

技術試験衛星VI型特別調査委員会
アポジェンジン分科会報告書について

平成6年12月15日

技術試験衛星VI型のアポジェンジンの不具合の原因と対策について、技術的に詳細に調査審議するため、去る9月22日、技術試験衛星VI型特別調査委員会（以下、「特別調査委員会」という）の下に設置されたアポジェンジン分科会は、以下のとおり、10月6日の第1回会合をはじめとして、11回の会合を開催し、慎重かつ精力的に調査審議を進め、報告書を取りまとめた。

本分科会では、宇宙開発事業団で実施された不具合現象に係る再現確認試験の結果を検討しつつ、調査審議をとり進めたが、必要に応じ、分科会より追加の確認試験を要請し、また、アポジェンジン製造工場の現地調査も行った。その結果、最も可能性が高いと推定される不具合原因について、概ね絞り込みができたものとする。また、それらの推定原因を踏まえ、今後に必要なと考えられる対策も提言した。

宇宙開発の関係者においては、今回の不具合の経緯に鑑み、その教訓を今後のわが国の宇宙開発に積極的に生かし、より適切に開発が進められるよう一層の努力を傾注されることを期待する。

（参考）アポジェンジン分科会開催状況

10月 6日（木）	第1回アポジェンジン分科会
10月13日（木）	第2回 "
10月20日（木）	第3回 "
10月26日（水）	第4回 "
11月 4日（金）	第5回 "
11月11日（金）	第6回 "
11月16日（水）	第7回 "
11月22日（火）	第8回 "
11月28日（月）	第9回 "
12月 6日（火）	第10回 "
12月12日（月）	第11回 "

2. 報告書の要点

(1) 不具合発生時の状況

8月28日にH-IIロケット2号機により打ち上げられた技術試験衛星VI型（ETS-VI）は、同月30日アポジエンジンを噴射したものの、出力が不十分であったためコマンドにより噴射を停止した。（図1（a）参照）

同月31日、アポジエンジンを3回再噴射したものの（図1（b）参照）、3回目の再噴射の際に推薬供給用の二液推薬弁が閉じなくなり、出力が不十分なまま噴射し続けたため、静止軌道に投入することが不可能となった。

(2) 不具合の原因について

アポジエンジンの不具合について、不具合要因解析（FTA）により、考えられるあらゆる原因（100以上）の項目を列挙し、その中から、宇宙開発事業団に行わせた確認試験等を通じ、有力原因の絞り込み作業を行った。その結果、不具合の原因としては、以下に述べる事象が最も可能性が高いと推定した。

①アポジエンジンの出力が十分に出なかった原因

- ・ 打ち上げ飛行時のランダム振動等により、二液推薬弁のばねが横に変位し、ピストンヘッドとケーシングの間に入り込んだ（噛込み）。
- ・ 宇宙空間でこれらの接触部表面の酸化膜が除去され、摩擦係数が増大し、ばねの噛込みがはずれなくなり、ピストンの動きを妨げ、同時にピストンが傾いた。
- ・ このため、推薬（燃料のヒドラジン及び酸化剤の四酸化二窒素（N₂O₄））の流量が微量に抑制され、出力が正常値に達しなかった。（図2参照）

②アポジエンジンの出力を停止できなかった原因

- 1) ①の二液推薬弁のばねの噛込みが原因となりピストンが傾いた際に、ピストン軸がケーシング（外枠）と接触して擦れ、3回目のアポジエンジンの再噴射の際にピストン軸とケーシングが宇宙空間の高真空中で凝着し、ピストンが戻らなくなった。（図2参照）

又は、

- 2) 二液推薬弁を閉じるために、駆動用のヒドラジン（燃料）をパイロット弁PV2から宇宙空間に放出した際に、ヒドラジンがPV2下流部で凍結し、3回目のアポジエンジンの再噴射の際に流路をふさいだ。（図3参照）

これによって、微量流量の推薬が停止せず、出力の停止が不可能となった。

(3) 宇宙開発事業団の対応についての考察

①アポジェンジンの構造

1) 二液推薬弁

- ・ 二液推薬弁のばねの大きな横変位は、地上で大きなランダム振動を加えた厳しい条件下では起きなかったが、実際の飛行振動環境と同等の小さなランダム振動を加える緩やかな条件下の方が発生し得るという特異な現象であることが判明。(図4(a)及び(b)参照)
- ・ 地上試験で相当の回数の作動試験等が実施されたものの、今回のような不具合の兆候が見られなかったこと、一般に地上試験は飛行環境よりも厳しい条件で行われること等を考慮すると、今回の特異な現象の可能性を予見することは困難であった。
- ・ ばねの横変位を防止する構造となっていれば今回のような不具合は生じなかったものと推定されることから、宇宙空間における不測の事態に対して、今後は、より注意深く対応する必要がある。

2) 二液推薬弁駆動圧供給系

- ・ 宇宙開発事業団は、再噴射に際して、放出したヒドラジンの全量がPV2配管出口で凍結した場合を想定して5回以上の噴射が可能と判断。実際にはアポジェンジンの燃焼停止動作不良は3回目の再噴射の際に発生。
- ・ 不具合発生時は緊急の対応が求められた切迫した状況下であり、その時点で宇宙開発事業団のとった対応策は、他に代替案も考え難く止むを得なかったものと考えられるが、二液推薬弁の駆動圧供給系の構造等については、今後は更に慎重な検討を行う必要がある。

②地上試験

- ・ 一般に、開発過程における地上試験は、実際の飛行時よりも厳しい条件を設定し、実施することが基本。今回の二液推薬弁の機能確認のための地上試験も、このような基本的な方法に従って実施された。
- ・ 今回の不具合の誘因になったと推定されるばねの横変位は特異な現象であることが判明しており、システムが非線形性をもつ場合には、従来の地上試験では機能が確認されるとは限らない場合があることを示すものとして、今後留意する必要がある。

(4) 今後の対策

①アポジェンジンの構造

1) 二液推薬弁

宇宙空間において類似の二液推薬弁を使用する場合には、ばねの横変位による嚙込みを防ぐため、シール性の確保に万全を期すことを前提に、ばねの嚙込み防止策を施すこと、真空中の金属間の接触・摺動を防止、改善することについて検討する必要がある。

2) 二液推薬弁駆動圧供給系

宇宙空間に推薬等を液体の形で放出しない方策を検討する必要があるが、それが困難な場合には、推薬等の凍結・解凍が生じる可能性がある場合にも破損することのないよう、柔軟な構造の配管を採用することを前提に、以下のような対策について検討する必要がある。

- ・ヒータの容量、配置等を適切なものとする
- ・温度センサを設置し、液体の放出を行う際に凍結していないことを確認できるようにすること。

②地上試験

- ・今後、開発過程における地上環境試験については、従来の基本的方法の採用を基礎としつつも、可能な限り充実していくことが必要。実際の飛行環境よりも厳しい条件での試験を実施することが基本であるが、必要に応じ、飛行環境に近い試験条件を設定し地上環境試験を実施することも検討する必要がある。
- ・今回の不具合の原因と推定されるばねの嚙込みは、かなり確率の低い事象と考えられ、宇宙実証試験により確実に把握できる可能性は小さい。地上環境試験の充実により様々な条件で繰り返し試験を行うことが効果的。

③関連事項

以下の事項についても、検討する必要がある。

- 1) 宇宙空間にヒドラジンを放出する際の凍結や高真空環境下での摩擦係数の増大のような、まだ十分なデータが蓄積されていない宇宙空間に特有の現象については、関連する基礎的な研究を進めること。
- 2) 今回の不具合のように、宇宙においては予期しえない現象が起きる可能性があることを十分踏まえ、開発過程の節目に、幅広く外部の有識者により技術問題についてアドバイスを受ける機会を確保すること。

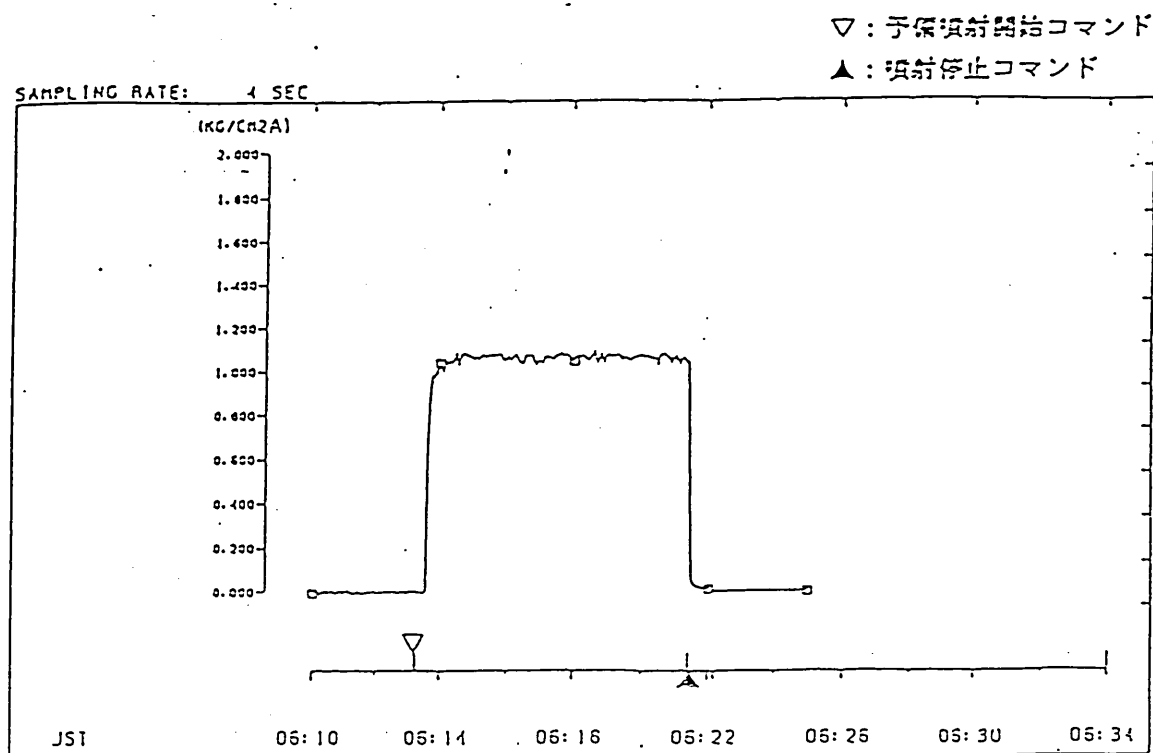


図1 (a) アポジエンジンの燃焼圧力 (8月30日の噴射)

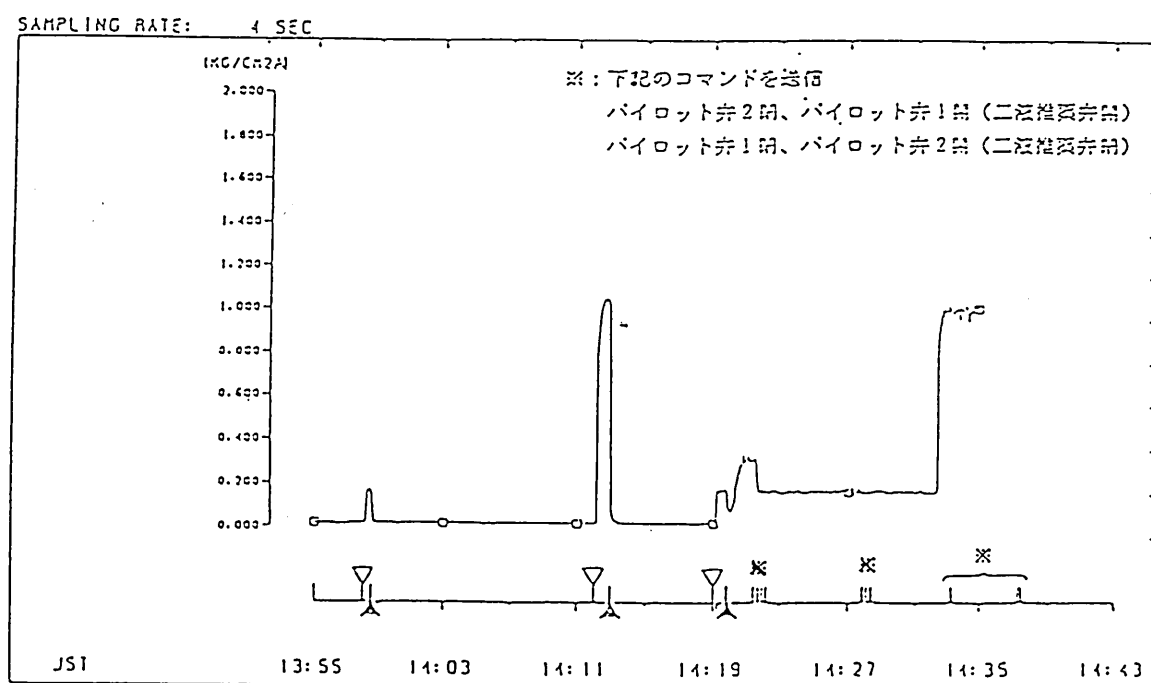
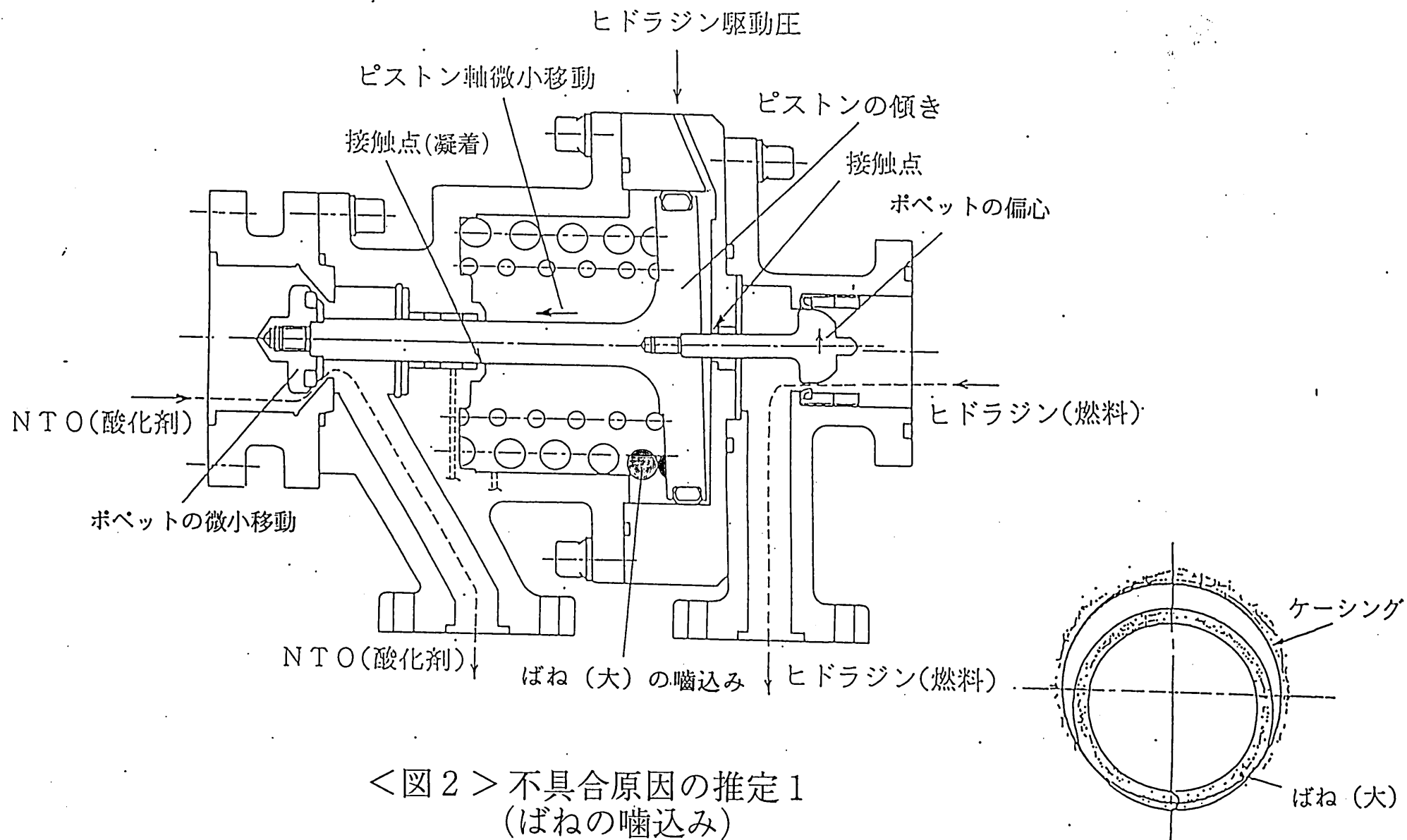
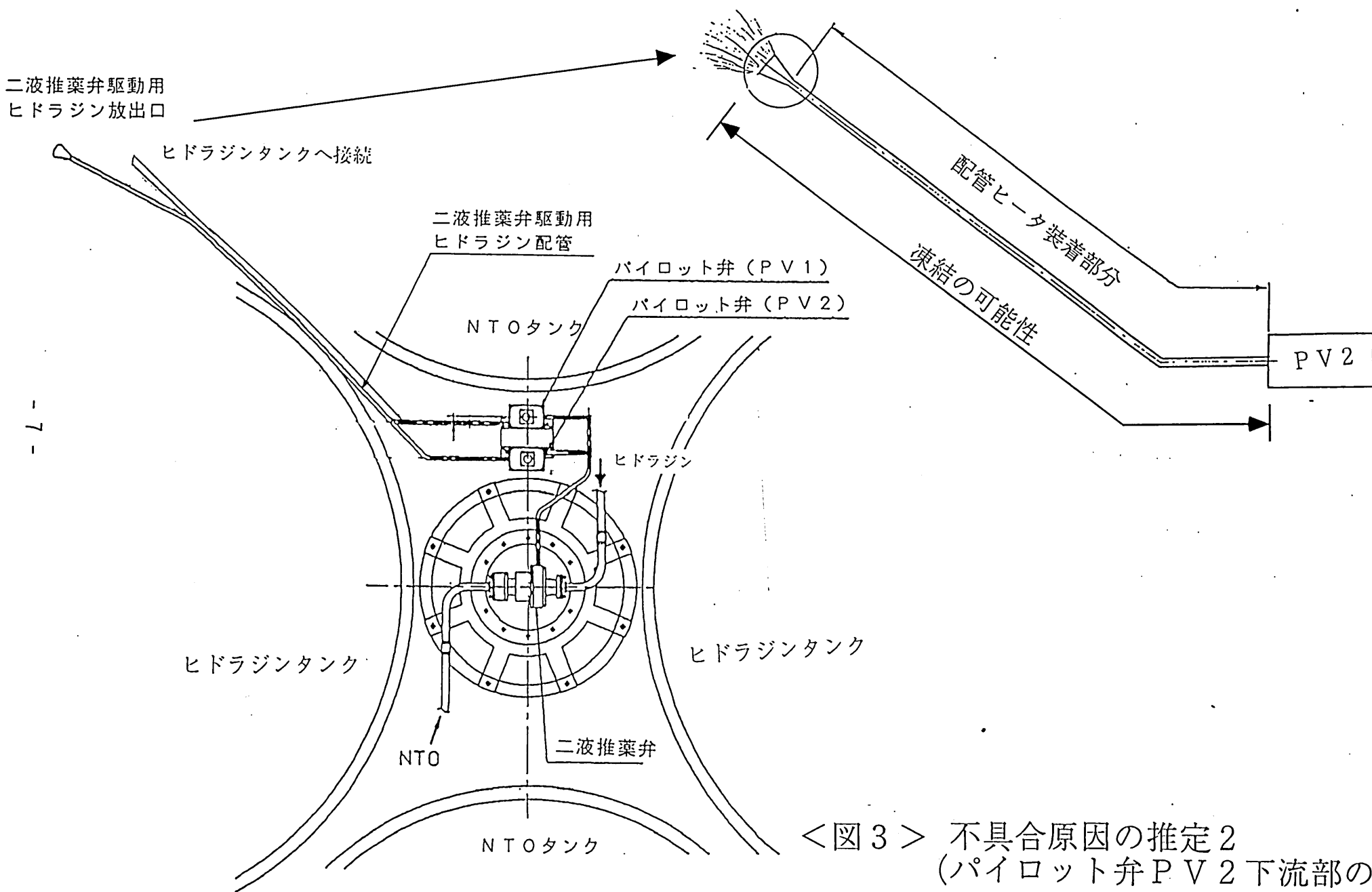


図1 (b) アポジエンジンの燃焼圧力 (8月31日の噴射)



＜図2＞ 不具合原因の推定1
(ばねの噛込み)



< 図 3 > 不具合原因の推定 2
(パイロット弁 P V 2 下流部の凍結)

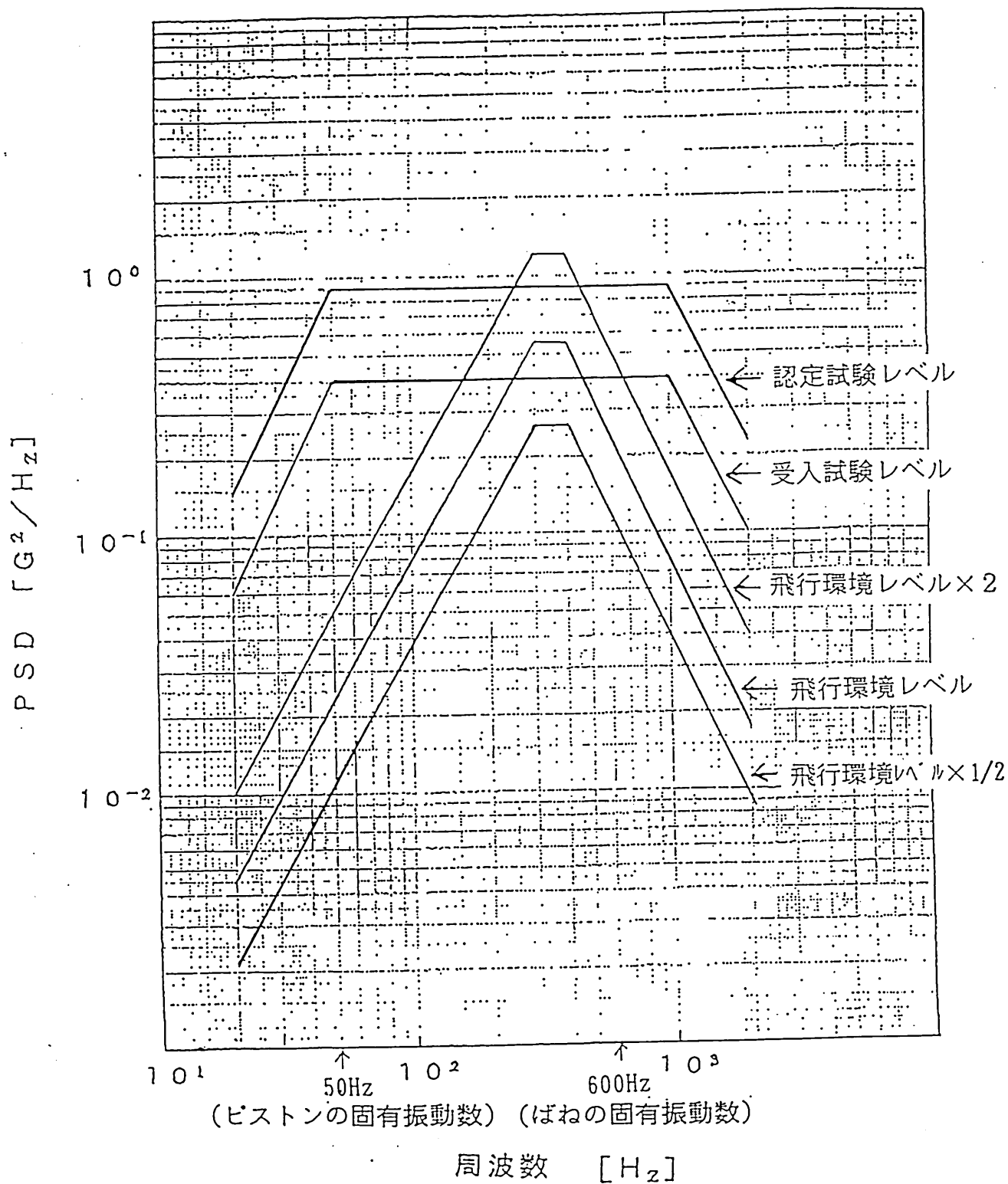


図4 (a) ランダム振動入力パターン・レベル

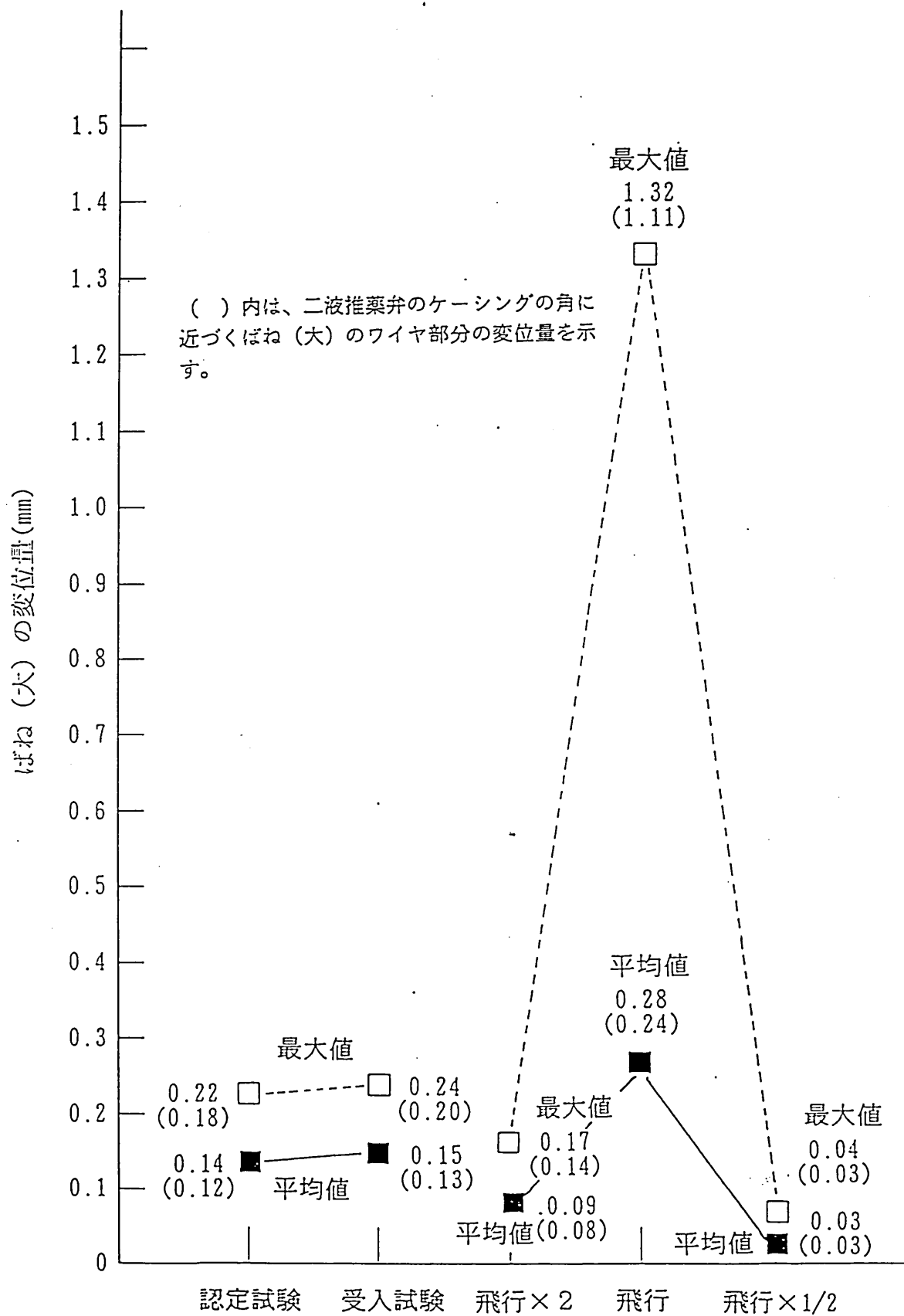


図4 (b) ランダム振動の違いによるばね (大) の変位量