

ガンマ線バースト観測衛星 HETE-2 の打ち上げ

河合 誠 之

〈東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail:nkawai@hp.phys.titech.ac.jp

高エネルギー・トランジェント探査衛星 2 号機 (HETE-2) は宇宙ガンマ線バースト観測を主要な目的として、2000 年 10 月 9 日に赤道上空の高度約 600 km の軌道に打上げられた。HETE-2 衛星は、日米仏の国際協力によって製作され、軟 X 線領域からガンマ線までの広い領域に感度をもち、反太陽方向を中心とする半径約 40 度の視野を監視する。この視野の中で発生したガンマ線バーストの位置は、衛星機上で高い精度で決定されてただちに地上に伝えられ、希望する人には誰にでもインターネット等を通じて配信される。これによって、今まで非常に難しかったガンマ線バースト発生直後からの追跡観測を実現する。本稿では、1983 年の最初の構想から、1996 年の一号機の打上げ失敗を経て現在にいたる HETE 計画の経過と、打上げ後の現状について報告する。



図1 HETE-2のロゴ

1. HETE-2 の打ち上げ

昨年 (2000 年) 10 月 5 日、高エネルギートランジェント衛星 2 号機 (HETE-2) の打ち上げオペレーションに立ち会うため筆者は米国フロリダ州の NASA ケネディ宇宙センターにやってきた。HETE-2 は、太平洋のほぼ中央にあるマーシャル諸島共和国クウェジリン環礁にあるアメリカの基地から、ペガサス有翼ロケットによって赤道軌道に打ち上げられることになっていた。マーシャル諸島の基地には、打ち上げを管制する設備がないため、ロケットのテレメトリーデータやレーダーの情報はすべて、衛星中継によって 100 人近い NASA とオービタル・サイエンス社 (ペガサスロケットの製造会社) の技術者の集まるフロリダの管制室に送られる。ロケットを搭載する飛行機が離陸するクウェジリンではなく、打ち上げの状況 (そして結果) が真っ先に分かるのはこのケネディ宇宙センターであり、HETE-2 の研究代表者である MIT の George Ricker もここに来ていた。このような遠隔

管制によるロケット打ち上げは、NASA にとっても初めての試みであるとのことだった。日本の他の HETE-2 関係者もそれぞれ別の場所で打ち上げを待っていた。吉田篤正は理研が設置した主地上局のあるシンガポールで待機、このプロジェクトの日本側リーダーである松岡 勝と白崎裕治は理研で待機していた。彼らは、インターネット上のチャットと、NASA ケネディセンターが、WWW でストリーム配信する画像と音声によって打ち上げの状況を追いかけることになっていた。

HETE-2 打ち上げと同じ晩に、国際宇宙ステーション建設のため日本の宇宙飛行士若田さんが搭乗するスペースシャトルの打ち上げが予定されていたが、その重なりを嫌って、直前に HETE-2 の打ち

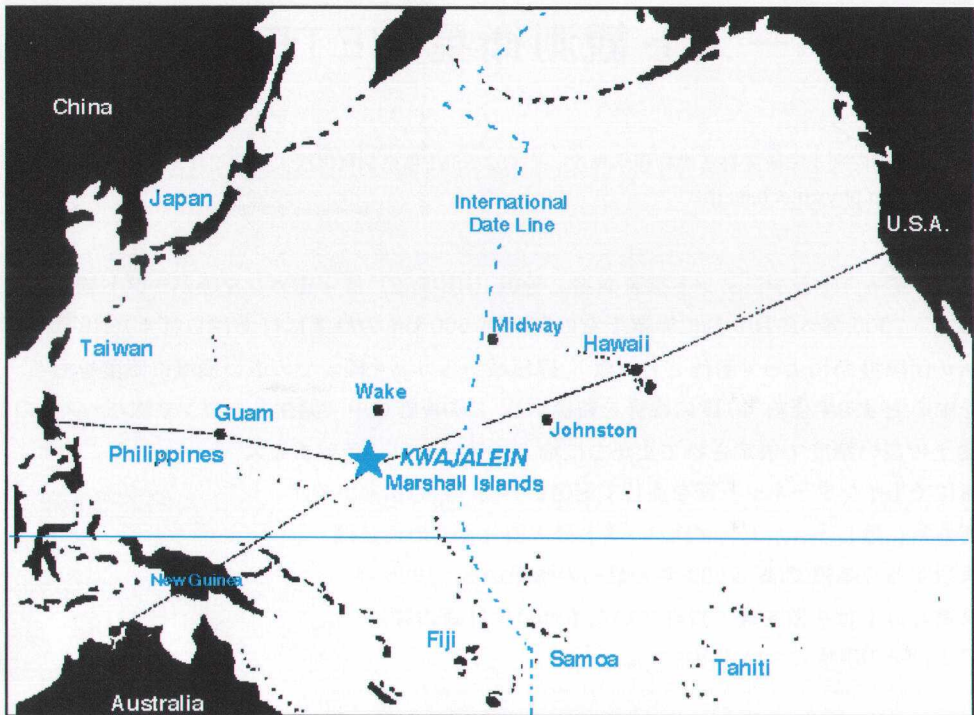


図2 HETE-2は、カリフォルニアでロケットに組みつけられた後、ハワイを経由して打上げが行われたクウェジェリン（地図中心の星印）へ運ばれた。

上げは7日早朝1時45分（米国東部夏時間）に変更されていた。日本からは私の他に、理研の広報担当の嶋田が派遣されていた。またとない機会なので我々もどうにかシャトルの打ち上げも見物し、そしてHETE-2の打ち上げオペに付き合う、という算段であった。筆者は国際宇宙ステーションの日本実験施設「きぼう」に搭載される予定の全天X線監視装置の開発に参加していることを手ごかりとしてシャトル打ち上げ台の対岸にある、もっとも良い見学席を確保してあった。

HETE-2の打ち上げオペレーションは、外観からはバラックとしか見えない古い建物で行なわれる。前日にそこを訪ねたときにケネディ宇宙センターの受け入れ担当者から知らされたことは、外国への高度技術情報の流出に関する規制（アイター）のため、オペレーション中に管制室とその背後のガラス張りの見学室には外国人は入れてもらえない、

ということだった。1996年のHETE一号機の時には我々は背後の見学室から打上げオペレーションを見られたのだが、この2年ほどで急に規制が厳しくなったとのことである。幸い、待機する会議室の電話に打ち上げ管制の音声がつながれており、プロジェクターとテレビモニターでチャンネルを切り替えるとさまざまな画像を見られるようになっていた。管制室内の風景、クウェジェリン基地でHETE-2を打ち上げるロケットを抱いた飛行機、気象レーダーの画面、飛行機の予定飛行経路を示すコンピューター画面、さまざまなイベントのスケジュール、などたくさんのチャンネルがあった。また、コンピューターはネットワークにつながれ、世界各地にちらばっているHETE-2関係者が連絡をとりあうチャットには参加することができた。

5日の晩に予定されていたシャトルの打ち上げは一日延期になった。翌日、HETE-2の打ち上げ

予定日である。再びシャトルの打ち上げは延期された。我々が HETE-2 打ち上げの打上げオペレーションを行なう建物に到着すると玄関近くのホールには大きな机の上に、サンドイッチ、菓子など大量の食べ物と飲み物が用意されていた。深夜から明け方まで続く打上げオペレーションに参加する数十人の人員の補給エネルギーである。しかし、現場には落ち着かない雰囲気は漂っており、主要メンバーは会議を行なっている。結局、クウェジェリンで、衛星と地上支援機器をつなぐコネクターを破損させるという小さな事故が起きて、その影響を評価する必要があること、そして、突然、衛星回線を管理する米軍が、クウェジェリンと米国本土を結ぶインターネット回線が打上げオペレーションの時間帯には使用できなくなることを通告してきたこと、この二つの理由のため、打ち上げは 48 時間延期されることになった。

そして 8 日、シャトルの打ち上げはさらに 4 日延期され、ほとんど見物できる可能性はなくなっていたが、HETE-2 打ち上げ延期のためできた時間を利用して、宇宙センター構内のスペースステーション組み立て、サターン 5 型ロケット博物館、シャトルの打上げ台などを見学したのち、夕方に再びわれわれは打上げオペレーションが行なわれる建物にやってきた。今度はすべて順調のようである。山盛りの食糧をつまみつつ、チャンネルを切り替えながら、飛行機の離陸を待った。打上げオペレーションを指揮する Flight Director が次々にチェックリストを読み上げ、担当者が、“Go” という次の項目に進んでいく。時間を設定して実行する項目は、“3, 2, 1, Mark!” と秒読みして実行していく。そして HETE-2 を運ぶ飛行機は離陸した。一号機の打ち上げの時には、カメラマンを乗せた小型飛行機がロケットを運ぶ飛行機を追跡し、飛行機と打ち上げの様子をライブ中継したのだが、今回の遠隔管制ではそのようなことをする費用はかけられなかったとのことで、飛行機の胴体下部に固定されたカメラがロケットを前と後ろから撮影

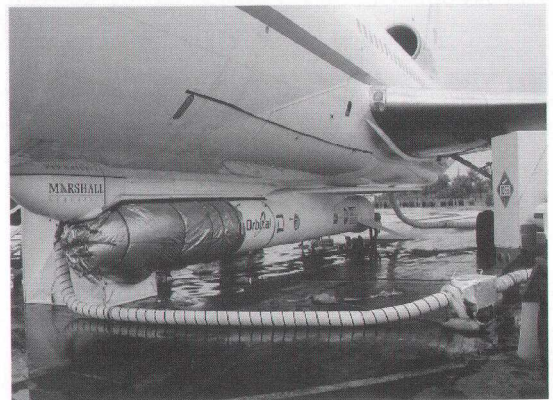


写真 1. ロッキード L-1011 飛行機胴体下に搭載された、HETE-2 を収納したベガスロケット。乾燥空素を循環させるパイプがつけられている。(クウェジェリンにて)

しているだけである。

飛行機はすぐに 14000 メートルの巡航高度に到達した。すべて“nominal”，すなわち予定どおりに進み、マーシャル諸島の南海上で折り返して、南東に向かい、予定の“drop box”に来た。時刻は予定よりやや早い 1 時 38 分（日本時間 2000 年 10 月 9 日午後 2 時 38 分、現地時間：同日午後 5 時 38 分）、ついに、ベガスロケットがロッキード L1011 飛行機から投下された。ロケットが飛行機のカメラからぱっと消え、その数秒後に、白煙をひきながら飛行機下方から前に向かって飛んでいくロケットが一瞬だけカメラに映された。そのあとは、直接の画像はなく、ロケットからのテレメトリとレーダーだけが頼りである。ロケットの速度、姿勢、軌跡がコンピューター画面に刻々と映し出されている。すべて“nominal”。ロケットの状態が、まるで 3-D ゲームのように、コンピューターのアニメーションで示されていた。第一段切り離し、第二段点火、そして切り離し。第三段点火、燃焼終了。そして予定どおりの高度 600 km の軌道に乗ったことが分かった。ここで、HETE-2 の関係者はすべて、軌道投入後ロケットからの分離に失敗した 4 年前の HETE 1 号機のことを思い出さずには

いられなかった。そして今回、ロケットの燃焼が終了してから切り離しまでの間は実際以上に長く感じられた。コンピューター・グラフィックの3-Dモデルは、ジェットをすこしずつ吹いて回転と姿勢を調整し、そして衛星がロケットから切り離されたことを示していた。その直後にロケットと衛星は、クウェジェリンとの通信可能範囲の外に出た。すべて順調、すべて“nominal”。ここで管制室の皆は笑顔で立ち上がり、握手を始めた。われわれも、ほとんど食物のなくなったホールへ出ていき、管制室から出てきたMITのGeorge Ricker、シカゴ大のDon Lamb、そしてNASAの打上げオペレーション指揮官と握手した。軌道投入と衛星の分離には成功したのである。打ち上げチームの任務は終了した。

HETE-2衛星は四周ぐらい回る間に、目的姿勢を達し、その時点で太陽電池パネルを開き、自動的に太陽を捕捉するはず。しかしいつそれが起きるか予測するのは困難である。その間は、電波も太陽電池パネルに遮られていて受からない可能性が高い。

われわれは、George Rickerの滞在するホテルに一緒に向かい、その部屋からインターネットに接続して、チャットによって地上局の様子を伺った。打ち上げから100分後、クウェジェリンから連絡がはいった。何と一周まわってきた衛星からの電波を受けたとのこと。つづいて、ガラパゴス、カイエンヌからも衛星の電波を受信したという知らせが入ってきた。予想外に早く、太陽電池パネルも展開した。しばらくは、この状態で様子を見て、自動的に太陽指向を保持することが確かめられた。

これで我々はフロリダにはもう用はなくなった。シャトルの打ち上げを見られなかったのは残念だったが、HETE-2の様子を追跡するには、衛星追跡運用センターのあるMITに向かわなくてはならない。その朝の便でオーランドを発ち、昼にボストンに着いた。MITはすでに落ち着いており、すべては順調だった。一週間はそのまま様子を見ることになっていた。その間に、クウェジェリンへ行っていた中心

メンバーの3人がMITに戻ってくる。一方、我々も一旦帰国することにした。

2. HETE の歴史

ガンマ線バーストは1960年代末に核実験監視衛星によって偶然発見されて以来、いまだに高エネルギー天体物理学における最大級の謎でありつづけている。ガンマ線バーストに対応する天体はつい最近まで決してどうしても見つかることはなかった。ガンマ線バーストは典型的には数十秒あるいはそれ以下しか続かない短い現象である上に、ガンマ線というのがそもそも到来方向を決めるのが難しい。ガンマ線バーストの起源を理解するための鍵となる観測は、その発生位置を即座に決めて世界中の観測者に迅速に配信することである。それによって可視光や他の波長域でガンマ線バーストを既知の天体種族に結び付ける手がかりが得られるはずである。これが、1983年に超新星爆発の理論などで有名なWoosleyが呼びかけて、米国カリフォルニア州Santa Cruzで開かれた“High Energy Transients in Astrophysics”会議が到達した結論であった¹⁾。HETE(高エネルギー・トランジェント探査機 High Energy Transient Explorer)はこの目的のために構想されたミッションであった。

このSanta Cruz会議には日本からは七人(小田 稔、蓬茨靈運、長瀬文昭、井上 一、田原 譲、柴崎徳明、河合誠之:小田 稔先生の言葉で言えば「七人の侍」)が参加していた。これだけの人数で海外のX線天文学の学会に日本人が参加するのはまだ珍しかったころだと思われる。まして大学院生が海外の学会に出席することはほとんど考えられなかった。筆者は当時博士課程2年の大学院生であったが、たまたまロスアラモス国立研究所に4ヶ月ほど短期学生助手として滞在していた期間中だったので、当時の研究指導者のEd Fenimore(現在もHETE-2の共同研究者)に連れられて出席する幸運を得た。筆者にとっては初めての海外学会だったのですべての印象が強烈だった。会議が開か

れたカリフォルニア大学のキャンパスの中には野生の鹿が闊歩しており、われわれも別荘地のリゾートマンションのようなキッチン付きの学生寮に宿泊した。会議はインフォーマルで、Walter Lewin や Lamb 兄弟などが極めて活発に議論を展開した。またあまりに天気がよいので、急遽午後のセッションが夕方に変更されたこともあった。そのときは会議場の黑板には“Hit the beach!”と書かれていた。

この会議の中心的なテーマは X 線バーストや X 線パルサーなどの X 線連星とガンマ線バーストだった。X 線連星関連では、降着駆動型パルサーの周期変動が星風降着のトルクの変動に起因すること^{2), 3)}, precursor (前触れとなる短い放射) 付きの X 線バーストがエディントン限界を示す現象であること^{4), 5)}, X 線連星のある一群を「超軟 (スペクトル) トランジェント」と定義してブラックホール候補と同定したこと⁶⁾ など、今振り返っても非常に重要な観測事実や解釈が数多く提示された密度の高い会議であった。

ガンマ線バーストよりも後に発見されていた X 線バーストは、すでに中性子星表面での暴走的核融合反応であることが確立していたが、ガンマ線バーストの正体は謎に包まれていた。X 線バーストは同じ天体から繰り返し発生し、その場所には中性子星周辺に存在が予想される降着円盤と思われる光学対応天体が見つかったりする。X 線パルサーであれば銀河面に沿って分布することから、銀河系内の天体であることが明らかであるが、ガンマ線バーストは、天空のさまざまな方向から到来する。既知の天体や種族に対応させることができないので、発生源の距離、すなわち、太陽系周辺の現象なのか、銀河系外の現象なのかを決定的に判断することすらできない。それにもかかわらず、当時は、ガンマ線バーストはパルサーや X 線バーストと同様に銀河系内の中性子星でおきる現象であるとの見方が有力であった。その根拠になったのは以下のような議論である。ガンマ線バースト発生領域の差し渡しは、その変動時間 (一秒以下、も

っとも早くても 1 ミリ秒) の間に光が横切れる距離 (最小 300 km) より小さいはずである。たとえば中性子星周辺のように高いエネルギー密度を閉じ込めることができるコンパクトな領域がその起源として有力となる。しかしそのような狭い領域であまりに大量のガンマ線が放射されると、光子同士が衝突して電子陽電子対になってしまっ外に出てこられない。観測されている、MeV 以上まで伸びるスペクトルを矛盾なく説明するためには、絶対光度に上限がつく。もしガンマ線バーストがわれわれの銀河系の外の遠方に起源をもつとするとあまりに絶対光度が高くなり、この制限に矛盾する。

実は、この問題は、光源が相対論的な速度で観測者にむかって運動していると考えれば解決する。そのことは当ても原理的にはわかっていたはずだが、銀河系内中性子星起源という先入観は支配的だった⁷⁾。1991 年に打ち上げられたコンプトンガンマ線天文台衛星が等方的な分布を高い精度で示すまでは、宇宙論的遠方起源を真剣に議論されることは少なかった。実際、この会議でも現在では宇宙論的モデルで標準となっている「火の玉」モデルやジェット状コリメーションがすでに議論されたことは注目に値するが、銀河系内の起源を前提にしている^{8), 9)}。

ガンマ線バーストの謎を解くためには、天空のまったく予測できない方向で発生し数秒ないし数十秒しか続かない現象に対して、1) 可視光からガンマ線にわたる広い波長域での強度とスペクトルの時間的変化と 2) その正確な位置を測定できることができる専用のミッションが必要であることが合意された。この会議を契機として Woosley を中心としたグループによってさらに検討が加えられ、ガンマ線分光器、可視光カメラ、およびガンマ線バーストの位置を決められる広視野 X 線監視装置を搭載する小型で安価な衛星 HETE の構想ができあがった。このミッションは、数年後に MIT (マサチューセッツ工科大) の G. Ricker を研究代表者として NASA に提案され、松岡 勝主任研究員をリ

ーダーとする理研を中心とする日本のグループと、フランスの宇宙線研究センター (CESR) を加え、国際共同ミッションとして 1990 年に開発が開始された。

当時、NASA の科学衛星計画の経費と製作期間は上昇の一途を辿っており、1980 年代には米国は一台も X 線・ガンマ線天文衛星を打ち上げることができなかった。その間に、日本は「はくちょう」や「てんま」衛星を成功させ、成果をあげてきた。

この HETE 衛星製作において、MIT は全体のプロジェクト管理と紫外線カメラを担当、広視野 X 線監視装置 (WXM) の検出器の製作と主地上局の一つ (宮崎大学工学部に設置) を日本が分担し、ガンマ線分光器をフランスが担当した。衛星バス製作は、AeroAstro 社という小さなベンチャー企業が受注し、打ち上げは NASA の責任で行なわれることになった。衛星の製作のプロジェクト管理を、NASA が大学に委任するというのは画期的な試みである。Cheaper, Faster, Better (より安く、より早く、より良く) をモットーとする HETE は、日本 X 線衛星の成功に刺激された NASA の新しい科学衛星開発方式の実験でもあった。

3. HETE 第一号機

HETE 第一号機は当初の予定から 2 年ほど遅れて 1996 年 11 月にアルゼンチンの科学衛星 SAC-B と一緒に打ち上げられた。この打ち上げに用いられたペガサスロケットは、オービタルサイエンス社というベンチャー企業によって開発された有翼小型の三段ロケットで、飛行機に運ばれて一万メートル以上の上空で投下され、そこから数百キロの衛星を高度 600 km 程度の軌道に投入する。日本側のチームのリーダーの松岡 勝理化学研究所主任研究員 (当時) とともに、筆者も NASA のウォーロップ基地に赴き、打上げオペレーションに立ち会ったが、肉眼で見られたのはペガサスを吊り下げた飛行機の離陸だけで、実際の投下、点火場面は管制室のスクリーンに写し出される追跡機から撮影

されるカメラ映像だけで見ることになった。ペガサスロケットを吊り下げたロッキード L1011 (トライスター) は一旦離陸し、バミューダ近海の投下予定地点まで飛行したが、投下直前の最終動作確認で異常が生じ、打ち上げは中止された。結局、一週間後 (我々が帰国した後) に打ち上げは行なわれ、HETE と SAC-B を搭載したロケットは予定軌道に達したが、衛星分離直前にロケット第三段の給電が消失し、HETE は金属容器に閉じ込められたままロケットと SAC-B から切り離されずに軌道を回り続けることとなった。地球を一周回ってきた後に容器を通して微かな電波がウォーロップ基地で受信された。これが HETE からの最後の通信だった。

その翌年の正月に小田 稔先生からいただいた年賀状には一言、「捲土重来」と記されていた。

4. 再挑戦

一号機の打ち上げ失敗直後から、参加三国でそれぞれ再挑戦のための予算獲得努力が始まっていた。ガンマ線バーストが天体物理学の非常に重要な問題だ、ということは世界的な天体物理学コミュニティのなかでは支持が得られていた。HETE が最初に構想された 1983 年ごろには、ガンマ線バーストは銀河系内の中性子星での現象であるという考え方が有力だったが、1991 年から観測を開始したコンプトン天文台衛星 BATSE (バツツイー) 検出器は (数度という粗い精度とはいえ) 1000 個を超えるガンマ線バーストの到来方向を決定し、それが全天にほぼ一様に分布していることを明らかにした。その結果、ガンマ線バーストは宇宙論的遠方に起源をもつという考え方が主流になりつつあった。ガンマ線バーストが、高エネルギー現象それ自体として興味深いだけでなく、はるか遠方 (すなわち遠い過去) の宇宙を探る手がかりとして、今までのガンマ線天文学、高エネルギー天体物理学より、はるかに広い天文学コミュニティの関心を引き始めていた。日本では、理研の小田 稔理

事長や日本での HETE チームのリーダーの松岡主任研究員の努力により、打ち上げ後の観測運用経費として想定されていた予算を観測装置再製作に振り替えてよいという内示を得られた。フランスでも間もなく再製作が認められた。しかし、米国では、NASA がなかなか再製作、再打ち上げを認めなかった。NASA 全体が緊縮予算体制にあったこと、NASA が公正性を保証するために非常に手続きを重んじたためである。ガンマ線天文学者を集めたアドホックな委員会が組織され、HETE 再製作の妥当性が討議され、好意的な評価を得たのち、広い天体物理学分野から集めた委員会において、さらに審議が行なわれた。伝え聞くとところでは、ここでは強力な反対があったという。

HETE は、NASA の探査機 (Explorer) プログラムとは独立に、小さな安いミッションのテストケースとして認められたものだった。90 年代になってから、NASA は定期的に小探査機 (Small Explorer) と中規模探査機 (Medium-class Explorer) ミッションを交互に公募するようになったが、その小探査機クラスでさえ、HETE の数倍の予算規模が予定されている。強力な反対の理由とは、ここで HETE の再製作を認めてしまうと、その後しばらくガンマ線バーストミッションが中小探査機計画で採択される可能性を低くするから、とのことだった。HETE が目指すガンマ線バーストは、あまりに重要なテーマであるが故に、HETE のような超小型ミッションではなく、探査機プロジェクトにおいてもっと資金をつぎ込んで追求すべきだ、という理由だったらしい。しかし、HETE チームは、ほとんど設計変更を行なわないので、2 年半で作れること (新しい探査機なら 4 年以上かかる)、また費用も一回目より安くできることを説明し、NASA は、ようやく 1997 年春に再製作を認めた。

5. 一号機からの変更点

HETE 二号機のもっとも大きな変更は、MIT 担当の紫外線カメラが、軟 X 線カメラに置き換えら



写真2. 国立シンガポール大学理学部屋上に設置された HETE-2 主地上局。レドームの中には、直径 1.8 メートルの S バンドパラボラアンテナがある。

れたことである。その理由は、理論的予測にもかかわらず可視紫外域でのフラッシュの信頼できる観測例が当時までなく、成果を得られる可能性が低いと思われたことと (実は、のちに GRB990123 での可視光フラッシュが観測された)、HETE-1 で用いられたものと同じ型の裏面照射型の CCD がもう MIT リンカン研究所で製造されておらず、新設計の紫外線カメラを作ることが期間的にもコスト的にも困難になっていたためであった。軟 X 線カメラは、X 線 CCD を一次元検出器として使い、符号化マスクの影を用いて X 線の到来方向を数秒角の精度で決めることができる。この位置決定精度は広視野 X 線モニターのものより二桁も良いものだが、有効面積が小さいため、特に明るい少数のガンマ線バーストに対してのみ、広視野 X 線モニターのデータを組み合わせて高い精度の位置が得られるものである。また、低いエネルギーの X 線に感度をもつため、ガンマ線バースト源周辺、あるいは途中の星間空間の光電吸収による X 線スペクトルの変化を精度よく測ることができる。一号機で紫外線カメラがもっていた機能である姿勢検出のため星を撮影する 4 台の可視光カメラが取り付けられることになった。

目に見えないところでは、衛星に搭載されたコ

ンピューター（全12台）で走るソフトウェアが、ほぼ完全に書き直され、より安定した高速なシステムになったことと、電源部が新しい設計のものに置き換えられた。

一号機で衛星バスを製作した AeroAstro 社からは、HETE を担当した技術者のほとんどが会社を離れており、MIT が AeroAstro から設計図、予備部品などをすべて引き取って、大学内で自ら衛星を組み立てることになった。衛星製作を指揮するマネージャーとして、かつての AeroAstro 社員、Bob Dill が雇われた。

もうひとつの大きな変更は打ち上げ軌道である。1993年に打ち上げられた「あすか」衛星には、初めて光子計数型の X 線 CCD カメラ (SIS) が搭載され、X 線天体観測に大きな成果を挙げたが、同時に、X 線 CCD カメラが、軌道上の荷電粒子、特に南大西洋異常放射線帯 (SAA) の高エネルギー荷電粒子によって損傷を受けて劣化していくことが明らかになった。HETE 2号機の打ち上げは、軌道上の放射線が最大になる太陽極大期の1999年に予定されている。一号機と同じ傾斜角30度弱の軌道では、あすか SIS と良く似た X 線 CCD を用いる軟 X 線カメラが急速に劣化することが予測された。幸い、HETE 2号機は一号機のアルゼンチン衛星のように、高い軌道傾斜角を要求する衛星との相乗りではなく、単独で打ち上げられる。そのため放射線損傷を軽減できる軌道傾斜角6度以下の赤道軌道に打ち上げることが提案されたが、これには二つの問題があった。ひとつは、米国内から打ち上げられないということである。ペガサスロケットなら、飛行機がある程度南に飛行してから投下すればよいのだが、とても米国本土から赤道近くまで行き、そしてロケットからのテレメトリーを受信し続けることはできない。したがって、打ち上げオペレーションを、赤道付近にて行なう必要がある。これは費用と技術の両面から難しいとされた。もう一つは、衛星とデータやコマンドをやりとりする地上局を赤道上に配置しなくてはならないことであ

る。日米仏の三機関はそれぞれ自国内に地上局を建設していたが、それぞれ外国に移さなくてはならない。

この二つの困難はあったが、赤道軌道に打ち上げた場合のサイエンスとしての利点を考え、技術的費用的な問題を克服して HETE-2 は赤道軌道に打ち上げられることになった。宮崎大学工学部の高岸邦夫、廿日出 勇による無線技士免許取得や熊本電波監理局への無線局開設申請を含む多大な努力の末に設置された宮崎地上局は、残念ながら使われないうまま、日本から比較的近く、ネットワークなど情報基盤がしっかりしているシンガポールに移設されることになった。理研は国立シンガポール大学理学部と覚え書きを交し、大学校舎屋上のかつて太陽観測望遠鏡が設置されていたところに HETE 地上局を設置した。かつて理研で HETE 一号機の検出器製作に貢献した山内 誠が、移設作業には中心的な役割を果たした。同様に、米国ヘイスタック局は太平洋の真ん中にあるマーシャル諸島共和国クウェジェリン環礁に、仏国トゥールーズ局は仏領ギアナのカイエンヌに移設された。

6. 打ち上げの延期

多少のスケジュールの遅れはあったが、1999年夏に HETE 2号機の製作は完了した。動作試験、環境試験などを行なった後、打ち上げは2000年1月に決定し、年末に衛星は MIT からカリフォルニアのバンデンバーグ基地へ運ばれ、ペガサスロケットに組み付けられた。クウェジェリン環礁へむけて搬出される予定の前日に最終的な準備審査が NASA で行なわれ、急遽、打ち上げの5月以降への延期が決まった。

延期の表向きの理由としては、シンガポールとカイエンヌの地上局で使用される通信機部品の輸出手続きが遅れていて、この二局の運用が打ち上げに間に合わないことが挙げられていた。非公式に NASA の HETE 担当者から伝えられた理由は、打ち上げ成功の可能性を高めるため、打ち上げを

許可するための要件を厳しくする方針変換があったというものであった。打ち上げ要件として、地上局の整備に加え、厳しい信頼性試験と審査が追加された。打ち上げ延期や追加の試験、審査は即座にコスト増に結び付く。2000年に二つの低コスト火星ミッションが失敗したために、NASAは議会や報道から厳しい批判を受けており、本来、リスク折り込み済みの低コストミッションであるHETE-2に対しても少々追加コストをかけても失敗の可能性を下げたいということだと当時筆者は理解した。しかし、これも実は主たる理由ではないということを数ヶ月後に聞かされた。そのとき行なわれていた議会でのNASAの予算審議が終了するまで、一切の失敗を嫌ったNASA長官が、リスクのある低コストミッションの打ち上げの延期を命じた、という政治的な理由がもっとも大きいというのである。この話はもちろん確認されたわけではないが、HETE-2のようにNASA全体の規模と比較すると全然小規模なミッションでも、場合によっては政治的に大きな意味を持ちうる、ということを実感した。

結局、NASAによる試験日程の遅れや、打ち上げ作業日程の確保の都合上、「5月中旬以降」からさらにずるずる延期された打ち上げは10月上旬になった。一旦決められた打ち上げ予定から8ヶ月あまり遅れたわけであるが、この期間はまったく無駄になったわけでもなかった。HETE-2は12個のプロセッサ（4個のトランスペューターと8個のDSP）を搭載し、今までの衛星だったらハードウェアで実現するような機能の多くはソフトウェアで実現している。その分、ソフトウェアは複雑化し、デバッグ作業は大変になる。この延期のおかげで、ハードウェアの信頼性の試験を行なうとともに、地上でのデバッグの時間を得ることができた。

7. ガンマ線バースト残光の発見とHETE-2

HETE2号機の再製作が認められた直後、1997年にイタリア・オランダのX線天文衛星BeppoSAX

によってガンマ線バースト研究の突破口が開かれた。BeppoSAXは、視野が狭いが高感度のX線望遠鏡(NFI)、ガンマ線に感度をもつガンマ線バーストモニター(GBM)、および広視野X線カメラ(WFC)を搭載し、WFCの視野内で起きたガンマ線バーストの位置を十分な位置精度(10分角弱)で比較的短時間(数時間)に決定し、NFIによって高感度の追跡観測を行なった。その結果、数日にわたって徐々に減衰するX線残光を発見した¹⁰⁾。X線残光の発見は、可視光および電波領域での残光(afterglow)の発見^{11), 12)}を導き、ガンマ線バースト源が、宇宙論的距離にある銀河内、あるいは周辺の現象であることが明らかにされた^{13), 14)}。ガンマ線バーストの位置速報にもとづく迅速な追跡観測が、ガンマ線バーストの研究にもっとも重要である、というHETE本来の目的のひとつが、皮肉にも打ち上げ失敗直後に別の衛星によって実証されたわけである。BeppoSAXの成功に刺激されて、ガンマ線バーストの位置速報は米国のロッシX線計時衛星(RXTE)や惑星ミッションの連携(IPN)によってももたらされるようになってきた。

最初の突破口をBeppoSAXにさらわれた1997年以來の観測によって、ガンマ線バーストの残光や母銀河の観測は徐々に進んできたが、ガンマ線バースト観測を主目的として設計されたHETEの重要性が薄れたわけではない。ガンマ線バースト残光の発見後まもなく、残光が巾乗則に従ってすぐに減衰してしまうことが明らかになった。バースト発生数時間後、可視光残光は典型的には19等級あるいはそれよりも暗くなっているが、そのような明るさの残光に対する詳細な分光観測には8-10メートル級の大望遠鏡が必要である。また、ガンマ線バーストの母銀河の明るさも典型的には23等級程度で、世界最大級の望遠鏡でしかその赤方偏移を測ることはできない。このため、ガンマ線バースト種族全体としての分布など統計的な性質を理解するにはその観測例はまだまだ少ない。もし、ガンマ線バーストの位置を通報するのにかかる時間が

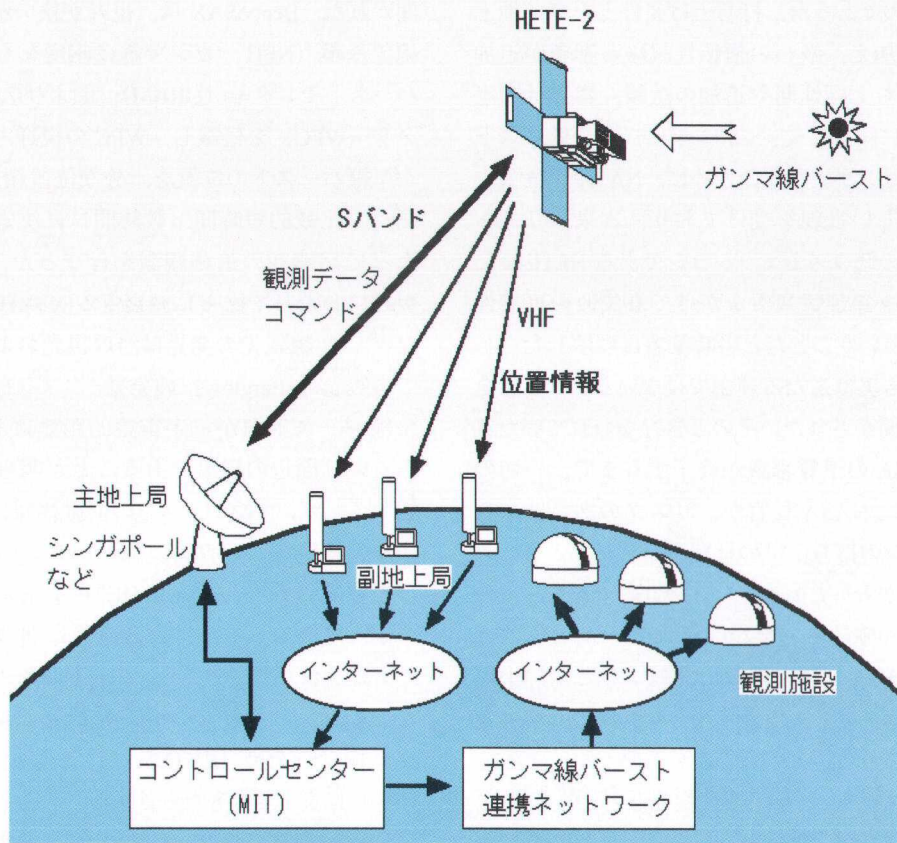


図3. HETE によって検出されたガンマ線位置情報は、副地上局で受信され、全世界へ配信される。大部分のデータの受信と衛星への指令は三つある主地上局で行われる。

現在の 100 分の 1、すなわちバースト発生後数分に知られるなら、可視光残光は 10 ~ 15 等級で検出されることになる。そうなれば 1メートル級以下の小望遠鏡でも分光観測が可能になる。また、ROTSE (ロツィー) という自動広視野カメラによる観測で、ガンマ線バースト GRB990123 からガンマ線ピークの数十秒後に 9 等級の可視光の閃光が検出された¹⁵⁾。10 秒程度以下の迅速な位置通報があれば非常に明るい可視光天体を観測できる可能性がある。今までガンマ線バーストの位置が決まるまでの時間は、衛星観測データを地上局で受信するまでの遅れと地上での解析にかかる時間で決まっていた。HETE はこの時間を短縮するために、

機上のコンピュータでガンマ線バーストの位置を決定するように設計されている。決定された位置は直ちに VHF 波で、赤道上空を周回する HETE-2 からいつでも受信できるように地球全周にわたって設置されたバースト警報受信局に向けて送信される。バースト警報は、MIT のミッション運用センター、NASA ゴダード宇宙飛行センターの GCN (ガンマ線バースト連携ネットワーク) を経由して地上観測者や自動望遠鏡などに配信される。(図3) ガンマ線バーストに対して測られた赤方偏移の多くは $z \sim 1$ 前後であるが、理論的には検出されているガンマ線バーストの一割程度は現在見つかった最遠の銀河よりも遠方から来ていると推定されてお

表 1 HETE-2 の科学観測機器

	ガンマ線分光器 (FREGATE)	広視野 X 線モニター (WXM)	軟 X 線カメラ (SXC)
製作担当	宇宙線研究センター (仏)	理研, ロスアラモス研	MIT 宇宙科学センター
検出器種別	NaI(Tl); cleaved シンチレーター	一次元比例計数管 (Xe 1.4 atm)	X 線 CCD (15 μ m pixel)
エネルギー範囲	6 - 400 keV	2 - 25 keV	0.5 - 10 keV
時間分解能	10 μ s	1 ms	1.2 s
スペクトル分解能	25% (20 keV) 9% (662 keV)	22% (8 keV)	46 eV (525 eV) 129 eV (5.9 keV)
角分解能	—	$\pm 11'$ (at 8 keV)	$\pm 33''$
有効面積 ^a	120 cm ²	350 cm ²	72 cm ²
符号化マスク	なし	1/3 open	1/5 open
感度 (10 σ) (erg cm ⁻² s ⁻¹)	3×10^{-8} (8 keV-1 MeV)	8×10^{-9} (2 keV-10 keV)	3×10^{-8} (1-10 keV)
視野	3 str	1.6 str	0.9 str

^a マスク遮蔽率を含まない有効検出器面積。

り、現在よりも大規模な探索が必要である。また、ガンマ線バーストは、継続時間 40 秒程度を中心とする「長いバースト」(全体の 8 割)と、0.5 秒程度を中心とする短いバーストの二群に分かれているが、残光によって位置が決められたバーストは長い一群だけで、「短いバースト」の起源、距離などについてはほとんど何もわかっておらず、HETE-2 によってようやくその手がかりが得られると期待される。そして、何よりも HETE-2 のバースト位置速報の特徴は、10 分角程度の精度のよいバースト位置を、地上観測者へ伝えるのに 10 秒あまりしかかからない、ということである。

8. HETE-2 の概要

HETE-2 ミッションの主目的は、ガンマ線バースト (GRB) の軟 X 線からガンマ線にわたる多波長観測と、追跡観測可能な精度のあるガンマ線バースト位置情報を全世界の天文コミュニティーに迅速に伝えることである。そのために HETE-2 は、1.5 ステラジアン の共通視野をもつガンマ線検出器と X 線検出器 (二種類) を搭載し、合わせて 0.5-

400 keV のエネルギー範囲の X 線・ガンマ線光子を観測する。二種類の X 線検出器はどちらも符号化マスクをもちいた撮像能力をもち、ガンマ線バーストの位置を 10 分角以下、条件がよければ 10 秒角の精度で決定することができる (表 1, 図 2 参照)。衛星搭載プロセッサによる解析によって、バースト発生と同時に位置が計算されるのに加えて、主地上局からダウンリンクされたデータを用いた詳細地上解析によって、さらに高い精度の位置を決定することが可能になっている。

HETE-2 衛星の X 線検出器の視野中心は常に反太陽方向に向けられている。したがって、HETE-2 が報告するバーストは必ず反太陽方向から 40 度以内で発生したものである。予めおおよその方向がわかっている上、地上光学観測の容易な太陽から遠い方角になる。HETE-2 の観測器は、地球が視野を遮っていない、軌道上の朝夕および夜間にあたる領域で観測を行なう。

9. 地上への通報

HETE-2 は地上と二つの周波数で発信を行なう。

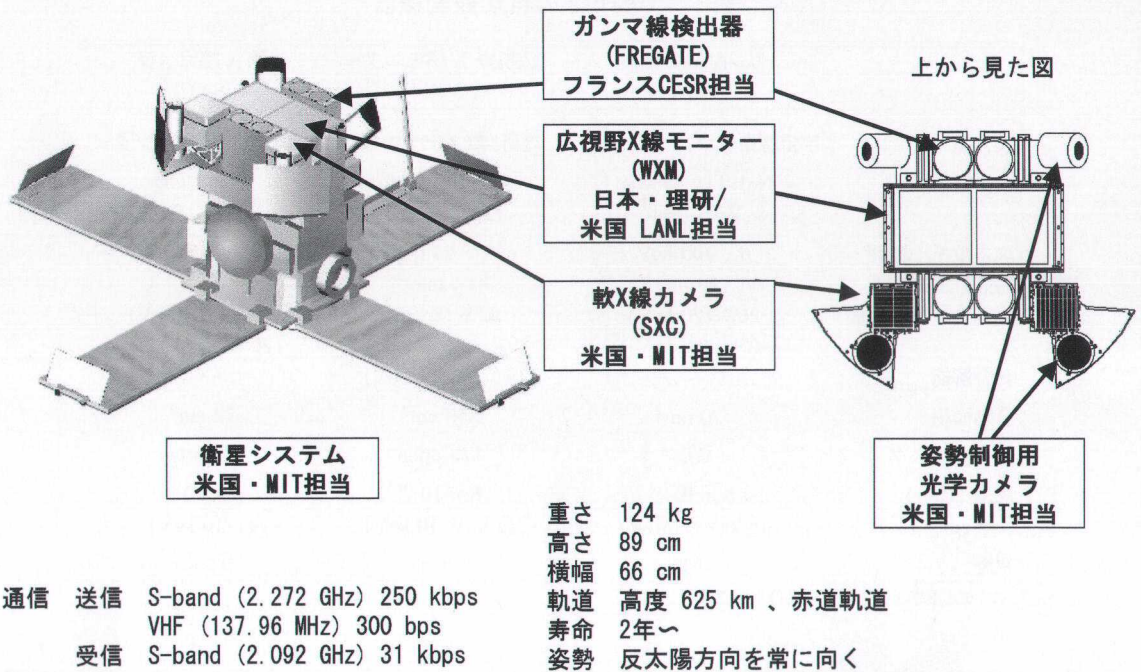


図4. HETE衛星全体図と、搭載されている観測器。

(1) 衛星へのコマンドの送信と、観測生データの受信にはSバンド(2.1-2.3GHz)が使われる。地上へのデータ通信速度は毎秒250キロビット。Sバンドの発信は、マーシャル諸島ケージェジリン、仏領ギアナのカイエヌス、およびシンガポールの3つの主地上局で行なわれる。

(2) バースト警報と衛星のハウスキーピング情報は、VHF帯(138MHz)で送信される。データ通信速度は毎秒300ビットという低速である。VHFデータは、赤道に沿ってほぼ等間隔に設置した12局ほどのバースト警報受信局(副地上局)によってほとんど途切れることなく受信される。

衛星と地上局の指令はすべてMITのミッション運用センターで行なわれ、主地上局と副地上局で受信されたデータも、すべて一旦は運用センターに集められる。観測データの二つの経路に対応して、

ガンマ線バーストの位置情報も、二つの形で観測者に伝えられる。

(1) 機上の即時解析の結果はVHF波を使って、バースト警報受信局に向けて即座に送信される。衛星上の計算能力の限界のため、計算される位置の精度にはある程度の制約がある。

(2) すべての観測機器の生データはSバンドで主地上局で受信される。地上での詳細解析により、バースト位置の精度を向上させる。

HETE-2によって決められたガンマ線バーストの位置は、NASAゴダード宇宙飛行センターで運営されているGCN(Gamma-Ray Burst Coordinate Network: ガンマ線バースト連携ネットワーク)を経由して全世界、だれでも希望する人にインターネット等を通じて配信される。

10. HETE-2の現状

打ち上げから、すでに半年がたつ。この間に

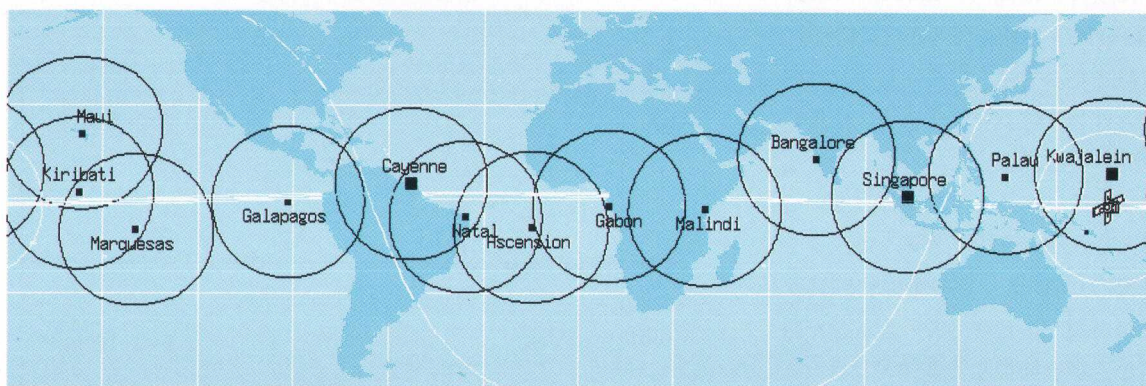


図5. 常に HETE-2からの電波を受信できるように、赤道に沿って配置された地上局。それぞれを中心とする円が、各局が高度 600 km の衛星からの電波を受信できる範囲を示す。

HETE-2は、十数個のガンマ線バーストを検出し、そのうち2個に関しては位置を決定することができた。この現状は、打ち上げ前の見通しに比べると非常に遅れている。その理由はいくつかあるが、最大の理由は、衛星運用センターであるMITのマンパワー不足である。打ち上げ成功後に、MITはNASAから、要求した最低限レベルに満たない水準の資金しか得られず、打ち上げまでに貢献のあった重要なメンバーを手放さざるを得なかった。その結果、衛星運用、観測器の調整、試験、ソフトウェアのデバッグ、地上局の監視、ネットワーク管理、その他、普通の衛星運用だったら数十人で分担するような仕事を、HETE-2では大学院生一人を含む5人のメンバー(John Doty, Geoff Crew, Roland Vanderspek, Joel Villaseñor, Glen Monnelly)で行っている。したがって、たとえば熱帯地方の地上局の停電による機能停止の対策、運用ソフトウェアのデバッグ、など些細な、しかし予想外の事態に誰かが対処すると、そのために、本来の業務ができなくなり、衛星全体の運用がストップする、というようなことが次々に起きてしまった。当初の予定では、打ち上げ後2ヶ月ほどで、基本的な衛星の機能と観測機器と性能の確認試験を完了し、12月にかに星雲を用いたキャリブレーション観測を行ないつつ、定常的な観測にはいる予定であったが、

運用の手順が確立し、衛星の姿勢が安定したのは2月に入ってからであった。さらに、太陽活動の影響が予想以上に大きく、昼間の衛星の運用への太陽X線の悪影響を懸念して、リスクの少ない、太陽に照らされていない軌道上の夜(軌道一周100分間中35分間)だけに、WXM(広視野X線モニター)の運用を限るということにした。この二つの理由のため、3月以降も、打ち上げ前の想定に比べて4分の1程度の割合でしか観測時間をとれていない。日本側は、今までの衛星運用の経験を生かし、衛星運用に大きく貢献している。現在のところ、理研が提供した広視野X線モニターの運用指令の作成と米国の深夜時間帯(日本の午後)の衛星全体の監視を、白崎裕治(NASDA)、玉川徹、鳥居研一(理研)、坂本貴紀(東工大/理研)の4人が交代で分担している。

観測器の健康状態に関しては、ガンマ線分光器FREGATEと日本が担当した広視野X線モニターには、何の問題も生じておらず、打ち上げ前と変わらない性能を示している。軟X線カメラについては、残念ながら、遮光フィルターが打ち上げ後3、4ヶ月で(おそらく活性酸素原子のため)消失してしまった。その結果、一ヶ月の半分の月が明るい期間は、有効面積の半分(ベリリウム保護膜のついていない領域)のCCDは使えない。また、

それ以外の期間も、星の光のため、2 keV 以下の低エネルギーの計測は困難となってしまった。しかし、明るいガンマ線バーストの 10 秒角の精度での位置決定というもっとも主要な目的には、大きな支障はないと考えられる。可視光カメラは、ごく一部の CCD チップの動作に問題が生じたが、4 台すべてのカメラが問題なく星を捕捉することができることが確認された。観測器の視野の中心に明るい月が入る満月のときでも、45 度傾けた ACS カメラを用いることにより、姿勢を固定できることも最近確認された。姿勢系、通信系、電源系に関しても、打ち上げ後の劣化の兆候は一切みられておらず、ハードウェアは問題なく機能している。

11. 観測例：GRB010213

2001 年 2 月 13 日、12:35:35 (UTC) に HETE-2 はバーストを検出した。図 6 に、WXM によって取得した 4 バンド（上から 2-5、5-10、10-18、18-25 keV）でのエネルギースペクトルを示す。ピークでの X 線フラックスはかに星雲の約 2 倍であった。

WXM（広視野 X 線モニター）と可視光カメラで決めた位置は、(10 h31 m36 s,+5° 30' 39") (J2000)、統計誤差は 3.5 分角である (GCN Circular 934)。ただし、この時点では、観測器の座標に関する較正が完了していないので、30 分角の系統的誤差がありうる。X 線光度曲線には二山のピークをもち、約 30 秒間続いたが、主に 10 keV 以下のソフトバンドで輻射しており、X 線バーストに近いスペクトルを示したと考えられる。しかし、この

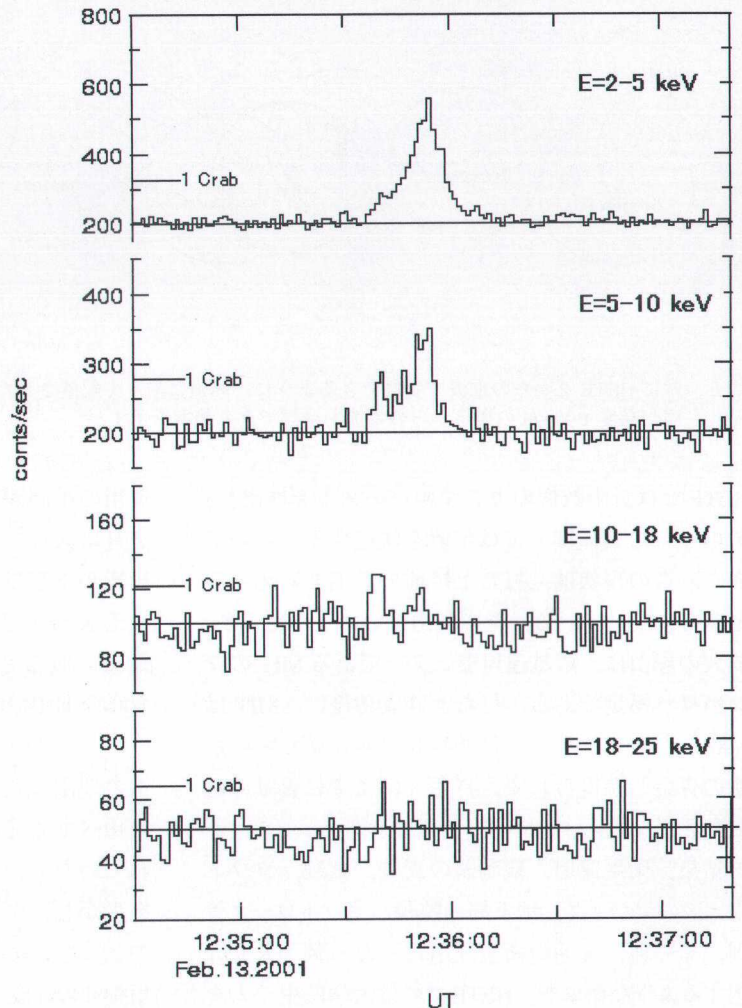


図 6. HETE-2 の広視野 X 線モニター(WXM)によって観測された GRB010213 のバンド別 X 線光度曲線。

イベントは高銀緯で起こり、銀河パルジから十分離れていて、球状星団など X 線バースト源と関係しそうな既知の天体は付近にない。X 線バーストの可能性は否定できないものの、いわゆる X-ray Rich GRB (14) に分類されるものかもしれない。

12. 今後の見通し

ようやく、かに星雲など明るい既知の X 線源を用いた、観測器座標と衛星姿勢の較正の結果が整

い、地上系の運用やバースト情報配信のソフトウェアも安定に動くようになってきた。WXMも今までは衛星が太陽に照らされない期間だけ、高圧を投入する安全第一の運用を行ってきたが、あと少々の安全機構の検証を行なった後に、視野が地球に妨げられていない時間帯は日照時も観測を行なう方針である。これにより、観測時間を5割増やすことができる。可視光カメラの満月時の運用も実現し、観測効率は徐々に、本来想定していたレベルに近づけることができると考えている。あと、数例の丁寧な検証ののち、リアルタイムでのバースト位置情報配信を始められるであろう。

われわれは、HETE-2からのバースト位置速報に基づいて自動的に撮像を行なう小型のロボット望遠鏡を開発しているが、その出番がようやく近づいてきた。(残念ながら、HETE-2による発見ではなかったが)この2月に起きたガンマ線バーストGRB010222の可視光残光は京大の屋上の口径30cmの望遠鏡で検出に成功している(Kato et al. GCN Circular 984)。全国の小口径望遠鏡をもつ方々は、ぜひ、HETE-2の情報にもとづき、ガンマ線バーストの可視光閃光や残光の検出に挑戦していただきたい。

最後に

小田 稔先生が3月に逝去された。本文中に述べたように、1983年 Santa Cruz 会議での発端から1990年の計画開始での日本の参加などHETE計画の節目で小田先生は非常に大きな役割を果たされてきた。そして1997年に宇宙科学担当 NASA 副長官が来日したときの熱意ある説得は二号機の実現への大きな契機となった。筆者は幸運にして大学院の初年から先生に指導を受け、特に、「研究を面白いがる」態度を教えていただいた。先生のご冥福を祈るとともに、HETE-2でよい成果をあげて先生のご恩に報いたいと思う。

参考文献

- 1) Woosley S.E. et al., 1984, in AIP Conf. Proc. 115, "High Energy Transients in Astrophysics", ed. S.E. Woosley, p. 709.
- 2) Lamb F.K., Ibid. p. 179.
- 3) Inoue H., Ibid. p. 243.
- 4) Lewin W.H.G. Ibid., p. 249.
- 5) Tawara Y., Kii T., Hayakawa S., Ibid. p. 257.
- 6) White N.E., Kaluzienski J.L., Swank J.H., Ibid., p. 31.
- 7) Woosley S.E., Ibid. p. 485.
- 8) Lamb D.Q., Ibid., p. 512.
- 9) Lingefelter R.E., Hueter G.J., 309
- 10) Costa et al., 1997, Nature, 387, 783
- 11) van Paradijs et al., 1997, Nature, 386, 686
- 12) Frail et al., 1997, Nature, 389, 261
- 13) Metzger et al., 1997, Nature, 387, 878
- 14) Sahu et al., 1997, Nature, 387, 476
- 15) Akerlof et al., 1999, Nature, 398, 400

The Launch of High Energy Transient Explorer 2

Nobuyuki KAWAI

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551

Abstract: The High Energy Transient Explorer 2 (HETE-2), a small scientific satellite designed to detect and localize gamma-ray bursts (GRBs), was launched successfully on October 9, 2000. HETE-2 monitors the sky field with a radius of 40 degrees centered on the anti-sun direction in soft X-ray to gamma-ray energy bands. The location of the GRB detected in this field is determined onboard, quickly sent to the ground, and will be distributed to interested ground-based observers within seconds of burst detection, thereby allowing detailed observations of the initial phases of GRBs. In this article I review the history of the HETE project since it was conceived in 1983, and present its current status after the launch.