

平成21年 5月11日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760053

研究課題名（和文） 周期的な結合構造物における局在振動現象の数理的研究

研究課題名（英文） Mathematical Research on the Localized Oscillations in a Spatially Periodic and Articulated Structure

研究代表者

渡邊 陽介（WATANABE YOSUKE）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：30304033

研究成果の概要：多数の浮体（ユニット）の周期的な結合により構成されているメガフロート（海上空港）や多数の床板と橋脚からなる長い橋梁、高架高速道路のような空間的な周期性をもつ長大構造物に特有の振動現象について、解析的、数値的考察を行った。何らかの衝撃や大きな変位がこれらの構造物の一部に加えられたとき、構造物自身に内在する非線形性と離散性のために、空間的に局在した振動（「非線形局在モード」）が励起する可能性を示し、長い構造物内を安定に移動することを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,100,000	150,000	1,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・工学基礎

キーワード：局在化、局在振動、非線形局在モード、ILM、離散性、周期構造、接続剛体系、メガフロート

## 1. 研究開始当初の背景

「メガフロート（超大型浮体式構造物）」とよばれる巨大な“いかだ”状の構造物がある。一見、真っ平らな一枚板のように見えるメガフロートであるが、実際は、多数の浮体（ユニット）の周期的な結合により構成されている。メガフロートは主に港や空港、発電所等の設置を目的として臨海や海上に建設されており、通常の陸地と同様な利用を期待されているが、海上に“浮いている”という点で、構造の安全性には一層の注意が払われ

る必要がある。特に懸念されるのが振動に対する不安定性である。メガフロートに振動をもたらす要因は、例えば、津波、台風、地震、船舶の衝突、飛行機の離発着等が挙げられる。また、一旦メガフロートに生じた振動が速やかに減衰しなければ、あるいは持続、共振、増幅するようなことがあれば、構造自体の破壊に繋がり大災害をもたらす恐れがある。従ってメガフロートの計画・設計に際しては、メガフロートにおける振動特性を明らかにしておくことが不可欠である。

これまでに研究代表者は、このような空間について周期的で離散性をもつ構造では、一般に、通常の一様連続な構造では現れない、独特の振動現象、波の伝播特性が存在することを定性的に明らかにした。また、周期構造物における波動・振動現象については多数の研究報告が存在するが、その多くは対象が個別的、実験的であり、力学モデルを用いて定性的に論じられたものは殆ど無い。これまでに研究代表者が取り組んできた研究手法を適用することにより、メガフロート系における振動現象、特に局在振動現象の解明が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はメガフロートや多数の橋脚を持つ長い大橋等、周囲の流体や弾性を示す固体の支持を受けている長大周期構造物に生じる特異な長時間持続局在振動の特性を、非線形力学の立場から定性的に明らかにすることである。

近年、固体物理学の分野で、欠陥や不純物が存在しない〈完全な〉周期格子において、格子自身に内在する〈非線形性〉とその空間構造の〈離散性〉のために、空間的に局在した振動（「非線形局在モード（Intrinsic Localized Mode: ILM）」や「離散ブリーザー（Discrete Breather）」とよばれている）が格子内に誘起されることが、実験的に、理論的に明らかとなり、“エネルギーの局在化現象”としてホットな話題となっている。現在ではこの格子力学におけるエネルギー局在化の概念が、化学、光学、生物物理学等に拡張され、これの利用を目指した研究も進められている。

この局在化の概念は、当然、同じく空間周期的で離散性をもつ工学分野の構造物にも拡張されて然るべきである。様々な周期離散構造系が存在する中、本研究ではメガフロート系にその対象を絞り、系に現れる ILM の定性的な性質を明らかにする。ILM とその生成の条件、海面との相互作用、ユニットの物性に関する空間構成パターン間の関係および局在振動の制御・脱局在化法に関して数理的な知見を与えることを目指す。

## 3. 研究の方法

(1) ILM の概念の、工学分野の構造物への拡張を目指す際、格子力学系の場合と決定的に異なる点があることに注意しなければならない。それは構造物において重要となる波動・振動現象は縦波ではなく、〈横波〉であるという点である。従って工学構造物の場合において定性的な議論を行う際は、格子力学系でよく用いられている多数の質点とバネからなる「バネ-質点モデル」とは異なる、

全く別な新しい解析モデルを構築する必要がある。この要請に対し、研究代表者は「接続剛体はりモデル」を提案した。接続剛体はりモデルは工学構造物のもつ空間周期的な離散性と非線形性を考慮した最もシンプルで本質的な数理モデルである。これまでにこのモデルに対して、解析的、数値的研究を進め、特に、対称的な形状で系の中心位置に定在する非線形局在振動、すなわち〈横波の定在型 ILM〉の存在およびその性質を明らかにしてきた（〔雑誌論文〕⑧）。このモデルは〈外力が作用しない〉系、例えば宇宙空間に浮かぶ人工衛星の太陽電池のパネル構造（図 1）に対する解析モデルであり、海面との相互作用があるメガフロート系を対象とした考察を行うためにはモデルの再構築が必要である。



図 1. 人工衛星の太陽電池パネル（JAXAのHPより）

(2) (1)で述べた外力が作用しない接続剛体はり系に対し、まずメガフロート系を想定した、〈周囲流体と相互作用のある〉接続剛体はりモデルを構築し、系の支配方程式の導出を行った。この力学モデルは「実際のメガフロート → 海面上の同質の浮体（パネル）の非線形バネによる周期結合体 → 弾性支持された接続剛体はり系」のモデル化によって構築されている（図 2、3）。またこのモデルはメガフロートに限らず、例えば、多数の床板と橋脚からなる長い橋梁や高架高速道路、長距離に渡って敷設されたパイプライン等、周期的に設けられた、変位に対して復元的な作用を与える弾性体によって支持されている周期離散構造系の解析モデルとも見ることができる。ここで考慮された弾性支持効果の大きさ ( $\eta$ ) は、系を伝播する線形波の伝播特性（線形分散関係）を変化させるため、系に内在する非線形性の大きさ ( $\kappa$ ) とともに、振動の局在化・脱局在化、すなわち ILM の生成とその特性に大きな影響を与えることが予想される。



図 2. メガフロート空港モデル  
(メガフロート技術研究組合のHPより)

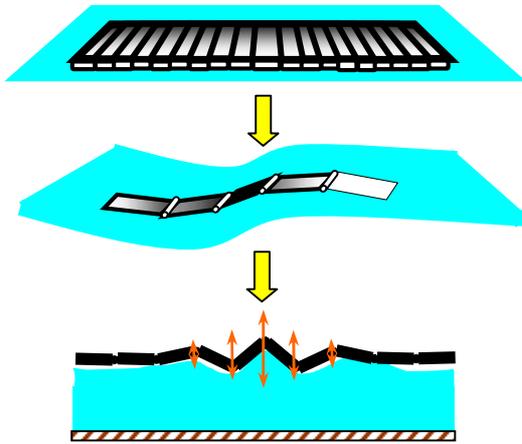


図 3. メガフロートから接続剛体はりへの  
モデル化 (流体と相互作用のある系)

(3) (2)のモデルに対して、まず〈定在型〉の ILM の存在およびその性質について、 $\kappa$ と $\eta$ のパラメータ値の組み合わせに対する詳細な数値計算を行った。図 4 に定在型 ILM の一例を示す。ILM の生成については、 $\kappa$ と $\eta$ の値とともに、接続剛体系の初期形状が重要な“パラメータ”となる。これらパラメータ値の選択の際には、これまでの外力の作用しない系に対する研究結果が大いに役立った。計算結果は、パラメータ空間における、局在の度合い (系全体に対する、局在部のもつ力学的エネルギーの比率) の分布によってまとめることができた。

(4) 次に(3)で得られた結果を参考にして、〈移動型〉の ILM に関する数値計算を行った。先行する研究により、初期条件として非対称な系形状を与えると、生成した ILM が〈動き出し〉、系内を〈移動する〉ことを確認しており、これらの知見を元に移動型 ILM を励起し、その移動パターンを重点に、ILM の振る舞いを詳細に調べた。

(5) (4)と平行して、ILM に対する接続剛体はりの不均一性の影響を調べる。すなわち、系内に他と質量が異なるはり結合された場合や、一つ一つのはりの質量が異なり、それらの系に沿った分布が連続的に変化している場合等の、ILM への影響についての研究を行う。実際のメガフロートの設計でも利用目的に応じて、部分的に他と異なるユニットの結合を考えるのは自然であり、これらに関する知見を得ておくことは意義がある。

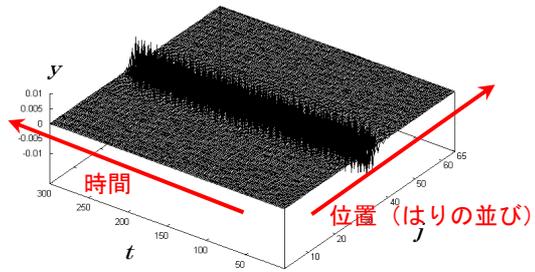


図 4. 局在振動の時空間発展  
(定在型 ILM)

(6) (1)から(5)までの研究で取り扱う解析モデルが系全体のエネルギーが保存される〈保存系〉であるのに対し、エネルギー散逸効果と強制外力とを考慮した〈非保存系〉における ILM の生成とその性質についての研究を進めたい。地上の構造物の振動問題を考える時、それらのシステムがエネルギー保存系であることは稀である。非保存系における ILM の存在条件やその特性を調査・把握することにより、本研究に関する知見の、現実のシステムへのより良い応用が期待できる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主な研究成果

メガフロート系を記述する解析モデルとして「弾性支持された接続剛体系」を提案し、系の支配方程式の導出およびその数値解析を行い、この系に〈横波〉の ILM が存在することを示した。この ILM の生成には、連結部が与える復元モーメントの非線形的な応答性 (非線形性の大きさ)  $\kappa$ と系の変位に対する海面からの復元力の大きさ $\eta$ のバランスが特に重要となる。パラメータ値の多数の組み合わせによる数値解析結果から、系に励起された ILM は、例外的な場合を除いて、系内を移動することが明らかとなった。この結果は、格子力学系における ILM (〈縦波〉の ILM) の場合、特別な条件を与えてやらない限り移動しないのとは対照的であり、本研究における特筆すべき成果であると言える。

メガフロート系における ILM の移動パターンは系の初期形状 (波形の局在部の、系内における初期位置) に強く依存することも明ら

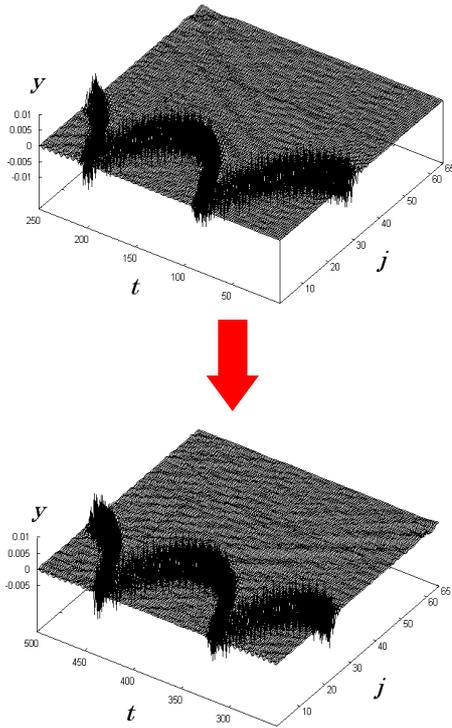


図 5. 系内を移動する ILM の時空間発展  
(一定の“バウンド”に落ち着く場合)

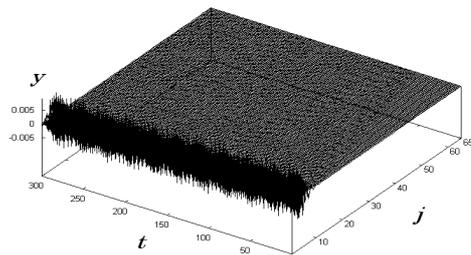


図 6. 系の端近くに定在する ILM  
(定位置に“捕捉される”場合)

かとなり、例えば、動き出した ILM が系の一方の端へと向い、端に到達するとそこで跳ね返され、何度も“バウンド”を繰り返した後、最終的に一定のバウンドをするようになるケースや (図 5)、バウンドを繰り返した後、端の近い位置に“捕捉される”ケース (図 6)、あるいは一端で強く跳ね返されて系を横切り、他端との間で何度も往復するようになるケース (図 7) 等の移動パターンが存在することが分かった。これまで接続剛体系の ILM で「定在型」と呼んでいた系の中心に留まるケース (図 4) は、本質的に移動する ILM の、特別なパターンとして分類されるべきであろう。

これら ILM の移動のメカニズムには、系の長手方向の〈バランス〉が大きく関係していると考えられ、系の長さの有限性、すなわち

系の「端の存在」の影響が有意に現れていると言える。

(2) 得られた成果の位置づけとインパクト  
様々な分野で ILM に関する理論的研究が行われている中で、〈横波〉の ILM の存在やその性質を明らかにしたのは本研究を中心とした、研究代表者らによる一連の研究のみであり、研究手法や得られた成果は大変独創的であると言える。本研究で得られた成果は数理系、物理系、機械系、情報系等様々な研究分野の学会、研究会で報告したが ([学会発表] 参照)、いずれの分野の研究者達にも興味を持ってもらうことができた。

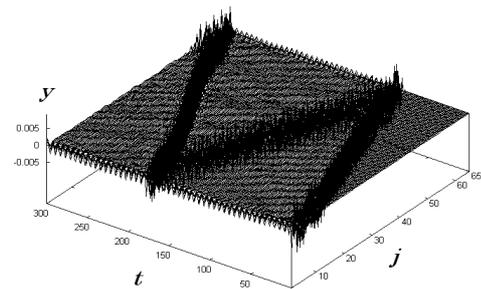


図 7. 系内を移動する ILM の時空間発展  
(系全体をほぼ一定の速さで往復し続ける場合)

### (3) 今後の展望

(1) の成果を踏まえた上で、以下の①から③について更に研究を進めることにより、将来的な目標である、実際の工学構造物における局在振動の制御・脱局在化法に関する理論的基盤の確立、より正確な提言、長大構造物の安全な設計や評価への応用等が可能になると考えている：

① (1) で述べたように、接続剛体系における ILM は一般に移動し、その移動パターンは系の初期形状に依存するが、これら移動パターンと初期形状の間の物理的な関係を見出すことが求められる。このためには別の視点からのモデルの解析や、ILM の更に詳細な振動特性の調査が必要である。

② 『3. 研究の方法』の(5)に関連して、系に不均一性がある場合の ILM の振る舞いを、幾つかのケースについて調べてみたところ、ILM は質量の小さいユニット (剛体はり) の位置に移動し、そこに定在、安定化する傾向が見られた。これは直感とも一致する結果であるが、更に詳細な調査が必要である。

③ 『3. 研究の方法』の(6)に関連して、現在、〈非保存系〉の接続剛体系における ILM の研究を進めている。エネルギー散逸効果と強制外力とを考慮した改良モデルを構築し、数値計算を行なってみたところ、系全体の対称性が保たれるような外力を入れると、系の

中心で定在する ILM が存在することが明らかになった。格子力学系の場合を含め、これまでになされてきた ILM についての理論的研究の殆どが保存系を対象としている中で、散逸系における ILM の存在が確認できたことは大変意義深い。散逸系における ILM の特性を明らかにすることは今後の大きな課題である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 渡邊陽介, 淡田聡二郎, 杉本信正, 弾性支持された接続剛体系を移動する非線形局在モード, 京都大学数理解析研究所講究録『非線形波動現象の数理と応用』, 2009 (in press), 無
- ② 淡田聡二郎, 渡邊陽介, 杉本信正, 弾性支持された接続剛体系を移動する非線形局在振動, 日本機械学会関西支部 第 84 期定時総会講演会講演論文集, 094-1, 825, 2009, 無
- ③ 渡邊陽介, 淡田聡二郎, 杉本信正, 弾性支持された接続剛体系を移動する非線形局在モード, 電子情報通信学会技術研究報告 (IEICE Technical Report) 信学技報, 108, 7-10, 2008, 無
- ④ 渡邊陽介, 濱田和幸, 杉本信正, 接続剛体系において境界に捕捉される局在振動, 日本機械学会関西支部 第 83 期定時総会講演会講演論文集, 084-1, 1019, 2008, 無
- ⑤ 渡邊陽介, 濱田和幸, 杉本信正, 接続剛体系を移動する非線形局在モード, Seminar Notes of Mathematical Sciences (Ibaraki University), 11, 168-173, 2008, 無
- ⑥ 渡邊陽介, 濱田和幸, 杉本信正, 接続剛体系を移動する非線形局在モード, 九州大学応用力学研究所研究集会報告, 19ME-S2, 145-150, 2008, 無
- ⑦ 渡邊陽介, 杉本信正, 喜多成充, 弾性支持された接続剛体系における定在型非線形局在モード, 日本物理学会講演概要集, 62, 278, 2007, 無
- ⑧ Y. Watanabe, K. Hamada, N. Sugimoto, Localized oscillations of a spatially periodic and articulated structure, Wave Motion, 45, 100-117, 2007, 有

[学会発表] (計 9 件)

- ① 淡田聡二郎, 渡邊陽介, 杉本信正, 弾性支持された接続剛体系を移動する非線形局在振動, 日本機械学会関西支部 第 84 期定時総会講演会, 2009 年 3 月 17 日, 近畿大学
- ② 渡邊陽介, 淡田聡二郎, 杉本信正, 弾性

支持された接続剛体系を移動する非線形局在モード, 電子情報通信学会 非線形問題研究会 (NLP), 2008 年 12 月 9 日, 石川県文教会館

- ③ 渡邊陽介, 淡田聡二郎, 杉本信正, 弾性支持された接続剛体系を移動する非線形局在モード, RIMS 研究集会『非線形波動現象の数理と応用』, 2008 年 10 月 22 日, 京都大学数理解析研究所
- ④ Yosuke Watanabe, Movable Intrinsic Localized Modes in a Spatially Periodic and Articulated Structure of Rigid Members, 第 3 回非線形局在モード勉強会, 2008 年 5 月 12 日, 金沢大学
- ⑤ 渡邊陽介, 接続剛体系を移動する局在振動, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門所属『減衰 (ダンピング) 研究会』ダンピング研究会講演会, 2008 年 5 月 9 日, 広島市立大学
- ⑥ 渡邊陽介, 濱田和幸, 杉本信正, 接続剛体系において境界に捕捉される局在振動, 日本機械学会関西支部 第 83 期定時総会講演会, 2008 年 3 月 15 日, 大阪大学
- ⑦ 渡邊陽介, 濱田和幸, 杉本信正, 接続剛体系を移動する非線形局在モード, 数理科学セミナー, 2008 年 3 月 7 日, 茨城大学
- ⑧ 渡邊陽介, 濱田和幸, 杉本信正, 接続剛体系を移動する非線形局在モード, 研究集会『戸田格子 40 周年 非線形波動研究の歩みと展望』, 2007 年 11 月 9 日, 九州大学応用力学研究所
- ⑨ 渡邊陽介, 杉本信正, 喜多成充, 弾性支持された接続剛体系における定在型非線形局在モード, 日本物理学会 第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 22 日, 北海道大学

[その他]

ホームページ等

<http://www-nlmech.me.es.osaka-u.ac.jp/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡邊 陽介 (WATANABE YOSUKE)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号: 30304033

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: