

## 1994年 日本国際賞受賞記念講演会 及び国際パネルディスカッション

日本国際賞の受賞を記念して、ピカリング及びカールソン両博士による記念講演会が、東京で開かれました。記念講演終了後は過去の受賞者2名（第3回受賞者クッシュ博士、第4回受賞者バンドリエス博士）を加えての基調講演、パネリスト講演及びパネルディスカッションが行われました。その後会場からの質疑にパネリストたちが応答しました。

---

### 記念講演会

1994年4月28日(木) 13:00～18:00

霞ヶ関「イイノホール」

主催者挨拶：伊藤正己（国際科学技術財団理事長）

受賞者紹介：齋藤成文（東京大学名誉教授）

講演：ウィリアム・ヘイワード・ピカリング博士

「宇宙技術—新しい挑戦」

受賞者紹介：島藺安雄（国立精神・神経センター名誉総長）

講演：アーヴィド・カールソン博士

「脳におけるドパミンの研究：過去、現在および将来」

---

### 国際パネルディスカッション

「21世紀の科学技術—予測と期待」

パネリスト：グルデブ・S・クッシュ博士（1987年日本国際賞受賞者）

ジョルジュ・バンドリエス博士（1988年日本国際賞受賞者）

ウィリアム・ヘイワード・ピカリング博士（1994年日本国際賞受賞者）

アーヴィド・カールソン博士（1994年日本国際賞受賞者）

コーディネーター：近藤次郎博士

## 記念講演会 宇宙技術—新しい挑戦

ウィリアム・ヘイワード・ピカリング博士

カリフォルニア工科大学名誉教授、元ジェット推進研究所所長

この度は、航空宇宙技術部門において、1994年の第10回日本国際賞を授けられ極めて光栄に存じます。長年にわたり、太陽系の遠距離到達計画の研究所を指導してきた者にとって、このような光栄は、ジェット推進研究所の科学者や技術者の技術と創造力に対する表彰であると思っています。

彼らはアメリカ合衆国で最初の人工衛星に挑戦し、そして打ち上げました。その当時は、記念碑的な仕事となるものと考えられていました。今日では、最初のエクスポローラ号に比べて、はるかに複雑なロケットを製作し打ち上げることのできる方々が世界の各地にいらっしゃいます。実際、ここ日本のこの会場にお集まりの工学者、科学者の皆様は、日本の人工衛星計画に関して高い能力をお持ちでおられます。

エクスポローラ I が軌道に乗ってからちょうど36年経ちました。エクスポローラ I の成功は、ソ連がスプートニック I を成功して4か月後のことでした。

アメリカ合衆国とソ連は、国際地理年 (IGY) に因み、科学実験を行う人工衛星の開発を公表し、1957年7月1日から1958年12月31日の間に定められました。この国際共同科学計画で、地球全域に関する膨大な量のデータを収集しました。人工衛星の軌道は地球全体をカバーするため、全体のデータを収集するためには好都合なものでした。

しかし、軌道上に人工衛星を打ち上げられるロケットは、地球の反対側の相手国に弾道を運ぶためのロケットとよく似ていることがすぐ分かりました。さらに、軌道上に正確な人工衛星を打ち上げる能力は、相手国を目標に誘導ミサイルを到達させるのに必要な誘導技術を持つ証しとなります。このため、アメリカ合衆国とソ連の人工衛星の計画は、両国にとって大陸間弾道弾を発射する能力を公開するデモンストレーションとなりました。

ソ連では、すべての打ち上げを軍の管制下で行うことを選択しました。民間の科学者がこの実験に集められ、後に打ち上げ及びデータ収集のために、軍に籍を移しました。

他方、アメリカ合衆国では、この科学計画を軍の管理から離しておき、軍のロケットを打ち上げ用に使用しませんでした。

しかし、スプートニックが思いもよらず軌道に乗ることに成功した後は、アメリカ合衆国の軍のロケット、レッドストーンが使用され、自由世界で最初の人工衛星エクスポローラ I を打ち上げました。ロケットのテレメトリー (遠隔操作) を除くデータ収集は、軍のチャンネル以外から操作されました。エクスポローラ I が打ち上げられてから数か月後の1958年には、アメリカ合衆国は米国航空宇宙局 (NASA) を創設し、アメリカの民間宇宙船を開発し打ち上げました。NASAは、月ロケットアポロを打ち上げたサターンVなどを、

独自に打ち上げロケットをいくつか開発しましたが、軍用ロケットのアトラスやタイタンなども利用しました。

NASAは10の研究所を創立し、宇宙計画をサポートしました。ジェット推進研究所はそのような研究所の一つです。ここは、設備こそ政府が所有していますが、私立大学であるカリフォルニア工科大学(Caltech(CIT))との契約により、この研究所は民間で運営している点が他の研究所と異なるところです。

NASAがCITと契約を交わしたとき、JPLでは当初、月及び惑星へは無人での科学実験を行う予定でした。言い換えれば、この研究所は、太陽系を探索するよう契約されていました。その数年後には、JPLは月、そして冥王星を除く主な惑星への人工衛星を製作し、打ち上げました。

NASAのこれ以外の計画には、地球に近い宇宙での科学・実験衛星の製作、宇宙の商業利用開発などの援助、有人宇宙計画などがあり、これは後にアポロ計画となりました。アポロ計画による月への着陸の成功後、有人宇宙計画はシャトル計画となり、より経済的で信頼性の高い輸送手段の開発を目指し、宇宙の無重力状態での人間の行動能力を証明しようということでした。

JPLの無人宇宙計画を達成するには、地上とは無線通信のみという宇宙環境で、長年にわたり操作可能な、先進の技術デバイスの開発や、宇宙船の製造が必要となります。

恐らく、解決すべき最も困難な一般的問題は、システム計画です。宇宙船は命令を与えて発射されるまでは完成したシステムとして試験することはできません。そこで、これは地球からの無線による命令で試験並びに修正を行います。地上基地の乗組員は遠隔測定されたデータを解析し、システムに入力されたコマンドは、パラメータ値のエラーを訂正し、あらゆる故障を直すことができます。

システム設計者は予想されるあらゆる故障の影響を予測し、それらの故障に関係ある作業方法を試みる必要があります。彼らは、このシステムに習熟しているため、遠隔計器の偏差をよく理解し、コマンドを訂正して宇宙船に送信して、所定の計画を実行するか、それにできるだけ近い作業を目指します。

長期にわたる宇宙船計画では、何らかの偏差が生じたり、予測しないデータが記録されることがあります。例えば、火星の軌道に乗り、火星の1年間を観測するよう計画されたマリナー9号は、南半球から発生して火星全体を覆うほどに発達した巨大な砂嵐の時期に到達しました。砂ほこりが収まり火星表面の明瞭な写真を撮影可能になるまでには約2か

月を要しました。マリナー9号は地球からのコマンドにより電源が入るように設計されていました。このため、科学者達は砂嵐が去って大気がきれいになり撮影及びデータ収集ができるようになるまで、ひたすら待ち続けました。これとはほぼ時を同じくして火星に到達したソ連の火星探査機は、自動的に写真を撮影するよう設計されていたため、そのデータはほとんど、または全く得られませんでした。恐らく、ソ連のシステム設計者は、地上からコマンドを送るよりも、自動的に電源で入るような手法の方が信頼性が高いと考え、そのようにシステム設計されたものと考えます。砂嵐の発生や写真撮影を遅らすということは考慮に入れられていなかったのです。

予定にはなかった実験を宇宙船が行う例として、マリナー9号は、火星の衛星フォボスに接近して写真撮影するよう求められました。このためには、火星を周回するマリナー9号の軌道を修正し、宇宙船をフォボスに接近するよう移動させる必要があります。マリナー9号は、約50kmの距離でフォボスを通過しました。この宇宙船のシステム設計により、当初実験予定に含まれていなかった元の実行計画も操作することができました。

宇宙船の部品が働かなくなったとき、それを修正するには働かなくなった原因を完全に理解し、問題点を正確に見極めるのに十分なデータや、正しい動作が得られるようシステムを熟知するなどの必要があります。

ボイジャー2号が土星を通過するとき、このタイプの問題点が発生しました。ビデオカメラのあるスキャン台座が正しい角度を向けなくなりました。この原因は、潤滑が原因でモータと台座間の歯車が噛みついていることが分かりました。研究室で行った予備のシステム実験で、台の動きが悪くなったときは、コマンドにしたがうようになります。管制官は天王星に到達するまでに可能なかぎり台座の移動を少なくするよう決定しました。天王星に到達したとき、万一この台座が機能しなければ宇宙船全体を回転させカメラを正しく向くようにしました。幸い台座は正常に機能し、天王星近傍の飛行も正常でした。

修正できない宇宙船の故障がガリレオ宇宙船で発生し、これは現在木星に向かっています。パラボラ構造のアンテナが予定どおり開きませんでした。宇宙船のシステムエンジニアは、予想できる故障に対処する原因に基づいた多くのコマンドを送信しましたが、どれもうまく行きませんでした。そこで、この計画の設計者は、一緒に搭載した低ゲインのアンテナシステムを最大ゲインで使用することにしました。その結果、当初計画していたデータの約70%が収集できたと考えています。

宇宙船の故障は、時に致命的なものとなります。最近、火星探査機がその衛星軌道に乗

るときに急に送信を停止しました。送られてきた使用可能な少量のデータを解析した後、宇宙船の燃料システムが爆発したものと結論しました。爆発の原因が求められました。このような失敗の後、学んだことは、将来のすべての計画に活かされるべきだと言えます。

宇宙計画の初期には、失敗がよく発生しました。例えば、1959年にアメリカ合衆国は23基の宇宙船を打ち上げましたが、その中で成功したのは13基だけです。その当時から比べると、宇宙環境への理解が進み、計画に対する管理経験が豊富になり、信頼性が向上しました。同時に、技術者の手の届かない発射台から離れたときに正常に動作する機器が必要であることの認識が高まったことにもよっています。

宇宙船はまず、システム全体が動作したときに正常に動作しなければなりません。このため、エンジニアリング設計やハードウェアの構造、試験などはすべてこの要件を満たさなければなりません。これは、一旦飛行用ハードウェアが製作されれば、機器の試験や操作中での異常は完全に理解され、修復しなければなりません。同時に、サブシステムやデバイスすべてに関連ある宇宙船システムが打ち上げ直前まで、絶えず継続して解析され、飛行中は必要に応じていかなる異常も瞬時に認識し、適切な対応策が施されなければなりません。

これらの要求事項は、エンジニアや乗組員にとり重要かつ困難なものです。宇宙船の試験手順は細部にわたり記録され、予期する性能からのすべての偏差はプロジェクト管理者に報告されなければなりません。この偏差には設計ミスや、部品製作時のミス、試験手順によるミスあるいはオペレータのミスなどによる場合が考えられます。原因がどのようなものであっても、プロジェクト管理者は、この問題を理解して、二度と起こらないようにしなければなりません。どの宇宙船ハードウェアに対しても、試験や操作に関する正確な故障の報告が必要となりました。

宇宙船のプロジェクトチームは、プロジェクト全体で設計される宇宙船システムで行う、個人の役割と関係を理解し、心を一つにして作業しなければなりません。これを実現するため、管理組織内での意志伝達は、縦方向にも横方向にも自由でオープンなものでなくてはなりません。問題点や、発生の恐れのある問題を認識し、試験によって解決し、組織内でのどのメンバーからも対策を評価できるようにしなければなりません。実際、中程度の複雑な宇宙船でも、製作及び試験時に、1,000件を超える問題点が報告されることがあります。これらのほとんどは簡単に解決できるものですが、約10件は詳細な解析が必要となるものです。このような場合、JPLでは“タイガーチーム”を作り、打ち上げ前に問題点を

解決するようにしました。問題点がすべて解決されなくも打ち上げが許可されたケースも数例ありました。明らかにこれは、その問題点が許容できる内容のものであるという結果によるものです。

一例を示しましょう。ボイジャー2号で受信の問題が発生しました。2台の受信機のうち1台の自動周波数制御が働かなくなりました。我々はこれを恐らく使用しなくても済むであろうと思っていたバックアップ用受信機の方であろうと考えましたが、これを使用しても伝送する信号周波数を注意深くチューニングすれば通常の操作が行えます。実際の航行では、メインの受信機は打ち上げ後すぐに働かなくなりましたが、宇宙船オペレータはこのバックアップ用受信機で、10年以上にもわたり正常に交信しています。この受信機では、地球の自転や宇宙船の移動によるドップラー効果を計算し、受信機の温度変化にも対応できるよう、通信周波数が連続的に調整できるものである必要があります。伝送周波数は、計算周波数約10GHzの100Hz以内に収まらなければなりません。

我々のJPLでの経験によると、自動宇宙船を成功させるには、

1. システム設計の一貫性
2. 注意深い部品の選択
3. 細心の注意を払った製作
4. 試験時における詳細な失敗の分析
5. 十分なデータを報告できる遠隔システムの使用及び宇宙船で発生する細かな偏差の送信
6. 緻密な設計や過去の航行の経験を活かした一丸となった操作チーム

などが求められます。

この計画が太陽系の探査であれば、科学者やエンジニアに与えられる問題点は増大します。その理由は、打ち上げ軌道は目標の惑星の地球との相対的な位置により決定されるため、打ち上げチャンスがほんの数日のみであるということです。この時期を逃せば次の打ち上げ機会は数年先になってしまいます。

このような極めて困難なことにもかかわらず、JPLは最初の月でのレンジャー実験から外惑星のボイジャー探査機まで、惑星計画を長期間成功させてきた記録があります。現在では、マゼラン宇宙船は、金星探査のレーダーを完了し、ガリレオ宇宙船は木星に接近中です。この宇宙船は木星の軌道に乗り、4つの衛星に接近観測する予定です。また、プローブを発射して木星の大気を貫通させる予定です。

ここで、これらの計画で収集されたデータを示しましょう。これらは惑星とその衛星の写真です。もちろん、宇宙船は数多くの機器を搭載し、惑星付近や惑星間の宇宙や粒子を計測します。これらのデータにより、太陽風や惑星の磁場、惑星の大気、表面温度、地質の履歴などに関する知識が増えました。惑星学の科学分野は、現在我々地球からのものより多くの実験データが得られています。太陽系に関する革新的な理解は宇宙船以前の時代よりも大きく進展しました。

写真画像を作成するために解決すべき工学的な課題は、宇宙における極めて長い距離でのデータ伝送技術です。

海王星の写真は、宇宙船が地球から40億km以上の所で撮影されました。この距離を信号が伝送する時間は4時間以上となります。より理解しやすい言い方をすれば、電波信号は1秒間に地球を7周半します。これによると、ボイジャー宇宙船の信号は、地球の回りを110,000回まわる距離となります。月までの距離で換算すれば、信号は12,000回往復します。

これらの信号は、電波発信機から、出力がわずか20W、周波数が8.4GHzで発信されます。海王星のデータレートは、毎秒21.6Kbitでした。

この性能を達成するには、直径3.7mの高利得パラボラアンテナを地上に正しく向けて送信します。

地上における基本的な受信システムは、深宇宙網(DSN)として知られています。このネットワークは地球を取り巻くカリフォルニア、スペイン、オーストラリアの各基地で構成されているため、宇宙船は地球と連続的に通信可能です。ボイジャー計画では、各基地で、直径70mのパラボラ追跡アンテナが使用されました。

信号収集能力を高めるために、これらのアンテナが1個の巨大なアンテナとして作用するように配置されました。この最も大掛かりな実験で、深宇宙網ゴールドストーン、カリフォルニアの70mアンテナとともに、大規模配列(VLA)アンテナをニューメキシコで使用しました。ニューメキシコで受信した信号は、リアルタイムでゴールドストーンに送られ、そこで3倍に増幅されます。

DSNへはもう1か所、日本の白田からも来ます。このリンクはリアルタイム動作はしないのですが、宇宙船が惑星の裏側を通過したときの信号の減少を計測して、その惑星の大気に関するデータを作成するという電波科学実験に貢献しています。

宇宙からの信号を収集するアンテナは、鎖状に1つにつなぐれ、有効なデータを作成し

ます。生データはデジタル形式に変換された後、エラーを最小にします。このデータは圧縮されて使用可能な帯域幅内に納められる情報量を最大にします。地球上の電波受信機は、理論値に極めて近いSN比で動作しなければなりません。

ボイジャー計画で使用されたDSN受信機の雑音温度はわずか17Kでした。リードソロモン符号法のエラー率は、20%のビット増大に対し100万分の1です。ボイジャー宇宙船で使用されたデータ圧縮法で圧縮すると、ビデオデータは60%減少します。

換言すれば、新しいエンジニアリングアイデアを使用すると、このボイジャー計画では月の12,000倍の海王星の距離から20Wの送信パワーで良質のビデオ画像を受信することができました。

1962年の最初の惑星間計画以降の長距離電波通信の発展は素晴らしいものでした。1964年の火星からの最初の写真は、海王星までの距離の5%ですが、毎秒8.5bitで送信されてきました。1964年から1989年までの間に、通信能力は百万倍以上に高まりました。通信システムの性能向上は、この25年間に達成された技術進歩の目覚ましい一例となるものです。

圧縮技術や新しい符号化技術などの発展のいくつかは、宇宙船のコンピュータを再プログラムして宇宙船にも適用されました。この搭載コンピュータは、1974年当時で最高のコンピュータですが、30億km以上の距離からうまく再プログラムできたということは驚くべきことです。

太陽系の無人自動操縦の基礎的な技術が示されました。しかし、科学的な疑問点がより細部に至るにしたがい、その結果宇宙船の性能に対する技術はより厳しく要求され、更に新しい技術挑戦が必要となってきます。計画遂行のための財政上の制約に合わせるための技術的問題もまた発生します。

これらの問題の多くは、データ処理と宇宙船の制御に関連しています。幸い、マイクロエレクトロニクスの驚異的な発展のお陰で、宇宙船のシステム設計者の仕事はしやすくなってきています。しかし、それでも宇宙船レベルの要求に合わせるには、最先端の技術が必要であることには変わりはありません。

ロケットや、構造、アクチュエータ、電源など、宇宙船システム以外のパーツ性能によっても計画は制限されます。このため、ますます技術的発展と歩調をとることになります。この分野で研究している工学者や科学者は、数多くの興奮する挑戦に遭遇しています。我々初期のパイオニアは進むべき方向を示しました。しかし、皆様は我々に宇宙の片隅を理解させていただきたいのです。

ここ日本では、この30年間の技術、特にエレクトロニクス分野の発展をご存知のことでしょう。皆様の民生用エレクトロニクスデバイスのほとんどは世界をリードしました。我々宇宙研究者は、多くの分野で技術的な開拓者を輩出させてきました。皆様の発展は、我々の経験から引き出されることと確信しています。

ここで、特に深宇宙探査に関して、宇宙で次に何があるかを考えてみたいと思います。我々の太陽系の惑星、主としてフライバイ (fly-by) を含む我々の実験からは、この遠距離の世界とその衛星を理解するために必要な情報の一部のみを得ました。着陸や車両走行を含め、惑星への航行が続けて計画されました。一般に、必要な推力はより簡単に得られ、宇宙船も安くなったため、より多くの回数の航行が行われました。最新のエレクトロニクス技術により、着陸機や走行車両は極めて小型化、軽量化され、比較的小出力のロケットで打ち上げられるようになりました。

探査範囲もまた太陽系の主な惑星を越え、他の星にも及びつつあります。この中には、彗星や小惑星なども含まれています。ガリレオ宇宙船は既に2つの小惑星の近接写真を撮影しています。ハレー彗星は複数の宇宙船によって観察されました。

将来の計画には、太陽の周りを航行中に遭遇する彗星を観察したり、小惑星に着陸し、岩を構成する材料の性質を研究することなどがあります。

すべての惑星の中では、火星のみが適切な宇宙服を着れば人間が表面で活動できる唯一の惑星です。疑いもなく、この会場の多くの方が、火星への有人宇宙飛行計画をご覧になれると考えます。しかし、その計画の前に、我々は無人自動宇宙船により、火星に関してできる限り多くのことを学ばなければなりません。不幸にも数か月前に失敗しましたが、火星探査計画はその努力の一つです。宇宙船は火星の表面や大気、天候などを火星の1年間にわたって研究するよう設計されていました。同様な目的を持つ、これに代わる計画は、1996年に実行される予定です。

火星表面を走行する車は、JPL及びその他の研究所で開発中です。この惑星の広い領域を観察するための数多くの提案の中には、昼間は気球を使用して風で移動し、夜間は表面に降りて観察するというものもあります。表面探査は、火星宇宙船からの写真撮影に加える重要な追加作業です。解決すべき疑問点には次のような項目があります。

- 火星に生命体は存在するか、または過去に存在したか、
- 氷を融解して、または泉から水が得られるか、
- 有人宇宙船が着陸するのに、よりよい場所があるか、

火星のどの領域が地質学的に最も興味が深いのか、

火星には地震活動はあるのか、

どのような気象形態が存在するのか。

表面の岩石の化学成分はどのようなものか。

金星、地球、火星の3つの惑星は研究上特に重要です。これら3つの惑星にはそれぞれ明らかに異なる点や、疑問点があります。この原因を理解する必要があります。

数多くの衛星がある外側惑星には、全く新しい疑問点が起こってきます。さまざまな月に関しては謎が特に多いものです。

解決すべき疑問点は少なくなく、我々は現在これらの疑問点を研究する基礎的な技術的方法を持っていることを示してきました。しかし、これにはコストの問題があります。太陽系を探索する計画ではますますコストが高まっています。この原因の一つには、科学上の研究課題がより複雑になったり、予備のために、費用のかかるロケットをもう一基製造する余裕がないため、可能なかぎり信頼性を高める必要があるからです。高信頼性を求められるというプレッシャーそのものもコストを高める要因となります。

アメリカ合衆国のNASAでは、この連鎖的なコスト増大から抜け出そうと試みています。JPLを含む実験研究所は、複数の計画で使用可能なモジュラー宇宙船など、標準化を目指しています。このタイプの宇宙船は、目的を単純化し、重量も軽くでき、航行回数も増やせます。

太陽系を完全に理解、研究するには、新しい技術が必要となります。例えば、火星や他の惑星や衛星などから岩石のサンプルを地球に持ち帰る必要があります。ソ連は、無人の自動宇宙船により、月から地球にサンプルを持ち帰りましたが、惑星からは持ち帰っていません。火星表面での走行車両はまだ公にされていません。ソ連は再び、地球のコントロールセンターから操作して、月表面を走行すると表明しました。惑星の表面を走行する車両を地上で示しました。実際、それからすぐに、JPLと日本の電気化学研究所は、太平洋を隔ててロボット操作を行い公表しました。

宇宙船を送る国が、火星からのサンプルを持ち帰る計画と、表面を走行する車両を送る計画の両方を行うことが期待されています。その後、目標近くを通過するフライバイ、その軌道に乗ること、そして軟着陸、表面の移動、サンプルを地球に持ち帰るなどの探索のできる全体の技術を公にする予定です。

ボイジャーは、太陽系の端からでも宇宙船と交信できることを示しました。ボイジャー

と他の宇宙船は、どのような精度でも航行できることを示しました。太陽系は今や我々の探査領域に入ったのです。

時折、宇宙船を星に送るという提案が持ち上がりました。しかし、宇宙は無限の広さがあり、太陽を除けば最も近い恒星も手の届く距離ではありません。10年間宇宙空間をボイジャーが航行した距離は、光や電波ではただの4時間で到達する距離です。最も近い恒星でも、地球からは4光年以上あります。ボイジャーの平均速度でこの距離を航行すれば、到達するまでに86,000年かかります。もし、恒星まで宇宙船を送るのであれば、光速に近い速度で航行し、かつ長い年月を必要とします。一方、この宇宙をより広い星の研究に利用できます。宇宙空間では、地上のように地球を取り巻く大気の底にいて視界がぼんやりするようなことはありません。宇宙の真空空間では、光学望遠鏡は地上で見るとはるかに高性能となります。

現在、ハッブル望遠鏡は修理され、素晴らしく鮮明な星の画像を眺めることができます。ハッブルの歪んだ画像を修理するのに使用した主な機器は、JPLで製作された広角惑星カメラ(WFPC)です。

恒星に到達するもう一つの方法は、ある距離を離れた、知能を持った生き物からの電波信号を受信して地球外生命を探査することです。他の星も惑星系を持つ証拠を天文学者から得ています。今日まで地球外知的生命体から発せられた積極的に確認できる信号はまだ得られていません。

恒星や銀河から発せられる電波の鮮明な画像を得るために、超長基線電波干渉計を開発するのに地球近傍の宇宙も利用されています。JPLは、日本の航空宇宙研究所(ISAS)と共同でこの計画に関して研究を行っています。JPLの深宇宙追跡網はこの計画の主要なツールです。最初の惑星の打ち上げは、ISASのMUSE-Bで行われ、1996年を予定しています。

私は、JPLの宇宙事業の多くが日本となされているのを見て喜ばしく思います。事業の内容は、次のようなものです。

DSNの技術を利用して、この計画をサポートする機器を製作し、日本の宇宙船で打ち上げる。日本の科学者やエンジニアが、JPLで研究する機会を与え、共同研究計画を推進する。

このような共同作業は宇宙研究のすべての段階で特に重要なものであり、単に日米間だけのものではなく、他の宇宙開発国間も同じく重要です。この壮大な宇宙探査の冒険への

参加は、すべての人類に開かれたものでなくてはなりません。

我々が宇宙船を海王星に送り、地球を眺めたとき、明るく輝く星、太陽の近くにかすかな惑星として見えます。この地点からは問題を抱える地球という存在は、我々が生きている広大な宇宙から見ればほんの些細なことであるのです。

このような見方は、取るに足らないように思えますが、そうではなく、我々は地球から遠く離れた所に航行できる宇宙船を作ろうとしたり、我々のまわりの宇宙の神秘を敢えて理解しようとする人間の心に驚くことが大切です。

1969年7月20日のある一時期は、地球上のすべてのテレビとラジオは、アポロの月着陸に注目していました。我々はもう一度、最初の生命体を火星で発見したときや、人間が最初に火星に着陸したり、あるいはイオの火山の爆発をリアルタイムで眺めたり、タイタンの原油の湖にカプセルが着水したときなどに同じようなことを行うことができるのでしょうか。

何十億年もの間、我々の到着を待ち続けている世界があります。待ち続けている時代は終わろうとしています。我々は、後に続く世代のためにドアを開け放つ最初の世代なのです。

どうもありがとうございました。

記念講演会

## 脳におけるドーパミンの研究：過去、現在及び将来

アーヴィド・カールソン博士

イエーテボリ大学名誉教授

人間の脳の神経細胞の数は正確には知られていませんが、100億から1,000億の間にあると概算されています。この数値は、地球上の総人口を越えるものです。各神経細胞は他の数千に及ぶ神経細胞と近接しています。基本的な問題は、神経細胞がお互いどのように伝達しているかということです。1960年までの長い間、脳を研究する研究者の多くは、この伝達は純粋に電氣的なものと考えられていました。このため、細胞膜内の神経繊維を通過する神経インパルスの伝播が電気変化によるのと同様、神経細胞間の信号伝達も電氣的な変化によるものと考えられてきました。この考えは、この数十年で劇的に変わりました。現在では、神経細胞間の信号の伝達は、神経繊維突起から放出され、もう一方の神経細胞までの短い距離を移動する神経伝達物質と呼ばれる化学物質によって行われていると一般に受け入れられています。

1950年代に採り入れられた精神病薬や鎮静剤の効果に関する研究は、このパラダイムシフトに対して決定的に寄与しています。この薬が適用されたのと同じころ、ヨーロッパとアメリカの薬理学者は、2つのカテコールアミンのノルアドレナリンとアドレナリン、インドールアミン・セロトニンが、脳内に少量に数多く、生理学的に高い能動有機塩基が発生することを発見しました。ノルアドレナリンとアドレナリンは、その当時は、身体の末梢組織にある神経伝達物質とホルモンであると知られていました。このため、当時はセロトニンの役割は知られていませんでしたが、この物質は、ヨーロッパやアメリカの科学者により、末梢器官は強力な幻覚剤LSDを中和する可能性があるとして発見されて以後、注目を浴びるようになりました。このすぐ後、アメリカの生化学者のバーナード・B・ブローディ博士は、同僚の研究者と共に、脳内及び他の組織内のセロトニンの量は、精神病薬物質リセルピンを投与することにより劇的に減少することを発見しました。これは神経化学と脳機能とのギャップを埋める進歩となりました。

この発見のすぐ後の1955-56年に、私はブローディ研究室で半年の休養期間を過ごしました。そこの研究室で新しく開発された技術の概要を紹介していただきました。スウェーデンに戻った後、私はニールス・エーク・ヒラーブ博士や同僚と共に、リセルピンはセロトニンの量と同様、ノルアドレナリンやアドレナリンも同様に減少させることを発見しました。さらに、リセルピンの主な作用はセロトニンよりもカテコールアミンにリンクされることを示しました。このようにしてわれわれは、1957年にカテコールアミン前のL-DOPAがリセルピンの作用を示し、L-DOPAによる治療の後、脳内に集まらないため、ノルアドレナリン又はアドレナリンではなくアミンの形成によるものであることを見出し

ました。このアミンはドーパミンになり、当時は弱い作用物質と考えられていましたが、ノルアドレナリンとアドレナリンの生合成の中間生成物であることがわかりました。

さらに、1958-1959年にわれわれは、脳内で前物質より多くのドーパミンが発生し、レセルピン治療により消滅し、脳内で奇妙に分布し脳底神経節に多く集まることを発見しました。これらすべては、ドーパミンは単なる前物質というだけでなく、それ自体が作用を起こしていると考えました。さらに、脳底神経節での現象は運動機能の役割を示唆しています。当時はレセルピンは、患者に対して、致命的で一般的ではない運動機能障害のパーキンソン病とよく似ている症状を誘発する可能性があると考えられていましたので、この症状はドーパミンの不足によるものの可能性があると考えました。数年後、これはオーストリアのオレー・ホーンキヴィッツ博士により、パーキンソン病で亡くなった患者の脳を解析して明らかにされました。この方針に沿って更に研究され、パーキンソン病の治療でL-DOPAやその他のドーパミンが使用されるようになりました。この治療法により、これらの患者の生活の質と寿命を大幅に改善しました。

これらの観察により、われわれは神経液の伝達は神経系だけでなく脳内でも存在することを確信しましたが、最初はこの考えはあまり受け入れられませんでした。しかし、このことは我々のグループにより、ドーパミン及びノルアドレナリン、セロトニンも神経細胞内及び脳内の神経索でも発生し、末梢神経系と同様な神経分布形状を示しています。ここで、ヒラー博士は手法を改善して、これらのアミンが蛍光顕微鏡で組織学的に可視化できる改善法により大きく貢献しました。

我々の研究室で継続して研究し、カテコールアミンと注目のドーパミンが、例えばクロロプロマジンやハロペリドールなどの主な精神病薬の作用に重要な役割をする結論に至りました。これらの治療薬は、カテコールアミンが変化することが分かり、我々はこの作用は、神経伝達分子の融合性により特定のたん白質分子を信号伝達する、リセプターと呼ばれる阻止体で引き起こされるフィードバック機構の活性化による作用であると提案しました。この考察は、精神分裂症のドーパミン仮説の基礎を成し、それからは精神分裂症の研究の主要な役割を演じています。

精神分裂症については生理学的見地からも、治療法はなおドーパミン仮説に大きく支配されています。しかし、この仮説はほとんどの部分、薬理学的証拠に留まっています。さらに、精神分裂症のかなり多くの割合は、ドーパミン・リセプター説に反対する人による従来治療には効果がありません。これは、患者によってドーパミンが効を奏さない、異なる精

精神分裂の形を持っていることを示します。

最近の研究では、脳の機能を高める機構をより深く理解するため、ドパミンと他の神経伝達物質間の相互作用に注目しています。これらの研究は、神経伝達物質の役割を強調し、例えばノルアドレナリンやセロトニン、ガンマーアミノ塩基など他の神経伝達物質も、相互作用に大いに影響を与えているように考えられます。

最近われわれの研究室における死体での研究によると、精神分裂症患者は生化学的に異質なものであることを証明しています。この種々のモノアミン異常のパターンは、二つ又はそれ以上の病気発生機構が存在することを示しています。これらの異常は、主なモノアミンのすべてを包含しています。例えば、我々のグループによって発見されたカテコール代謝産物の新しいクラスの5-S-システイン・カテコール内転の高さは、少なくとも慢性精神分裂で、いわゆる自家中毒が拡大されていることを示します。セロトニン前物質と新陳代謝レベルは、異なるサブグループで増大又は減少され、セロトニンの変性で異常を示します。いくつかのデータは、少なくとも精神分裂患者では、基本的な分布はドパミン系以外の所にあることを示しています。

グルタミン酸塩は不足しているが、精神分裂症のあるケースでは臨床的には有効です。“精神分裂症のグルタミン酸塩仮説”を支持するにはより直接的な証拠が必要です。

ドパミンとその他の神経伝達物質関係に集中する研究は、例年大きく進展し、通常脳の機能と精神及び運動異常を起こす原因となる機構の両者の深い理解に向かっています。これは、言い換えれば有効な治療法に向かって新しい道が拓かれたということです。将来のこの分野の研究は、分子生物を包含する、さまざまな発展した神経生理学、神経化学、薬理学方法論、医療化学、最新画像技術及びこれらのデータ解析用コンピュータ利用による、強力な新しい技法の大いなる発展の恩恵を受けるでしょう。