

# 非線形音響の世界と非線形音響研究会

非線形音響研究会

杉本 信正

## 非線形音響の世界と非線形音響研究会

非線形音響研究会 杉本 信正

### 1. はじめに

昨年の8月、超音波テクノ編集部より2011年度非線形音響研究会での発表をもとに今春特集を組みたいとお話を頂き、その前書きとして本表題の執筆依頼を受けた。「非線形音響の世界」は内容が広すぎて、限られた紙面に纏めるのはなかなか難しい仕事である。題目の変更も一時考えたが、非線形音響を紹介する良い機会であると思い直し、そのままでお引き受けした次第である。内容はあくまでも筆者の目を通したものであり、理論を中心に述べ実験の発展については紹介しておらず偏りがあることをお断りしておく。

特集には11本の研究紹介がある。その内容は現象別に、キャビテーション、音響流、放射圧、弾性表面波、パラメトリックアレイ、熱音響に分けることができる。これら現象について非線形音響の歴史を振り返りながら紹介し、今後についても考えてみたい。なお紙面の都合上、周知の事柄については参考文献を挙げていない。非線形音響に関しては、優れた成書<sup>[1]~[8]</sup>が幾つかあるのでそちらをご覧ください。また、音の研究の歴史としての観点は文献[9]に詳しい。

### 2. 非線形音響の世界

#### 2-1 非線形音響とは

非線形音響とは何かを一言でいえば、強い音波の伝播とそれに伴うさまざまな現象を指す。では強力音波と呼べばいいのではとの声が聞かれそうであるが、なぜ敢えてイメージしにくい非線形と呼ぶのかをまず説明しよう。

音波というのは特定の媒質だけに限られたもので

はなく、さまざまな媒質に共通した波という普遍な現象の一つである。一方、強い音波の伝播は、足し算・引き算だけの「線形」の考えが通用しない世界にある。この「非線形」の世界では、数式をもとに議論しないと怪しい議論が横行する恐れがある。何よりも数式を用いるご利益は、共通の基盤の上で議論でき、表面的な現象に惑わされずに本質を理解し、さらには定量的な予測ができることである。

非線形音響という用語の起源は定かでないが、背後にこの普遍性と共通性があると思う。このため非線形音響の研究には、物理法則に従って組み立てた数学モデルが必要である。では、モデルの式をいつでも書き下すことができるかと問われれば、必ずしもそうとは答えられないが、その確立を目指して想像を巡らせながら色々考えているのである。

ここで再び非線形音響とは、音波による攪乱が大きくなり、その二次項以上の効果や影響を研究する分野である。攪乱は常に有限の値を有しているのに、その二次項以上を全く無視し議論するのが線形音響である。このため線形音響は無限小攪乱理論とも呼ばれる。線形と非線形の区別は、例えば音圧が130dB以下を線形、それ以上を非線形というように線引きできないことに注意していただきたい。この判断の主体はあくまでも研究する側にあり、実験結果を線形理論による結果と比較して二次項の効果が必要と判断すれば130dBには関係なく考慮すればいいのである。非線形音響はこのように線形音響近似に満足せず、現実をより精密に捉えようとする研究分野である。

#### 2-2 音波の非線形現象の発見

非線形音響としての研究は1960年代に始まるが、

音の伝播において非線形性が実質的に原因となる現象は古くから知られている。中でも音速の導出において、ラプラス (1816) がニュートン (1686) による等温近似ではなく、断熱近似が適当であるとした19世紀初頭に、ポアソン (1808) はすでに音速 (ニュートンによる) は一定ではなく、気体速度に依存することを述べている。この後ストークス (1848) が「音の理論の難しさについて」と題する論文で、波形の突っ立ちと不連続の発生の可能性を指摘している。不連続は今でいうショック (衝撃波) であり、これはまさに非線形音響の始まりである。

一方ファラデー (1831) は、音の強さが大きくなると定常な流れが起きることを発見している。周期的な音から定常な質量流れが誘起される現象は音響流と呼ばれ、現在でも研究が行われている。また、音波が物体に一定の力 (時間に関する平均圧) を及ぼす現象がある。これは放射圧と呼ばれ、レイリー (1902) によってすでに研究されている。音響流と放射圧は気体、液体共に発生するが、液体に特有なのがキャビテーションの発生である。これもレイリー (1917) が20世紀初頭に調べている。最近話題になったソノルミネッセンスも、1934年にケルン大学のフレンツェル (Frenzel) とシュルテス (Schultes) によって偶然に発見されている。非線形音響の重要な現象はこの時代にすでに発見されているが、当時の研究の主流は線形音響であり、非線形の研究はそれに押しやられ進展は緩やかなものであった。

20世紀前半までの時代では、強い音が発生し問題となるのはやはり砲術や軍事の分野である。そして第二次世界大戦直前のジェット機の出現や、さらには戦後の超音速機の出現に伴う衝撃波の発生などから、ソニックブームの研究が始まった。いわゆるN波 (デュモンド (DuMond : 1946) ら<sup>m)</sup>の命名とされる) の伝播や、有限振幅音波に及ぼす粘性効果の議論がメンドウス (Mendousse : 1953) やライトヒル (Lighthill : 1956) によってバーガース (Burgers) 方程式に基づいて行われた。

ライトヒル (1952) はこれに先立ち空力音響理論を提案し、ジェット騒音低減に向けた研究が始まる。導出された方程式は流体力学の式を書き直しただけのものであるが、重要な点は音響アナロジーと呼ばれるその式の解釈にある。ライトヒルの理論は

また一方では、ヴェスターヴェルト (Westervelt : 1963) に影響を与えた。非線形性は二つの異なった周波数をもつ波から和・差音を発生させ、特に差音である低周波は減衰が小さく指向性がよい。非線形項は線形の波動方程式に対する分布した音源とみなすことができることから、パラメトリックアレイと呼ばれ研究が始まる。パラメトリックアレイは当初はソナー開発に関係して研究されたが、現象は空気中でも発生可能であり、その後オーディオ・スポットライト (1983) が提案<sup>n)</sup>され、現在実用化されている。

一方、固体の中でも強い音波が伝播すると高調波や和・差の周波数をもつ波が発生することが知られるようになり、これらを用いて三次の弾性定数を測定する研究が60年頃から始まった。固体の非線形性は流体に比べ一般に現れにくい。しかし表面波であれば、その名の通り表面付近だけに限られ内部に深く浸透しないので、小さな入力パワーでも振幅が大きくなりやすく非線形性が現れやすいことが分かってきた。このときにすでに弾性表面波を電子デバイスに利用することを念頭に研究が行われ、80年代には楕円トランスデューサを用いたコンボルバ、パラメトリック増幅器、フーリエ変換器、ミキサ等が考案され実用化された。

固体が気体や液体と性質を著しく異にするのは、せん断変形に対して弾性を示すことである。したがって圧縮・膨張波に加えせん断波が伝播する。有限なせん断変形は二次の非線形性によってまず圧縮・膨張波を引き起こし、これがせん断波と非線形相互作用をするので、せん断波の非線形性は実質的に三次になる。

### 2-3 非線形音響としての研究の起源と経緯

非線形現象は上で見たように、気体や液体、さらに固体をも含めた全ての媒質で発生し、概ね連続体力学で説明できる範疇にある。これら媒質に共通する特性は、線形音速が周波数に依存せず一定である、言い換えれば媒質は分散性を示さないことである。ここでいう分散性とはエネルギー散逸を伴わない純分散を指す。音速は実際には周波数に弱いながらも依存するが、これは粘性や熱伝導性の散逸によるものである。分散のない散逸媒質を強い音波が伝播すると、次第に波形が突っ立ち最終的にショック

が発生する。ショックは気体だけに限ったことはなく、分散性のない媒質に共通した普遍的なパラダイムである。

こうした背景の下、1960年代頃から現象を統一的立場から議論しようとする動きが起こってきた。これが1968年のInternational Symposium on Nonlinear Acoustics (以後ISNAと呼ぶ)の発足に現れる。この時期には他分野でも非線形の研究が始まる。一つは核融合を目指したプラズマ物理である。プラズマにはさまざまな波が存在し、しかも非線形が不可欠である。また流体力学でも水の非線形波の研究が行われ、とりわけ分散性媒質での非線形波動という研究が始まり、孤立波からソリトンの発見につながっていく。また、レーザーの発明により非線形光学という分野も出現する。一方では電気回路や、熱対流、化学反応などの非線形振動系においてカオスという新しい概念が出てきた。非線形音響の分野でも、気泡を励起するとカオスは発生する。こうしたさまざまな非線形の研究は非線形科学とその後呼ばれるようになったが、非線形音響はその先駆けであったことは間違いない。

非線形音響の典型であるショックの形成は、バーガス方程式によって見事に記述される。この方程式は平面波の一方方向伝播を仮定しているが、伝播方向に垂直な方向の緩やかな変化を取り入れた、いわゆる放物型近似に基づく方程式がコクロフ(Khokhlov)とザボロツカヤ(Zabolotskaya)、そしてクズネツォフ(Kuznetsov)によって導かれた。これはKZK方程式と呼ばれ、パラメトリックアレイや非線形音波の回折の研究に成功を収めた。KZK方程式の導出の背景には面白いエピソードがあるので、ご関心ある方は文献[12]を参照されたい。

媒質自身に分散性がなくても、境界があると反射・透過によって音波に分散性が発生する。分散性が強いと音波は非線形自己変調を起し包絡ソリトンが一般に出現するが、分散性が弱い場合の孤立波は音波では発生しないと考えられてきた。しかし、K-dV型(コルトヴェーク(Korteweg)とド・フリース(de Vries))のソリトンも共鳴器列を空間周期的に取り付けた管路内の音では可能であることが明らかになった<sup>13)</sup>。ショックの伝播速度は超音速であるのに対し、ソリトンを極限に含む音波の孤立波は亜音

速で伝わる。多数の境界がある例として混相の場合がある。気泡を含む液体中の音波では気泡が弱い分散性を発生させ、いわゆるK-dV-バーガス方程式が導かれる。分散性はショック構造を振動的なものに変えるが、散逸性の方が分散性より効果は優勢である。

音響流や放射圧は現在でも盛んに研究が行われており、三次元問題は十分解明されていない。発見以来相当な時間が経過しているが、一次元問題でも依然誤解や混乱がある。計算が正しければ、いずれの結果も解釈次第で等しくあるべきである。音響流と放射圧はペアをなす。前者は質量流束 $\rho v$ の二次の量の時間平均から求められ、後者は音響放射応力(流体力学の運動量流束の符号を反転した量) $P - \rho v v$ の同じく二次の平均量である。ただし、 $\rho$ 、 $v$ 、 $P$ はそれぞれ、密度、速度ベクトル、応力テンソルである。静止状態での圧力と変動場での平均圧とは異なり、後者は流れ場全体の境界条件の影響を受け、音響流とも関係する。この解を求めるのが難しいのが混乱の一因のように思われる。

音響流や放射圧の理論面での解明は十分とはいえないものの、実験的には面白い現象が発生する。混じらない二つの液体の界面や、液体と固体との界面に音波が入ると放射圧の違いにより噴水のような現象が発生することは古くから知られている。また固体表面上に置いた液滴を表面波で駆動し、音響流の発生や液滴の搬送実験も行われている。放射圧は超音波浮揚やマニピレーションに応用されている。そのとき音響流が背後に存在する。

## 2-4 非線形音響研究の展開

非線形音響の研究が始まって以来、液体とも固体とも区別できない生体は格好の研究対象であった。当初はその非線形パラメータ $B/A$ の測定が盛んに行われた。特に80年代以降、デジタル技術の飛躍的発展により大きな進展があった。パルス波から生じた衝撃波を収束させて結石破碎に応用する技術や、超音波が組織を伝播する際に発生する高調波や、造影剤の微小気泡が発する高調波を取り出し映像化するハーモニックイメージングが実用化されている。最近では、HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) と呼ばれる、強力な超音波を収束させることにより、病変組織を加熱し壊死させる方法が研究

されている。

ソノルミネッセンスには従来多くの気泡が含まれていたが、ガイタン (Gaitan : 1990) 等が20年ほど前に単一気泡での発光に成功して以来、大きな関心を集めた。発光メカニズムはまだ十分に解明されていないようであるが、気泡内部の化学変化を考慮しなければならず、これが音と化学を結びつけ両者が融合したソノケミストリーの扉を開くきっかけにもなった。気泡はドラッグ・デリバリーへの応用でも盛んに研究されており、キャピテーションも含め研究の余地は十分残っている。

固体が有限変形を受けると、音速が僅かに変化する音弾性現象が発生する。これを用いて三次の弾性定数が測定できる。最近、き裂の圧縮と引っ張りの際の接触の挙動の違いによる、区分線形的な非線形による高調波や分調波の発生を用いた非破壊検査法が研究され応用されている。また、いわゆるグラニューマテリアルにおいては、弾性体接触のヘルツの理論による非線形性を考慮した研究が行われている<sup>14)</sup>。

固体中での非線形音波の研究は遅れていたが、最近レーザーを用いたナノ・ピコ秒パルス波によって大きなひずみをナノスケールで発生できるようになってきた。低温で減衰を抑えるとバルク波のショックやソリトン、表面波のショックも観測されている。表面をコーティングするなどして二層にすればレイリー波以外にもラヴ波のソリトンも可能である。層の厚さによってK-dV型のソリトンだけでなくベンジャミン (Benjamin) と小野 (Ono) 型も存在することが明らかになってきた<sup>15)</sup>。

音波による媒質の変化は断熱的で、エントロピーの変化は無視されるのが普通である。これに対し、エントロピー変化が本質的な音響現象が熱音響である。これにはさまざまな現象があり、近年関心を集めているのは、温度勾配のある壁面に接した気体の粘性や熱伝導性が引き起こす不安定化現象である。不安定化した後は非線形性とのバランスによって自励振動が発生する。熱から振動へのこのエネルギー変換は熱機関の作用とみなすこともでき、新しいブライムムーバ (原動機) として関心を集めている。逆に、気体を外部から駆動すると熱を汲み上げるヒートポンプ作用が起こる。これはエネルギー流束の

二次の時間平均量である熱音響流によるものである。この現象を用いた新しい冷凍機が一部実用化されている。

非線形音響の黎明期から今日までの研究を概観した。理論がうまく実用化に繋がっているのが特徴である。最近ソニッククリスタルなどをはじめメタマテリアルの研究が行われているが、その非線形挙動は興味あるところである。今後もバイオ関連の一層の発展が期待される一方、熱音響の実用化にはもう一段の展開が必要である。それにはやはり精密な数値計算手法の開拓が今後不可欠である。

### 3. 非線形音響研究会

すでに述べたように、1968年に第1回ISNAがアメリカ・コネチカット州ニューロンドンにある水中音響研究所で開催された。初期の頃は毎年ないし隔年にアメリカを始め、英国、ソビエト連邦、フランスで頻繁に開催されてきたが、1978年に開催された第8回以降は3年ごとの開催である。21世紀になってからは2002年にはモスクワ大学、2005年にはペンシルバニア州立大、直近の2008年にはスウェーデン王立工科大学で開催されてきた。会議録が公に出版されるようになったのは1990年からである。このため設立当時に日本から参加者があったのかどうかについては不明である。

第1回ISNAから10年後の1978年11月に、第1回日米合同音響学会議がハワイで開催された<sup>16)</sup>。非線形音響の特別セッションが設けられ、日本から纏まって論文が発表された。これが契機となって研究グループの創設の機運が盛り上がり、1980年12月に池谷和夫先生 (名古屋大学) の提唱によって非線形音響懇談会が発足した<sup>17)</sup>。その後日本の研究レベルの向上と共に、ISNA国際組織委員会から1984年に第10回ISNAの開催の要請を受けた。この開催の受け皿として非線形音響懇談会を発展的に解消し、1981年に非線形音響研究会を設置することが決まった。池谷先生を初代会長として会員数30名で発足した。この3年後に第10回ISNAが7月24日から28日にわたって神戸国際会議場で中村昭先生 (大阪大学) を議長として開催され、70件の研究発表が行われた<sup>18)</sup>。参加者約100名のうち半数は海外からであった。会議の開催は幾つかの新聞で取り上げられ、特にパラ

メトリックアレイが「望遠スピーカー実用化へ」と題して紹介され関心を集めた。

ISNAを契機に国内が組織化されたことにより研究が活発化し、非線形音響研究会は順調に活動を続け昨年発足30年目を迎えた。最近の研究会は(財)加藤科学振興会の援助の下に、例年夏に同財団の軽井沢研修所を借りて1泊2日の合宿形式の研究会を開催している。参加者のバックグラウンドは異なるので、発表時間を十分にとり議論を中心に据えている。懇親会ではさまざまな話題が飛び交い、合宿ならではの親睦を深めている。なお、初回から昨年までの研究会で発表された内容はウェブ (<http://ew3.ee.uec.ac.jp/nl/>) に公開されている。

本研究会はその成り立ちからISNAの国内下部組織的な側面があり、ISNAには毎回多くの会員が参加してきた。日本は次第に世界の中で、アメリカ、ヨーロッパ、ロシアと並ぶ一つの極を形成するようになってきた。これには本研究会の寄与は大きい。ISNAの国際組織委員には中村昭先生に次いで、現在は本研究会の前会長の鎌倉友男先生(電気通信大学)が日本代表を務めている。なお、研究会は現在会員数が70名程度の規模の任意団体である。昨年発足30年目にして、研究会の英語名をNonlinear Acoustics Society of Japanと決め、ロゴを会員に募った。それをもとに決定したロゴが第1図である。



第1図 非線形音響研究会のロゴ

こうした実績を踏まえて、2008年の第18回ISNAにおいて2011年に第19回の日本開催が決まった。実に四半世紀ぶりの日本での開催である。非線形音響研究会を招致母体として、日本音響学会、アメリカ

音響学会、IUPAP(国際純粋・応用物理学連合)の共催の下、昨年の8月1日から4日にわたって早稲田大学国際会議場で開催される予定であった。アブストラクトの査読準備を終え、今後の予定を話し合った実行委員会の翌日、東日本大震災が発生した。地震と津波、それに伴って発生した福島での原発事故の深刻さを考えると、予定どおり開催することには無理があると判断し、当面は無期延期する措置をとらざるを得なかった。その後暫く原発事故の収束状況を見て、開催を9ヶ月遅らせ今年の5月21日から24日に開催することになった。日程以外、招待講演などの変更はない。会議録は後日AIPより出版される予定である。詳細はウェブ (<http://www.isna19.com>) をご覧いただきたい。

昨年の非線形音響研究会は当初、ISNAと一体として東京で開催する予定にしていた。しかし開催の延期によって例年の研究会を中止するわけにもいかず、急遽7月16、17日の土日に箱根で開催することになった。このため参加者数は例年より幾分少なかったが、それでも11件の講演が集まった。写真1に研究会後の参加者の集合写真を紹介する。今年は例年どおり夏に開催を予定している。

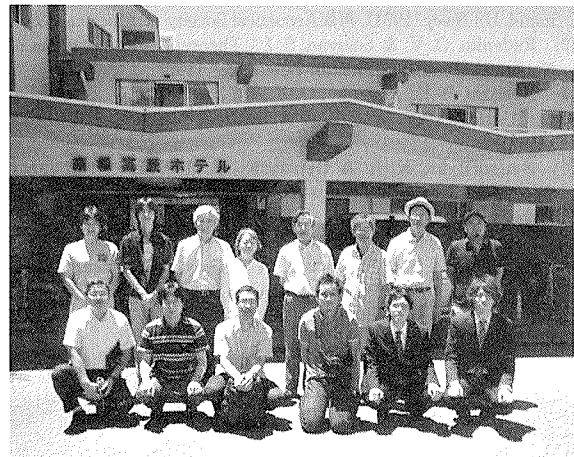


写真1 2011年度非線形音響研究会の集合写真

#### 4. おわりに

非線形音響は約半世紀を経て現在は成熟状態にある。若い方からすれば今から研究することが残っていないのではとの心配が起きるかもしれない。いつ

の時代でも、どの分野でも同じようなことがいわれつつ、暫くして振り返れば何か新しい進展がある。一つの技術であれば、ひととおり研究し尽くされると余地はなくなるかもしれない。しかし非線形音響は技術ではない。問口の広い膨大な学問分野である。一見完成したように見えても解明されていない問題は山積している。それらはまた身近なだけに解決には社会的な要請もある。非線形を中心に据える限り研究の方向は間違っていないと思う。

新しい発見には諦めず絶えず研究を継続していくことが何よりも大切である。その中で同じことを繰り返すのではなく、発想の転換が必要である。これには他の分野の新しい知識の習得も必要である。こうした中から次の新しいテーマが見つかると思える。しかし何よりも地道であるが基盤をしっかりとさせることが第一である。確かな基盤がなければ他人の研究を自ら評価できず、周りの風潮に流されるだけになるし、何より自分で新しい一歩が踏み出せない。次世代を担う方には、流行をいち早く見つけそれに乗ることだけではなく、ぜひ新しい流行を自ら作りだしていただけることを期待している。

#### <参考文献>

- (1) Beyer, R. T. : Nonlinear Acoustics, Naval Ship Systems Command, US Navy (1974), 再版Acoustical Society of America (1997)
- (2) Rudenko, O. V. & Soluyan, S. I. : Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics, Plenum Publishing (1977)
- (3) Novikov, B. K., Rudenko, O. V. & Timoshenko, V. I. : Nonlinear Underwater Acoustics, Acoustical Society of America (1987)
- (4) Naugolnykh, K. A. & Ostrovsky, L. A. (eds.) : Nonlinear Acoustics, Research Trends in Physics, American Institute of Physics (1994)
- (5) 鎌倉友男 : 非線形音響学の基礎、愛智出版 (1996)
- (6) Hamilton, M. F. & Blackstock, D. T. (eds.) : Nonlinear Acoustics, Academic Press (1998)
- (7) Naugolnykh, K. & Ostrovsky, L. : Nonlinear Wave Processes in Acoustics, Cambridge University Press (1998)
- (8) Enflo, B. O. & Hedberg, C. M. : Theory of Nonlinear Acoustics in Fluids, Kluwer Academic Publishers (2002)
- (9) Beyer, R. T. : Sounds of Our Times, Two Hundred Years of Acoustics, Springer (1999)
- (10) DuMond, J. W. M., Cohen, E. R., Panofsky, W. K. H. & Deeds, E. : A determination of the wave forms and laws of propagation and dissipation of ballistic shock waves, J. Acoust. Soc. Am., 18, pp.97-118 (1946)
- (11) Yoneyama, M., Fujimoto, J., Kawamo, Y. & Sasabe, S. : The audio spotlight : An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design, J. Acoust. Soc. Am., 73, pp.1532-1536 (1983)
- (12) Rudenko, O. V. : The 40<sup>th</sup> anniversary of the Khokhlov-Zabolotskaya equation, Acoustical Physics, 56, pp.457-466 (2010)
- (13) Sugimoto, N., Masuda, M., Yamashita, K. & Horimoto, H. : Verification of acoustic solitary waves, J. Fluid Mech., 504, pp.271-299 (2004)
- (14) Nesterenko, V. F., Daraio, C., Herbold, E. B. & Jin, S. : Anomalous wave reflection at the interface of two strongly nonlinear granular media, Phys. Rev. Lett., 95, 158702 (2005)
- (15) Hess, P. & Lomonosov, A. M. : Solitary surface acoustic waves and bulk solitons in nanosecond and picosecond laser ultrasonics, Ultrasonics, 50, pp.167-171 (2010)
- (16) Program of the 96th Meeting, ASA and ASJ Joint Meeting (Nov. 27-Dec. 1, Honolulu, Hawaii), J. Acoust. Soc. Am., 64, Supplement No.1 (1978) ; 五十嵐寿一他 : 会議報告 日米音響学会ジョイントミーティング1978, 日本音響学会誌, 35, pp.202-214 (1979)
- (17) 中村昭 : 非線形波動の計測工学への応用に関する基礎研究, 昭和62年度・文部省科学研究費補助金・総合研究 (B)、準備研究・調査報告書 (1987)
- (18) Nakamura, A. (ed) Proceedings of the 10th ISNA, Teikoksha Press (1984)

#### 【筆者紹介】

##### 杉本 信正

非線形音響研究会 会長  
 大阪大学 大学院基礎工学研究科 機能創成専攻  
 教授  
 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町1-3  
 TEL : 06-6850-6190 FAX : 06-6850-6190  
 E-mail : sugimoto@me.es.osaka-u.ac.jp