

宇宙飛行技術の進歩（3・7・20）

前田 弘（昭19・理乙）

只今ご紹介を頂きました昭和19年に理乙を卒業しました前田です。よろしくお願い致します。私が卒業しました頃は丁度終戦直前の一番ひどい時で、私の場合は入学試験も何もなしで京都大学工学部の航空工学科に入学しました。しかし入学して間もなく昭和20年に終戦になり、航空に関する研究教育が一切禁止になりましたので、航空工学科も廃止されて私は新設の応用物理学科に移り、そのまま卒業しました。その後昭和25年から運輸省の運輸技術研究所というところに入所し、はじめて研究業務に従事することになりました。ところが昭和27年になって航空に関する研究の禁止が解かれて、研究所の中にも新しく航空部という部ができることになりました。主に旧海軍や空技廠などで航空関連業務をやっていた人達が集った訳ですが、私も航空学科の出身らしいということで、航空部の方へ移ることになり、それから本格的に風洞実験や飛行実験などをいろいろ教えてもらった訳です。そのお蔭で、昭和32年に京都大学に再び戦後の新しい航空工

学科ができたとき、私もその教室へ帰りまして、それ以来航空工学教室に約30年勤務しました。

このような事情で、私自身は航空機の飛行力学が専門ということで研究教育に従事してきたのですが、たまたま昭和38年に一年間海外留学の機会を得て、カナダのトロント大学へ行くことになりました。トロント大学には当時エトキン (B. ETKIN) 教授という飛行力学の著名な先生がおられたので、私はその研究室で航空機の運動の研究をするつもりで行ったわけです。ところがカナダに到着したその年に、偶然カナダの最初の人工衛星アルエット1号が打上げに成功しました。そのためエトキン先生の研究室ではその人工衛星の運動解析をやっていて、丁度そこへ私が行きましたのでよい手伝いが来たと思われたのでしょう、早速その運動解析に共同で取り組むことになりました。何分はじめての宇宙飛行関係の仕事ですので、文献を一から勉強して、結局一年かかってようやく論文を一つだけまとめて帰国しました。

当時日本ではご承知のように、東大で糸川先生がロケットの実験を続けておられた頃で、昭和39年頃と言えば無誘導弾道飛行といって、ロケットを丁度花火のように打上げて放物線を描いて落下させるといふ飛行をやっていた時期です。したがって日本では宇宙工学関係の研究はほとんどない時代でした。しかし将来は日本でもこの方面の研究が行われるに違いないという見通しで、京都大学の航空工学科でも宇宙工学関係の講義を始めようという機運になり、これが私にとつての研究の第一歩になった訳です。今思いますと、宇宙工学のような新しい工学の分野の研究を、

このように全く偶然の機会で手がけることになったのは本当に幸運であったと思います。

このような私事はこれで終りにして、これから所謂宇宙飛行について述べてみたいと思います。最初に宇宙飛行の歴史を簡単に述べたいと思いますが、ここで宇宙飛行というのは、云うまでもなく人工の物体を宇宙空間に打上げて飛行させるという意味です。この飛行原理は天体の運動すなわち地球が太陽のまわりを廻り、あるいは月が地球のまわりを廻るといような昔から天文学で非常に詳しく調べられている天体の力学の応用であることはご承知のとおりです。したがって宇宙飛行の原理はおそらく一六〇〇年代の頃から既に力学者の間では周知のことでした。

例えばニュートンがケプラーの惑星の運動に関する法則を用いてニュートンの力学法則を証明したことは有名ですが、同様に当時の力学者達は争って天体の運動を研究することによって運動力学の基礎理論を確かめていたことはよく知られた事実です。オイラー、ラグランジなど私達がよく名前を知っている著名な力学者達の理論的な研究成果が沢山残されています。したがって人工の物体を宇宙飛行させるにはどうすればよいかということとは、力学者にとつては古くからよく知られていたことは明らかです。その例として有名な「ニュートンの人工衛星の原理」と呼ばれるものがあります。が大変おもしろい考え方ですのでご紹介してみたいと思います。

今、地球の表面上に高い塔を建てて、その塔の上から例えばボールのようなものを水平に投げると、ボールは地球の重力によって地表面に落下します。もしボールの初速度を更に大きくすれ

ば、ボールはより遠方へ落下します。この初速度を更に大にしてゆくと、遂にボールは地球のまわりを一周してもとの投出した位置へ戻ってくるにちがいない。そうすればその後ボールは地球のまわりを周回する人工衛星の軌道に乗ることになる。

ニュートンはこのように説明しています。これは直観的によくわかる話ですが、もう少し力学的に表現すると、要するにこのボールに作用する遠心力が地球の重力と釣り合うという条件が成り立てば物体は地球のまわりを周回運動するわけです。

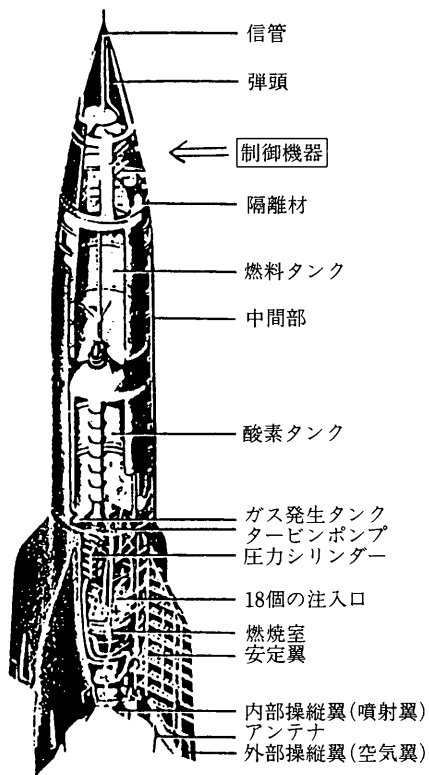
ただしこの運動を実現するためには必要な条件が二つあります。一つは先に述べたように遠心力が地球の重力と釣り合わなければなりません。この条件を地球の重力の値を使って計算してみると、必要な速度は約 7.8 km/S であることが簡単に求められます。もう一つの条件は打出し点が大気の影響を受けない高さでなければなりません。もし物体が空气中を 7.8 km/S のような高速度で飛ぶと、所謂空力加熱という現象がおこり、その表面は数千度の高温になるため丁度流星のように熔けて消失してしまいます。したがってこの打出し高度は大気圏外でなければなりません。数値的には高度二〇〇 km 以上が必要です。すなわちニュートンの人工衛星の原理で物体を地球のまわりの周回軌道上を飛行させるには、まずその物体を高度約 200 km のところまで持上げ、その点で水平に 7.8 km/S の速度で打出すことが必要です。

一口に 7.8 km/S と言いますが、例えば小銃の弾丸や大砲の砲弾の初速度は 1.0 km/S またはそれ

より少し大きい程度であることを思えば、 7.8 km/S は極めて大きい速度でとても簡単には実現できない値であることがわかります。

私の記憶ではジュールベルヌの小説であったかと思いますが、数百mの長い砲身の大砲を作つて人工衛星を打ち出す話がありましたが、要するに火薬の力でこんな高速を得るためには、このように長い砲身で加速しなければならぬことを示しています。すなわちこの 7.8 km/S という速度が宇宙飛行にとって最大の問題点であつたと思われまふ。勿論、もう一つの打出し点高度が200 km以上というのも極めて困難な問題であることは、私達の利用する飛行機の飛行高度が約10 km以下であることから明らかでしょう。すなわち宇宙飛行を実現するための二つの条件は、いずれも従来の技術を用いては乗り越えることのできない困難な条件であることが理解されます。これらの技術的な課題を克服できなかったことが一九五〇年代後半まで人類が人工物体の宇宙飛行に成功しなかつた理由と考えられます。

この問題の解決に曙光を与えたのが、第二次大戦の末期に出現したV2号（図1参照）という大型ロケットの技術です。ご承知のようにこのV2号はドイツで開発された軍用ロケットで、長さ約14 m、重量約13 tの一段式液体ロケットで、当時としては画期的な大型ロケットです。ドイツ軍はこのロケットを敗戦までに三千発以上製作し、主として英国のロンドンに向けて発射したことは有名な歴史的事実です。



全長	: 14m
発射時重量	: 13トン
航続距離	: 300km
推力	: 25トン

図1 V-2ロケット

戦後、このV2号の技術は、これを開発した技術者とともに、主として米国とソ連に引継がれることになりました。主任技術者であった有名なフォンブラウンは米国に移り、アメリカの大型ロケットの開発を指導したことはよく知られています。このV2号のような大型ロケットこそ人工衛星を実現させる可能性のある技術ではないかということが世界的に予測され、その後米国とソ連を中心に激しい大型ロケットの開発競争が始まりました。当時の新聞にはよく大陸間弾道弾などという物騒な話が出ていましたが、あれはロケットの大型化が進んで飛行可能距離八千kmなどという大型ロケットの開発成功を示すものです。当時は米ソ間で軍事力の拡大競争をやっていた時代ですから、お互いに相手を牽制する意味でこの大型ロケットの開発に総力を挙げていた訳です。

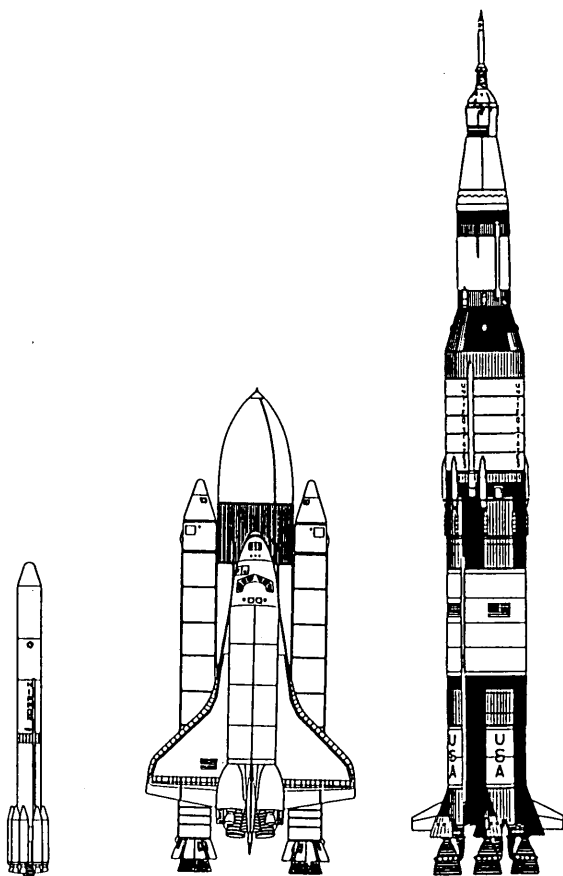
大陸間弾道ロケットができる頃には既に人工衛星を実現させるのに十分な技術的裏付けができてきた訳で、あとは人類最初の人工衛星がいつ実現するかということが世界的に大きな話題でしたが、ご承知のように一九五七年十月にソ連がスプートニク1号という人工衛星の打上げに成功しました。当時の新聞が大きな見出しで大々的にこのニュースを伝えたことは御記憶のことと思います。

米国はこのようにソ連におくれをとったので、一九五八年一月、すなわちスプートニク1号におくれること3ヶ月で米国の最初の人工衛星エクスプローラ1号の打上げを行いました。そして

その後米ソ間で人工衛星の熾烈な打上げ競争が始まった訳です。しかし当時の実情を見ると、ロケット技術ではソ連の方が圧倒的に進歩していたことは明らかです。

例えばソ連のスプートニク1号は重量が約80kgもありましたし、またそれに続いてライカ犬を積んだ衛星も打上げています。すなわちソ連のロケットは一九五〇年代に既に重量五百kg位の衛星の打上げ能力をもっていたと思われる。これに対して米国では、先に述べたエクスプローラ1号も実質的には精々重量十数kg程度の衛星で、ロケットの能力に格段の差のあることは誰の目にも明らかでした。したがって米国にとってソ連の大型ロケットの開発能力は非常な驚異で、何とか追付き追越したいというのが当時の米国の国をあげての願望でした。

このような事情を背景に、米国の当時のケネディ大統領はアポロ計画という大計画を提唱しました。これは一九六〇年代に月に人間（宇宙飛行士）を送って無事に地球に帰還させようという壮大な計画です。当時の米国は文字どおり世界一の超大国で、その国家予算の一パーセントをこのアポロ計画に支出するという力の入れようでした。計画では最初に月に宇宙飛行士を送り込むための超大型ロケットを開発しなければならないのですが、その結果完成したのが有名なサターンV型ロケット（図2参照）です。このロケットは胴体の直径が約10m、長さ約110m、重量二〇〇〇t以上という史上最大のロケットですが、米国はこれを一九六七年に完成しています。図には比較のためにスペースシャトルと、つい最近まで日本の実用衛星打上げ用に使用されていたN



N - II (日) スペースシャトル(米) サターンVアポロ(米)
 (1981) (1981) (1967)

☒ 2

ロケットを入れましたが、サターンVの巨大さがお判り頂けることと思います。

最近新聞などにもよく出ますので御存知のことと思いますが、今、日本ではH2というロケットを開発しています。H2は2tの衛星を静止軌道上に打上げる能力をもっていますが、直径約4m、長さ約40m、重量約200tですからサターンVと比べると格段に小型のロケットです。それでもいまだにエンジントラブルなどで苦労しており、完成予定の遅れが心配されています。このように大型化の技術は極めて困難なものですのに、サターンVのような超大型ロケットを二十数年も前に既に完成していた米国の技術力には唯々感嘆の外ありません。いずれにしても、アポロ計画の成功はこのサターンV型ロケットの開発と所謂システム工学的手法の採用のお蔭である、というのが定説になっています。計画の実施面ではアポロ11号の月着陸船が無事月面に軟着陸し、アームストロング船長が月面に人類最初の第一歩を印したのが一九六九年六月ですから、当初の目標は立派に達成された訳です。

このアポロ計画の推進によって、米国はロケット開発の面でもソ連を超越し、世界で最も優れた技術を手にしたと言われています。その後の宇宙開発の目ざましい発展については、今更申し上げるまでもなくよく御存知のとおりです。

最近では宇宙開発は科学探査、実利用および日本では殆んどありませんが軍用という三本立てで行われているのが、世界的にみれば実情です。また宇宙飛行という観点からすれば、既に地球

周辺の人工衛星の時代を過ぎて、太陽系内の惑星探査を行う人工惑星の時期に入っていると云えましょう。

宇宙飛行の歴史は概略以上のような足取りで現在に到っている訳ですが、宇宙飛行が日常的に行われるようになった最近では、宇宙飛行の目的はペイロードを宇宙空間に持ち上げること、すなわち宇宙輸送が第一の仕事です。したがってこれからは宇宙輸送技術の進歩と将来の展望について述べてみたいと思います。

現在のところ、宇宙輸送が大型ロケットに依存していることは云うまでもありませんが、ロケットも最近ではいろいろな種類のもものが提案されています。しかし現状では所謂化学ロケット、すなわち燃料の燃焼によって生じる高温高圧のガスをノズルをとおして噴出することにより、その反力として推力を出すロケットが依然として主流を占めています。この化学ロケットは固体ロケットと液体ロケット（図3参照）に大別することができます。

先ず固体ロケットは推薬と酸化剤を混ぜてゴム状にねり上げたもの（推進剤）を適当な形に整形してロケットの胴体（チャンバー）内につめ込みます。これに点火すると、推進剤が燃焼して高压ガスを発生するので、そのガスをノズルを通して噴出することによって推力を得る、これが固体ロケットの原理です。したがって固体ロケットは花火のようなもので、製作が簡単で価格も安いという利点があります。しかし欠点は、一度点火すると燃焼が終るまで途中で燃焼を止めた

り加減したりすることができないこと、またチャンバー内で推進剤が燃焼するためチャンバーに大きい内圧が加わるので、構造を堅牢にする必要があり、そのため重量が大きくなること、この2点が主な欠点です。

一方、液体ロケットでは酸化剤のタンクと燃料タンクが別々に作られていて、配管によって酸化剤と燃料が燃焼室に運ばれてきます。燃焼室で点火すると、やはり高温、高圧のガスが発生し、それをノズルをとおして噴出させることによって推力を生じる訳ですが、この場合は酸化剤も燃料も別々のタンクに入っており、また燃焼室も別に作られているので、ロケットを成形する外板は極くうすいものでよいこととなります。したがって全体として可なり軽く作ることができます。反面欠点は云うまでもなく構造が複雑で、配管やバルブなど多数の付属装置を要するため製作費が高いこと、故障を生じ易いことなどでしょう。ただし液体ロケットでは、適当なバルブ操作によって燃焼を止めたり再開したりすることが可能で、推力の大きさを加減することもできるといふ利点もあります。

したがって最近の趨勢としては、小型で比較的大きい推力を必要とする場合は固体ロケットを用い、大型ロケットの場合は液体ロケットを用いるのが一般的です。例えば先に述べた日本の大型ロケットH-2は三段式のロケットですが、下方の二段は液体ロケットで、上段（第3段）のみ固体ロケットという構成になっています。

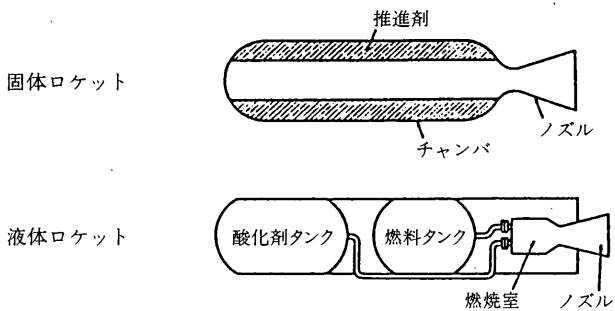


図 3

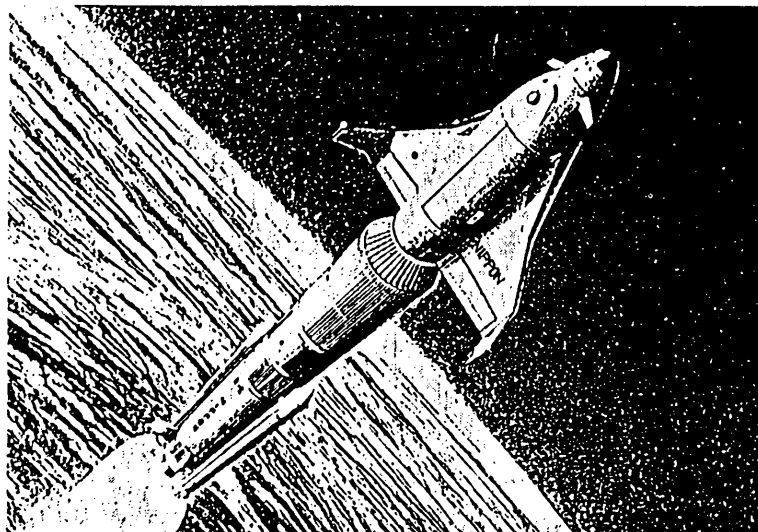


図 4 無人宇宙往還機(HOPE)の概念

固体にせよ、液体にせよ、これらのロケットの問題点は、ご承知のように一回打上げるとそのまま使い捨てにする点にあります。丁度百円の使い捨てライターと同じで、燃料がなくなると捨ててしまふ訳です。昔の固体ロケットのように小型で安価ならば、打上げ毎に捨てても大した負担にならないのですが、最近の大型ロケット、特に液体ロケットの場合は極めて高価で、製作費が百億円以上が普通でしょう。したがって、こんな高価なロケットを一回だけの使用で捨ててしまふのは極めて大きい経済的損失です。何らかの方法でこれを回収して再利用することはできないか、というのが最近の世界的な研究テーマになってきています。

これに先鞭をつけたのは、云うまでもなく米国のスペースシャトルで、これは一九八一年に最初の飛行を行っています。しかしスペースシャトルの場合は、回収再利用も勿論開発目的の一つですが、それ以上に米国の宇宙開発の基本理念、すなわち人間を宇宙空間で活動させるということと関連が深いと思われれます。これは米国が宇宙開発を始めた当初から一貫している考え方で、アポロ計画で月に宇宙飛行士を送ったのもその一つの表われですし、最近提唱されている宇宙ステーション計画も同様です。とにかく宇宙空間で活動するには人間以上に優秀なものはないということが確固たる信念のようです。これは日本とは非常に考え方の違う点で、日本の宇宙開発ではなるべく人間に危険なことをさせないで、できればロボットなどに委せたいという考えが支配的なのと対称的と思われれます。いずれにせよ、米国の場合は人間の宇宙活動を念頭に置いていま

すので、当然仕事を終えた人をもう一度地球上に連れ戻さねばならない。そのためには宇宙から帰還するシステムが必要で、これがスペースシャトルの開発の最も基本的な概念と思われます。

当時の技術水準からやむを得ない結果でしょうが、スペースシャトルはロケットの上に飛行機のような形態の機体（オービタ）を取付けたシステムになっています。オービタは回収再利用、ロケットも主燃料タンクのみ回収することになっていますが、再利用による経済性の向上は殆んど期待されないうのが現状です。しかしスペースシャトルが従来の使い捨て型のロケットに代るものとして将来を期待されたことは明らかで、事実米国では一九八〇年代から従来のロケットの使用を取止め、宇宙輸送はすべてスペースシャトルに頼ることを決定しています。ただ残念ながら、一九八六年に例のチャレンジャー1号の爆発事故がおこり、その後スペースシャトルの安全性、信頼性に対する風当たりが非常に強くなって打上げ頻度も大幅に低下し、米国の宇宙開発に重大な影響を与えていることは明白な事実です。

このスペースシャトルに対する信頼感の低下は米国以外の各国の宇宙活動にも様々な影響を与えることになりました。そしてこの機運に拍車をかけたのが宇宙ステーション計画であろうと思います。この計画は米国のレーガン前大統領が提唱したもので、地球周辺の高度約五〇〇kmの軌道上に大型の宇宙ステーションを構築し、訓練された宇宙飛行士以外の民間の科学者でも恒久的な宇宙観測や宇宙実験のできる施設を作ろうとするものです。

計画自体は既に国際協力で始められていて、トラス構造のステーション本体には米国、ESA（ヨーロッパ共同体）および日本の3個のモジュール（宇宙実験室）が取付けられることになっていますが、当初の予定では機材の打上げ、組立てから物資の補給、人員の交替まですべてのスペースシャトルで行うことになっていました。しかし先に述べたように、スペースシャトルが余り信頼できないということで、輸送計画の見直しが各国で行われるようになった訳です。

特に当初からこの計画に可なり批判的であったESAでは、将来ヨーロッパ独自の宇宙ステーション建設の構想もあり、その実現のためスペースシャトルに代る宇宙往還機を開発しようというので一九八五年頃からフランスを中心に検討が加えられ、HERMES計画などが進められています。

日本の場合もスペースシャトル依存の予定が見直しを迫られた結果、現在宇宙往還機HOPEの開発が進められています。HOPE（図4参照）はH-2ロケットの先端にシャトルオービタに相当する小型の飛行体を取付けたもので、先に述べたフランスのHERMESもよく似た形態のもので、したがってこれらはいずれもスペースシャトルと同様に、回収再利用の観点からは中途半端な計画です。

以上述べた宇宙輸送機の発達から、その将来の理想像は丁度飛行機のように飛行場から水平に飛び立ち、宇宙空間を飛行してまた水平に飛行場に着陸できる機体と考えられます。この計画は

SSTO (Single Stage to Orbit) と呼ばれていますが、その実現には技術的に非常に困難が予想されます。例えばエンジン一つをとってみても、地球表面の大気中を飛行するときにはジェットエンジンのように空気を利用したエンジンを使用し、一方空気のない高々度の空間ではロケットエンジンに切り換える必要があります。この両方の機能を備えたエンジン（エアブリージングエンジン）の開発が最大の課題です。その外SSTOの実現のためには、機体の軽量化や耐熱構造など克服すべき課題が山積していますので、その完成は多分二十一世紀初頭と予想されています。ただこのような新しい技術の実現の可能性ができたことと関連して、超高速の航空機、すなわちHST (Hypersonic Transport) を開発しようという提案がなされています。これもレーガン前大統領が提唱したもので、ニューオリエントエクスプレス計画と呼ばれていますが、例えば米国から日本まで三、四時間で飛行できる輸送機を製作、運航させようというものです。最近の国際情勢では、このような壮大な計画の実現の可能性は低いと思われるますが、先のSSTO計画と合せて宇宙飛行技術が航空機の技術とタイアップする時代が近づきつつあるものと理解されます。

戦後、一九五〇年代によく実現した宇宙飛行の技術が、僅か三十数年の間に今日のような進歩を遂げたことは驚きの外ありませんが、歴史的にみればまだまだ最初の数歩を印したところというのが現状でしょう。一つの新しい技術が生れると、関連する広範な分野で応用面が拡がっ

て行くことを思えば、今後の発展は予測が付き難いことですが、これまでの歩みが将来の進歩に
どのようにつながって行くかを眺めるのは興味深いことと思います。

本日は大変雑な話で恐縮ながら何かの御参考になれば幸いです。御静聴有難うございま
した。

(関西大学教授)