

アポロプロジェクトに使われたリアルタイム 複合計算機システム*

G. W. Ebker* (訳) 足立 暁生**

序

テキサス州ヒューストンの有人宇宙船センターは、アポロ宇宙船（司令船、機械船、月着陸船）の設計、開発およびミッションのコントロールに対する管理責任を持っている。

IBM は実時間データ処理サービスを提供するべく、有人宇宙船センターと契約を結んでいる。このシステム管理契約は、つぎのような内容である。

(1) ハードウェア: RTCC (Real Time Computer Complex) は5台の S/360 モデル 75, シミュレーション・システムとして、別に1台の S/360 モデル 75, 特殊インタフェース装置, これらをサポートするための S/360 モデル 75, 2台の S/360 モデル 50, 2台のモデル 30, 1台のモデル 20 の合計 12 台。

(2) ソフトウェア: 即時処理オペレーティング・システム, ミッション・オペレーション・プログラム, シミュレーション・プログラム, エラー診断システム。

(3) 上記ハードウェア, ソフトウェアの保守およびオペレーション。

1. システムの概要

宇宙飛行士, オンボード・コントロール・システムに関して, 常に新しい情報を飛行管制官に知らせるために, NASA は有人宇宙飛行ネットワークを作った。ネットワークは, 陸上基地と宇宙船の軌道に沿って配置された追跡船から成っている。ネットワークには, 18のステーションがあり, レーダー, デジタル・コマンド, テレメトリー, 声・通信機能を備えている。ネットワークからの高速データは, 2.4キロビット/秒の伝送ラインを通して, メリーランドにあるゴダード宇宙飛行センターの NASA スイッチングセンターで中継され, 40.8 キロビット/秒のラインでヒューストンに送られる。

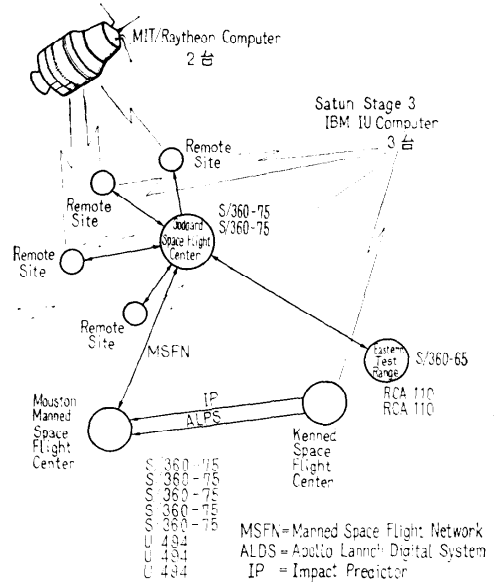


図 1

一方, 低速データは標準の 600 あるいは 100 語/分のテレタイプラインを通して伝送される。

ロケット発射前と発射フェーズの間は, データはアポロ発射管制システムから直接ヒューストンに送られる。テレメトリーは 40.8 キロビット/秒のラインで, レーダーは 2.0 キロビット/秒のラインで送られる。

レーダー追跡ステーションが宇宙船をとらえるのを指示するために, RTCC は当該ステーションが宇宙船と交信可能になる 25 分前に予定時間と方位, 高度のデータを送るようになっており, デジタル・コマンド・システムによって, RTCC はオンボードコンピュータに情報を送る。この情報は宇宙船の位置, 速度情報であったり, 操縦情報であったりである。

2. ミッション・オペレーション制御室

レーダー, テレメトリー・データは, ヒューストンのミッション・コントロール室に送られる。発射日が間近かにせまり, 飛行士のトレーニング・スケジュール

* The Role of Real Time Computer Complex in Support of Project Apollo, by Gerald W. Ebker (IBM, Houston)

** IBM 公共企業営業部・第一営業所

ルがせまってくると、コントロール・センターはプログラム開発、トレーニング、ミッション計画を同時にサポートしなければならず、非常にいそがしくなる。3階建てのミッション・コントロール・センターのオペレーション・ウイング（コントロール・センターは二つの翼から成る3階建てのビルである。訳者注）の1階には RTCC、2階、3階はミッション・コントロール室があり、コントロール室は全く同じ機能、構成のものが二つある。ミッション・オペレーション・コントロール室は、18の制御卓を有し、20～35人の管制官のグループで編成されている。飛行管制官の1人1人は、オンボード・ガイダンス・システムとか宇宙船のシステム・ブロックなどの部分を担当するように義務づけられている。コントロール室のとなりは、飛行管制官に対して技術的な援助をするスペシャリストがいるスタッフ・サポート室になっている。

3. リアルタイム情報管理

飛行管制官の前には、ミッションについての一般情報を与えるように設計された表示スクリーンがあり、RTCC によってアナログ形式でプロットされる。スクリーンは 34 本のペンと 5 個のスポッターにより、54 種類の表示が可能になっている。

RTCC はデータ・ベースとして、ミッション全体に関係するデータ・ファイルを扱っており、各管制官は自由にそれを検索することができるようになっている。

RTCC はつぎのようなテレビジョン表示を管制制御卓に出せるように、プログラムができています。

- (1) 2つの宇宙船のランデブーを司るための飛行データ。
- (2) テレメトリー・パラメータ・テーブル。
- (3) 追跡ステーションから受けたレーダー観測データの質を示す統計データのプロット。

各テレビジョン表示型式は、飛行管制官に関するものだけでも 50 以上を含んでいるし、全体で 643 種類ある型式のうち、44の表示を同時にすることができるように、RTCC はプログラムされている。一方、ディジタル表示と呼ばれる諸種のインディケータも、コンソール上に出すことができる。これらによって、宇宙船あるいはオンボード・コンピューターのスイッチのセット状態を監視することができるのである。ミッション・コントロール室では 4,847 のディジタル・ディスプレイのうち、2,201 個のユニーク・インディ

ケーションをみることができるし、コンソール上のスイッチのセット、あるいは、押しボタン・スイッチをセットすることによって、1,000 以上の演算要求を RTCC に出すことができる。

4. コンピュータ管理

ミッション・コントロール部門と別に、RTCC プログラムのデザインについて、充分知識を持っている10人のプログラマーと、システム・アナリストが1チームとなって、3チームのスタッフがいる。コンピューター・コントローラーは装置、データ・フロー、プログラムの状態を監視し、コンピューターからの絶えざる情報を飛行管制室に伝えることに専念している。すべてのミッションに関する決定は、飛行管制官が行なう一方、コンピューター・コントローラーは RTCC の装置、ソフトウェア、その使用に関する援助などの面での評価者である。コンピューター・コントローラー用のコンソールは、やはりミッション・オペレーション・コントロール室にあるコンソールと同じような設計になっている。x-yプロッター・ボードがプロジェクト・ボードの代わりに使われ、また、飛行パラメーターとして、1,596 個のパラメーターを含む 302 メッセージを入力するためのマニュアル・エントリー装置が使われている。

5. RTCC の機械構成

RTCC を構成する5セットの S/360 モデル 75 を述べる前に、単体のシステムについて述べ、ネットワークとミッション・コントロール・センターとのインタフェース（接続部分）について示し、その後で、ミッションのサポートと、飛行のシミュレーションを同時に行なう RTCC の構成について述べよう。構成中もっとも重要な装置は、システム選択装置 (SSU) であり、IBM によって、開発・作成されたものである。

その機能は、選ばれた1台のモデル 75 と、実時間オペレーション環境とのインタフェースとなり、コントロール室、ネットワーク、発射管制システムからの情報は、SSU を通して RTCC に入力される。RTCC の各モデル 75 は、全く同じ構成である。

すべての実時間入力データは、SSU によってアドレスされた後2902マルチプレックス・ライン・アダプターに送られる。マルチプレックス・ライン・アダプターは、2870マルチプレクサー・チャンネルに接続され、I/O ライター、リーダー/パンチ、2台のプ

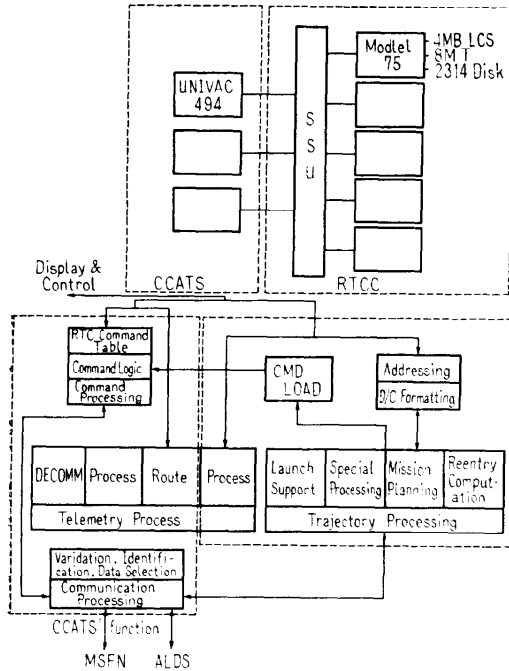


図 2

リントラ (1403 と 1440) のインターフェースになっている。テレビジョン出力は 2860 セクター・チャンネルから、2701 データ・アダプター装置を通して、SSU に送られ、しかるのち、コントロール室に送られる。その他の実時間出力データは、マルチプレクス・ライン・アダプターを通して扱われている。2324 集団ディスク装置は、ソース・コード、ロード・モジュールのための記憶媒体として、および実時間処理プログラムのデータ・ベースとして、ユーティリティ・プログラム、オペレーティング・システムの記憶媒体として使われている。また、4 億バイトの大容量コア記憶装置 (LCS) を実時間ロード・モジュールとデータ・ベースのための高速記憶媒体として使っている。1M バイトの主記憶装置は、オペレーティング・システム (OS) のほとんどと、実行中の処理プログラムのロード・モジュール、処理サブルーティン、それらに使われる定数データ・テーブルなどを収容している。

各 8 台の 2401 モデル 3 テープ装置は、すべての実時間データのログギングと、中間

データのログギングのために使われている。

マスター・プログラム・システムは、テープからディスクに書き直されるし、テスト・データはテープから読まれる。さらにコンピューター・リスタートは、テープから CPU, LCS のコピーを読んで行なわれるようになっている。

6 なぜ 5 台も必要か

システムの信頼性を保つために、RTCC はミッションの遂行中、リダundant (冗長な) な演算を行なうように設計されている。SSU はネットワークからのデータ、発射管制システムからのデータ、管制室からのデータをコンピューター、あるいはスタンバイ・コンピューターに入力するための経路コントロールに使われている。また、SSU はコンピューターからの出力を実際にアウトプットし、スタンバイ・コンピューターからの出力は出さない。これらのコンピューターの機能は、スイッチを押すことによって 250 ms で交替するし、また、他のコンピューターへの切り替えは SSU に装備されているプラグボードを操作することによって、11秒でチャンネル・チャンネルのリスタートを行なうことによってなされる。

ミッションに先だって、宇宙飛行士、飛行管制官を訓練するために、NASA は発射管制システムおよびネットワーク入力と全く同じ入力を、ミッション・コントロール・センターに提供するような、コンピューター・ネットワークと乗組員の訓練装置を作った。このシミュレーション・システムの一部が、6 台目のモデル 75 であり、IBM ヒューストンの管理下におかれている。

RTCC の装置である SSU は、シミュレーション・



図 3

コンピューター、およびシミュレーション・スタンバイコンピューターをシミュレーション・システムおよび2階と3階にあるミッション・コントロール室に接続している。

アポロ計画において、RTCCのこの機能は、非常に重要な要素となっている。そして、常にRTCCのコンピューターのうち、少なくとも一つのコンピューターは、実時間入出力には関係せず、バッチ処理を行っている。

7. リアルタイム用 OS

RTCCに関する契約に従って開発されたソフトウェアには、実時間オペレーティング・システムも含まれている。これはOS/360を基礎にしており、あらゆる種類の要求に最も早い応答ができるように独立のタスクに対するリソース・アロケーションを可能にし、キー・マネージメントの概念を取り入れて、プライオリティ・ベースで演算を行なう。もし、高い優先度のタスクがウエイトの状態にあれば、割込み処理により、即座にコントロールはそのタスクに渡され実行されるようにOS/360を改良している。その他OS/360でサポートされていない入出力装置についても改良している。ミッション・プログラムは、6億バイトの大きさであるが、主記憶装置に関しては、1億バイト分を占めるにすぎず、残りの部分は4億バイトの論理記憶装置(LCS)のディスクに置くようになっている。RTOSでは非常に使用頻度が高く、速い応答時間を要求されるプログラム、データは演算の遅れを防ぐためにLCSに置くのを原則としている。RTOSは自動的にすべての入力データのログをとる。そして、あらかじめシミュレートされた入力コントロールに従って、これらのデータは諸種のチェックの目的に使われる。

RTOSは実時間の環境をシミュレートするために、時間に同期した形で、入力データをテープにログする機能を持ち、80分の軌道データを約10分で処理できるような設計になっている。その他とくに重要なのはデバイス・インデペンデントに働くことである。なぜならば、各装置のダウンを考えるからである。また、テープを印刷すること、テープ・コピー、ディスク・ダンプなどのユーティリティ・プログラムもRTOSに含ませてある。要するに、RTOSの基本思想は、オーバーヘッドを最小にし、ミッション・プログラムの処理速度を最大にすることである。したがって、とくに割込みに対する応答時間を最小にしていることで

ある。さらに、フェイル・ソフト、フェイル・セーフの概念の導入も大事なことである。

RTOSには3億バイトの命令があり、55万バイトがオペレーショナルである。この55万バイトのうち14万バイトは、RTCCが働いている間中、主記憶装置に常駐する。残りの41万バイトは、バッチ処理に使われ、LCSにおかれている。実時間応答時間についていえば、入力について2.7ms、出力について1.94msである。

8. サブシステム

RTOSをミッション・プログラムのサブシステムとみれば、RTCCプログラムは8つのサブシステムからできている。

8.1 ミッション・コントロール・サブシステム

システムのイニシアライズを行なうとともに、システム・パラメータ、常数、地球物理的な特性、宇宙船特性などのパラメータを設定する。テレメトリー・データは解読され、キャリブレートされたのち、飛行管制官のデータとなる。テレメトリーは3つの任務を持ち、第1にオンボード・コンピューターの監視、第2に計器の監視であり、第3に宇宙飛行士の健康状態の監視である。

8.2 発射管制サブシステム

発射フェーズの飛道データの監視を行なう。ここでいうデータは、ALDS (Apollo Launch Data system) を司るIP (Impact predictor) からはいってくる。この監視システムはプロット・ボードを作動させ、速度-時間、速度-傾角、高度-水平距離、高度-時間を表示するのであるが、このシステムは全く別のデータ源、すなわち、レーダー・データと比較すること、LVDC (Launch Vehicle Digital Computer) データと、CMC (Command Module Computer) のテレメトリー・データとの比較、という3つの独立のデータ・システムを使ってシステムの信頼性を保つようになっている。このように発射フェーズで管制システムは、飛道の追跡を精密に行なうことによって、システムの万一の場合の脱出を常に想定して着水地点を予測するのが一つの目的である。サターン・ブースターの2段目の点火後30秒たつと、その後宇宙船のエンジンをを使って、軌道に正確にはいれるか否かの“軌道テスト”をすることができる。

8.3 飛道決定サブシステム

散在するレーダー追跡基地からのデータを解読し、

使用目的に応じて処理する。たとえば、距離、距離の変化率という2つのデータ、距離・方位角・仰角を示すCバンド・データ、慣性誘導指標のデータをIPから受けるという具合に、データの種類はいろいろである。レーダー・データの雑音は、カルマン・フィルターを使って除去している。接触飛道の決定には微分修正法が使われている。

8.4 軌道予報サブシステム

上記飛道決定サブシステムを使う。地球の衛星軌道においては、ブラウワーの天象歴生成プログラムを使っている。天象歴データ・テーブルは、他のサブシステムのためのデータとして保存される。

軌道の予報位置を地球上に投影したとき、どこステーションが宇宙船と交信可能であるかという計算をして、そのときのアンテナの角度をステーションに指示する仕事も、このサブシステムの役割である。

8.5 ミッション・プランニング・サブシステム

動力飛行の各フェーズの目標負荷を導き出すことが主目的となっている。すなわち月への飛道突入、突入コースの修正、月軌道への突入、月軌道から月面への降下、月面からの離陸、ランデブー、地球への飛道突入、中間飛道修正、再突入の各フェーズに関する計算を行なうものである。このためにミッション計画サブシステムは、オンボード・ガイダンス手法のおのおのについての写しを持っており、予報飛道はレーダー観測の結果、およびテレメトリーの結果と常に比較検討されている。これは宇宙船の操作を監視するためである。目標負荷を求めることは、時間的な制約が非常に強い。たとえば、中間飛道修正についてそうである。なぜならば、月への飛道に突入する場合は、“自由帰還経路”をとらなければならないという制約がある。このためには月への飛道にはいったあと、月周回軌道でのデータ予測、帰りの軌道でのデータ予測、再突入の場合の条件などをすべて調べなければならないわけである。これらの仕事には30分は必要であり、しかも、このプログラムは優先度が低く、しばしば割り込みをかけられるものである。

8.6 再突入サブシステム

第一に予定地点に着水するための飛行制御である。そのために姿勢の安定を保つこと、突入路のコントロールをすることがつぎの任務である。そして、ブラック・アウト（高密度大気層にはいって、宇宙船の速度がはやいために、周囲の大気がイオン化して通信不能になること。アポロ11号では12分間あった。訳者

注）の間の通信のサポート体制を作るために、その時間を予測することも大変大事なことである。

9. シミュレーション

シミュレーション・システムは、第1に飛行管制官の訓練であり、任務開始の60~90日前から始め、1週間に3日から5日間、1日に10~14時間の割で行なう。

このシミュレーションでは、ミッションの各フェーズを1日で行ない、通常の状態および異常条件を含む状態で、くり返し行なうのである。シミュレーション・システムの基本要素は、ヒューストンのモデル75である。

シミュレーション・コンピューターのデータ生成は、宇宙船のマーベル(MARVEL)・サブシステムであり、司令船、機械船、月着陸船、サターン4宇宙船に対して、並行的に数学的表現が与えられるように作ってある。このマーベル・プログラムは、約300の司令にこたえる2,000個のテレメトリー・パラメータをプロセスすることができる。飛行管制官と宇宙飛行士の訓練を総括するために、地上のシミュレーション・コンピューターは、司令船と月着陸船をシミュレートする非常に複雑な装置を作り出している。そのような訓練装置はヒューストンとケープ・ケネディに1セットずつあり、訓練の前半はヒューストンで、後半ケープ・ケネディで行なわれるのである。コミュニケーション・ラインは40.8キロボアである。シミュレーション・システムの一つの重要な機構は、ミッション管制センター、あるいはネットワークとのインターフェースである。

10. 開発費の見積りと評価

IBMはNASAとハードウェア、ソフトウェア、保守について契約を結んでいる。NASAは装置のコスト、ソフトウェア開発コストをチャージド・ベース(IBMからの請求によって払う形式)の話し合いで支払いその他に雑費を支払う。しかし、これは常にコストと能率の関数になっているが、契約のときの話し合いで、目標コストはすでに決まっている、したがって、IBMがこの目標コストより少ない費用で仕事を達成すれば、そのことによるプロジェクトのメリットが評価されて、その分だけ報酬がふえることになり、この逆の場合は、IBMは自腹を切らなければならないわけである。だから、われわれは4箇月ごとに評価され

ているし、常に開発スケジュールを気にしながら仕事をしているわけである。RTCC への要求は、契約をしたときには、まるで細かいことは決まっていなかったもので、毎日毎日 IBM と NASA の管理者は、そのことについて話し合いを続けていた。一度プログラム化されるべき問題が、どちら側からか提案されると、それは多角的に検討され、双方が有効であり、価値のあるものであると認めると、つぎに実際の技法だとか設計の方法について検討を始めるという具合である。たいていは IBM から提案し、細かい技法上の問題についても NASA と検討した結果、承認されてきた。

11. 開発日程管理と信頼性

開発部は予想完成日を予測するが、そのとき IBM と NASA の管理者は、どのミッションにこの機能が組み込まれるべきであるかを定めるために、完成日について検討するのである。できあがったプログラムの信頼度は、われわれの仕事にとって重要な要求の一つであるから、完成の4箇月前に、フローズン・ゾーン(凍結期間と呼び、それ以後はいつかの新しい機能の追加を許さない。訳者注)にはいるが、それ以後はどんなことがあっても、プログラム変更は行わず、どうしてもミッションに必要な機能で、プログラムに用意されていないものがあれば、そのミッションではその機能を削除するようにするのである。

NASA と IBM の両者が、ミッションの目標を共に理解したとき、開発部はそのプロジェクトのマイルストーンを設定し、以後週ごとにそのマイルストーンに沿ったレビューが行なわれるのである。契約ではプログラム構成に4レベルを設けてあり、第1のフェーズは発射・軌道・再突入についての諸機能を持ったミッション・プログラムを作ることであった。

501, 502 に対するミッションの定義は、システムのこの種の要求であった。フェーズ1に属する機能は発射管制、飛道決定、軌道予報、再突入の処理、機械船からのテレメトリー処理、および軌道変更、再突入を伴う SPS (Service Propulsion System), RCS (Reaction Control System) についてのミッション計画である。

フェーズ2は503と定義された地球軌道でのランデブー(地球軌道ではランデブー・フェーズはなかったから、講演者 Ebker 氏の感違いでではなかるうか? 訳者注)、さらに、フェーズ1では諸機能は、単独宇宙船についてのものであるが、このフェーズで2つの

宇宙船にした場合の機能を持たせることと、DPS (Descent propulsion System), APS (Auxiliary Propulsion System), RCS エンジンに関するミッション計画を含んでいる。フェーズ3は504, 505 ミッションに必要な月周回軌道に関するプログラムである。これは月の勢力圏内での飛道決定、軌道予報、月への飛道への突入、中間飛道修正、月軌道への突入、月軌道でのランデブー・プログラムを含んでいる。フェーズ4は最終的な月着陸プログラムであり、月への着陸、月面からの離陸、月面力学などの問題を含んでいる。

12. システムの検査方法

アポロのスケジュールを維持するために、連続的に起こる大量のシステム修正を施すために、ちょっと工夫したテスト法が使われている。テストは3レベルに分割されている。ユニット・テスト・レベルは最も小さいセグメント単位であり、ただ1つのロードモジュールか、何個かのロードモジュールを含んでいるか、1つのプログラムかのどちらかであるが、大抵はユニットは1人のプログラマーの責任下にある。ユニット・テストのスペックは、どんなテストが必要であるかどんなふうにやればよいか、その結果はどんなことになるかという予想について、具体的にプログラマーが指示する。これはそのプログラマーのマネジャーによって細かく検討される。われわれのプロジェクトの場合、マネジャーはもともと、いまの仕事の分野でのプログラマーであったために、非常に細かいことにまでよく気をくばっているし、技術的にもよくわかっていて仕事もうまくいっている。マネジャーが承認したスペックは、最終的に NASA に送られて承認されるという手順である。これでユニット・テストが完了するわけであるが、正確なユニット・テストの結果は、プログラマーによって書かれ、マネジャーと NASA によって検討される。テストの第2のレベルは、サブシステム・レベルである。

サブシステム・テストは、ユニット間のつながりに行なわれる。これの検討もユニット・プログラムと同じような手順がとられる。最後のレベルはシステム・テスト・グループによってなされ、プログラムに要求されている機能が果たされているか否かに重点がおかれている。システム・テストは実時間処理という条件の中でマスター・コントロール・システムに沿ってなされる。もし、このシステム・テストの段階で何

か問題がおこると、修正のために即座にレポートが出される。

システム・テストは大体2箇月かかる。システムはシミュレーションに使われるので、システム完成引き渡しの2箇月前には、おそくとも始めなければならぬ。そして、発射日の2箇月前には納入することになっている。

13. 独立に仕事できる管理組織の確立が成功のコツ

われわれは、組織間のインタフェースをできるだけ

少なくし、できるだけ独立に仕事ができるように管理組織を作り、システムズ・エンジニアリング、保守作業、ミッション・プログラミング、シミュレーション・プログラミング、RTOS プログラミング、解析、事務の機能とした。これによって各管理者は、自分達の独立の仕事のほかには、あまり力を入れる必要がなく、十分に目的を果たすことができ、他との関連がないということから、一つの部門の仕事がおくれたために、他の部門の仕事もおくってしまうということがない、というよい結果になったということを、強調したい。
(昭和44年12月4日受付)