

氏名	と い ゆう すけ 土 井 祐 介
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2520 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻
学位論文題目	Studies on the Intrinsic Localized Modes in the One Dimensional Fermi-Pasta-Ulam Lattices (一次元 Fermi-Pasta-Ulam 格子系における非線形局在モードの研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 土 屋 和 雄 教 授 北 村 隆 行 助 教 授 小 川 欽 也

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は非線形格子系におけるエネルギー局在現象である非線形局在モード (Intrinsic Localized Mode, LM) の 1 次元 Fermi-Pasta-Ulam 格子系における素過程についての研究をまとめたものであり、6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、系の非線形性および離散性が波動現象の特性にあたる影響が述べられており、これらの両方の寄与によって ILM が励起されることが説明されている。さらに非線形格子系を材料中の結晶構造のモデルとみなせることを示し、材料中での微視的局在構造としての ILM という観点から ILM の素過程を調べるといふ本研究の目的が述べられている。

第 2 章では、格子系の不均一構造と ILM の作用について解析を行っている。不均一構造として孤立不純物、2 個の不純物および質量がランダムに分布するランダム格子系を取り上げている。孤立不純物との作用では、数値解析から、ILM は不純物の質量に依存して鋭敏に反応し、不純物上で透過、反射、捕捉、モード変化および分裂が起こることを明らかにした。これらのメカニズムとして ILM の内部振動数と不純物を中心として励起される不純物局在の固有振動数が近い場合にこれらのモード間で共鳴が起こり、さまざまな作用を示すという考察がなされている。次に 1 個の不純物の背後に同一質量の不純物が存在する場合について解析がなされており、2 個の不純物が近距離に配置された場合、ILM の振る舞いは孤立不純物の場合と異なり、不純物間の距離が離れるに従って、孤立不純物の場合に近づくことが示されている。このことから ILM は格子オーダーの構造の違いに対しても鋭敏に変化することが考察されている。最後にランダム格子における ILM の振る舞いが解析されている。マクロな観点からは ILM はランダム格子を移動することによってランダム格子のフォノンモードと共鳴して、エネルギーを失っていく。この作用はランダム性が増大するにつれて大きくなる。一方、ミクロな観点では、ILM はランダム格子中で比較的小さな質量を持つ格子点に捕捉され、移動によるエネルギー減衰は起こらなくなり、局在構造が安定に維持される。以上のことからランダム格子において ILM のエネルギーはある程度まで減衰するが、最終的に消滅するまでには至らないことが明らかになった。

第 3 章では ILM 同士の衝突作用について解析を行っている。網羅的な数値シミュレーションから ILM の衝突のメカニズムは、2 つの ILM のエネルギー、振動の位相、距離を用いて次のように説明できることが明らかになった。

- 2 つのモードのエネルギー  $E_1, E_2$  の移動方向および移動量はモードの位相差  $\Delta\phi$  に依存している。具体的には、 $\Delta\phi$  の符号でエネルギーの移動方向が決まり、 $\Delta\phi=0, 2\pi$  でエネルギーの移動が 0 になる。
- エネルギーの交換量は、2 つのモードの距離が近ければ近いほど大きくなる。また、ある距離よりも離れているときにはお互いに作用しない。
- 共鳴状態における振る舞いから 2 つのモードは、距離  $x$  が十分に近い場合には、同位相に近いときには引力、逆位相に近いときには斥力を及ぼす。

さらに、これらのメカニズムを記述するモデル方程式を提案し、モデル方程式の計算結果と数値シミュレーションの結果の

比較を行った結果、よく一致することを示している。

第4章では格子系での波動現象解析においてよく行われる連続体近似のFPU格子系への適用について検討を行った。一般に連続体近似は振幅の変化が格子間隔に比べて十分小さい現象に対して適用可能であり、ILMはこの条件を満たしていない。ここではILMの短波長成分を取り除き、Padé近似を用いることによって数値的に安定な偏微分方程式を構成した。この偏微分方程式の局在構造を記述する解析解を導出し、その性質を調べた結果、格子系におけるILMに対応する解であることが明らかになった。最後にこの偏微分方程式をILMの衝突現象の問題に適用できるかどうかを検討した。数値シミュレーションの結果、偏微分方程式の局在解の衝突は格子系におけるILMの衝突解と定性的に一致することが示された。

第5章において周期構造を持つ格子系におけるILMの集団的振る舞いについての解析を行った。均一系においては多数のILMが衝突、エネルギー交換を繰り返し、単一の巨大なILMが形成されるという過程が報告されているが、周期構造の導入によりこの単一ILMの形成が阻害されることが示された。集団的振る舞いの課程の詳細な検討から、このような系でのILMの振る舞いはILMの局在の特性長および周期構造のサイズの関係から説明が可能であることが示された。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果の要約および今後の課題について述べられている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、1次元Fermi-Pasta-Ulam格子系における非線形局在モード(Intrinsic Localized Mode, ILM)の振る舞いについて、基礎的な観点からの理解を深めることを目的に研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 格子系の不均一構造とILMの相互作用について解析を行い、孤立不純物との反応においては、ILMは不純物の質量に依存して鋭敏に反応し、不純物上で透過、反射、捕捉、モード変化および分裂が起こること、またランダム格子中においては、ILMの移動に伴うエネルギー減衰、不純物に捕捉されることによるエネルギー局在構造が維持されることを明らかにした。
2. ILM同士の衝突について体系的な数値シミュレーションを行い、衝突作用中のILMの位相差、エネルギー差が互いに影響を及ぼしあう複雑な挙動を示した。これらの振る舞いについて2つのILMの位相差、エネルギー、距離を変数とするモデル方程式を導出した。
3. Fermi-Pasta-Ulam格子系についてILMに対応する安定な局在解が存在するように疎視化を行い、偏微分方程式を導出した。この偏微分方程式における局在解について移動速度、2つの局在解の衝突の数値シミュレーションを行った結果、この局在解がILMの振る舞いをよく近似していることを示した。
4. 周期構造をもつ系における多数のILMの集団的振る舞いについて解析を行い、ILMの振る舞いはILM自身の特性長および平均自由行程と周期構造のサイズの大小によって分類ができることを明らかにした。またこの観点からILMの振る舞いのメカニズムが説明可能であることを示した。

以上、要するに本論文は、その多くが未解明であるILMの振る舞いについて、現実の物理系への応用を考慮した素過程の解析を纏めたものであり、学術上、実際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)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認められた。