

応用力学研究所研究集会報告 No.17ME-S2
「非線形波動および非線形力学系の現象と数理」 (研究代表者 梶原健司)

Reports of RIAM Symposium No.17ME-S2
Phenomena and Mathematical Theory of Nonlinear Waves and Nonlinear Dynamical Systems
Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 9 - 12, 2005

Article No. 02

非線形格子中の局在励起の実験的研究

佐藤 政行 (SATO Masayuki)

(Received February 28, 2006)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
May, 2006

非線形格子中の局在励起の実験的研究

金沢大学自然科学研究科 佐藤政行 (SATO Masayuki)

概要

Sievers-Takeno により提唱された非線形格子中の局在励起 (Intrinsic Localized Mode, ILM) に関する実験について、MEMS 格子での研究を中心に ILM の生成、観測、格子ピンングなどの基本的な ILM の性質から、不純物モードとの相互作用を利用したレーザーマニピュレーションまで述べる。

1. はじめに

1980年代の終わりごろに Sievers-Takeno[1]により提唱された非線形格子中の局在励起 (Intrinsic Localized Mode, ILM) に関する研究は、当初はもっぱら計算機実験に拠っていた。実験は、1990年代の終わりごろから始まった。ロスアラモスの Bishop のグループによる塩素架橋混合原子価白金錯体のラマンスペクトル[2]、コーネル大の Sievers のグループによる反強磁性体のマイクロ波吸収[3]といった固体物質 (自然格子)、あるいは MIT[4]や Nurnberg 大の Ustinov のグループ[5]による人工的なマクロ格子であるジョセフソン接合格子や振り子格子[6]などが初期の実験である。このような時期に、わたしは Sievers 研へ加わり、ILM の研究に携わった。

Sievers は固体物理、特に遠赤外域を中心とする分光分野の第一人者であり、自然の固体格子での ILM に一番の興味があった。ILM 生成で重要なパラメータは非線形性の大きさや符号、隣り合う振動子間の結合の大きさである。しかしながら固体の格子振動は遠赤外域 (テラヘルツ域) にあり、強力な励起光が得にくい。マイクロ波 (ギガヘルツ域) ならば、強力な光源が手に入る。マイクロ波に共鳴周波数を持つような励起には反強磁性共鳴があり、負の非線形性をもつ。結合が小さいほど局在状態は作りやすいので、スピン波のバンド幅が狭く実験温度も手ごろな物質が探された。[7]

反強磁性スピン格子は、一般には高温では反強磁性状態を保てない。高い転移温度は大きいスピン間相互作用を意味し、ILM 生成には都合がわるい。1次元反強磁性鎖が弱く結合した3次元物質では状況は深刻で GHz 程度の反強磁性共鳴周波数 (バンドの底の周波数) でバンド幅も GHz 程度の場合、転移温度はマイクロケルビン域になってしまい実験には適さない。

ところで、我々が実験で用いた試料 $(C_2H_5NH_3)_2CuCl_4$ はシート状のCu原子を含む層が大きな分子 $C_2H_5NH_3$ で分離されている層状構造となっている。層間のスピンには弱い反強磁性共鳴相互作用が、層内のスピン間にはその1000倍強い強磁性相互作用が働いている。強い相互作用のため1つの層を一つの巨大スピンと思えば、巨大スピン間に弱い反強磁性相互作用が働いているとみなせる。(低いほうの) 反強磁性共鳴周波数は1.5 GHz であり、バンド幅は3.6 GHz 程度であるので非常に都合が良い。一方、転移温度は層内の強い相互作用

のため 10 K と高く、これもまた都合が良い。この 3 次元格子を 1 次元で近似することはシミュレーションを容易にする。ILM 生成に伴うブロードな吸収がシミュレーションで予想され [7]、これをマイクロ波吸収にて観測した。 [3]

励起、吸収測定ともにマイクロ波の波長が試料や格子間隔に比べて極めて長いので、実験では波数 $k = 0$ のチャンネルを通じて試料を見ていることになる。高周波コイルによる一様 ($k = 0$) モードの励起から変調不安定性を用いて、高い波数の状態を生成し、ILM を作り出す。我々はシミュレーションも行っていたが、ILM 生成時の変調不安定性の最初のステップは、 $k = 0$ 状態の大きな振幅による (励起されていない) バンド内状態の非線形周波数シフトであると気づいた。 [8] これは、 $k = 0$ 状態自身の非線形周波数シフトより大きく、非線形光学で言うところのクロス位相変調がセルフ位相変調より大きいことに相当する。重要なことは、バンドの底であったはずの励起 $k = 0$ 状態に、バンドの底近くのどこかで非励起の 2 つの状態 (この波数を $k = k'$, $-k'$ とする) が周波数縮退することである。ステップの 2 番目は、 $k = 0$ 状態を 2 つ消し、 k' と $-k'$ 状態を一つづつ生成する 4 マグノン散乱である。

ところが、スピンのダイポール・ダイポール相互作用を含めて考えると、波数 $k = 0$ 近傍のスピン波の構造 (バンド構造) は極めて複雑になる。これは、強磁性体では良く知られていたことで、試料形状の変化が共鳴周波数の変化をもたらす。 [9] また、共鳴周波数は複雑なスピン波構造の底付近で非励起でも最低周波数ではなく、非励起でも $k = 0$ 状態に縮退した状態がある。したがって非線形周波数シフトを伴わずとも、4 マグノン散乱が起きる可能性がある。さらに、 $k = 0$ 状態の線形緩和過程はこれら縮退した状態への 2 マグノン散乱であると考えられている。

しかしながら、バンドの最低周波数から離れた ILM 状態を想像することが出来るように、このような複雑な状態からも ILM 状態は生成されるはずである。われわれはもう少し興味深い実験が出来ないかと考えていた。このような中で、全く別のプロジェクトとして Microelectro-mechanical systems (MEMS) 技術を用いた非線形格子が実験に使えないかというアイデアが、Sievers から提案された。

ここで、簡単に ILM について解説する。同じ共鳴周波数を持つ振動子を結合させると、ノーマルモードの周波数は分布しバンドを生成する。1 つの振動子を異なる種類に置き換えると、不純物モード (局在モード) ができ、その周波数はバンドの外に出来る。不純物を用いる代わりに、非線形振動子による格子を作る。ある条件では局所的な励起パターンは、非線形性による局所的なポテンシャルの違いを生み出すので、不純物様に振る舞い、局在モードが生成される。この局在モード励起が、非線形によるポテンシャルのパターンを作り出し、自己安定化する。不純物状態同様、バンドの外側にできるのでバンド状態と重ならず、平面波に緩和しない。不純物が必要ないので、格子中どこでも生成できる。連続体、あるいは格子での可積分系のソリトンと異なり、重心の平行移動に対してエネルギー差があり、格子にピンギされる。そのため、静止状態で安定である。(逆に、ILM は非可積分格子系の現象であると言える。) エネルギーの自己集中現象に関係すると考えられている。自然格子、人工

格子に関わらず応用が考えられており、格子振動、DNA、塩素架橋混合原子価白金錯体、反強磁性体、ジョセフソン接合格子、MEMS 格子、フォトニック結晶などが研究されている。

(Campbell らによる解説が *Physics Today* に載っていますので参考にしてください。[10] また、Sievers 教授の web サイトには ILM のアニメーションがあります。[11])

2. MEMS 格子における ILM 生成

この時期、たまたま Craighead グループでカンチレバーを用いたバイオ関係の研究がなされていた。カンチレバーを非線形振動子とみなすことには疑問はないが、振動子間の結合の方法と観測方法には問題がありそうであった。9つのカンチレバーが並んだ試料があったので、これの周波数特性を測定してみると見事に9つの分布したピークが出てきた。結合はカンチレバー間のオーバーハングによって成される。オーバーハングはエッチング工程のいわば”やりすぎ”により出来るものである。

個々のカンチレバー自身にも無限のカンチレバー振動モードがあるが、ここでは一番周波数の低いモードのみについて考える。この一番周波数の低いモードについて非線形性を測定してみると、励起強度に伴って周波数が上昇する正の非線形性を持つことがわかった。同じカンチレバーを並べた格子の場合、バンドの底は $k = 0$ になる。我々は反強磁性体の場合と同様に、 $k = 0$ の一様モードを励起することで ILM 生成を行いたい。非線形性が正なので、 $k = 0$ モードがバンドの頂上にあると都合が良い。

共鳴周波数の異なる、2種類のカンチレバーが互い違いに並んでいる場合、2種類のバンドがあり一様モードも2つ存在する。片方の一様モードは下のバンドの底であるがもう片方は上のバンドの頂上にある。そこで、長さのわずかに異なるカンチレバーを互い違いに100個から250個並べることにした。

このようにして出来た試料の(高いほうの)一様モードの周波数は、約140 kHzほどである。2つのバンドのうち、上のバンドの幅は狭く、3 kHz から10 kHz 程度である。これは ILM 生成に都合が良い。一方下のバンドは50 kHz 程度のバンド幅がある。ダンピングは空気中では大きいので、真空中で使用した。Q 値は最大で10000程度である。

ILM はバンドの少し上に出来る。150 kHz の上下動を捕らえるには最低でも300 kHz のサンプリング速度が必要であるが、250点もの多点をそのような速度で観測するのは非常に難しい。高速の1次元 CCD カメラは1024ピクセルを40MHz程度で読み出す。したがって1ピクセルでは40 kHz で、半分の20 kHz 程度までの上下動しか読めない。我々は上下動を測定することをあきらめ、局在した場合のエンベロープの動きを測定することにした。群速度から移動速度は見積もれるが、バンド幅が狭いので、左右に動いたとしても数 kHz 程度の速度で十分である。

試料全体を真空中で piezo 振動子に載せ、上下にゆする。各カンチレバーは同じ加速度を感じる。カンチレバーの先端を格子軸方向に平行に1次元 CCD に結像する。光を全てのカンチレバーの先端に照射するため、レーザービームを直線状にフォーカスした。反射光は1次

元 CCD に入射する。静止状態ではカンチレバーに相当するピクセルが明るくなるので縞模様が記録される。CCD の一ラインが取り込まれる間にカンチレバーは何回も上下動をするが、振動が大きくなるにつれ反射光は CCD 位置に結像する時間が短くなり、暗くなる。このようにして振動の大きさの空間パターンの時間変化が記録される。

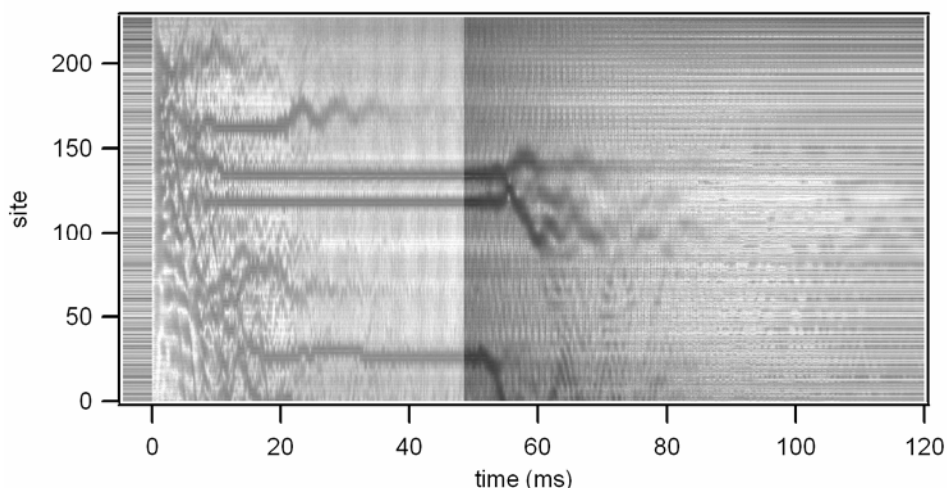


図1 カンチレバーアレイにおける ILM の生成。縦軸は格子サイト、横軸は時間。1次元 CCD 上カンチレバーアレイ像を時間に沿って並べてある。

実験結果を図1示す。[12] 試料は、Craighead グループの"Rob" Illic に作ってもらった。上のバンドは狭く局在モード生成には都合が良いが作成誤差による不純物にも弱い。これは3作目の試料である。 $t < 0$ の領域は励起以前の縞模様が記録されている。 $t = 0$ から 48 ms で piezo 振動子を ON にしてある。励起が ON の部分が見えるように、同時に赤外 LED を点灯しているのでこの時間内は明るく記録されている。はじめの暗いカオス的なパターンは変調不安定性により生成された、高い波数成分による。この時点で、すでに動き回る局在励起の様相を示している。

piezo 励起の周波数は時間とともに $t = 0$ から 16.2 ms まで、バンドの頂上からわずかに高い周波数まで上昇し、その後は一定になるように設定してある。励起周波数をバンドの頂上に固定した場合、常に一様モードが励起され、変調不安定性によるカオス的動局在パターンが生成され続ける。励起周波数が上昇すると、ある周波数以上では一様モードはもはや強く励起されない。励起周波数の近くに共鳴周波数を持つ振動モードのみがエネルギーを受け取ることができる。そのようなモードの振幅は、非線形性が正であるので周波数が上昇するにつれ振幅も大きくなる。図で、 $t = 20 \text{ ms}$ あたりからカオス的なパターンが薄れているのは、一様モードへの励起が止まっているからである。運よく励起周波数に同調することができた局在モードのみが生き残る。また、そのようなモードの振幅は $t = 16.2 \text{ ms}$ まで時間とともに増大する。ILM の最大の特徴は格子にピンギされることである。図で 8 ms あたりから ILM の横の動きが小さくなるのは、振幅が周波数シフトとともに大きくなり、格子ピンギ効果が大きくなることによる。また、変調不安定性を用いているので ILM のシードはノイズである。このため、毎回異なった位置に ILM

が生成される。

われわれはシミュレーションも行い、以上の結果が最近接の線形バネ、オンサイトの線形バネと非線形バネの簡単なモデルで再現できることがわかった。

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} + \frac{m_i}{\tau} \frac{dx_i}{dt} + k_{20i} x_i + k_{40i} x_i^3 + k_{2i} (2x_i - x_{i-1} - x_{i+1}) = m_i \alpha \cos \omega t \quad (1)$$

このモデルが、正確に試料を表現しているとは思ってはいなかったが、最低限の ILM 的振る舞いはよく再現する。そこで実験で得られた局在モードの ILM 的な性質はこのモデルに起因すると考えた。以上で、ILM の最大の性質である格子ピンング効果と、格子中にどこでも静止できる性質を実験で捉えることが出来た。

3. ILM のレーザーマニピュレーション

あるとき、静止した ILM の振動成分を測定するためフォーカスした He-Ne レーザーを ILM 位置に当て、その上下動を実時間で測定しようと試みた。カンチレバー 1 個ずつ測定することは容易である。Ne-Ne レーザーを当てると、CCD 画像での ILM がゆれるように見えた。そこで、レーザービームと ILM との関係を調べるため、手持ちの光出力の大きな赤外ダイオードレーザーをフォーカスして ILM に近づけてみた。すると、図 2 に示すように反発することがわかった。[13]

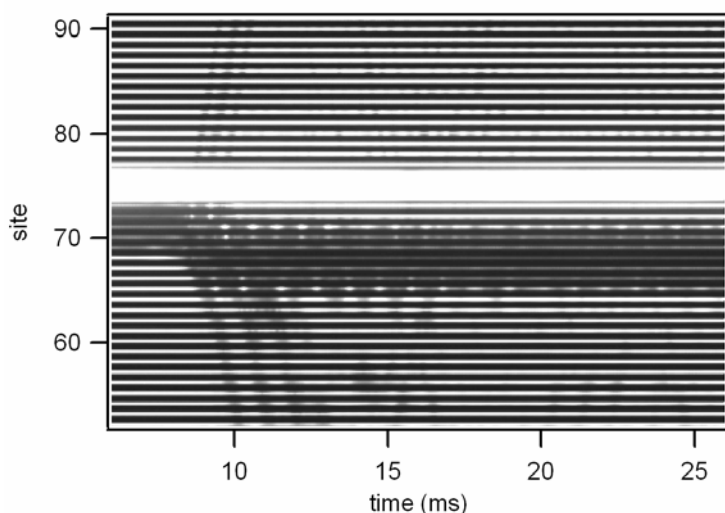


図2 フォーカスしたレーザーによる ILM の反発。レーザーの位置を固定し、時間とともに出力を増大させた。移動した瞬間近傍を表示している。反発された ILM が新しいサイトへトラップされ、そこを中心に振動している。

そのころ、このような相互作用を系統的に予言する理論は存在していなかった。レーザーが不純物局在モードを生成していると考えるのが自然であり、ILM も不純物モードも周波数空間ではバンドの外側に状態がある。Kivshar による Ablowitz-Ladik(AL)格子中の不純物のソリトンへのポテンシャル[14]から類推すると、これらの状態がバンドの反対側にあるとき反発が、同じ側にあるとき吸引相互作用が働くことが予想される。しかしながら式 (1) と

AL モデルと比較可能な非線形シュレジンガー方程式との比較は変換を経なくてはならず、その間にどのようなパラメーターや条件が落ちてしまうかもしれない。

まず始めに、不純物モードを実験的に確認した。1 個のカンチレバーの上下動を詳しく測定することで、線形モードの対象性に邪魔されない限り格子中の全てのモードの周波数分布を調べることができる。ILM を反発することを確認したレーザービームの存在下で、バンドの下に不純物モードが生成することが確認された。これはヤング率が温度上昇で低下することで理解される。バネ定数で -10% 程度の変化であることが見積もられた。

次に、式 (1) の下でシミュレーションを試みた。安定な ILM を生成し、その ILM の隣に不純物ポテンシャルを突然 ON にする。ところが、不純物効果を大きくしても反発しないか、不安定になって ILM が消えてしまう。シミュレーションでの ILM サイズが実験でのサイズよりも小さく、不純物の影響が ILM の袖だけでなくその中心部まで及んでしまうようにも見た。そこで、振動子間の線形バネを最近接以外に第 6 最近接まで取った。こうすることで上のバンド幅が下のバンド幅よりも狭いなど、測定された分散関係をよく再現できる。また、ILM サイズが大きくなってより安定になると期待された。ところが、このモデルでも反発は再現できない。そこで、最近接の非線形バネを導入した。この変更で初めて、バネ定数で -10% 程度の不純物で ILM が反発された。考えてみれば、非線形モードの形状は、線形のパラメーターよりも非線形のパラメーターの影響を強く受けることは自然なことである。我々のモデルは以下の式で表せる。

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt} + \frac{m_i}{\tau} \frac{dx_i}{dt} + k_{20i} x_i + k_{40i} x_i^3 + \sum_j k_{2l}^{(j)} (2x_i - x_{i+j} - x_{i-j}) + k_{40} [(x_i - x_{i+1})^3 + (x_i - x_{i-1})^3] = m_i \alpha \cos(\Omega t) \quad (2)$$

実験を再現するモデルが得られたので、線形不純物の周波数位置と ILM の周波数位置をマップして、その間にどのような相互作用が働くか、調べてみることにした。シミュレーションでは、バンドの上に不純物モードを作ることも自由である。図 3 (b) にその結果を示す。

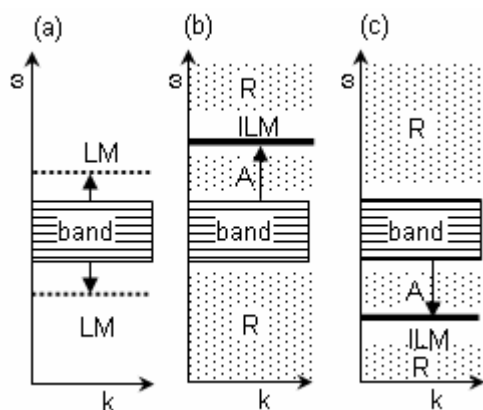


図 3. 不純物局在モード (localized mode, LM) の周波数と ILM との相互作用。(a) LM はバンドの外側にできる。(b) ILM がバンドの上側にあるとき。LM の周波数がバンドの下では反発 (R) し、バンドと ILM の間では吸引 (A) する。ILM よりもある程度上では、反発する。(c) ILM がバンドの下側にあるとき。LM の周波数がバンドの上では反発 (R) し、バンドと ILM の間では吸引 (A) する。ILM よりもある程度下では、反発する。

当初の予想と似て、バンドの反対側では反発が起こる。吸引は ILM とバンドの間にあるときのみであり、不純物モードが同じ側にあっても、不純物モードがある程度離れていると反発される。あまりにバネ定数が違いすぎると反発されるという自然な結果にも見える。

図 3 (c) に示すように、ILM がバンドの下側にある場合も同様な結果が予想される。実験では、カンチレバーに電極を付け、基板との間に電界をかけることで負の非線形性が導入されることが期待される。そこで、実際にそのような試料を作り、実験を行った。作成には前回同様、CNF の Rob Ilic をお願いした。彼の類まれな作成能力をしても使用可能なサンプルは 6 バッチ目から作られるようになるなど、これは以前の実験よりかなり困難であった。

[13] シミュレーションも行い、図 (3) b の関係を確認したが、これも実験同様、困難であった。これは、負の非線形性に由来する。容易に想像できることだが、負の非線形ポテンシャルが存在する場合、大振幅ではそれにトラップされてしまうからである。

用いたモデルを式 (3) に示す。ILM はバンドの下に生成されるため、ユニットセルは 1 カンチレバーの単純なものでよい。ILM は $k = 0$ 近傍の状態から生成されるので、 $k = 0$ 近傍の非線形性が重要である。

$$m \frac{d^2 x_i}{dt^2} + \frac{m}{\tau} \frac{dx_i}{dt} + k_{20i} x_i + k_{40i} x_i^3 + \sum_j k_{2l}^{(j)} (2x_i - x_{i+j} - x_{i-j}) + \sum_j k_{4l}^{(j)} \left[(x_i - x_{i+j})^3 + (x_i - x_{i-j})^3 \right] + \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{[w(L-l)]V^2}{(d+x_i)^2} = m\alpha \cos(\Omega t) \quad (3)$$

最後の項が電界の効果であり、オンサイトの項である。はじめは、式 (2) のモデルに電界の項を加えたものを用いていた。 $k = 0$ で、オンサイトの正の非線形バネをキャンセルしてトータルで負の非線形性を持つように、電圧を調整する。振幅があまり大きいと、この電界の項の底なしのポテンシャルに引きずられてしまうので、おおよその振幅範囲を見積もる。その振幅での非線形周波数シフトを見積もり、右辺の励起周波数を決定する。ILM 生成には不純物シードを用いた。これは、励起周波数に振幅 0 で共鳴する不純物モードを作り、不純物ポテンシャルを徐々に取り除く方法である。完全に不純物を取り除いた後には、もしも ILM が安定ならば ILM が励起に共鳴して残る。色々なパラメーターを調べた結果、インターサイトの非線形バネ定数がオンサイトの非線形バネ定数より大きいことが決定的に重要であることがわかった。

ILM の生成は、自己エネルギー集中現象と考えられているように、ILM が生成したとき、その中心での振幅は一様 $k = 0$ モードより大きいと考えられる。この場合、負の非線形性がさらに強く働くので、中心部では振幅が大きくなり、先鋭化する。インターサイトの正の非線形項は $k = 0$ モードには影響しないが、波数が大きくなるに従い大きな影響を及ぼす。ILM 近傍での先鋭化による高波数成分が、正の非線形効果と呼び、振幅の増大を抑えるので安定化すると考えられる。式 (3) の長距離非線形インターサイト項は、さらにこの効果を増大するために付け加えられた。

恐らく、高次の正のオンサイト非線形項を加えるのが安定化に一番簡単な方法だったのかもし

れない。しかしながら、正の非線形 ILM のマニピュレーションの結果同様、大きな正のインターサイト非線形項が重要であるという結果は、式 (3) のモデルがもっともらしいことを支持している。簡単な構造解析によるそれぞれの非線形項の大きさの見積もりも、これを支持している。

実際の実験も、ほぼ同様の手順を踏んで行われた。はじめに、バンドの少し下の周波数でピエゾ励起を行い、次に電界生成の電圧を徐々に上昇させる。上げすぎると、カンチレバーが基板にくっついて取れなくなってしまうので、危険である。ポテンシャルにとらわれそうになると、CCD イメージが全体に暗くなるのでそれとわかる。次に赤外レーザーを ON にして不純物モードを生成する。励起と共鳴すると、ビート波がそこから格子へ放出される。徐々に赤外レーザーの出力を落とすと、ILM が残る。レーザーの位置をずらし、ON にする。レーザースポットを ILM に近づけると、ILM がレーザーに吸引される様子が観測された。(図 4)

これらの反発や引力相互作用は、励起源に同調している ILM に特徴的と考えられる。そのような ILM 内部では、ダンピングによるエネルギーロスと、励起源からの供給がつりあって、ある振幅を保っている。この振幅は、バンドの端の周波数と励起周波数の差を非線形形で補うために必要である。必要な周波数差は、バンドをはさんで反対側の不純物モードが近くにあると大きくなる。周波数差が大きいときは、大きな振幅が必要になり、反発が起こると考えられる。バンドと ILM の周波数の間に不純物モードがあると、必要な周波数差は小さく、小さな振幅でよいので吸引されると考えられる。

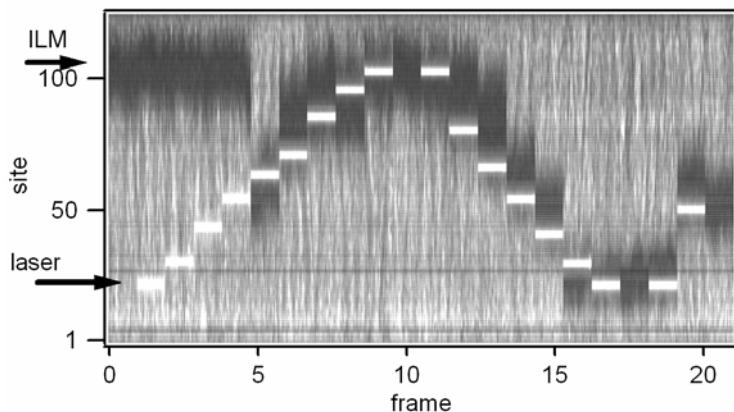


図 4. 負の非線形性を持つ格子中に作られた ILM と、バンドの下に作られた不純物モードが引き合う様子。フレーム 5 で、レーザースポットが ILM に近づくと、ILM が引き寄せられる。

4. 反強磁性体へ

MEMS 格子での結果をなんとか反強磁性体に応用できないかと考えているとき、図 1 の $t = 20 \text{ ms}$ 以降で観測される、安定な励起源に周波数同調した ILM が作れないかと考えるようになった。我々は、いままで図 1 での $t = 5 \text{ ms}$ での状態をマイクロ波吸収[3]で見ていると考えられるからである。もし、 $t = 40 \text{ ms}$ のような状況が作り出せれば、ILM について線形分光や、非線形分光が詳しく行われる可能性がある。カオス的な励起がなく、システム全体ではほとんど励起されていない低温の状況を保ちながら、わずかな ILM のみを安定に保

てば、2次元面内のスピン波励起はあったとしても ILM からの放出のみである。また、ちょうど Craighead のグループでは単分子分光が試みられていた。さらに Sievers 研の卒業生の Moerner による単分子分光[15]のレクチャーがあった。これらに共通するキーポイントは、濃度の低い試料を用いることである。

パルスマイクロ波源で、図1の初期状況を作り出し、別に用意した弱い CW 源で生成された ILM のうち、わずかな数の ILM を捕まえることを試みた。共鳴周波数の一番低い試料を用いて2次元面内への緩和を小さくするなど、実験上の改良を加えた結果、周波数同調した ILM の検出には非線形4波混合法が吸収法より感度が高いこと、4波混合スペクトルにも MEMS で見られたのと同様のサイドバンド構造があること、4波混合信号の時間経過にステップ状の変化があることを見つけた。このステップは ILM の同調が外れるときに生じると考えられ、個々の ILM の崩壊を観測していると結論付けた。見積もられた ILM の大きさはシミュレーションよりかなりおおきい。[16]モデルで無視した ILM からの2次元面内への緩和が利いていると考えている。

5. まとめ

MEMS 格子には人工格子に共通の、試料の均一性の問題があった。極端には、すべて不純物と考えても良いかもしれない。このような状況で、ILM 一般の特性を引き出すため常にシミュレーションと比較し、簡単なモデルで再現できるような性質を追及した。シミュレーションでは均一性の問題はないが、モデルの正当性の吟味が問題となった。

他の系と比較すれば、GHz 程度と共鳴周波数の高い Josephson 接合格子では横方向の振動を測定するには高速のサンプリング速度が必要になり、ILM 生成や移動を記録することは非常に難しい。一方、共鳴周波数が数 Hz の振り子を用いた実験[6]も行われているが、そのようなシステムでは長い測定時間が必要である。振り返ってみれば、カンチレバー振動子の適度の周波数域と作成の容易さが、他の系では実現が難しい生成、消滅、操作などの直接カメラ観測を可能としていた。

実験やシミュレーションで示されたさまざまなマニピュレーションや消去、生成[13]は興味深く色々な可能性を含んでいるように思われる。可積分でない非線形格子であれば、ほぼどのような系でも成立すると考えられる。光や磁気格子に応用することでスイッチ素子やロジック素子への可能性を秘めている。

ダンピングの存在を強く意識しない限り、周波数同調した ILM は存在しない。また、系をマクロと捕らえ、ミクロな緩和過程は考慮していない。しかしながらもともとの ILM の考えは、自動的にエネルギーが集中する過程である。そこでは、ILM の生成が緩和過程かもしれない。また、ここで述べた MEMS 格子や、反強磁性体は古典的として扱ってきた。武野先生が述べておられるように、量子論的な ILM には本質的に別の意義があるように思える。[17]本研究はこれら大きな問題には達していない。ILM には、未知の大きな領域があることを最後に付け加えたい。

謝辞

この仕事は、コーネルでなされ、そこでの多くの人に支えられた。特にスーパーバイザーの Sievers 教授、学生の L. Q. English, B. E. Hubbard, J. Wrubel, Craighead 研の学生で CNF のスタッフでもある B. "Rob" Ilic, また IRG-E グループの多くのメンバー、特に J. Parpia に感謝したい。

参考文献

- [1] A. J. Sievers, and S. Takeno, Phys. Rev. Lett. **61**, 970(1988).
- [2] B. I. Swanson, J. A. Brozik, S. P. Love, G. F. Strouse, A. P. Shreve, A. R. Bishop, W.-Z. Wang and M. I. Salkola, Phys. Rev. Lett. **82**, 3288(1999).
- [3] U. T. Schwarz, L. Q. English and A. J. Sievers, Phys. Rev. Lett. **83**, 223(1999).
- [4] E. Trías, J. J. Mazo and T. P. Orlando, Phys. Rev. Lett. **84**, 741(2000).
- [5] P. Binder, D. Abraimov, A. V. Ustinov, S. Flach and Y. Zolotaryuk, Phys. Rev. Lett. **84**, 745(2000).
- [6] W.-Z. Chen, Phys. Rev. **B49**, 15063(1994).
- [7] R. Lai and A. J. Sievers, Phys. Repts. **314**, 147(1999).
- [8] M. Sato, L. Q. English, B. E. Hubbard and A. J. Sievers, J. Appl. Phys. **91**, 8676(2002).
- [9] 例えば R. W. Damon, "Ferromagnetic Resonance at High Power", in G. T. Rado and H. Suhl, "Magnetism", vol. 1, (Academic press, NY, 1963).
- [10] D. K. Campbell, S. Flach, and Y. S. Kivshar, Physics Today **57**, 43 (2004).
- [11] <http://www.lassp.cornell.edu/~sievers/ilm/>
- [12] M. Sato, B. E. Hubbard, A. J. Sievers, B. Ilic, D. A. Czaplewski and H. G. Craighead, Phys. Rev. Lett. **90**, 044102.(2003); M. Sato, B. E. Hubbard, L. Q. English, A. J. Sievers, B. Ilic, D. A. Czaplewski and H. G. Craighead, Chaos **13**, 702.(2003).
- [13] M. Sato, B. E. Hubbard, A. J. Sievers, B. Ilic and H. G. Craighead, Europhys. Lett. **66**, 318(2004); M. Sato, B. E. Hubbard, and A. J. Sievers, Rev. Mod. Phys. **78**, 137 (2006)
- [14] Y. S. Kivshar, Phys. Lett. **A161**, 80 (1991); Y. S. Kivshar, Phys. Rev. **B47**, 11167 (1993).
- [15] W. E. Moerner, "Thirteen Years of Single-Molecule Spectroscopy in Physical Chemistry and Biophysics", in Single molecule spectroscopy, ed. by R. Rigler, M. Orrit and T. Basche, (Springer, Berlin, 2001).
- [16] M. Sato, and A. J. Sievers, Nature **432**, 486.(2004); M. Sato, and A. J. Sievers, Phys. Rev. **B71**, 214306(2005).
- [17] 武野正三、物性研究 **84-4**, p.602 (2005).