

パラメトリックスピーカ*

鎌倉 友男

電気通信大学 電子工学科

電子通信用語辞典にも音響用語辞典にも、「パラメトリックスピーカ」という用語は出ていない†。どうせ合成語であろうということで、「パラメトリック」と「スピーカ」に分けてみると、スピーカは日常見かけるから分かるにしても、パラメトリックの意味が釈然としなない。そこで、さらに理化学辞典などでパラメトリック (parametric) を引くと、パラメトリック増幅とかパラメトリック励振という用語として出ている。例えば、パラメトリック励振の説明には、身近かな例としてブランコの振動をあげている場合が多い。

ブランコの振れを大きくするには重心の位置を周期的に移動させ、これはブランコの鎖の長さを変えていることと等価であるが、乗っている人の腰の上下運動エネルギーをブランコの振れのエネルギーに供給して振れを大きくしているのである。パラメトリックという意味は、このブランコの例からも分かるように、ある種のパラメータ (ブランコにおいては重心の位置とか鎖の長さ) を周期的に変えて、それに関連する物理量を大きくしたり、新たな物理量を発生させることである。ただ、ブランコの場合は非線形ということと直接関係しないが、ここで取り上げるパラメトリックスピーカは、音波の非線形現象と密接に関連する。本文では、まず音波の非線形現象とは何かを問う。そして、その現象を利用した、用語辞典にも取り上げられるようになってきたパラメトリックアレイ、パラメトリックソナー

の補足説明をして、スピーカとしての特徴に言及したいと思う。

直線でない?

非線形とは何だろうと疑問をもつ読者がおられるかも知れない。非線形といったほうが直観的で分かりやすいかもしれない。非線形を数学的に厳密に定義することはむづかしい。ここでは、原因となる物理量とそれに起因する結果としての物理量の関係が、直線ではない、すなわちある系を考えたとき、「入力と出力の物理量間に直線性がみられない」と理解しておこう。もちろん、直線とみなされれば線形な系と解釈してよい。では、音波でいう非線形とはどういうもので、どのような現象が見られるだろうか。

そもそも音波は代表的な弾性波であって、何かモノがないと伝わらない。これは光、電磁波がモノのない真空中でも伝わることと大きく異なる点である。音の伝搬の担い手となるモノとは通常、空気や水といった流体、鉄などの固体である。これら伝搬媒質は弾性という性質をもつ。力を加えて媒質を押ししたり引

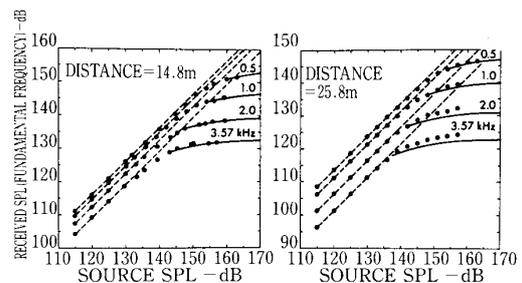


図 1: 音波の入出力特性. 文献 [1] より引用.

*本文は、超音波テクノ (発行所 日本工業出版株式会社) 1989 年第 1 巻 2 号の解説記事 “パラメトリックスピーカ” を一部加筆修正したもの。

†現在は記載されている。

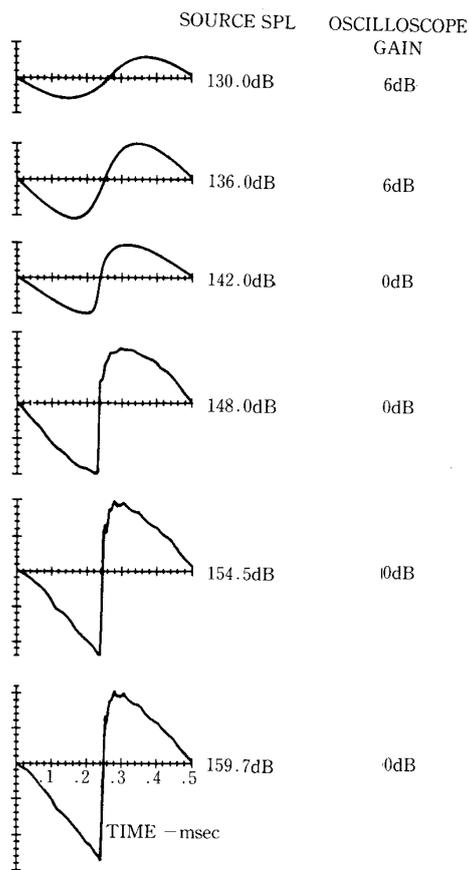


図 2: 受波波形の変化. 下段になるほど音源音圧は高い. 周波数は 2kHz, 距離は 14.8m. 文献 [1] より引用.

張ったりすれば縮んだり伸びたりして体積が変わり、力を離せばもとの状態に戻る。そして、圧力と体積の変化量には一般的に線形性が成り立つ。しかし、厳密にいうと線形ではない。圧力が増すときの体積変化の割合、すなわち圧縮率は圧力に依存し、圧力が大きくなるとともに小さくなる傾向にある。これは物質を構成する分子の運動によるものであって、気体では断熱性が、また固体では分子間の力がその原因になっている。音の速さが圧縮率の逆数（体積弾性率そのもの）の平方根に比例することを考え合わせると、音速もまた圧力に依存して、圧力が増すと音速が大きくなると予想できる。

そこで、次のような実験結果をみる。図 1 は 0.5 ~ 3.57 kHz の正弦波が、それぞれ内径

5 cm の導波管内を伝搬したときの音圧関係を測定した空中実験である [1]。横軸は音源であるホーンドライバ用スピーカ近傍の音圧を、また縦軸はその音源から 14.8 m とか 25.8 m だけ離れた位置での音圧であって、音圧はともに等間隔のデシベル単位（音圧レベル）で表示している。よって、45° の傾きは両測定値に比例関係、つまり線形性が成り立つことを意味する。

なお、音圧レベルとは正常な聴覚機能をもつヒトの最小可聴値 $20 \mu\text{Pa} (= 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2)$ を基準として音圧をデシベル換算したものであり、120 dB は最大可聴値で、それ以上の音は耳に痛感を与えるほどの大きさとみてよい。この実験結果をみる限りにおいては、日常われわれが経験している音の大きさでは、線形理論に従って伝搬すると解釈できる。ただ、周波数が高くなると、低い音源音圧で受音音圧に飽和が見られる。すなわち、導波管内の音の伝搬経路を 1 つの系と考えたとき、入出力間の音圧に非線形性がみられることになる。線形からズレた入出力関係において、音波の時間波形はどのようになっているだろうか。

図 2 は周波数 2 kHz を音源より放射したときの距離 14.8 m における観測波形である [1]。音源での音圧レベルが 130 dB あっても、受波波形は放射波形と同じ正弦波状である。しかし、140 dB を越える辺りから波形は正弦波とは異なって歪んできており、150 dB になると急峻な波面が見られ、「衝撃波」(shock wave) が現われている。もちろん、このような波形が見られるときでも放射音波は正弦波をしており、結局、波が 14.8 m 伝搬していく過程で歪んだと理解できる。

同じ現象は水中でも生じる。図 3 は周波数 2.3 MHz の音波を半径 9 mm の超音波振動子から放射したときの、水中マイクロホン（ハイドロホン）で観測した波形である。0.25 気圧では 15 cm 伝搬しても正弦波のままで観測される超音波も、4.4 気圧にもなると空中の場

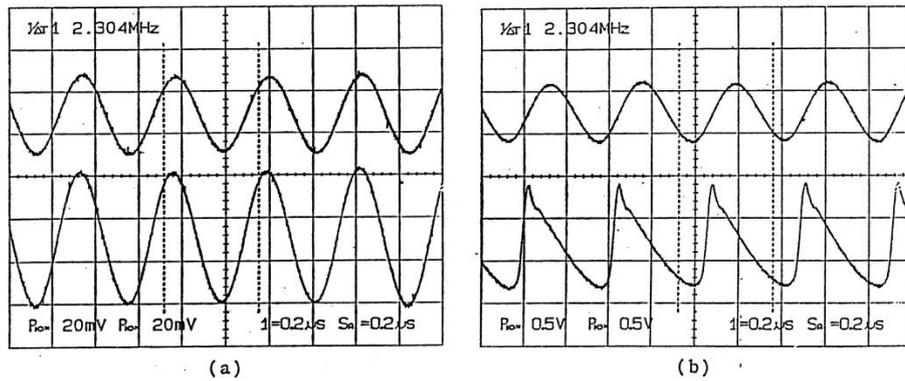


図 3: 水中で周波数 2.3 MHz の超音波を放射したときの観測波形. (a) は音源音圧が 0.25 atm, (b) は 4.4 atm のとき. それぞれ上段が音源近傍, 下段が音源より 20 cm 離れた位置での波形を示す.

合と同様に衝撃波が見られ, 波形がかなり歪んでいる. このような波形歪みの発生は, 実は先に述べた音速の音圧依存性 - 音速のパラメータ変化 - に密接に関連があるわけであって, 音圧の大きいときの音速 c が, 微小なときの音速 c_0 と異なっていることに起因するのである. これを式で表すと

$$c = c_0 + \Delta c, \quad \Delta c = \frac{\beta p}{\rho_0 c_0} \quad (1)$$

になる. ここで, ρ_0 は媒質の密度, p は音圧である. また, β は非線形係数といって体積弾性率の圧力依存項に関する媒質固有の値で, 例えば空気では 1.2, 水では 3.5, 動物の脂肪は 6.5 程度である. 2, 3 の例外を除いて, ほとんどの媒質は $\beta > 0$ であり, 音圧が正に大きい $p > 0$ では $c > c_0$, また逆に $p < 0$ では $c < c_0$ になる. よって, 背の高い人, 低い人が一列に並んで歩調を合わせて歩いているような場合に起こる, 追い付き衝突に似た現象が音波にも現われることになる (図 4 参照. ただし, この場合には横軸が距離で, 図 2, 3 での時間と異なっている点に注意されたい).

実は, 音波の瞬時音速が波面の位置によって異なるといっても, それほど大きく異なるものではない. 空中 120 dB の音圧では $\Delta c \approx 0.07 \text{ m/s}$ であって, $c_0 \approx 340 \text{ m/s}$ に比べて微々たる量である. また, 140 dB になっても

音速の変化量は 0.7 m/s であり, 大それた量ではない. このような微小な音速のパラメータ変化がなぜ衝撃波面をもつ波になるかは, 伝搬に伴う波形歪みの蓄積効果によるものである. 小さな歪みも「塵も積れば山となる」

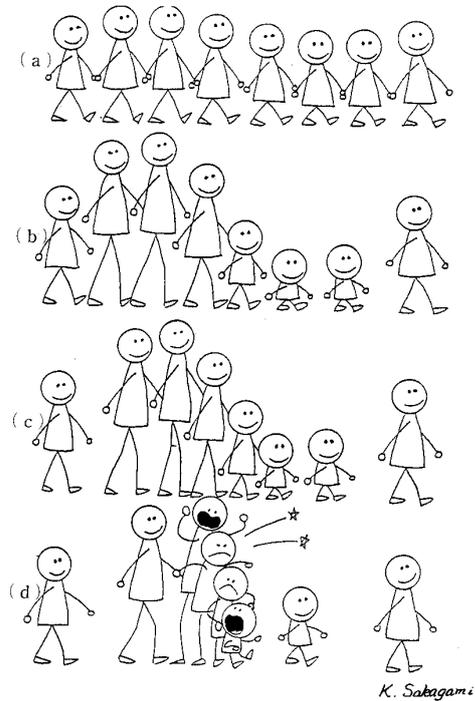


図 4: 「衝撃波」の発生. 微小振幅な音波の場合には波形歪み (歩調の乱れ) は目視できない (a). 振幅が大きくなると波形歪みが生じる (b)~(d).

がごとく、伝搬過程で蓄積的に増大して衝撃波へと移行するのである。また、同じ音圧であっても周波数が高くなれば位相の変化量は増すから、波形歪みは一層顕著になる。よって、可聴周波数帯域を越えた、通常 20 kHz 以上の超音波ではそれほど強い音でなくても、歪みが容易に発生することになる。このことは、図 4 において歩調のピッチを上げたとき、時間的に早く衝突が起こることからも類推できるであろう。

以上の説明で、音波の非線形現象、特に波形の歪みの発生原因について、曲りなりにも理解していただけたと思う。次に、このような現象を利用した代表格、パラメトリック音源について概説する。

音のスポットライト

舞台のある特定部分を特に明るく映し出すスポットライトは、光であるからこそでき演出法である。可視光線の波長はおおよそ 400 ~ 800 nm と短かく、この特長がなせる技である。一方、可聴音の波長は短くてもせいぜい 2 cm であり、光に比べれば随分長い。一般に、周波数が低く波長が長くなると、電波にしろ音波にしろ、回折効果によってビームは広がり、したがってビーム幅は伝搬とともに増す。このような波の拡がり効果によって、われわれは一度の話で多くの人達に情報を伝えることができる。しかし、ときとしてある特定の領域にいる人に音声や楽音を伝えたい、指向性の鋭いスピーカが必要な場合がある。例えば、各展示会場ごとに、指向性の鋭いスピーカがあれば、互いに他の音が騒音とならず快適に説明を聞くことができる。また、音によるナビゲーションとしても有用となろう。通常、スピーカの指向性は波長のみならずスピーカの口径の大きさにも依存し、口径を大きくすればするほどシャープとなる。音波の非線形現象を利用したパラメトリックスピー

カは、口径をそれほど大きくしなくてもビームを絞ることができる特色あるスピーカである。以下、この原理を説明しよう。

先に、音波の振幅を大きくすると媒質の非線形性によって伝搬とともに波形がひずみ、高調波が発生することを知った。このような音波を有限振幅音波というが、いま 2 つの周波数からなる有限振幅音波を同時に同方向に放射した場合を考えてみる。それぞれの周波数の高調波の他に、和の周波数成分、差の周波数成分、すなわち和音、差音などの結合音も同時に発生する。放射した有限振幅音波（これを 1 次波という）の 2 つの周波数を近接すれば、当然差音（高調波や和音をも含めて、差音を 2 次波という）の周波数は低くなる。こうして、発生した差音は 1 次波の伝搬とともに蓄積的にその振幅を増す。そして、1 次波が吸収や球面拡散によって減衰し、非線形効果が弱くなるまで差音の増幅効果は持続する。また、周波数が低いゆえに音波吸収が小さく差音のみが遠方まで伝搬しえる。ここでみた差音の発生は、テレビの八木アンテナにおける縦型アレイに類似しており、差音ビームは低周波にもかかわらず狭くなる。また、一般の指向性スピーカに付き物のサイドローブは小さい。このような特長をもつ差音の仮想的アレイ[†]は音波の非線形現象に由来しているが、これは取りも直さず音速のパラメータ変化に関連し、よってパラメトリックアレイ (parametric array) といっている [2]。また、パラメトリックアレイを音源として利用する場合にはパラメトリック音源という。

パラメトリック音源の実例を示そう。図 5 は水中通話として開発したパラメトリック音源を示したものである [3]。同図 (a) のように 11 mm 四方の超音波振動子を市松模様状に配置し、80 kHz と 88 kHz の 2 つの周波数で駆

[†]アンテナのアレイ素子というような実体がなく、差音の音源が 1 次波のビームに沿って仮想的に空間分布しているという意味から、仮想アレイ - バーチャルアレイ - という。

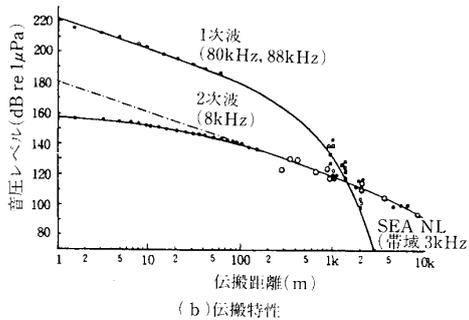
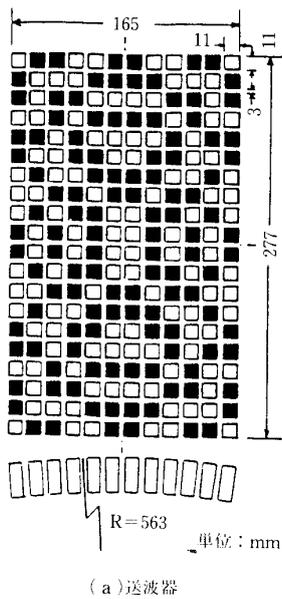


図 5: 水中通話として開発されたパラメトリック音源. 文献 [3] より引用.

動することで 8 kHz の差音を得ている。垂直方向の -3 dB 指向角は 3.5° で、仮りに 8 kHz の音波を同寸法の送波器で放射したときビーム角は 35° となり、これに比べるとかなり鋭くなっている。通話として利用するときには振幅変調単側波帯伝送方式 (SSB 方式) を採用している。図 (b) はその伝搬特性である。

図 6 は 7 kHz のパラメトリック音源を用いて、海底下の断層像をパルスエコー法で得たものである [4]。周波数の低い差音は、上図に示すように海面下およそ 25 m に存在する数十メートルの土砂層の厚みまで映し出している。一方、高い周波数の 1 次波では海底下に波は進行せず、下図のように海底表面のようすしか分からない。

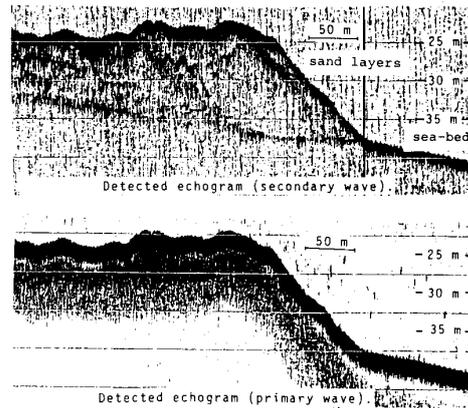


図 6: パラメトリック音源をサブボトムプロファイラとして利用したときの観測例. 文献 [4] より引用.

もともとパラメトリックアレイの実用化研究はソナーで代表されるように、水中音響分野でなされてきた。これは軍用などのニーズの問題ばかりではない。大きな振幅の有限振幅音波を放射するにはそれに十分答えるべく放射音源が必要であり、水中においては従来の超音波振動子そのまま利用できた点を見逃してはならない。これに比べると空中でのパラメトリックアレイはその存在が古くから認められていたにもかかわらず実用化への研究は随分遅れた。オーディオ・スポットライトの異名としてスピーカへの応用が考えられたのは、空中用超音波振動子の開発に負うところが大きく [5]、これは我が国であったことは大いに自負できるであろう。

パラメトリックアレイをスピーカとして利用するときには、1 次波の周波数を 20 kHz 以上の超音波領域にする。通常、40 kHz 近辺がよく用いられる。そして、大きな振幅の超音波を得るために、いくつもの空中用振動子をちょう密に平面上に並べ、音声や楽音で振幅変調された、振動子の共振周波数付近の 1 次波をもって放射する。なお、振幅変調であると無信号においても超音波がつねに放射されており、電力の不経済のみならず聴覚への超音波暴露が問題になる。そこで、今日では信

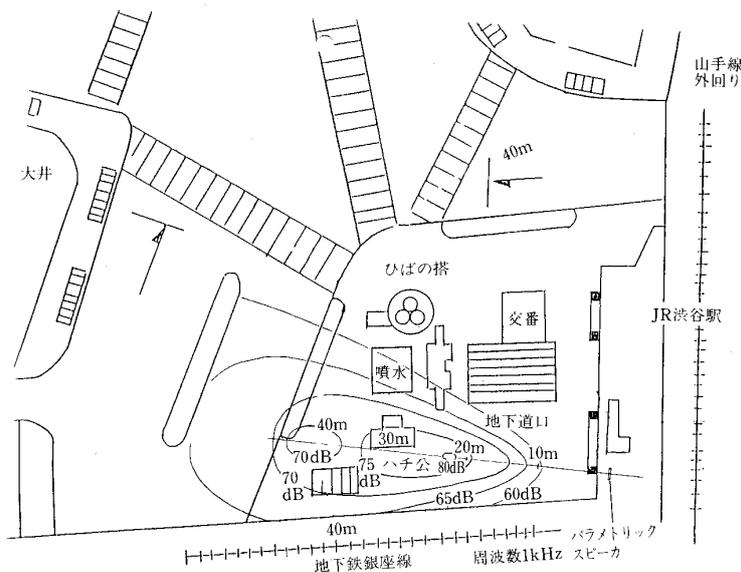


図 7: 東京渋谷駅に設置されたパラメトリックスピーカによる音場. コンターの数値は音圧レベル [dB] を示す. 松下電器産業 (株) 提供.

号の包絡をもって振幅変調する包絡変調方式が最適変調法と提案されている [6]. いずれにしても, 変調された 1 次波にはキャリアと信号の情報を含んだサイドバンドがあり, これらの非線形相互作用でサイドバンドが可聴周波数帯域に移動する. よって, 耳で聴くことができる. すなわち, 空気非線形性をもって変調波を自ら復調する, 自己復調 (self demodulation) 現象を利用していることになる. 以上がパラメトリックスピーカの原理である. 無論, パラメトリックアレイの特長が生きており, 復調した可聴音のビームは狭くなっている.

ここで, パラメトリックスピーカの 2, 3 の使用例を取り上げてみる. 図 7 は, 東京渋谷駅前に設けられたことのあるパラメトリックスピーカの音場を示す. ただし, 十分広いグラウンドで測定した音圧分布をそのまま地図上で重畳したもので, 実測値ではない. 地下道口や噴水といった地形の凹凸で音場は乱れる. しかし, 聴感上では略図 7 のような音圧分布が得られている. 従来のスピーカでは交番ま

で広がっていた音の拡散が弱められ, パラメトリックスピーカの特長がよくでている.

図 8 は視覚障害者用信号装置への適用を想定した小口径のパラメトリックスピーカの指向性ならび音圧分布図である [7]. 現用の信号装置の外寸を考慮してスピーカの直径は 11 cm の円形とし, 直径約 1 cm の振動子を 91 個使用している. 同図 (a) は, 距離 4 m における差音 3 kHz のビームパターンである. 振動子の駆動電圧を増すとビームは広がる傾向にあるものの, 細線で示した同径のピストン音源の指向性に比べてはるかに鋭い. また, 図 (b) はスピーカを地上 3 m に設置し, 1.6 m の高さに置いたマイクロホンで測った音圧分布図である. 幅が ± 1 m の範囲内ではスピーカから 4 ~ 15 m にわたって音圧の変動が 3 dB 以内となっている. 一方, (c) の図に示した現用装置では, 音軸から離れても音圧は高く, 図 (a) の指向性の拡がり特性が如実に現われている.

このように, 騒音にもなる音の不要な拡散を弱め, 横断歩道の幅員内に信号音を集中さ

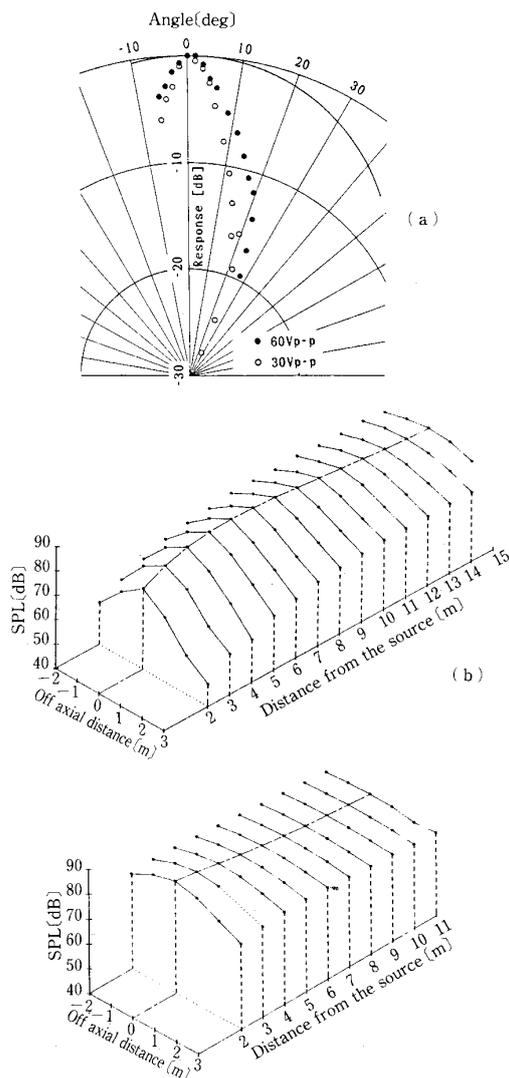


図 8: 小口径パラメトリックスピーカの音圧分布. 送波器の直径は 11 cm, キャリア周波数は 40 kHz, 差音周波数は 3 kHz. (a) はスピーカ指向性, (b) は音圧分布, (c) は視覚障害者用信号装置に用いられているスピーカの音圧分布. 文献 [7] より引用.

せるような音環境には, パラトリックスピーカはまさに打って付けである.

未来はバラか?

すばらしい效能をもった良薬も多かれ少なかれ副作用をもつものである. 一長一短というが如く, 世の中のほとんどのものは長所があればまた短所もある. パラメトリックアレ

イの長所は単に低周波でありながら指向性が鋭い, というのみではない. 1 次波の周波数を少し変えるだけで, 差音の周波数は大きく変化し, 広帯域化が可能なことである. すなわち, Q 値の大きな送波器を用いても, 差音に関する限り周波数特性の広い音源となっていることである. しかし, 短所もある. 1 次波から 2 次波, 特に差音への変換が悪く, 音響パワー効率に換算してせいぜい 1% 前後ということである. これはもともと煤質の非線形性が弱いことに大きく起因しており, 避けることのできない欠点といってよい. この効率の低さに目を瞑り, 長所に目を向けてパラメトリックアレイを都合よく利用するかどうかはわれわれの今後の大きな課題である.

最後に, この解説記事を書くに当たって多くの方々にお世話になった. 特に, 空中用超音波振動子の特性について松下電器産業 (株) の田中恒雄さん, 視覚障害者用信号装置への問題提起については名古屋電機工業 (株) の上田浩次さんから多くの情報をいただいた. ここで, お礼申し上げます.

参考文献

- [1] D. A. Webster and D. T. Blackstock, "Finite amplitude saturation of plane sound waves in air," *J. Acoust. Soc. Am.* **62**, 518-523(1977).
- [2] P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," *J. Acoust. Soc. Am.* **35**, 535-537(1963).
- [3] 兵藤孝義, "水中パラメトリック音源," *防衛技術* **3**, 22-35(1983).
- [4] 中村敏明, 池谷和夫, "パラメトリック音源による海底探査の基礎実験," *信学技報 US86-29*, (1986).
- [5] M. Yoneyama, J. Fuiimoto, Y. Kuwano, and S. Sasabe, "The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," *J. Acoust. Soc. Am.* **73**, 1532-1536(1983).
- [6] T. Kamakura, K. Aoki, and Y. Kumamoto, "Suitable modulation of the carrier ultrasound for a parametric loudspeaker," *ACUSTICA* **73**, 215-217 (1991), または, 浜田直明, 青木健一, "パラメトリックスピー

カの音響特性,” 電子通信学会技術研究報告
US88-14 (1988).

- [7] 青木健一, 浜田直明, 熊本芳朗, “小口径パラメ
トリック音源,” 音響学会議論集 (1989.3).