

小型・高速応答加速度センサーシステムの研究開発 Research and development of high response acceleration system

北川 一敬[†], 丹野 英幸^{††}
K. Kitagawa[†], and H. Tanno^{††}

Abstract: This study aim to develop high response acceleration system for forces measurement of rocket, cornering force and impulse of crash car and hypervelocity testing for space vehicle. The acceleration system is mounted on the front nose of pet rocket and accelerated to a speed up to 10G for the experiment. In the rocket launch experiment, which will be able to measure one minute, acceleration data for the rocket is recorded. Results show that rocket axial acceleration increases as axial force increases.

1. 緒言

自動車等の加速度を計測する場合、ピエゾ圧電方式センサー、チャージアンプおよびオシロスコープを組み込み実機に搭載する必要がある。但し、センサー、アンプ、オシロスコープなどは非常に高価であるため、加速衝突実験などの取り扱いに細心の注意を払う必要があり、またランニングコストが非常に高くなる場合がある。自動車衝突試験、ロケット飛行時の力計測、風洞試験では、試験体に積込める測定器が有効であると考えられる。

小型ロケットの高度測定では、一定区間離れた地点から角度を測定し、打ち上がった高さに換算する2点法や3点法という方法、またはドップラーレーダなどを使った方法をとっている。通常の小型ロケットの高度計測は、目視領域であれば前者の方法が用いられるが、人為的な誤差も発生しやすい。また、測定にあてる人員が必然で、少人数で行う場合の実験・研究には向いていないと考えられる。そこで、小型ロケット本体に加速度計を搭載して、外付けのフラッシュメモリにデータを蓄積し、リーダーを使ってデータをメモリ上に転送し、機体回収後、パソコンを使ってデータを転送する方法を考えた。

過去に本研究室は、モデルロケット用小型加速度計測シ

ステムの開発を行った経験がある。その経験から宇宙航空研究開発機構(JAXA)と共同にロケット、飛翔体等の実験機に搭載可能寸法 W90×H100×L100 mm を目指し、小型・高速応答の加速度センサーシステムの開発と安価で信頼性の高いシステムの構築を行った。

2. 実験装置

加速度計の低コスト・小型・軽量化のために、加速度センサにはモジュールのみを使用し、ユニバーサル基板、またはプリント基板を用いて作成する。電源も9V電池よりもさらに小型のものを選択する。また加速度の測定軸を一軸だけし、制度が高い測定を行えるようにする。

加速度センサからのアナログデータをデジタルデータに変換する必要があるため、A/D変換機能を用いた。さらに、パソコンとシリアル通信をし、変換されたデータをパソコンに取り入れるためにUSART機能を取り入れた。

以上の条件よりH8/3694を用い、C言語によりプログラミングを行った。

Fig.1は加速度計の回路図を、Fig.2は製作した小型加速度センサシステムを示す。製作した寸法は75mm×75mmである。H8/3694Fを使用し、AN1アナログ入力チャンネルに、加速度センサの電圧値のアナログ出力が接続されている。アナログデータは、H8/3694F内のA/D変換機能によってデジタルデータに変換され、外付けEEPROMへと送られる。H8及び外付けEEPROMはICソケットに実装されており、着脱可能となっている。

[†] 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

^{††} 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 先進技術研究 GL (角田市)

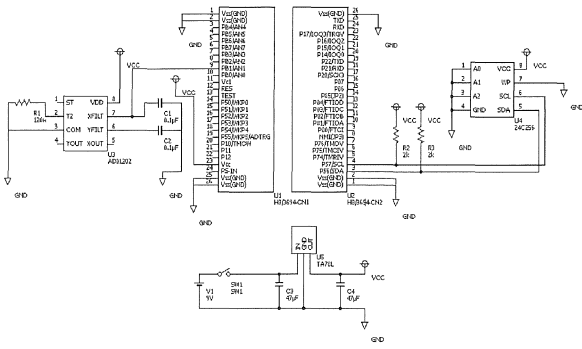


Fig.1 小型加速度センサシステムの回路図

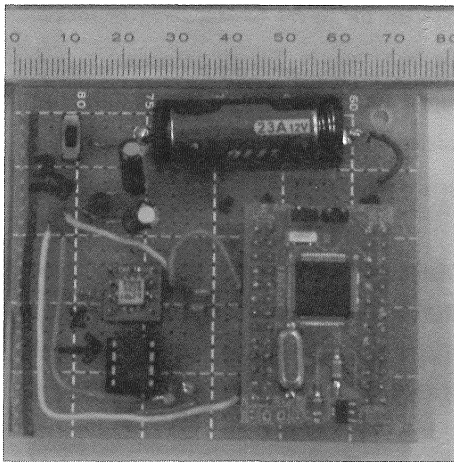


Fig.2 製作した小型加速度センサシステム

3. 実験方法

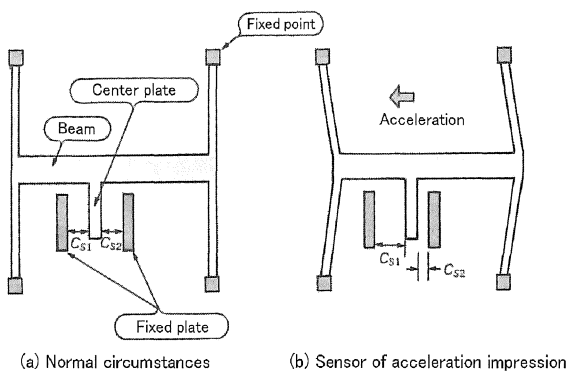


Fig.3 加速度センサ内部構造の概略図

Fig. 3(a)は平常時の加速度センサ部の構成, Fig. 3(b)は加速度印加時のセンサ部を示す. Fig. 3(a)において, シリコンウエハ上にビームと呼ばれるばねがあり, そのばねに42組のセンタプレートと呼ばれる板が付けられている. これはウエハ上に浮いた形で取り付けられていて, そのセンタプレートに対してウエハ上に固定されたプレートが対照的に配置されている. センタプレートと固定プレートはそ

れぞれ同間隔になっており, 両プレート間に電流を流すことによって, プレートをコンデンサとして動作させている.

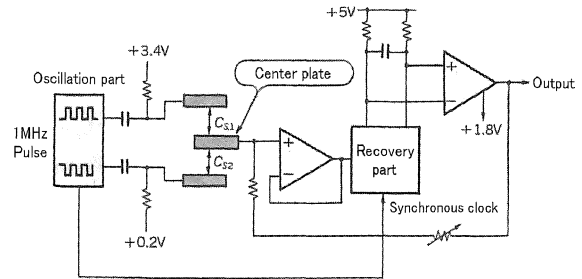


Fig.4 センサから復調部までの回路図

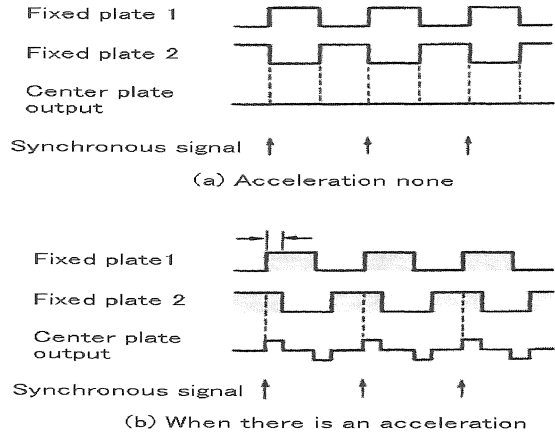


Fig.5 センタプレートでの加算の概略図

Fig. 3(b)において, センサに加速度が加わると, ばねに力が加わりセンタプレートが加速度と反対方向に移動する. すると固定プレートとの間隔が変わり, それによってセンタプレートと固定プレート間の容量が変化する. この容量変化により加速度を検出している.

Fig. 4 はセンサから復調部までの回路を示す. センサの固定プレートに対して発振器から1MHzのパルスを入力する. そのとき, それぞれの固定プレートに対して逆相のパルスを入力する. 加速度が加わっていない場合, 容量 C_{s1} と C_{s2} は同じになるため, センタプレート上加えられるパルスは逆相で打ち消され, 一定値となって出力される.

Fig. 5 はセンタプレートでの加算の概略図を示す. 加速度が加わった場合は, C_{s1} と C_{s2} の値が異なるため, 容量の分それぞれのパルス波の位相がずれてくる. このずれによって, センタプレートで加算される電圧が変化する.

復調器は, 基本の1MHzのパルス幅に同期して電圧を得る. これにより, 加速度方向が正方向であれば+方向, 180度反転していれば-方向に電圧が出力される. また, その他の必要のない信号は外部のコンデンサを通して取り除かれる. これにより, プレート間の容量差を電圧値として出力することができる. この復調された信号は電圧値と

してOPアンプに入り、外部に出力されるとともに、抵抗(3 MΩ)を通してフィードバックされる。

なお、出力値は電源電圧+5 V単一で使用できるようになっており、加速度ゼロの状態(Cs₁=Cs₂) 1.8 Vになるようになっており、19 mV/Gで出力され、最大振幅±50 Gのとき±0.95 Vが出力される。

4. 実験結果及び考察

本実験で製作した加速度計は、1軸 3.85ms 間隔でその瞬間にセンサにかかっている加速度を記録する。このデータを利用して到達高度を求める。X軸とY軸は機体の傾斜として扱う予定であったが、角度成分としての分解能が低く、軸全体の回転運動と傾斜角を見分けることが困難なため断念した。Z軸は機体自体の加速度とする。加速度から時間積分を行う事で速度、変位を求めた。

実験前の加速度計測は以下の仮定の基で行った。

- ① 発射と同時に上向きの加速度が発生する。
- ② 到達高度において重力のみがかかる。
- ③ 下降時は自由落下で重力と等しい加速度がかかる。
- ④ 着地した際、進行方向逆向きの加速度がかかる。

最も特徴的な加速度があらわれるのは、発射時と着地時であると考えられる。この2つの加速度が測定できていれば、実験全体の加速度が測定できたと考えられる。本実験では3回の測定を行ったが、発射時から着地時までのデータが記録されていたのは1回目と3回目の測定だけであった。2回目はデータが記録されていなかった。Fig.6はペットボトルロケット発射時の写真を示す。

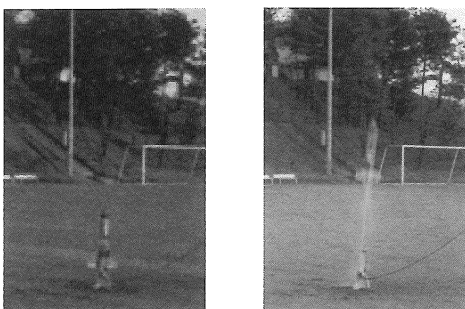


Fig.6 ペットボトルロケットによる実験風景

Fig.7はペットボトルロケットの実験の加速度の時間履歴を示す。Fig.7から、機体の動きは、a点において発射され、b点までの0.3s間に最大4.7Gの加速度がかかる。その後c点までは、水と空気を放出し終えて推力を失ったため、重力により加速度が減っていく。d点で重力とつりあって到達高度に達する。発射の瞬間であるa点から到達高度であるd点までの時間は1.6sである。d点以降2.5s間自由落下で落ちてくる。そして発射後4.2s後のe点で

地面に当たり、進行方向逆向きに約6Gの加速度がかかる。その後バウンドしてf点でもう一回地面当たりg点で地面に落ち着く。

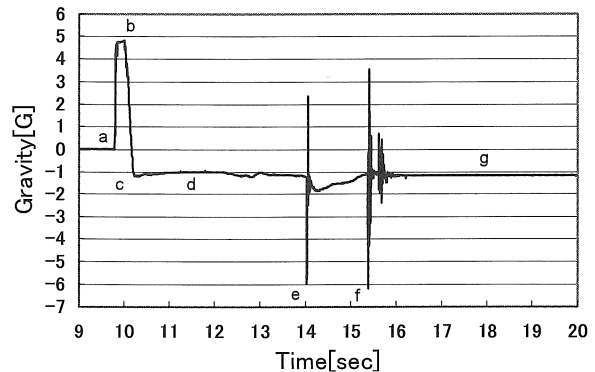


Fig.7 ペットボトルロケットの加速度の時間履歴

高度測定に必要な計測条件は、到達高度までの加速度である。機体が垂直に打ち上がった場合、到達高度では速度が0m/sになっていると考えられる。加速度の積分の結果、速度が0m/sになった時間を到達高度とする。

Fig.8は到達高度までの加速度を、Fig.9は到達高度までの速度の変化を、Fig.10は到達高度までの変位を示す。

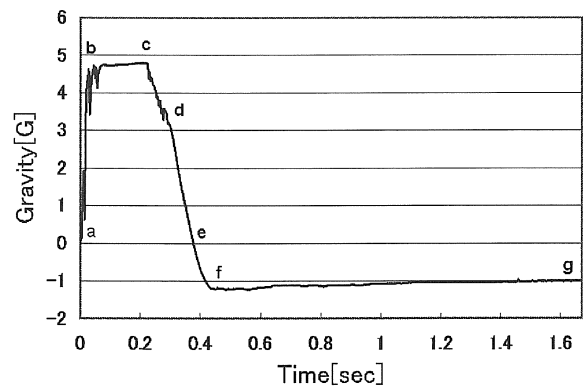


Fig.8 Z軸の加速度の時間履歴

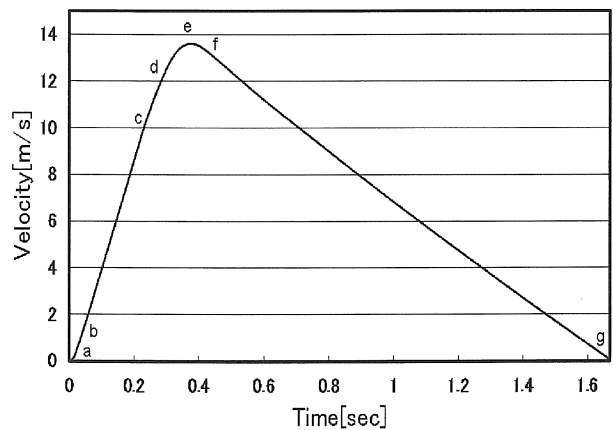


Fig.9 Z軸の速度の時間履歴

Fig.8からa-b間において急激に加速度が上昇している事

がわかる。これはロケット発射直後にロケット内に蓄えられた水が勢いよく噴出していることを示しており、発射後 28ms の b 点において 35.1m/s^2 の加速度を検出している。b-c 間ではさらに加速度が上昇し、発射後 180ms の c 点で最大加速度 46.9m/s^2 を示している。よってこの点で水の噴出量は最大である。c-d 間の加速度の減少は、ロケットのタンク内の水が少なくなると水の粘性によってスムーズに水が噴射されず空気も外へ漏れてしまったため加速度の減少が起きた。d-e 間では加速度はさらに減少し加速度は 0 となる。この時点でロケットの推進力による上向きの加速度と重力による下向きの加速度がつりあっていることを示す。e-f 間で加速度はマイナスとなり重力の力が強くなっていることがわかる。f 点では -1G より負の値を示しているが、その原因としてロケットにかかる空気抵抗が掛かる。そして f-g 間では加速度は -1G となりロケット内に蓄えられた推進力を使い切り、重力の下向きの加速度のみを受け発射後 1673ms に速度が 0 となり、到達高度へと達する。Fig. 9 から a-b 間では加速度の傾きが急なため速度の傾きも大きくなっており、b 点での速度は 0.12m/s である。b-c 間では速度が急激に伸び、c 点で 9.54m/s である。これは加速度が高い値を維持しているため速度の伸びがよいと考える。c-d 間では負の加速度であるが、加速度は増加しているため速度は上昇する。d-e 間でも速度は上昇し、e 点の速度は 13.6m/s で最高速度となっている。e-f 間では重力による下向きの力が強くなるため速度は減少する。f-g 間では加速度は -1G でほぼ一定となっているため速度グラフの傾きも一定のまま減少し速度が 0 となった瞬間、到達高度となる。

Fig10 からはじめのうち速度が低いいため変位の変化も殆ど無く、速度の上昇につれ変位の傾きも増加する。1.67s あたりで時間軸と平行になる。この点が到達高度となりグラフから到達高度は 11.45m であった。

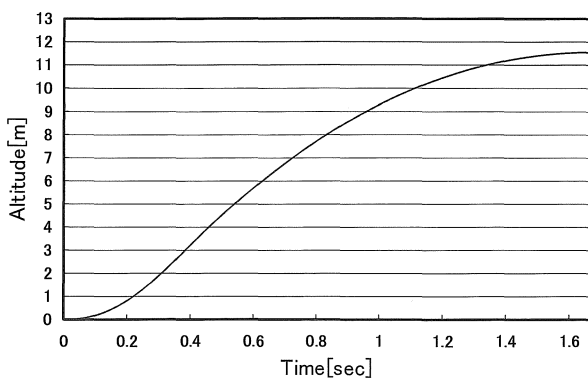


Fig.10 Z 軸の速度の時間履歴

5. 結言

本研究では小型ロケット用加速度計測システムの改善という目的のため、前年度で製作されたシステムの改良を行

った。本研究によって得られた結果の要約を以下に示す。

本システムを使用することで、ペットボトルロケットに搭載して詳細な非定常な加速度を測定を行う事ができた。

加速度の時間履歴から、a-b 間において急激に加速度が上昇している事がわかる。これはロケット発射直後にロケット内に蓄えられた水が勢いよく噴出していることを示しており、発射後 28ms の b 点において 35.1m/s^2 の加速度を検出している。b-c 間ではさらに加速度が上昇し、発射後 180ms の c 点で最大加速度 46.9m/s^2 を示している。よってこの点で水の噴出量は最大である。c-d 間の加速度の減少は、ロケットのタンク内の水が少なくなると水の粘性によってスムーズに水が噴射されず空気も外へ漏れてしまったため加速度の減少が起きた。d-e 間では加速度がさらに減少し加速度は 0 となる。この時点でロケットの推進力による上向きの加速度と重力による下向きの加速度がつりあっていることを示す。e-f 間で加速度はマイナスとなり重力の力が強くなっていることがわかる。f 点では -1G より負の値を示しているが、その原因としてロケットにかかる空気抵抗が掛かる。そして f-g 間では加速度は -1G となりロケット内に蓄えられた推進力を使い切り、重力の下向きの加速度のみを受け発射後 1673ms に速度が 0 となり、到達高度(11.45m)へと達する。

小型ロケットに搭載実験では、実際に衝撃が加わると、予期していなかった所に故障が見られた。ソケットに取り付けたセンサ部分が衝撃で抜けるなど接触不良を起こした。また衝撃により基盤の半田にも接触不良が見られ EEPROM へのアクセス時間が遅くなるアクシデントまで起きた。

謝辞

本研究は、平成 21 年度 愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト共同研究 B と JAXA 共同研究テーマ「風洞模型内蔵用小型データロガーの開発」の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 島田 義人 編著
「H8/Tiny マイコン完璧マニュアル」
309 - 315 頁
CQ 出版株式会社 2005 年 5 月発行
- [2] 栗原 哲郎
「加速度センサの動作原理と応用回路」
154 - 163 頁
トランジスタ技術 SPECIAL No.66
CQ 出版株式会社 2002 年 9 月発行
- [3] 久下 洋一 著
「アマチュア・ロケットのための

手作りロケット完全マニュアル」

141 - 143 頁

株式会社誠文堂新光社 2000 年 3 月発行

[4] 太田 貴之・梅村 章

「水ロケットにおける飛行最適条件の研究」

14 - 19 頁

日本航空宇宙学会論文集

第 49 巻 574 号 2001 年 11 月発行