

論文の内容の要旨

論文題目 マルマンクランプ型接手の分離に関する研究

氏名 竹内伸介

マルマンクランプ型分離接手は衛星打ち上げに多用される分離機構の一形態であり、機構の特徴から特に、衛星とロケットを結合／分離する分離機構に用いられることが多い。最も一般的なマルマンクランプ型分離接手の機構の概念図を図1に示す。マルマンクランプ型分離接手は、フランジを有する上下段2つの円筒もしくは円錐台と、マルマンバンドと呼ばれる内面にV字型の溝がつけられた帯とで構成されており、上下段のフランジ部を合わせてマルマンバンドのV字型の溝に嵌め、バンドで締め付けることにより結合を行なう。またマルマンクランプ型分離接手の分離は、火工品と称される火薬を動力源とする装置を用いてマルマンバンドを切断することにより行われる。実際のマルマンクランプ型分離接手の設計には荷重、分離衝撃、分離速度、分離擾乱等の設計条件が課されている。このうち特に分離衝撃については、忠実にマルマンクランプ型分離接手のモデル化を行って分離衝撃の解析を行う場合には、解析が接触問題を含む動的解析問題となり、計算量などの面が問題となるため、解析的に分離衝撃を予測できた例は現在のところ報告されていない。実際の接手の開発は、過去の実験値から経験的に分離衝撃を予測して搭載機器用の衝撃設計基準を設定し、ある程度開発が進んだ段階で接手を試作して分離実験を行い、実際に発生する衝撃が設定した衝撃設計基準以下であることを確認するという形で行われている。そこで本研究では、マルマンクランプ型分離接手の分離時に発生する衝撃を、実際的な計算量で定量的に予測する手法の確立を目指す。いくつかの条件の下で実験を行い、実験結果から分離衝撃の発生メカニズムについて考察し、その考察結果に基づいて分離衝撃に対する定量的な予測法を提案し、さらにその予測法を応用した接手構体の設計改善法について考察する。

第1章は序論であり、まずマルマンクランプ型分離接手の機構について解説している。またマルマンクランプ型分離接手に対する設計条件を挙げ、各条件について従来行われてきた研究及び現段階で確立されている設計手法について概説し、特に本論文で問題としている分離衝撃加速度について現在用いられている一般的な設計手法と、実際の実験結果と経験式による衝撃設計基準の比較とを示している。衝撃加速度の評価には、衝撃応答スペクトル（Shock Response Spectrum, 以下 SRS）と呼ばれる指標を用いた。SRS は図2に示すような固有振動数 f_0 、共振

倍率 $Q = 10$ である一自由度系に衝撃加速度 \ddot{y} が作用したときに、質点に発生する加速度 \ddot{x} の絶対値の最大値を固有振動数 f_0 の関数として

$$m(\ddot{x} - \ddot{y}) + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = -m\ddot{y}$$

$$SRS(f_0) = \text{Max}(|\ddot{x}|)$$

のように表すものである。SRS は通常、衝撃の評価に多用されており、衛星の衝撃設計基準としても用いられる。本研究でも衝撃加速度の評価に SRS を用いた。

第2章ではまず最初に分離実験の概要と、行った実験内容とその目的、及び実験結果の評価法について解説している。次に接手構体の寸法及び材質が分離衝撃に及ぼす影響を調べるために、表1に示す接手半径と材質が異なる A~D の4種類の接手構体を用意し、分離実験を行って分離衝撃加速度のデータを収集した。さらに後の衝撃発生メカニズムの考察に役立つように実験条件を変更し、発火する火工品の数を変更した実験、分離用バネを用いない実験、バンド張力を変更した実験、バンド質量を増加させた実験等を行った。それに続く分離実験結果の整理にあたっては、まず、同一条件下での実験で得た衝撃計測値を比較してその再現性を見極め、この再現性を念頭において各実験結果を吟味した。その結果、実験結果の整理/考察から以下の知見を得た。

1. 分離時に接手構体上各部に発生する衝撃値は、火工品や張力調整機構からの距離にほとんど依存しない
2. 分離時に発生する衝撃は、マルマンバンド締め付け力にほぼ比例する
3. マルマンバンド質量が増加すると、分離時に発生する衝撃は減少する傾向がある
4. 分離用バネの有無が、分離時に発生する衝撃に与える影響は小さい
5. 分離時に発生する半径方向衝撃の SRS が最大値となる周波数はほぼ、接手構体の比剛性の平方根に比例し、接手構体の半径に反比例する (図3参照)

第3章ではマルマンクランプ型分離接手の分離衝撃を現実的な計算量で定量的に予測する計算法の提案を行っている。まず最初に分離衝撃の発生メカニズムについて考察を行った。分離衝撃の要因として、火工品の化学的エネルギー、分離用バネの歪みエネルギー、バンドの歪みエネルギー、構体の歪みエネルギーを考え、第2章の実験結果で得られた知見1.~4. と一般的なマルマンクランプ型分離接手の運動に対する考察から、分離衝撃の要因は構体に蓄えられた歪みエネルギーによって発生する接手構体の振動が支配的であるとの仮説を立てた。しかしこの仮説に従い接手構体の振動を計算するにあたり、接手構体やマルマンバンドを忠実に有限要素モデル等でモデル化して分離解析を行うと、複雑な接触問題を含む動的解析を実施することとなり、計算量が膨大となるため計算法として非現実的になるという問題が生じる。そこで接触問題を避けるために、マルマンバンドが接手構体に及ぼす影響を簡略にモデル化した簡易マルマンバンド張力モデル及び簡易マルマ

ンバンド質量モデルを提案した。簡易マルマンバンド張力モデルは、マルマンバンドの張力が接手構体の振動に及ぼす影響をモデル化したものであり、マルマンバンドの単なる外力としてのモデル化、及びマルマンバンドの張力変化は瞬間的にバンド全体に伝達されるという仮定からなる。また簡易マルマンバンド質量モデルは、マルマンバンドの質量が接手構体の振動に及ぼす影響をモデル化したものであり、マルマンバンドから張力が失われた後のマルマンバンドの単なる質量としてのモデル化、及びその質量が接手構体の振動に影響を及ぼさなくなる時刻 τ を一自由度系の振動に基づいて類推した仮定からなる。

まず接手構体を有限要素モデルでモデル化して固有値解析を行い、得られた固有振動モードを用いて提案した2つの簡易モデルに従ってモード法による衝撃加速度の計算を行った。その結果、図4に示すように、実験で得られた最大の衝撃（図4の例では半径方向）とほぼ一致する計算結果（図4中太実線）を得た。なお図中には、参考としてNASAの文献に基づいて計算した経験式による衝撃設計基準も点線で示している。先に述べたように、現在のマルマンクランプ型分離接手の分離衝撃の予測は経験式と実験値に頼っており、解析的な手法である程度精度の良い分離衝撃の予測が行えるようになったことは大きな進歩である。また、異なる実験条件に対応するように計算条件を変更して衝撃加速度の計算を行い、対応する実験結果との比較から、この計算法を用いて実験条件の差によって生じる衝撃加速度の差が再現できることの確認を行った。

またこの計算結果における振動モードの解析から、半径方向の衝撃加速度のSRSが最大になる点においては軸対称振動が支配的であることが判明した。そこでさらに簡略な衝撃加速度の予測法として、Donnelの方程式に基づいて軸対称円筒殻の固有値解析を行い、求めた軸対称固有振動モードを用いてモード法によって衝撃加速度を計算する簡易計算法をも提案した。その結果、図4中灰色実線に示すように、半径方向衝撃のSRSが最大となる周波数及びその最大値が実験値とほぼ一致する計算結果を得た。この簡易計算法は先の有限要素法を用いた計算法よりもさらに簡略であり、また設計時に重要な値となる半径方向衝撃のSRSの最大値および最大値を生じる周波数がある程度精度良く予測できるため、特にマルマンクランプ型分離接手開発の初期段階で有用であると言える。またこの軸対称円筒殻の解析解から、半径方向衝撃のSRSが最大となる周波数はほぼ接手構体の比剛性の平方根に比例して接手構体の半径に反比例することを示し、実験から得られた知見5.を理論的に裏付けている。

第4章では第3章で提案した衝撃予測法を実際の接手の設計に応用する例として、最適設計問題を取り上げた。ある接手構体を例とし、その接手構体と同一の荷重条件に耐え、かつその接手構体と同一重量の条件下で、分離衝撃が最小となる接手構体の設計を求めた。その結果、例とした接手構体と同一重量で、かつ発生する衝撃が約3割軽減された接手構体の設計を得ることができた。3割減少という値はそれほど大きな値ではないが、これは出発点とした設計が既に比較的良

い設計であるためであり、最適設計の効能を否定するものではない。また最適化結果に対する考察から、実際の接手構体の設計指針として、接手構体に作用する荷重のうち、軸方向引張力が支配的な場合は接手構体半径が小さい方が、また曲げモーメントが支配的な場合には接手構体半径が大きい方が、発生する衝撃が小さくなるという結果を示した。

最後に第5章は結論である。

本論文では、実験結果に対する考察からマルマンクランプ型分離接手の分離衝撃の発生メカニズムを明らかにし、それに基づいた現実的かつ定量的な衝撃予測法を提案している。またこの予測法を設計に応用することで、接手構体の設計が改善可能であることを示している。

項目	A 構体	B 構体	C 構体	D 構体
半径 (m)	0.7	0.26	0.065	0.065
長さ (m)	0.5	0.48	0.057	0.1
厚さ (m)	0.01	0.0012	0.007	0.004
材質	アルミ合金	CFRP	アルミ合金	真鍮
弾性率 (N/m^2)	7.2×10^{10}	8.6×10^{10} (面内疑似等方)	7.2×10^{10}	1.0×10^{11}
密度 (kg/m^3)	2.7×10^3	5.0×10^3	2.7×10^3	8.9×10^3
バンド必要張力 (kgf)	6500	950	200	200

表 1: A~D 接手構体の概要

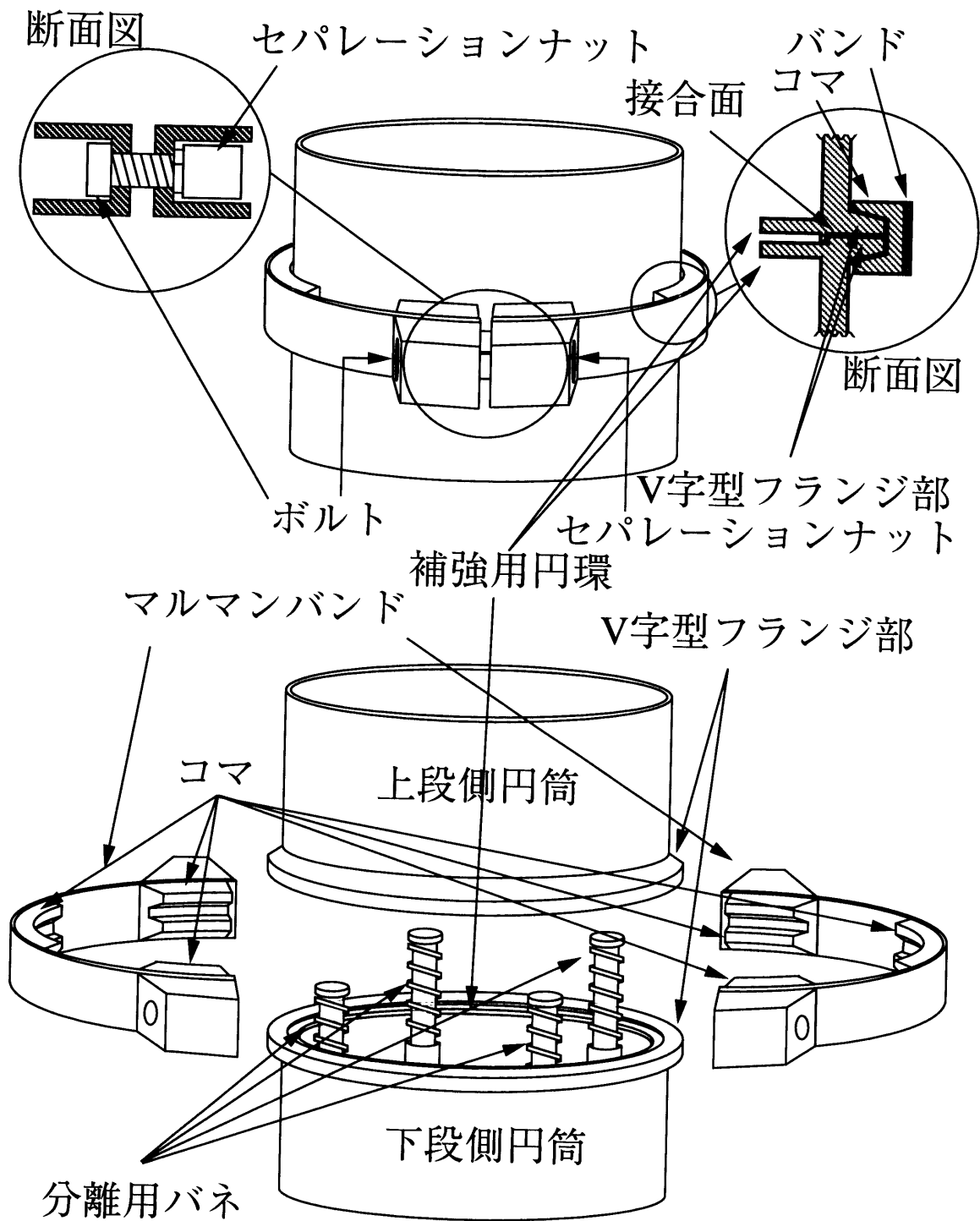
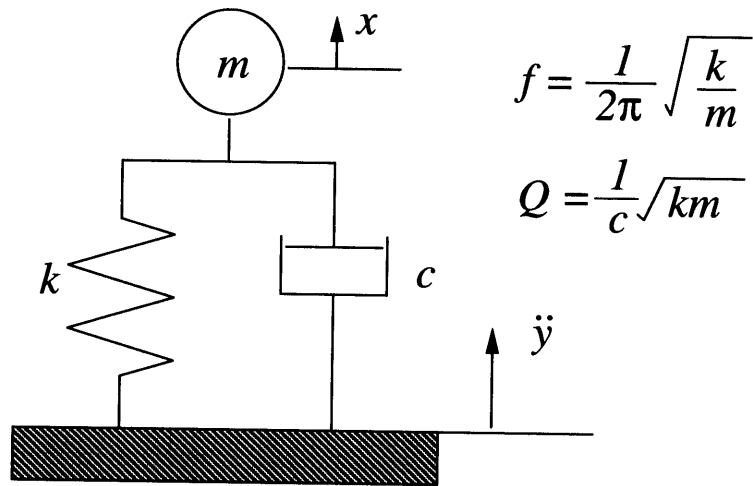


図 1: マルマンクランプ型分離接手の概念図



$$\text{SRS} = \max(|\ddot{x}|)$$

図 2: SRS 振動モデル

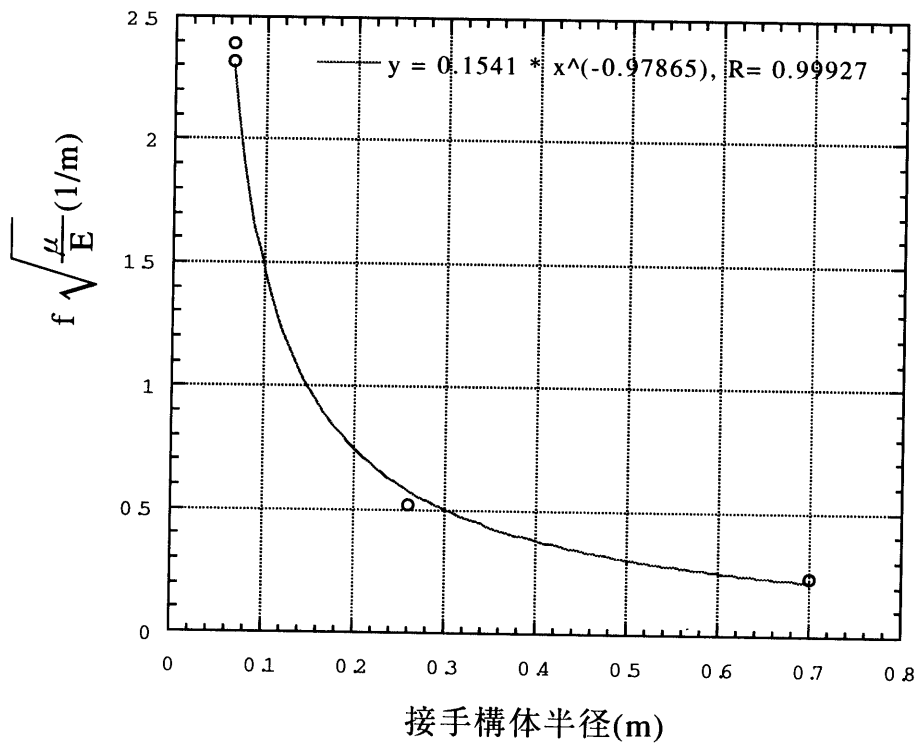


図 3: 接手構体半径に対する SRS が最大になる周波数の補正値のプロット

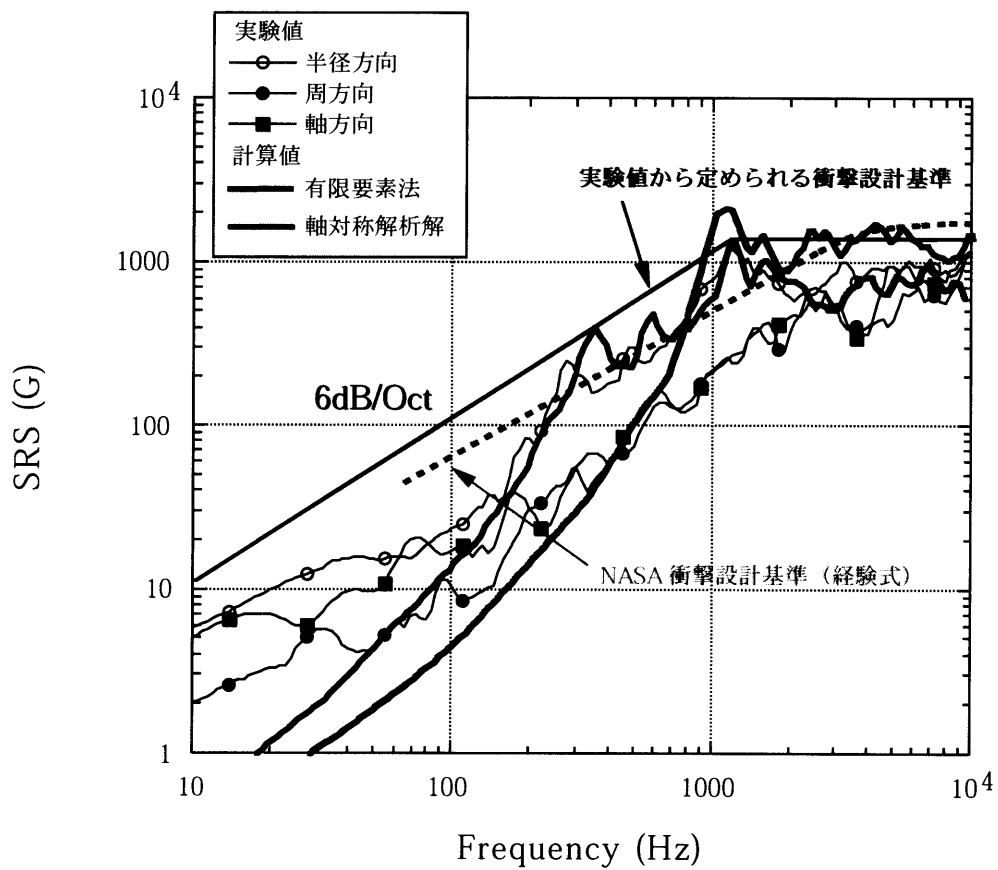


図 4: 計算結果例：分離衝撃の実験値と計算値の SRS の比較