

座談会 ヒトは再び月をめざす

# ヒトは再び月をめざす

ギリシャ神話に登場する太陽神アポロンを冠し、月面着陸をめざした「アポロ計画」から約半世紀。アポロンと双子の兄妹である月の女神アルテミスの名を掲げ、月面基地の建設、そしてその先の火星をめざす計画が現在進行中だ(MEMO欄)。他方、2021年には民間人乗組員のみによる宇宙旅行も実現し、宇宙の存在はより一層身近なものとなった。

しかし宇宙空間が人体に及ぼす影響にはいまだ解明できていない部分があり、人類のさらなる宇宙進出には医学分野の関与が必要不可欠と言える。医師として臨床に従事した後、2017年12月から約6か月間、国際宇宙ステーション(International Space Station:ISS)でのミッションを果たした宇宙飛行士の金井氏、宇宙飛行士専属の医師であるフライトサーजनを総括する三丸氏、そして宇宙医学の研究者である岩崎氏が、今後の人類の宇宙進出に医師がどう貢献できるかを議論した。

日本大学医学部社会医学系  
衛生学分野 教授  
岩崎 賢一氏●司会

JAXA 宇宙飛行士/医師  
金井 宣茂氏

JAXA 有人宇宙技術部門総括医長  
三丸 敦洋氏

## 宇宙へ行くとヒトの体に何が起るのか

**岩崎** これまで数多くの宇宙飛行士がミッションに成功し、宇宙に関する新たな知見を得てきました。金井飛行士がISSに滞在している際には、「長期宇宙滞在がヒトの脳循環調節機能に及ぼす影響」(Cerebral Autoregulation)と題したわれわれの実験の準備にも協力いただいています(写真)。その一方で、宇宙空間が人体に与える影響には謎に包まれた部分がいまだ数多く存在し、微小重力や宇宙放射線、閉鎖環境による影響などについての詳細な研究が進められています。ヒトが宇宙に行くとは何が起るのか。実体験も交えつつ金井飛行士からご紹介いただけますか。

**金井** まずは読者の皆さんが最もイメージしやすいであろう微小重力環境での体の変化からお話しします。あくまで個人的な体験談となりますが、微小重力環境への適応過程に大きな問題はありませんでした。ただし新しい環境に体が適応するまでには、期間に応じてさまざまな不調が現れます。1つは、微小重力環境に入った直後に現れる気分不良やめまいなどを指す宇宙酔いと呼ばれる症状で、一般的に数日間で症状は消退すると言われています。私の場合は、吐き気止めなどの内服を行っていたこともあり、嘔吐などの症状もなくスムーズに微小重力環境での生活を始められました。

続いて起る体の変化は、下半身にプールされていた体液が、重力の影響がなくなったことにより体に均等に分布し、上半身の体液が地上よりも多くなるという体液シフトです。相対的に上半身に体液が多くなることでmoon faceと呼ばれる顔のむくみや、逆に

写真 「きぼう」船内実験室にて、実験(岩崎氏が研究代表者)で用いられる測定機器のチェックアウトを金井飛行士が行う様子



© JAXA/NASA

脚が細くなるbird legsといった体の変化があります。また頭部への血流増加に伴い頭痛・頭重感、鼻閉といった不快症状があります。これらの体の変化や症状は、微小重力環境で数週間過ごすうちに循環血液量が調節され自然に軽快していくことが一般的ですが、完全になくなることはありません。私の体験では、微小重力環境で生活を始めた当初でも、頭重感や鼻閉などの不快症状は軽微で、業務に影響を与えるほどのものではありませんでした。

**岩崎** 微小重力環境下では筋萎縮や骨量の減少も進むと言われていますよね。

**金井** ええ。重力に抗って体を支える必要がないため、廃用性筋萎縮が進んだり、骨量の減少が進んだりします。こうした事実はこれまでの知見から明らかになっていたため、ISS内にはARED(Advanced Resistive Exercise Device)という大掛かりな筋トレマシンをはじめトレッドミルやエルゴメーターが設置され、週6日、1日2時間程度の運動に励んでいました。おかげで滞在前後での筋量・骨量の大きな変化は認められませんでした。

**岩崎** 宇宙放射線の影響はいかがでしょう。

**金井** ISSが周回する地球低軌道では、磁場によって宇宙放射線から守られているとはいえ、ISS滞在中の被曝線量は1日当たり0.5~1 mSv程度(地上の場合は1年間で2.4 mSv)に上ります。そのため生涯の被曝線量制限値(寄与生涯がん死亡確率が約3%となる被曝線量)を設定するなどの健康管理が徹底されています<sup>1)</sup>。けれども月・火星をめざすとなった場合は飛行期間の長期化によって被曝線量もおのずと増加しますので、対策は喫緊の課題と言えるでしょう。

**岩崎** 最近では、SANS(Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome)と呼ばれる、宇宙飛行の長期化に伴って発生する眼球や視覚の形態学的・機能的変化も注目されています。約300人の宇宙飛行士へ帰還後にアンケートを行った結果、短期滞在者の

29%、長期滞在者の60%に遠見もしくは近見困難の訴え、さらには視神経乳頭浮腫や脈絡膜ひだ等の形態の異常変化の例も見つかり<sup>2)</sup>、宇宙飛行では眼に影響があまり起こらないと考えていた宇宙医学の研究者たちを驚かせました。いまだ広くコンセンサスを得るような発生機序のエビデンスは得られていない状況です<sup>3)</sup>。

**金井** 長期宇宙滞在に伴う眼球・視覚の変化は、今後の月・火星ミッションに向けても大きな医学的課題の1つです。ISS滞在の宇宙飛行士に対しては、単純な視力検査だけでなく、眼底検査、眼球の超音波検査、OCT(Optical Coherence Tomography)など、専門的な診断技術を用いて宇宙飛行に伴う経時的な眼科的变化のデータ取得が行われています。またSANSの原因の1つとして脳血流増加に伴う頭蓋内圧上昇の可能性が挙げられており、岩崎先生のチームによる研究から、宇宙飛行中の頭蓋内圧の変化に関するエビデンスが得られることを期待しています。



岩崎 賢一氏

**いわさき・けんいち** 宇宙医学の研究が進められていた日大医学部衛生学教室に医学生時代より足繁く通い、同教室で行われた宇宙医学関係のさまざまな活動に参加。1989年に同大を卒業し6年間麻酔科医として臨床経験を積んだ後、宇宙医学研究に専念するため同大医学部衛生学教室に籍を移す。同研究領域で著名な米テキサス大サウスウエスタンメディカルセンターにポスドク研究員として留学し、NASAのスペースシャトル医学研究ミッション(ニューロラボ、STS-90)に参加。2007年より現職。現在は宇宙飛行における脳循環や頭蓋内圧の変化に着目した研究を進める。日本宇宙航空環境医学会理事長。

## 地上から宇宙飛行士を支える立役者の存在

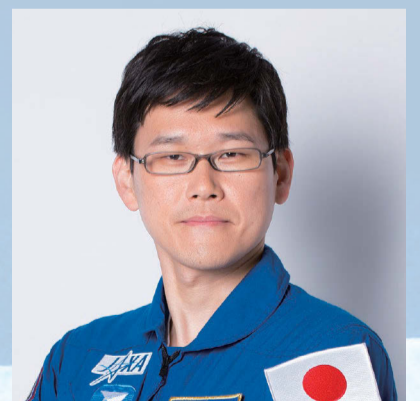
**岩崎** では宇宙飛行士に起る体調の変化に対し、JAXAはどのような介入をしているのでしょうか。有人宇宙技術部門で総括医長を務める三丸先生から教えていただけますか。

**三丸** 宇宙飛行士の健康管理は、多職種から構成される医学運用チームによってなされています。その中でも医師はフライトサーजन(以下、FS)と呼ばれ、航空宇宙医学の知識を有した人材が対応します。

**岩崎** 具体的にはどのようなサポートを行うのでしょうか。

**三丸** 宇宙飛行士の日々の健康管理です。FSの役割は宇宙空間での健康上のアクシデントに対応するだけとよく誤解されますが、定期的な医学検査、リスクの高い地上訓練・打上げ時・飛行中等の医学支援、飛行後のリハビリテーション、精神・心理面のサポートなど、その役割は多岐にわたります。端的に表現すれば、宇宙飛行士を専門とする産業医のような存在ですね。

また飛行ミッションにアサインされた宇宙飛行士には専任のFSが1人指名されます。専任FSは、米テキサス州ヒューストンにあるジョンソン宇宙センターで行われる訓練にも帯同し、搭乗期間中に予定される宇宙実験の訓練や宇宙医学研究のデータ収集などにも立ち会います。その後、宇宙飛行中はもとより、帰還後のフォローを含め、数年にわたって健康管理を担います。もちろん専任FSだけで全ての診療科の医療問題をカバーできるわけではありませんので、適宜専門家へコンサルトしながら、全人的な介入を行っているところです。



金井 宣茂氏

**かない・のりしげ** 2002年防衛医大卒。同年海上自衛隊に入隊し、自衛隊大湊病院などで外科医および潜水医官として勤務する。05年には米海軍潜水医学課程に留学。09年JAXAの宇宙飛行士候補者選抜試験に参加し、大西卓哉氏、油井亀美也氏と共に宇宙飛行士候補者に選定されJAXAに入社。2年間の基礎訓練を経て、11年にISS搭乗宇宙飛行士として認定される。15年ISS第54次/第55次長期滞在クルーのフライトエンジニアに任命。17年12月にロシアのソユーズ宇宙船でISSに向かい約6か月間滞在中、翌年6月に帰還。滞在中は、ミッションテーマの「健康長寿のヒトは宇宙にある。」に基づく各種利用実験活動に取り組む。

MEMO

### 深宇宙に対する国際的な有人宇宙探査の潮流

有人による宇宙探査が計画される背景には、①無人では技術的にもコスト的にも実現できない質の高い計画が立案可能であること、②実験や探査活動等において臨機応変な対応が可能となること、③ヒトという生命体の宇宙適応に関する研究などの促進が見込めることなどが挙げられる。現在は米国が中心となっており、有人火星探査を視野に入れたつり持続的な月面探査の実現をめざす「アルテミス計画」が進行中。同計画では2025年以降の有人月面着陸を目標とする。並行して、月面および火星に向けた中継基地となる月周回有人拠点(ゲートウェイ)を建設予定。2022年2月の初回ミッション(アルテミス1:無人試験飛行による月周回軌道投入・帰還)に向け、準備が進む。

**金井** 帰還後のフォローは特に重要だと思います。個人的には宇宙滞在中の体の変化よりも、帰還後の重力への再適応のほうが大変に感じましたから。いかに重力が人間の体にとって苛酷なものかを身に染みて味わいましたね。

**岩崎** それはどういう意味ですか？

**金井** まずは体液シフトの問題です。微小重力環境に順応した体は、地上時よりも体内の循環血液量が減少していることから、そのまま重力環境に戻ると起立性低血圧が起りやすくなります。予防のため地上への帰還の際には病院で用いられる弾性包帯のようなものを下半身に装着し、上半身や脳の血流を保つ工夫がされています。併せてISS離脱の直前にはタブレット状の塩を多量の水分と共に摂取し、体内に多めの水分を保つようにしています。

また宇宙滞在中は三半規管に対する刺激がない状態で生活しているため、帰還直後はちょっとした首の傾きや体位の変化によって激しい回転性のめまいが生じやすく、支えがなければ歩けない状態でした。平衡感覚の再適応は比較的早く、帰還後48時間ほどでめまいは軽快し、2週間もすると車の運転も許可されるほどに回復します。

先ほど筋量や骨量については比較的維持されていたとお話ししましたが、歩いたり、かがんだり、しゃがんだりといった筋肉を複合的に用いるような動きは宇宙では行わないために、協調運動についてリハビリが必要でした。また足首や股関節、背骨など、使わなかった関節が固くなっていたのは自分にとって新しい驚きでした。

**三丸** 帰還後は筋力がどれだけ維持されていても、平衡感覚や体性感覚などのずれが一気に襲ってきますので、専任FSが最初の2週間は重点的に対応します。特に気を付けなければならないのは転倒です。思わぬ瞬間に転倒するケースが多々あります。帰還後に行われる45日間に及ぶリハビリテーションでは、さまざまな運動療法を通じて平衡感覚のずれや抗重力筋等の筋力回復、柔軟性を徐々に取り戻すプログラムが組まれています。

## ついに始まった宇宙旅行

**岩崎** 昨今は宇宙旅行も話題です。2020年5月、イーロン・マスク氏率いる米スペースX社が、民間企業初のISSへの有人宇宙飛行を実現させたことを皮切りに、翌年にはヴァージン・

ギャラクティック、ブルーオリジン、スペースXの3社が、民間人を乗せた宇宙船による宇宙飛行を相次いで成功させています。同年12月には日本人実業家の前澤友作氏らを乗せた宇宙船のISSへ向けた打ち上げも予定されており、より一層宇宙の存在を身近に感じられるようになりました。

各社、宇宙での滞在時間は数分～数日と、近年の職業宇宙飛行士が経験する数か月に及ぶ滞在期間よりはかなり短いものの、先ほど話題に挙げたような健康管理はますます重要となるはずで、金井飛行士は宇宙旅行における医学的な問題をどのようにとらえていますか。

**金井** 従来と大きく異なるのは、持病を抱えていたり高齢だったり、さまざまな背景を持つ方が搭乗者となり得る点です。しかし、これまでのミッションで得られた経験値は十分に蓄積されていますので、知見を生かせる部分は多々あると考えます。また、宇宙へ向かうことばかりに焦点が当たりがちですが、帰還後に持病が悪化したり、障害等を発生したりしないよう、医学的なフォロー体制を綿密に練る必要もあるはずで。

**岩崎** なるほど。宇宙旅行の場合であっても健康管理を務めるFSの存在が重要となりそうですね。

**三丸** ええ。ISSに向かう宇宙飛行士を担当するFSになるためには、国内外で航空宇宙医学の研修を受け、JAXA内のFS認定審査で承認を受けた後、ISSを共同運用する5機関(米、露、加、欧州、日本)の委員で構成される委員会の承認を得る必要があります。しかし民間による宇宙旅行が拡大していけば、その需要に応じるために宇宙航空身体検査医のようなISSプログラム以外の資格認定のフレームワークが構築されていく可能性は出てくるかもしれません。いずれにしても、FSのような宇宙航空医学の知識を持つ医師の需要は高まると考えます。

## 月・火星をめざす際の医学的な課題とは

**岩崎** 民間企業による宇宙旅行の台頭によって、選抜された一握りの人材だけが宇宙をめざしていた時代は過去となり、基本的には健康であれば誰もが宇宙をめざせる時代となりました。金井飛行士のような職業宇宙飛行士には今後、より遠くへ、より長い期間、宇宙に滞在するミッションが求められるはずで、月や火星での活動はISSとはまた違った状況になることは間違いありませんが、どのような懸念があるのでしょうか。

**金井** 現在のISSは軌道上約400km上空を飛行しています。遠いと感じるかもしれませんが、医学的に何か問題があったとしても最悪の場合は数時間程度で緊急帰還が可能で、地上での治療を行えます。また通信環境も良好です。地上とは基本的に24時間通信できる状況ですから、軽微な医学的問題であれば管制センターで待機するFSにコンサルトできますし、FSの指示の下、診断や治療行為を行うこともできます。ある意味恵まれた環境です。けれども月や火星をめざすこれからのミッションではそうはいきません。月へは片道数日、火星へは片道約6か月以上を要すると考えられています。

**三丸** 当然、画像や音声データを常時確認できる状態にはならず、宇宙飛行士たちは孤立した中での活動が求められるはずで。故に、そうした事情を

織り込んだ念入りの地上での訓練が必要となるでしょう。つまり、宇宙船内にある物でいかに対処できるか、またそれを地上からどう伝えるかをシミュレーションする必要があります。

**岩崎** そうなると、搭乗者の中に医学的な素養を兼ね備えた宇宙飛行士が含まれていることが望ましいですね。

**金井** まさにそこがポイントです。医師出身の宇宙飛行士は多いものの、ISSクルーの任命に当たり前職のバックグラウンドは考慮されておらず、必ずしも医師出身の宇宙飛行士が軌道上にいるわけではありません。そのため医学的な緊急事態に備え、専門性を有しない宇宙飛行士であっても簡単な外科処置や薬剤の使用法などに関する訓練は受けています。しかし、より長期のミッションを考慮すると、やはり医学的な素養を持つ宇宙飛行士の存在が求められるように感じています。

## 月面に医師が常駐する未来も……

**岩崎** 近年では遠隔手術も現実味を帯びてきましたが、通信環境が整備されなければ月・火星の距離ではまだまだ実現困難と考えます。

**三丸** そうですね。通信環境が整わない状況で大掛かりな処置は難しいでしょう。けれども月に医療機器を持ち込んで治療できる環境が整いさえすれば、地球の6分の1とはいえ重力が存在するために、大半の治療が行えるようになるのではないのでしょうか。医師が月面の診療所や病院に常駐する未来もあり得ると考えます(図)。もちろんこれらの事柄は全て想像の域を出ませんし、施設ができるまでの過渡期は先ほど申し上げたような可能な範囲での臨機応変な対応をしていくしかありません。しかしながら、今は手術機能や病床を備えた艦艇もありますので、医療設備を月面に運ぶ技術さえ確立すれば、課題はクリアできる気がしています。

**岩崎** 月や火星ミッションを考慮すると、飛行期間のさらなる長期化によって、宇宙飛行に対するFSの考え方も変化し得るのではないのでしょうか。

**三丸** われわれFSがまず考えなければならないのは、「リスクのある状態で飛行士を宇宙空間に飛び立たせないこと」です。宇宙飛行士は常に健康管理がなされているからといって、病気にならないわけではありません。宇宙空間でもしも脳梗塞などを発症した場合は手遅れになる可能性もありますので、発症リスクのなるべく低い飛行士を選抜しなければならなくなるでしょう。予防医学の観点もこれからさらに重要になると考えます。

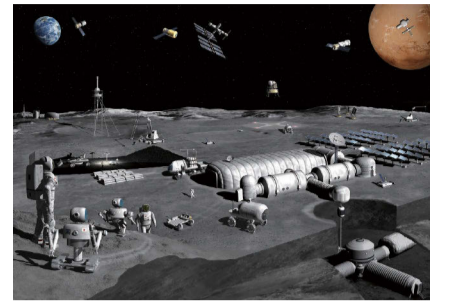
**岩崎** つまり、宇宙飛行士の健康管理がさらに厳格なものになっていくと。

**三丸** そうならざるを得ないと思います。アサインからISS搭乗までは通常1～2年を要します。日本人飛行士の場合、ヒューストンで生活し訓練を受ける機会も多いため、食生活の変化などの影響を受けます。その間の健康管理についてはNASAとも連携しながら十分な注意を払っていますが、飛行士本人が健康管理に関する自覚を持つよう働き掛けることは、FSの役割としてより一層求められるでしょう。

## 宇宙医学のさらなる発展に向けて

**岩崎** 今後、宇宙開発に携わる医師の需要が増すと意見はわれわれの中で

**図** 将来の月面・月周辺での活動風景(イメージ) アルテミス計画では有人月面着陸を目標に、月に物資を順次運び月面拠点を建設予定。月で人類の持続的な活動を実現し、その先の火星をめざす。



© JAXA

一致していると思いますが、本領域のさらなる発展をめざすには宇宙医学に関心を抱く方をさらに増やしていく必要があります。三丸先生からお考えを伺えますか。

**三丸** まずは「宇宙」という未開拓な領域に興味・関心を持ち続けてほしいということです。宇宙飛行士をはじめ、それを支えるFSや研究者など、宇宙分野で活躍したいと考える医師は案外多いように感じます。私自身、キャリアパスについてよく相談されるのですが、その際「まず医師としての経験を積んでください」と伝えています。ベースラインとしての医学的な素養がなければ、宇宙関連の職業に就いたとしても、「医師」として周囲から期待されるような活躍はできないでしょう。

そして臨床経験を積んだ上で大事なものは、地上と宇宙空間との差をどこまで意識できるかです。本話題に挙げた微小重力下での問題、放射線や閉鎖空間での問題など、宇宙空間特有の課題を理解した医師が増えれば、この分野は加速度的に発展すると考えます。**岩崎** 金井飛行士からはいかがでしょう。13年ぶりに募集が開始([https://astro-mission.jaxa.jp/astro\\_selection/](https://astro-mission.jaxa.jp/astro_selection/))された宇宙飛行士を、これからめざす医師もいるはずで。

**金井** JAXAの日本人宇宙飛行士はこれまでに11人。その中で医師免許を有しているのは向井千秋飛行士、古川聡飛行士、私の3人です。割合としては十分高いと言えます。本日の座談会でも再確認しましたが、やはり宇宙でのミッションを果たすためには医学的な素養を持った人材は重要です。同じ境遇である医師の仲間が増えることは私自身とてもうれしいことですし、宇宙医学を発展させる上でも自身が宇宙環境を体験していることは大きな強みです。奇妙奇天烈な無重力環境を体験したい方はぜひお待ちしています。

**岩崎** お二人ともありがとうございます。私が理事長を務める日本宇宙航空環境医学会では、学術大会の際に若手の医師や研究者が研究提案を行い、向井先生や古川先生から批評をいただくシンポジウムを行ったこともあります。最近では「若手の会」が自ら企画したシンポジウムも毎年開催されています。こうした活動に刺激を受ける方は多いと思いますので、ぜひ宇宙分野に興味を抱く医師、医療者は気軽に参加いただければうれしい限りです。ぜひともこれからの宇宙医学研究を盛り上げていきましょう。

### 参考文献・URL

- 1) JAXA 有人サポート委員会 宇宙放射線被ばく管理分科会 国際放射線防護委員会2007年勧告(ICRP Publication103)の「国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士放射線被ばく管理規程」への取入れに係る検討結果報告書, 2013. [https://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/pdf/report\\_a.pdf](https://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/pdf/report_a.pdf)
- 2) Ophthalmology. 2011 [PMID: 21849212]
- 3) NPJ Microgravity. 2020 [PMID: 32047839]



### 三丸敦洋氏

**みつまる・あつひろ** 1985年防衛医大卒。陸上自衛隊に入隊後医官として総合診療や外科の診療に従事。97年厚生省(当時)に出向し、特定疾患研究事業、難病対策などに携わる。2000年自衛隊中央病院に赴任し、心臓血管外科診療の傍ら医療情報システムの構築や病院管理にかかわる。06年陸上自衛隊行政医官として陸上幕僚監部衛生部医務保健班長、陸上自衛隊東部方面総監部医務官などを歴任し、災害医療、国際貢献活動に従事。その後、自衛隊中央病院救急科部長、同診療技術部長、自衛隊阪神病院長を経て自衛隊を退官。18年にJAXA入社後、1年間のトレーニングを行いFSの資格を取得する。