- 3 (1965) pp. 965-967.
- 46) SELLERS, J.P. Jr.: Gaseous film cooling with multiple injection stations, AIAA J. Vol. 1, No. 9 (1963) pp. 2154-2156.
- 47) ECKERT, E.R.G. and BIRKEBAK, R.C.: The effects of slot geometry on film cooling, in Heat Transfer, Thermodynamics and Education, Edited by Johnson, H.A., McGraw-Hill (1964) pp. 150-163.
- 48) HATCH, J.E. and PAPELL, S.S.: Use of a Theoretical flow model to correlate data for film cooling or heating an adiabatic wall by tangential injection of gases of different fluid properties, NASA TN D-130 (1959).
- 49) 川島増司, 佐藤 陽: タービン・エンジン(18), 航空技術 No. 177 (1969) pp. 21-28.
- 50) BIONDI, D. and DRAIZEN, S.: Development of a turbojet combustor with a segmentally constructed liner, NASA CR-54635 (1968).
- 51) PAI, B. R. and WHITELAW, J. H.: The prediction of wall temperature in the presence of film cooling, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14 (1971) pp. 409-426.
- 52) GODFREY, D. J. and PARR, N.L.: A consideration of the possible use of refractory ceramic materials for advanced combustion chamber design, Ref. 33) pp. 379-395.
- 53) JACKSON, S.R. and ODGERS, J.: Factors influencing heat release in combustion chambers and consideration of the related materials and structures, ibid. pp. 173-210.

宇宙救急の技術的側面*

Engineering Aspect of Space Rescue

長 友 信 人**

Makoto NAGATOMO

はじめに

その昔、工匠ディダラスは息子のイカルスとともに空を飛び、ミノス王の監禁をのがれたが、イカルスはあまりに太陽に近づきすぎたため、翼を溶かして墜死した。ディダラスは自らの作った翼が不完全なために息子を失ったことを深く悲しんだ。

人間が新しい領域に進出するとき、危険はつきものであって、はじめは勇気がある一人や二人が必死の思いでいってみるほかはないようである。しかし、回を重ね、より多くの人々が進出するためには住み心地のよさと安全の保証が要求されるようになる。そして、そのための研究開発が行なわれ、大がかりな対策が立てられるようになってくる。これは、現に海上の船舶や航空輸送においては努力が蓄積されていることであるが、宇宙飛行の分野においてもしだいにそのような段階に近づきつつある。

数多くの学問分野から成る航空宇宙工学の中には、飛行航行の原理や理論、ハードウェアの設計製作に関する分析的な研究分野から航空機やスペースクラフトのレベルのシステム設計製作に関するものなど、やや総合的な分野があると考えられる。さらに OR やシステム工学といったシステムのダイナミックな取扱いも含まれるようになったが、宇宙救急に関する研究は、より一層この傾向を強く出しており、より広範囲の専

門分野の知識を必要とし、研究対象としては漠然としているとすらいえる。筆者は、ふとしたことからこの研究に首をつっこみ、その厄介ではあるが重要な問題をより多くの人々に認識してもらうことが必要だと思い、全く非力ながら、ここに宇宙救急の概要を紹介することを試みた。柄にもないことをやる気になった動機は、頭記の神話がいづらか説明してくれそうに思う。

1. 宇宙救急の研究の歴史

文献を調べてみると、宇宙救急の問題に最初に関心を示したのは、航空医学の延長として宇宙において人命をあずかることになった宇宙医学者と、宇宙飛行の軌道学の立場から興味をもった数学者とであったらしい¹⁻³⁾。

有人飛行を行なうに先だって、アメリカとソ連ではおそらく大規模にその安全性と危険におちいった場合の救難方法を考えたことが想像される。詳しいことはわからないが、たとえばアメリカの公的機関が官民の数多くのスタッフを集めて行ったサーベイ“宇宙飛行における緊急事故と安全”の20をこす内容のリスト⁴⁾を見てもそのことが示されているし、これ以前に1963年アメリカ宇宙航行学会の行った“宇宙ランデブー、救出および回収に関するシンポジウム”のプロシーディングズ⁵⁾を見ても、その当時のこの問題に対する関心の高まりが想像できる。

宇宙救急はその性質上、国際的な理解と合意が成り立つことが望ましいが、この面での努力は国際宇宙航

* 昭和48年11月13日原稿受理

** 東京大学宇宙航空研究所

行学アカデミー (International Academy of Astronautics) の中の“宇宙救急研究委員会”において行われてきた。これには、わが国からは慈恵医大の佐伯耿、航空医学実験隊の横堀栄の両氏が委員会メンバーとして参加し、これまでに二つの論文発表⁶⁷⁾をもって貢献している。最近では“救急”だけでなく“安全”を広い観点から取り上げるために“宇宙救急と安全研究委員会”と改称された。

この委員会にはソ連もメンバーを出しているが、必ずしも活動が活発だったとはいえない。しかし、アポロ・ソユーズ共同飛行の実現はこれらの努力が間接的であれ、有効であったことを何よりも良く示しているといえるだろう。これは今後の宇宙活動における国際協同作業への新しい道を開くものであるが、さらにアメリカのスペース・シャトルの実現にさいして、技術的にも救急体制が計画の中心的部分となるような時代に入りつつある。日本が有人飛行の分野で大きな貢献をほとんどしなかったけれども、来るべき第2世代の宇宙飛行時代においてわれわれはチャンスを見出さうと思う。

これまでの宇宙救急の分野の文献調査には上記委員会の FLEISIG 氏らのすぐれた定期報告⁴⁾があって、以下の紹介においてもしばしば利用させてもらっている。

2. 生命の安全基準—宇宙医学からの指針

救急における“危険”や“安全”はもともと宇宙医学的判断にもとづいて下されるべきものであって、宇宙医学の研究が救急に果たすべき役割はきわめて大きく、初期の宇宙飛行以来、医学者がこの分野で指導的立場にあったのは当然といえよう。

エンジニアは生命に関してはどのくらいの中で安全と考えるかという問題にまず直面する。一般的にいえば、これは、いろいろな環境における人間の生活に関することである。今日、宇宙医学は相当完全にこれに答えるだけの知識を有しているようである^{12), 18)}。ここでは宇宙医学に関連した技術的問題としてとくに重要と思われる2つの点についてまず述べておきたい。

気圧 高空医学の分野として研究の歴史は大変長く、ガスの組成の影響なども調べられている。これらは、宇宙船の計画段階で不可欠の知識である。宇宙救急の立場からは圧力の減少や緊急加圧などが問題とされるが、これらは文献に概述されている¹⁹⁾。この中で time of useful consciousness という用語があるが、エンジニアリングな立場から有効な基準である。これは、減圧後、自ら避難するなどの具体的な行動をとる意識がなくなるまでの時間であって、10~15秒といっ

た程度である。

重力 この問題は短期間の無重力状態ではあまり問題とされなかったものであるが、数か月にわたる飛行においてどのような効果がでるかはスカイラブの結果をまたないと未だ予測できないとされている。この問題の結着によってはスペース・ステーションの計画およびこれに関連して宇宙救急の方法にも新しい技術的指針が与えられることとなる。

技術的には以上のような点に最大の関心があるが、実際に行われている飛行について医学的な観点からはもっと広範な因子を考慮して乗組員全体としての生命の安全を検討する必要がある。S. H. DOLE はこれを次のようにまとめている⁹⁾。

i) 代謝停止

- a. 酸素欠乏   b. 脱水作用   c. 飢え

ii) 過大生理学的ストレス

- a. タンブリング (回転運動)
b. ストレス (高熱, 寒冷)

iii) 傷害, 中毒

- a. 化学的   b. 放射線   c. 物理的

i) の代謝停止は要するに空気がなくなったり、水や食料がなくなったときのことである。ii) では、直線加速度やばげしい振動をうけることは宇宙飛行においては考えにくいので、二つだけをあげている。3番目の化学的中毒にはさきに述べた毒性のある気体の発生のほか、炭酸ガス吸着装置の故障による炭酸ガス中毒が含まれる。

これらの危険が作用をはじめてからどのくらいの間生きのびられるか (survivability) という問題は、救急作業の開始あるいは脱出、救出の過程を実行するために必要な時間と関係しているので、実際の救急システムの計画に非常に重要である。しかし、各々の危険の度合によってこの時間は異なってくる。もし、一般的にあらわそうとしたら、その時間の確率として示されだろう。この関数の一つの表わし方が

$$F = \exp(-At^\alpha)$$

である。これは、 t 以上の生存時間をもつ確率が F であるということを意味する。ところが問題は、この A と α の値を個々の危険性について経験的に知ることが必要である点で、事故例の多いものならともかく、宇宙救急という新しい分野ではかなりあらっぽい推定をしなければならなくなる。 $F=0.50$ と 0.05 とで t を推定して以上の因子について計算したものは第1図⁹⁾である。右下は全体としての生存関数の傾向のみを示している。

このような表現は技術者の好みそうなモデルであって医学者はまた別の意見を持っているかも知れない。

第1図 宇宙飛行事故における生存曲線⁹⁾

3. 救急の対象となる想定事故

救急が必要となるような事故は何か、それは、

- i) 機器の故障に起因するもの
- ii) 個人のミスに起因するもの (病気を含む)
- iii) 外部環境に起因するもの

に、分類できる。したがって、これを防ぐためには、完全な機器を用いること、ミスをしない健康人を起用すること、外部環境から安全に守られることが必要だと指摘できる。しかし、われわれエンジニアは、もっと描けるようにこれらのことを把握し、予防対策をたてることはもちろん、事故が起ってしまったときのことと考え、とりうる対策を図面に書き表わすことができればならない。そこでまず、事故対策を立てるさいに、いかなる事故を予想すべきかを順を追ってあげてみよう。

2.1 打ち上げ段階 打ち上げ発射台上にあるロケットに乗員が乗りこみ、ロケットが加速をして軌道に人間を送りこむまでの過程がこれに相当する。ここでは、ロケットに生じたトラブルによる飛行中止 (mission abort) が考えるべき事態となる。

発生しうる事故を大別すると、空力的外力による構造の破壊、推進剤の爆発、および飛行に支障をきたすようなその他の事故の三つである⁹⁾。打ち上げ時には全飛行中を通じて最も大量の推進剤ととなり合わせに人間がいるので、発生する事故は緊急かつ重大なものを想定しておかなければならない。問題は警報に要する時間と脱出に要する時間がともに短かく、秒を争うものであるために、飛行状態のリアル・タイム・モニターを通じて、事故を検知する方法が重要な対策である。また、この時点では、人間は高加速度状態におかれており、判断や動作が正常とは異なった状態にあるのも特徴の一つとして指摘されよう。

2.2 宇宙空間での事故 人工衛星になった宇宙船の内部の状態は打ち上げ段階での輸送という過渡的な状態に比べて定常的である。とくに、宇宙船が大き

なるに従って、そこでの生活は地上の生活に近いものとなる。それに比べれば、打上げ時と帰還時にはカプセルに入って、気密服を身につけて飛行した初期の、いわゆる第一世代の宇宙飛行ではそれだけで救急対策をしていたといえることができる。問題は、今後、スカイラブ以後の居住性の良い宇宙飛行における救急の考え方であろう。スペース・ステーションで起こりうる危険性から考えていくと次の5項目が予想される。

1) 使用している機器類の故障等

i) 人命に影響をおぼす点からいえば、宇宙船の動力源系統の故障や生命維持装置系の故障などがある。スカイラブは打ち上げられたときに、太陽電池パネルが開かなかったので電力供給計画を変更しなければならなかったし、アポロ宇宙船の LOX タンクが破壊したなどという事例は、この種のトラブルが比較的小さくおさえることを示しているといえよう。

ii) 宇宙船の正常な飛行に支障のあるようなトラブルには、まず誘導制御、姿勢制御系あるいは推進系等の故障から起こりうる姿勢制御不能の状態が最も重大であろう。宇宙救急においては、姿勢制御不能となった状態も含めて一般的にタンブリングと称している。これが起こった場合、対処する有効な方法は論議が多い。予防的な方法としては姿勢制御等の加速度をごく小さくおさえることにより、危険な状態になるまでの時間を十分にとり、脱出あるいは修復のチャンスをふやすことが常識的に考えられる。

2) 乗員の健康に関するトラブル、傷害事故、放射線障害 病気と傷害の場合救出を含む対策をとらなければならないほどの事態が生じるのは少ないと考えられている。たとえば、地上における事例を基礎にして出した数値例が第1表⁹⁾に示されている。これによれば、宇宙で医療設備を充実することによって外部からの救助の必要性は極めて少なくなることが予想される。

しかし、長期の宇宙飛行の人体に及ぼす影響という本質的な部分については問題は残っているわけで、もし、重力が人間の長期の宇宙生活にとって不可欠なものであるという結論が将来でてくれば、宇宙船の設計に根本的に新しい指針を与えることになる。放射線

第1表 宇宙飛行における傷害と病気の発生確率¹⁰⁾

症 状	処 置 法	発 生 確 率
重 傷	地上へ帰還	0.25 /年
軽 傷	船上で手当	0.66 /年
重 病	地上へ帰還	0.0005/年
軽 病	船上で手当	25 /年
伝 染 病	全員帰還。場合によってはミッション一時放棄	0.002 /年

注: 1. 40才以下の健康な男子、危険作業に従事しない者。

2. 乗組員は12名とする。

障害は太陽などからの自然の放射線と搭載した原子炉などの人工のものによるものがあるが、前者は飛行している空間によって危険性が異なり現在のように地球の放射線帯より下側(地球の方)であれば影響は少なく、惑星間飛行において、大型の太陽フレアに直撃される機会のある飛行では防備が必要とされている¹⁰⁾。

3) 火災および汚染¹¹⁻¹³⁾ アメリカの宇宙船内の初の犠牲は、地上で訓練中における火災によるものであった。これはアポロ型までのアメリカの宇宙船は純酸素を用いていたためであるといわれる。たしかに純酸素ふんい気は火災および医学的観点からも好ましいものではないが、これは、宇宙船内の圧力を低く(5psi)することができると同時に生命維持装置のシステムを簡単化できるという技術的メリットとの妥協の結果である。

火災ほどはげしくはないが、船内の汚染はやはり同様に危険である。船内汚染は船内で使用している非金属材料から発生するもの、貯蔵タンクやガス処理装置の故障などによるガスもれによるものなど、見えないだけに注意をはらう必要がある。

4) 衝突およびイン石 宇宙飛行が実施される前には、イン石が宇宙船を破壊する危険性がよく論じられたが、実際には、イン石の中で数が多いのはごく小さな、直径がミクロン級のものであって、宇宙船の壁で大部分が断断されることがわかってきた¹⁴⁾。これに対して、人工衛星などの人工の飛行物体との衝突の危険性の方が大きいことが指摘されている。その関係は第2図¹⁾に示されている。アポロの各飛行においては別の方法であるがこの危険性について計算された模様である¹⁵⁾。この種の危険性は宇宙船の断面積と滞空時間に比例し、第2図のように表わした確率で 1×10^{-4} という値は $10,000\text{m}^2$ あたり 300年に1回の衝突に相当

するので、将来、宇宙ステーションといわれるぐらい大きなものではとくに問題となろう。

衝突には、軌道上でのドッキング等の操作ミスによって発生するものも考えておかなければならない。これらは、結果的には宇宙船を破壊し、船内大気の放出によって乗員が危険にひんする事故となり、極端な場合には、爆発と同様な結果をもたらす。また、このケースでは当然、タンブリングなど姿勢に異常を生じることが予想される。

5) その他、船外活動での事故および過失 事故は以上のほか、人の過失によるものも多い。過失はいろいろな原因によって生じるものであるが、たとえば宇宙活動では地上とは異なった感覚、視覚になるとか、運動モードが異なってくることによる疲労の生じ方の違いなど、医学的な観点から研究することによって改善されるものも多い。

初期の宇宙飛行においては、飛行中のトラブルに対してパイロットが対策をとる場合が多く、事故分析の結果によってシミュレーターを作り、これによってパイロットの事故に対応する能力を向上させたといわれている。今後、このプロセスの大部分がコンピュータ化された場合に、人間が適性を養っておくべき基準はどういうものなのか、これは医学、心理学、技術などに関連したむづかしいテーマとなるであろう。

宇宙空間の特殊性に関することでは、たとえば、地上で用いる道具は、宇宙空間での作業には不適当なものが多い。とくに、地上で足で支えて作業する動作を必要とするものは根本的な再検討が必要となる¹⁶⁾。米国ではこのための道具が数多く開発された¹⁷⁾。これらはこの種の事故や過失をへらす上で役立つであろう。また、船外活動においては、宇宙に浮かんだように見える物体は一個一個が人工衛星である。ただよい出た人間の救助や、捨てたつもりものの物体の取扱いは、この点を考慮して行う必要がある。

いずれにしても事故がおこってから、“まったく初歩的なミスだ”として、その人間がそのときに気が付けば何もおこらなかったらというやり方はここではとりたくないわけで、むしろミスは元来初歩的であって、宇宙船内の人間は一定のひん度でミスをおかすものと考えて、これが致命的にならないような設計をしておくことが宇宙での活動ではとくに望まれる。

4. 救急の方法

一般的に言えることは、まず危険な事故がおこらないように“予防的”手段をつくしておくこと、そして、既にそれらが発生した場合の“救急対策”を考えておくことである。以下の分類は文献 4) を基本としてい

第2図 流星じんと人工飛行物体の存在確率の比較¹⁾

る。

1) 予防的方法 宇宙船などの設計段階で安全性を特に意識することにあるが、具体的には次の2点である。

i) 信頼性の高い部品を用いる。とくに重要な部分は設計要求以上の性能をもつ部品を用いることがよくある。この考え方は、構造設計における safe-life の考え方を拡張したもので、人命の安全に関するとくに重要な部品などを、全体システム設計の最適化の対象からはずして、より高度な基準を与えることを意味している。ただしこの方法は、対象となる部品やサブシステムによっては、その性質上常に適用できるとは限らず、比較的複雑なコンポーネントやサブシステムにこれを適用すると、全体のシステムが成り立たなくなる場合があり、このときは次の方法がとられる。

ii) 乗組員の安全に関連した機能について、リダンダンシーをもたせること。これはさきの safe-life に対して fail-safe の考え方であって、ある部品ないしサブシステムは一定の確率で故障すると見なした上で、これを予備品などで補うことができるようなシステムにしておくのが主眼である。このさい、個々の部品からバックアップ・システムにいたるいろいろな段階においてこの方法を用いることができ、それらをさらに組合わせることが好ましいと指摘されている。これ以上のことは、個々の設計において論ずるほかはない。

2) 救急対策 ここで救急の手順を表わす用語、脱出、生存、救出を次のように定義づけている⁴⁾。

脱出 (escape)—外部からの援助なしに、危険の至近範囲から、緊急にのがれるために装置やサブシステムを利用すること。

生存 (survive, より厳密には、生きのこるというべきかも知れない)—乗組員が脱出し、一時的に安全な状態が保たれるための装置を使用すること。

救出 (rescue)—最終的に安全な場所に帰るために外部の援助を受けること。

救急の方法は、いろいろな角度から検討されているが、それらがこの3つの段階のどこでとくに有効なのかを判断することは整理の目安となるであろう。

救急の手段をどこにおくかという観点から分類すると

- i) 搭載型システム
- ii) 待機型システム
- iii) 地上発進型システム

の3つがある。実例によってこの中の代表的なものを示そう。

4.1 搭載型システム

1) 打ち上げ時脱出法⁵⁾²⁰⁾²¹⁾ 人工衛星軌道への打

第3図 航空機から脱出時の生体・空力的条件 (GEER R. L. による)²⁾

ち上げ過程においては搭載型システムが用いられている。

エジェクション・シートは航空機で使用される最も一般的な方法であるが、宇宙ロケットの場合は速度がはるかに大きくなるために、人工衛星打ち上げの全過程で用いることはできず、そのごく初期の速度のおそい段階でしか使用できない制約がある。ジェミニ宇宙船ではこの脱出法が採用されたが、打上げの後半部は再突入のときに用いるシステムを併用することになっていた。エジェクション・シートの計画にさいしては、第3図のような図が用意されている²⁾。ここに見るように、マッハ数3をすぎると空力加熱からの保護が必要とされ、シートを保護カプセル内におさめた方式が必要とされるが、これは、小型の宇宙船では著しい重量増となり、全体のシステムとして成り立たなくなる。しかし、本来のカプセルにすべてこの機能を併せもたせる方法は当然考えられることであって、実際にマーキュリー計画とアポロ計画では、宇宙船全体をこのカプセルにして、脱出用ロケットをとりつける方法を用いた。この方法は第4図²²⁾に示すようにカプセルが本体ロケットから切り離されると同時に、脱出用ロケットが、カプセルをつり上げるように作動することになっている。その推力中心がやや重心からはずしてあって、上下方向だけでなく横方向にも、打ち上げロケットから離れるようになっている。この脱出用ロケットは“牽引ロケット”などといわれて短時間に大

第4図 アポロ宇宙船の脱出システム²²⁾ 第5図 射出座席の軌道と火球の大きさ²³⁾

推力を出せることが必要である。ソ連のソユーズ宇宙船もほとんど同じ考え方の脱出ロケットを有している²³⁾。

脱出する距離は、打ち上げロケットの爆発による“火球”(fire ball)の範囲外にあることが必要とされ、たとえば、第5図²³⁾には火球の大きさが時間とともに大きくなり、消えていく様子と、これに対して、脱出シートあるいはカプセルがこれを上まわるように離れていくありさまが示されている。はじめに述べた警報に要する時間を脱出の所要時間が問題になることは、このグラフからも読みとれる。このさい打上げロケットに使用する推進剤について、いろいろな高度での爆発による火球の発達についてのデータ²⁴⁾が必要である。

2) 脱出用カプセル 比較的小型のステーションなどで、宇宙船の火災などによって船内に滞在すること

自体が危険になったときには、ほかに避難する場所がないので放棄して脱出する以外に方法がない。地球のまわりの宇宙ステーションの場合はこのために脱出用カプセルを装備し、いったん“脱出”して“生存”し、救出を待つか、あるいは自ら小型の推進装置を有し、軌道はずれて地球に帰還するかの方法をとる。これらは、アメリカの有人飛行計画において検討されたものが多く、簡単なものは宇宙服に救命胴衣をつけて、耐熱性をもたせたもの²⁵⁾²⁶⁾から、数人乗りの再突入ロケット機²⁷⁾にいたるまで、それぞれの特性を強調したアイデアがだされている。

この方法は地球の周辺の救急においてのみ有効だと考えられるし、また再突入して救出されるまでのプロセスを考えると、むしろ地上の救急体制(後述)の問題の方が大きくなってくるので、単なる脱出カプセルのアイデアだけでは評価できない。筆者はこれらの方法は地上の火災事故に適した考え方と見え、外部環境そのものが危険な宇宙空間では、やむを得ずとる最後の手段として、期待しない方が良く考えている。なおスカイラブでは正規の帰還用カプセルが脱出用のカプセルをかねているほか、この故障に備えて、別に救出用のドッキング・アダプターを有している。

3) コンパートメント・退避場所 十分大きなスペース・ステーションであれば、ステーション全体を急に放棄しなければならないような事態は少なく、ステーション内の安全な場所に逃げこんで、事故のあった箇所を復旧することが可能になるであろう。とくに、惑星間飛行のように事実上、他の方法がとりにくいようなミッションにおいては、これ以外の方法はない。また逆にいえば、これが可能になるまでは惑星間飛行計画は現実性をもちえないともいえよう。

第6図 宇宙船の気密区画と事故時の状態¹⁹⁾

これに関連して、ステーション内の部屋割り (コンパートメント) の仕方、避難場所の設置、および、エア・ロック・システムなどが問題となる。

部屋割りは、船舶の水密隔壁と同じような考え方で、区割りといった方がいいかも知れないが、一つの部屋の気密が破れても他の部屋は安全であること。また、そのさい、安全な部屋への脱出が容易であることなどが指摘される。例えば、第6図のような最も簡単な区割りの例が示されている¹⁹⁾。詳しい説明はなくても考え方は理解できると思う。

避難場所の設置は、このような気密が不完全になった場合に逃げこんで宇宙服を着る場所とか、放射線の強い期間をその中で過ごすようなものが考えられる²⁸⁾。

エア・ロックやドッキング・ハッチはその構造や原理のほか設置する場所や数などの設計上、検討すべき点が多い²⁹⁾³⁰⁾。米ソの共同宇宙計画でのアポロ・ソユーズ計画では将来の宇宙救急に備えて、ドッキング・ハッチの規格化を行うことが目的の一つとなっている。これによって後述の地上発進システムはより有効なものとなりうる。

4.2 待機型システム³²⁾ 待機型システム (pre-positioned system) はあらかじめ人の行く場所に、救急のためのシステムを配置しておく方式である。これを用いる方式は救急用宇宙船として、地球のまわりの軌道において移動するために十分な能力をもつ推進機関を持っている必要がある。したがって、シャトルのオービ

ターやスペースシャトルと組合わせたものが必要となるのでかなり複雑である。しかし、地上から発進する場合よりも短時間で救出ができるのが利点であるという。

この方式の一つとして、月や惑星において、あらかじめ人が到着する場所に救急装置をおいておく構想がありアポロ計画でも考えられたことがある³³⁾が高価につくのが難点である。しかし、より大規模な月計画が実行されるときには、この方法はまた見直されるものと思われる。

惑星探検の場合にこの方法を採用することは考えられないことではない。各惑星の衛星軌道にいくつかの物資補給用の宇宙船をあらかじめ配置しておくことくらいはできそうである。しかし、これは本来の救急作業とは大分異なり、正規の作業を予定した、いわばベース・キャンプの設置である。これだけ人が遠く離れると、人間はあまり地球をあてにしていはいけないのかも知れない。

4.3 地上発進型システム 地球の周辺を飛ぶ宇宙船における救急法として、地上から別の救助用の宇宙船を仕立てていくというのはわかりやすい。この場合も、救助用ロケットの発射点と事故船との位置関係が問題で、発射点の上空付近を事故船が通過すれば、救助船にとって最も良い条件となるが、そうでない場合には、その状態がくるまで待たなければならない。これは軌道の点からいえば、救助船の発射点を事故船の軌道面に近い位置に選ぶことである。この待ち時間の分だけ救助に要する時間がふえることになる。これをへらすためには、救助船を十分強力にしておいて、異なった軌道面の軌道に打ち上げておいて、そこから事故船の軌道に入ればよい。したがって、救助船の能力によって待ち時間が異なってくる。この検討をした例が第7図に示されている³⁴⁾。横軸はロケットの能力を

第7図 地球周回軌道からの救出³⁴⁾。軌道は高度200n. mile, i は軌道傾角, ハッチ域は不確定要素による変動分, 生存可能時間が救出までの待ち時間より大 (この図で上の領域) になれば救出可能。

第8図 ジェミニの軌道の地上軌跡および2つの回収地点 (recovery site)³⁹⁾。円内に斜線の入っている2地点はアポロ計画用に追加されたものを書き込んだ。

示し、たて軸には生き残り時間。したがって、事故発生から救出船が到着するまでの時間を示している。これによると、サターンV型ロケットでも、タイタンⅢCの半分までは生き残り時間を短縮し得ない。つまりロケットの大型化によるメリットは少ない。

これに対して、救助発射点をふやすことは有効である。しかし、発射点は地球上のお互いに離れた地点におく必要があるので、現在人間を打上げているような

大がかりな発射場を各国が海外に設置することを意味しており、現実には考えられたことはないようである。これは回収の場合と比べると事情が異なっている。

この方式は打ち上げロケットを含む大きなシステムを常時待機させておかねばならないので、金がかかるという面がある。したがって、これは現在のように散発的な計画しかないうちは、一軒で消防署をかか

第9図 アポロ7号のための打上時飛行中止区域と艦船配置案

えているようなものである。しかし、宇宙ステーションが多くなれば、それほど無駄なものとはいえない。スカイラブ計画は、次のミッションに使用するロケットを救助船として仕立てることになっており、この事態は一度発生しかけたが実行する必要がなかったのは幸いだった。

5. 救急活動の運用と組織

前述のような技術を生かして、救急活動を実行するために必要な研究も数多く行われている。これらは大まかに次のような項目に分類される。

- i) 生命維持装置と装備品用具の標準化
- ii) 回収オペレーション
- iii) 地球周辺の軌道の管制、法律問題

5.1 生命維持装置と装備品用具の標準化³⁵⁾

生命維持装置：まず、船内大気圧の圧力と組成の統一があげられる。アポロ・ソユーズ共同飛行はこの一つの試みである。元来、アポロは5 psi の純酸素、ソユーズは標準大気である。これが、この計画のためにソユーズの圧力は10 psi に減圧された³⁶⁾。これは将来全く同じになることが望ましく、そうすれば装置の基本的機器に互換性をもたせ、パイプ・ライン電線の色わけなどを統一化したり、さらに、宇宙服についても、パイプの結合部、ヘルメットの取付け部などに互換性をもたせることが可能になる。このほか、非常用の酸素供給装置、非常食の組成などの規格化は当然考えて

おくべきものである。

用具として必要なものの中には、ドッキング・ハッチや宇宙船補捉用具³⁰⁾ (arresting gear) のような大きな装備品から、このような緊急時にとくに有効な働きをされると考えられる小道具類がある。まず救助される宇宙船に救助船がドッキングする必要がある。ドッキングは正常時ならば、両方で姿勢制御が完全に行われているはずであるが、ドッキングを必要とするぐらいの事故においては、事故船は姿勢制御が不完全な場合が多いと予想されるので、このドッキングの方法が問題となる。原理的には、救助船が事故船の回転運動の軸の部分で、同期した回転をしてドッキングして、両者を固定した後、救助船の姿勢制御装置でタンブリングを止める、というわけで、おだやかな方法は、回転運動の軸となりそうな場所に接触点を分布させておいて、これを救助船のものと合わせておく方法がある⁴⁶⁾。少々手荒いものではカウボーイの投げなわ式にひっかけて、ロープによるフレキシブルな結合をするというのがある³⁷⁾。こういうものは、その手順そのものが標準化されることが必要である。

ドッキング・ハッチでは、大きさ、形状、シール、開閉機構の規格化、また、ラッチの大きさ、作動の方向の統一なども必要である。

ガスや液体、電力の供給方法についても規格化される必要がある。これらは酸素や液状食料の移送にも用いられるであろうから、非常用食品などの関係もあっ

(NASA-S-68-4936)⁴⁰⁾

第10図 回収地点の数と待機軌道周回数との関係³⁹⁾

て生命維持装置も同時に考えられるべきであると指摘されている。

5.2 回収オペレーション ここでいう回収は、軌道から地球への着地と、着地から救出地点への移動とにわけられる。回収オペレーションは軌道計算と地表地点配置の関係などを含み数学の問題となりうるテーマである。すなわち、着地点が救出地点に一致するくらい近ければ望ましいが、宇宙船の軌道は救出点を通るとは限らないので、最も近づいた地点に着地点を選ぶ必要がある。しかし、このようなチャンスは1日に1～2回地球の自転によって目標の着地点が軌道の下を通るときに生じるだけなので、救急のように時間が限られているものについては、救出地点をうまく配置して、軌道によらず、より早く着陸することができることが望ましい。また、着地点と救出地点の距離は地上の探索と運搬能力にかかっていて、この能力が大きければ、一つの救出点のまわりの着陸範囲を大きくとることによって、やはり早期に救出されるチャンスをうるといわけである。

第8図³⁸⁾にはジェミニの軌道が描かれている。recovery sites とあるのは、ここでいう救出地点である。この円にかかっている軌道はただちに着陸(水)できるが、それ以外のものはそのような条件になるまで待たなければならない。アポロでは、さらにハッチした地点がつけ加わり、ほとんど軌道上での周回待機は必要なくなった。また別の第9図³⁹⁾には、打ち上げ時の事故による飛行中止に備えてよりきめこまかく艦船が配置され、救出地点がふやされた模様が示されている。

CHUら^{38,40)}は、この問題を数学的に取扱っている。結果の一例を第10図³⁹⁾に示す。図中の OPTIMUM は、最適位置に配置した SITE という意味。同じく AVAILABLE は救出地点として機能しうる SITE を現

実に近くに持っていない場合があるので、これを考慮した場合で、SITE (ここでいう救出地点) の数によって軌道上での周回待機の回数が何回になるかを示したものである。 r は着陸点と救出地点との距離を示し、回収能力が十分あれば2点で十分という結論である。実際には、この大きさは着陸点の誤差や艦船の出動時間に関係してくる。

スペース・シャトルの計画においては再突入後の滑空飛行によって、この距離をカバーし、救出点に近づくことができる。このグラフ等から明らかなように軌道の進路と直角の方向への滑空距離をのばすことができれば、実質的に回収半径を大きくしたことになる。このような能力をもたせたものを high cross range 型のオービターといっており、現在この方向で計画が進行中である。

同じ問題は通信網を考慮にいれて論じることができる⁴¹⁾。低軌道で、可視性を考えなければならないような波長領域による通信による場合は、常時接触を保つために、救出地点よりはるかに数多い通信ステーションが必要となるが、将来は軌道上の通信ステーションがこの問題を改善するだろう。

回収のための気象情報も大切なものである⁴²⁾。このシステムについては、全地球上の気象条件をいかにして把握するかという問題と関連して論じられている。

5.3 軌道に対する考察 将来の有人ステーションの軌道を予測しておくことは前述の問題にも関連している。

NASA のポストアポロ計画に関連して行われた調査の結果などから、スペース・シャトルの標準軌道は軌道傾角 55° を標準としている。従来の無人のミッションから判断すると極軌道が多く⁴³⁾、高度は1,000km 以下が大部分である。有人飛行はバンアレン帯に入ら

ないことを条件として考えているから、今後ともこのようなミッションを宇宙ステーションなどが実行すると考えてよいであろう。この空間では将来、衝突の危険性が拡大するであろうが、これに対する予防法に関連して次のような点が検討された。

衝突防止用レーダー⁴⁴⁾。現在、船舶や航空機において広く用いられている方法である。宇宙用として、このようなレーダーを設計するさいには、その目標物が高速であること、衝突は三次元空間的に、つまり、あらゆる方向から飛んでくる物体との間でおこりうること予想しておかなければならない。計算によると⁷⁾、現在のところ、前方は上下方向にはせまいが左右に広がった範囲から 10 km/s 以上のスピードを持って接近するものが多く、後方からは、やや速度は小さいが上下左右とも広い範囲から接近してくるので、結局、上下以外のはば全天を監視していなければならないことが分かる。これによって衝突を予測し、ステーションを移動するためには、強力なレーダーと強力な推進ロケットを装備すればよいのであるが、あるていど以下の大きさのものは現実的に避けることがむづかしい。これは大きさが直径 10 cm 以下のものであろう。

根本的対策は、不要になった人工衛星の回収と、新たに地球まわりの人工衛星軌道のわりあてをきめることであろう。現在、無人の人工衛星は 3,000 個あるが、これらを回収することは、なかなかやっかいなことである。スペース・タグのようなもので集めて持て帰るとか、回収用のロケットを装着して地球におとすとかいろいろのアイデアが出され、これに要するシステムはいろいろな形で数学的に検討されている⁷⁾。また、軌道の交通管制システムによって軌道を割あてる方法のうち、最も簡単な方法は一定の高度、つまり球面で区切られた空間内に一定数のミッションの似た宇宙ステーション群をおく方法で、現在の航空路の管制方式を発展させたようなものを考えればよい。

これに関連して、最後に一つ、原子力ロケットや原子動力の放射性廃棄物はこの空間内にはガス状にして放出してはいけないことを、安全の上から述べておこう。人工衛星は、衛星として地球のまわりをまわることではできても、この空間は、まだまだ地球の大気の延長部分であって、1,000 km 位の高度でも、ガスの分子 1 個が人工衛星となるには、あまりに大気は濃すぎるのである。むしろ、この高度で保管カプセル内に入れて、一か所に集め、危険物衛星として地球のまわりをまわらせて管理する方がはるかに安全である。

おわりに

今年は国内の研究所の掲示板に“宇宙に行って研究

する人のための講習会のお知らせ”がはってあった。これは一昔前なら“ふざけるな”といっってはがされてしまいそうな代物であるが、ここで取上げた“宇宙救急”のテーマ自体も、現在のわが国では同じような印象を与えるのではないかと筆者は心配している。しかし、現実にはスペース・シャトルの出現によって米ソ以外の国の人々が宇宙飛行する可能性は強くなりつつあるので、いやでもこの方面への関心が高まってくるのではないかも知れるのである。

ともかく、この原稿を書いてみて、宇宙救急の分野を説明できたかどうかは全く自信がない。重要な問題で見逃していることもあることだろうし、知っていることを不必要に書きすぎている点もたしかにある。このような欠点を指摘しつつ、新たに“宇宙救急”を論じ、各専門分野ごとにこのテーマを取上げていただければ、それだけでわが国における“宇宙救急”の分野を充実できるのではないかと内心期待している。

末筆ながら、この原稿を書くきっかけを作って下さった東大宇宙研の砂川恵教授、および、非力な筆者に数多くの貴重な資料を教示され、激励をして下さった東京慈恵医大の佐伯敦教授に対し、心から感謝の意を表したい。

参考文献

下記の 2), 5), 11), 12) には数多くの論文が含まれている。とくに 5) は引用頻度が高いので、後出のふんは〔5〕と略記している。また国際宇宙救急シンポジウムは以下では ISRS と略記した。このプロシーディングスは国際宇宙航行学アカデミーから入手できる。

- 1) CAMPBELL, P. A.: Earthman, Spaceman, Universal Man?, Pageant Press, Inc., New York, (1965).
- 2) BENSON, O. O., Jr., and STRUGHOLD, H. (Editors): Physics and Medicine of the Atmosphere and Space, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, (1960).
- 3) HOLLOWAY, P. F., and PRITCHARD, E. B.: The Orbital Recovery Problem, Part 1, NASA TR-259 (1967).
- 4) FLEISIG, R., and BOLGER, P. H.: Survey of Space Flight Safety System, The Fourth ISRS, (1971/9), pp. 23-67.
- 5) PETERSEN, N. V. (Editor): Space Rendezvous, Rescue, and Recovery, Advances in the Astronautical Sciences, Vol. 16, Part one and two, (1963).
- 6) YOKOBORI, S., YURUGI, R., and MATSUMOTO, I.: Protective Effect on an Air-Bag Cushion on Crash Injury, The Second ISRS, (1969/10), pp. 371-383.
- 7) NAGATOMO, M., MATSUO, H., and UESUGI, K.: Safety Design of Space Station Against Collision Hazards with Artificial Orbiting Bodies, The Fifth ISRS, (1972/10).
- 8) DEANS, P. M.: Launch-Escape Systems, Manned Spacecraft: Engineering Design and Operation, Fairchild Publications, Inc., New York, (1965),

- pp. 315-325.
- 9) DOLE, S.H.: Potential Causes and Consequences of Space-Flight Emergencies, The Second ISRS, (1969/10), pp. 155-169.
  - 10) MOLTON, P. M.: The Protection of Astronauts against Solar Flares, Spaceflight, Vol. 13, (1971).
  - 11) WEBB, P.: Bioastronautics Date Book, NASA SP-3006, (1964).
  - 12) 人間—環境系, 上, 下巻, 人間と技術社, (1972).
  - 13) KARSTENS, A. I., and WELCH, B. E.: Spacecraft Atmospheres, Aerospace Medicine (Edited by Randel, H.W.), The Williams & Wilkins Company, Baltimore, (1971), pp. 664-683.
  - 14) たとえば, D'AIUTOLO, C. T.: First Meteoroid-Penetration Data for SNAP Designers, Nucleonics, (1963/11).
  - 15) Collision Probability of the Apollo Spacecraft with Objects in Earth Orbit by Florida Operations, TRW Systems, MSC Internal Note No. 67-FM-44, (1967).
  - 16) MARTON, T., RUDEK, F. P., MILLER, R. A., and NORMAN, D. G.: Handbook of Human Engineering Design Data for Reduced Gravity Conditions, NASA CR-1726, (1971).
  - 17) JOHNSON, L. B., SANDER, E., and LEBOW, S.: NASA List of Potential Space Tools and Equipment, NASA CR-1760, (1971).
  - 18) 横堀栄: 航空宇宙医学の展望, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 21, No. 232, (1973), pp. 291-297.
  - 19) von BECKH, H. J.: Decompression and Recompression in Space Rescue, The Second ISRS, (1969/10), pp. 307-369.
  - 20) BOLGER, P. H.: Evolution of Emergency Systems for Manned Space Flight, The Third ISRS, (1970/10), pp. 115-164.
  - 21) NUTTALL, J. B.: Emergency Escape from Aircraft and Spacecraft, Aerospace Medicine (Edited by Randel, H.W.), The Williams & Wilkins Company, Baltimore, (1971), pp. 376-417.
  - 22) CAHUVIN, L. T., and JOHNSON, C. C. Jr.: Apollo Command and Service Module-Design Integration, Manned Spacecraft: Engineering Design and Operation, pp. 375-388.
  - 23) Aviation Week & Space Technology, Jan. 13, 1969, p. 49.
  - 24) FLETCHER, R. F.: Liquid-Propellant Explosions, J. Spacecraft, Vol. 5, No. 10, (1968), pp. 1227-1229.
  - 25) HEITCHUE, D. C.: Emergency Escape from a Space Station, [5], pp. 680-692.
  - 26) HUANG, C. J., and DICKERSON, S. L.: Concepts and System Design of a Space Emergency Re-entry Vehicle, The Third ISRS, (1970/10), pp. 305-343.
  - 27) BRADLEY, R. H., and CARTER, W. K.: Low-Earth-Orbit Emergency-Escape Vehicle, The Second ISRS, (1969/10), pp. 243-270.
  - 28) CAMPBELL, P. A.: Medical Aspects of the Rescue Environment, [5], pp. 227-229.
  - 29) CARLYLE, L., DUSKIN, F. E., and ENGLAR, K. G.: Considerations for Manned Space Vehicle Airlock Design, [5], pp. 438-446.
  - 30) ZOSZAK, J.: Coupling and Assembly of Orbiting, Pressurized Modules, [5], pp. 325-340.
  - 31) TAYLOR, J. D.: Application of Terminal Guidance Systems and Techniques to Space Rescue Operations, The Third ISRS, (1970/10), pp. 279-303.
  - 32) HINTON, M. G., Jr., and OERCGIBIJ, E.: The Earth Orbit Shuttle as a Space Rescue Vehicle, The fourth ISRS, (1971/9), pp. 281-300.
  - 33) PERCHONOK, E.: Lunar Mission Escape and Rescue Concepts, The Third ISRS, (1970/10), pp. 251-278.
  - 34) GORDON, T. J., and GERSVAIS, R. L.: Critical Engineering Problems of Space Stations, Manned Laboratories in Space, (Edited by SINGER, S. F.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland (1968), pp. 11-32.
  - 35) von BECKH, H. J.: The Standardization of Space Vehicle Components a conditio sine Qua non for Successful International Rescue Operations, The Third ISRS, (1970/10), pp. 193-198.
  - 36) Aviation Week & Space Technology, July 10 (1972), p. 16.
  - 37) WEISS, D. C.: Arrested Rendezvous: A New Concept, [5], pp. 77-102.
  - 38) NAGY, A. R., Jr., PERCHONOK, E., and CHU, S. T.: Potentials for International Contribution to Astronaut Emergency Recovery, The Second ISRS, (1969/10), pp. 111-129.
  - 39) HEATH, G. W.: Space Rescue: Requirements for Recovery of Astronauts Returning to Earth under Contingency Conditions, The Second ISRS, (1969/10), pp. 131-154.
  - 40) CHU, S. T., and DAVIS, K. S.: Multiple Site Return Probability of Spacecraft from Circular and Elliptical Orbits, J. Spacecraft, Vol. 5, No. 4, (1968), pp. 419-424.
  - 41) CHU, S. T., and NAGY, A. R., Jr.: Inclusion of Time Constraints and Redundant Access on Spacecraft Return Probabilities by the Concept of Borel Set, J. Spacecraft, Vol. 6, No. 6, (1969), pp. 667-672.
  - 42) DOBRYSHMAN, E.: Availability of World-Wide Weather Data with Respect to Possibilities for Determining Recovery Sites, The Fourth ISRS, (1971/9), pp. 167-174.
  - 43) NAGATOMO, M., MATSUO, H., and UESUGI, K.: Some Considerations on Utilization Control of the Near Earth Space in Future, Proceedings of the Ninth ISTS, (1971), pp. 257-263.
  - 44) KAMEN, S. K., and TANENBAUM, M. S.: Design of a Satellite-Based Radar Seeker, [5], pp. 116-126.
  - 45) ROSE, R. G.: Space Rescue Considerations, the Fourth ISRS (1971/9), p. 324.
  - 46) WILD, J. W.: Space Rescue Operations, The Third ISRS (1970/10), p. 172.