

次世代の航空機と航空安全について

次世代超音速機を中心に

坂田公夫*

航空機の出現から来年で100年を迎え、高速性に加え、信頼性、安全性および経済性を獲得するにつれ、国際輸送機関として定着発展した。今後は高速化や多様性が軸であり、次世代超音速機、超大型機、V/STOL機などが有望である。次世代超音速機は環境適合、安全性、経済性を実現する超音速での低空力抵抗、高効率エンジン、軽量機体が重点技術であり、航空宇宙技術研究所のNEXSTプロジェクトは、これら技術の飛行実証を目標としている。ボーイング社の音速機、ソニッククルーザーも同様な高速技術を基盤とする。また、拡大する輸送需要を安全に供給するには、次世代管制システムや耐天候性技術などによる事故率の大幅な低減が必要である。

Future Aircraft and Air Safety

- Next Generation SST as the Major Topic -

Kimio SAKATA*

The air-traffic has been expanding as the international human transport based on the speed, safety and reasonable cost. In the future, the supersonic transport, V/STOL and huge transport are expected to bring new paradigm with higher speed and diversity. Next generation SST should realize environmental compatibility, safety and energy efficiency with the advanced technologies, such as low supersonic drag, efficient engines and light-weight composite structures which are necessary for the sonic transport as well. NEXST project is aiming at proof some of those technologies by the flight tests. As for the air safety for the future demand, the incident ratio should drastically down with the advanced traffic management, weather proof systems and so forth.

1. はじめに

輸送機械としての航空機が出現してから来年で100年を迎えることになる。その間、飛行の科学という高度な科学技術の成果としての空気より重い物体の自由な空中飛行の実現から、郵便輸送、そして

人の国際輸送へと大きく発展してきた。物と情報の流れは人類文明の発達を握る主要な歴史的要素であり、航空機はその高速性と長距離性とにより、16世紀から18世紀の帆船が開いた大航海時代が果たした人類の地球規模の交流に匹敵する以上の世界の変貌を演出してきた。

しかし、どの輸送手段でもそうであったように航空輸送は、信頼性、安全性が一般に許容できるレベルに達してはじめて、本格的に公共的な乗り物として採用されたのである。またさらに、現代に至る航空機の発展には高速性の追求と長距離大量輸送とい

* 航空宇宙技術研究所次世代超音速機プロジェクトセンター長
Director of Next Generation SST Project Center ,
National Aerospace Laboratory
原稿受理 2002年6月19日



Fig. 1 航空技術の発展と輸送革命 (60年周期説)

う要求を満たすことによって、国際的な人の輸送の主役となったと言える。航空輸送の次の展開にもさらなる高速化や多様な用途に対応する要求に応えることが勿論不可欠であり、発展の推進力となっている。

その最大の課題と考えられている次世代超音速機 (SST : Super Sonic Transport) は、人の国際間移動の高速化手段として、環境に適合し、安全性が確保され、十分な経済性の実現が強く期待されている。また、航空機の多様化などの要求から、垂直離着陸機 (VTOL : Vertical Take Off and Landing) や小型機も実用化されよう。

本稿は、SSTをはじめとする今後の航空機の開発動向を踏まえて、将来の航空機の安全技術への要求に関して述べようとするものである。

2. 航空機の将来

Fig. 1は航空機および航空輸送の100年にわたる発展を、速度と航続距離の観点から表現したものであり、今後30年にわたって発展するであろう方向性について宇宙飛行を含めて示している。

1903年にライト兄弟が拓いたプロペラ飛行機から約60年後にジェットエンジン搭載の輸送機が、速度、距離、輸送量全てにわたって航空輸送に大きな変革をもたらした。これをジェット機による輸送革命と呼べよう。この革命は、今日ある航空輸送の普及・大衆化による国際活動の展開をもたらし、航空機が世界を大きく変える原動力となった。

Table 1 21世紀の航空輸送への要求と対応機種・技術

目的 / 需要		機材あるいは技術	
飛行の拡大	高速化	SST、SSBJ、Sonic Cruiser	
	大型化	600人乗超大型機	
	多様化	VTOL、STOL、GA、PA、UAV	
	長距離化	航続20,000km超機	
経済性の追求	既存機の改良	新機材 管制システムの安全性向上 高密度運航管制	
安全性の追求	高効率、低コスト、高安全、 低騒音、低NO _x 、低CO ₂ 、 低ソニックブーム		
環境適合性の追及			

さらに今後の技術開発により、その革命から60年ほど経つ2015年から20年にもう一度大きな輸送革命が予測される。その中心は超音速機であるといえよう。それは速度革命であり、本格的な多様化でもあって、現行の2倍を超える超音速飛行速度がもたらす世界同日時代という世界観の変革ともなる。また、現用の高亜音速機の運航に加え、VTOLや小型機の実用化も考えられ、幅広い速度および航続距離の航空機が、それぞれに適した目的で利用されることとなる。即ち本格的な多様化の時代となる。

まず、現時点の需要増として50から100席の小型ジェット輸送機やヘリコプターが上げられ、次にSSTや超音速ビジネス機 (SSBJ : Super Sonic Business Jet、8 ~ 12人乗り程度) の研究開発、超大型機としてのエアバス社のA380 (600席) の開発や超大型の全翼機の研究など、さらには、昨年春に発表されたボーイング社の音速機ソニッククルーザー (Sonic



(a)250人乗りクラス次世代超音速機概念図



(b)超音速ビジネス機



(c)ソニッククルーザー(音速機)

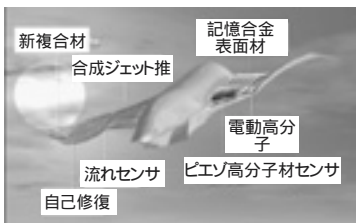
Fig. 2 高速機としての次世代超音速機とボーイング社ソニッククルーザー



(a)航技研の高速VTOL概念図



(b)ティルトロータVTOL概念図



(c)NASAの小型機概念図と将来技術



(d)NASAの全翼機概念図

Fig. 3 各種将来型機概念と新技術

Cruiser)の国際共同研究着手もきわめて興味深い。また、市場確保としての国際共同開発の活発化や航空機産業の大型合併などの企業体系の変革も関連して逃さない。

これらを含めて将来機を見通すと、超大型機、SST、小型低コスト輸送機(GA: General Aviation)、VTOL、無人機(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)、個人用飛行機(PA: Personal Airplane)、SSBJ、スペースプレーン(SP: Space Plane)へと発展することが考えられる。SPは純粋な航空機とは言えないが、飛行場から日常的に宇宙へ旅客を運ぶという未来型の輸送機が実現すれば、航空宇宙輸送機として位置付けられよう。また、別の観点からこれらの航空機および技術動向を、輸送における役割あるいは実現要求として整理するとTable 1のようになる。

Fig. 2には大型SSTと、ボーイング社の提唱する音速機、ソニッククルーザー、およびSSBJの概念を示し、Fig. 3には他のジャンルに属する、VTOL、ならびに、安全および省エネで画期的な新技術の搭載を目指す小型機概念を示す。VTOLとしては航空宇宙技術研究所(以下、航技研)の提唱するリフ

Table 2 技術課題/要求とその対処

	課題/要求	対処/意味
既存機の改善・改良	産業寡占化の中で機体コスト低減要求の高まり	設計技術・製造技術の開発。整備低コスト化を含む低コスト運航技術
	中小路線の活性化: 70人から150人の中小型輸送機需要の高まり	低コスト機体技術を含む成熟技術の活用
	徹底した省エネの要求	多様な省エネ技術、低CO ₂ 要求/環境適合性
	ヘリコプターの需要増大	航空機の多様化、全天候運航技術を含む安全技術の向上
拡大	輸送量増強を目的とする600人乗りの超大型機	既存技術の向上、信頼性の一層の向上
新型機	SSTの研究開発	輸送の革命、技術開発への意欲、空力、構造、エンジン、制御全てにわたる多様な新技術の開発
	ソニッククルーザー、SSBJ、偵察機の開発	大型SSTの技術波及、航空機の多様化、用途拡大
安全	ティルトロータ等のVTOL、STOLの開発	信頼性安全性技術向上、輸送の多様化、運航技術
	事故率の1/4以下に低減、ますますの安全性信頼性向上要求	機体・エンジン設計、整備、運航、管理技術
環境	排ガス(低CO ₂ 、NO _x の1/5以下に低減)、騒音に関する基準の強化	『京都議定書』対応、エンジン技術、空力技術、運航技術などの総合技術、超音速機に対する低騒音化、低NO _x 要求は高い

トファンを有する高速VTOLと、既に欧米で開発段階に入っているティルトロータ機を示した。また、翼面にピエゾ変換機などのマイクロマシン技術を用いた新しい概念の小型機は米国NASAが研究中的のもので、革新的な省エネルギーを目指している。さらに、翼と胴体の一体化による構造超軽量化を目指した全翼機も研究されている。

3. 技術開発動向

上記の実機開発動向を支える技術研究の動向を見ると、Table 2に示す技術要求点が主要な研究対象となっている。

環境に関する技術要求も、CO₂排出をめぐる『京都議定書』が規定するCO₂排出規制への対処を含めて、低NO_xなどの高い技術要求が存在する。

以下、各技術分野を概説する。

3-1 省エネ技術、低CO₂技術

現用航空機の低燃費化ならびにさらに高度な省エネルギーを目指す新概念機の研究開発が行われている。技術の中心は、エンジンの高圧高温化などによる低燃費化、機体空力性能の低抵抗化、機体エンジンの軽量化、特に複合材適用、運航システムとの統合を含む運航効率化などである。

また新概念機には、空力性能向上のための翼面上の境界層制御マイクロマシン、軽量化を目的とするフラッタ抑制制御技術などが検討されている。

3-2 超音速機技術

マッハ2の250人乗りの大型輸送機、あるいはマッハ数1.5から1.8の10人乗り程度のビジネスジェット機が対象となり、技術類似性からボーイング社が提唱するマッハ数0.98のソニッククルーザーもこの系統に入る。

必要技術は、超音速低抵抗のための空力技術、軽量化を目的とする複合材適用技術、超音速域での高効率エンジン技術と離着陸域での低騒音技術、全速度域での低NO_x燃焼技術、複雑システムの制御技術、超音速飛行時のソニックブーム低減技術など、多様で高度である。

SSBJは、騒音に関連する技術課題をはじめ技術要求の困難性が比較的低いため、早期の実現が期待されている。また、マッハ数0.98のソニッククルーザーは、巡航速度の空力特性が超音速機技術に同等で、また複合材適用技術、制御技術などにも類似点があることから、超音速機技術の波及と見ることができる。

Table 3 代表的な技術目標

技術項目	内容	
空力設計技術	従来の風洞実験、経験則、過去のデータベースの範囲を越えた物理と数学による計算機設計技術の開発	逆問題として設計要求を実現する手法、最適設計の可能性、低コスト開発
最適設計技術	計算機を中核とする最適設計技術	高速化、高効率化、低コスト化などの要求の実現
システム統合技術	エンジン機体統合など、複雑系の設計手法開発。最適化必須	計算機技術、飛行実験技術などを経て獲得

Table 4 CO₂の排出に係わる数値目標の例

IPCC	2010年までに 2015年までに 2050年までに	8~10% 20% 40~50%
NASA	当初 2010年までに	8% 25%
アメリカ・エネルギー省 (対90年比)	2010年までに 2020年までに	18~31% 24~35%
EC		20%

3-3 VTOL技術

航空技術者の夢であるVTOLがヘリコプター技術の発展や新推進技術の研究などから、現実味を高めている。特にティルトロータ機は、垂直飛行から水平飛行への遷移飛行時の安定性確保に課題があるが、欧米で開発が進められている。また航技研ではFig. 3の(a)に示す独自のリフトファンを有する高速VTOLの概念を提示し、基礎研究に着手している。課題はエンジンからの大量抽気(エンジン圧縮機から抽出する比較的大量の空気)でファンを駆動するタービン、推進エンジンとリフトファンの同時作動と遷移飛行時の制御、複雑システムの安全運航を確保する技術、ファンの低騒音化などである。

これらVTOLとしての技術課題をまとめると、Table 3に示すとおりとなる。

3-4 その他

航空機の種類によらず飛行安全、環境適合性向上および低コスト化に対する要求はますます高度化している。

安全については後に詳述するが、環境技術の一つとして、Table 4に各国が目標として設定しているCO₂削減値を示した。CO₂排出量は、省エネルギーとしての数値指標でもあり、両目的を包含している。

また、中小型機を中心とする低コスト化の要求も

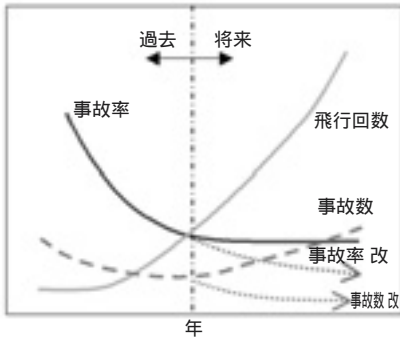


Fig. 4 航空機事故率と将来の事故数予測

高く、コンピュータ化した設計手法、複合材の省エネ製造法、一体構造、整備と部品交換を含むライフサイクルコストの低減などが求められる。

4. 航空安全の観点

上述の新機材の技術動向とあいまって、航空輸送量の拡大および大衆化を確実にするための航空安全に関する技術要求がますます高度になってきている。現在は、100年に及ぶ航空機の歴史の中で最低のレベルとなっている。しかし、今後の航空輸送の伸びを考えれば、事故率を下げない限り事故件数は増加することになる。Fig. 4は事故率、飛行回数、事故数の関係を示したグラフである。これらの事故は近年下記の原因に集中しているように思える。

- 老朽機の整備不良などによる構造欠陥
- 過密スケジュールの空域・空港管制の課題
- 複合材などの適用による新技術の安全性・信頼性の確保の未成熟
- 乱気流などの天候

NASAでは今後の事故の絶対数を減少させることを目標に、今後の航空輸送需要の伸びを5%としても、飛行回数の増大に応じた事故率の減少と死傷者の減少を大命題として大規模な研究を展開している。その主要な課題は次のとおりである。

- (1) ウインドシアなどの局所天気情報の取得と活用
- (2) 先進航空管制システム(ATM : Air Traffic Man-

Table 5 航空安全のための主要な課題

分類	安全課題
大型亜音速機	事故率の低減 人的要因の除去 エンジン安全性向上 監視と自動修復 複合材構造安全性
SST	長大機空港安全性 高空飛行安全性(乗員・乗客) デコンプレッション (与圧キャビン安全性) SVS(人工合成表示装置) 複雑多様制御信頼性向上 主翼燃料タンクなど安全性向上 高速機飛行管制管理技術
ヘリコプター、VTOL	計器飛行技術 全天候飛行技術 低速機飛行管制管理技術 (4次元飛行管理) 混雑空域飛行管理技術
その他	全球飛行管理技術 多様航空機飛行管理技術 MLS飛行管制技術 天候・乱気流監視、予測、回避技術

agement)の開発

- (3) 老朽機の構造健全性確保
- (4) エンジン信頼性向上と機体情報の表示
- (5) 氷結防止技術
- (6) 小型航空機の安全確保
筆者はこれらに以下の管制などの技術を加えたい。
- (7) 4次元管制技術、即ち時間と3次元空間を同時に
かつ広範囲に航空管制する技術。広域管制と空港
周辺空域の飛行密度増大に対する高密度安全管理
技術に通じる。
- (8) 超音速機などの複雑系システムの制御系安全性向
上、人的要素排除技術
- (9) 安全性管理データベース：アクシデント、インシ
デントデータ解析管理技術
- (10) フラッタ、非定常現象などの回避、低減制御技術
これらへの対処技術はほぼ上述されているが、実
際には、技術基準の設定、運航における技術管理、

Table 6 各国の次世代超音速機概念

項目	名称	巡航マッハ数	座席数	航続距離(km)	最大離陸重量(t)	全長×翼幅(m)	騒音/NOx
日本	JSRP	2.0 - 2.2	250 - 300	10,200	390	94 × 43	- 5dB / 5EI
アメリカ	HSRP大型機	2.4	300	9,600	328	100 × 41	- 6dB / 5EI
	ボーイング社案1999 小型ビジネス機	1.6-2.0	8-10	8,000	62	39 × 18	- 9dB /
ヨーロッパ	ESRP大型機	2.0	250	10,200	339	89 × 42	- 4.3dB / 5EI
	コンコルド	2.0	100	6,000	185	62 × 26	0 / 20EI

ヒューマンファクターの適切な活用あるいは排除を含む運用上のシステム改善などについても同時に検討が必要とされる。また特に、最大の次世代機である超音速輸送機では新技術に伴う新たな安全性技術の要求がある。

Table 5に各種航空機に分類した安全技術を示した。現用の亜音速航空機は事故率の低減に向けた各要素とシステムの信頼性安全性の向上が主題であり、SSTは、100m機体のハンドリング、高空飛行、視界の悪いコックピットを補助するディスプレイ装置(SVS: Synthetic Vision System。統合画像表示、人工視界装置)などの技術、その他、ヘリコプター、VTOL、さらには地上設備に関する新技術を整理した。しかし、これらは相互に技術波及することができる、汎用性のある技術でもある。

5. 次世代超音速機とその研究開発

5-1 大型化と高環境適合性に向けた技術要求

SSTは1960年代に登場したコンコルドに比べ、輸送量、巡航距離、経済性、環境適合性の各分野において画期的に改善されたものとならなければならない。巡航マッハ数は2程度であり、機体規模もほぼ250人乗以上、胴長約100m、総重量350tクラスとなる。また、環境適合性に優れたものでなければならず、低騒音、低NO_x、低CO₂、さらには低ソニックブームなどの特性も備える必要がある。また、技術の活用として超音速のビジネスジェット機も検討されている。

Table 6は各国で検討されているSSTの概念例である。小型機を除くと乗客数、航続距離、低公害性などで上記の条件を満たし、コンコルドからの飛躍的な改善を目標にしている。

大型SSTの実現に必要な条件と技術課題の概要をまとめると以下のとおりとなる。

- (1)250人以上のペイロード
- (2)10,000km程度の航続距離
- (3)現用空港の利用(2,500m級滑走路、既存タクシーウェイ、既存駐機スポット)
- (4)高経済性、高効率、低CO₂
- (5)現行の環境基準を満たす低騒音性
- (6)同様の低NO_x排ガス

これらのための具体的技術課題は以下のとおりである。

高空力性能機体：超音速高揚抗比、統合設計、逆問題・最適化計算機設計技術

高効率軽量超音速エンジン(可変形状低騒音エンジン)

複合材主構造適用による軽量機体(耐熱複合材など)

低公害(低騒音、低NO_x)エンジン

低ソニックブーム、低騒音機体

高離着陸性能(低速高揚抗比技術)

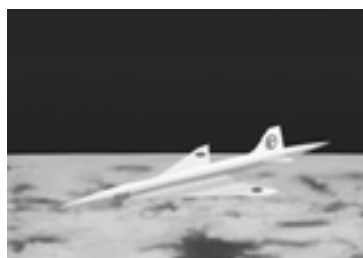
高機能飛行制御技術、革新コックピット技術、SVS技術

これらの高度な技術課題は、これまでの高亜音速機技術の発展だけでは実現せず、計算機科学の活用、全く新しい複合材の導入、革新的な制御とコックピット技術などの新しい分野を必要とする。

5-2 超音速機技術の研究開発

SSTの研究は、2000年7月のパリでのコンコルド事故にも拘らず、コンコルドの退役や、技術発展の帰結としてより高速の次世代SSTが求められ続けている。研究開発は各国で行われているが、NASAでは高速機研究開発計画(HSR: High Speed Research, 1990~1999)引き続き進められているエンジン高効率化(UEET: Ultra Efficient Engine Technology, 2000~2005)、革新システム研究(REVCON)が推進され、欧州においては欧州超音速研究計画(ESRP: European Supersonic Research Program)およびフランスの超音速機要素研究により推進されている。

また、8~10人乗り程度のビジネスSSTがその需



ロケット実験機(NEXST 1:2002 2003)



ジェット実験機(NEXST 2:2005 2006)

Fig. 5 航技研の超音速実験機概念図(無人機)



Fig. 6 プロジェクトスケジュール



a) NEXST 1ロケット実験機の組立て風景



b) オーストラリア実験場のランチャとNEXST 1

Fig. 7 超音速無人滑空実験機(ロケット実験機NEXST 1)の開発・オーストラリア飛行実験準備風景

要の顕在化により研究開発に着手され、米国では防衛用の低騒音、低ソニックブームの小型偵察機の研究もされている。

我が国では、航技研ならびに経済産業省を中心に、高揚抗比機体設計、エンジン、複合材構造、市場調

査等について研究を進めてきている。

1) NEXST (National Experimental Supersonic Transport) 計画

航技研の「次世代超音速機技術の研究開発」は、我が国独自の技術基盤を活用したCFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) 逆問題最適化設計法を中心とする革新技術を、小型無人超音速実験機によって飛行実証するもので、航空機を丸ごと設計開発することにもきわめて大きな意義がある。2002年に無推力実験機(ロケット実験機NEXST 1)をロケットブースタにより超音速飛行させ、2005年に小型のジェットエンジンを2基搭載したジェット実験機(NEXST 2)を飛行させる計画である^{3,4)}。

研究開発は2010~2015年頃に開始されることが予測される大型の国際共同開発に独自の高度な新技術で主体的な参加を実現し、今後の我が国における航空宇宙産業の健全な発展を実現することを目指しており、ひいては、技術先導性を生かして、我が国工業の先端性を確保し、さらに、先進的な航空機を世界に供給する主要な国になることで、国際関係の一層の促進を担うとすることも大きな狙いである。また、実験機による技術実証は、技術に信頼性を高めるばかりでなく、技術の世界へのデモンストレーションとしての意義も大きく、我が国の技術レベルを世界に発信することとなる。

両実験機は、我が国独自の技術基盤を活用したCFD逆問題最適化設計法を中心とする革新技術開発の成果を実験機的设计開発に適用して、飛行実験により技術実証することを目的としている。その概

念をFig.5に示す。両者とも長さ12m程度、スパン(翼幅)4.7~4.9m、重量約1,960kg(ロケット実験機)~3,500kg(ジェット実験機計画値)の小型無人超音速実験機である。

Fig.6は研究開発計画の年次スケジュールである。計画は既に1997年に開始して5年を経過している。第一のロケット実験機NEXST-1は既に実験機をはじめとする実験システムの開発を終え2002年度に飛行実験を行う計画である。飛行実験はオーストラリアの無人砂漠地帯ウーメラで実施することとしており、本年1月末には実験機を運び込み、現地における再組立を完了して、5月現在システム機能試験を実施している。飛行実験は7月に行う予定である。実験機は三菱重工業を開発とりまとめ会社として川崎重工業、富士重工業(株)ならびに石川島播磨エアロスペースを部分分担会社とした体制で開発を進めてきた。Fig.7の写真a)は2000年6月の富士重工業(株)工場内の実験機構造組立の状況であり、写真b)はウーメラにおいて、宇宙科学研究所から拝借したランチャ上にロケットと実験機を打ち上げ角度で設置した状況を示している。

このロケット実験機により、世界でも初めての逆問題によるCFDを用いた理論的数学的な空力設計法を実証することとなり、実機開発に必須の低抵抗空力形状を設計できる技術の確立が可能となる。また、このような計算機を用いた設計開発技術は、低コスト開発および製作をもたらす基幹技術であるといえる。

ジェット実験機は、エンジン2基を搭載した無人機であり、より実機に近い複雑システムを対象とする設計技術の確立を目指している。

4. おわりに

航空機技術には製造産業の技術牽引役としてきわめて重要な任務がある。わが国においても産業の技術高度化による構造変革が求められており、航空宇宙分野が重要な役割を担うと期待されている。15年後のSST開発をはじめとする大きな航空輸送の技術革新の折に独自の新技术を持ってわが国が航空機と輸送の革新を演出し、以降の航空機開発の主要な担い手となることが願いである。そのためにも、人を運ぶ輸送業にとって最も重要な安全について、技術的な認識を十分に高め、現用航空機の安全性向上を基盤として、将来航空機の目指すべき安全性技術の目標を明確にして適切に取り組むことが重要であると考えられる。

このことは、航空輸送の拡大と大衆化をさらに広げることになり、今後ますます重要となる人種、国籍、宗教などを越えた国際交流による平和と経済発展の最大的手段としてその確立が期待されることでもある。昨年9月11日のニューヨークとワシントンでの航空機自爆テロの教訓も生かしつつ、次世代の高速化、多様化を睨んださらなる安全な航空輸送システムの構築に向け技術の確立を図ることが課題であり、願わくはわが国の技術がその担い手となることを期待したい。

[後記：2002年8月記]なお、本稿脱稿後、7月14日にロケット実験機の第1回飛行実験をオーストラリアにおいて実施したが、残念なことにロケット制御系統の不具合から、実験機を計画どおりに飛行させることはできなかった。現在原因調査中であるが、早期の課題解決に向け関係者が力を結集しているところである。