

## 沖縄県における宇宙港建設構想の提案

高田尚樹 (独立行政法人 産業技術総合研究所 環境管理研究部門\*)

Proposal of plan to construct space port in Okinawa prefecture

Naoki TAKADA (Institute for Environmental Management Technology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

**Abstract:** This paper describes study on a proposal of plan to construct space port in the Okinawa Island to launch with lower price not only new rockets for commercial-use satellites but also reusable manned space vehicles for low-earth-orbital and sub-orbital space tours, which would be developed by venture companies in next two decades. In the idea, called OASIS :Okinawa Aero-Space Island or International Station Plan hereafter, aerospace transport system on the ground can be set up with low initial and running costs, because the runway and several facilities in the United States Air Force base are usable for horizontal or vertical launching and landing, maintenance, and propellant supply of space vehicles, and because the Okinawa is located most south in Japan at about 26-degree north latitude. The validity of the OASIS Plan is proved by calculation of propellant consumption for the H-2A rocket with the equation of motion.

**Key words:** Okinawa (沖縄), Space Port (宇宙港), Space Tourism (宇宙旅行)、Space Development (宇宙開発), United States Force Base (米軍基地)

本論文では、今後 20 年にベンチャー企業により開発されるであろう、商用人工衛星のための新型ロケットおよび地球周回低軌道や弾道軌道の宇宙観光用の再使用型有人宇宙船をより低価格で打ち上げるための宇宙港を沖縄に建設する構想の提案に関する研究を報告する。ここで OASIS (= 沖縄航空宇宙国際ステーション、もしくは沖縄航空宇宙アイランド) Plan と呼ばれる本構想では、沖縄県の米空軍基地の滑走路や関連施設を宇宙船の水平もしくは垂直離着陸、メンテナンスおよび推進剤補給に利用できる上、沖縄県が北緯 26 度という日本でもっとも南に位置することから、地上の宇宙輸送システムを低コストで設置・運営することができる。OASIS Plan の妥当性は、運動方程式を用いた H-2A ロケットの推進剤消費量の計算によって証明される。

### はじめに

近年の宇宙開発では世界的に、従来の国家主導以外に、宇宙環境を商業的に利用する民間企業主体の活動が増えてきており、人工衛星やロケットの製造・打ち上げだけでなく、衛星を利用した様々な情報提供サービスの産業分野が成長しつつある (Scientific American, 2000)。日本も、国産の H-2A ロケットで衛星打上市場へこれから本格参入しようとしており、その価格 (約 85 億円) は十分な競争力を持っている。しかし、商用静止衛星の打ち上げに関しては、現在 Arianespace 社が世界市場の約半分を占め、ロシアやアメリカも高い信頼性と豊富な実績を、中国は低価格を武器に顧客のニーズに応えようとしていることから、日本の打上ビジネスは厳しい状況に置かれている

\* 〒 305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1  
Phone: 0298-61-8232, Fax: 0298-61-8722, E-mail: naoki-takada@aist.go.jp

(宇宙と天文編集部, 1999), 朝日新聞 2001 年 9 月 7 日朝刊 15 面)。また、1990 年代後半からは、宇宙観光のための宇宙船の開発やその企画を行うベンチャー企業や財団がロシアやアメリカで設立され、2001 年には史上初の宇宙観光旅行が実現された。宇宙観光は全く新しい市場であり、今後 10 数年で大きく成長する可能性がある。日本でも、宇宙観光ビジネスに関する活動はすでに始まり、低予算で運行可能な有人宇宙船の開発が研究機関で進められているものの(久保田・江口, 2002)、日本は 1 例を除けば有人宇宙飛行の手段を米国のスペースシャトルのみに依存してきており、独立に行った経験を持たない。中国もまだ有人飛行を行っていないが、2002 年 4 月に国産宇宙船の無人飛行テストを成功させており、将来は日本より先に宇宙観光事業を開始する可能性もある。

人工衛星や宇宙船の打ち上げ費用を下げるには、再利用性を持つ効率の良い輸送システムの技術開発が最も重要である (Scientific American, 2000) が、それ以外に、打ち上げ施設を低緯度の地点に建設することが求められる。地球を円軌道で回る人工衛星は、地球の引力につりあうだけの遠心力を与える速度 (時速 7.9km) を必要とするが、実際には自転による地球表面の移動速度を差し引いた分だけロケットで加速される。地表速度は赤道に近いほど速いため、より少ない燃料、すなわちより少ない費用で衛星の速度が目標値に達するように発射地点は低緯度地域に選ばれる。日本のロケット発射がより緯度の低い鹿児島県の種子島や内之浦で行われるのもそのためである。

以上のように、打ち上げ拠点の選定は、宇宙輸送システムのパフォーマンスを最大限に引き出すために重要なものであり、日本の宇宙産業にとっては衛星の打ち上げや宇宙観光ビジネスの国際競争で勝つ上で大きな意味を持つと考えられる。しかしながら、上述の宇宙観光旅行部門を含む将来の宇宙産業の発展を見据えた打ち上げ施設に関する議論はほとんどなされていない。また、国内の航空宇宙産業基地構想は、公的機関や民間企業の既存施設を中心に想定されているため、研究開発や機器製造については非常に高いポテンシャルを持っているが、打ち上げ、飛行運営、建設等のコスト面を考えると宇宙観光ビジネスの展開には最適でないと思われるものもある。

著者が提案する、沖縄への宇宙港建設構想、OASIS (Okinawa Aero-Space Island/International Station) Plan (高田, 2002) は、建設費用、ならびに宇宙船の打ち上げから回収・補給・再打ち上げまでの飛行運営費用を他の国内地域よりも低くすることができる。その理由は、同県が日本国内で最南端に位置すること、および在沖米軍基地の滑走路や通信・補給・点検整備などの既存施設を転用できることにある。OASIS Plan の研究では、将来の日本経済の一翼を担う可能性を持つ航空宇宙産業の振興を目的として、宇宙観光ビジネスを視野に入れた、沖縄における宇宙輸送システムの地上拠点に関する検討を行っている。本論文では、最初に現在の宇宙開発の概要を述べ、続いて沖縄県の経済について触れた後、沖縄県への宇宙港建設の利点を説明する。その次に、宇宙船の打ち上げコストの面から OASIS Plan の妥当性を証明するため、ロケットの運動方程式を用いた推進剤消費量に関する計算結果を示し、最後に結論を述べる。

## 宇宙開発の現状

### 国家レベルにおける宇宙開発

日米欧加露 16ヶ国が参加する国際宇宙ステーション (ISS) (堀川, 2001) の建設は、2006 年の完成を目指して 1998 年 11 月の基本機能モジュール「ザーリヤ」の打上に始まり、宇宙空間を利用したいくつもの地球や宇宙の観測、生物・物質科学実験が計画されている。日本は実験モジュール (JEM) 通称「きぼう」を 2004 年から 2005 年にかけて打ち上げる予定 (2000 年 8 月時点) であり、今後は ISS を無重力・超真空環境の実験室、天体・地球観測室として積極的に利用する時代が到来すると考えられる。ISS の目的の一つは、得られた成果をさらなる産業の発展、日常生活の向上、地球環境問題の解決等に役立て、地上に住む我々人類に平和で豊かな暮らしを実現することである。このように宇宙へ行くことは人類にとって非常に有意義で重要な活動であり、欧米露以外で有人・物資宇宙輸送システムをアジア地域に構築することは日本が担うことができる重要な役割のひとつである。尚、宇宙開発事業団 (NASDA) は、再利用型の宇宙往還技術試験機 HOPE-X の着陸場をキリバス共和国の Christmas 島 (北緯 1.9 度) に整備する予定であり (日本航空宇宙学会誌編集委員会, 2002)、H-2A ロケットをベースにした無人の再利用型宇宙輸送システムの構築を進めている。このほかにも、通常の航空機のような翼を持ち、水平離着陸を行って宇宙まで航行できる極超音速ジェット機「スペースプレーン」をはじめ、様々な形態の将来型宇宙輸送システムの研究開発がアメリカ航空宇宙局 (NASA) や我が国の航空宇宙技術研究所 (NAL) 等で行われている (野村, 2001)。

### 宇宙観光旅行事業

史上初の宇宙観光飛行は、2001 年 4 月 28 日、米露共同出資の Mir Corp 社によって実現され、ロシアの宇宙船ソユーズに乗り込んだアメリカ人実業家 Dennis Tito 氏が体験した。同氏は、訪問先の ISS において、地上との交信や記者会見を行った他、自身が持ち込んだ CD による音楽鑑賞などを楽しんだ。その 1 年後の 2002 年には、南アフリカの実業家 Mark Shuttleworth 氏が 2 番目の宇宙旅行者となり、8 日間の飛行中 ISS においてアルツハイマー病の研究等の遺伝子工学実験に参加した。両氏の飛行費用はロシアの「星の町」での訓練を含めて推計約二千万ドルである。また、次の候補者である米人気音楽グループ「\*NSYNC」の Lance Bass 氏も同様のサービスを Mir Corp 社より受ける予定であり、現在の宇宙観光事業は、長期宇宙滞在の豊富な実績と安い有人宇宙輸送手段を有するロシアを中心に進められている (久保田・江口, 2002)。しかし、その費用は高く、仮にスペースシャトルのパイロッドベ이를改造して 50 人分の座席を造っても、1 人 840 万ドルになる (Scientific American, 2000)。外部燃料タンクのみを捨てて固体ロケットブースターとオービターを再利用するシャトルのシステムは、それまでの完全使い捨て型ロケットよりコストを下げた定期的な宇宙輸送を行うため、ポストアポロ計画の一つとして 1970 年代に開発されたが、実際には再打ち上げまでの点検整備に手間がかかり、その分 1 機あたりの飛行回数が減って地上での固定費の負担が増えたため、1 回のフライト費用は当初 30 億円の予定であったが現在は 500 億円といわれる (久保田・江口, 2002)。

ロケット工学研究者でもあり、NASA のコンサルタントとして宇宙開発に関ってきた G. H. Stine (1997) は、軍事的優位が重視された冷戦時代には、膨大な費用がかかっても宇宙飛行を早期に実現可能な大陸間弾道ミサイルを改造した使い捨て型の多段式ロケットが輸送手段に選ばれたことを指摘し、航空機や列車、バスと同様に、商業的な宇宙輸送には低コストで繰り返し使用できるシステムが不可欠であると述べている。その指摘に沿うように、1996 年にアメリカで設立された X Prize 財団は、低予算で運用可能な再使用型宇宙往還システムの開発を促進するため、有人飛行を初成功させた民間企業に対して 1 千万ドルの賞金を出すことを計画している。その開発レースには、いくつかのベンチャー企業が名乗りをあげていることから、宇宙観光旅行は 10 ～ 20 年後には本格的なビジネスとして実現する可能性が高い。宇宙観光経済学に精通する Patrick Q. Collins 麻布大学教授の調査によれば、100 万円台の費用では年間 100 万人が宇宙へ出かけ、約 1 兆 3 千億円規模の産業が生まれると予測されている(久保田・江口, 2002)。アメリカの旅行代理店ゼグラム・エクスペディションズ社が 1998 年に発表した宇宙旅行企画では、乗客は 9 万 8 千ドルの費用を支払って 2 日間の講義と 3 日間の宇宙飛行訓練を受けた後、高度約 100km に達する弾道飛行で約 2 分間の無重量環境を体験することになっていた (NASDA ホームページの海外宇宙情報より)。一方、日本ロケット協会が目指す宇宙観光旅行は、垂直離着陸型の観光用宇宙船「観光丸」が高度 200km、傾斜角 45 度以下の円軌道で、3 時間に地球を 2 周するものである (日本ロケット協会, 1997; 宇宙と天文編集部, 1999)。価格 716 億円の宇宙船 48 機で定員 50 名のフライトを年 300 回行くと、旅行費用は上述の宇宙観光産業成立の条件に近い一人あたり約 230 万円となる。米航空会社 US Airways は、延べ搭乗距離に応じて利用客に宇宙旅行等のサービスを提供する計画を発表した。計画には、1,000 万マイルに達した場合に、スペースアドベンチャーズ社が 2004 年以降に実施する予定の宇宙旅行の無料提供が含まれる (読売新聞ホームページ Yomiuri On-Line, 2002 年 3 月 12 日)。

近年は日本においても、アメリカやロシアと同様、宇宙観光旅行ビジネスの検討や宇宙船の技術研究開発が積極的に行われている。財団法人日本航空協会は、前出の観光丸の構想をもとに、地球周回軌道から日本列島を見下ろす宇宙観光旅行の実現をめざして、航空宇宙輸送研究会を 2001 年 8 月に発足させた。研究会では、宇宙船の運航管制や整備、事故に対する補償問題、運航の基本となる「宇宙航行法」等、運航技術や法律が検討されている。年 4 回開催される会合には、近畿日本ツーリストの宇宙旅行クラブがオブザーバーとして参加している。また、2001 年末には、月観光旅行を 2015 年までに実現しようという「ルナ・クルーズ・プロジェクト」が発足した。これには、前出の Collins 教授、航空宇宙輸送研究会に参加するエンジニア、デザイナーの松井龍哉氏らが参加し、3 日間の月面ホテル滞在を含む 1 週間の月往復旅行が、ホテルのデザインから資金調達までを含めて計画されている。低価格の有人宇宙飛行のための完全再使用型ロケットを研究する、宇宙科学研究所 (ISAS) の稲谷芳文教授らは、2001 年に 9m の垂直上昇と軟着陸の実験に成功し、高度 100km までの弾道飛行を今後 5 年以内、10 年以内には有人飛行を実施したいとしている。一方、NASDA の先端ミッション研究センターは、使い捨てカプセル型の 4 人乗り宇宙船「ふじ」の開発を進めている。ふじは、

打ち上げ費用の引き下げのために H-2A ロケットに他のペイロードと相乗りし、2008 年に高度 500km の地球周回軌道を約 1 日飛行する予定である。さらに 2012 年には、居住用の拡張モジュールと太陽電池を備える推進モジュールを組み合わせ、宇宙に 1 ヶ月間滞在することも計画されている（久保田・江口, 2002）。

現在、宇宙空間への輸送システムの打ち上げ形態・着陸形態として通常のロケットのように垂直方向に行うタイプと航空機のように水平方向に離着陸を行うタイプが考えられる（野村, 2002; Stine, 1996）が、水平方向の離着陸であれば通常の航空機と同様の滑走路を利用できる一方、垂直方向の離着陸であれば離着陸設備の面積は少なくて済む。いずれのタイプに対しても、宇宙港の建設は現在の技術水準で十分可能であると考えられる。世界に先駆けて宇宙旅行の拠点を築くことは我が国における次世代の産業の創造と沖縄地域における経済発展にとって非常に重要である。また、通常の空港施設と宇宙飛行施設を兼ね備えれば、空路による周辺地域からの旅客をスムーズに宇宙へ運ぶことが出来る。

### 商用人工衛星の打ち上げビジネス

イリジウムやグローバルスターを始めとするさまざまな低軌道人工衛星によるグローバルな移動体情報通信システムが計画されているように、商業的な衛星の打ち上げは今後いっそう盛んになると考えられる。国が開発した従来型ロケットによる高度数百 km の低軌道へのペイロード打ち上げは 1kg あたり約 2 万ドルの費用を必要とする。このように高いコストをジェット航空機並に下げようと、現在アメリカでは、NASA を退いたエンジニアらが中心となって多くのハイテクベンチャー企業を設立し、既存技術を基礎に新しいアイデアを取り入れて繰り返し飛行できる新型ロケットを開発しており、低軌道へのペイロードの低コスト打ち上げによって宇宙ビジネスで優位に立とうとしのぎを削っている（Scientific American, 2000）。このようなロケット・人工衛星打ち上げ市場に日本が参入する上で重要な打ち上げコストの削減には、ロケットの打ち上げ地点（射点）を一定数以上確保することが不可欠であるが、現在のところ実用衛星の打ち上げは種子島でのみ行われている。より南に位置する沖縄地域は次世代の衛星打ち上げ拠点として最良の候補であり、人工衛星の打上げコストは、上述の宇宙観光飛行の発展がもたらす技術革新や打上げ設備の増設によってさらに下がると期待される。

日本のロケット開発はこれまで NASDA や ISAS による政府主導で進められてきたが、経済産業省は 2002 年度から民間企業によるロケット開発の支援に乗り出す（読売新聞ホームページ Yomiuri On-Line, 2001 年 12 月 3 日）。全世界の宇宙産業市場は、ロケットや衛星の製造、衛星からのデータ利用サービスを含めて 2010 年には 40 兆円規模になるとの予想もあるが、日本は民間企業による宇宙産業の取り組みが欧米に比べて遅れているため、同省は官民共同のロケット開発によって競争力のある宇宙産業を育てたいとしている。支援先は、石川島播磨重工業や三菱商事など国内 7 社が 2001 年 3 月に共同設立したギャラクシーエクスプレスである。NASDA が静止軌道衛星等を打ち上げる大型ロケット H-2A を開発したのに対し、ギャラクシー社は高度 200km の低軌道に 3 トン程度の衛星を打ち上げる小型の GX ロケットを開発する。海外企業との国際競争に勝つ上で重要な打ち上げ費用の切り下げは、ほぼ赤道にある Christmas 島（キリバス共和国）からの打ち上げによって実現する。同社は、2006 年の種子

島における1号機打ち上げ後、海外拠点での打ち上げに乗り出す初の日本法人になる。このように、日本の宇宙開発も既に、民間企業が積極的に参入する本格的なビジネス時代に突入している。

### 日本の航空宇宙産業基地計画

現在、日本では、以下の4地域が地理的特徴と既存の研究施設や生産設備を活かした航空宇宙産業拠点計画を提案している。各計画の推進団体は、調査研究・普及啓蒙等の活動のほか、4地域航空宇宙関係団体連絡会で文部科学省、財務省、経済産業省など関連省庁の代表者を交えた情報交換を協調して行っている。日本列島が南北に長く分布することを考えれば、これらの地域の連携は緊急の着陸や救援地点を確保する上で必要である。

### 北海道航空宇宙産業基地構想

組織としては、北海道航空宇宙産業基地研究会を中心に、大樹町の十勝圏航空宇宙産業基地構想研究会、室蘭市の室蘭航空宇宙産業を考える会、苫小牧東部圏航空宇宙産業基地研究会等が結成されている。関連施設としては、上砂川町の地下無重力実験センター（JAMIC）や大樹町多目的航空公園等がある。炭鉱跡を利用したJAMICの落下塔は、500m自由落下するカプセル内で10万分の1の重力を約10秒間実現することが可能で、新素材・エレクトロニクス材料・バイオテクノロジー等の研究開発の基礎実験や宇宙開発の予備実験のための微小重力環境を内外の研究者に提供している（賞雅ら，1997；Sakaguchi et al, 1997）。多目的航空公園では、NALがドルニエ実験用航空機による宇宙往還機の航法誘導制御技術等に関する飛行実験を行っている他、ミレニアムプロジェクトの1つである成層圏プラットフォーム（通信・放送、地球観測のため成層圏に滞空させる無人飛行船）（Onda, 1999）の研究開発に関するテストも2001年から始まった。

### 岩手宇宙航空産業基地構想

本構想は、岩手ネットワークシステム宇宙航空研究会、岩手県宇宙航空開発推進協議会等が中心となって検討されており、太平洋に臨む北上山系のなだらかな平原にスペースプレーンの離着陸場を中核として主要滑走路や関連施設を集積し、その過程で各種産業を誘致することを計画している（アバンアソシエイツ，1991）。岩手県周辺の関連施設には、NALの角田宇宙推進技術研究所、NASDAの角田ロケット開発センター、ISASの能代ロケット実験場、三菱重工株式会社の田代試験場、県内には、ISASの三陸大気球観測所、気象庁の気象ロケット観測所、国立天文台の地球回転研究系水沢観測センターがある。

### 中部エアロスペース・テクノロジー・パーク構想

社団法人中部宇宙産業科学技術振興センターおよび中部航空産業技術振興協議会が中心となって実現に向けた調査研究や企画提言を行い、中部地域に三菱重工や川崎重工を始めとした企業が集積している利点を活かして航空宇宙産業に関する研究から生産までを行う世界的な一大拠点の形成を目指す。総合的な研究所を中心に、実験、製作、教育、人的交流を通じ

た航空宇宙産業の技術開発を行い、周辺の関連企業や都市、レジャーエリアを含む地域と産業の活性化が図られている。

#### 仮想・九州地球観測情報センター

九州航空宇宙開発推進協議会が中心となって、九州地域の特性を活かした航空宇宙産業の振興を図るプロジェクトの調査を実施し、九州地球観測情報センター、宇宙往還機用飛行場および支援センター、宇宙物質研究所、青少年宇宙研修センター、九州スペーステクノロジーセンター、国際航空宇宙研究研修機構の6プロジェクトの必要性と機能等について検討を行った。この中で、九州地球観測情報センターはリモートセンシング技術を活用し、衛星データや地球観測情報を広くかつ迅速に提供する中核期間の役割を果たすもので、その基本設計実現化策の検討を進めるため、1999年1月に仮想・九州地球観測情報センターが開設された。九州の代表的な宇宙施設である、NASDAの種子島宇宙センター、ISASの鹿児島宇宙空間観測所ではそれぞれ、現在実用衛星用の液体燃料ロケットH-2A、科学衛星用のMシリーズ固体燃料ロケットが打ち上げられている。

#### 沖縄県経済の現状

日本国内に配備される米軍施設の多くは沖縄県に集中しており、冷戦終結に伴う米軍施設の規模縮小による土地返還は不十分であるといえる。軍施設は周辺地域に対してある程度の経済効果をもたらすが、防衛・治安維持を目的としており経済活動を積極的に行っているわけではないため、本来大きな経済発展を望むことは不可能であり、長期的に見れば軍事基地の存続は周辺地域の経済発展の障害になり得ると考えられる。また、基地収入に依存する経済は、ベトナム戦争のような有事の際には好況になるが、平時に戻ると基地の減収に伴って収縮するため、本質的に不安定である。さらに沖縄県では物的生産部門産業が弱いために、基地収入が増えても物資の輸入の増加で金が本土に流出するということもあり、基地経済は「ザル経済」とも呼ばれていた（新崎ら、1998）。

近年の県内経済は、日本経済と同様に不況下に置かれており、特に2001年7月-9月期の県内失業率はアメリカのテロ事件の影響による観光旅行のキャンセル等もあって9.4%と過去最悪の数字を記録した。沖縄県での平成13年平均の完全失業率8.4%は、全国平均値5.0%を大きく上回っており（総務省統計局・統計センター発表）、特に15～29歳の若年層における数値15.7%は全国平均の約2倍にも上る（毎日新聞、2002年5月8日朝刊、東京本社版12-13面）。このような非常に苦しい雇用環境を改善し、沖縄県の安定した持続的・自立的経済発展を促進するためには、米軍基地用地の返還は勿論であるが、その後で新たな産業を誘致し育成することも重要である。

#### 沖縄地域における宇宙港建設の利点

沖縄地域が宇宙港の建設に適する主な理由としては、以下のようなものが挙げられる。

### 低コストのロケット・宇宙船打ち上げサービス

沖縄県は北緯約 26 度に位置し、日本国内では最も赤道に近い（北海道大樹町は約 42.5°、岩手県南端は約 39°）。そのため、沖縄では地球の遠心力が北の地域より大きく、周回軌道への打ち上げに必要な加速度も多く得られるので、同じ打ち上げ能力を持つロケットであればより多くのペイロードを宇宙空間に輸送することが可能であり、同じ重さのペイロードをより少ない燃料で宇宙へ運ぶことができる。スペースシャトルの打上拠点である、NASA のケネディ宇宙センター（フロリダ州ケープカナベラル）も沖縄県（本島では北緯約 26°）に近い緯度（約 28.67°）に位置し、この有利性は打上施設を建設する上での第 1 条件である。1960 年代当時の科学技術庁・宇宙開発推進本部も、上記の理由から衛星打ち上げ用ロケットの発射地点を国内でより南に設置する種子島（北緯約 30.5°、現・種子島宇宙センター）に選定している。この時、沖縄は、小笠原諸島とともに米軍占領下にあったため現実的な選択肢にはならなかったが（松浦，1997）、本土に復帰して 30 年が経過する現在では宇宙港建設の有力な候補である。海外においては、同様の理由から、Tonga の Eua 島（南緯約 21 度）に民間の宇宙港を建設する計画があり、米企業 InterOrbital Systems はそこから宇宙観光の宇宙船を打ち上げる予定である（宇宙開発情報ホームページ，2002 年 1 月 18 日）。また、Boeing の商業宇宙部門、RSC エネルギア（ロシア）、クバルナ・マリタイム（ノルウェー）3 社も、Hawaii 南方の太平洋赤道域でロケットを打ち上げるために、排水量 34,000 トンの海上石油掘削基地を改造した海上打ち上げ施設を共同運営している（Scientific American, 2000）。次章では、宇宙輸送コストに関する沖縄地域の優位性を、ロケットの運動方程式に基づく簡便な計算を通して説明する。

### 宇宙港建設の低コスト化

米軍基地内の既存施設（道路・滑走路・港湾施設・通信施設・補給施設など）を活用することによって建設費用を抑え、建設期間の短縮が容易である。現在、我が国の財政事情は非常に厳しく、今後は公共事業費の大幅な削減が予想される中で、現在あるものを有効に利用し、新規の土木建設開発を必要最小限に抑えられる本構想は十分実現が可能であり、他の宇宙産業基地誘致計画に劣らないものと考えられる。

### 宇宙輸送システムにおける高いターンアラウンド性の実現

ターンアラウンド性とは、宇宙船の打ち上げから、地球への帰還を経て再び打ち上げるまでの利便性を表す言葉である（日本ロケット協会，1997）。沖縄米軍基地の広大な敷地内に、上記の既存施設に加えて新たな製造・組立整備施設など様々な機能施設を集中配置することは、打上（離陸）・管制・着陸・補給・補修点検・再打上の一連の作業を短期間に連続して行うことを可能にし、運用コストの低減につながる。

### 沖縄地域の気象・地理的環境

温暖な沖縄地域では、積雪がないため、冬季においてもロケットおよび宇宙往還機を打ち上

げ、回収することが容易である。ただし、実際の宇宙港の運営には、周辺海域の漁場や地域住民に対して騒音被害ならびに水質汚染等の悪影響を与えないような十分な配慮が必要であり、年間を通した宇宙船の打上が可能であるとは限らない。

また、沖縄県は海に囲まれているので、万一の事故に対して被害を最小限に食い止めることができる。十分な安全性の確保は、事業と地域社会の共存のためには不可欠な要素である。宇宙関連施設としては、恩納村に NASDA の沖縄宇宙通信所が、近隣には種子島宇宙センターや ISAS の内之浦宇宙空間観測所がある。沖縄における宇宙港の運営や宇宙関連企業の経営では、これらを宇宙船の研究開発や飛行の追跡管制で利用することが考えられる。

#### 宇宙港の建設、産業誘致におけるアメリカ・中国の協力

アメリカは沖縄を「キーストーン・オブ・ザ・パシフィック」（太平洋の要石）と軍事戦略的に位置付け（新崎ら，1998）、合わせて約2万5千人の軍人・軍属を駐留させているが、それと同時に宇宙開発先進国でもあり、NASA を中心に60年代からアポロ、ボイジャー等の無人・有人宇宙飛行計画を推進し（中富，1984）、現在は日本、カナダ、欧州各国、ロシアとともに国際宇宙ステーションの建設を行っている（中富，1985；堀川，2001）。このように長年にわたって宇宙開発の先頭を走ってきたアメリカには、Lockheed Martin、Boeing のような大型メーカー、Space Adventures 社のような宇宙旅行会社や各種の航空宇宙関連の民間ベンチャー企業がある。軍事と航空宇宙産業の大国の両面を持つアメリカに対して、沖縄米軍基地の削減が、数多くの航空宇宙関連企業の誘致を可能とし、アジアに宇宙観光産業を生み出し、ひいては世界規模の新しい市場の創造と経済発展を実現することを明確に示せば、基地用地の返還もしくは軍民共用の合意と企業誘致の協力が得られることも予想される。在沖米軍基地全体を一括して返還することは困難かもしれないが、軍事的側面と経済的側面から日米の国益を合理的に考えれば、両政府が宇宙港建設のための基地の部分返還と跡地利用を合意する可能性は高い。

一方、中華人民共和国や台湾は、沖縄と歴史的に深いつながりを有し、現在も経済・文化の交流を行っていることから、宇宙関連企業の誘致協力が期待できる。前者は、ロケット「長征」による低予算での人工衛星の打ち上げに実績を持ち（宇宙と天文編集部，1999）、2005年までに有人宇宙飛行を実現しようとしている。2002年3月に酒泉衛星発射センター（甘粛省）から打ち上げられた国産の宇宙船「神舟3号」は、有人飛行に向けた3回目の無人試験で地球を7日間に108周し、その後中国内モンゴル自治区へ帰還した。将来、宇宙観光事業へ進出すれば、中国は、アメリカと並んで宇宙産業の誘致と育成のための有力なパートナーとなり得る。

尚、嘉手納基地は、NASA のスペースシャトルの緊急着陸地に指定されており、同基地ではシャトルが打ち上げられると航空宇宙救難回収中隊の HC130 救難機や HH3 救難ヘリなどで特別救難チームが編成され待機体制を取る（新崎ら，1998）。このことから、沖縄は宇宙開発に対する実績とポテンシャルを有していると言える。

## 経済活動のキーストーンとしての地理的位置

沖縄県は東アジア・東南アジア諸国に近く、同地域におけるハブ空港地点として最適であり、軍事戦略のキーストーン的存在であると同時に経済活動の要石にもなり得る。実際、琉球王朝時代には、沖縄地域は周辺各国との中継貿易によって栄えていた。人々や物資を各地域から集めて宇宙へ送り出し、再び宇宙から各地域へ送り届けるという、宇宙と通常空域のポータルサイトの実現を目指す上で、宇宙輸送システム機能を兼ね備えた空港建設地として、沖縄は日本の中で最も理想的な位置にあるといえる。また、沖縄県への大型物資の搬入では、那覇港湾施設を利用することが考えられ、ロケットや宇宙往還機の資材や部品の輸送も容易である。

## 既存観光産業との融合

亜熱帯性気候にある沖縄は、美しい海という天然の観光資源と他の日本国内にはない独特の琉球文化を持ち、マリンスポーツや文化イベント事業を中心とする観光産業立県であり、平成12年には450万人以上の人々が国内外から訪れている（新崎ら，1998）。このような既存の観光関連産業を新規の宇宙観光ビジネスと結びつければ、より多様な観光プランを提供することによって航空宇宙産業の振興と沖縄の地域経済の活性化を同時に実現することができる。

## 沖縄県特有の経済制度の有効活用

現在、沖縄県では、沖縄振興開発特別措置法に基づき、中城湾特別自由貿易地域において、国税・関税・地方税等に関する優遇措置、若年者雇用を促進するための助成金制度、無利子のふるさと融資制度、および工場立地の際の調査費や環境整備事業費に対する県の助成制度等が実施されている。沖縄県にのみ適用されるこれら優遇・助成制度は、ロケットや有人宇宙船、発射システム等の精密部品の製造・組立、改修整備工場の誘致を促し、新規に進出した企業でも早期の黒字経営を達成できると考えられる。

毎日新聞は、2002年3月31日付の論説「西論風発」（大阪本社版，朝刊第2面）で、オートバイエンジンの製造企業が上記の制度を活用して日本の高コストを克服しようと特別自由貿易地域へ進出した事例を報告している。この記事は、宇宙開発とは直接関係しないものの、宇宙機器の製造企業もまた、沖縄県への工場設置によって一般地域より40%低い実効税率等をもって、海外進出なしに日本国内で高い収益率を実現する可能性を示唆している。

## マルチメディアアイランド構想との融合

現在、沖縄県は情報通信産業を中核として地域経済の振興を図る沖縄県マルチメディアアイランド構想を推進しており、コールセンターが同県に設置されている他、2001年11月27日には県IT関連東京共同事務所が開設された（沖縄タイムス，11月28日水，朝刊・総合2面）。この施策は、将来、人工衛星による情報通信サービスを沖縄で展開する場合に有効利用することも考えられ、OASIS構想は宇宙観光以外にもIT関連の新たな事業を生む可能性を持っている。

沖縄でのロケットの打ち上げに関する検討

本章では、ロケットや宇宙船の打ち上げコストの面から、沖縄県が日本国内における宇宙港の建設地点として最適な候補であることを、基本的な数式を用いた計算によって示す。ここでは、最新鋭の純国産ロケット H-2A の打ち上げを仮定し、比較対照するための高緯度地点として北海道を選んだ。

ロケットの運動は、Newton の運動の第 2 法則に従い、次のような時刻  $t$  に関する微分方程式で表される (中川, 1990)。

$$(1) \quad m(t) \frac{dV(t)}{dt} = T$$

ここで、

$m(t) = m_0 - bt$  : 発射後の経過時間  $t$  におけるロケットの質量

$m_0$  : 打ち上げ前のロケットの全質量

$b$  : 推進剤の燃焼速度 (単位時間当たりの排出ガスの質量)

$V(t)$  : ロケットの速度

$T$  : ロケットの静推力

である。ただし本計算では、典型的な一例を示すため、空気抵抗と重力の影響は無視される。

式 (1) を  $V(0) = 0$  の条件下で解くと、速度  $V(t)$  は、

$$(2) \quad V(t) = -\frac{T}{b} \ln \left( 1 - \frac{b}{m_0} t \right)$$

となる。その結果、推進剤の消費量  $M(t)$  は、次式で記述される。

$$(3) \quad M(t) = bt = m_0 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{b}{T} V(t) \right) \right]$$

H-2A ロケットの場合、式 (3) 中の各定数は以下の値を取る。

$$m_0 = 2.854 \times 10^5 \text{ [ kg ]}, \quad T = 5.594 \times 10^6 \text{ [ N ]}, \quad b = 1.556 \times 10^3 \text{ [ kg/s ]}$$

ここで、静推力  $T$  の内訳としては、1 段目エンジンの LE-7A が  $1.074 \times 10^6$  [ N ]、固体ロケットブースター (SRB) が 2 本分で  $4.520 \times 10^6$  [ N ] であり、燃焼速度  $b$  は、LE-7A が推進剤 100 t を 390 秒で、SRB が推進剤 130 t を 100 秒でそれぞれ燃焼することから、各燃焼速度  $256.4$  [ kg/s ] および  $1.3 \times 10^3$  [ kg/s ] の和とした。

地球の自転による地表速度  $V_e$  は、地球半径  $R$ 、緯度  $\theta$ 、および自転の角速度  $\omega$  から、

$$V_e = \omega R \cos\theta \quad (4)$$

と表され、北海道と沖縄では以下ようになる。

$$V_e \doteq 3.43 \times 10^2 \text{ [m/s]} \quad \text{北海道 (北緯 } \theta = 42.5^\circ \text{)}$$

$$V_e \doteq 4.18 \times 10^2 \text{ [m/s]} \quad \text{沖縄 ( } \theta = 26.25^\circ \text{)}$$

ここで、 $R=6.378 \times 10^6$ [m]、 $\omega = 2 \pi \div 60 \div 60 \div 24=7.3 \times 10^{-5}$ [rad/s] とした ( $\pi \doteq 3.14159$ )。

速度  $V_e$  がより速ければ、人工衛星を地球周回軌道上へ打ち上げるのに必要な推進剤はよ

り少なくて済み、燃焼時間もより短くなる。よって、沖縄での打ち上げは、北海道の場合よりも速度差、

$$\therefore \Delta V = 0.75 \times 10^2 \text{ [m/s]} \quad (5)$$

の分だけロケットを加速するための推進剤を節約することができる。この差は、時速に換算すると 270km になり、ほぼ新幹線の速度に匹敵する。

式 (3) の  $V$  に  $\Delta V$  の値 (5) を代入すると、節約される推進剤の質量  $\Delta M$  と燃焼時間  $\Delta t$  は、

$$\therefore \Delta M = 5.892 \times 10^3 \text{ [kg]} \quad , \quad \therefore \Delta t = 3.787 \text{ [s]}$$

となる。もしくは、式 (3) の微分式、

$$\Delta M(t) = \frac{m_0 b}{T} \text{Exp}\left(-\frac{b}{T} V(t)\right) \Delta V \quad (6)$$

に、速度  $V(0) = 0$ 、式 (5) および各定数値を代入すれば、

$$\therefore \Delta M = 5.954 \times 10^3 \text{ [kg]} \quad , \quad \therefore \Delta t = 3.826 \text{ [s]}$$

が得られる。

このように、沖縄では、北海道よりも約 6,000kg (6ton、標準型 H-2A の諸元データより、第 1 段・SRB 推進剤の合計質量 230ton の 2.6% に相当) 少ない推進剤を約 3.8 秒短く燃焼させて H-2A を打ち上げることが可能であり、その分コストを下げるができる。また、その節約された推進剤の重量を衛星や宇宙船の装置に割り当てることによって、より大きな多機能で高性能のペイロードを輸送することも可能になる。以上の計算は仮想的で簡単なものだが、沖縄の宇宙港は、宇宙環境の商業利用に関する顧客のニーズに対して、他の国内地域よりも低いコストで打ち上げサービスを提供できることを示唆している。

まとめ

本論文では、沖縄県に宇宙港を建設する構想、OASIS Plan を提案し、日本及び海外にお

ける宇宙開発の動向や建設の利点を述べた後、Newton の運動方程式を用いてロケットの推進剤消費量の計算を通して本提案の妥当性を示した。OASIS Plan は、沖縄の持つ地理的利点と米軍基地の存在に注目し、それらを将来の宇宙観光旅行事業に有効利用することによって、沖縄の経済発展と日本の航空宇宙産業の振興を同時に実現することを目指している。筆者は、基地用地の返還が、返還後に一層の経済発展を実現できる利用計画を周辺地域社会から積極的に提案して初めて促進されるものと考えている。現実的に困難と考えられる全面的な用地の一括返還ではなく、部分的な返還もしくは軍民共用によっても宇宙港の建設は十分可能であり、むしろそのほうが軍事戦略的側面からも基地施設の雇用者や借地料を受けている軍用地地主の観点からも急激な反発を引き起こすこともなく、返還された跡地に誘致された航空宇宙産業がもたらす経済的メリットを証明することにより、日本とアメリカの両国から用地返還について多くの賛同を得ることが出来ると考えられる。その結果、より一層の用地返還と宇宙関連事業の拡大が図れるとともに、沖縄と我が国は周辺アジア地域の経済発展と安定した平和に貢献できる。今後は、沖縄在住の人々と意見を交換するとともに、様々な分野の人たちと協力して詳細な調査研究を行い、本構想の実現可能性についてより定量的に検証していきたいと考えている。

尚、以上で述べられた OASIS Plan の概要は、Web サイト <http://mi-1.mech.kobe-u.ac.jp/ob/takada/oasis.htm> で公開されている。また、本文の執筆にあたって用いられた沖縄と宇宙開発に関する情報は、本文の最後に記されている引用文献以外に、以下のウェブサイトに掲載されている資料からも収集された。

社団法人 中部宇宙産業科学技術振興センター ホームページ

<http://www.tcp-net.ad.jp/c-stec/index.htm>

H-2A ロケット解説シート (宇宙開発事業団ホームページ)

[http://www.nasda.go.jp/h2a/sheet/j/h2a\\_08j.pdf](http://www.nasda.go.jp/h2a/sheet/j/h2a_08j.pdf) (Adobe Acrobat PDF 形式ファイル)

北海道航空宇宙産業基地研究会議ホームページ

<http://www.dokeiren.gr.jp/uchu/>

航空宇宙産業基地構想関連資料 (北海道大樹町公式ホームページ内)

[http://www.hokkai.or.jp/taiki/5\\_12/sec/020kikaku/kikaku\\_chosei/space/kichikoso.htm](http://www.hokkai.or.jp/taiki/5_12/sec/020kikaku/kikaku_chosei/space/kichikoso.htm)

宇宙科学研究所 (ISAS) ホームページ

<http://www.isas.ac.jp/>

九州航空宇宙開発推進協議会ホームページ

<http://www.kyukoukyo.jp/>

ルナ・クルーズ・プロジェクト

<http://www.lunarcruise.org/>

宇宙開発事業団 (NASDA) ホームページ

<http://www.nasda.go.jp/>

航空宇宙技術研究所 (NAL) ホームページ

<http://www.nal.go.jp/>

沖縄県ホームページ

<http://www.pref.okinawa.jp/>

労働力調査 調査結果, 総務省 統計局・統計センター

<http://www.stat.go.jp/data/roudou/2.htm>

宇宙開発情報

<http://www.spaceref.co.jp/index.html>

X Prize 財団ホームページ

<http://www.xprize.org/~xprize/home/default.htm>

## 引用文献

新崎盛暉・大城将保・高嶺朝一・長元朝浩・山門健一・仲宗根将二・金城朝夫・安里英子・宮城晴美 (1998) 「観光コースでない沖縄 第三版」(株) 高文研.

堀川康 (2001) 「国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の全貌 - 連載 第 1 回 国際宇宙ステーションの概要」『日本航空宇宙学会誌』49 (571), 192-198.

(株) アバンアソシエイツ (1991) 『岩手宇宙航空産業基地構想』.

久保田裕・江口和裕 (2002) 「日の丸ロケット 2010 年宇宙の旅」『Asahi Shimbun Weekly AERA』15 (10), 67-69.

松浦晋也 (1997) 『H- II ロケット上昇』日経 BP 社.

中川憲治 (1990) 『工科のための一般力学』森北出版株式会社, 104-106.

中富信夫 (1984) 『アメリカ宇宙開拓史』新潮社.

中富信夫 (1985) 『宇宙ステーション 1992』新潮社.

日本航空宇宙学会誌編集委員会 (2002) 「年間展望 (2001) - 航空関係・宇宙関係 -」『日本航空宇宙学会誌』50 (578), 46-58.

日本ロケット協会運輸研究委員会 (1997) 『宇宙旅行用標準機体「観光丸」開発・製造費用報告書』日本ロケット協会.

野村茂昭 (2001) 「将来型宇宙輸送システムの研究開発の方向性」『日本航空宇宙学会誌』49 (568), 89-99.

Onda, M. (1999) Design Considerations on Stratospheric LTA Platform. Proc. 13th AIAA LTA Technology Conference, AIAA99-3911, 204-209.

Sakaguchi, T., Tomiyama, A., Zun, I. & Hosokawa, S. (1997) Lateral migration of single bubbles in a laminar duct flow under normal and micro gravity conditions.

Proc. the 4th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 1009-1015.

Scientific American 編集部 (2000) 『別冊日経サイエンス 21 世紀宇宙への旅』日経サイエンス社.

白木邦明 (2001) 「国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」の全貌 - 連載

第2回「きぼう」全体システム-」『日本航空宇宙学会誌』49（572），211-225.

Stine, G. H. (1996) Halfway to Anywhere, M. Evans & Co., 飛永三器訳 (1997) 『宇宙観光がビジネスになる日』三田出版会.

高田尚樹 (2002) 「沖縄米軍基地跡地を利用した国際航空宇宙港構想に関する研究」『構想』1 (1), 34-42.

賞雅寛而・近藤宏一・川瀬誠・Rezkallah, K.・Clarke, N. (1997) 「ステレオ画像解析法による微小重力 / 通常重力下の気泡流界面測定」『日本機械学会論文集 B 編』63 (606), 396-403.

宇宙と天文編集部 (1999) 『宇宙と天文 No.2 特集・世界のロケット最前線』誠文堂新光社.

2002年5月12日 受稿  
2002年5月27日 受理

※ 本論文は2002年に日本構想学会の論文誌『構想研究』Volume 1, 1-15として掲載されました。その後、2005年7月に『構想研究』が同学会誌『構想』に統合されたことから、遡って2002年の『構想』誌に「研究論文」という位置づけて組み込まれました。