

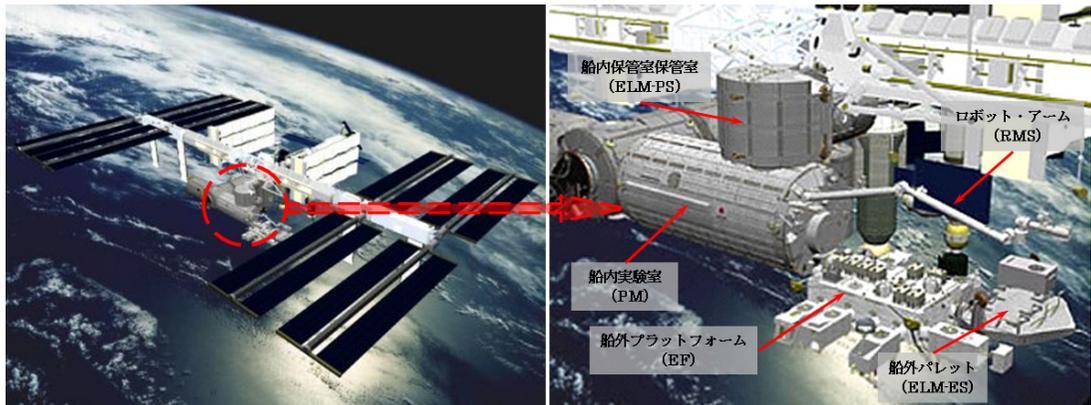
第9章 生命維持技術

1. 序論

我が国初の有人宇宙長期滞在対応モジュールである「きぼう」の、典型的な有人宇宙技術である生命維持技術について総括的説明を行う(第1図の船内実験室と船内保管室が生命維持環境を有する)。まず、生命維持技術の全体像と「きぼう」が対応している範囲の関係を整理し、国際協力の中でどのように所掌範囲が決められたかについて述べる。

次に、温湿度制御、大気成分と圧力の管理

／制御、微粒子・微生物管理、騒音管理、有害ガス管理等の設計手法に焦点を当て、仕様の設定根拠に関する説明を与えると共に、システムとしてそれらをどのようにして実現しているかについて述べる。また、キャビン内空気循環に代表されるような開発段階における設計変更への対応の仕方、有害ガス管理や騒音管理に代表される開発当初は設計上破綻をきたしていた問題をどのように解決していったかについて解説し、我が国における生命維持技術の蓄積状況について示す。



第1図 ISS (左図) と「きぼう」(右図)

2. 生命維持技術と「きぼう」所掌範囲

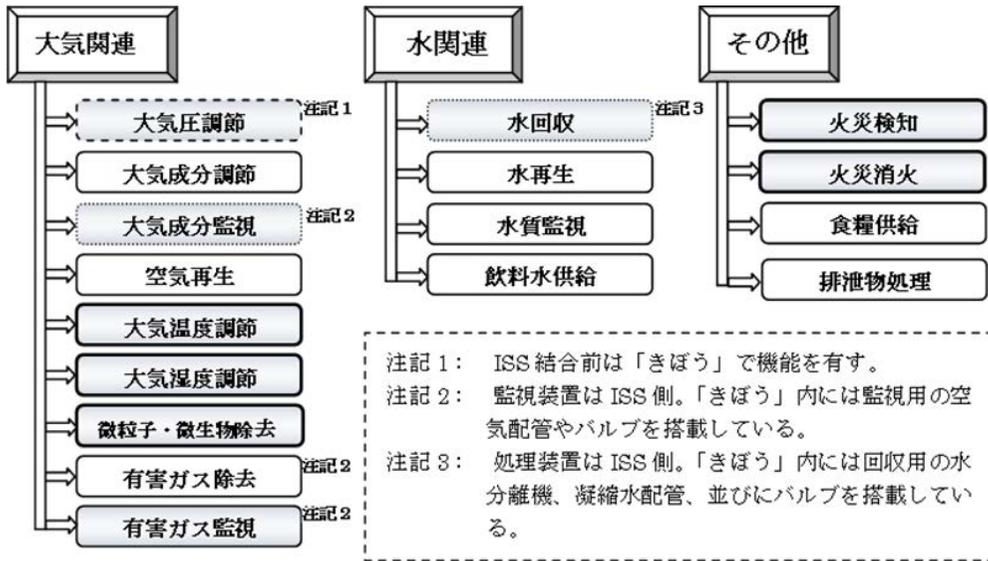
第2図に、生命維持技術の全体像と「きぼう」が対応している機能範囲の関係を示す。図中、太実線の四角は「きぼう」が有している生命維持機能、細実線の四角は「きぼう」

が有していない機能、そして、破線四角の機能については、軌道上で国際宇宙ステーション (ISS) に結合されるまでは「きぼう」側で機能を持ち、その後は同機能を停止するものを表している。

当初、「きぼう」には全ての生命維持機能

を付与することが検討されていたが、ISS 本体側による集中制御・管理が好ましく、「きぼう」の機能は実験モジュールとしてのものに集中すべきであるという観点から、国際調

整の過程で現在の機能範囲に限定することになった。上記の破線四角の機能付与と停止はその調整過程で生じたものである。



第 2 図 生命維持技術機能範囲

3. 生命維持系の技術仕様と設計根拠

「きぼう」の生命維持系に対する代表的な仕様とその設定根拠を第 1 表に示す。長期滞在型であることから、基本的に地上と同等の環境を与えるものとなっており、従来の軌道上設備(米国のスカイラブ、ロシアのミール)に比し、軌道上で格段に快適な活動環境を搭乗員に与える。特徴的なものとして、我が国の宇宙開発では初めての、有害ガス濃度、低速空気循環、騒音に関する規定が挙げられ、長期宇宙滞在に必要な仕様値が明確化されている。

これらの要求へのシステム対応を以下に説明する。

(1) キャビン空気温度制御

過酷な宇宙での外部温度環境に対し、キャビン空気温度の効率的かつ安定な制御を実現するため、受動熱制御系による保温効果、並びに、能動熱制御系による最終排熱という熱的連携作動を採った。

(2) キャビン空気湿度制御

湿度制御は受動的制御とし、所与のキャビン空気温度に対する除湿能力が過度にならぬよう、熱交換器の冷却水温度を設定した。また、微小重力下での凝縮水回収は水分離機による吸引方式で実現した。

(3) 有害ガス濃度制御

有害ガス管理がされた材料を使用する。機器とサブシステムレベルに有害ガス規定を

課し、要すれば脱ガス処理を行う。最終的には打上前にシステムレベルで有害ガスを測定、規定を満たすことを確認した。

(4) 大気圧制御

機器レベルだけでなく、モジュールレベルで最終検査としての圧力調整試験を実施して作動確認をした。

(5) 船内空気循環風速制御

機器や部分モジュールの各種基礎試験に加え、フライトモジュールで最終確認としての風速計測を実施。

(6) 騒音制御

防振・防音材等による機器及びサブシステムでの減音化や、システム消音器等による最終騒音対策を採った。

第1表 「きぼう」生命維持系の主要仕様

生命維持対象	内容	設定根拠	
大気	圧力	全圧97.9kPa～102.7kPa (気圧換算:0.97気圧～1.01気圧)	地上と同レベル
		酸素分圧19.5～23.1kPa (濃度換算:19%～24%)	地上と同レベル
	温度	18.3℃～26.7℃の範囲で、任意の温度に精度±1.1℃で設定可能。	人種等の違いを考慮した快適温度範囲を設定。
	湿度	25%～70% (露点は15.6℃以下)	快適性と機器故障防止の考慮。
	風速	平均7.6cm/s～20.8cm/s (キャビン空間の67%以上で)	下限値は二酸化炭素等の有害気体の淀み防止、上限値は快適性(乾燥肌)を考慮。
		最低3.5cm/s、最高102cm/s	
	有害ガス濃度	二酸化炭素分圧0.7kPa未満 その他はSMAC ^{注記1} 基準に従う。	軌道上長期滞在を考慮した厳しい許容濃度要求。
	清浄度	微生物1000CFU ^{注記2} 未満	地上病院の一般清潔区域(一般病室、診察室)の500 CFU/m ³ に準ず。
		微粒子3.53×10 ⁶ 個/m ³ 未満(平均)	高清浄度が要求される一般の宇宙製品用クリーンルーム規定と同等。
騒音		NC-50以下	一般的な事務所の静けさ

注記1: Spacecraft Maximum Allowable Concentration の略。

一般に日本の産業衛生法より厳しい。

注記2: Colony Forming Unit の略、微生物の多さの単位。

4. 重要課題とその解決

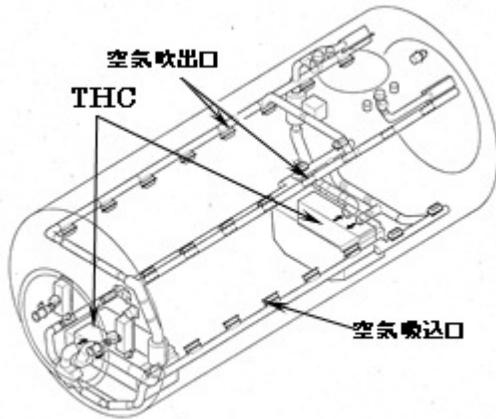
「きぼう」は、我が国初の有人宇宙施設であり、当初から種々の開発上の困難を伴う重要課題が識別された。かつ、国際的に決められた当初の打上げ期日に間に合わせる必要であったことにより、早い段階から各種の基礎試験を行い、その成果を設計に取り込みつつ開発を行っていた。しかしながら、

ISS 本体側の開発が長期化すると共に、各種設計変更が行われ、「きぼう」はその影響を強く受けることになった。本項では、ISS 側設計変更への対応を含めた重要課題に関し、有人宇宙技術特有の代表的な幾つかの事項について述べる。

4.1 船内実験室の空調能力問題

船内実験室キャビン空気の温調試験(第3

図)において、設定したキャビン空気温度に到達するまでの時間が予期した時間より遥かに長いという問題が生じた(第4図)。



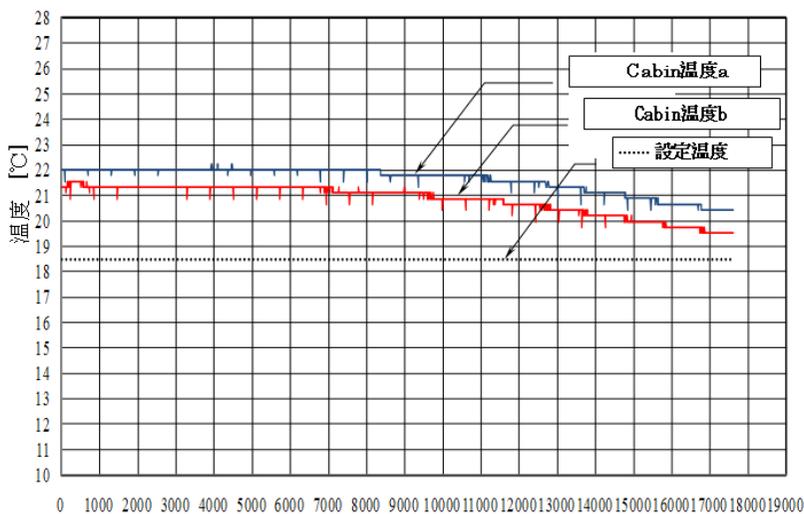
第3図 温調試験の空気循環系と空調装置

直接の原因は、①空気調和装置(THC)の温度制御(PID制御)ロジックに、温度差分量の「切り落とし」による風量調整弁角度設定の不適切性があり、これがTHCの温調

能力を低下させる、②重量軽減のため、空気調和装置(THC)の冷却能力には、キャビン空気熱容量に比し大きな余裕が与えられていないことから、空調時のキャビン空気温度の時間変化が極端に小さくなる、の二点が複合したものであった。

また、問題の背景要因として、a) THCの開発当時には、宇宙用部品として認定されたCPUは8ビットのものしかなく、制御パラメータ値の選定の仕方によっては、温度制御ロジックの差分化における有効数字を十分にとることが難しかった。b) システムの温調試験に先立ち最大排熱能力の確認を行うTHC単体試験では、オープンループの供給空気に対するTHC出口での返送空気温度の変化のみに注目したものであったため、冷却すべき船内実験室内キャビン空気の熱容量の影響が反映されず、THC単体試験では問題が顕在化しなかった、の二点が挙げられる。

最終的には、原因を踏まえての制御パラメータの吟味・変更を行うことで問題を解決した。

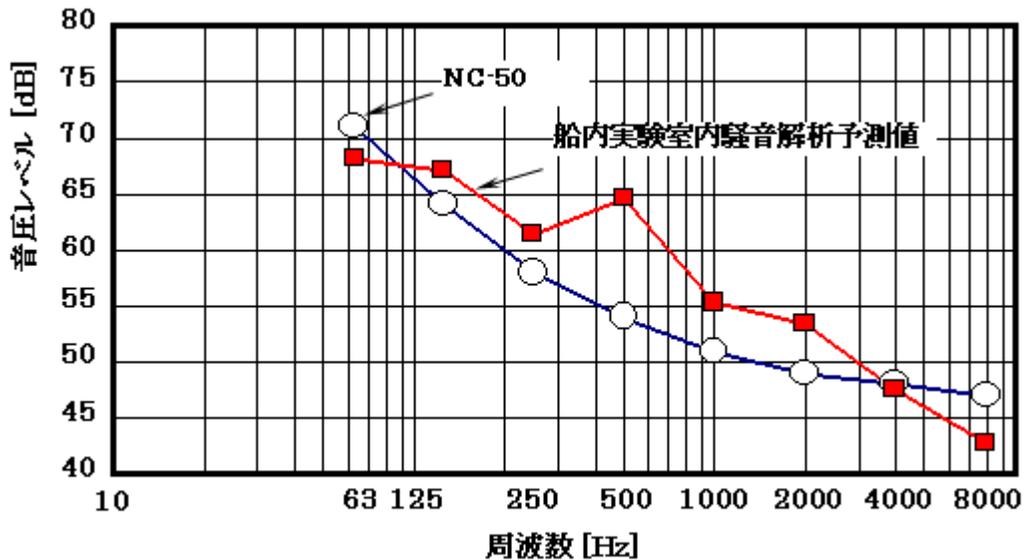


第4図 キャビン空気温調試験結果の一例

4.2 騒音問題

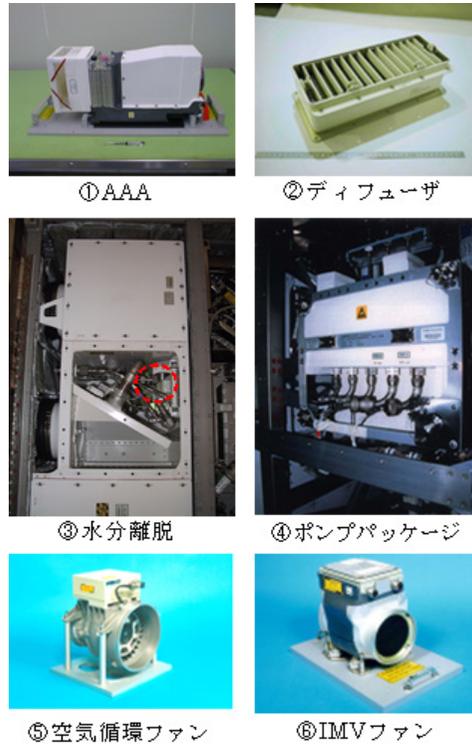
船内実験室と船内保管室には NC-50 という厳しい騒音要求が課されているが、開発初期における騒音予測では、例えば 500Hz 付近で 10dB 以上の逸脱を示しており、実に要求されるエネルギーの約 8 倍(騒音エネルギーは 3dB 毎に倍加)を示し破綻していた(第 5 図)。船内実験室には騒音源となる数多くの

機器(第 6 図)が搭載されているが、循環量を増やす(即ち、騒音が増大)ことにつながる性能や機器の小型化(質量とサイズ)に関する相反した要求の中で、全ての要求を満たすための設計及び管理が必要となり、以下の対策を講じた(概して列挙の順に効果大)。その結果、第 7 図のように騒音要求を達成した。

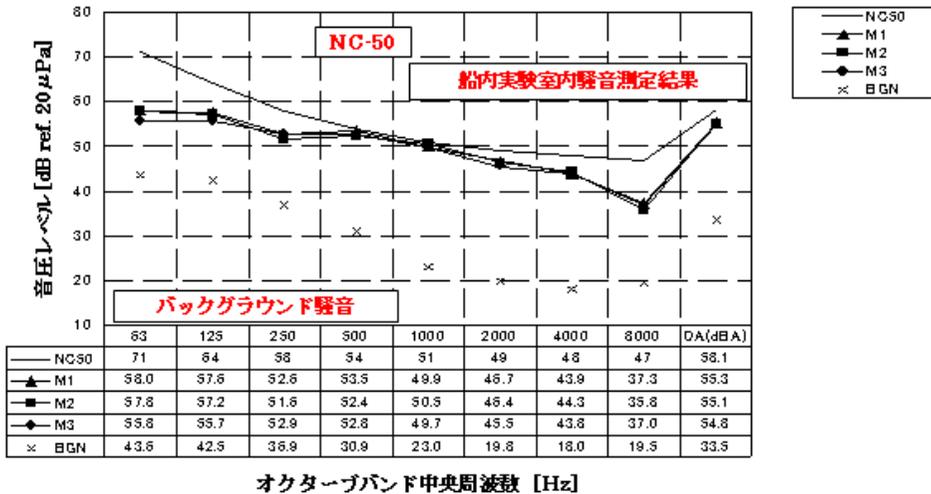


第 5 図 船内実験室内騒音予測解析

- (1) システムレベルの詳細熱解析を実施し余剰冷却用機器を減らす(騒音源の低減: 第 6 図の①)
- (2) システムエアダクトへの膨張型サイレンサ設置(音を反射音で消す)
- (3) 減音パネルの追加(2 種類の空気の振動系を持つ通気孔を設け、逆位相により音波を打消す.: ②等)
- (4) 防音パネルの追加(ダンパ構造による音響エネルギーの低減: 空調・熱ラック)
- (5) ダンパの追加(騒音発生源からの音響エネルギーの遮断: ③のマウント部)
- (6) 断熱材兼防音材のコーティングの使用(音の閉じ込め: ④)



第 6 図 船内実験室搭載機器の一例



通常運用時のシステム連続騒音：
TCA(M)+THC(B)+TCA(L)+THC(A)+IMVファン2台+WSラック

第 7 図 船内実験室の最終騒音状況

4.3 循環風速問題

「きぼう」のキャビン空間には、時速0.5km程の非常にゆっくりとした循環空気が求められている（第1表）。開発当初識別された主要課題（以下の（1）～（4））に対し、下記開発手法を採ることにより、風速規定を完全に満たす快適で安全な有人環境を達成した（第12図～第13図）。

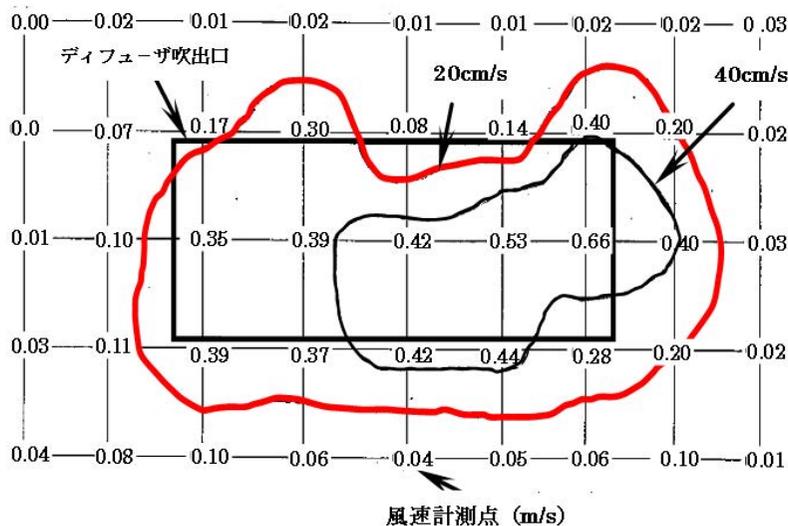
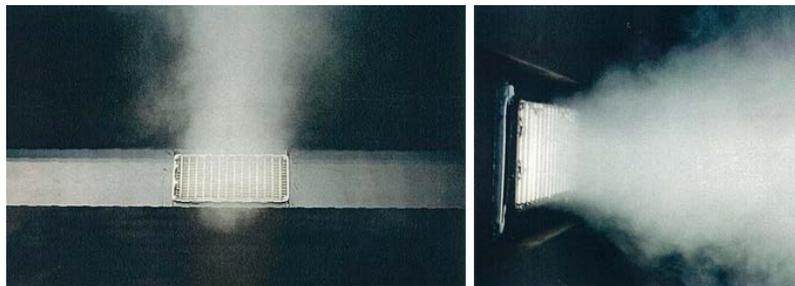
- （1） 船内実験室と船内保管室を結合した軌道上形態での地上試験実施は構体の強度面から困難である。
⇒信頼性の高い解析手法を確立し、これを用いた解析検証を採用する。
- （2） 軌道上各種運用状態での空気循環に

対する試験検証を全て実施するとコスト及び時間が膨大になる。

⇒（1）に準じる。

- （3） 微小重力下で船内の凹凸空間に対し、限なく低速流れを実現する手法の確立が必要である。

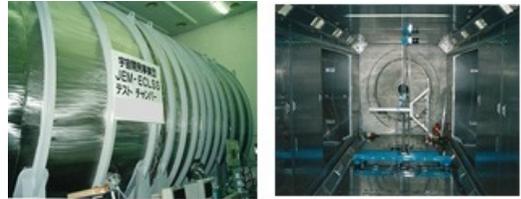
⇒吹出口（ディフューザ）の性能評価基礎試験（第8図）、ECLSSチャンバ（船内実験室自然対流抑制構造を有する部分モデル）でのキャビン風速分布評価基礎試験（第9図、第10図）、実機船内実験室の風速分布最終確認試験を段階的に実施し、解析と試験手法を併行して確立する。



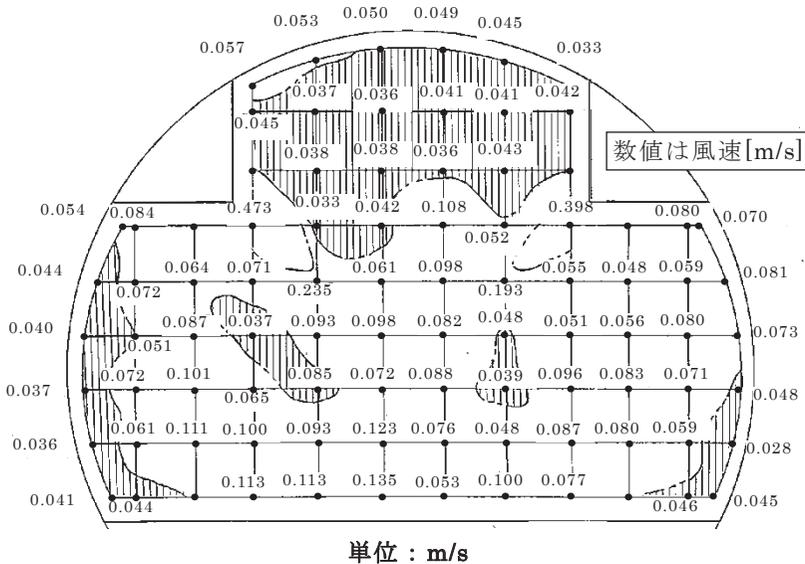
第8図 ディフューザ性能評価基礎試験

(4) 自然対流の影響を除去した地上循環風速試験の実現が困難である。

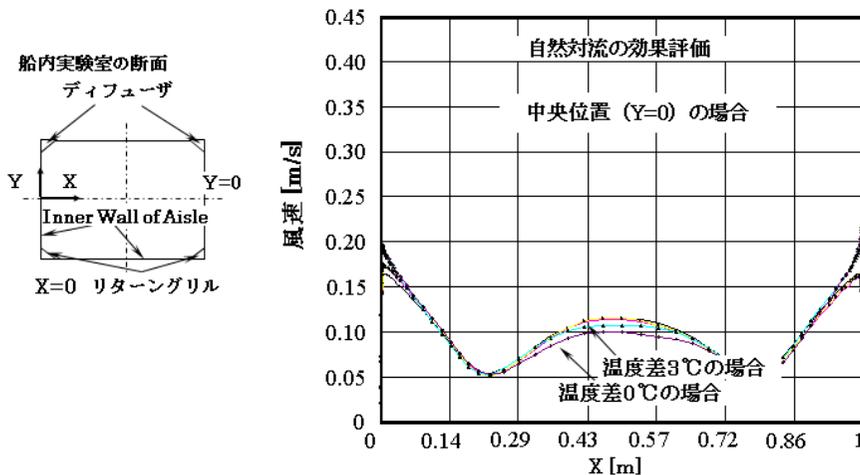
⇒事前詳細解析で自然対流を排除する試験条件と手法（稼働機器の種類と運用状態を含む試験形態の吟味と内壁への断熱材設置等）を検討し、これを試験に反映（第11図）。



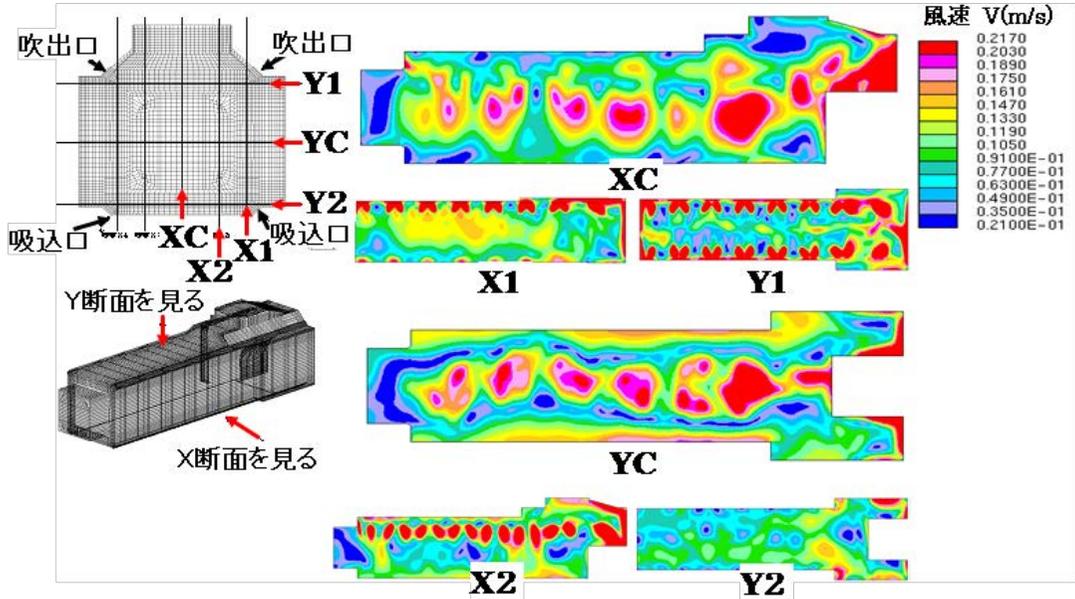
第9図 キャビン風速分布評価基礎試験 (ECLSS チャンバ)



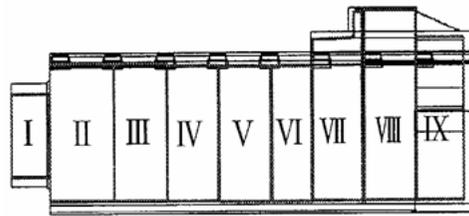
第10図 キャビン風速分布評価基礎試験



第11図 フライト品試験における自然対流の影響解析結果



第 12 図 実機軌道上風速分布解析結果の一例



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	0.49%	19.23%	71.87%	8.40%	0.00%

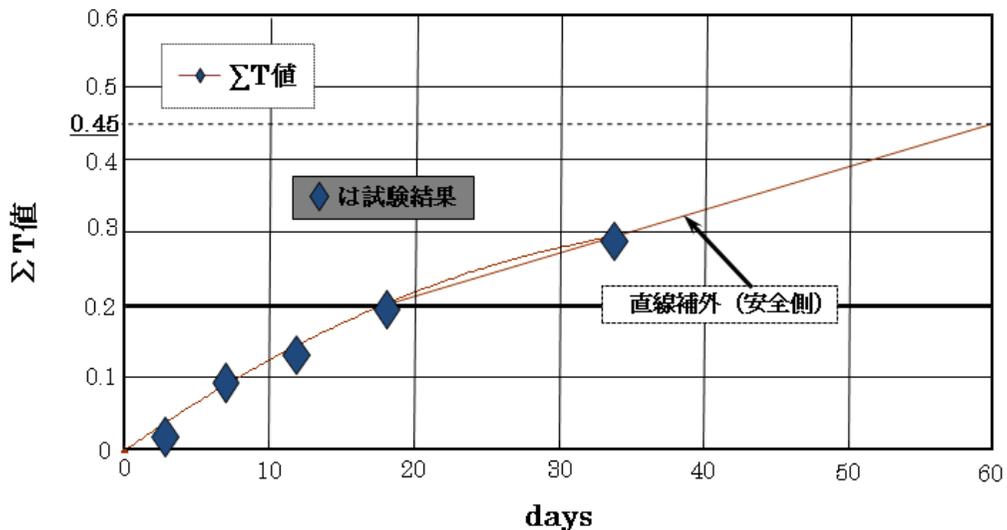
第 13 図 実機軌道上風速分布予測結果

4.4 有害ガス問題

キャビン空間の有害ガスを抑制することは有人宇宙特有の開発事項である。対象となる有害ガスは SMAC (Spacecraft Maximum Allowable Concentration) で種類と許容濃度が定義されており、その数は 200 種を超える、総相対濃度規定値 ΣT は次式で定義されている。

$$\Sigma T = \sum_i (\text{ガス種}i\text{の濃度} / \text{ガス種}i\text{の許容濃度})$$

軌道上で「きぼう」のハッチを最初に開く時(地上で最後にハッチを閉め 60 日以内)の $\Sigma T < 3$ が要求であるが、 ΣT の開発当初の解析予測値は 100 を超え、大きな問題となった。そのため、以下の開発方針を採った。その結果、有害ガスの影響が船内実験室より大きい船内保管室(容積が小さいため)を例にとると、第 14 図のように打上げに問題のないレベルまで ΣT 値を低減できた ($\Sigma T \approx 0.45$)。



第 14 図 船内実験室の有害ガス濃度予測曲線

- (1) 不明気体種の明確化による T 値低減 (不明気体に対する許容濃度は小さいため、明確化による結果として許容濃度が増加)
- (2) 有害ガス発生試験条件と実機温度環境との整合化 (高温に曝されない場合、発生量の少ない室温での測定実施)
- (3) ベーキング (高温曝露による脱ガス処理) の実施
- (4) 有害ガス発生量の経年変化把握試験

を実施し、打上げ時の「有害ガス発生が枯れた」状態を解析予測する。

- (5) 実機の打上げコンフィギュレーションでの有害ガス試験を実施し、上記(1)～(4)の仕上げとしての確認を行う。

5. 軌道上運用

2008 年 5 月の船内実験室の打上げに際し実施された軌道上チェックアウトにおいて、

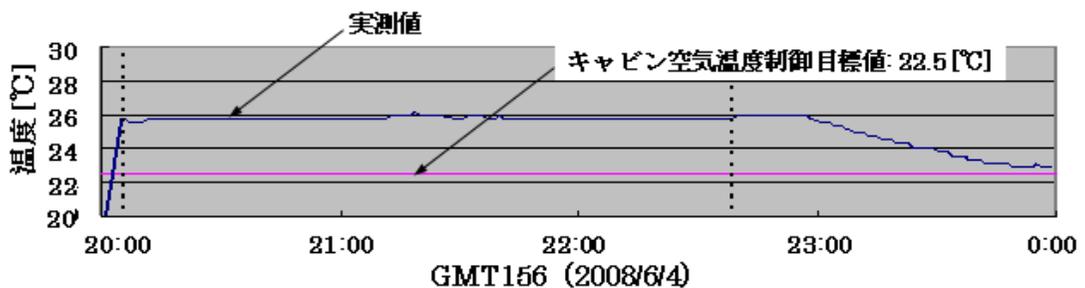
環境制御系として、IMV ファン、AAA ファン、煙センサの動作が地上解析・試験結果と一致し、正常であることを確認した。更に、空気調和装置（THC）に関しては、キャビン空気設定温度に対する THC 温調機能（第 15 図）、キャビンファン回転数、フィルタ差圧が正常であることも確認されている。特に、第 15 図が示すように、4.1 項で述べた温調問題に対する処置が、軌道上でも有効に機能していることが分かる。

尚、環境制御系としての不具合事象として、CHX 空気出口側水分センサー及び水分離機（WS）での水飛散検出による THC 自動停止が発生している。

対応としては、頻繁に水飛散検知を行う CHX 側水分センサーは、水滴量が微小であることからインヒビットをかけて運用し、WS 側水分センサーはそのままの状態で運用を続行している。そのため、WS 側水分センサーの水飛散検知による THC の遮断は今も発生している。同事象が起こる詳細な原因は現時点で不明であるが、

- (1) 軌道上の ISS のキャビン空気は、低熱負荷状態が続いている。
 - (2) そのため、THC 内では空気からの排熱を抑制するように、CHX 側への風量配分を小さく（即ち、バイパス側への風量が大きく）した状態とするよう、風量調整弁（TCV）開度の制御が自動的に行われる。
 - (3) この時、CHX 側への風量は小さいものの、長時間経つと多くの水滴が CHX 内に発生する。
 - (4) 従って、この状態から、CHX 側風量が大きくなると水飛散が生じる。
- という状況が把握されている。

一方、THC 単体の地上試験においても、水飛散現象が生じたため、TCV の開閉速度を落とすソフトウェアの処理により、地上での問題は解決された経緯がある。これらのことから、微小重力場の影響が地上で想定した以上に大きいことが原因である可能性が高いと考えられる。



第 15 図 軌道上におけるキャビン空気の温調

6. まとめ

我が国初の長期滞在型有人宇宙構造物である「きぼう」の開発において、種々の生命

維持技術を獲得した。その主なものを以下に纏める。

- 1) 生命維持技術の全体像を把握するとともに、実験モジュールとして必要な所

掌範囲を把握・決定した。

- 2) 生命維持に必要な技術仕様内容とその背景を確認・獲得した。
- 3) 有害ガス濃度を制御するための設計・管理手法を構築・確立した。
- 4) 微小風速循環に関する設計と試験手法を確立した。
- 5) 騒音抑制に関する設計と管理手法を確立した。
- 6) 設計及び地上試験では、重力の影響を従来の想定以上に精度よく取り込んだ解析・評価を実施するとともに、適切な影響評価試験を実施することが重要であることが分かった。