

宇宙ステーションの与圧システムにおける大気制御

青木伊知郎 宇宙航空研究開発機構

キーワード: 有人宇宙 (Manned Space)、船内大気制御 (Cabin Air Control)、検証 (Verification)

日本初の長期滞在型有人宇宙大型構造物である「きぼう」の船内実験室を例にとり、宇宙における船内大気の移動に関する制御を、温度、湿度、清浄度、並びに、気流に焦点を絞り説明する。

1. はじめに

日本初の長期滞在型有人宇宙大型構造物である「きぼう(図-1)」の開発において、国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の微小重力下、しかも、環境温度等の苛酷な宇宙環境の中での船内大気の温度や気流等に関する要求の達成には多大の困難を伴った。本稿は、米国のアメリカ航空宇宙局 (NASA: National Aeronautics and Space Administration) が ISS 共通のものとして国際パートナーに課した ISS 船内大気要求の内容と日本国内法との関係、そして、その実現方法について説明するものである。

2. 宇宙ステーション与圧モジュール内大気規定

ISSにおける、船内大気の温度、湿度、清浄度、並びに、気流に関する要求を表-1に示す。これらは、NASAが有人宇宙分野の経験に基づき、ISS共通要求として設

定したものである。

大気の温湿度に関しては、電子機器と人体への影響を考慮する必要がある。日本の労働安全衛生法では、「室内空気は17℃～28℃、相対湿度は40%～70%となるように努める」となっており、ISSの温度範囲はこれに対応しているが、湿度下限値は若干異なったものとなっている。尚、ISS温湿度要求は、実際の運用を考慮すると、米国暖房冷凍空調学会が電子機器運用に関して定めた”許容可能運用環境”、並びに、人体への影響に関して定めた”人体に快適な温湿度環境”に対して適切なものとなっており、実際、軌道上での宇宙飛行士の活動においてこれまで喉の痛みと言った問題は生じていない。

清浄度は、微生物と微粒子に分けられる。前者に対しては、通常居住空間に関する日本病院設備協会規格の「病院空調設備の設計・管理指針HEAS-02-1998」が存在する。その抜粋を表-2に示す。ISS要求は同表のクラスIV(一般病室や診察室)レベルの空気清浄度要求となっており、搭乗員が通常作業を行う空間に対する規定として適切であると考えられる。

後者へのISS要求は、JIS B 9920規定でのクラス8の対象に相当し、「一般の事務所の微粒子濃度は 4×10^6 [個/m³]～ 8×10^6 [個/m³]」と謳われているため、ISS要求は、搭乗員が通常作業を行う空間に対する規定であることを考慮すると適切であることが分かる。

最後に、空気流要求について述べる。微小重力下では自然対流が無いため、人体からの排熱は船内空気流に

頼らねばならない。搭乗員の活動量を MET (Metabolic Equivalent) 数で表わすと、人体排熱に必要な船内気流速度は、2MET (かなり軽い運動) ~ 4MET (中程度の運動) に対して、0.076 [m/s] ~ 0.203 [m/s] に対応する。また、二酸化炭素及び有害ガスの濃度上昇の防止も空気流に依らねばならない。これには、船内空気流ではなく、「きぼう」と ISS 本体との間の換気で対応している。換気に関する日本の「建築基準法第 20 条」では、「事務所において 1 時間に 0.7 回以上の換気をする」と規定されており、「きぼう」の場合、船内空間容積を考慮するとモジュール間換気量は十分これを満たしたものとなっている。最後に、ドライアイや乾燥肌などの健康阻害の防止に対する風速制約について述べる。日本の「事務所衛生基準規則」によると、“事務所内の気流は 0.5 m/s 以下”とある。同規則は、地上では自然対流やエアコン等の冷却装置があるため、人体からの排熱を考慮した規定でないことは明らかであり、更に、換気に関しては別に規定されていることを考慮すると、同規定はドライアイや乾燥肌などの健康阻害の防止を対象にしたものであると考えられる。これに対して、キャビン内の循環風速は 0.076 [m/s] ~ 0.203 [m/s] であり、同規則を満たしている。

以上のことから、表 - 2 の風速規定は、人体からの排熱、有害ガス濃度制御、健康維持の全てを考慮したものになっており、適切であることが分かる。

3. 空気の移動に関する制御

本章では、要求を達成するためのハードウェア構成、検

証上の課題とその対策について述べる。

3.1 温度制御

過酷な宇宙での外部温度環境（約 180°C ～ 約 150°C ）に対し、船内大気温度をどのように効率的に制御するかが課題となった。検討の結果、受動熱制御系（適切な表面光学特性の付与、並びに、断熱材やヒータの使用により、船体各部の温度を適切な温度範囲に維持するシステム：図 - 2）により、内部発熱や船外からの入熱、場合によっては船体へのヒータ加熱を考慮して、船体構体温度が低下しないように保たれた状態とし、必要に応じて環境制御系（船内大気温度を司る）により船内大気の冷却を行うようにした。これにより、ヒータの二重設置を避け全体質量低減と制御干渉を回避している。また、環境制御系への冷却水提供とその温度調節は、能動熱制御系（機器への冷却水温調を司る）の所掌となっている。

環境制御系構成品の一部を図 - 3 に示す。船内空気は、図中の空気調和装置内の空気循環ファンにより、空気吸込口から吸入され、キャビン熱交換器（CHX）で冷却される。CHX に流入する空気と、これをバイパスする空気が混合され、再び空気吹出口から船内へと送風される。この時、CHX に流入した空気は、能動熱制御系が CHX に供給する約 5°C ～ 10°C の冷却水で冷却される。温度制御はバイパス比を変えることにより、 1.1°C 刻みで船内空気温度を 18.3°C ～ 26.7°C の範囲の任意の温度に制御できる。これを陰で支えているものが受動熱制御系であり、船外から船内への入熱量を制御し、空気調和装置へ極度の熱

負荷が生じることを抑制している。

3.2 湿度制御

湿度要求に関し、ISS や「きぼう」では、能動的湿度制御は行っていない。即ち、温度は、搭乗員の活動状態や個人の感受性に応じ、随時、快適な値に設定する必要があるものの、湿度は、要求にある範囲内にありさえすれば温度調節で対応できる、というコンセプトを採用している。

そのため、湿度”制御”としてすべきことは、要求範囲の船内大気温度に対し、常に湿度要求が満たされるようにすることであり、CHX に供給する冷却水温度の上限値の設定によりこれに対応している。これについて述べる。船内大気の冷却前及び冷却後の温度を各々 T_i [°C] と T_f [°C]、冷却水温度を T_{allow} [°C]、温度 T [°C] における空気の水蒸気絶対質量を $a_{H_2O}(T)$ 、そして、温度 T [°C] における空気の飽和水蒸気量を $s_{H_2O}(T)$ とすると、温度 T_f における相対湿度 RH_f は次式で評価できる。

$$RH_f = \frac{[a_{H_2O}(T_i) \cdot (T_{LTL} - T_f) + a_{H_2O}(T_{allow}) \cdot (T_f - T_i)]}{s_{H_2O}(T_f) \cdot (T_{LTL} - T_i)} \quad (1)$$

(1)式を用いて行った解析結果を表-3に示す。同表から、船内空気の湿度を70%以下に制御するには、 T_{allow} を10°C以下にせねばならないことが分かる。実際、ISS本体と「きぼう」との間の冷媒インタフェース温度は1.1°C～10°Cと規定されている。

更に、湿度制御の一つとして、船体構体等の結露による、カビ等の繁殖や金属腐食を防止することを目的とした

結露対策が必要となる。宇宙での結露は致命的な損傷につながる可能性があるため、各種機器及び船体内面温度はISS露点(15.6℃)以上に維持されている。

3.3 清浄度制御

船内大気清浄度は空気調和装置内のHEPAフィルタ(図-3)によって制御されている。同フィルタは、0.3 μm以上の粒子を99.97%以上捕獲(実力値は99.99%)するものである。ISS内での微粒子と微生物の発生量はそれぞれ、3000 [CFU/(人・分)]、 1×10^9 [個/(人・日)]と規定されており(CFU: Colony Forming Unit)、これらを基に微粒子・微生物の船内濃度を解析し、要求を満たすことを検証している。尚、同フィルタの圧損を軌道上計測し、所定の値に到達した段階で軌道上交換を行うことで、フィルタ性能を保証している。

3.4 気流制御

船内気流の制御は、最も困難な開発項目の一つであった。表-1の船内大気風速を満たしつつ、空気循環ファン等の消費電力の低減をも考慮した船内空気循環を実現せねばならない。即ち、要求の一つである0.203 [m/s]は0.7 km/時という非常に遅いものであることや、船内実験室通路は断面2 m × 2 mの矩形型であるものの、通路の後端(船外実験室が付いている側)にはエアロックが配置された複雑な空間形状となっており、全体を低速領域にし、かつ、2/3以上の空間において要求風速範囲に抑えることは非常に難しい。これに加えて、初めての有人宇宙分野に関する検証は、基本的には地上試験で実施すべきもの

であるが、思慮無く、前述の風速に対し地上試験を実施した場合、自然対流の影響が大きく、自然対流の無い軌道上での循環風速を模擬した検証とならない。そこで、軌道上検証は解析により実施することを前提とし、次のような開発シナリオを採用した。

①解析精度を上げるため、解析手法を吟味する。

②空気吹出口周辺の風速を実測し、問題の無いことを確認後、得られたデータを解析の境界条件として用いる。

③解析式に自然対流項を加えた解析を行い、地上試験における自然対流の影響を無視できる「空気と壁面間の温度差」を求める。

④上述③の温度差以下になるような工夫をした地上試験を実施する。

⑤自然対流無しの解析結果と、上記④の試験結果とを比較し、両者が誤差範囲で一致することを確認する。

⑥上記⑤を検証したうえで、軌道上における種々の場合に対する船内大気循環を解析検証する。

まず、上記の②に関し、空気吹出口周辺の風速分布を計測し、適切な範囲に空気が吹き出すことを確認した(図-4)。上記③に対する解析結果を図-5に示す。同図より循環空気と壁面との温度差は3℃以内にすることがあることを把握した。これを基に、地上試験では壁面に断熱材を設置すると共に、船内発熱量が最小になる運用模擬状態を採用することにより、温度差を1℃以内とした風速分布取得試験を実現した。尚、この手法により開発コ

ストを大幅に低減することにも併せて成功し、NASA が自国のモジュールに対して行った同種の試験が温度差 2°C ~ 3°C であり、そのコストが日本側の 3 倍以上であったことを考慮すると、日本側の初めての試験が優れていたことが分かる。

図 - 6 は軌道上解析結果の一例である。この結果を基に船内風速を纏めたものを表 - 4 に示す。同表の最下端欄より船内実験室の風速が、要求の「全空間の $2/3$ (67%) 以上が 0.076 m/s ~ 0.203 m/s 、最低風速 0.035 m/s 以上、最大風速 1.02 m/s 以下」を満たしていることが分かる。尚、米国モジュールでは最大風速が要求を逸脱しており、同要求を全て満たすことの困難さが分かる。

4. まとめ

日本初の長期滞在型有人宇宙大型構造物である「きぼう」の船内実験室を例にとり、微小重力空間における船内大気の温度、湿度、清浄度、並びに、気流の制御に関し、ISS 共通要求の設定根拠を説明し、国内法との関係について言及した。更に、要求実現のためのハードウェアに関する説明を行うと共に、開発過程での問題点について技術的解説を行った。

JAXA 及び関連国内メーカーにおいて、「きぼう」の開発過程を通じ、従来の無人宇宙技術とは全く異なる、有人宇宙開発技術の中でも特に重要な船内大気の制御技術に関して、数多くの技術蓄積を行うことができたことを報告し纏めとする。

5. 参考文献

- 1) C.Son, I.Aoki, M.Kozuma, S.Ito, J.Lewis:
'Characteristics and Performance of the
Japanese Experimental Module (JEM) Air
Ventilation', SAE Technical Paper, 003-01-2412,
2003
- 2) 青木、及川、伊藤、金澤：「きぼう」キャビン内空気循環制御」、宇宙科学技術連合講演会講演集
(CD-ROM) 巻：52nd ページ：ROMBUNNO.1B12、
2008
- 3) I.Aoki, H.Mizuno, S.Ito:
'On the Establishment of the Analysis and
Verification Methods regarding the Air
Ventilation with Very Low Velocity in JEM
(KIBO) as the first Manned Space', SAE Int.
J.Aerosp. 4(1):531-536, 2011



青木伊知郎 あおきいちろう

昭和30年生まれ／出身地 福岡県
／専門 流体力学及び伝熱工学／
学位 博士(工学)

図表の部



図 - 1 国際宇宙ステーション(左)と「きぼう」(右)及び船内実験室

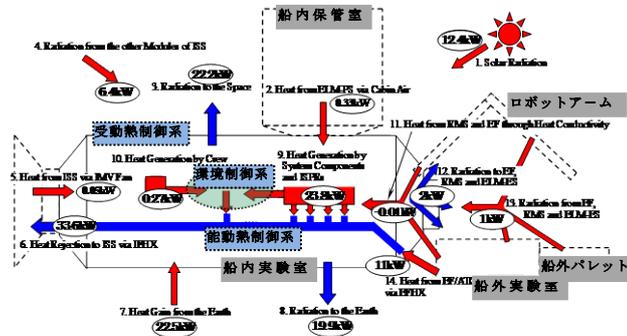


図 - 2 「きぼう」の熱的連携の一例

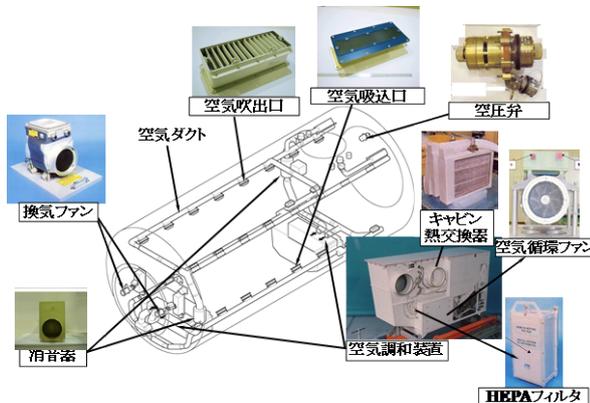


図 - 3 「きぼう」の環境制御系

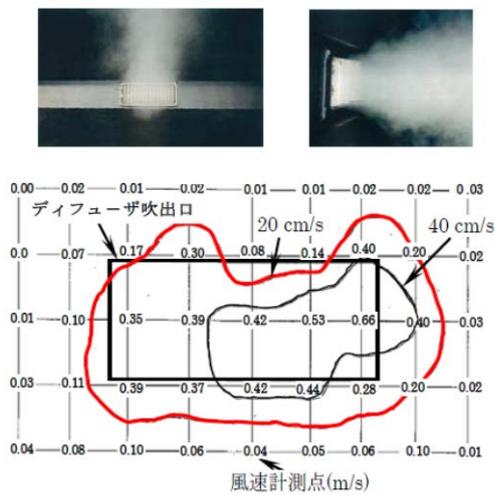


図 - 4 空気吹出口周辺の風速分布

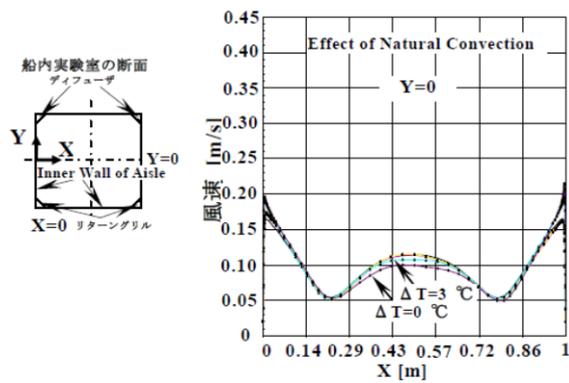


図 - 5 自然対流の影響と温度差との関係解析

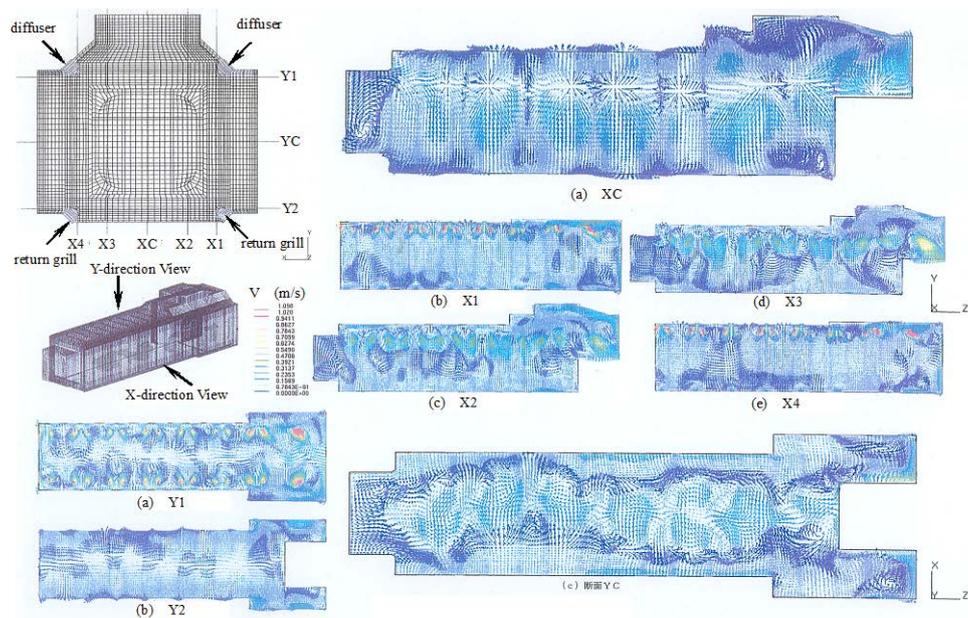


図 - 6 船内実験室内の循環空気風速（解析結果例）

表 - 1 ISS における船内空気に関する要求例

項目	単位	要求（通常時）
温度	℃	18.3～26.7
湿度	%	25～70
清浄度	微生物	CFU/m ³ (注記 1)
	微粒子	個/m ³
風速 (注記 2)	m/s	0.076～0.203

注記 1 Colony Forming Unit

注記 2 壁面から 15cm 以上離れたキャビン空間の 2/3 以上が満たすこと。また、最高風速は 1.02 m/s 以下、最低風速は 0.035 m/s 以上であること。

表 - 2 清浄度クラスと空気中の微生物濃度

清浄度クラス	区域名	微生物濃度 [CFU/m ³]	備考
I	高度清潔区域	10	超清潔区域とも呼ばれる。
II	清潔区域	200	一般手術室等
III	準清潔区域	200	未熟児室等
IV	一般清潔区域	200~500	一般病室、診察室、符合室等
V	汚染管理区域	IV以上	細菌検査室、解剖室等
VI	一般区域	規定せず	-
VII	汚染拡散防止区域	-	-

表 - 3 冷却水上限温度と船内空気の湿度

$T_{allowable}$ [°C]	$RH_f \times 100$ [%]	可否
1.1	67	○
1.0	70	○
1.5	76	×
2.0	80	×

表 - 4 船内実験室内の循環空気風速（解析結果例）



船内実験室の縦断面図

風速 [cm/s]	$v \leq 3.5$	$3.5 < v \leq 7.6$	$7.6 < v \leq 20.3$	$20.3 < v \leq 102$	$102 < v$
I	12.50%	87.50%	0.00%	0.00%	0.00%
II	0.00%	23.15%	71.30%	5.56%	0.00%
III	0.00%	18.52%	75.00%	6.48%	0.00%
IV	0.00%	20.37%	74.07%	5.56%	0.00%
V	0.00%	9.26%	83.33%	7.41%	0.00%
VI	0.00%	7.41%	82.41%	10.19%	0.00%
VII	0.00%	9.66%	78.14%	12.20%	0.00%
VIII	0.58%	22.02%	69.80%	7.60%	0.00%
IX	0.00%	21.63%	61.76%	16.61%	0.00%
平均	0%	1.9%	7.2%	8%	0%