

連載企画—音響学の温故知新—

M 系列変調相関法の低周波音閾値実験への応用*

橘 秀 樹 (東京大学名誉教授)**

43.50.Qp; 43.66.Cb

本稿では、物理的な音の伝搬特性を測定するために考案された手法を全く内容が異なる心理実験に適用した例を紹介する。本誌の「温故知新」の編集意図に適っているかどうか自信はないが、ご一読いただければ幸いである。

暗騒音（外来騒音）の影響を低減しながら音の伝搬を測定する方法として、図-1(a) に示す音源信号と伝搬音の音圧信号の相互相関関数を直接計算する方法が古くから用いられている。しかし、この方法を屋外の測定に適用すると、風の乱れの影響などによってなかなかうまくいかない。そこで、図-1(b) に示すように伝搬特性を調べたい音源信号（キャリア信号）を周期が桁違いに長い M 系列信号で変調（ON/OFF）して放射し、伝搬音の音圧の 2 乗（包絡線）と変調信号の M 系列信号との相互相関関数を計算すると、音場の擾乱の影響は極めて少なくなり、また外乱ノイズの影響も低減しながら音源信号の伝搬強度を測定することができる。これは、屋外における騒音の伝搬特性を調べることを目的として、1968 年に青島、五十嵐によって考案された方法 [1] であり、原理的には M 系列信号の自己相関関数（左右対称の 3 角形）のエネルギーパルスの伝搬を調べることに相当する。そこで、筆者らは屋外における騒音の伝搬に対する気象の影響を長期にわたって調べる実験 [2] や、室内の残響時間を求めるためのエネルギーパルス応答の測定 [3]（図-2）などに利用した。

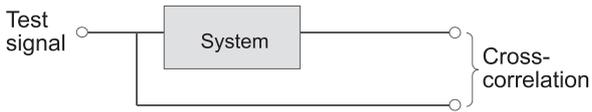
本稿では、このような物理的測定への応用とは全く違って、音の閾値の聴感実験にこの方法を利用した例を紹介する。

最近では自然エネルギー利用が盛んになり、その一つとして風力発電が注目されているが、風車の

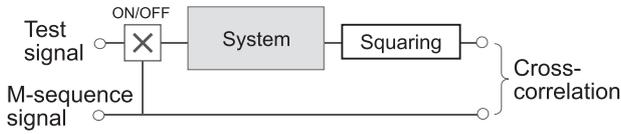
周辺地域では翼の回転によって生じる騒音が深刻な問題となっている。これはマスコミなどで“低周波音”問題として取り上げられ、新たな環境騒音問題となってきている。そこでこの問題を基本的立場から調べるために、環境省の環境研究総合推進費による「風力発電等による低周波音の人への影響に関する研究」と題する研究が 2010 年から 3 年間にわたって行われ、筆者がその研究代表者を務めた。この研究では、風車騒音の実態把握（実測調査）と近隣住民に対する社会反応調査の二つのテーマと並行して、実験室における聴感実験も実施した。その中で、風車騒音に含まれている超低周波音を含む低周波数成分が本当に聞こえる（感じる）のかどうかを調べるために、4 Hz まで再生できる実験装置を東京大学生産技術研究所の音響実験室内に作り、聴感実験を行った。この実験では、風車騒音の周波数成分をローパスフィルタの遮断周波数を段階的に下げていきながら被験者に可聴性を答えてもらうこととした。しかし予備実験を行ってみたところ、普段聞きなれない低周波数に限定された音が聞こえるかどうかを判断することは極めて難しいこと、またこの種の実験ではなるべく正反応を出したいという心理から、音が出ていなくても反応を示す被験者もいることが分かった。そこで、このような被験者のストレスをなるべく少なくし、率直に（気楽に）反応してもらうために、M 系列変調相関法の応用がアイデアとして浮かんだ [4]。すなわち、図-3 に示すように、試験音（風車騒音）を M 系列信号（この実験では、クロック周期 4 秒の 5 次の M 系列信号を 4 種類使用）で ON/OFF し、被験者には聞こえていると感じている間には反応スイッチを押し続け、聞こえていないと思ったらスイッチから手を離すという単純な方法で回答してもらうこととした。この反応を 2 値信号として、試験音を ON/OFF した M 系列信号との相互相関係数を計算すること

* An application of M-sequence modulation cross-correlation method to threshold test of low frequency sound.

** Hideki Tachibana (Professor Emeritus, The University of Tokyo)



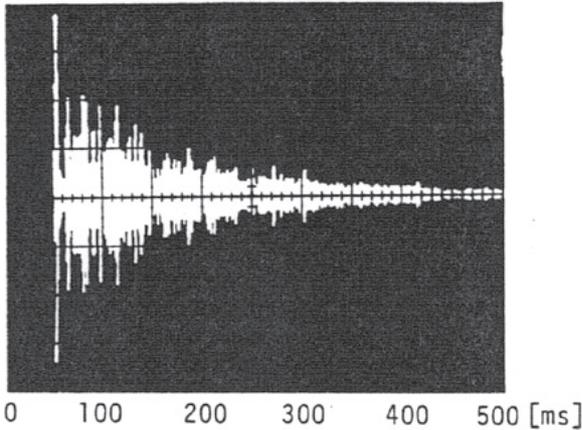
(a) Direct cross-correlation method



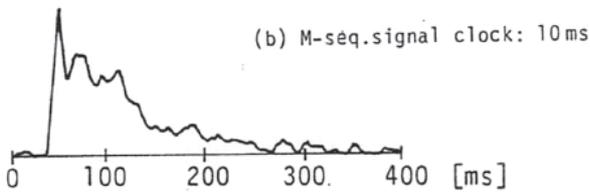
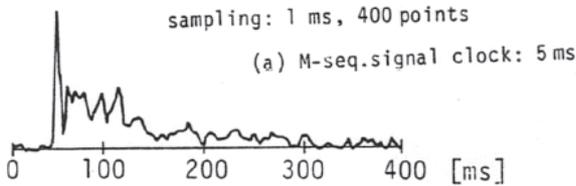
(b) M-sequence modulation cross-correlation method

図-1 相互相関法

(a) 直接法と (b) M 系列変調法



(a) インパルス音源を用いた直接法による結果



(b) M系列変調相関法による結果

図-2 室内のインパルス応答の測定例 [2]

によって、可聴性の程度を調べることにした。この方法によれば、被験者のストレスは著しく軽減され、また見込みで答えても必ずしも正反応にはならないということが分かった。実験の一例として、図-4 に示す実際の風車騒音 (録音) のスペクトルの高音域成分を順次カットしながら、可聴性を

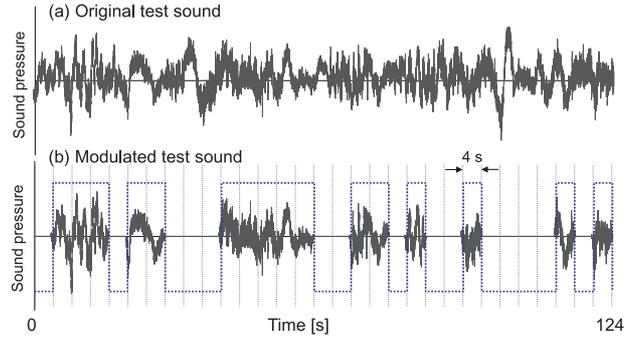


図-3 M 系列信号による試験音の ON/OFF

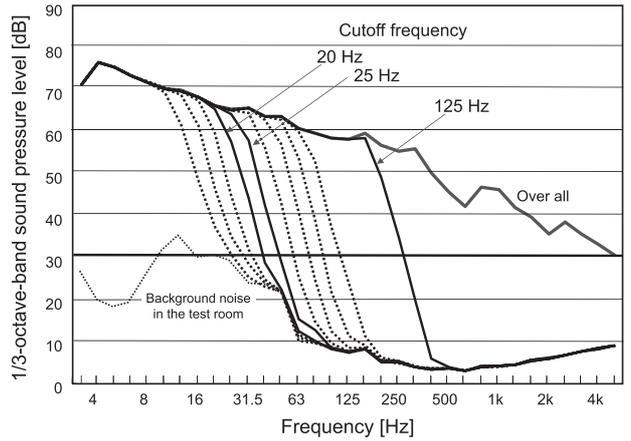
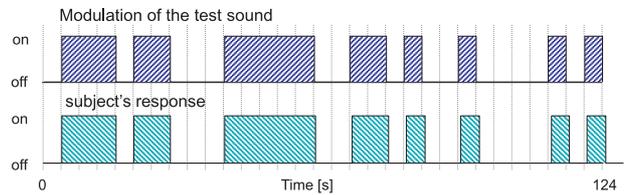
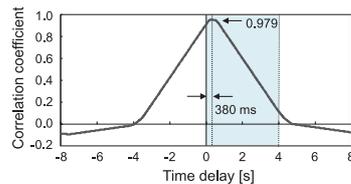


図-4 試験音

風車騒音の高音域成分を順次カット



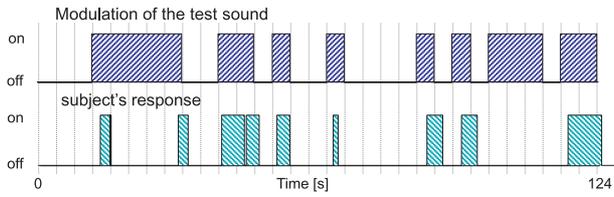
(a) on/off of the test sound and the subject's response



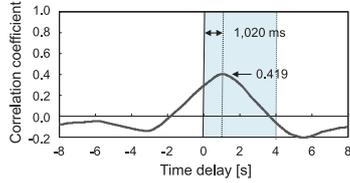
(b) Cross-correlation between the two binary signals shown in figure (a)

図-5 相互相関分析の結果-1
カットオフ周波数：125 Hz

調べた結果のうち、カットオフ周波数を 125 Hz、25 Hz 及び 20 Hz としたときの一人の被験者の反応 (ON/OFF) と M 系列信号との相関を計算した結果の例をそれぞれ図-5, 6, 7 に示す。この実験では、種々の検討の結果、相関係数 0.4 以上のときに可聴であると判断することとした。このような方法で 10 人の被験者を対象として実験した結果の一例を図-8 に示す (図中の $n/10$ は正反応

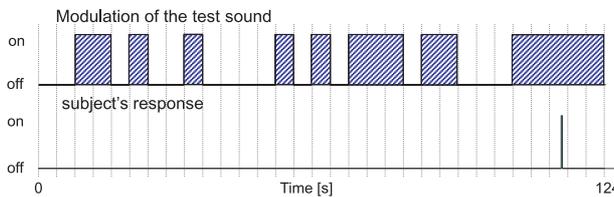


(a) on/off of the test sound and the subject's response

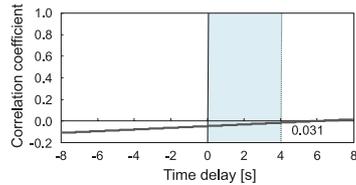


(b) Cross-correlation between the two binary signals shown in figure (a)

図-6 相互相関分析の結果-2
カットオフ周波数：25 Hz



(a) on/off of the test sound and the subject's response



(b) Cross-correlation between the two binary signals shown in figure (a)

図-7 相互相関分析の結果-3
カットオフ周波数：20 Hz

の割合)。多数の点で録音した風車騒音を対象とし

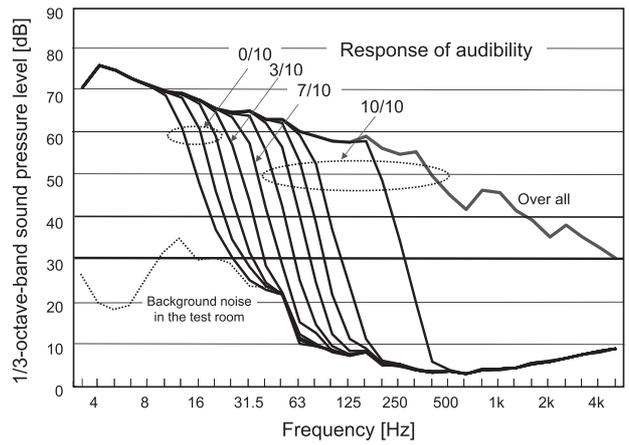


図-8 可聴性の実験結果
聞こえる/感じると答えた回答の割合

てこのような実験を行った結果、通常の風車騒音に含まれている程度の音圧であれば、超低周波音成分はほとんど非可聴（聞こえない/感じない）であることが確認された。

文 献

[1] 青島伸治, 五十嵐寿一, “M 系列の相関を用いた音響測定,” 音響学会誌, 24, 197-206 (1968).
 [2] 吉久光一, 橘 秀樹, 石井聖光, “屋外における騒音の伝搬性状 (長期定点観測によるフィールド実験結果),” 音講論集, pp. 329-330 (1975.6).
 [3] 矢野博夫, 吉久光一, 橘 秀樹, “M 系列変調相関法による建築音響測定,” 建築学会環境工学論文集, 4, 40-45 (1983).
 [4] S. Yokoyama, S. Sakamoto and H. Tachibana, “Perception of low frequency components in wind turbine noise,” *Noise Control Eng. J.*, 62, 295-305 (2014).