

氏名	うるしやま ゆうた 漆山 雄太
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成 年 月 日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和53年3月 日本大学 理工学部 航空宇宙工学科 卒業
学位論文題目	形状記憶合金による座屈抑制とエネルギー吸収に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 高木敏行 東北大学教授 長南征二 東北大学助教授 裘 進浩

論文内容要旨

第1章 序論

知的材料構造物の概念は、あたかも知能を有するかのように振るまい、求められる環境・状況に応じて性能を発揮するという考え方である。将来の移動体の知的化技術について幾つかの提案がなされたなかで、この概念の自動車分野における将来展望としては、将来のボディの構造は衝突時における衝撃エネルギー吸収を制御し、固さや強度を変えるという技術概念が示されている。

現在のボディ構造は薄板構造物のため、座屈現象をともなってエネルギー吸収を行うが、このような座屈現象に対して、適応構造物の概念を導入し、知的構造物にむけての可能性を論じた研究は、現在のところ世界的にほとんど見当たらない状況である。

座屈を制御する適応構造物の構成を考えると、変位・加速度などのセンサーによる系の状態をモニターしながらの制御を加える手法では、センサーと制御の高精度化とアクチュエータの高速応答性が必要となり、システムが高コスト化する。したがって、座屈制御の研究は、シンプルな構成の適応構造物の応用を目指すのが得策である。そこで、本研究は、形状記憶合金(SMA)を応用した、比較的シンプルな構成で座屈を制御する適応構造物について研究を行う。

第2章 形状記憶合金によるフレームの座屈制御

薄板鋼板中空フレームを用い、連続的な座屈現象を発生しない条件となる中空曲りフレーム形状に、SMAを応用したアクチュエータを用いて座屈モードを制御し、連続的な座屈が生じる圧潰モードを発生させることを目的に実験を行った。

ロッド形状のSMAのアクチュエータはヒーターで加熱し、形状記憶効果によって荷重が発生させる。SMAアクチュエータの特性は、変位を固定し荷重を発生させた状態から、さらに10%程度の圧縮歪みに耐え、構造の大変形塑性状態の変形制御に適用可能である。

SMA アクチュエータによって、フレームの曲げ変形モードを抑制し、中空フレームの変形モードを圧壊モードとすることが出来た (Fig 1) . また, SAM アクチュエータを起動する場合としない場合によって, 異なる変形モードを発生させることができ, 吸収エネルギーを変化させる適応構造が実現した. SMA アクチュエータの適用により, 構造物は重量増加するが, 中空フレーム構造の重量・エネルギー吸収比は, 構造材の板厚増加に比べ重量効率で同等以上の結果が得られた.

第3章 形状記憶合金アクチュエータの高速作動

10msec の応答時間を狙って, キャパシタをもちい SMA に電流を通电し抵抗加熱を試み (Fig 2), SMA アクチュエータの特性を理論値と実験値について比較をおこなった.

SMA の変位測定実験では, 応答時間を 4.61msec まで短縮することができ, SMA の荷重測定実験では, 応答時間を 6.5msec まで短縮することができた.

高速作動時における直径 5mm の長さ 50mm の SMA の回復力を測定し, 最大で 1280kgf の力を得ることができた. また Fig 3 に示すように, 回復力の値は SMA で消費されるエネルギーに依存し, SMA での消費エネルギーが増加するほど, 回復力も大きく発生する傾向にあることがわかった. しかし, 形状記憶効果による回復力の最大値には上限があり, 本実験では, その最大回復力は 11.3kN 付近であった (形状記憶効果による回復応力は 576MPa) .

理論値と実験値の応答時間比較では, 理論値は 10~20%ほど小さくなるが, アクチュエータ設計に対して有効な手法であることが確認できた.

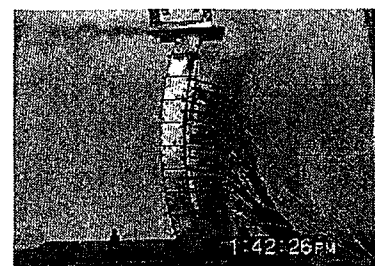
SMA を拘束した場合と非拘束の場合を比較することで, 荷重発生を狙った SMA のアクチュエータ応用では, ストロークを発生させる応用方法に比較して, 約 50%増しの供給エネルギーが必要であることが確認された.

第4章 形状記憶合金曲り柱の座屈現象と

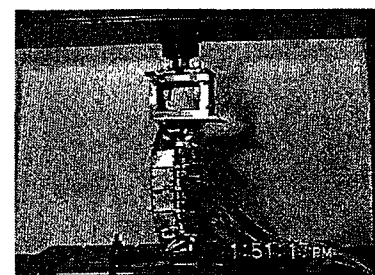
直線化挙動

SMA を用い, 軸荷重を受けることで直線化する挙動が生じることを見出した (Fig 4) .

圧縮実験では, 圧縮荷重を受けることで曲率が減少し, 直線化挙動による自己形状最適化の挙動を生じさせることができる. その結果, 最適形状である直柱と比較し, ほぼ同等 (99%) の座屈荷重が得られた. この時の温度計測の結果から, 直線化挙動は



(a)Before Compression



(b)After Compression (Collapse mode)

Fig.1 Compression test of curved frame with heated SMA

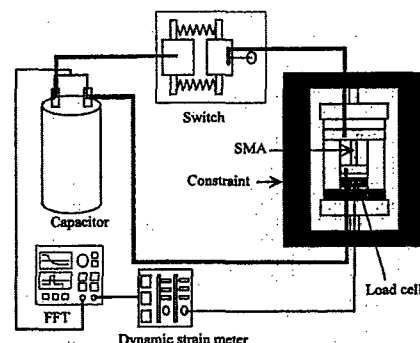


Fig.2 Experimental setup

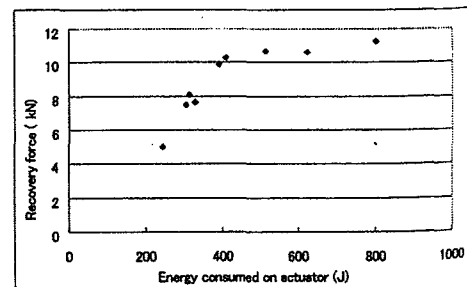


Fig.3 Maximum recovery forces versus energy

オーステナイトの変態開始温度 A_s 点よりも低い温度で現象が生じており、SMA 曲り柱は、相変態すること無しに、マルテンサイト相において直線状に回復する性質があることがわかった。すなわち、荷重が加わることで、マルテンサイト相の双晶変形による効果 (TD-Effect) によって、直線状に変形する自己形状最適化が生じたと考えられる。

直線化挙動の数値解析のため、内部の歪み状態、応力状態を求め、分割繰返し計算による数値解析を行ない、SMA マルテンサイト相の応力歪み特性により、曲り柱が圧縮荷重の増加にともなって、形状的な曲率と構造中立軸の曲率とが逆となることを示し、座屈を抑制する自己最適化挙動の発生原理を定性的に確認した。

第5章 直柱における形状記憶合金の座屈抑制効果

第4章の挙動は直柱に座屈を抑制する作用があると考えられる。そこで、第4章の座屈荷重の計算に用いた、数値解析方法を座屈余裕として新たに定義し、SMA の座屈抑制効果について解析を行なった。

SMA の座屈余裕のと座屈荷重の関係は、通常の弾塑性特性を有する構造材では存在しない、極小値が存在することが特徴である。

座屈余裕の計算を用いた座屈荷重を求める方法と、実験による座屈荷重結果との比較を行った結果、良好な精度で座屈荷重の算出が可能であった。

SMA の応力-歪み線図が下に凸となる曲率の範囲にあるとき、座屈余裕は増加し、この範囲では SMA の柱の座屈現象は生じなかった。

直径 3mm の SMA 柱では長さ 40mm 以上になると座屈余裕の極小値が負となり座屈が生じる。この極小値は小さな曲げ剛性の補強で座屈余裕を負から正にすることが可能で、座屈荷重を増加することができると考えられる。実験の結果、直径 3mm の SMA 柱に対し、板厚の 0.1mm のステンレスチューブによる補強を行ない、極小値の存在を立証した。また、SMA の短柱は、鉄 (SCM-435)、アルミ (AL7075) で作られる柱の座屈荷重に比べ、座屈荷重が大きくなる特徴がある (Fig 5)。

第6章 形状記憶合金の座屈抑制効果の応用

SMA の座屈抑制効果を利用し、初期角度を有する柱の座屈性能向上に関する研究を行った。SMA の応用方法については FEM 計算を用いた検討方法を示し、FEM 計算により、Al の柱の一部を SMA

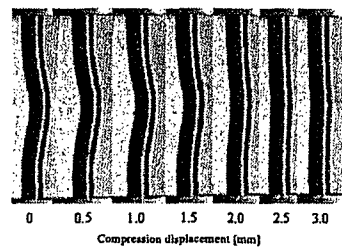


Fig.4 Changing column shape by compression

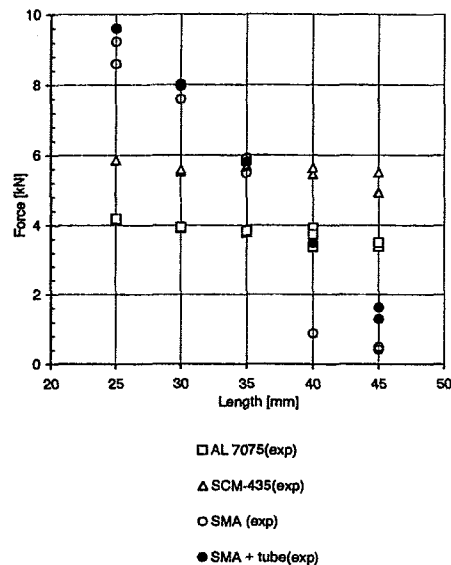


Fig.5 Buckling in ϕ 3mm columns (fix-fix)

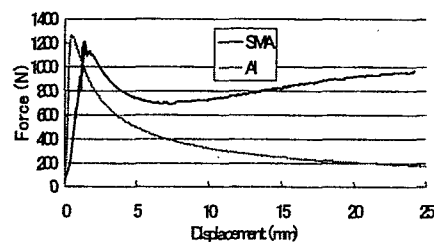


Fig.6 Force-displacement relation

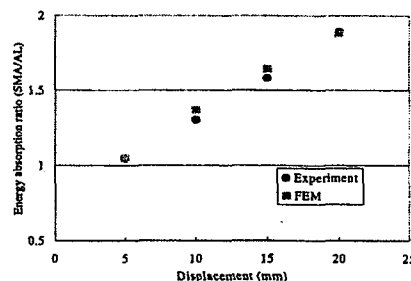


Fig.7 Energy absorption

に置換えエネルギー吸収について比較検討をした結果、SMA 応用時には2つの荷重のピークが発生することを確認した。

FEM 計算から得られた結果にしたがって、SMA 応用時におけるエネルギー吸収向上について実験を行い、効果的な応用方法を確認した (Fig. 6)。それらの結果から、Al の柱は座屈後強度の低下が著しいが、SMA 応用時には、横撓みの抑制効果が認められ、座屈後強度の低下が生じない。この効果により、SMA が一部に設置された柱は、Al 柱の約 1.9 倍のエネルギー吸収が得られた (Fig. 7)。これは、SMA 自体の効果として、歪みが大きくなった柱の部分で、SMA により局所変形が生じないためである。

また、実験結果とシミュレーション結果は良く一致しており、有限要素法解析が、SMA と Al を組合わせた柱の設計に有効であることを明らかにした。

第7章 結論

SMA を用いて構造物の座屈抑制し、構造物の荷重と変位の特性から、エネルギー吸収量について比較をおこなった。SMA アクチュエータを応用した場合は、曲りを有する中空フレームの座屈モードをオープンループで制御するエネルギー吸収構造物についての実験立証を行った。さらに、システム実現にあたって、SMA アクチュエータの応答時間が 10msec 付近で理論値と実験結果の比較をおこない、SMA アクチュエータの高速応答が実現可能であることを示した。

また、新たな応用方法として、SMA 自体の座屈抑制効果を見出した。SMA の座屈荷重とエネルギー吸収量は、座屈抑制効果により、従来の構造材に比べ大きくなることを実験と有限要素法から明らかにした。この方法は全く電氣的な起動を必要としない方法であることから、本応用により、よりシンプルな知的 (インテリジェント) 構造物に近づくことが可能である。

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	漆山 雄太
論文題目	形状記憶合金による座屈抑制とエネルギー吸収に関する研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 谷 順二 教授 長南征二 教授 高木敏行 助教授 裘 進浩
論文審査結果の要旨	
<p>安全性を格段に高めた先進安全自動車の開発が推進されており、衝突安全のためには、フレームの座屈現象を制御しエネルギー吸収を高めることが必要である。種々の形状のフレームが用いられているが、従来の方法では吸収エネルギーが限界に達している。本論文は、状況によって強さや硬さが変る適応構造物の概念に基づき、形状記憶合金により座屈現象を制御し、エネルギー吸収を高める提案をしてその検証を行ったもので、全編7章からなる。</p> <p>第1章は緒論である。</p> <p>第2章では、形状記憶合金アクチュエータを用いて、中空曲りフレームの座屈現象を制御し、圧壊モードを発生させられることを示している。アクチュエータにより重量が増加するが、フレームの肉厚増加に比べ重量・エネルギー吸収比は同等以上の結果が得られている。これは安全設計の観点から貴重な成果である。</p> <p>第3章では、形状記憶合金アクチュエータを高速作動させるには、キャパシターを用いて直接通電で抵抗加熱する方法が有効であることを確認し、応答時間と発生力は投入エネルギーに依存することを明らかにしている。これは有用な結果である。</p> <p>第4章では、形状記憶合金曲柱が軸圧縮荷重を受けると直線化した後に座屈することを発見し、そのメカニズムを非線形応力歪曲線の点から明らかにしている。これは画期的で重要な成果である。</p> <p>第5章では、形状記憶合金の直柱には座屈抑制効果があることを明らかにし、座屈余裕を定義している。座屈余裕の小さい直柱では僅かの曲げ剛性の補強で座屈荷重が著しく増加することを示している。これは有用な成果である。</p> <p>第6章では、折れ曲がったアルミニウム柱の一部を形状記憶合金で置き換えることにより、座屈抑制効果で座屈後も強度の低下が避けられ、エネルギー吸収が2倍に増加することを明らかにしている。これはフレームの設計上極めて重要な指針である。</p> <p>第7章は結論である。</p> <p>以上要するに本論文は、形状記憶合金を用いてフレームの座屈現象を制御し、エネルギー吸収を高めることができることを明らかにしたもので、機械工学ならびに適応構造物の発展に寄与するところが少なくない。</p> <p>よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。</p>	
学力確認結果の要旨	
<p>平成15年12月22日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は機械工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。</p> <p>なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。</p>	

論文審査結果の要旨

安全性を格段に高めた先進安全自動車の開発が推進されており、衝突安全のためには、フレームの座屈現象を制御しエネルギー吸収を高めることが必要である。種々の形状のフレームが用いられているが、従来の方法では吸収エネルギーが限界に達している。本論文は、状況によって強さや硬さが変る適応構造物の概念に基づき、形状記憶合金により座屈現象を制御し、エネルギー吸収を高める提案をしてその検証を行ったもので、全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、形状記憶合金アクチュエータを用いて、中空曲りフレームの座屈現象を制御し、圧壊モードを発生させられることを示している。アクチュエータにより重量が増加するが、フレームの肉厚増加に比べ重量・エネルギー吸収比は同等以上の結果が得られている。これは安全設計の観点から貴重な成果である。

第3章では、形状記憶合金アクチュエータを高速作動させるには、キャパシターを用いて直接通電で抵抗加熱する方法が有効であることを確認し、応答時間と発生力は投入エネルギーに依存することを明らかにしている。これは有用な結果である。

第4章では、形状記憶合金曲柱が軸圧縮荷重を受けると直線化した後に座屈することを発見し、そのメカニズムを非線形応力歪曲線の点から明らかにしている。これは画期的で重要な成果である。

第5章では、形状記憶合金の直柱には座屈抑制効果があることを明らかにし、座屈余裕を定義している。座屈余裕の小さい直柱では僅かの曲げ剛性の補強で座屈荷重が著しく増加することを示している。これは有用な成果である。

第6章では、折れ曲がったアルミニウム柱の一部を形状記憶合金で置き換えることにより、座屈抑制効果で座屈後も強度の低下が避けられ、エネルギー吸収が2倍に増加することを明らかにしている。これはフレームの設計上極めて重要な指針である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、形状記憶合金を用いてフレームの座屈現象を制御し、エネルギー吸収を高めることができることを明らかにしたもので、機械工学ならびに適応構造物の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。