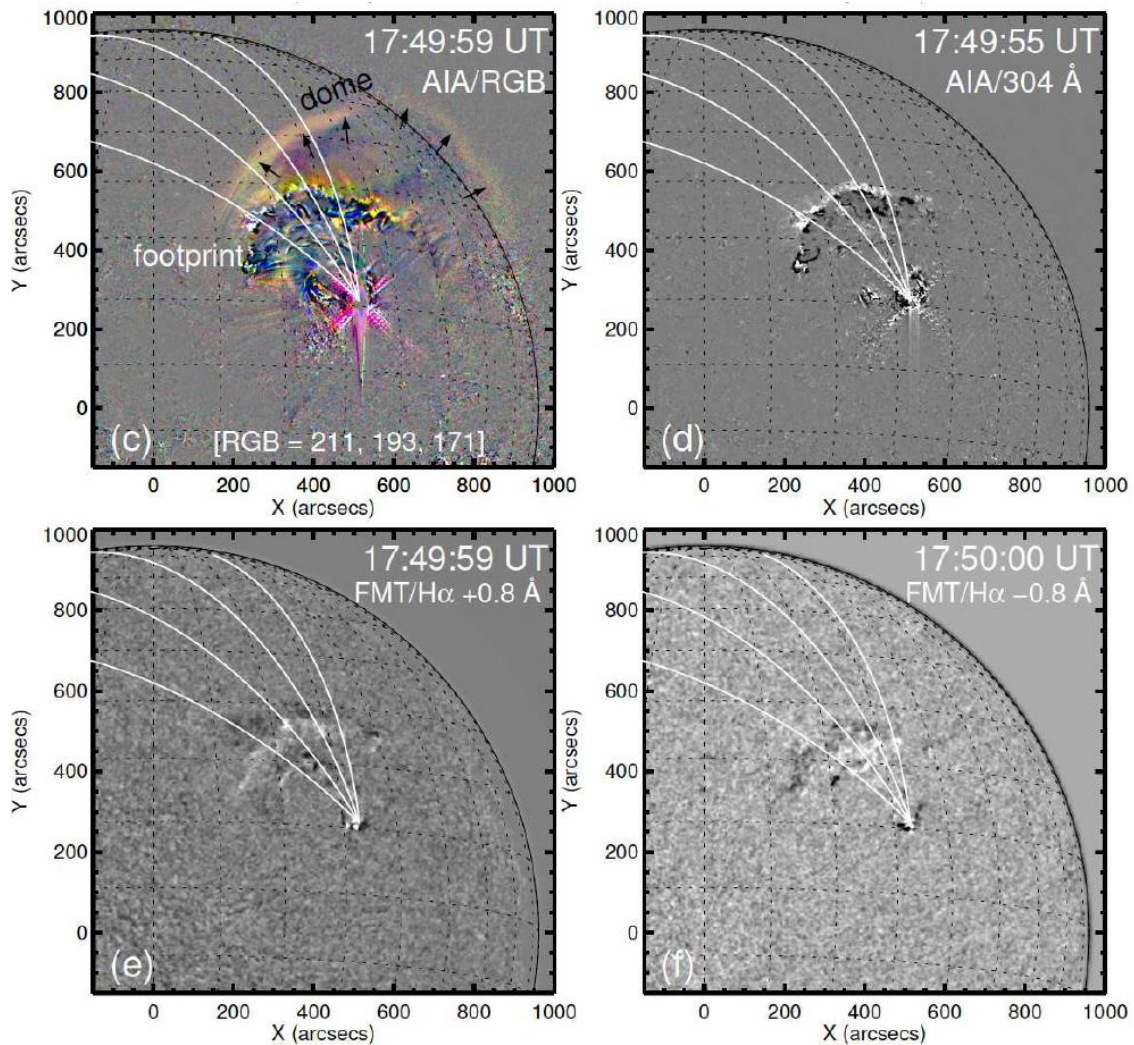
太陽 H α 線観測では、ごくまれに、太陽フレアに伴い発生するコロナ衝撃波が彩層と接する際に発生する「モートン波(Moreton wave)」が観測されます。モートン波は、発見こそ 1958 年になされていますが[1]、まれにしか観測されないため観測例が少なく、その特性や発生機構などが謎に包まれていました。一方 FMT は、飛騨天文台に設置されていた 1992 年から 2006 年の間に、世界中で観測されたモートン波のうち 3 分の 1 以上を捉えることに成功しており、モートン波の観測で多くの研究成果を挙げています[2, 3]。このため、CHAIN プロジェクトでも、モートン波は主要な観測ターゲットとなっています。近年では、SMART 望遠鏡によるモートン波観測と人工衛星によるコロナ衝撃波の同時観測に成功しており、モートン波に関する理解が一層進んでいます[4]。ペルーに移設後の FMT でも、モートン波の観測が待たれていました。



(図 1)ペルー・イカ大学に移設されたフレア監視望遠鏡(FMT)

・2014 年 3 月 29 日のフレアとモートン波

2014 年 3 月 29 日世界時 17 時 30 分(日本では 30 日の夜中 2 時 30 分に当たります！)に大フレアが発生し、それに伴い 850km/秒で伝播するモートン波がついにペルーの FMT で観測されました(図 2)。この観測例は、単にペルーFMT でのモートン波発検出というだけにとどまらず、H α 線のウイング(少し波長を線中心からずらした波長)での観測に成功したことで、モートン波の波面の速度場が初めて導出されました。コロナ衝撃波は超高速でコロナ中を伝播しますが、その際、彩層プラズマを約 4km/秒で押し込んでいることが分かりました。さらに、人工衛星 SDO 搭載の極端紫外線撮像装置(AIA)による複数の観測データを解析することでコロナ衝撃波の温度構造を導出し、磁気流体に関する衝撃波理論に基づいて、衝撃波の強さの指標である「マッハ数」を導出することにも成功しました。このモートン波のマッハ数は 1.05–1.27 であり、これまでに推定されていた例とおおよそ一致する値です。



(図 2)2014 年 3 月 29 日に観測されたモートン波。上段：SDO 衛星搭載の極端紫外線撮像装置 AIA によるコロナ衝撃波の様子。下段：ペルー-FMT がとらえたモートン波。画面中央やや下でフレアが発生し、モートン波は左上の方向に伝播している。差分画像(少し前の時刻の画像を差し引いている)のため、モートン波の通過による増光・減光が白・黒の弧状の構造となって見える。

[参考文献]

- [1] Moreton, G. E., 1960, AJ, 65, 494.
- [2] Eto, S., Isobe, H., Narukage, N., et al., 2002, PASJ, 54, 481.
- [3] Narukage, N., Hudson, H. S., Morimoto, T., et al., 2002, ApJL, 572, L109.
- [4] Asai A., Ishii, T. T., Isobe, H., et al., 2012, ApJL, 745, id.L18.
- [5] Cabezas, D. P., Asai, A., Ichimoto, K., et al., 2019, ApJ, in press.

京都大学 宇宙総合学研究ユニット
<http://www.uss.s.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：伊藤梓

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: uss.s@kwasan.kyoto-u.ac.jp