

M-V ロケット搭載の地磁気姿勢計（GAS）

高橋隆男*，廣川英治**

1. はじめに

ロケットの飛翔姿勢を計測することは、ロケット工学上および搭載観測計器のデータ解析のためにも極めて重要である。M-V-5号機からM-V-8号機のB3PL部に基本計器（CI）として搭載された地磁気姿勢計（GAS：Geomagnetic Aspect Sensor）は、地球磁場方向を基準としたロケットの飛翔姿勢を示す地磁気姿勢角を測定するものである。B3PL部に搭載された地磁気姿勢計は全号機とも正常に動作し、地磁気に対するロケットの飛翔姿勢とスピン特性を正しく計測した。また、地磁気姿勢計は姿勢計測系のバックアップシステムとしての役割を担っていた。

2. 概 要

M-V ロケット B3PL 部に基本計器として搭載された地磁気姿勢計は、小型・軽量で信頼性が高いリングコアをセンサとするフラックス・ゲート型磁力計である。地磁気姿勢計のセンサはロケットの機軸方向成分（GAZ）と、これに垂直な平面内で互いに直交する二成分（GAX，GAY）を持った三成分タイプの磁力計である。測定できる姿勢情報はロケット座標軸と地球磁場ベクトルとの成す角度で、これらのデータからスピン特性や姿勢制御にともなう飛翔姿勢の変化やコーニング角の大きさ、及びコーニング周期などを計測することができるようになっている。

なお、ロケット本体や他の搭載計器からの磁気的なバイアスを打ち消すためのオフセット・システムを採用しており、チェックアウト・コネクタを用いてバイアスを任意に補正することも出来るようになっている。

M-V ロケット B3PL 部に搭載された地磁気姿勢計のセンサと電気回路は全号機とも同一のものである。表1には地磁気姿勢計の仕様を示すと共に、地磁気姿勢計のブロックダイアグラムと外観図を図1及び図2に示す。

* 東海大学：Tokai University

** The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA

表1 地磁気姿勢計の仕様

センサタイプ	三成分フラックス・ゲート型磁力計（リングコア）
磁場測定範囲	$\pm 50,000\text{nT/成分}$
測定精度	$\pm 1.0\%$ 以下（0 ～40℃）
応答周速度	100.0 Hz 以上
応答周波数	$7.5 \pm 0.5\text{ kHz}$ 以下
消費電力	+18V : $40 \pm 10\text{mA}$, -18V : $-30 \pm 10\text{mA}$
	寸 法, 重 量
センサ部	40× 50×62 h , 0.12±0.05 kg 以下
電 気 部	95×125×50 h , 0.40±0.10 kg 以下
	テレメータ・チャネル
GAX センサ	PCM NA43
GAY センサ	PCM NA46
GAZ センサ	PCM NA47

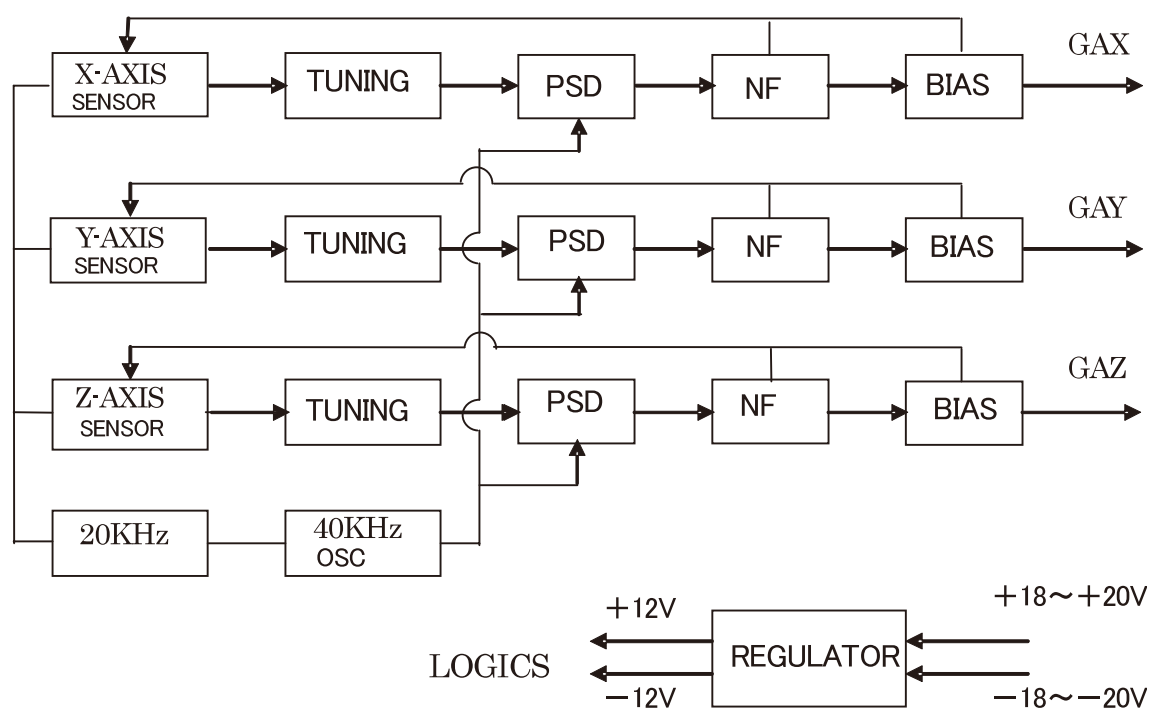


図1 地磁気姿勢計のブロックダイアグラム

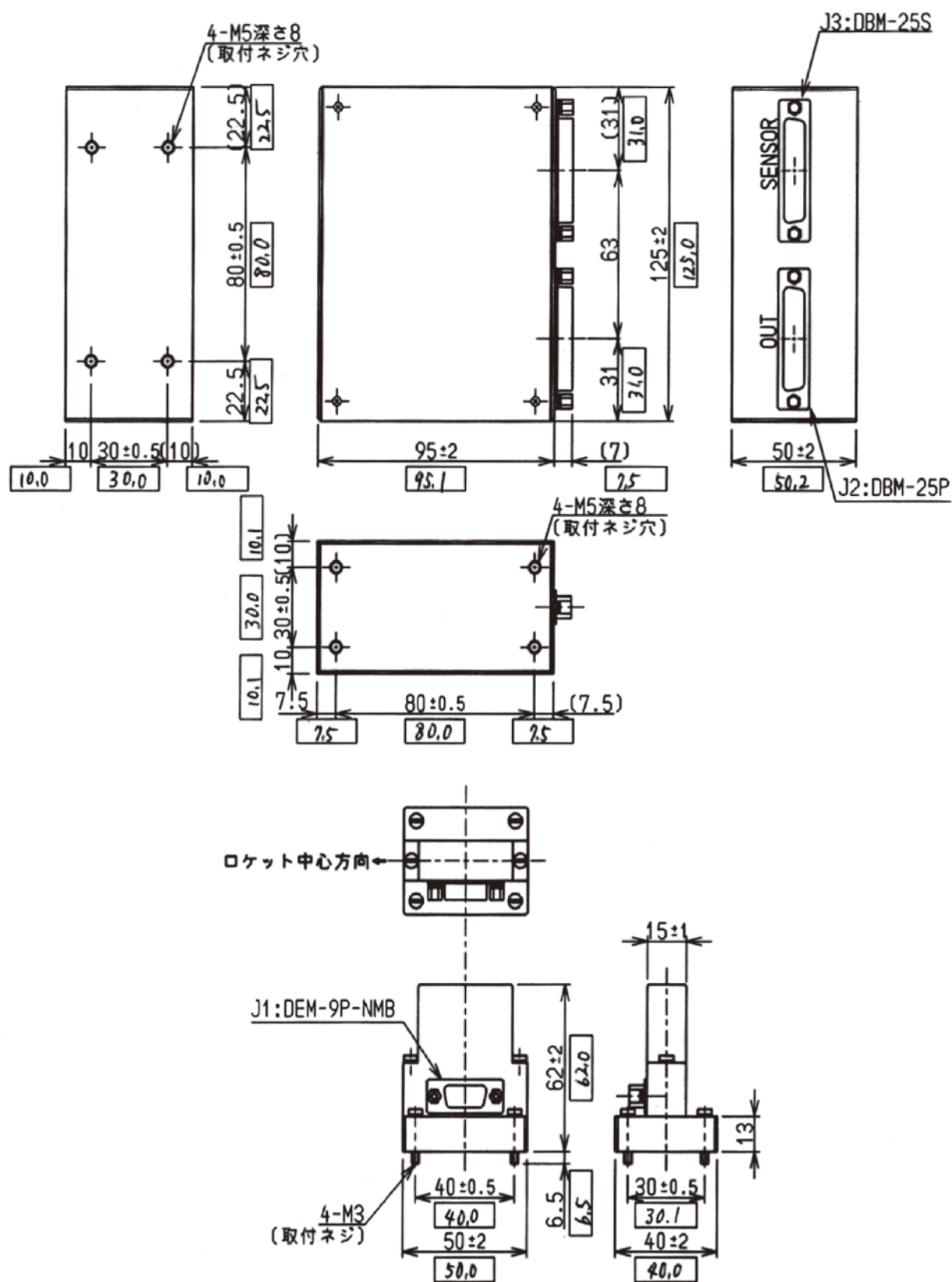


図2 地磁気姿勢計のセンサ部と電気部の外観図

3. 飛翔結果の概要

M-V-5, 6, 7, 8号機のB3PL部に搭載された地磁気姿勢計は、各号機とも全飛翔期間、全て正常に動作し、地磁気姿勢計の出力データからスピン特性や地球磁場方向に対するロケットの飛翔姿勢である地磁気姿勢角を正常に計測することができた。なお、M-V-5号機では2段目ロケットの飛翔姿勢をも計測することを目的としてB2PL部にも地磁気姿勢計が搭載された。以下に、地磁気姿勢計から得られたロケットのスピン特性と地磁気姿勢角を各号機毎に報告する。

3.1. M-V-5号機

3.1.1. スピン特性

発射からX + 399秒までの間、3軸制御によってロケットのスピンはゼロであったが、X + 238秒からX + 285秒まではテレメータの受信状況を良好に保つためにロケットの機軸周りに90度回転させるロール制御が行われている。また、X + 339秒のスピンモータ点火によってスピンは約0.68rpsとなり、その後は一定であった。

3.1.2. 地磁気姿勢角

B2PL部とB3PL部に搭載された地磁気姿勢計によって計測された地磁気に対するロケットの姿勢変化を図3.1.1と図3.1.2に示す。これらの図には、発射からX + 450秒までの間に姿勢制御が予定通り正常に行われたことが示されている。

図3.1.1は、第2段ロケットモータ部の地磁気姿勢角を表示したもので、発射からX + 200秒の第2段ロケットモータ分離までの姿勢変化と分離後の姿勢変化が示されている。分離後は、周期が約75秒から100秒程度へとゆっくりと変化しながらタンブリングして落下する第2段ロケットモータ部の様子が示されている。

図3.1.2には、発射からX + 450秒のテレメータがロックオフになるまでの間、予定通りに姿勢制御が行われている第3段ロケットモータ部の姿勢変化が示されている。発射後、X + 75秒の第1段ロケットモータ分離と第2段ロケットモータ点火、X + 139秒の第2段ロケットモータのSMSJ点火、X + 186秒のノーズフェアリング展開、X + 200秒の第2段ロケットモータ分離、X + 202秒の第3段ロケットノズル伸展、X + 205秒の第3段ロケットモータ点火、ならびにX + 350秒の第3段ロケットモータ分離やX + 354秒のキックモータ点火などのイベントによる著しい姿勢変化は特に検出されなかった。

なお、X + 238秒からX + 285秒までの間に示されている約10度程度の姿勢変化はテレメータの受信状況を良好に維持するためにロケットをロール軸方向に90度回転させる姿勢制御に対応するものであり、GAX, GAYセンサ出力からも予定通り90度のロール制御が行われたことを示している。

また、X + 339秒からの地磁気姿勢角の変化は、第3段ロケットモータ部のスピン周期と同期しており、スピンモータ点火によるスピンの影響が示されたものである。この変化はロケットスピン軸方向と地磁気姿勢計の機軸方向センサ (GAZ)が約2～3度ずれていることによるものであり、姿勢変化ではないと考えられる。

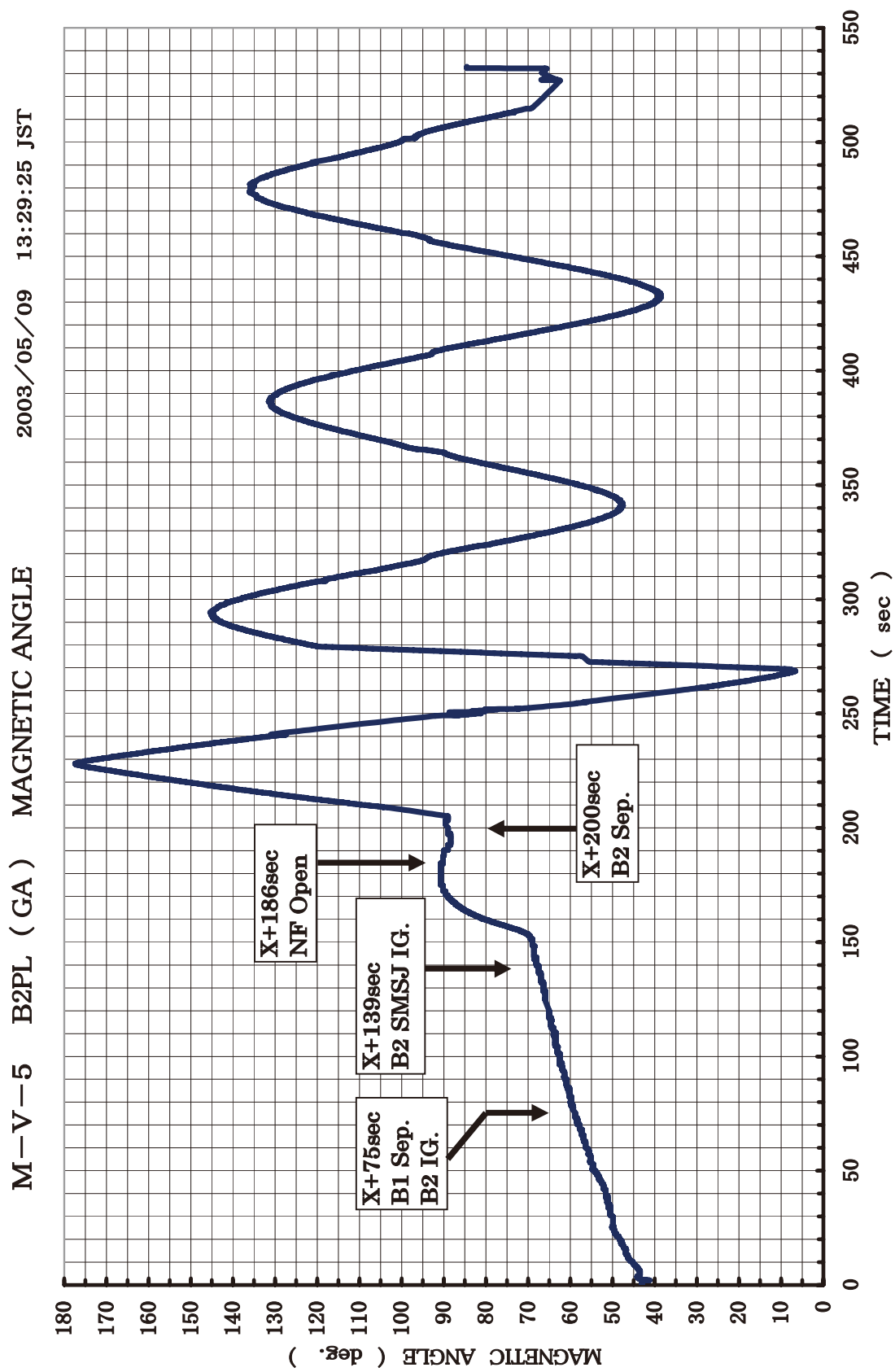


図 3.1.1 地磁気姿勢角 (B2PL 部)

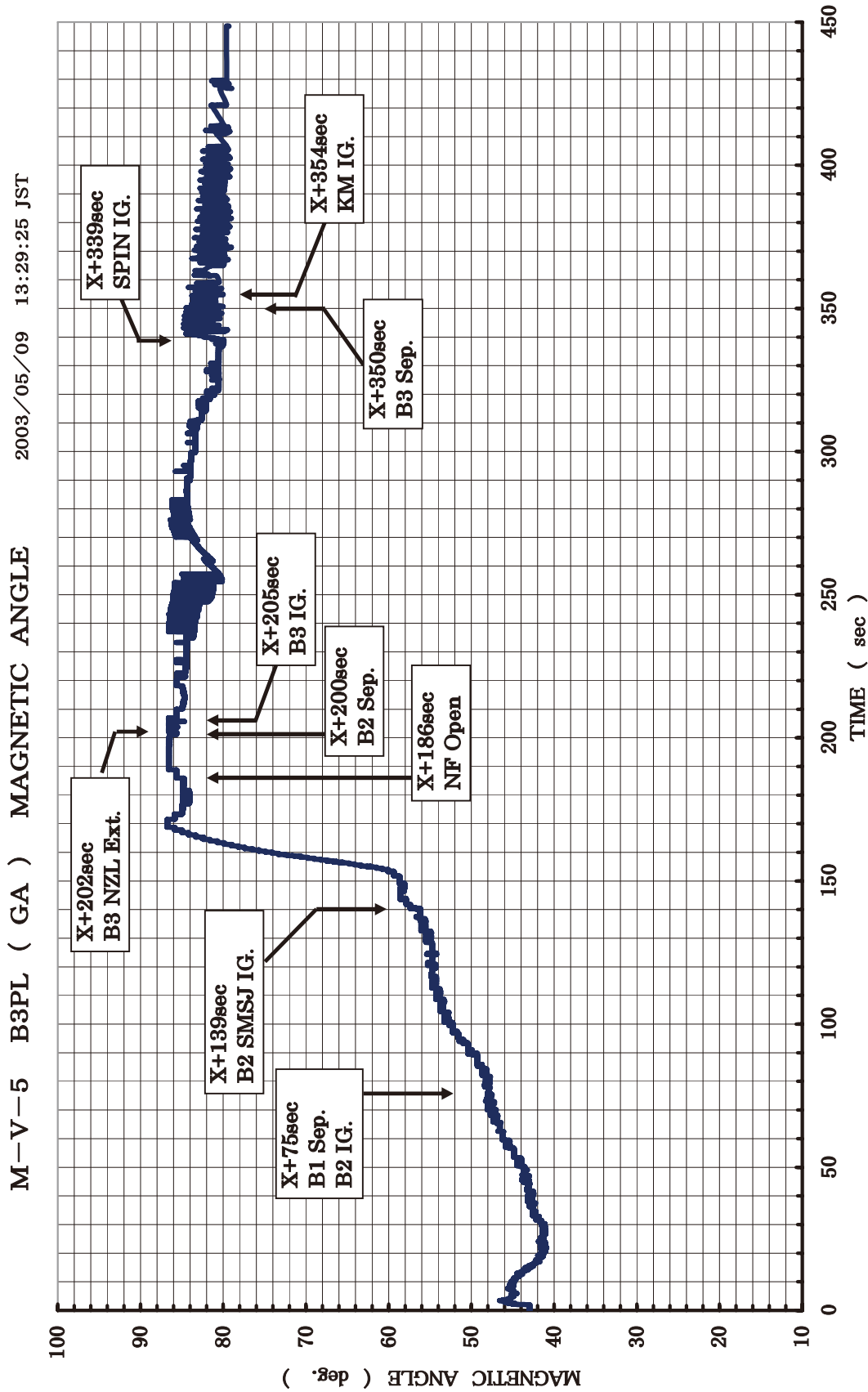


図 3.1.2 地磁気姿勢角 (B3PL 部)

3.2. M-V-6号機

3.2.1. スピン特性

発射からX + 207秒までの間、3軸姿勢制御によりロケットのスピンはゼロとなっていた。X+207秒にはテレメータの受信状況を良好に保つためにロケットのスピン軸周りに90度回転するロール制御が行われた。ロール制御開始から回転が始まり、X + 280秒には約90度回転している。その後、ロールはゼロに制御されていた。その様子が図3.2.1に示されている。また、X + 1291秒に第3段モータのスピンアップが行われ、スピンレートが約6.8rpmに達している。X + 1307秒の第3段モータと衛星の分離後、X + 1307.5秒にはデスピンが開始され、X + 1380秒には約0.4rpmにスピンが減衰している。さらに、X + 1451秒には第3段のスピンアップが再度開始され、スピンレートは約5.2rpmで一定に制御されていた。その様子が図3.2.3に示されている。

3.2.2. 地磁気姿勢角

B3PL部に搭載された地磁気姿勢計（GA）による地磁気に対するロケットの姿勢変化を図3.2.2（内之浦受信局等）および図3.2.4（クリスマス島受信局）に示す。地磁気姿勢計の測定結果から、発射からX + 470秒までの間、姿勢制御プログラムによる姿勢制御が予定通り行われたことが図3.2.2に示されている。

X + 75秒の第1段と第2段の分離と第2段モータの点火、およびX + 200秒の第2段と第3段の分離、X + 205秒の第3段モータの点火に等による姿勢変化は見られない。また、X + 152.5秒のリファレンスチェンジ開始によってピッチ角が約45度ダウンしていることが示されている。さらに、X + 347秒のリファレンスチェンジによって、姿勢反転を開始し、X + 422秒にはロケットのスピン軸方向が180度回転していることが示されている。

クリスマス島受信局でX + 1040秒からX + 1740秒までの間に受信された地磁気姿勢角が図3.2.4に示されている。X + 1307秒には、第3段モータと衛星の分離による磁気バイアスの変化に伴う姿勢変化も示されており、リアルタイムで分離の様子が確認できている。また、X + 1316秒からはピッチ軸タンブリング開始に伴って、ロケットのスピン軸方向が地磁気に対して約120度変化している様子が示されている。さらに、X + 1451秒のスピンアップを再度開始した影響により、周期が約12秒で、半頂角が約2度のコーニングを行っていることも示されている。

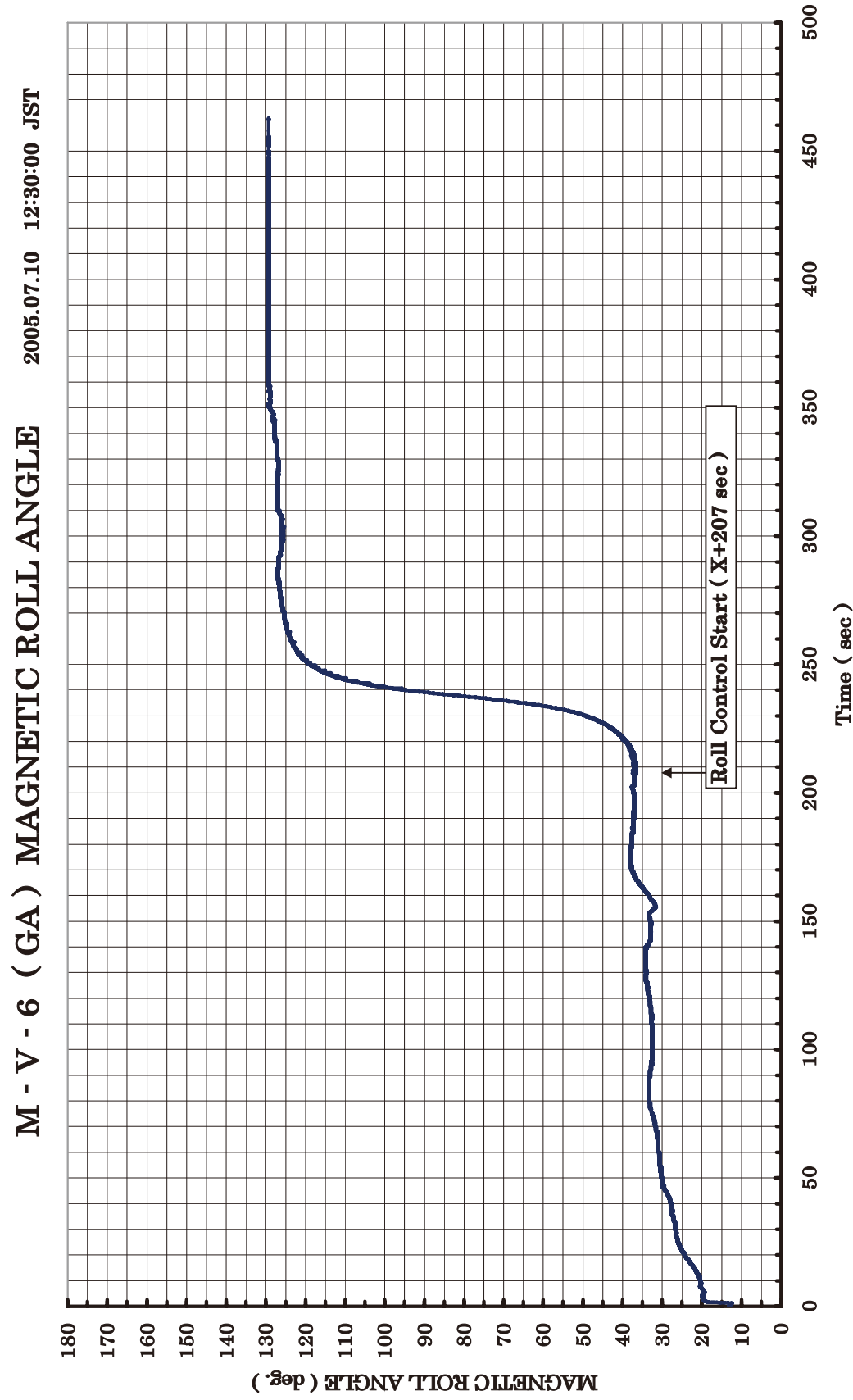


図 3.2.1 地磁気ロール角 (B3PL 部)

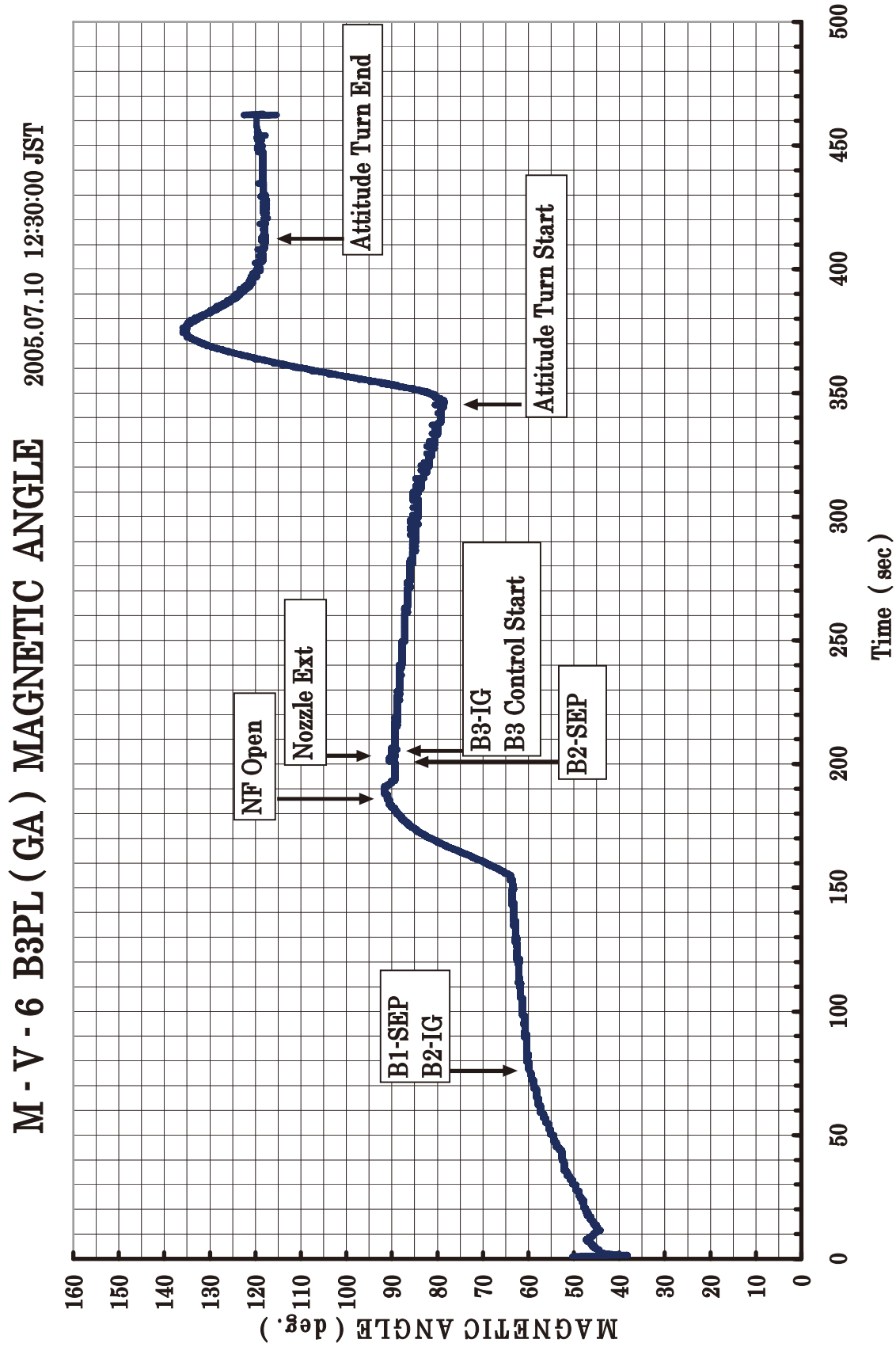


図 3.2.2 地磁気姿勢角 (B3PL 部)

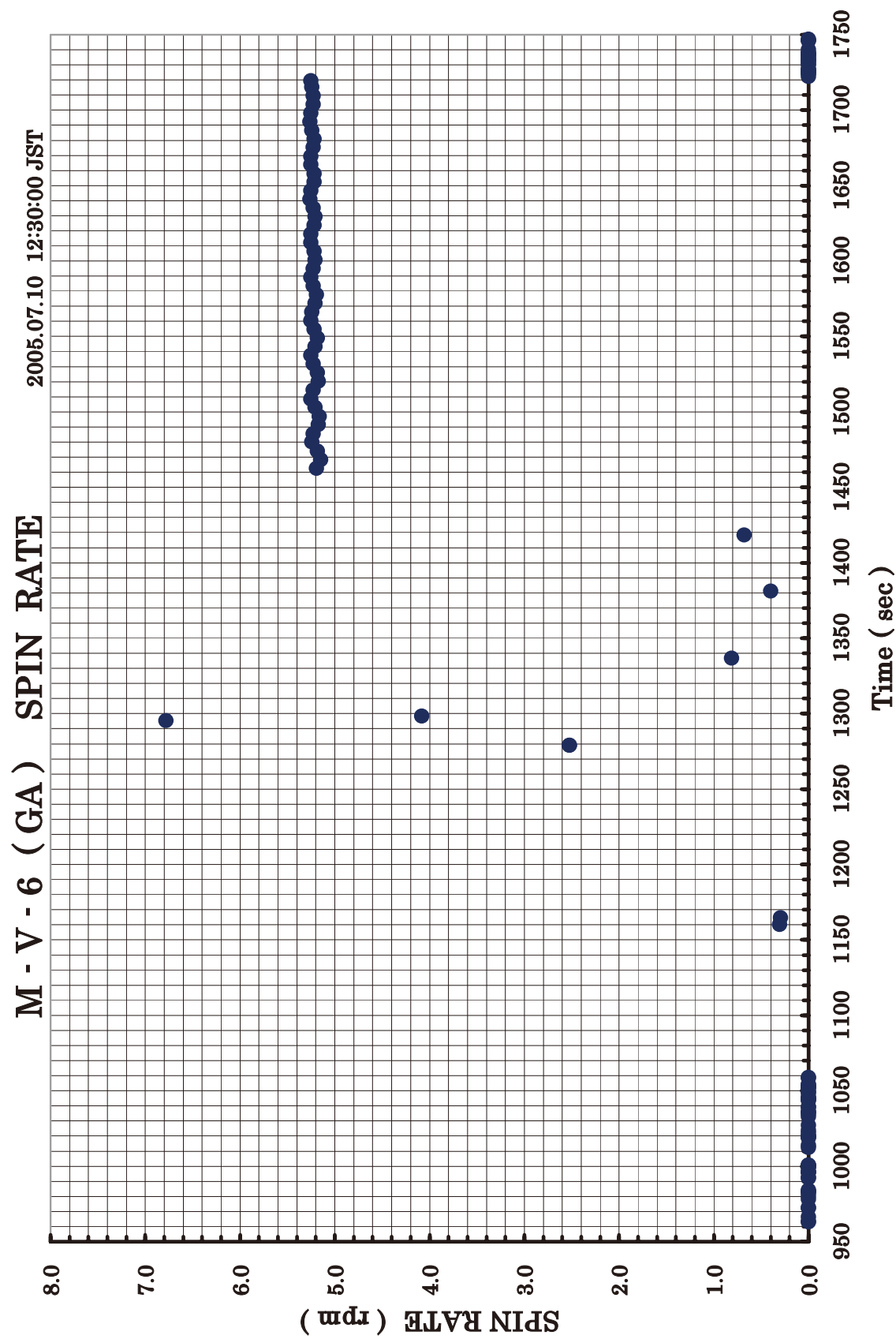


図 3.2.3 スピントレート (B3PL 部)

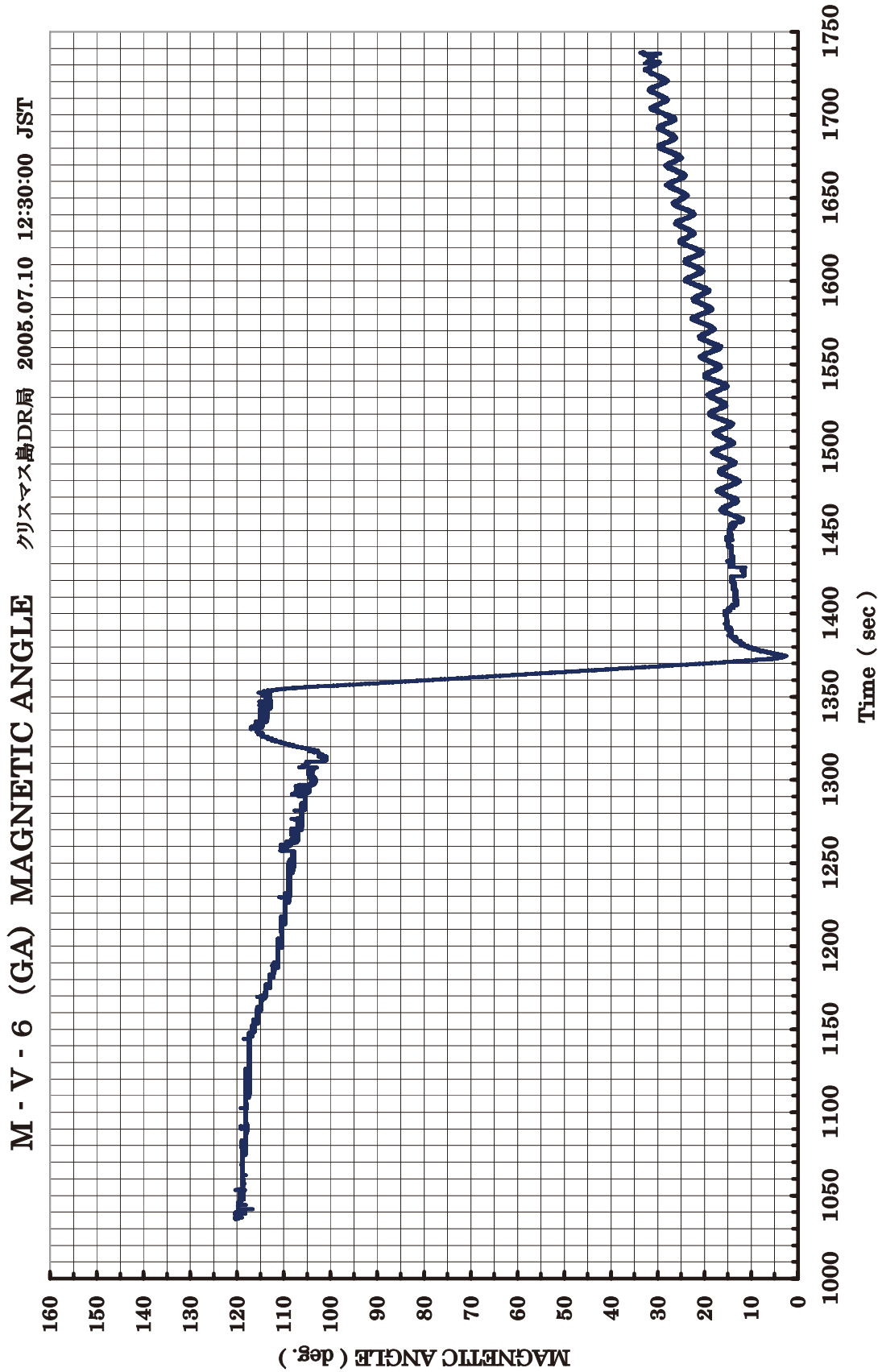


図 3.2.4 地磁気姿勢角 (B3PL 部)

3.3. M-V-7号機

3.3.1. スピン特性

発射からX + 152秒までの間はSMRC制御によりロケットのスピンはゼロとなっていた。X+152秒にはテレメータの受信状況を良好に保つためにロケットのスピン軸周りに90度回転するロール制御が行われた。その後もSMSJや3軸制御によってテレメータがロックオフになるX + 500秒まで予定通りにロールは制御されていた。

なお、B3PL部としてのミッションは終了しているが、オーストラリア局とアラスカ局で受信されたデータの解析結果ら地磁気に対するロール角度を図3.3.4と図3.4.5に示している。これらのデータから衛星分離後にSJなどによるスピニアップなどは検出されておらず、スピンは粗ゼロで一定であったと考えられる。

3.3.2. 地磁気姿勢角

B3PL部に搭載された地磁気姿勢計（GA）による地磁気に対するロケットの姿勢変化を図3.3.1に示す。地磁気姿勢計の測定結果から、発射からテレメータがロックオフとなるX + 500秒までの間、姿勢制御プログラムによる姿勢制御が予定通り行われたことが示されている。

X + 75秒の第1段モータ分離と第2段モータの点火、X + 186秒のNF開頭、X + 200秒の第2段モータの分離、及びX + 205秒の第3段モータの点火などによる顕著な姿勢変化は見られていない。また、X + 152.5秒のリファレンスチェンジ開始からX + 185秒のリファレンスチェンジ終了までに地磁気に対して約30度の変化を検出している。この変化はピッチ角に換算するとピッチ角が約45度ダウンしていることを示している。さらに、X + 347秒のリファレンスチェンジによって姿勢反転を開始し、X + 420秒には姿勢反転が終了したことが示されている。なお、X + 465秒の姿勢変化は第3段モータ部のSJによる昇温噴射による影響が検出されたものである。

また、図3.3.2と図3.3.3にはオーストラリア局とアラスカ局で受信された地磁気姿勢角がそれぞれ示されている。オーストラリア局で受信開始後のX + 830秒からX + 865秒までの地磁気に対する姿勢変化は予定された通りのロール姿勢制御による姿勢変化を示しているが、その後の地磁気姿勢角の変化はロケット位置の変化に伴うもので飛翔姿勢は一定であったことを示している。同様に、アラスカ局での地磁気姿勢角変化もロケット位置の変化によるもので、やはり飛翔姿勢が一定であったことを示している。

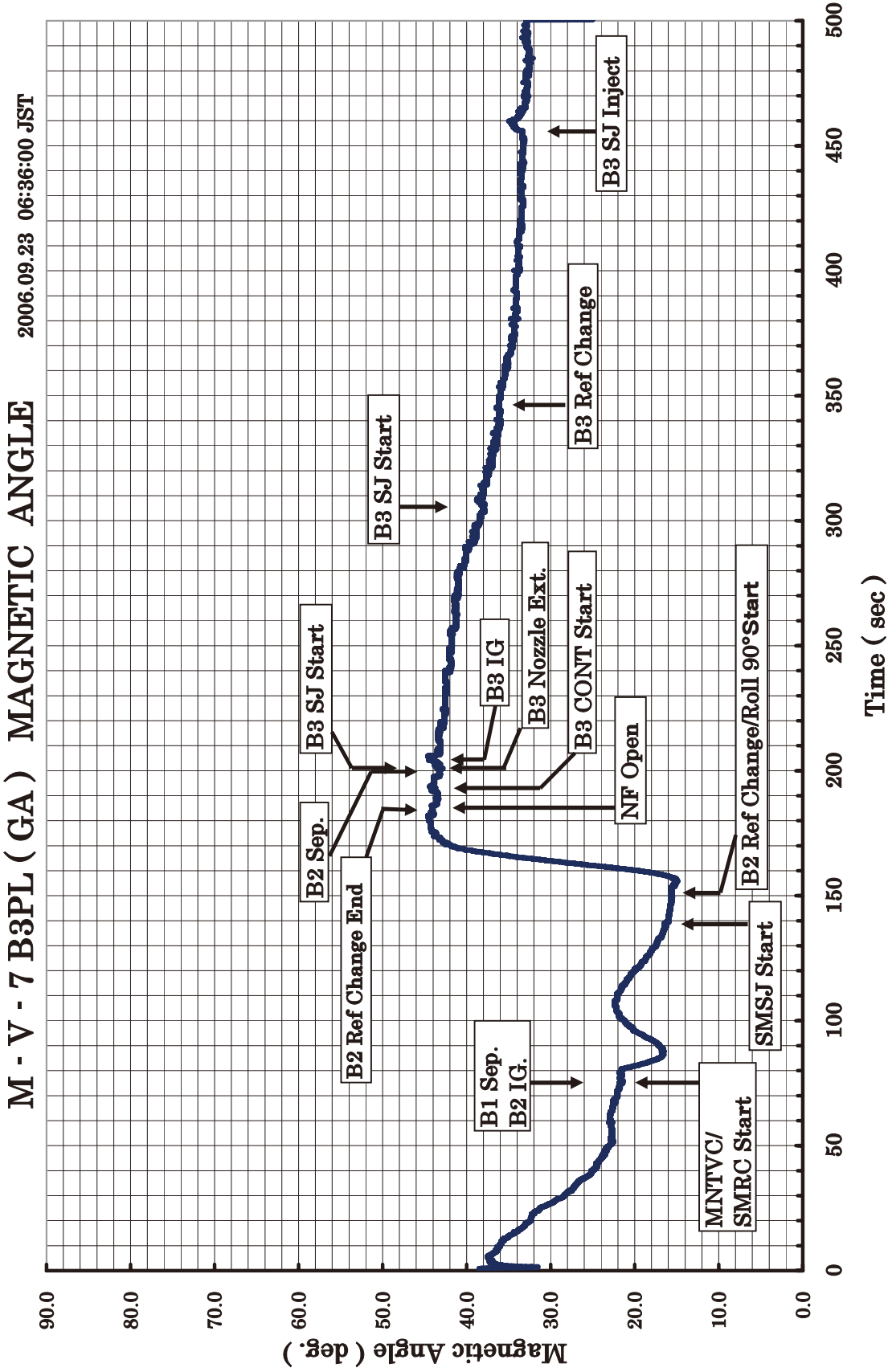


図 3.3.1 地磁気姿勢角 (B3PL 部)

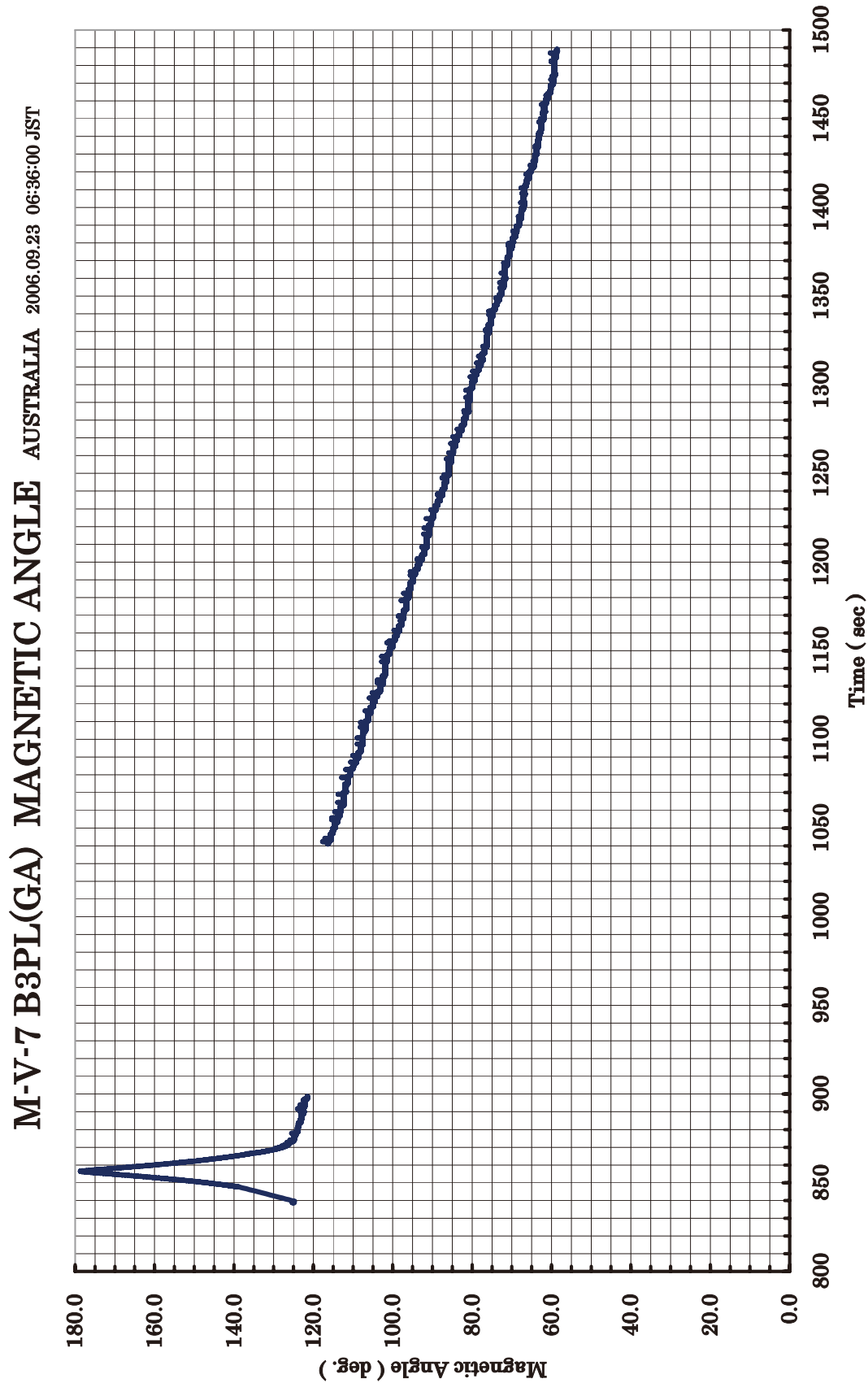


図 3.3.2 地磁気姿勢角 (オーストラリア局)

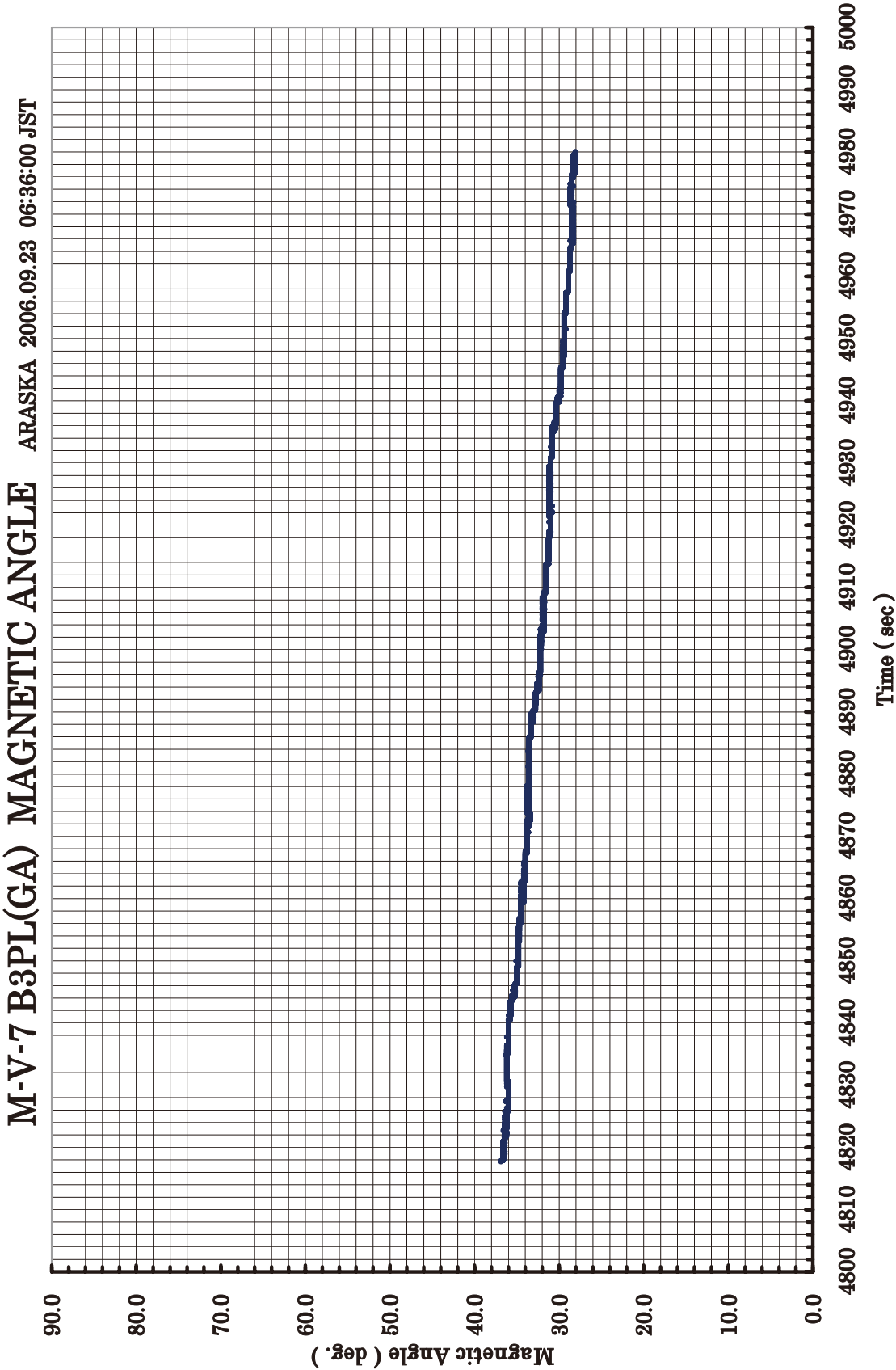


図 3.3.3 地磁気姿勢角 (アラスカ局)

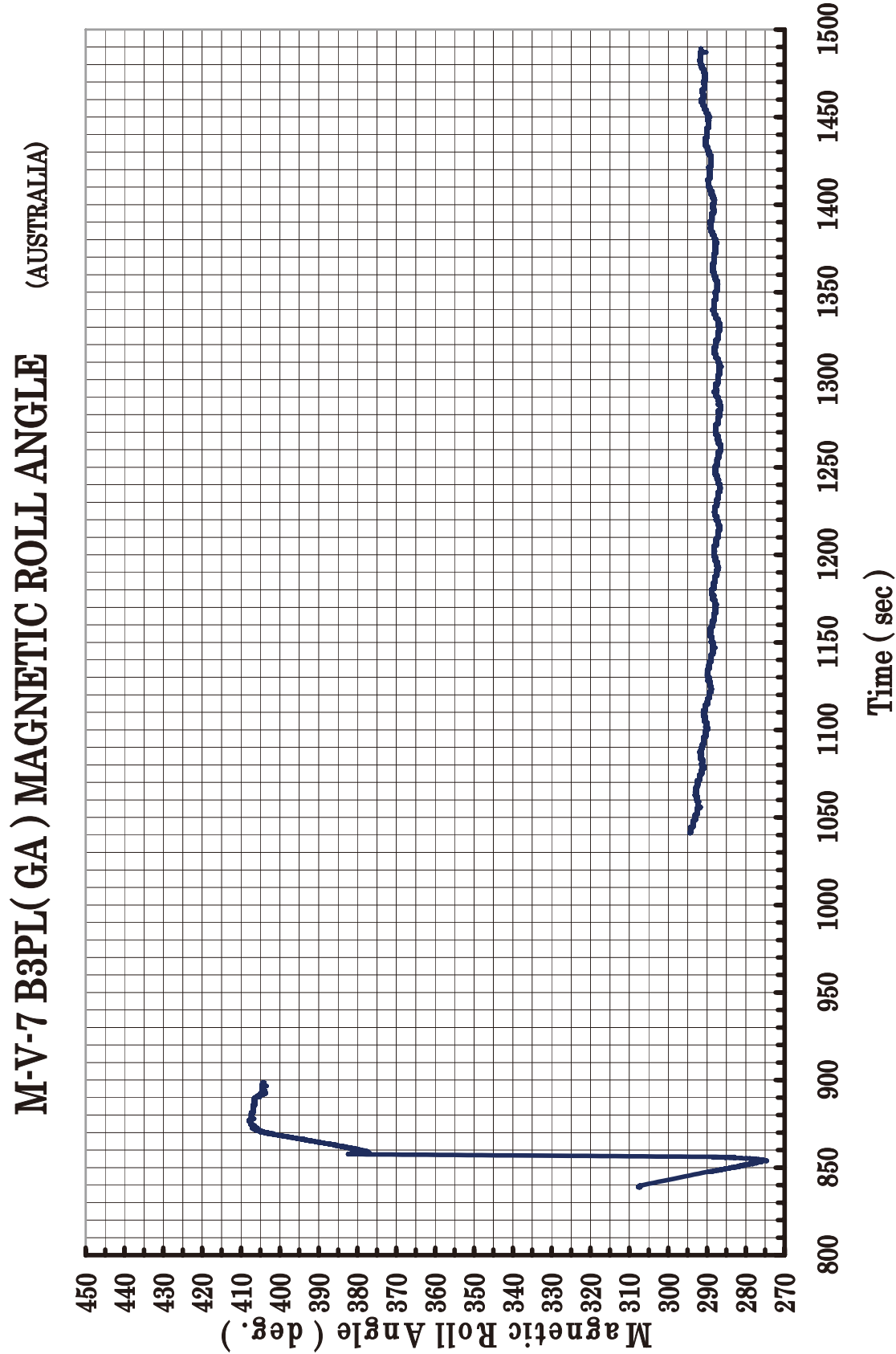


図 3.3.4 地磁気ロール角 (オーストラリア局)

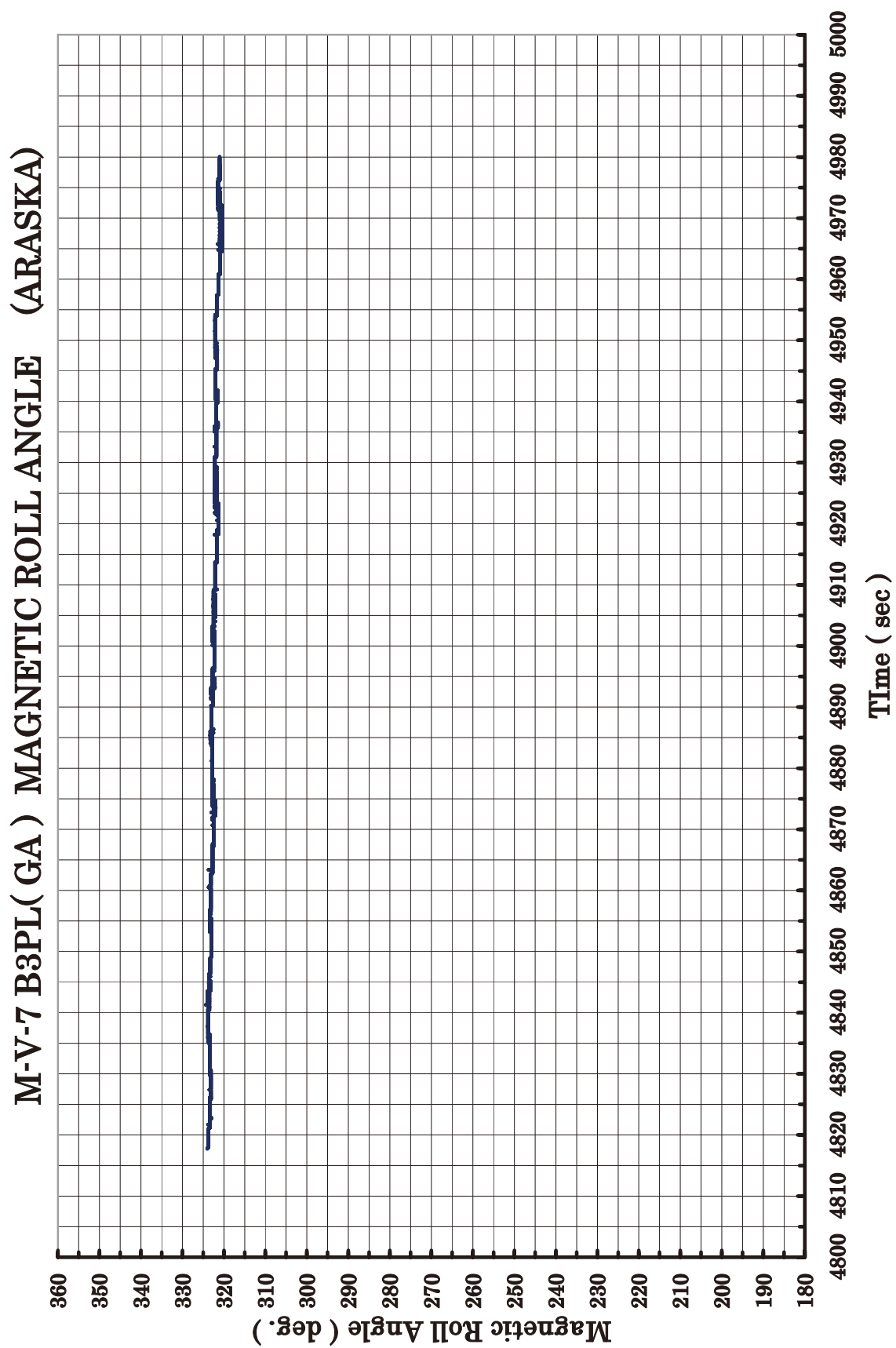


図3.3.5 地磁気ロール角 (アラスカ局)

3.4. M-V-8号機

3.4.1. スピン特性

図3.4.1には、B3PL部に搭載した地磁気姿勢計の3成分センサ出力電圧を計測した結果を示してある。ロケット機軸方向のGAZセンサ出力からは主にロケットのピッチ角方向の変化を、このセンサに垂直な平面内で互いに直行しているGAXとGAYセンサの出力からは主にロールに関する変化を相対的に検出することが出来るようになっている。発射からX+210秒までの間、3軸姿勢制御によりロケットのスピンはゼロとなっていた。X+210秒にはテレメータの受信状況を良好に保つためにロケットのスピン軸周りに90度回転するロール制御が行われた。ロール制御開始から回転が始まり、X+280秒には約90度回転している。その後、ロールはゼロに制御されていた。その様子が図3.4.1に示されている。なお、X+487秒でテレメータがロックオフとなったためにX+499秒のスピンアップ開始、X+519秒の衛星分離、X+520秒の第3段デスピンモータ点火などを確認することはできなかった。

3.4.2. 地磁気姿勢角

B3PL部に搭載された地磁気姿勢計（GA）による地磁気に対するロケットの姿勢変化を図3.4.2に示す。地磁気姿勢計の測定結果から、発射からテレメータがロックオフとなるX+487秒までの間、姿勢制御プログラムによる姿勢制御が予定通り行われたことが示されている。

X+75秒の第1段と第2段の分離と第2段モータの点火、X+186秒のNF開頭、X+200秒の第2段と第3段の分離、及びX+205秒の第3段モータの点火等による顕著な姿勢変化は見られていない。

また、X+152.5秒のリファレンスチェンジ開始からX+185秒のリファレンスチェンジ終了までの間にピッチ角が約45度ダウンしている。さらに、X+347秒のリファレンスチェンジによって姿勢反転を開始し、X+422秒にはロケットのスピン軸方向が180度回転していることが示されている。なお、X+465秒の姿勢変化は第3段モータ部のSJによる昇温噴射によるものである。

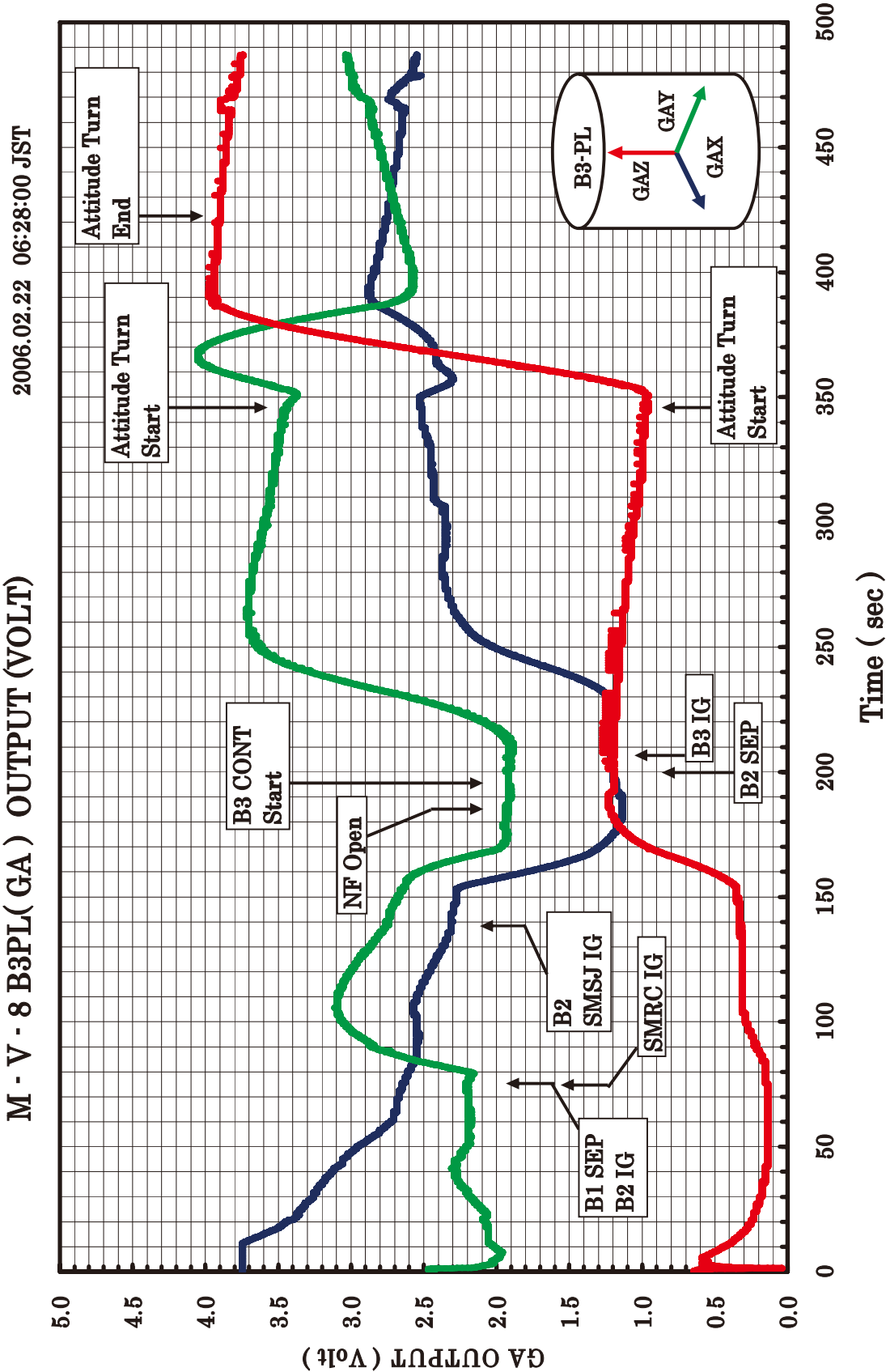


図 3.4.1 地磁気姿勢計出力電圧 (B3PL 部)

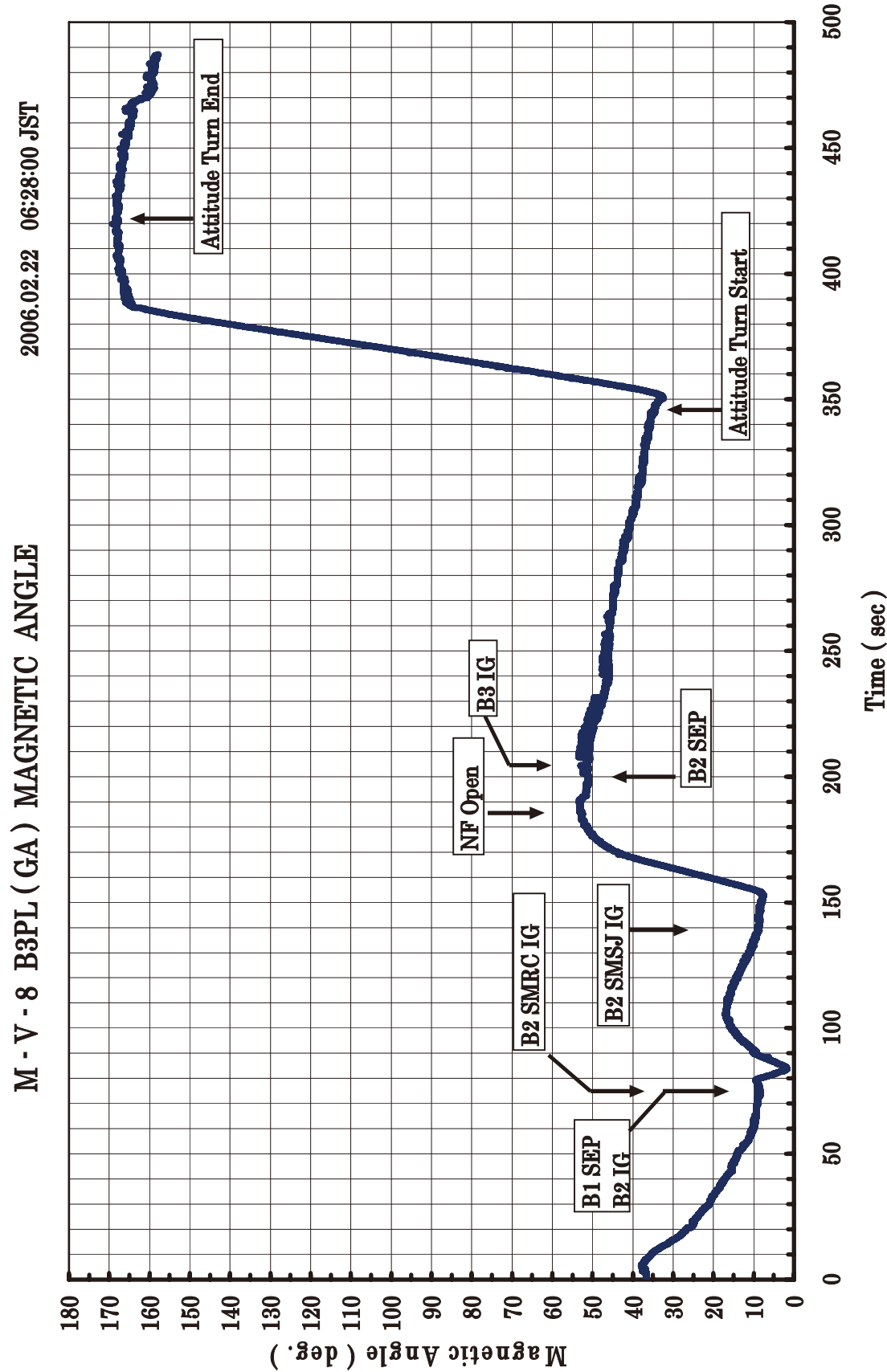


図 3.4.2 地磁気姿勢角 (B3PL 部)

4. 次期固体ロケットへの反映事項

基本計器としてCI部に搭載されている地磁気姿勢計は、M-Vロケットの姿勢計測系をバックアップするシステムとして位置づけられ、全号機にわたり成功裏にその役割を果たしてきた。M-Vロケット以外にも、M-3SやS-310、S-520、SS-520など殆どのロケットに搭載され、ロケットのスピン特性や地磁気に対する飛翔姿勢を25年以上の長きにわたり、常に安定した状態で正常に計測し続けてきた。M-Vロケットにおいては技術的にも完成し、安定して運用されている計測システムを無闇に変更などすべきではないという基本思想に従って、地磁気姿勢計も従来通りの部品や技術によって安定したシステムとして正常に運用されてきた。

また、クリスマス島などのダウンレンジ局においては、磁気バイアスの変化から衛星の分離をリアルタイムで確認するなどの成果もあげている。

なお、地磁気姿勢計に関しては、現在も従来通りのアナログシステムのままで正常に動作しているが、最新技術の導入によって計測システムをデジタル化することなどで、さらに小型・軽量で高性能な安定した地磁気姿勢計測システムを、より安価に作成できることが分かっており、現在の約1/3程度のコストダウンを図ることができると考えられている。従って、最新技術の導入によってコストの削減を図ると共に、高信頼性で小型・軽量、かつ高性能で安定したタフなシステムとして、あらゆる観測ロケットなどにも搭載できる汎用性の高い地磁気姿勢計を安価に実現するように是非とも改善すべきであると考えている。

5. まとめ

M-Vロケットに基本計器として搭載された地磁気姿勢計は、小型・軽量で信頼性が高く、非常に安定した姿勢計測システムで、全ての打上げ実験において正常に動作し、地磁気に対するロケットのスピン特性や飛翔姿勢を正しく計測した。解析結果は、各号機とも常に姿勢制御に伴う姿勢変化を地磁気に対する姿勢変化としてほぼ正確に検出しているので姿勢計測系のバックアップシステムとして十分に役立てられていたと考えられる。

最後に、地磁気姿勢計による姿勢計測システムが長期にわたり、非常に安定して運用されてきた背景には、メーカー現場担当者の豊かな経験と技術力は勿論のこと、ロケット班、テレメータ班、RB管制班、集中電源班など、数多くの方々との信頼関係に基づいて築かれた大切なチームワークがあり、大変重要な役割を担っていたと考えられる。