

宇宙飛行生物学 (Bioastronautics)の大学院 教育への利用

東京女学館大学 宮嶋宏行
2009.8.25 石川研究室輪講資料

宇宙生物学(Astrobiology) ?

- 宇宙生物学
 - 宇宙生物学(Astrobiology)とは地球に限らず、広く宇宙全体での生命体について考察し、生物生存の実態や生物現象のより普遍的な仕組み、生命の起源などを明らかにしようとする学問。
- 広義の宇宙生物学
 - 「地球以外の場所の生命に関する問題」
 - 「地球上の生命が宇宙に出た際の問題」
- 狭義の宇宙生物学
 - 動物、植物を利用した宇宙での実験
- 宇宙生物学の課題
 - 生命の起源と進化
 - 地球外生命の探査、地球外文明との交信
 - 地球生物の地球外への移住

宇宙飛行生物学(Bioastronautics) ? 宇宙生物学(Astrobiology)との違いは ?

- 背景
 - 宇宙飛行する人間への生物学的・医学的影響に関する研究。
 - クルーが宇宙環境で危険に曝されるリスクを同定、評価して、減少させる。
- 5つの分野
 - 人間健康、行動健全・性能、先端の人間支援技術、放射線医学、自立的医療
- 先端の人間支援技術
 - 宇宙船および惑星居住で人間居住をサポートするための効率的で、信頼できる、自律的な技術やシステムの開発。
 - 適当な施設での結合試験を通じた、**食料、生命維持システム、環境監視・制御システム、EVA技術、ヒューマンファクター**の解決。

参考文献 <http://bioastroroadmap.nasa.gov/index.jsp>

コロラド大学ボルダー校 航空宇宙工学科 宇宙飛行生物学カリキュラム

- 宇宙飛行生物学の2つの基軸
 - 宇宙生命科学
 - 宇宙居住環境設計
- 関連科目
 - 航空宇宙環境、ロケット推進、宇宙航力学
- 2つの選択肢
 - 修士論文なしコース
 - 宇宙飛行生物学セミナー、修了プロジェクトまたは課題研究(2セメスター)
 - 修士論文ありコース

カリキュラム詳細

- 宇宙生命科学
- ASEN 5016 Space Life Sciences (spring) <http://www.colorado.edu/ASEN/asen5016/>
 - Familiarizes students with factors affecting living organisms in the space flight environment. Covers basic life support requirements, human physiological adaptations and cellular-level gravity dependent processes. Emphasis placed on technical writing and research proposal preparation.
- 宇宙居住環境設計
- ASEN 5158 Space Habitat Design (fall) <http://www.colorado.edu/ASEN/asen5158/>
 - Utilizes systems engineering methods for designing a spacecraft intended for human occupancy and provides a working knowledge of the subsystems needed to sustain human life. Emphasis is placed on deriving functional requirements from stated mission objectives, developing integrated vehicle schematics, and comparing options by trade study.
- 宇宙飛行生物学プロジェクト
- ASEN 5519 Bioastronautics Projects (spring & fall) <http://www.colorado.edu/LunarMARS/>
 - The course meets the MS project requirement for students with an interest in human space vehicles and related infrastructure. The current project is set up to examine trade-space parameters applicable to the design of a Lunar Lander Habitat. Different projects may be pursued in future years. This course is still in pilot status as a Special Topics listing.
- 宇宙飛行生物学セミナー
- ASEN 5506 Bioastronautics Seminar (spring) <http://www.colorado.edu/ASEN/asen5506/>
 - Focuses on current research involving space flight medical and biological topics ranging from human life support to molecular-level processes. Literature analysis and scientific presentations are expected. Emphasis placed on biophysical mechanisms, comprehensive models and related technology development.

Space Life Sciences

- Overview of Humans in Space
 - Course Overview & Historical Perspective on Human Space Flight
 - Space Flight Environmental Parameters
 - Human Spacecraft Life Support Requirements and Trade Factors
 - Respiration and the Oxygen Cascade
 - Nutrition - Ch. 8, & Temperature Regulation
 - a) Motor Control & b) Chronobiology
 - Physiology of Extravehicular Activity (EVA) - Ch. 5
 - Human Performance in Space
 - Exam Review
 - Exam 1 = 2/12
 - Human Physiological Adaptations to Space Flight
 - Miscellaneous Human Physiological Responses to Space Flight
 - Neuro-Sensory System - Ch. 6 (balance) & Ch. 9 (motion sickness)
 - Skeletal System - Ch. 1
 - Muscular System - Ch. 4
 - a) Hormonal Regulation & b) Immunological Response
 - Radiation Effects - Ch. 3
 - Operational Space Medicine - Ch. 12 (partial)
 - Cardiovascular System - Ch. 7
 - Exam Review - linked summary & cardio feedback loop
 - Exam 2 = 3/19
 - Spring Break Week
 - Space Life Science Research
 - Space Biology, Experiment Design (& Proposal Writing)
 - Summary of Current Biomedical Countermeasures - Ch. 11 & 12 (partial)
 - Gravity Dependent Physical Processes
 - Ig & Og Analogs
 - Microbial Responses & Related Crew Health Issues
 - Space Biotechnology
 - Plant and Animal Research in Space
 - Guest Lecture "What it's really like to fly in space?" Joe Tanner
 - *Physiological Aspects* - CR 2
 - Astrobiology / Course wrap up / Mock panel prep
 - Mock Review Panel - Final Exam Period
- Textbook
"Space Physiology" by Buckley, Oxford University Press, 2006

Space Habitat Design

- **Course Overview**
 - Introduction to Human Spaceflight and Current Programs (Intro & Chapter 1, part 1) (Chapter 1, part 2)
 - Guest Lecture: J. Tanner – Consolidation Program Overview and Crew Perspective on S/C Designs
 - Guest Lecture: K. Higdon – Orbital Factors and Ares I and V Launch Vehicles (Chapters 9 and 10, partial)
- **Requirements**
 - Human Space Mission Primary Design Drivers (Chapter 2)
 - Space Environments – Orbital (Chapter 3) and Surface (Chapter 4)
 - Human Physiology (Chapter 5)
 - Human Factors and Psychology (Chapter 6 & 7)
 - EXAM 1 (History, Design Objectives and Requirements)
 - Safety and Reliability Issues (Chapter 8)
- **Systems Engineering Design**
 - Terminology, Definitions, Requirement Hierarchy and Design Phases
 - Defining and Sizing Space Elements by Functional Decomposition (Chapter 11)
 - Transfer, Entry, Landing and Ascent Vehicles (Chapter 12)
 - Surface Bases (Chapter 13)
 - Environmental Control & Life Support Subsystem (ECLSS) (Eckart Chapters I-IV)
 - Fundamentals of terrestrial ecology and scaling down to spacecraft constraints (Chapter II)
 - Historical Overview of Spacecraft Life Support Systems
 - Functional ECLSS Schematic Flow Diagram (Chapter IV)
 - Closed vs. Open Loop and Regenerative vs. non-Regenerative Technologies
 - Physico-Chemical vs. Bioregenerative Life Support Approaches
 - EXAM 2 (Systems and Technologies)

Space Habitat Design Cont.

- ECLSS Subsystem Technologies (Chapter 17 & Eckart Chapter V)
 - Atmosphere Management
 - Water Management
 - Food Supply
 - Waste Processing
- Crew (& Payload) Accommodations (Chapter 18)
- Extravehicular Activity (EVA) (Chapter 22 & Eckart Chapter IV.6.2)
- Shuttle ECLSS (view ppt slides, ~10 MB)
- **Subsystem Integration and Interface Definitions (Wrap Up)**
 - Structures (Chapter 21, partial)
 - Command, Control and Communication (C3) (Chapter 27, partial)
 - Power (Chapter 20, partial) & Thermal Control (Chapter 16, partial)
 - in situ Resource Utilization (ISRU) Considerations (Chapter 15, partial)
- **Operations**
 - Mission Operations (Chapter 26)
 - Logistics Support (Chapter 28)
 - FINAL EXAM – Monday December 15, 1:30-4:00 pm

Textbooks

1. Larson and Pranke, Human Spaceflight Mission Analysis and Design, The McGraw-Hill Companies, Inc, NY, Space Technologies Series, 1999
2. Peter Eckart, Spaceflight Life Support and Biospheres, Space Tech. Library Vol. 5, Kluwer Academic Publishers & Microcosm Press, 1996

Bioastronautics Projects

- 例) 月面着陸船の設計

Bioastronautics Seminar

Presenter	Topic
1. Prof. Klaus	Introduction / Overview
2. Prof. Klaus	Set speaker agenda for semester / Giving Effective Presentations
3. K. Higdon	Human Spacecraft Design Process
4. J. Metts	Electrochromic Thermal Control Concept for Spacesuit Application
5. E. Thomas	Managing Fouling in a Spacecraft Fluid Handling System
6. R. Witoff	BOP Data Collection Assessment - Systems Engineering Analysis Tool
7. R. Kobrick	Mars Habitat Arctic Simulation
8. J. Tanner	STS-97 P6 SA deploy anomaly
9. R. Purschke	Neutral Buoyancy Testing for Neutral Body Posture Determination
10. Prof. Klaus	Space Suit Evolution from Gemini to Shuttle
11.	<i>Spring Break Weekend meeting</i>
12. S. Jacobs	Overview of University of Maryland's EVA and Robotics Research Program
13. J. Reimuller	Orion Contingency Rescue and Recovery
14. J. Voss	Living and Working on the International Space Station
15. B. Kemper	TBD
16. Prof. Klaus	Wrap up

有人宇宙船設計概要

1. 居住容積と生理的要求の定義
2. 居住や移動のための宇宙船への要求を機能配分する。
3. 要求機能の実現のために必要な具体的要求は、最小質量、設計境界として定義される物理的・生理的、定量的な原理から求めることができる。
4. 最初の目標は、耐故障ではない最小機能/最小質量基準ライン形態を確立することである。
5. 基準ライン形態をもとに、耐故障の付加、主要でない機能の追加を評価する。この評価をリスク軽減達成や運用向上実現に相当する相対的な設計質量影響により行う。
6. リスクの評価には、Failure Mode Effects Analysis (FMEA)を機能単位で行う。

宇宙飛行生物学アカデミックプログラム

- **人間サブシステム**
 - 宇宙環境での生命維持
 - 健康維持
 - 運用設計
 - ヒューマンファクターの影響
- **居住容積の定義**
 - ミッション期間、クルーサイズ、ミッション機能
- **宇宙船サブシステム設計**
 - 機能配分
 - 汎用設計最適化 (MDO)
 - 物理的試作
 - 故障解析
 - リスク軽減
 - 運用・効率の強化

人間サブシステム

- 宇宙環境での生命維持
 - 主要な危険
 - 真空、極端な熱環境、流塵塵・デブリ、温湿度制御…与圧空間で解決
 - 放射線…シールドに十分な材料を補強する
 - 微小重力…人間、サブシステムに考慮すべき点が増える
 - 生命維持
 - ECLS
 - 呼吸…食品パッケージ、食べ残し、非可食部、衛生用ホップ、使用済み衣類
 - ECLS: 3C(Communication, Command, and Control)
 - 電力の三大消費者で、ピークと平均負荷に影響する
- 健康維持への対応
 - 微小重力への身体適応、医学的な諸問題、隔離空間、放射線への被曝
- 運用設計の考慮…運用と保守
 - EVA…エアロック、宇宙服、インターフェイス、空気の構成が変わる
 - 研究…ペイロード、サンプルリターン
 - 時間…家事や保守
 - ツール、スペアパーツ
- ヒューマンファクターの影響
 - 独自の人間工学…ワークステーションレイアウト、作業の心理的能率、飲食要求
 - 居住環境…トレードスタディでクリティカルなパラメータではないが、長期的にはミッションの成否に関わる重要な役割を果たす。
 - 時間的影響…ミッションの初期と後期では人間の能力も変化する。

居住容積の定義

- 容積に影響する3つの要因
 - ミッション期間
 - クルーサイズ
 - ミッション機能
- モックアップを製作して、居住容積とレイアウトを評価する。
 - Hands-on design activities
 - 企業や政府とのアカデミックなコラボレーション

宇宙船サブシステム設計 機能配分

- 宇宙船の最下層の機能の特定から行う。
- 機能を、特定のサブシステム、アセンブリ、サブアセンブリ、部品まで対応づける。
 - このアプローチは、機能的に結合されたシステムの検証のための管理プロセスを与える。
- 概念設計初期においては、概念の証明のために機能的ベースラインを確立する。
- 不確定要因を考慮して、技術評価、リスク軽減のための戦略基準を与える。

宇宙船サブシステム設計 汎用設計最適化(MDO)

Multidisciplinary design optimization

- Sobieszczanski-Sobieski and Haftka (1997)
- 複雑なシステム
 - 専門的な高い意識を持つ設計者の中で強い相互作用があるシステム

宇宙船サブシステム設計 物理的試作

- 設計は物理的対象や材料に関する経験によるところが大きい。
- 設計で、ハードウェア(試作品)を利用することは、考えるための強制的な媒体になる。
- 学生は自分の考えやアイデアを明確にするために単純な「物」を利用する。その「物」はコミュニケーションを促進するためにも使われる。
- 工学設計において“hands on” hardwareを利用することの論理的根拠 Brecreton and McGarry (2000)
 - ハードウェアに触れる。
 - 概念モデルのための物理的な存在を与える。
 - その振る舞いは、概念モデルのエラーを明確にする。
 - 利用者の探索を誘発するような予想外の方法で振舞う。
 - 異なる利用環境、異なる利用状況の中で、異なる様式で振舞う。
 - ハードウェアやハードウェアの結合による相互作用は、ハードウェアやハードウェア要素の特性や制約を明確にする。
 - 質問の方向、アイデア生成、発見、グループ相互作用のダイナミクスに影響するコミュニケーションに不可欠である。
 - 物理的対象物は、注目を集めたり、デモンストレーションしたり、説得したりするのに利用できる。

宇宙船サブシステム設計 故障解析

- Failure Mode Effect Analysis (FMEA)
 - ボトムアップ手法(FTAはトップダウン手法)
 - 機能、サブシステム、コンポーネントでの故障の可能性をマッピング
 - 機能配分とFMEAを組み合わせ、スペースクラフト全体のリスクを減少させるために、冗長性や信頼性の向上が要求されるサブシステムやコンポーネントを特定する。
 - 平均故障間隔 Mean Time Between Failure (MTBF)を用いて故障率や時間に依存した故障を考えるのは次の段階。
- 致命度
 - 致命度1: 緊急避難というシナリオがなければ、宇宙船全体性とクルーを失う故障
 - 致命度2: ミッションの損失につながり、致命度1にならないことを保障するために中止を要求するような故障
 - 致命度3: 時間に依存した修正措置を要求したり、致命度2になる可能性のある軽故障
 - 致命度4: 致命度が3にならないように監視を要する本質的でない故障

宇宙船サブシステム設計 リスク軽減

- スペースクラフトのリスク軽減(Won et al. (2000))
 - プロジェクトの失敗、財政的失敗、負傷、身体的損傷を最小化するような計画の立案
 - 安全性、信頼性を向上させることは、宇宙船の質量、複雑さ、そして全体プログラムのコストに影響する。

宇宙船サブシステム設計 運用・効率の強化

- 安全性・信頼性の次は、宇宙船、ミッション、クルータスクの運用を強化することで、質量とコストの間での別のトレードオフがある。
- リスク軽減の付加が示唆される場合、**運用の向上**によって得られた利得は、**質量、コスト、複雑さ、故障モード**に相当する重み付けがなされ、**厳密な解析**によって合理的に考えられなければならない。

事例

事例1 月面着陸船 Phase 1

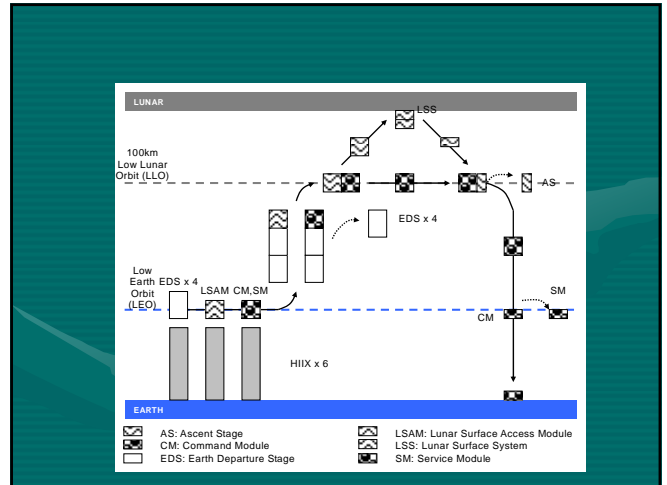
- 2006 fall、NASA Vision for Space Exploration (VSE)に学生が触発される。
- Full-scale Lunar Lander mockup製作
 - 宇宙船の設計思想を実践的(hands-on)に理解するため。
 - Exploration Systems Architecture (ESAS) baseline (NASA 2005)をもとにする。
- 2007 spring、Lunar Module Designクラス(大学院レベル)
 - Lunar surface habitatの基準外部構造を組み立てた。
- 2007 summer
 - ハッチ設計、ダスト軽減



Fig.1 Full-scale Volumetric Mockup of Lunar Lander Habitat

事例1 月面着陸船 上昇モジュール Phase 2

- 上昇モジュールは効率的に打ち上げられなければならない。
- 先にあるすべての他のシステムの推進系のペイロード要求に関わる。
- 質量の最小化は、他のシステムの設計に非線形に波及する。
- 解は、容積測定のみockupを作ることによって選択される。



事例1 月面着陸船 上昇モジュール Phase 3 (現在)

- 最小機能(冗長性なし、安全性なし、マージンなし)要求以降の設計に移行し、ロバストな形態を追求
- 構造、インテグレーション&レイアウト、センサー&データフロー
 - 目標の達成のための計画や実行 Statement of Work (SOW)
 - プロジェクト管理 Work Breakdown Structure (WBS)、Gantt Chart、Weekly Quad Chart

事例1 月面着陸船 上昇モジュール 設計問題の統合化

- 現セメスタの作業
 - プロジェクト目標の概要を述べる
 - 制約の明確化
 - 仮定の文書化
 - 基本原理の定義
- 宇宙船の機能レベルとミッション期間をもとに3つのケースについて解析
 - 最小機能最小期間
 - 最小機能最大期間
 - 最大期間のロバスト設計

事例1 プロジェクト(講義)の最終目的

- 特定の設計を考え出すことではない。
- リスク軽減と運用延長ペナルティとを関連付けさせた概念設計質量推算のためのトレード解析ツールの開発
- 確率的な入力と人間信頼性要因を含む設計ツールに拡張すること。

CU Lunar Module and Analog Research Station (LunarMARS) Program

The Goals for the Lunar Habitat analog design project are as follows:

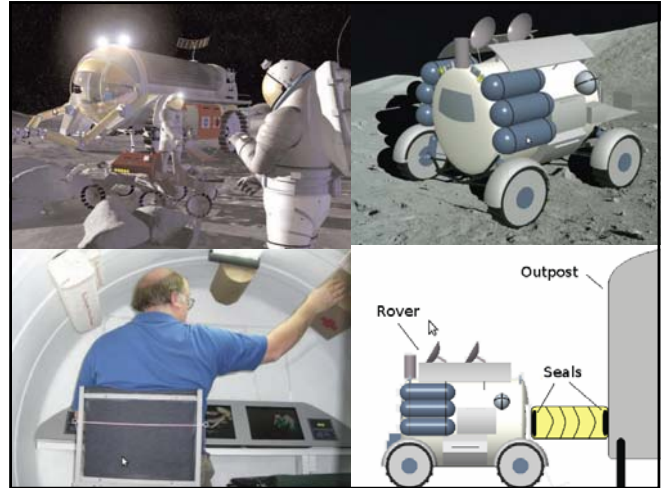
1. Analyze anticipated crew tasks to evaluate operational requirements for lunar surface sortie missions
2. Utilize a rapidly-reconfigurable, full-scale prototype to assess Lunar Habitat configuration trade spaces
3. Conduct computational analyses coupled with the physical mockup aimed at optimizing vehicle mass
4. Host local K-12 and public outreach events showcasing a 'life size spacecraft'

事例2 メリーランド大学 宇宙システム研究室

- メリーランド大学上級設計コース
 - Terrapin Undergraduate Rover for Terrestrial Lunar Exploration (TURTLE)の開発
- 目標
 - 居住性、生命維持システムの検討のためのたたき台とする。
- 設計要求
 - 2,500kg、与圧月面ローバー、2人×8日間維持、100kmの範囲
- 問題
 - 生命維持システムの要求
 - 居住設備の要求 (生命維持システムの配置と関係がある)
- 試験
 - Full-scale mockupを利用

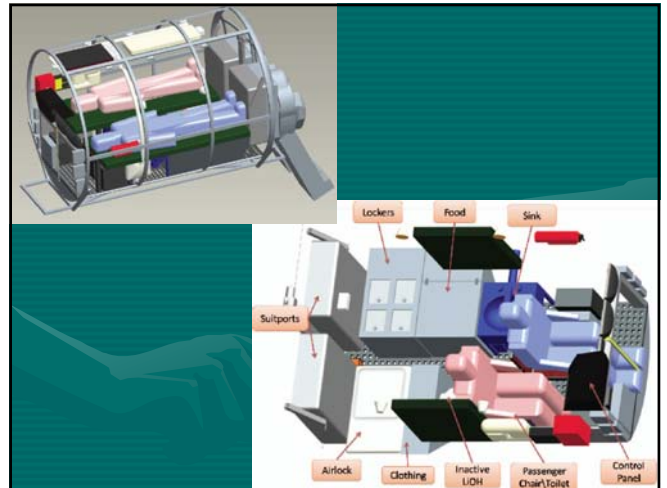
事例2 概観

- 設計要求
 - 2人 × (3日出撃 × 2回 + 48時間の予備)
 - 95%アメリカ人男性、5%アメリカ人女性
 - ローバーの減圧なしでEVA × 2人、着陸機から自律的に降りて、10km走行してクルーと会うことができる。
 - 進化した拡張打ち上げ船を打ち上げできる。
 - 持続性、多面性がアポロとの違い
- モックアップ製作
 - ローバーの居住性の評価のため、様々なレイアウトを試す。
 - 異なる運用、シート位置、操作パネルについても検討できる。
- 拠点とのインテグレーション
 - 他のモジュールとのドッキング



事例2 検討事項

- 生命維持システム
 - 技術選択肢の比較にESMを利用
 - 空気系、水系
- 放射線
 - 造血臓器への被曝 女性の場合 0.25 Sv per day, 0.5 Sv per year, 1.0 Sv for their career
 - 宇宙からの放射線や、地面からの放射線、食物に含まれている放射線といった微量の放射線を毎日自然に浴びている。この量は平均すると岸間で約10022シーベルトとなる。
 - 銀河宇宙放射線、太陽エネルギー粒子 (過去最大 8.10×10^8 in Aug. 1972)、後者は防ぎやすいが、いつ起こるかわからない。
 - 人命を損傷する確率は1/1000以下
 - 50 g/cm^2 のシールドが必要、TURTLEの場合 10.2 g/cm^2
- 居住性
 - TURTLEの場合 直径180cm、長さ240cm
 - スリーピングモード (仰向け)、低重力では仰向けでは寝られない。
 - 貯蔵スペース不十分、トイレ



事例2 生命維持システムの形態マトリックス

機能	技術
CO2除去	4BMS, 2BMS, EDC, APC, SAWD, LiOH, METOX
O2供給	貯蔵、冷却貯蔵、SPWE
N2供給	貯蔵、冷却貯蔵
衛生水処理	MF, RO
尿処理	TIMES, VCD, VAPCAR

