

# 探査に必要な 宇宙医学/健康管理技術

---

山村 侑平

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

有人宇宙技術部門 宇宙飛行士・運用管制ユニット

宇宙飛行士健康管理グループ

# 有人探査に必要な健康管理技術とは？



探査ミッションに必要な科学レベル

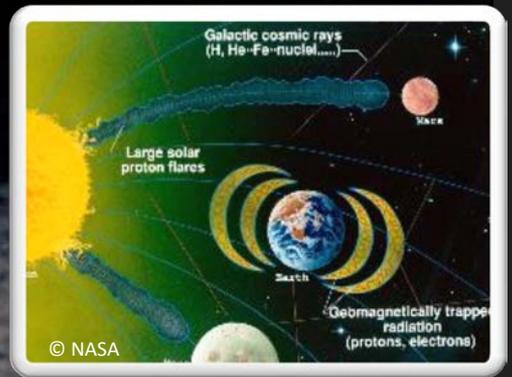
探査ミッションでの健康管理



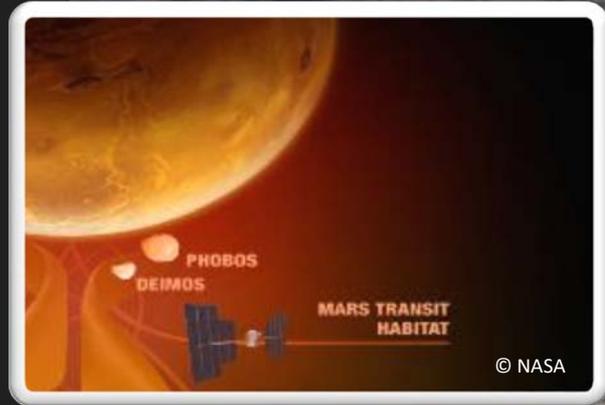
# 探査ミッションの健康リスクファクター



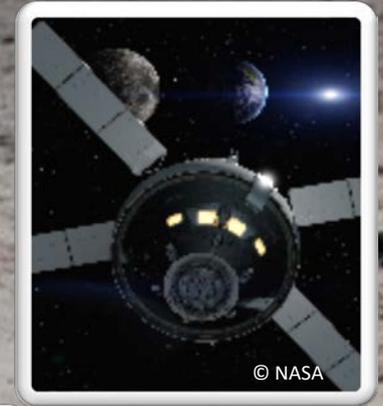
重力再適応



宇宙放射線被ばく



超長期宇宙滞在  
(閉鎖・隔離環境、微小重力)



地球からの距離  
・省スペース  
・無補給  
・通信遅延



粉塵 (月面ダスト)



砂・砂嵐 (火星)

# 探査ミッションの健康リスク

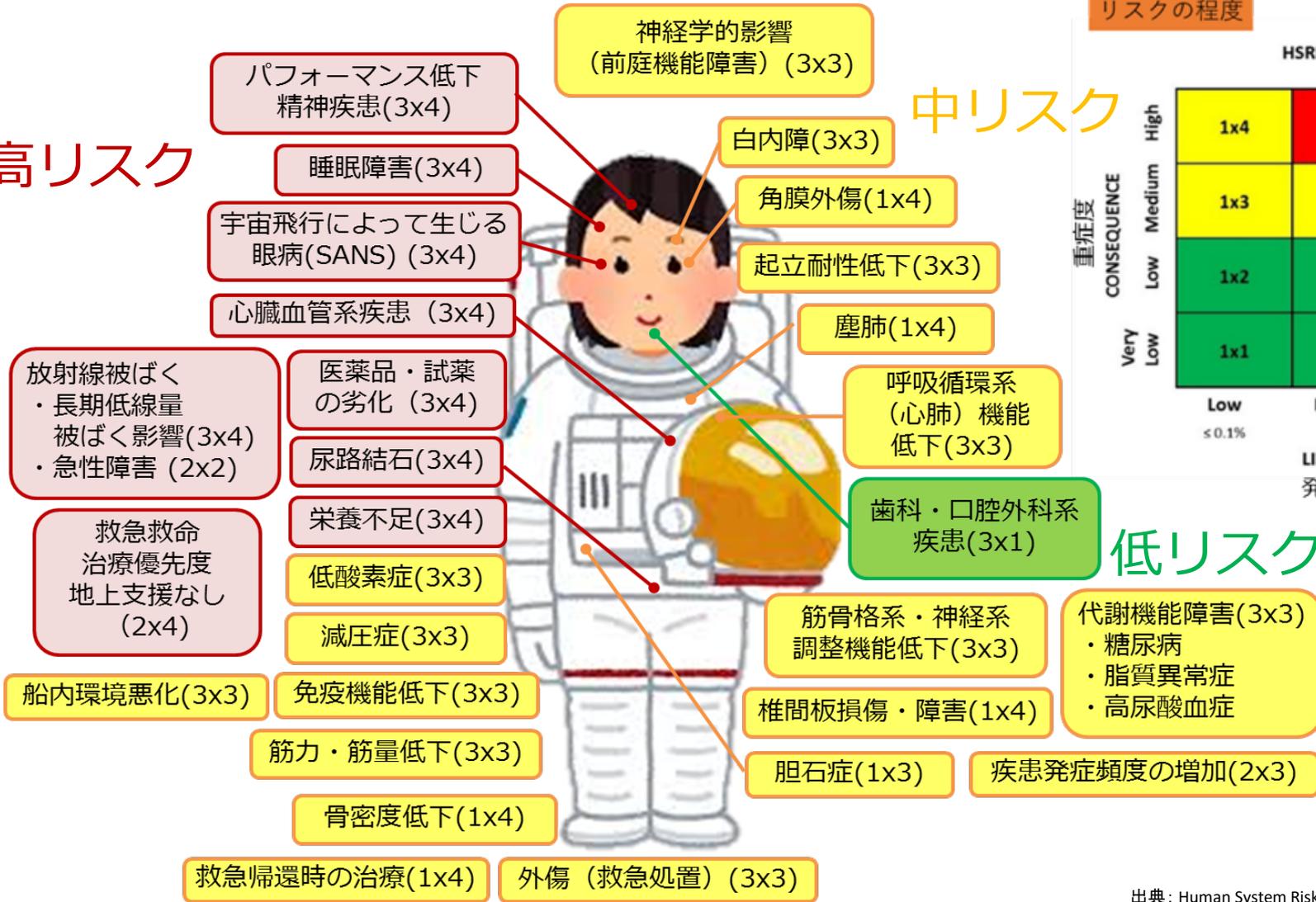
高リスク

中リスク

リスクの程度

HSRB Risk Matrix

重 症 度 CONSEQUENCE	High	1x4	2x4	3x4
	Medium	1x3	2x3	3x3
	Low	1x2	2x2	3x2
	Very Low	1x1	2x1	3x1
		Low ≤ 0.1%	Medium < 1%	High ≥ 1%
		LIKELIHOOD 発生頻度		



低リスク

出典: Human System Risk Management Plan – JSC 66705

探査ミッションの健康リスクの程度を評価 (L x C)  
健康リスク低減のための技術ギャップを識別 (次頁以降) 4



## 神経学的影響 (前庭機能障害)

月面  
リスク 3X2

火星面  
リスク 3X3



- めまい、眼振、頭痛、協調運動障害、起立歩行障害等  
宇宙機の操縦/操作能力の低下、転倒による外傷、活動制限

- **検査** 前庭機能評価
- **予防対策** 微小重力下での予防、クルー作業支援/補助

## 起立耐性低下

月面  
リスク 3X1

火星面  
リスク 3X2

- 意識低下、ふらつき、めまい、錯乱、活動制限

- **予防対策** 微小重力下での予防、クルー作業支援/補助

## 筋骨格系・神経系 調整機能低下

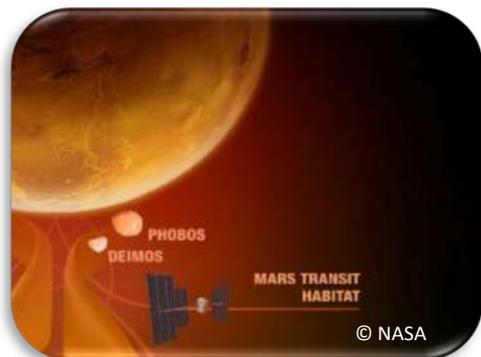
月面  
リスク 3X2

火星面  
リスク 3X3

- 運動障害、起立歩行障害、転倒による外傷、活動制限

- **検査** 画像機器を用いた自律動作解析
- **予防対策** 省スペース運動機器（微小重力環境で使用）、運動手法

# 重力再適応×超長期宇宙滞在



## 筋力・筋量低下

月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク 3X3

- 外傷（転倒、骨折、肉離れ）、活動制限
  - **検査** 自律した筋力・筋量評価  
(測定による外傷リスク最小化・安全管理含む)
  - **予防対策** 微小重力下での予防、クルー作業支援/補助

## 骨密度低下

月面  
リスク N/A

火星面  
リスク 1X4

- 骨折、骨密度低下時の活動制限
  - **検査** 骨密度検査（DEXA、超音波）
  - **予防対策** 骨量・骨密度の維持
  - **治療** 骨密度低下時/骨折が生じたときの治療  
安静期間の活動支援/補助、リハビリ支援



## 椎間板損傷・障害

月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク 1X4

- 腰痛、麻痺、活動制限
  - **検査** 画像診断検査（X線、磁気共鳴画像：MRI）
  - **治療** 椎間板障害の治療（牽引、ブロック療法等）  
安静期間の活動支援/補助、リハビリ支援

# 超長期宇宙滞在(1/2)

## 心臓血管系疾患

月 (1年)  
リスク 3X3

火星 (3年)  
リスク 3X4

- 心臓血管系疾患 (冠動脈疾患/不整脈等)
  - **検査** 自律した心電図検査、血液検査 (その場分析)
  - **予防対策** 栄養・献立管理等
  - **治療** 発症した場合の治療方法

## 宇宙飛行によって 生じる眼病(SANS\*)

月 (1年)  
リスク 3X3

火星 (3年)  
リスク 3X4

- 眼球後部平坦化、視神経周辺組織の変形
  - **検査** 自律した画像診断 (光干渉断層計)
  - **予防対策** 予防策 (発症原因が明らかではない)
  - **治療** 治療策 (発症原因が明らかではない)

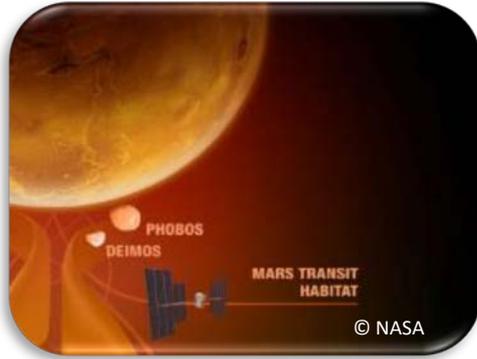
\*: Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome

## 尿路結石

月 (1年)  
リスク 3X3

火星 (3年)  
リスク 3X4

- 激しい痛み、活動制限
  - **検査** 自律した画像診断検査
  - **予防対策** 尿中カルシウム排泄の抑制、栄養管理
  - **治療** 体外衝撃波結石破碎療法



# 超長期宇宙滞在(2/2)

## 免疫機能低下

月 (1年)  
リスク 3X2

火星 (3年)  
リスク 3X3



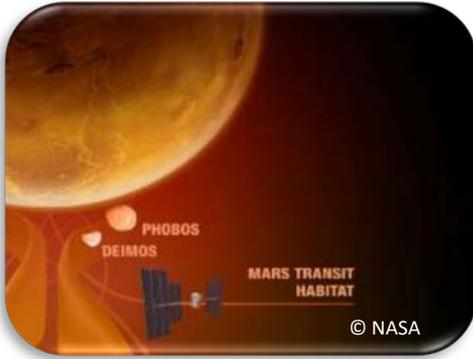
- 感染症（日和見感染症）、保持ウイルスの再活化
  - **検査** 船内微生物種の同定検査（その場分析）、血液検査
  - **予防対策** 免疫機能の賦活化（予防接種）、腸内環境健康（免疫機能低下の原因を明らかにする必要あり）  
滅菌・消毒等の衛生管理、皮膚を清潔に保つ手法
  - **治療** 発症した場合の治療方法

## 呼吸循環系 (心肺) 機能低下

月 (1年)  
リスク 1X4

火星 (3年)  
リスク 3X3

- 全身持久力の低下、活動制限
  - **検査** 自律した有酸素運動能力（最大酸素摂取量）評価
  - **予防対策** 運動手法、運動機器の小型化





## 外傷（救急処置）

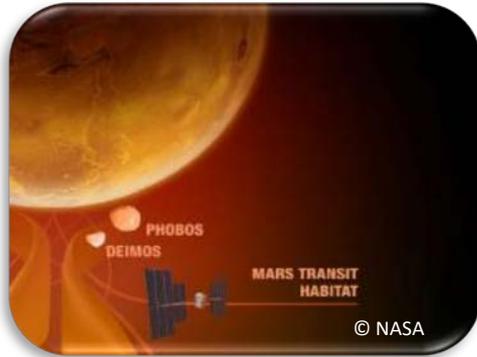
月面  
リスク 3x3

火星面  
リスク 3X3

- 月、火星での重力下環境により外傷リスク増加
  - **治療** 自律した一次救急処置技術  
自律した二次救急処置技術  
(入院、手術を要する症例の治療)



医療廃棄物の処理、医療材料の再利用  
(病理廃棄物、体液・血液、廃液の処理)



## 火星突入時の心臓機能異常（不整脈）

月(1年)  
リスク N/A

火星(3年)  
リスク 1X3

- 不整脈、意識消失（加速度暴露時の心臓血管系負担）
  - **モニター** 自律的な心電図評価



# 超長期宇宙滞在×地球からの距離(1/5)



## 代謝機能障害

月(1年)  
リスク 3X2

火星(3年)  
リスク 3X3

- 糖尿病症状(疲労感)、脂質異常症(動脈硬化)、高尿酸血症(急性関節炎)、活動制限

- **検査** 血液検査(その場分析)
- **予防対策** 栄養・献立管理等
- **治療** 発症した場合の治療方法

## 歯科・口腔外科系疾患

月(1年)  
リスク 2X1

火星(3年)  
リスク 3X1

- う蝕・歯周病(歯・歯ぐき痛)  
知覚過敏、咬合時疼痛  
(長期閉鎖ストレス:顎関節症、口臭)  
(外傷:歯牙破折、歯根破折、歯脱臼)

- **検査** 歯科検査
- **予防対策** クリーニング(PMTC\*)、フッ化物塗布、知覚過敏予防
- **治療** 切削・非切削対応、修復法、スプリント治療



\*: Professional Mechanical Tooth Cleaning

## 胆石症

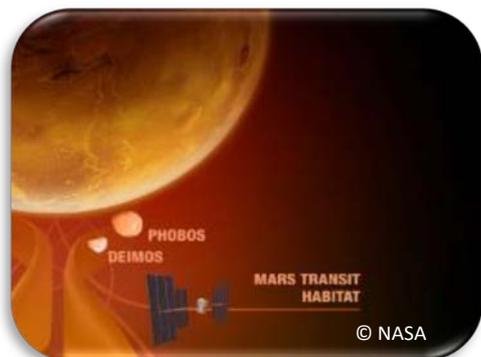
月(1年)  
リスク 1X3

火星(3年)  
リスク 1X3

- 胆石症症状(腹痛、発熱等)、活動制限

- **検査** 画像診断検査(X線、エコー)
- **予防対策** 栄養・献立管理等
- **治療** 溶解療法、摘出術、体外衝撃波結石破碎療法

# 超長期宇宙滞在×地球からの距離(2/5)



## 減圧症（船外活動）

月面  
リスク 3X2

火星面  
リスク 3X3

- EVA回数の増加による発症リスクの増加  
呼吸器障害、関節痛、しびれ
- 予防対策 減圧症発症リスク軽減策

## 低酸素症（船外活動）

月面  
リスク 3X2

火星面  
リスク 3X3

- EVA回数の増加による発生リスクの増加、判断力低下
- 治療 重症化した際の継続治療

## 睡眠障害

月（1年）  
リスク 3X2

火星（3年）  
リスク 3X4

- 不眠症、パフォーマンス低下
- 検査 睡眠・覚醒度評価
- 予防対策 事前教育・訓練
- 治療 自律的治療法（光照射療法）

## パフォーマンス低下（個人/チーム）

### 精神疾患（ストレス因関連障害：適応障害等）

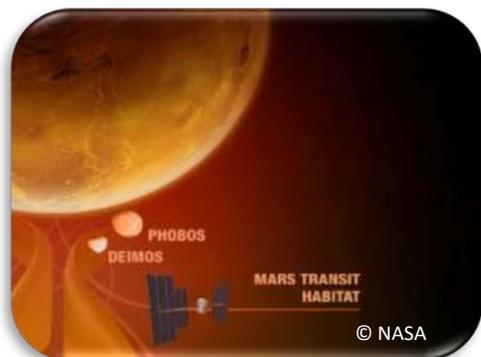
月（1年）  
リスク 3X2

火星（3年）  
リスク 3X4

- 個人/チームのパフォーマンス低下
- 検査 セルフケア、レジリエンス、集団力学等の行動評価、磁気共鳴画像（MRI）  
ストレスマーカー評価（血液分析）
- 予防対策 事前教育・訓練、クルー相互ケア、業務管理の自己裁量・余暇バリエーションの拡大
- 治療 自律的治療法（電気けいれん療法、光照射療法）



# 超長期宇宙滞在×地球からの距離(3/5)



## 医薬品・試薬の劣化

月(1年)  
リスク 1×1

火星(3年)  
リスク 3×4

- 医薬品・試薬の劣化(酸化、光分解、加水分解、放射線分解)

➤ 予防対策 医薬品・試薬の超長期保管技術、長寿命化

## 地上支援なし

月(1年)  
リスク 1×1

火星(3年)  
リスク 2×4

- リアルタイム双方向通信による問診ができない  
救急処置時に地上支援ができない

- 検査 自律型問診(身体所見)支援
- 治療 救急処置の飛行前訓練、飛行中の処置支援  
術後の安定化(手術をする場合)



## 疾患発症頻度の増加

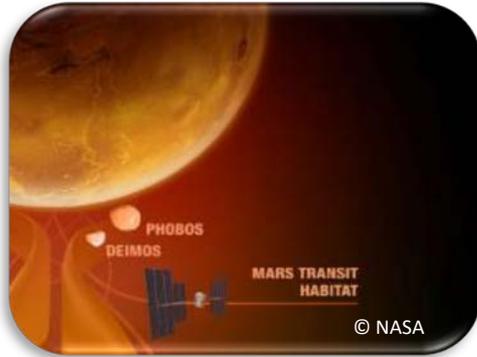
月(1年)  
リスク 2×3

火星(3年)  
リスク 2×3

- 遺伝的要因が関連する疾患の発症頻度の増加

➤ 検査 遺伝的リスクの事前評価

# 超長期宇宙滞在×地球からの距離(4/5)



## 栄養不足

月(1年)  
リスク N/A

火星(3年)  
リスク 3X4



- 栄養失調、代謝機能障害  
パフォーマンス低下、活動制限

- **検査** 血液検査(その場分析)
- **予防対策** バリエティ豊富な食事メニュー/栄養・献立管理  
長期食品保管技術、残渣の少ない食品包材
- **治療** 栄養不足による体調不良に陥った場合の治療策

## 船内環境の悪化

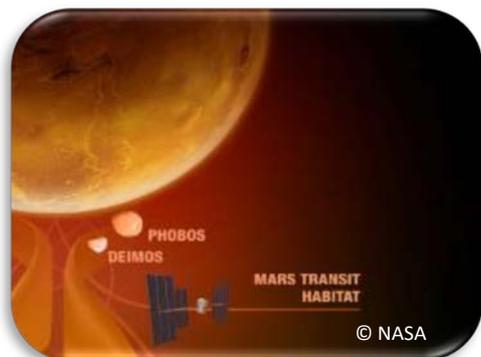
月(1年)  
リスク N/A

火星(3年)  
リスク 3X3

- パフォーマンス低下、健康状態への悪影響(有害物質汚染、感染症)

- **モニター** 空気質・オフガス定量分析、  
船内微生物種の同定検査(その場分析)
- **予防対策** 滅菌・消毒等により衛生管理(空気・水再生技術含む)  
皮膚を清潔に保つ手法、  
悪臭原因物質の除去・緩和、船内空気の消臭・無臭化、  
空間への芳香付与  
衛生用品・被服の再利用(洗濯技術含む)

# 超長期宇宙滞在×地球からの距離(5/5)



×



## 救命処置 (ALS、BLS)

月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク 2x4

- 地上からの支援なしの二次救命処置 (ALS\*1)、一次救命処置 (BLS\*2)の実施

➤ 治療 処置ナビゲーション

\*1: Advanced Life Support \*2: Basic Life Support

## 治療優先度 (トリアージ)

月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク 2x4

- 救助可能な傷病者を優先的に治療
  - 治療 手術侵襲に耐えられる全身状態、術後の安定化を考慮したガイドライン 自動診断システム

## 救急帰還時の治療

月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク 1x4

- 救急帰還中に船内で継続した安定化が必要
  - 治療 術後の安定化、保存療法 (痛みの緩和など)、低体温/体温管理療法

## 死亡時の対応

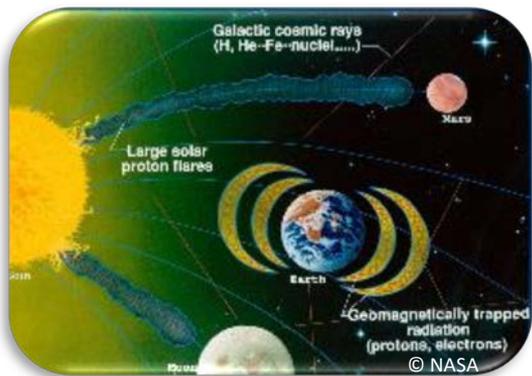
月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク 1x4

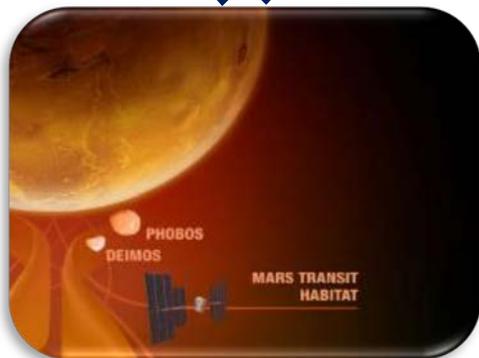
➤ 対策 飛行士死亡時の対応方法 (遺体保管・管理)



# 放射線被ばく × 超長期宇宙滞在



×



## 白内障

月 (1年)  
リスク 2X3

火星 (3年)  
リスク 3X3

- 白内障発症/進行、視力低下、活動制限
  - **検査** 自律した白内障検査
  - **治療** 発症した場合の治療方法 (眼内レンズ交換)

## 長期低線量被ばく影響

月 (1年)  
リスク 1X4

火星 (3年)  
リスク 3X4

- がん死亡リスク増加、白内障、微生物変異
  - **モニター** 実効線量評価 (長寿命なアクティブモニター)  
火星周囲および航行中の宇宙環境観測
  - **予防対策** 被ばく影響の低減策  
物理的に被ばく量を低減させるための遮蔽技術  
消毒・滅菌・洗浄技術 (微生物変異対策)

## 放射線急性障害

月 (1年)  
リスク 2X2

火星 (3年)  
リスク 2X2

- 皮膚損傷、血液障害、不妊
  - **モニター** 組織等価線量評価 (自律的、長寿命なアクティブモニター)  
火星周囲および航行中の宇宙環境観測
  - **予防対策** 物理的に被ばく量を低減させるための遮蔽技術
  - **治療** 急性放射線障害治療

# 粉塵・砂・砂嵐



© NASA

## 塵肺

月面  
リスク 1X4

火星面  
リスク？

- 塵肺症状（咳、痰、喘鳴、息切れ）、活動制限
  - **検査** 画像診断検査（X線）、呼吸機能検査
  - **モニター** 空気清浄度評価
  - **予防対策** 粉塵の清掃・除去方法
  - **治療** 塵肺治療

## 角膜外傷

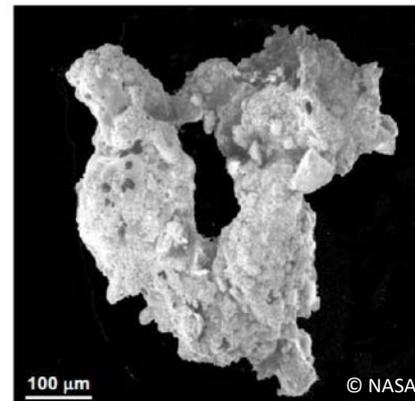
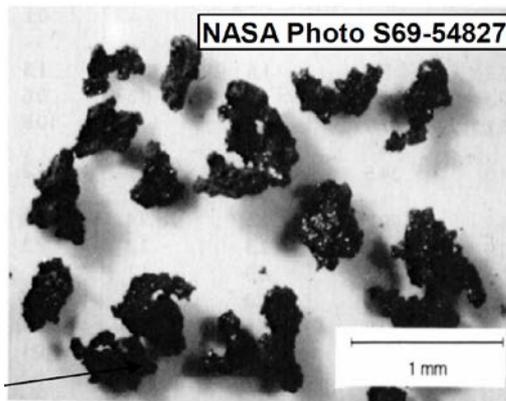
月（1年）  
リスク 1X4

火星（3年）  
リスク？

- 角膜異物、角膜潰瘍による眼痛、視力低下、活動制限
  - **予防対策** 眼への粉塵混入防止策、粉塵の清掃・除去方法
  - **治療** 眼への異物混入の治療



© NASA



# 探査ミッションの健康リスク（まとめ）



## 高リスク

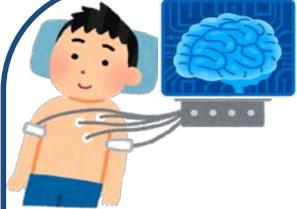
- 心臓血管系疾患 (3×4)
- 眼病 (SANS) (3×4)
- 尿路結石 (3×4)
- 睡眠障害 (3×4)
- パフォーマンス低下・精神疾患 (3×4)
- 医薬品・試薬の劣化 (3×4)
- 栄養不足 (3×4)
- 放射線長期低線量被ばく影響 (3×4)
- 救命処置/治療優先度/地上支援なし (2×4)

## 中リスク

- 神経学的影響 (前庭機能障害) (3×3)
- 筋骨格系・神経系調節機能低下 (3×3)
- 筋力・筋量低下 (3×3)
- 免疫機能低下 (3×3)
- 呼吸循環器系機能低下 (3×3)
- 外傷 (救急処置) (3×3)
- 代謝機能障害 (3×3)
- 減圧症 (3×3)・低酸素症 (3×3)
- 船内環境の悪化 (3×3)・白内障 (3×3)
- 起立耐性低下 (3×2)
- 疾病発症頻度の増加 (2×3)
- 椎間板損傷・障害 (1×4)
- 骨密度低下 (1×4)
- 救急帰還時の治療 (1×4)
- 死亡時の対応 (1×4)
- 塵肺 (1×4)
- 角膜外傷 (1×4)
- 火星突入時の心臓機能異常 (1×3)
- 胆石症 (1×3)

高リスク・中リスクの低減に関する  
技術ギャップを埋めることが重要！！

# 共通する技術項目 (1/2)



自動診断・  
解析システム  
(自律評価)

筋力筋量低下

地上支援なし  
(自律問診)

眼病(SANS)

心臓血管系  
疾患

白内障

長期低線量  
被ばく影響

筋骨格系  
神経系調整  
機能低下

呼吸循環系  
(心肺)  
機能低下

治療優先度

放射線  
急性障害



処置  
ナビゲーション

歯科・口腔外科系疾患

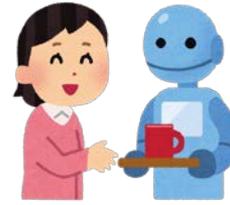
精神疾患

尿路結石

外傷 (救急処置)

救命処置 (ALS、BLS)

救急帰還時の治療



作業支援/補助

神経学的影響

起立耐性低下

筋骨格系  
神経系調整  
機能低下

骨密度低下

筋力筋量低下

椎間板  
損傷・障害



血液分析

栄養不足

代謝機能障害

心臓血管系疾患

免疫機能低下

精神疾患



X線撮影

骨密度低下 (DEXA法)

椎間板損傷・障害

外傷 (救急処置)

塵肺

尿路結石

# 共通する技術項目 (2/2)



消毒・滅菌

免疫機能低下

外傷 (救急処置)

長期低線量被ばく影響

船内環境の悪化



人工重力負荷

神経学的影響

起立耐性低下

筋骨格系神経系  
調整機能低下



栄養・献立管理

心臓血管系疾患

胆石症

代謝機能障害

栄養不足



長期保管技術

外医薬品・試薬の劣化

栄養不足

死亡時の対応



MRI

椎間板損傷 障害

精神疾患

# まとめ

- 有人探査ミッションの健康リスク低減に向けて、現在の国際宇宙ステーションでの健康管理運用との差分を「技術ギャップ」としてご紹介いたしました。
- 技術ギャップを埋めるために活用できる技術や方策を通じて、探査ミッションへの適用を目指した研究開発を進めていきたいと考えております。
- 皆様のアイデアをお待ちしています。