

SPACE OFURO

池田雅央・伊藤美樹・加瀬康裕・早瀬亮・山崎暢大
日本大学大学院 理工学研究科 航空宇宙工学専攻

1. はじめに

1-1. 宇宙でのリラックスの必要性

1961年にガガーリンが人類初の宇宙飛行を成功させてから50年近くが経つ今、宇宙旅行や国際宇宙ステーション(以下、ISS)での長期滞在など、宇宙にまつわるニュースは私たちの生活に身近なものになりつつある。

我が国日本においても今年3月より若田光一宇宙飛行士による約4ヶ月間のISS長期滞在ミッションが行われており、その後も随時多くのクルーによる長期滞在が予定されている。21世紀はより多くの人々が宇宙へと進出し、国際協力のもと人類はさらに地球近傍からより遠くの星へとその活動範囲を広げていくことが予想される。

ところが、宇宙での滞在期間が長期化するにつれて問題となる事柄も多数出現する。中でも宇宙環境がもたらす精神的・身体的なストレスが蓄積していくことによって、宇宙における生活が損なわれるだけでなく、作業能率の低下も危惧される。よって、より快適な宇宙生活の実現にはストレスの軽減を積極的に図ることが必要不可欠である。

1-2. 宇宙滞在における入浴とリラックス

リラックスとは、精神的・身体的ストレスが緩和、もしくは解消された状態である。積極的にストレスを軽減させる方法として「旅行」「運動」「音楽」など幾つもの挙げることが可能だが、我々の中でも「入浴」を推奨・提案する。風呂文化研究会が日本人を対象に行った、入浴に対する意識回答では「リラックスできる」と答えた人が90%にも達した。故に、日本人は毎日の入浴という行為を生活の習慣としてのみならず、リラックスや疲れをとることを目的として利用していると判断できる。

しかし、ISSでの入浴の現状は、頭は水なしシャンプーで洗いその後タオルで拭きとるというも

のであり、体も体拭き用タオルで拭うという単純なものである。NASAの宇宙飛行士 R.Mike Mullane氏は、自身の著書「宇宙飛行士が答えた500の質問」の中で「宇宙で一番恋しいものは熱いシャワーである」と述べている。これら実経験者のコメントをみても、宇宙に滞在中の入浴行為は、日本人に限らず世界中のクルーや旅行者にとって究極のリラックスになり得るものと確信する。



Fig.1-2.1 若田宇宙飛行士のISSでの洗髪
(水なしシャンプーで洗いながらタオルで拭き取っている)

1-3. 地上での入浴におけるリラックス効果⁴⁾

風呂・シャワーなど、地上で我々が利用する入浴方法には重要な3つの要素「温度」「浮力」「水圧」が存在し、これらが地上での入浴におけるリラックス効果を生み出す要因となっている。

まず「温度」に関しては、水温38~42[°C]程度でリラックスへと導いてくれる副交感神経の働きが活発になる。また、筋肉の緊張が解き放たれ、血液循環が良くなり、体の芯から温まる。さらに42[°C]以上になると、新陳代謝が促されて疲労物質の乳酸を減らすので、疲労回復に効果的である。

また、「浮力」により、常に重力の影響を受け、筋肉・関節などへの負担を抱えている我々の体が負担から解放され、副交感神経が優位に働くこと、「水圧」によって全身の血液循環が促進されて新陳代謝が活発になり、体内の疲労物質が排出されることなどが知られている。以上より、入浴によ

る副交感神経の活性化，体にかかる負荷からの解放，疲労回復の結果，精神的・身体的なリラックス効果が見込めることがわかる。

1-4. 宇宙滞在で発生するストレス

宇宙では，宇宙船内の閉鎖された環境，危険な環境で暮らす緊張感，言葉や宗教の違うクルー・旅行者達との生活などから，精神的ストレスが蓄積されていく。また，身体的にも無重力という宇宙における特殊な環境故のストレスが現れる。人それぞれではあるが，「宇宙酔い」が代表的なものである。時に激しい頭痛に見舞われるほど，その身体的ストレスは大きいものであると想定できる。慣れてくると症状は次第に緩和されるが，近い将来，宇宙旅行が我々の身近な存在になり得たとき，宇宙空間に来てしばらくの時間を苦痛と共に過ごすのは非常に勿体ない。宇宙酔いの他，ムーンフェイスや長期無重力暴露に起因する循環や骨筋肉系の退化・カルシウム喪失が大きな問題になることも無重力環境下で危惧される問題であるが，目下これらに対応できる方法は，「遠心重力」のみであるというのが現実のところである⁵⁾⁶⁾。

1-5. SPACE OFURO の定義

1-3~1-4 節をまとめ，地上において入浴が身体現象に及ぼすリラックス効果を Table1-5.1 に示す。

Table1-5.1 入浴によるリラックス効果(地上)

項目	身体現象	効果
温水	副交感神経の活性化	リラクゼーション
	交換神経の刺激	疲労回復
	血液循環の促進	疲労回復
	疲労物質の分泌	疲労回復
浮力	副交感神経の活性化	リラクゼーション
	筋肉の弛緩	リラクゼーション
水圧	血液循環の促進	疲労回復
	疲労物質の分泌	疲労回復
洗浄	清潔化	不快感の除去

このように，地上での風呂にリラックスを感じる経緯は，重力下で生じる下肢部への体液の偏り，重力に対する筋肉の緊張と緩和が関係しているの

で，地上での風呂のシステムをそのまま宇宙空間に流用してもリラックス効果は得られないだろう。そこで，入浴とリラックスに関係する 3 要素「温度」「浮力」「水圧」が人体にもたらす影響のうち，「温度」による温浴効果で精神的ストレスを低減し，人工的に重力を発生させることで，宇宙酔いに代表される身体的ストレスを和らげる風呂を提案する。ここで，Table1-5.2 に宇宙滞在による身体現象に適用されるリラックス効果を示す。我々はこれらを満たす入浴法を「SPACE OFURO」と定義する。

Table1-5.2 SPACE OFURO のリラックス効果

項目	身体現象	効果
温水	副交感神経の活性化	リラクゼーション
	交換神経の刺激	疲労回復
	血液循環の促進	疲労回復
	疲労物質の分泌	疲労回復
遠心重力	体液の下降	宇宙酔い・ムーンフェイスの緩和
	体への負荷	筋骨系の退化の緩和
洗浄	清潔化	不快感の除去

2. 目的

我々が提案する SPACE OFURO は，毎日の体の汚れを取る・体をきれいにすることのみを対象とした風呂ではなく，リラックス・体を休めることを第一の目的とする。さらに宇宙環境が人体に及ぼす様々な身体的ストレスの軽減を第二の目的とする風呂設計を行う。

3. システム要求

SPACE OFURO の設計に際して考慮すべき項目(システム要求)を Table3-1.1 に列挙し，以降はその項目をもとに話を進めることにする。

Table3-1.1 SPACE OFURO のシステム要求

入浴	体表面の汚れを水を用いて洗い流すことが出来ること →地上で使用しているものと同様なシャワーを採用
	流量・水圧を調整できること →シャワーノズルの出口径は可調整とする
	少量の水で入浴が可能であること →ミストシャワー、宇宙水再生システム(4-4)を利用
	水を副交感神経に働きかける温度領域まで加熱可能であること(温度は可調整) →Fig. 4-5.1に示す給湯システムを利用
	効果的に体を温められる機能を有すること →ミストシャワーを使用
遠心重力	遠心力を利用し、それを人体・水をはじめとする他の物体へ地上での重力と同等の役割を担わせること →遠心重力は最高1Gまで可能な設計とする
	人体への宇宙酔いを配慮した角速度の設計であること →個人差を考慮して、遠心重力の大きさは~1Gの範囲で調整可能
	回転機構を考慮し、電源・ケーブル類は可能な限りSPACE OFURO内で完結させること →入浴時に必要なシステムはサービスモジュール下部の回転部に集合させる
	安定した回転を得るために、回転軸に対するマスパイアスは極力なくした設計であること →入浴モジュールは回転軸に対称に2つ配置
構造・回転機構	打上げ可能なサイズ・重量であること →各々のモジュールの重量・サイズはHTV・HII-Bで打上げ可能な範囲内に収めた
	SPACE OFUROとISSとの接合部で十分な気密構造が保たれること →結合部には共通結合機構(CBM)を採用
	それぞれ別々に打上げられるサービスモジュール・入浴モジュールが確実に結合できること →それぞれの結合にはHTV方式を採用
	必要角速度を十分に与えることができること →質量・慣性モーメント・必要トルク等から実現可能なSPACE OFUROのサイズ・重量・形状を設計
	非回転部・ISS側に回転の影響が少ない設計であること 軸接続部と回転機構部のシーリング・機密構造を考慮した設計であること →サービスモジュールを回転部・非回転部に分けて回転させ、僅かに伝わる軸受からの影響は非回転部のハッチに設置したリアクションホイールによってキャンセルする(Fig.4-1.1)
電力	ISSとの電力収支の問題を回避するため、電力は自己発電できること →太陽電池パネル・蓄電池(ORU)を搭載することで、日照・日陰どちら側でも使用可能

4. システム

4-1. システム概要

SPACE OFURO のシステムは水温管理・水再生など、入浴に関する系を担う入浴システム、人工重力を発生させるための人工重力システム、電源・構造システム等で構成され、外板には太陽電池パネルを搭載し自己発電を行う。

SPACE OFURO はバス機器・リアクションホイール等を設置したサービスモジュールと、入浴カプセルをうでの先に配置した入浴モジュールからなる。SPACE OFURO のイメージ図をFig.4-1.1~3に示す。Fig.4-1.2に示すように、ISSの連結モジュールとSPACE OFURO のサービスモジュールがドッキングし、その中を人が行き来する。サービスモジュールの非回転部にはSPACE

OFURO 全体の系に関わる機器を配置し(ISPR ラックを使用)、回転部には給湯器・汚水タンク・モータなど、入浴時のみ必要となるシステムを配置している。

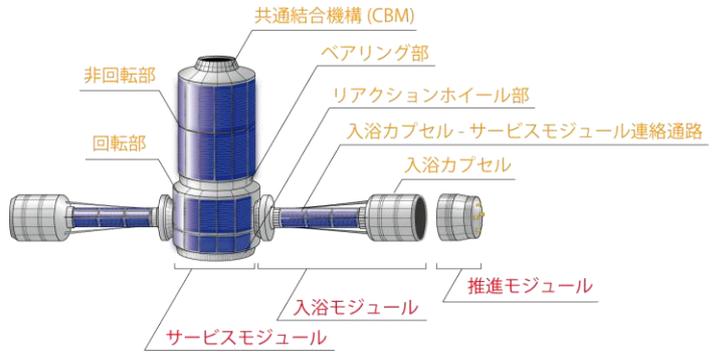


Fig.4-1.1 SPACE OFURO イメージ図

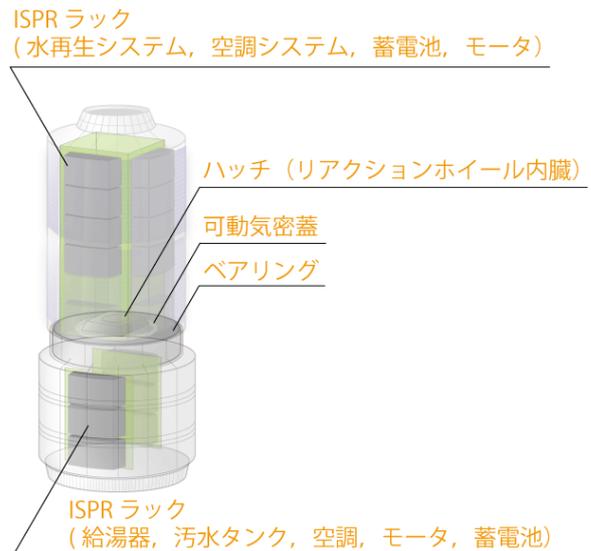


Fig.4-1.2 サービスモジュール内部 イメージ図

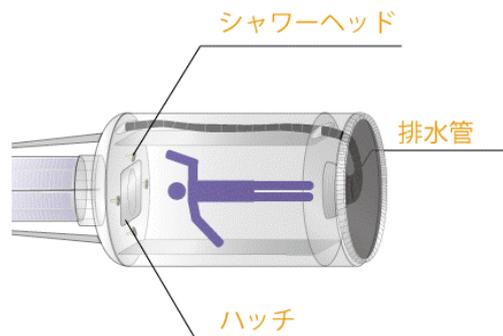


Fig.4-1.3 入浴カプセル イメージ図

Fig.4-1.4 に SPACE OFURO のシステムダイアグラム図を示す。

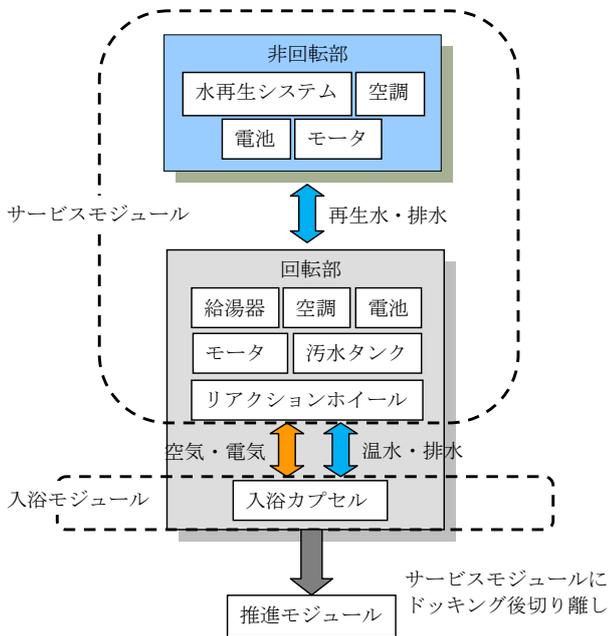


Fig.4-1.4 システムダイアグラム

4-2. 入浴カプセル

入浴カプセル内の大きさは幅 1.1[m], 奥行き 1.5[m], 高さ 2.0[m]となっており, 排水管を通して汚水を水再生システムに戻す。また, 入浴後は空調により除湿を行う。

入浴にはミストシャワーと通常のシャワーを併用する。ミストシャワー5分と通常のシャワー5分とした時の水の使用量は, およそ 80[L]であり, 10分のシャワーによる入浴と比較して 20[L]ほど削減できる。ミストシャワーは全身を温かなミストで包むため, 全身の血流を促進させる効果がある。また, 湿った空気が体に熱を伝えやすくなるため, 体の芯まで温まり, リラックスへと促す副交感神経を働かせる。ミストシャワーではサウナ効果もあるため, 汗や皮脂が分泌され, 汚れが落ちやすくなる。そのため, ミストシャワー後に通常のシャワーで体を洗い流すことによって体を清潔に保つことができる⁴⁾。

4-3. 回転機構

入浴カプセル内に遠心重力を発生させるために, リアクションホイールをモータで回転させることによって生じる反トルクを利用する。サービスモジュールは回転部と非回転部からなり, 回転部および回転部の両端に連結された 2つの入浴モジュールが回転することによって, 遠心重力を生み出す。リアクションホイールはサービスモジュール・回転部の末端に搭載される。リアクションホイールはモータに支持され, モータはサービスモジュール回転部に固定される。モータがリアクションホイールにトルクを伝えることによって反トルクがサービスモジュール回転部にかかり, その反トルクによってサービスモジュール回転部および入浴モジュールが回転する。

サービスモジュールの回転部と非回転部の間は, ISS への回転の影響を抑えるための設計をする。

Fig.4-3.1に回転部と非回転部を繋ぐベアリング部の機構詳細を示す。

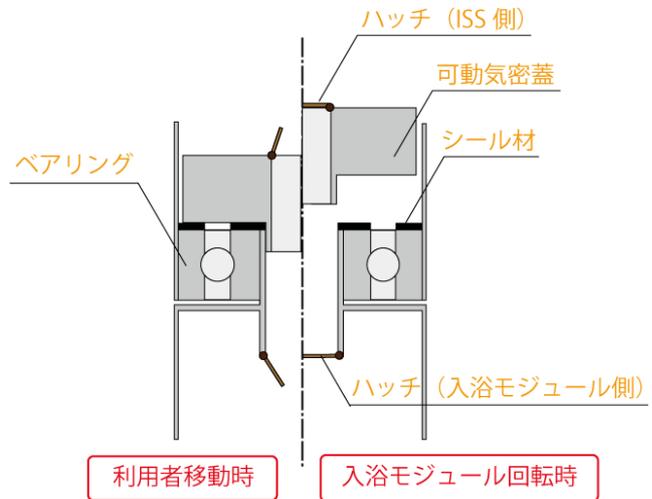


Fig.4-3.1 ベアリング部 詳細

入浴中はハッチを閉じ可動気密蓋をベアリングから離し, 非運転時は可動気密蓋をベアリングに密着させ, ハッチを開き人の行き来を可能とする。ベアリングを介して伝わるトルクは非可動部側ハッチに内蔵されるリアクションホイールによって打ち消す。

ここで、回転する部分の諸量とモータの規格から、リアクションホイールの質量を Table4-3.1 のように求めた。

Table4-3.1 質量計算結果

回転する部分の全質量[ton]	7.50
回転する部分の慣性モーメント[kg・m ²]	124.86 × 10 ³
モーターの定格トルク[N・m]	57.30
モーターの定格回転数[rpm]	1000
1Gに達するまでの角加速度[rad/s ²]	0.00046
リアクションホイールの質量[ton]	1.25

人間が酔いを覚える角加速度は、0.28[rad/s²]と見積もった。上記の計算結果では1[G]を得るまでに人間にかかる角加速度は0.00046[rad/s²]であるので、運転中にかかる角加速度によって酔いの症状が現れる可能性は低いといえる。

4-4. 水再生システム

SPACE OFURO では、宇宙空間において貴重かつ有限性のある水を有益に使用するために、入浴に使用した排水を再利用できる水再生システムを搭載する。

水再生システムは、現在 NASA や JAXA にて開発されており、NASA の水再生システム WRS(Water Recycle System)は ISS にて試験利用され、尿やエアコンで集めた排水を飲み水に再生させている。また、JAXA においても 200[L]の水を 8 時間で再生できる水再生装置が開発中であり、ISS の日本実験棟「きぼう」にて実証実験が計画されている。SPACE OFURO ではこの JAXA で開発中の水再生装置を使用する予定である。



Fig.4-4.1 JAXA が開発中の水再生装置

4-5. 給湯器

SPACE OFURO では、温水を供給するために電気給湯器を設置する。電気給湯器のイメージ図を Fig.4-5.1 に示す。

電気給湯器は、供給された水をタンクに貯蔵し、タンク内のヒータによって水を温める。暖められた高温水は混合バルブにて水と混合され、最適な温度の温水となって入浴カプセルへ供給される。また、無重力環境下では水の対流が起きないため、タンク内の水が温まりにくい。そこで、タンク内にファンを内蔵し、ファンを回転させることでタンク内の水を攪拌させる。

1 回の入浴に使用する水の量は 80[L]であるが、地上にて既に 80[L]以上の温水を供給できる電気給湯器が実用されているため、技術的には問題ないと考える。

水温に関しては、個人によって好みの温度が異なり、より多くの人にリラックスをしてもらうために水温を調節できるようにする。個人差を考慮して火傷の危険のない温度である 45[°C]まで設定できるようにする。また、水と高温水との混合は電子制御によって行うため、利用者は温度の設定をするだけで良い。

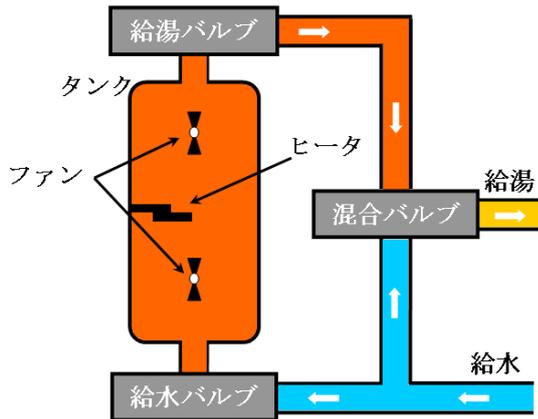


Fig.4-5.1 電気給湯器の全体図

4-6. 電力収支

電力収支がとれることを確認するために、電力計算を行った。まず、SPACE OFURO の表面にある太陽光パネルがどの程度発電するかを計算し、さらに、入浴時に消費する電力から電池の個数を決定した。電池の性能はISSで採用されている電池を参考として計算した。

SPACE OFURO の電力計算結果を Table 4-6.1 に示す。空調が常に稼働していることを考慮すると電池 1 つの容量は 6250[Wh]であるので、電池を 6 つ搭載した場合、電池容量は 37500[Wh]となる。SPACE OFURO 全体の発電量は 318[Wh]であるので、充電に必要な時間は約 120[h]となる。

また、運転時の消費電力(モータ、給湯器、空調が稼働)は Table4-6.1 より、20150[W]であるので、入浴モジュールの運転可能時間は約 1.8[h]となる。搭載できるモータの性能から回転する部分の目標運転時間は 1.5[h]であるので、運転時間の要求を満たすことが確認できた。

さらに、運転後の電池容量から水再生システムの稼働可能時間は 14.6[h]となる。入浴後に排水された水を再生するのに必要な時間は 6.4[h]であるので、満たす水再生に必要な運転時間も満たすことが確認できた。

以上より、電池を 6 つ搭載することによって 120[h]の充電を行えば、電力収支をとれることが

確認できた。従って、日照・日陰の時間を考慮することにより、SPACE OFURO は約 216[h]周期で入浴することができる見積もりとなった。

Table 4-6.1 電力計算結果

発電量[Wh]	318
電池個数[個]	6
電池容量[Wh]	37500
充電時間[h]	118
運転時の消費電力[W]	20150
運転可能時間[h]	1.86
目標運転時間[h]	1.5
運転後の電池容量[Wh]	7275
水再生システムの消費電力[W]	500
水再生システムの運転可能時間[h]	14.6
水再生システムの目標運転時間[h]	6.4

5. 建設手順

SPACE OFURO を形作るモジュールは H II-B を使用し、3 回に分けて打上げる。まず、中央のサービスモジュールを打上げ、ISS にドッキングさせる。次に 2 つの入浴モジュールをそれぞれ打上げ、サービスモジュールのドッキングポートに連結させる。

3 つのモジュールは各々、自立姿勢制御系を有する。ISS とのランデブー後に、ISS のロボットアームの操作によって捕獲・ドッキングさせる。

Table5-1.1 に、各モジュールの物理的な諸元と、H II-B の打上げ能力との比較を記す。

Table 5-1.1 各モジュールの物理的な諸元と、H II-B の打上げ能力との比較

入浴モジュール (1つあたり)	質量[ton]	1.56
	最大直径[m]	1.7
	長さ[m]	7.0
サービスモジュール	質量[ton]	12.25
	最大直径[m]	4.4
	長さ[m]	7.0
H II-B 軌道投入能力	打上げ可能質量 (HTV軌道)[ton]	16.5
	ペイロード直径[m]	4.4
	ペイロード長さ[m]	9.8

6. 安全性について

人間が宇宙空間で生活する上で、特に問題視されるのがそのシステムの安全性である。よって予め事故を想定し、対策を考慮しておくことが非常に重要である。Table6-1.1 に人の生命にかかわる被害レベルで起こりうる事故と、それに対する対策を挙げた。

Table6-1.1 想定される事故とその対策

想定される事故	対策
遠心重力装置が止まらない	停止装置に冗長を組む
SPACE OFUROの円盤部分が異常な角速度で回転する	・システム上で角速度の上限を設定する ・SPACE OFURO外部(ISSや地上管制室)からも制御できるシステムにする
入浴中に人工重力装置が止まり、無重力下になる	無重力に浮かぶ水によって溺れないように、人工重力の強さに応じて水の噴出を止めるようにする
入浴カプセルからの空気漏れ	遠心重力下で連絡通路を移動できるように、連絡通路内部に梯子を設ける
入浴後に可動気密蓋が作動せず、ISSへ戻れない	回転停止後に、ISSのロボットアームを用いて入浴モジュールを別のポートに移し、内部の人間を救出する

7. 今後の課題と展望

今後解決すべき課題としては、宇宙酔いの改善方法の確立、リラクゼーション効果の評価、遠心重力装置で発生させる重力が1[G]に達するまでの入浴準備時間の短縮、ISS への振動の低減が挙げられる。これらの課題は地上実験によって確認、評価を行う。また、そのほかにも、全システムの軽量化や省エネ化などについても検討する必要がある。

今後、ISS における長期滞在や近い将来の宇宙旅行などが発展していく上で、宇宙での入浴は必要不可欠なものである。

SPACE OFURO の打上げによって宇宙での入浴によるリラクゼーション効果の実証がなされれば、今後の人類の宇宙への進出に大きく貢献するものとなると考える。

参考文献

- [1] 熊野宏昭 入浴の心理効果・脱ストレス・休養作用 東京大学医学部附属病院診療内科
- [2] R.Mike Mullane 宇宙飛行士が答えた500の質問 1997
- [3] 温泉科学プロジェクト web ページ <http://www.onsenkagaku.com/index.html>
- [4] AA Vein,H, Koppen, J Haan, GM Terwindt and MD Ferrari. Space headache : a new secondary headache. Cephalalgia 2009;29:683-686
- [5] 谷島一嘉 人工重力 バイオメカニズム学会誌,Vol.25,No.1,2001
- [6] 松波謙一 リスザル-宇宙基地実験を目指して- 宇宙生物化学 Vol.11, No.2 1997
- [7] 東京ガス Misty web ページ <http://home.tokyo-gas.co.jp/living/misty/index.html>