

地球観測衛星によるリモートセンシング画像処理

Data Processing Techniques of Remotely Sensed Satellite Imagery

近年、地球資源の有効利用などの認識が高まり、衛星によるリモートセンシングが注目されている中で、日立製作所は日立制御用計算機HIDICによる我が国で初めての「ランドサット3号」衛星画像処理システムを完成し^{1)~4)}、更に「ランドサットD号」衛星画像処理システムを受注の上、SAR搭載衛星向けの画像処理システムも開発中である。

本論文では、これらシステムの中核である高速衛星画像信号処理方式について述べる。本方式は衛星画像信号処理の特殊性を十分考慮し、処理の高速化だけでなく記憶装置アクセスの高速化をも図り、超高速処理を達成できるものである。

山縣振武* Shinbu Yamagata
井原廣一* Hirokazu Ihara
久保 裕** Yutaka Kubo
小坂晃義*** Mitsuyoshi Kosaka

1 緒 言

近年、注目を集めているSAR(Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ)、更に昭和57年7月に打上げ予定の「ランドサットD号」に搭載のTM(Thematic Mapper: 光学センサ)などの衛星画像信号処理を、高速かつ高精度に行なうニーズが高まってきている。日立製作所では、「ランドサットD号」、通商産業省が昭和62年に打上げを予定している国産の資源探査衛星「ERS-1」をはじめとする将来の衛星にも適用できる高速衛星画像信号処理方式を開発した。

本方式は、処理の高速化だけでなく記憶装置アクセスの高効率化など、衛星画像信号処理の特殊性を十分考慮し、超高速処理を達成できるものである。

この種の方式としては、カナダのMDA社ほかがSAR画像処理実験システムを提案しているが、現在、SAR以外の衛星画像信号処理全体にも適用可能な実用高速処理方式の例はない。

2 衛星搭載センサの種類

光、マイクロ波などの電磁波をとらえる装置をセンサと呼ぶ。リモートセンシングのセンサには、可視光などの入射を記録する受動的方式と、レーダのように衛星から電磁波を発射してその反射波を記録する能動的方式がある。受動形センサの代表は「ランドサット」シリーズに搭載のRBV(Return-Beam Vidiconカメラ)、MSS(Multispectral Scanner)、更にフランスの「SPOT」衛星、日本の「MOS-1」衛星に搭載予定のCCD(リニアアレイセンサ)がある。能動形センサの代表はSARである。

RBVはテレビジョン方式により、視野全体を一定画面上に1ショットの短時間に映し出すものである。「ランドサット3号」は、可視光域($0.505\sim0.750\mu\text{m}$)の光をとらえるRBVを搭載している。MSSは地表からくる光、電磁波を反射鏡で集光しフィルタで分光して、幾つかの波長帯(バンド)に区切り

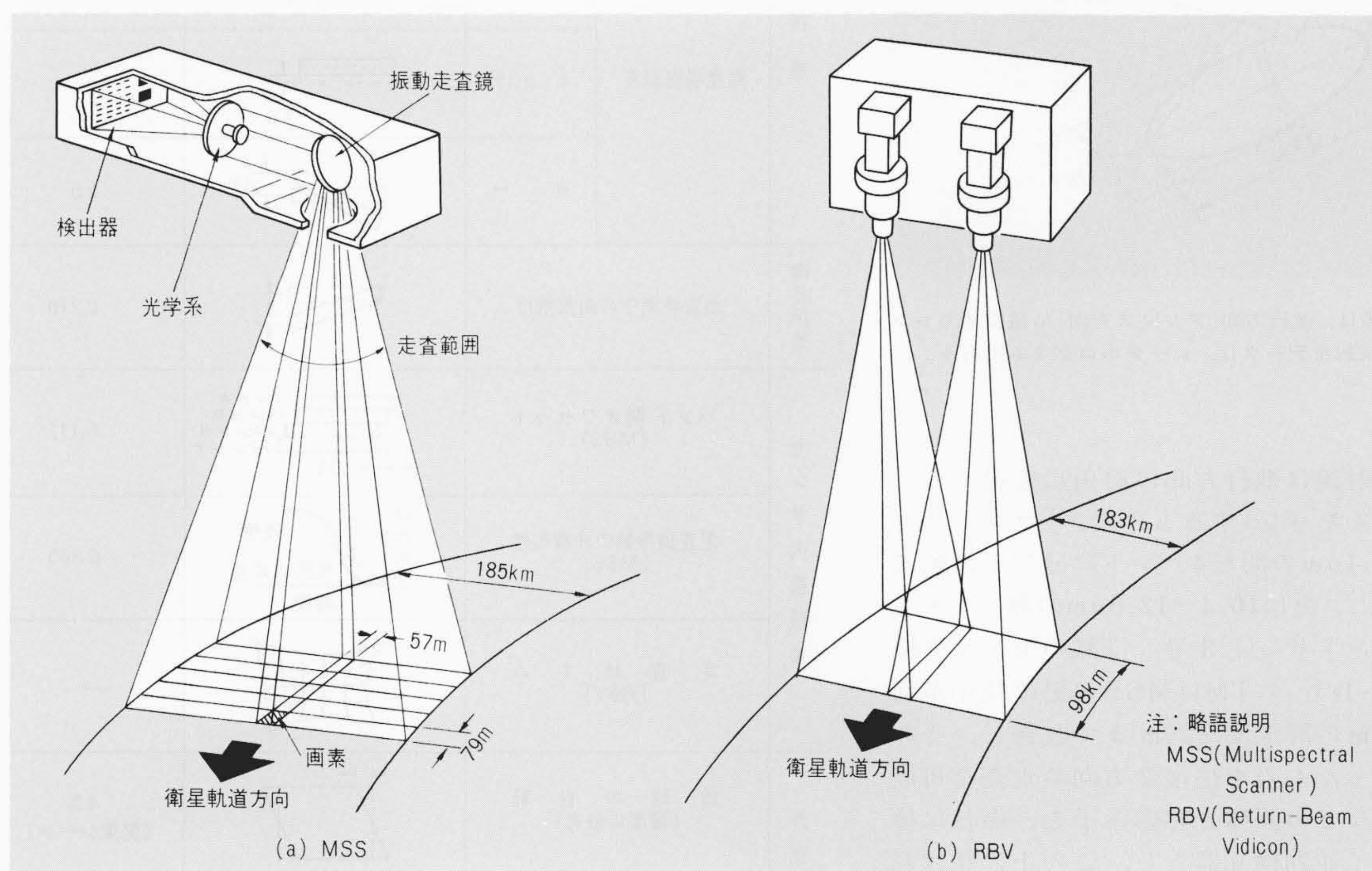


図1 「ランドサット3号」搭載のセンサ概要
MSSは、185km幅の地表を連続的に走査する。RBVは、12.5秒ごとに183km×98kmの地表を撮像する。

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所機電事業本部

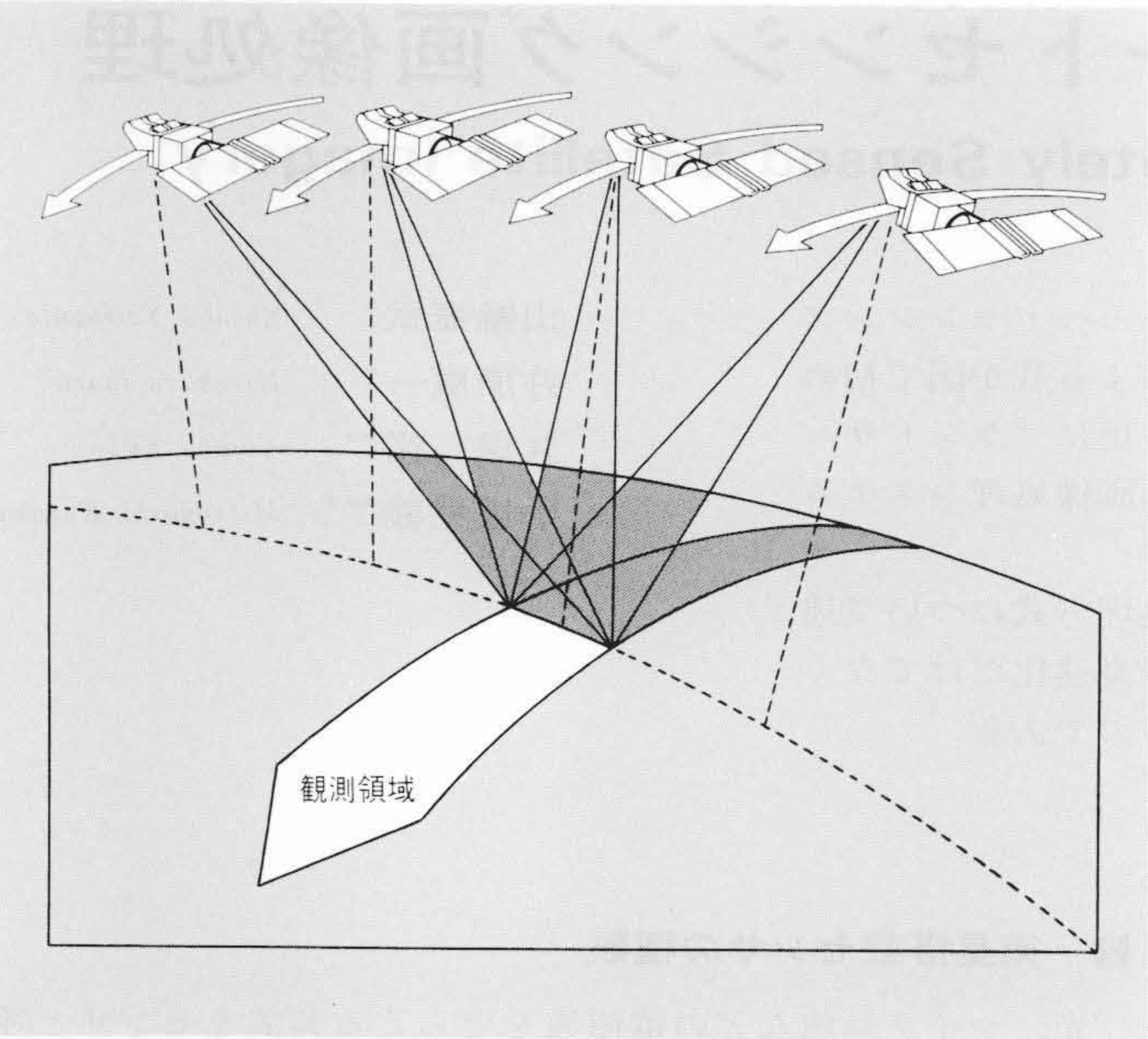


図2 フランスの“SPOT”衛星によるステレオ観測の概要 “SPOT”衛星は、同一の領域を異なった複数の軌道から観測することが可能である。

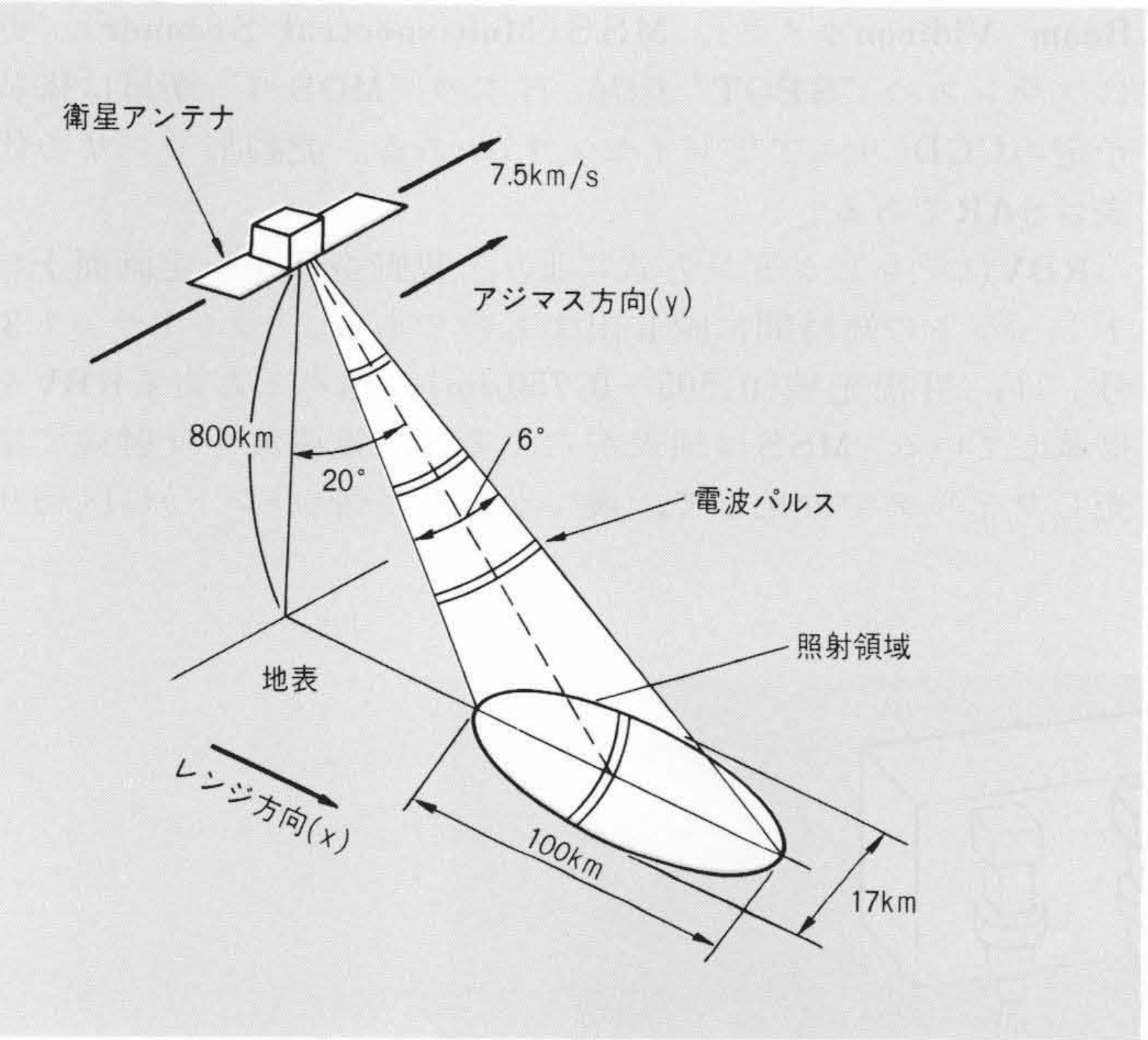


図3 SARシステム 衛星は、進行方向(アジマス方向)に直交するレンジ方向にパルス電波を発する。反射生データは、レーダホログラムである。

記録するものである。反射鏡は飛行方向に直角に振動することにより地表面を走査(スキャン)するもので、「ランドサット3号」の場合は $0.5\sim1.1\mu\text{m}$ の間を4バンドに分け1振動で6画素の列を一度に走査し、更に $10.4\sim12.6\mu\text{m}$ の熱バンドも加えている。図1に「ランドサット3号」搭載のセンサの概要を示す。「ランドサットD号」のTMはMSSに更に技術革新を加えたもので、従来79mの解像度を29mまで改善し、そのうえ従来1方向走査であったものを往復2方向の走査を可能とした。CCDはシリコンなどの固体光感応素子を、面状に極めて高密度に並べてアレイ並列検知器とし、この上に結ばれる光学的な像を電気信号に変換するものである。CCDセンサを搭載したSPOT衛星はステレオ画像処理が可能である。地球観測を更に高精度、多様に行なうニーズが高まり、衛星打

上げに至ったものである(図2)。
能動形センサの代表SARのうち、米国SEASAT衛星のSARシステムを図3に示す。衛星は進行方向(アジマス方向)に直交するレンジ方向に、 $1,647\text{Hz}$ でパルス電波を発する。この電波は持続時間 $34\mu\text{s}$ 中に時間に対し線形に周波数を増し、チャープ信号と呼ばれている。SARの反射生データはレーダホログラムであり、利用のためにはこれから画像を復元する必要がある。

3 画像処理の課題

観測画像には様々なひずみが混入し、地表換算の幾何学的ひずみは100kmにも及ぶ。更に1シーンのデータ量は 10^7 個以上であり、汎用大形計算機で数時間以上の処理時間を要する。一方、我が国のように土地の細分化と利用の多様化が高度に進んだ地域で衛星画像を利用する場合には、観測画像の幾何学的ひずみを実時間内に、1画素程度(「ランドサット3号」

表1 「ランドサット3号」の幾何学的ひずみの例 観測画像には衛星の軌道・姿勢のふらつき、走査時間中の衛星飛行、センサ内部誤差、地球の自転など様々なひずみが混入し、地表換算の幾何学的ひずみは100kmにも及ぶ。

誤 差 要 因		内 容	地表誤差(km)
衛星に起因する誤差	衛星軌道誤差	軌道直角方向 	37
		軌道方向 	30
		高度方向 	1.5
	衛星姿勢誤差	ロール 	12
		ピッチ 	12
		ヨー 	2.5
衛星誤差	走査時間中の衛星飛行		0.216
センサ内部誤差	バンド間オフセット(MSS)		0.112
	走査鏡振動の非線形性(MSS)		0.395
	走査ひずみ(RBV)		—
外部誤差	地球の自転(緯度に依存)		4.5 (関東シーン)
	視差		0.115

で80m)にまで補正しておくことが必要であり、観測画像を同じ地域の過去にとった画像と比較して変化を調べる際には、更に高精度の補正が必要となる。

ここでは昭和57年7月に打上げ予定の「ランドサットD号」のひずみ、データ量、要求機能及び性能について述べ、画像処理の問題点を明らかにする。なお、ひずみの要因を表1に示す。

3.1 ひずみ

「ランドサット3号」のMSSは走査形のセンサであるため、1シーンを撮像し終わるのに30秒近くかかる。このため、観測画像は衛星の軌道、姿勢のふらつき、走査時間中の衛星飛行、センサ内部誤差のほか、地球の自転による影響を強く受ける。「ランドサットD号」の場合は従来の「ランドサット」の倍以上の精度が必要なため、更に往復走査から生ずる走査間隙誤差についても考慮しなければならない(図4)。走査間隙誤差はジッタ誤差とアンダラップ及びオーバラップ誤差から成り、最悪の場合2.8画素に及ぶものである。更に考慮が必要なひずみとして放射計ひずみがある。これは検出器の感度のばらつきや変動によって、画素の濃度に生ずる誤差である。このひずみは、観測画像に検出器個数周期の横じまとして現われる。

3.2 データ量

1シーンのデータ量を図5に示す。「ランドサットD号」のTMでは入力画像で「ランドサット3号」の7倍、出力画像で5倍であり将来の衛星では更に増加の傾向にある。1シーンの大きさは「ランドサットD号」では170km×185kmと若干狭まるが、1画素の大きさが縦横両方向とも1/2となり、更にバンド数が5バンドから7バンドへと増加するために、入力画像で223.8Mバイト、出力画像で271Mバイトにも及ぶ。

3.3 要求機能と性能

要求機能で放射計ひずみ補正は、衛星打上げ前と後の較正データにより行なう。幾何学的ひずみ補正にはGCP(地表基準点)データを用いず、衛星の軌道・姿勢データだけを用いて行なうバルク補正、GCPデータ及び衛星の軌道・姿勢データを用いて補正を行なう精密補正、更に精密レジストレーション

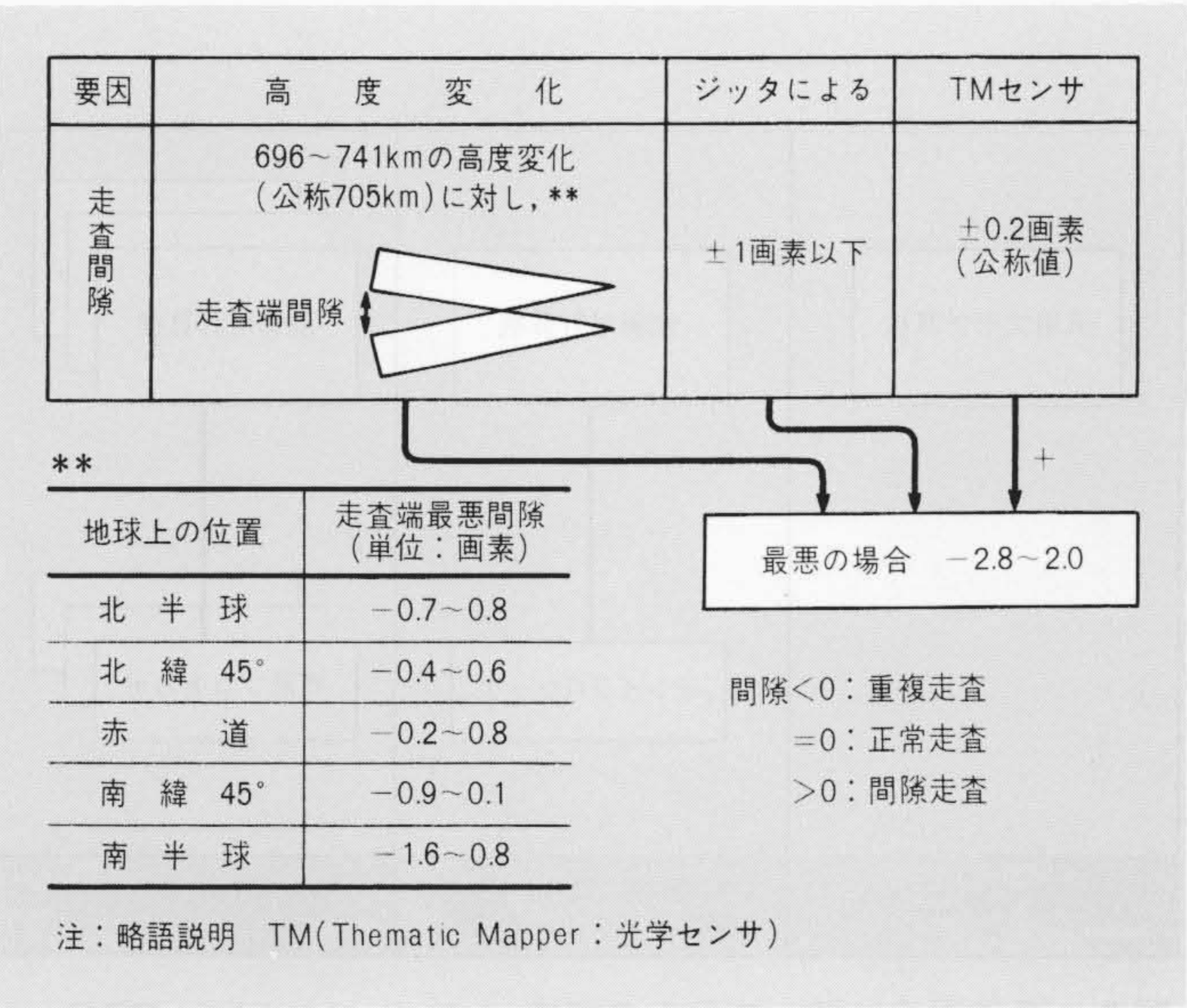


図4 「ランドサットD号」の画像走査間隙誤差 従来の「ランドサット」の倍以上の精度が必要となるため、走査間隙誤差についても考慮しなければならない。



図5 「ランドサット3号」と「ランドサットD号」のデータ量比較 「ランドサットD号」のTMでは、入力画像で「ランドサット3号」の7倍、出力画像で5倍である。

ン補正の三つがある。また更に地図投影法としてSOM(Space Oblique Mercator), UTM(Universal Transverse Mercator)の各法が可能であり、リサンプリング法としては最も近距離のサンプル点の濃度をとるニアレストネイバ法、ある周波数範囲内で失う情報が更に少なく、より自然な画像が得られるキュービックコンボリューション法が必要である。

目標性能のうち放射計ひずみ補正の精度は1量子レベル、幾何学的ひずみ補正のバルク補正精度は1km、精密補正精度は16個のGCPを用いた補正で30mである。「ランドサット3号」の場合は80mである。更に、観測画像を同じ地域の過去にとった画像と比較して変化を調べる際に問題となり、精密レジストレーション精度は15mである。処理速度は7.5時間で5シーンを処理可能なことが目標性能となっている。

4 高速衛星画像信号処理方式

ここでは、高速衛星画像信号処理方式の二大側面である処理フローとシステム構成について述べる。

4.1 処理フロー

本節では宇宙開発事業団に納入した「ランドサット3号」地球観測画像処理設備の衛星画像処理方式と、画像再生実験

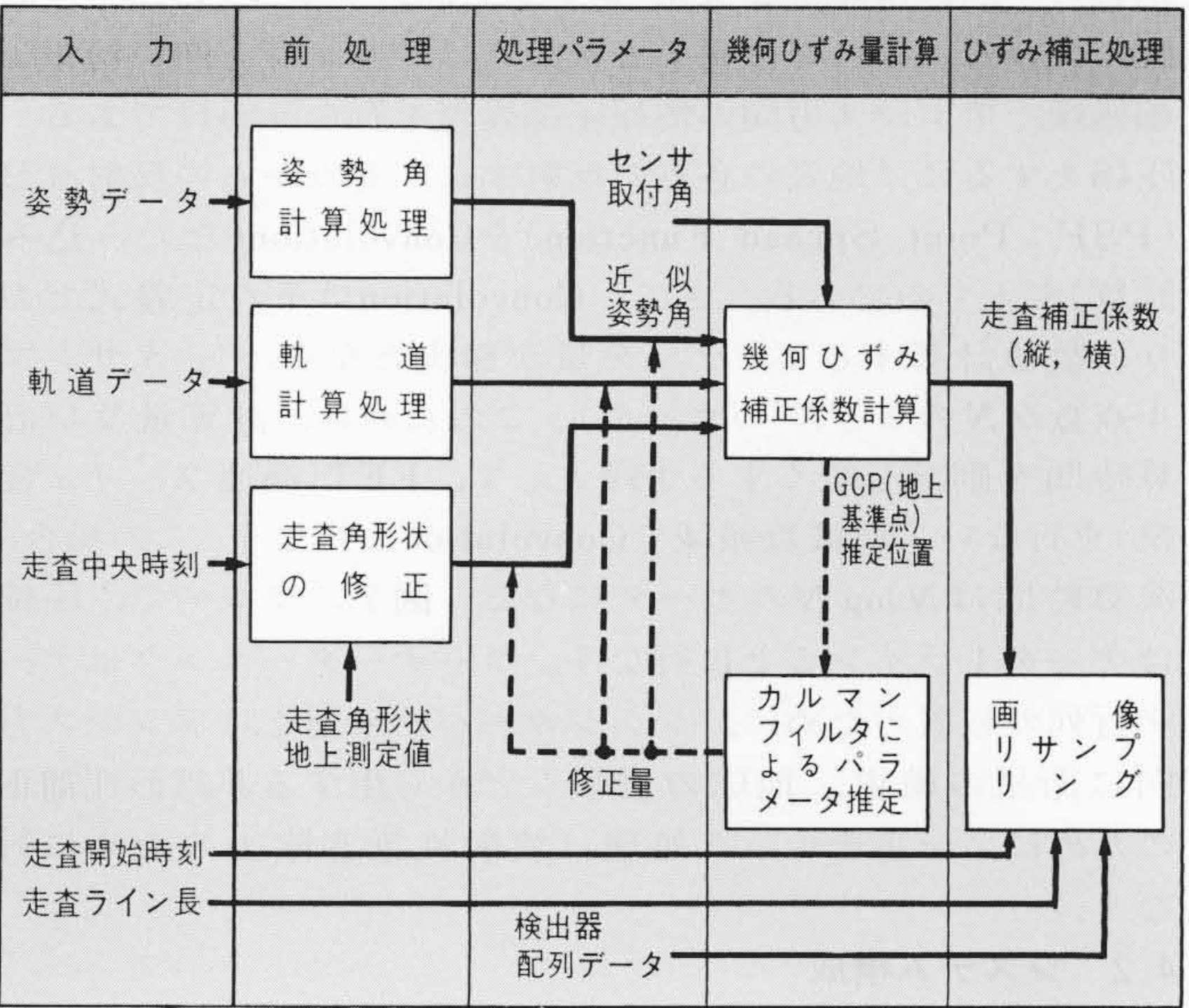


図6 「ランドサット3号」ひずみ補正ソフトウェアのデータフロー ひずみ補正ソフトウェアは、衛星の軌道、姿勢やセンサの特性に起因するひずみ発生の機構を解明し、これを精密にモデル化してひずみ量を求めるものである。

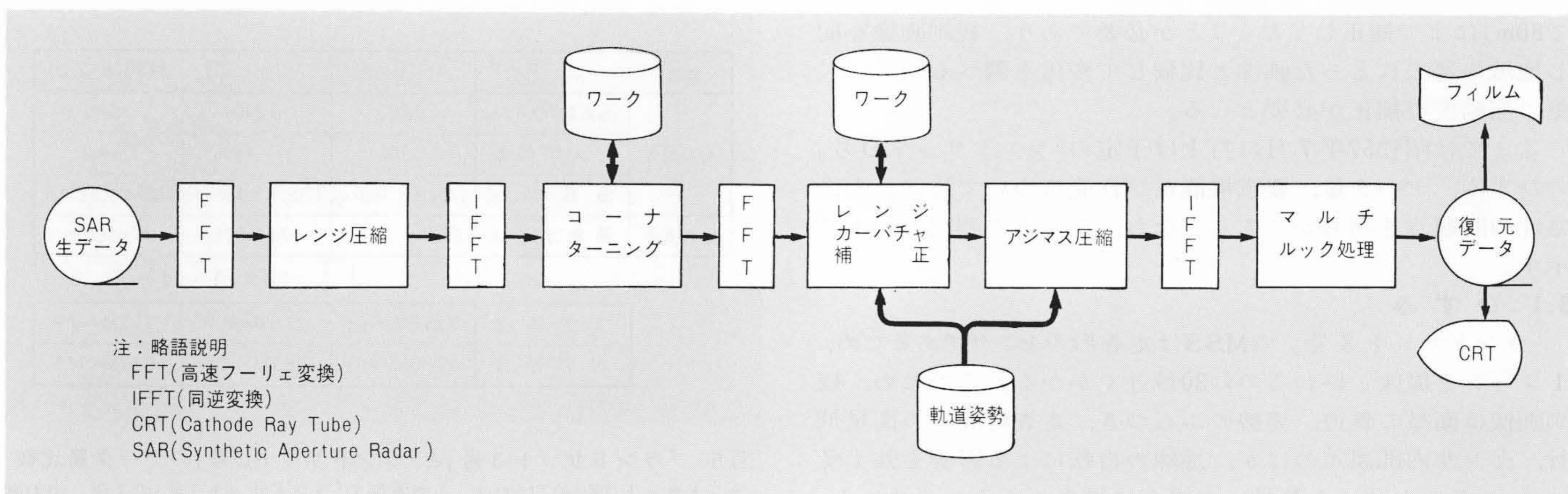


図7 SAR画像復元処理フロー SARの処理で生データはホログラム状の干渉じまであり、これを復元する際、散乱している情報の圧縮を行なう。

に成功したSAR画像処理方式の処理フローについて述べる。

要素処理の一つである画像ひずみ補正を取り上げて述べる。

画像ひずみ補正は、(1)観測画像の入力、(2)ひずみをもった観測画像の各画素を正しい濃度、正しい位置に置き換えるための放射計ひずみ補正関数及び幾何学的ひずみ補正関数を求めるひずみ計算処理、(3)この補正関数を用いて補正画像を作成するひずみ補正、出力から成る(図6)。幾何学的ひずみ計算の方法としては、多項式ひずみモデル方式がある。この方式は観測画像上の幾何学的ひずみの分布を、多項式で近似するものである。多項式の係数はGCPで実測した幾何学的ひずみから決定される。この方式では、補正精度を高めるためには1シーン中に多くのGCPが必要となる。

これに対し開発した衛星モデル方式は、衛星の軌道・姿勢やセンサの特性に起因するひずみ発生機構を解明し、これを精密にモデル化してひずみ量を求めるものである。本方式はGCPを用いなくとも、幾何学的ひずみを補正できるという特長をもっている。上記画像ひずみ補正アルゴリズムは、観測生データがレーダホログラムであり、画像再生しなければGCPを使えない能動形センサSARの画像処理にも不可欠な要素ソフトウェアである。

SARの処理で受信信号はホログラム状の干渉じまであり、地表の一点の情報が2次元(レンジ方向、アジマス方向)に散乱している。これを復元するためには、レンジ方向の情報圧縮処理、アジマス方向の情報圧縮処理を行なうわけである。圧縮をするには地表の各点の反射率に、各点からの反射波形(PSF: Point Spread Function)をConvolution(たたみ込み計算)するものである。さて、Convolutionはその定義式どおりに数値計算すると、データ量が膨大となる(データサンプル点数が N のとき N^2 のオーダー)。このために、計算量及び計算時間を削減し短くする手段として、FFT(高速フーリエ変換)を行ない、周波数領域でConvolutionを行なう。この場合、演算時間は $N \log N$ のオーダーになる。図7のフローで、圧縮はデータ1ラインごとに行なう。コーナターニングはデータ行列の転置のために、レンジカーバチャ補正はアジマス方向に衛星の軌道、地球の自転などから生ずる非線形性補正のために、マルチルック処理は放射性雑音除去のために行なう。

4.2 システム構成

衛星画像信号処理の内訳は軌道計算法(例えば、VINTIの重力ポテンシャルモデルを用いる解析的解法)、幾何学モデルと呼ぶセンサ・衛星・地球のモデルに関する誤差パラメータ

の推定計算、観測画像の1ピクセルごとに出力画像強度と位置を補正する画像リサンプリング、ホログラム生画像データに関するFFT計算、レンジカーバチャ計算などがある。更にこれらアルゴリズムの規模は、大規模計算制御システム並みであり、開発途上でアルゴリズムの修正追加などが頻繁であるなどの特徴がある。

以下では、このうちホログラム生画像データ再生処理実験の結果を述べた後、衛星画像信号処理のアルゴリズムに適合したシステム構成を紹介し、終わりに一例として「ランドサット3号」地上局画像処理システムの構成図を示す。

SARの画像再生アルゴリズムを、日立汎用大形計算機HITAC M-200Hで実行した。CPU(中央処理装置)処理時間にして合計6.5時間も必要であり、FFT計算が関連しているレンジ圧縮処理、アジマス圧縮処理の時間が長く、レンジカーバチャ処理ではチャンネル時間が長い。更に、全体計算時間にFFTが占める割合が90%で最大であることが分かった。そこで現在、世界最高速といわれるベクトルプロセッサについてFFTの演算時間を見積ったところ、AP-120B(FPS社)の数倍オーダーのスピードしか出せないことが分かった。商用ベクトルプロセッサの課題としては下記の3項目である。

(1) FFTの多重ループを、切れ目のないパイプラインとして

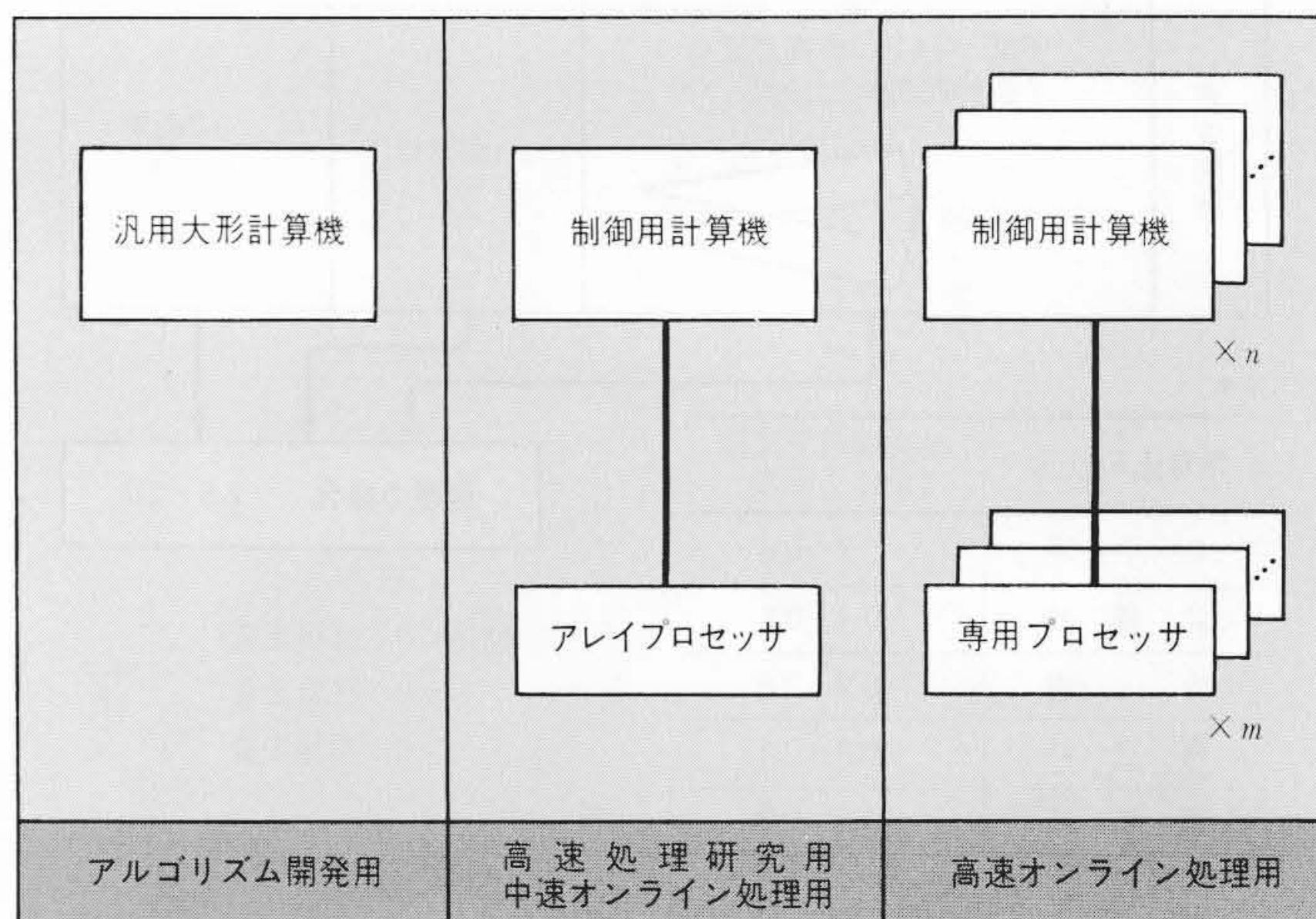


図8 衛星画像処理システムの構成 第一はアルゴリズム開発用として、高級言語によりソフトウェアの生産性を上げることが可能な汎用大形計算機、第二はアーキテクチャの研究用構成、第三は、超高速計算システム用の構成である。

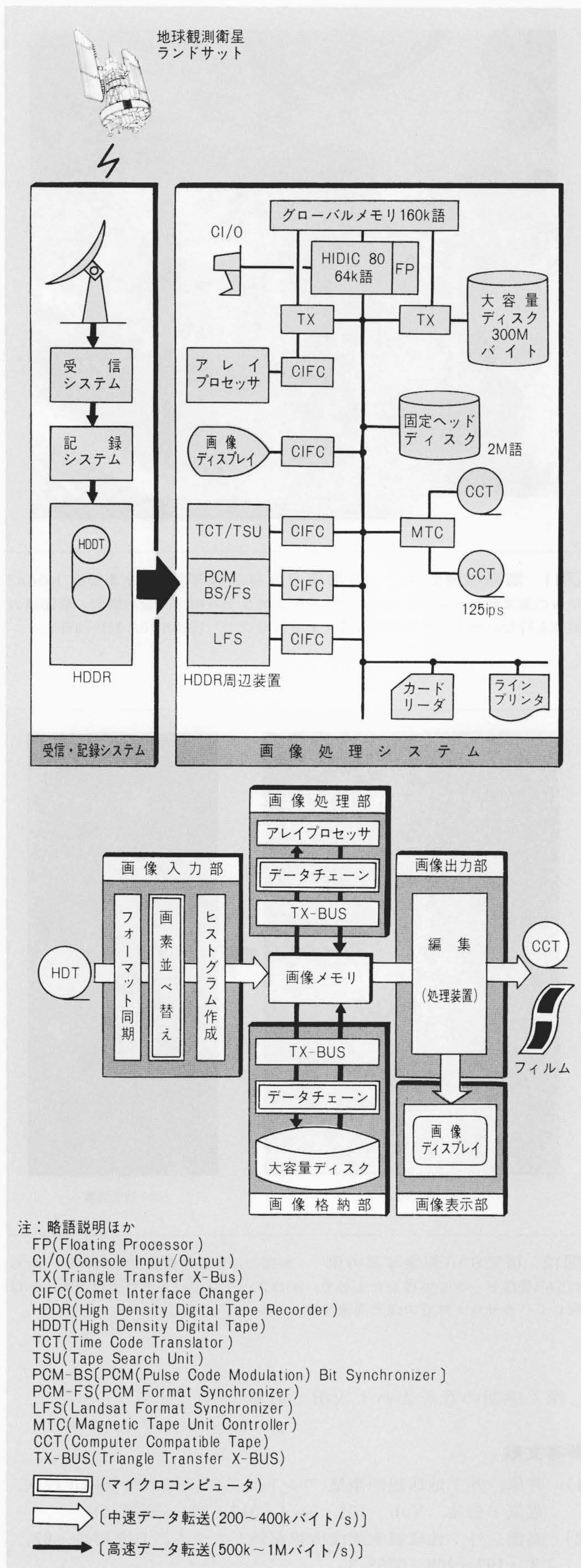


図9 「ランドサット3号」衛星画像処理ハードウェア構成図 ユーザープログラマブルアレイプロセッサは、ソフトウェア生産性には難があるものの、現時点では最も能力があり、「ランドサット3号」地上局画像処理システムアーキテクチャの構成要素として採用した。

構成できない。

(2) FFT演算の前後、画像転置、内挿処理などでのデータ並べ替えに時間がかかる。

(3) データアクセスがメインメモリの特定バンクに集中するため、メモリアンタリーブの有効性が生かない。

さて、日立製作所は過去の衛星画像処理システムの開発に当たり図8に示すような位置づけを行なっている。すなわち、第一にアルゴリズム開発用としては、高級言語によりソフトウェアの生産性を上げることの可能な、汎用大形計算機を用いる。第二に高速処理のためのシステムアーキテクチャの検討、プロトタイプ構築のための制御用計算機+アレイプロセッサを用い、第三に高速オンライン処理用として制御用計算機を n 台、更に専用プロセッサを m 台をつけ加えたシステム構成を用いる。二番目のシステム構成は、中速オンライン処理用でもあり、現在宇宙開発事業団に納入済みの「ランドサット3号」地上局画像処理システムがその代表例である。図9にシステム構成図を示す。本システムで画像情報が往復する画像処理部、画像格納部では500kバイト/秒以上の高速データ転送を実現させたこと、また、高速データ転送による負荷のCPU処理への影響を避けるため、TX-BUS(CPUを介さずに画像メモリへ直接データ転送を行なう方式)を採用した。アレイプロセッサの結合に際しては、その効果を最大限に引き出すため、データ転送に伴うプログラムオーバーヘッドを最小化するように、マイクロプロセッサによるデータチェーン機能を介する方式としたことが主な内容である。

5 高速衛星画像信号処理方式の適用

高速衛星画像処理方式には広い適用範囲があり、適用の研究開発も幅広く進めている。本稿では、その一部として下記の3項について紹介する。

5.1 画像組合せ処理への適用

「ランドサット」衛星搭載のセンサには、低解像度であるがカラーのMSSと、高解像度ではあるがモノクロで濃淡むらのひずみをもつRBVがある。この二つの個々にひずみ補正した画像を組み合わせ、高解像度、カラー、低い濃淡むらのひずみの画像を合成したのが図10に示す写真である。感度差モデルによりスペクトル感度差を考慮して、合成画像を生成した。

5.2 気象衛星「NOAA」利用漁業情報システムへの適用

気象衛星「NOAA」からの海洋観測データを受信して、海面温度などの海洋実況情報を作成し、漁業情報として漁船にファクシミリ伝送する漁業情報システムの開発が水産庁を中心に進められている。本システムの基本的機能は、受信衛星画像の幾何学的ひずみ補正、雲の識別、複数日データの重ね合せ処理による雲面積の削減、温度分布図などの画像出力の各処理から成る。図11に出力結果の一例を示す。

5.3 SAR画像復元処理実験への適用

SARの画像復元処理は、既開発の「ランドサット3号」画像処理と比べて格段に大きな計算能力、記憶容量を必要とする。米国海洋観測衛星「SEASAT-1」搭載のSAR受信データを手し、日立汎用大形計算機HITAC M-200Hで処理したところ、 $8,192 \times 8,192$ 画素²の入力データから $53 \times 33\text{km}^2$ の復元画像を得るために、CPU 6時間30分を必要とした。「ERS-1」に搭載予定のSARの画像復元処理システムに対する目標性能の一つは、1日に80枚の画像を出力するというもので、約500MFLOPSの処理能力を必要とする。図12(a)は、スペインのバルセロナ付近のSAR生データ写真を、同図(b)はその復元画像を示すものである。



(a) RBV画像(東京中心部)



(b) MSS画像(波長帯 $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$)



(c) カラー化RBV画像(波長帯 $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$)

図10 組合せ画像処理への適用 「ランドサット」衛星搭載のセンサMSS(精度80m, 4バンド)とRBV(精度30m, 1バンド)の各々の長所を組み合わせ、高解像像, カラー, 低い濃淡むらひずみの画像(精度30m, 4バンド)を合成した。

6 結 言

衛星リモートセンシング画像処理の中核技術として、超高速衛星画像信号処理方式を開発した。本方式は衛星画像のひずみ発生機構を詳細にモデル化し、高精度画像補正を行ない、更に超高速な画像復元処理も可能とする特色をもっている。

最後に、この研究の全般にわたり御指導をいただいた関係各位、及びデータの利用、その他の多くの面について御協力をいただいた宇宙開発事業団、社団法人漁業情報サービスセンター、財団法人資源解析センターほか多数の関係各位に対

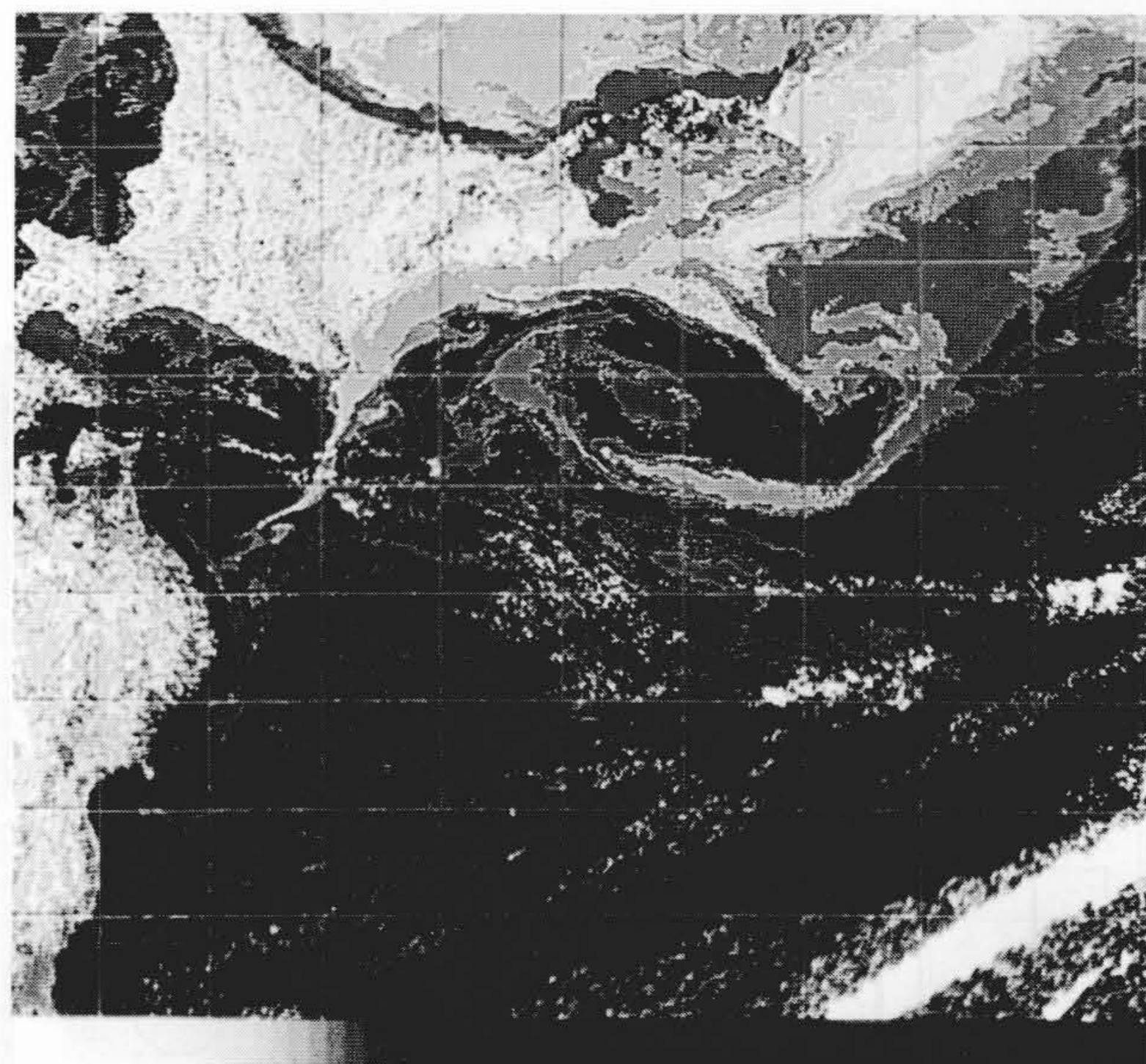
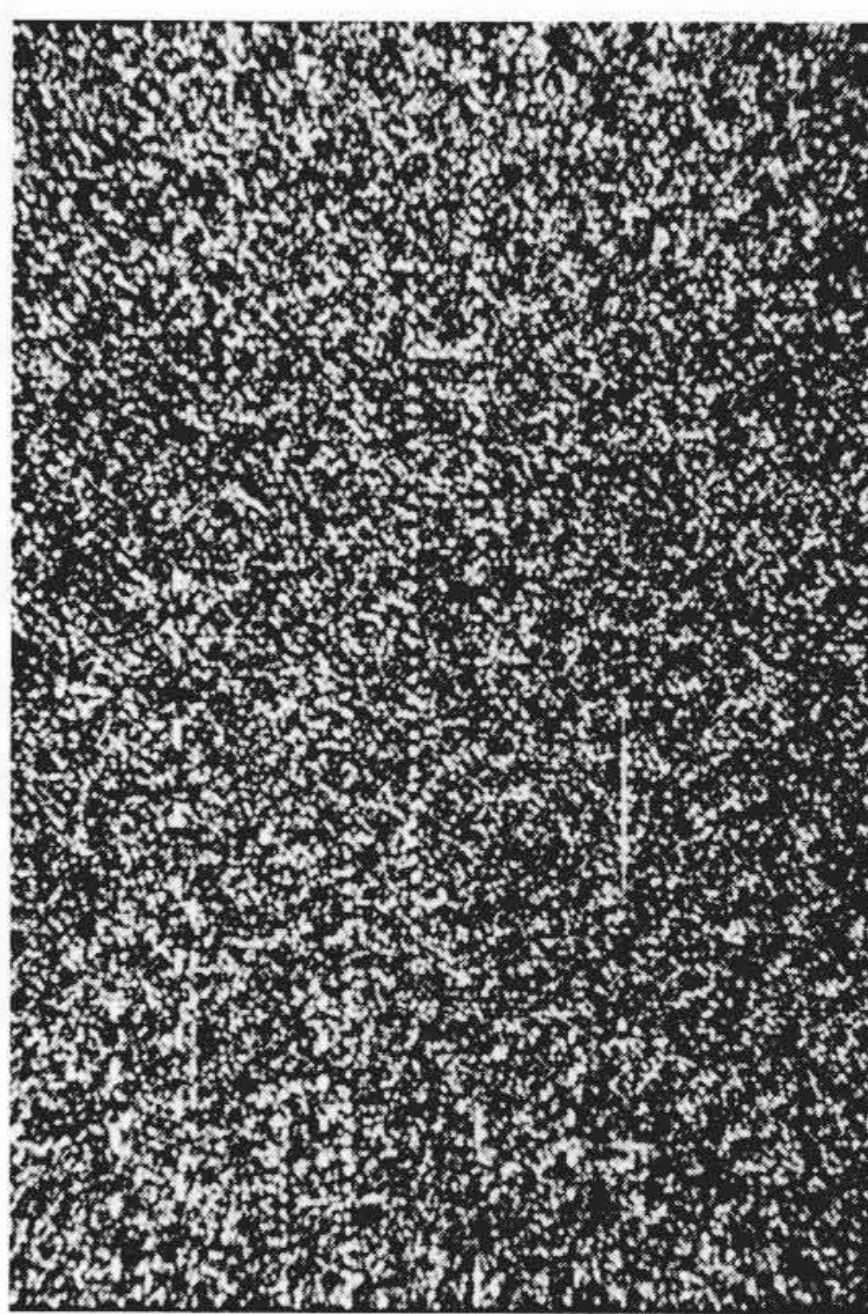


図11 雲領域補間法による海面温度等温線写真 気象衛星“NOAA”からの海洋観測データを受信して、幾何学的ひずみ補正、雲の識別、雲面積の削減を行ない出力した等温線写真である(1℃ごと 1980年10月3日～5日)。



(a) SAR生データ



(b) 復元画像

図12 復元SAR画像写真の例 米国の海洋観測衛星“SEASAT-1”からのSAR受信データを処理したもので、(a)はスペインのバルセロナ付近を、(b)は同じくバルセロナ付近の復元画像写真である。

し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 井原, 外: 地球観測衛星(ランドサット)画像の精密補正技術, 電気学会誌, Vol. 101, No.4 317~324 (昭56-4)
- 2) 高橋, 外: 地球観測画像情報記録システム, 日立評論, 62, 3, 197~202 (昭55-3)
- 3) 高橋, 外: 地球観測画像情報処理システム, 日立評論, 62, 3, 203~208 (昭55-3)
- 4) 土屋, 外: 全デジタル方式による高精度地球観測画像情報処理技術, 日立評論, 62, 3, 209~212 (昭55-3)