改良近距離音響ホログラフィ法の開発
(機構部品を用いた実証実験)長松 昌男^{*1}Development of converted nearfield acoustic holography method
(The verification by experiments using mechanical elements)Masao NAGAMATSU^{*1}^{*1} Hokkaido University of Science

15-4-1 Maeda-7-jo, Teine-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 006-8585, Japan

Received 24 October 2014

Abstract

There are several types of sound localization methods. However, the almost methods are used for sound localization of middle frequency noise around 1kHz. In high frequency, the measurement of sound field needs huge load. Therefore the measurement of high frequency noise by sound localization methods is unrealistic. We are currently developing the Converted Nearfield Acoustic Holography method, which is converted method of conventional Nearfield Acoustic Holography method. This method can localize the high frequency noise source with few quantity of datum. Therefore the load in measurement is quite light. In this paper, the noise of a gear set and a linear slider are measured as examples of application of the Converted Nearfield Acoustic Holography method to the actual industrial elements. As a result, since this method has some deterioration of resolution in the reconstructed image, this method can localize high frequency noise source with quite quick measurement.

Key words : Sound and acoustics, Servo mechanism, Measurement, Acoustic holography, High frequency sound

1. 序 論

近年、機械製品に対する静音化への要求は、ますます厳しくなっている。機械製品の静音化を行おうとする場合にはその設計段階において、数値解析により製品の振動を予測し、対策することもできる。しかし、実際の機械製品の開発において、設計段階での解析により、機械製品の振動を完全に予測することは不可能である。このために製品の試作品等の段階において、騒音の発生部位を特定し、その部位に対して騒音対策を行っていく必要がある。このときに用いられるものが音源探手法である。

現在、いくつかの音源探手法が研究・実用化されているが、そのほとんどは使用可能な周波数帯域が 1kHz 付近の中周波数帯域に限られている。本研究で対象とする 5kHz を超えるような高周波数帯域においては、空間的なサンプリング間隔を小さく取らなければならず、空間中におけるサンプリング点数が膨大な数となり、計測を行うことが実質的には難しいのが現実である。マイクロホンアレーを用いる計測方法では、非常に多数のマイクロホンを用意しなければならず、実質的に計測は不可能である。またマイクロホンを逐次移動させるスキャニング法では計測は可能ではあるが、計測すべき位置の多さより非常に時間がかかる。

筆者らはこれらの音源探手法の一つであり、最も精度が良いとされている近距離音響ホログラフィ法 (Maynard, et al., 1985)(Williams, 1999)を改良した、改良近距離音響ホログラフィ法を開発している(Nagamatsu, 2003, 2006, 2007)。この手法は主に高周波音波の音源探査を目的としたものであり、元の手法と比較して精度は落ちるものの、空間中の少ない点の情報により、音源位置を推定可能とするものである。

前報では、この手法の理論と小口径スピーカーを用いた基礎的な実験について報告した。本論文では、この改良近距離音響ホログラフィ法の実験を、簡単な機構部品である歯車実験装置とリニアスライダに対して行い、高周波の音源同定を行うことにより、提案している手法が実際の機械構造物に適用可能かを検証している。

2. 改良近距離音響ホログラフィ法の概要

改良近距離音響ホログラフィ法（改良 NAH 法）は、その名の通り音源探査手法の一つである近距離音響ホログラフィ法（NAH 法）を改良したものである。近距離音響ホログラフィ法の計測は図 1 に示すように、音源よりある距離（計測距離）離れた位置に計測面と呼ばれる平面を設定し、この平面上の音圧分布を計測するものである。平面上の音圧分布を連続的に計測することは不可能であるので、実際には計測面上に格子状に計測する点（計測点）を設定し、この点の音圧分布を計測する。この計測点の間隔が、高周波音波の計測では問題となってくる。通常、近距離音響ホログラフィ法においては、計測点の間隔は、対象とする音波の半波長以下でなければならないと言われている。これは、平面と同じ方向に音波が進行した場合、これを空間軸でフーリエ変換できなければならないという考え方に、サンプリングの定理を適用したことより来る。音波の周波数が人間の聴覚が敏感な 1kHz 付近である場合、音波の半波長は約 17cm 程度であり、特に問題とはならない。しかし 10kHz の音波を計測しようとした場合、半波長は 1.7cm 程度となり、計測点をこの長さ以下の間隔で配置しなければならない。このために、計測点の数が膨大なものとなり、実用上問題が起きてくる。マイクロホンアレーにより計測を行おうとすると、マイクロホンの数が膨大なものとなり、実質的に実現不可能となってしまう。またスキャニング法により計測を行おうとしても、計測する位置が膨大であるため、非常に長い時間が必要である。

Fig.1 This figure shows the overview of measurement of holography.

提案している手法は、計測点間隔を大きく取り、計測点数を大幅に少なくした計測による計測結果より、音源位置の同定をしようとするものである。この手法では、計測点数を大幅に少なくした結果、位置同定精度は落ちるものの、スキャニング法による計測時間を大幅に減少させることができる。また従来の手法では不可能であったマイクロホンアレーの高周波音源への適用の可能性も生じてくる。

改良近距離音響ホログラフィ法の解析（再生計算）手順は、近距離音響ホログラフィ法の再生計算手順とほぼ同じである。ただし改良近距離音響ホログラフィ法では空間フーリエ変換する際に、余分な空間周波数を使用する。

改良近距離音響ホログラフィ法ではまず、近距離音響ホログラフィ法と同じように、計測された音圧データを時間領域でフーリエ変換して求められる複素音圧を、計測平面上で空間軸の離散二次元フーリエ変換を行う。

$$\hat{p}(k_x, k_y) = \frac{d^2}{2\pi} \sum_{x,y} p(x, y) e^{-i(xk_x + yk_y)} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{p}$ は求める空間周波数スペクトル、 p は計測された複素音圧、 x, y は計測面上の横、縦方向の座標、 k_x, k_y は、 x 方向、 y 方向の空間周波数、 d は計測点の間隔である。ここで求めるスペクトルの空間周波数は、以下のようになる。

$$k_x = \frac{2\pi}{dm} b \quad (2)$$

$$k_y = \frac{2\pi}{dm} c \quad (3)$$

ここで、 m は各軸方向の計測点の数、 b, c は次に示すような整数である。

通常フーリエ変換においては、エリアジングの影響を無視したとしても、得られるスペクトルの数は、サンプリングしたデータの数と同じ数が上限となる。したがって、近距離音響ホログラフィ法での式(2)、(3)中の整数 b, c は以下の通りとなる。

$$b, c = -\frac{m-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{m-1}{2} \quad (4)$$

改良近距離音響ホログラフィ法においては、この空間周波数を上下に n 本追加して以下のように拡張して使用している。

$$b, c = -\frac{m-1}{2} - n, \dots, 0, \dots, \frac{m-1}{2} + n \quad (5)$$

改良近距離音響ホログラフィ法では、従来の近距離音響ホログラフィ法と比較して、計測時の計測点数を少なく取る。計測点数が少ないと、従来の方法では空間スペクトルの数もそれに従って少なくなる。しかし、上記のように空間周波数を計算時に擬似的に拡張することにより、再生計算を可能にするものである。この時に使用される x, y 各方向の、上下に n 本追加した後の、総スペクトル数は、前記の空間方向でのサンプリングの定理を満たし、かつなるべく少ないスペクトル数と同じになるようにする。つまり、通常の音響ホログラフィにおいて、サンプリングの定理を守った場合の各方向の計測点数と同じにする。本手法では、空間方向で計測点間の補間を行う代わりに、空間フーリエ変換時の空間スペクトルの数を高周波数方向へ意図的に増やすことで、空間方向の補間を実質的に行っている。

フーリエ変換の原理により、高周波の波形を低周波にてサンプリングすると、高周波の情報は低周波のスペクトルに含まれることとなる。また、近距離音響ホログラフィ法においては、すべての解析の前に時間領域でフーリエ変換を行い、特定の周波数ごとに解析を行う。このために空間方向の主たる周波数帯は、近距離で計測し、解析している音波の周波数が決まっているために、音波の波長より自ずと決まってくる。この性質を利用して、本来は低周波として計算された空間周波数を高周波としても扱うことにより、擬似的に高周波の計算結果を得ようとするものである。つまり、空間領域で高周波と低周波の情報を一緒に低周波として計測し、それを計算上で強引に高周波と低周波として逆変換している。ただしこの方法では、低周波の逆変換結果に高周波の情報が、高周波の逆変換結果に低周波の情報が入ってくるので、これが解析結果の画像の精度の劣化の原因と成っている。しかし、先に述べたとおり、空間領域での主たる周波数は、解析音波の周波数によりほぼ決まっており、これを適切な周波数帯において逆変換することにより音源を特定することができる画像が得られる(Nagamatsu, 2003)。

式(5)のようにして求めた空間スペクトルを、従来の近距離音響ホログラフィ法と同じように以下の式に代入して、音源があると予想される再生面上の再生音圧分布 r を求める。

$$r(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k_x, k_y} \hat{p}(k_x, k_y) G(k_x, k_y, z) e^{i(xk_x + yk_y)} \quad (6)$$

この式のうち、 z は計測距離であり、また G は半自由空間のグリーン関数であり、以下のような式である。

$$G(k_x, k_y, z) = e^{iz\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \quad (7)$$

従来の方法と同じように、求めた再生音圧の分布を可視化して画像化したものより、音源位置を同定する。

提案している方法は計測点を少なくして、計測時のデータ量、計測時間の低減を実現している代わりに、擬似的に空間スペクトルを作成しているので、どうしても精度が劣化してしまうという欠点がある。

3. 歯車実験装置の騒音計測実験

本報ではまず、騒音源が比較的容易に想定でき、また実用に近い条件の機械として、スピードコントロールモーター（オリエンタルモーター製 M540-001）付きのギアを用い、改良近距離音響ホログラフィ法の実験を行った。以下の図2に計測対象のギアの写真を示す。

Fig.2 The mechanical gears which is used for experiments.

この装置は右上にあるモーターにより駆動され、1組の歯車が回転している。この装置の回転数の設定可能範囲は300rpm～1200rpmである。

計測はマイクロホントラバース装置を用いたスキニング方式で行った。この方法は図3にあるように、スキャンマイクロホンとリファレンスマイクロホンの2本のコンデンサマイクロホンを用いて、計測を行うものである。リファレンスマイクロホンを固定位置に設置し、スキャンマイクロホンを計測面上で移動させ、各計測点位置において順次計測を行っていくものである。実際に使用した計測装置の写真を図4に示す。実験は図4に見られるとおり簡易無響室環境にて行われた。またマイクロホンはリオン(株)製の1/2インチマイクロホンを使用した。

Fig.3 The explanation of measurement system.

Fig.4 This is the photo of measurement equipments.

まず、計測対象に対し、回転数 300rpm, 600rpm, 900rpm での前方約 1m における音圧を計測した。この結果を以下の図 5 に示す。

Fig.5 The Sound Pressure spectrum of the Mechanism.

この結果を見ると、いずれの回転数においても周波数 14kHz 付近にピークがあることがわかった。この結果、このピークに相当する周波数において、騒音源探索の実験を行った。以下の図 6 に、NAH 法、および改良 NAH 法の計測実験の様子を示す。防振ゴムシートと吸音材を計測対象の下に敷くことにより、台への振動の伝播を防いでいる。

Fig.6 The overview of measurements.

以下に、回転数 300rpm における騒音の、13940Hz における解析結果を示す。本論中の解析結果の表示は、各解析結果の図中の最高レベルを基準として、赤色が最高レベル、以下 5dB おきに黄色、緑色、青色との色分けになっている。以下の表 1 にこの実験の実験条件を、図 7 に NAH 法、改良 NAH 法による実験結果の比較を示す。なお両者の実験において、計測点数は x , y 各方向で約 10 倍、全体では約 100 倍異なっている。このために計測時間は従来の NAH 法では約 4 時間 20 分、改良 NAH 法では約 10 分であり、改良法では飛躍的に短縮されていることがわかる。

Table 1 Experimental conditions.

Analyzing method	NAH	Converted NAH
Motor speed [rpm]	300	
Measurement Distance [m]	0.55	
Size of the measurement plane [m]	[X] 1m X [Y] 1m	
Number of measurement points	[X] 101 X [Y] 101	[X] 11 X [Y] 11
Measurement Time	4h. 20min.	10min.

Fig.7 These figure are the experimental results at 13940Hz, 300rpm.

この実験結果より、改良 NAH 法による結果は、従来の NAH 法の結果と比較して、音源位置の同定結果がぼやけてはいるものの、ほぼ同位置を示しており、正確な同定を行っているものと思われる。図 7 より読み取れる音源位置は、上側の軸における右側軸受付近であり、実際の騒音源としても十分納得できるものである。

4. リニアスライダの騒音計測実験

次に、実用的な機構部品の一例として、リニアスライダに対する騒音計測実験を行った。対象としたリニアスライダは、オリエンタルモーター社製の EDR36P-K である。写真を図 8 に示す。なお計測装置は、前章の物と同じ物を使用した。

Fig.8 The photo of linear slider.

このリニアスライダは、全長約 95cm であり、写真左側にあるステッピングモーターにより駆動され、筐体内部にあるボールねじによりスライダヘッドが横方向に動作するような構造になっている。本研究では、スライダヘッドが写真左側端より右側へ移動を始めた瞬間の音を計測した。

計測面はリニアスライダより 8cm の位置に設定し、大きさは 1m×1m とした。計測は従来の近距離音響ホログラフィ法と、提案する改良近距離音響ホログラフィ法の 2 通りを行った。従来の方法では計測点を 1cm 間隔に設定した。このため計測点数は約 1 万点となった。提案法では計測点を 10cm 間隔で設定した。このため計測点数は大幅に少ない 121 点であった。計測時間は従来法では 16 時間であったのと比較し、提案手法では 12 分であった。ここでは代表的な 3 つの周波数での解析結果を示す。

図 9 は 11669Hz における解析結果である。図 9 (a) に示す従来の手法による結果では、音源が画像左端にあるステッピングモーターにあることがはっきりとわかる。しかしこの結果を得るための計測時間として約 16 時間を要している。一方、図 9 (b) に示す提案している方法による結果でも、右側ステッピングモーター付近に音源が存在

することがわかる. 図 9 (b) の結果は図 9 (a) の結果と比較して精度は劣るものの, 計測時間は 12 分である. この実験結果の場合は, 図 9 (b) の結果だけでも十分騒音の原因を特定することはできるが, さらに必要ならば, 提案手法の結果を見た後に範囲を狭めて, 図 9 (a) の従来法の実験を行い, 計測時間を全体として短縮するなどの手順も考えられる.

Fig.9 The experimental results at 11669Hz.

図 10 の結果は周波数 14990Hz における解析結果である. 図 10 (a) の従来法による結果によると, 左側のステッピングモーターのあたりから音が出ているのがわかる. 図 10 (b) の提案法による結果でも同じ位置に強い反応が存在する. 図 10 (b) においては右側においても強い反応が見られるが, 図 10 (a) においてもスライダ右側に若干強い音源が見られ, この音源に対しての反応であることがわかる. このために図 10 (b) の結果は, 精度は悪いものの, 音源位置を的確に示していると言える.

Fig.10 The experimental results at 14990Hz.

図 11 の結果は 16992Hz における解析結果である. 図 11 (a) に示す従来法による結果は, 左端のステッピングモーターより強い音は出ていることを示している. またこの図をよく見ると, その他スライダ筐体上のいくつかの位置にも音源が見える. これに対し, 図 11 (b) の提案法の結果では, ステッピングモーターの音源がやや右上方にずれている. また筐体全体にわたりぼけたような表示になっている. これは, 解析周波数があまりにも高く, 無理にスペクトル数を増やしすぎたため, 解析精度が劣化し, 筐体上の細かい音源を個別に表示できずに, 全体として表示するような状態になっているためと思われる. この結果より即時に音源位置を正確に同定することは難しいと思われるが, 音源のだいたいの分布をつかむには十分であると思われる.

Fig.11 The experimental results at 16992Hz.

以上の結果より、提案する手法は、10kHz 付近では良好な解析結果が得られるが、15kHz を超えるような超高周波数帯において複雑な音源の計測を行うと、同定精度が落ちることがわかった。

5. 結 言

本論文では提案する改良近距離音響ホログラフィ法を、実用的な機械部品の一例である歯車実験装置およびリニアスライダに対して用い、その同定精度の検証を行った。この結果、同定精度は落ちるものの、音源の位置をほぼ明らかにすることができることがわかった。ただし、15kHz を超えるような音源に対しては、その同定精度が劣化することも明らかになった。

高周波音波の計測では、通常の近距離音響ホログラフィ法では計測面上の計測点を極めて細かく設定しなければならず、スキャンング法で計測しようとする計測時間が極めて長くなる。本実験においては計測点数約 1 万点、計測時間で約 4～16 時間かかった。この時間は実用を考えると現実的な時間ではなく、また試作品などの計測においては製品の故障、破壊などの危険も伴う。またマイクロホンアレーにより計測を行おうとすると 1 万チャンネルのマイクロホンアレーを用意しなければならず、ほぼ不可能である。

提案する手法では精度は劣るものの、計測点数は大幅に少なくて済む。本実験では計測点数 121 点、計測時間約 10～12 分であった。この計測時間ならば、試作品等に対する騒音計測として十分実用可能な範囲であると思われる。また計測点数からしても、マイクロホンアレーによる計測も可能となってくるものと思われる。

References

- Maynard, J.D. Williams, E.G. and Lee, Y., Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH, The Journal of the Acoustical Society of America Vol.78 (1985), pp.1395-1413.
- Nagamatsu, M., A theoretical argument of NAH method with extra k-domain spectrums, Internoise 2003, Abstract Book (2003), p.129.
- Nagamatsu, M., Experimental results of converted NAH method, JSME international Journal, Series C, Vol.49. No.3 (2006), pp.670-674.
- Nagamatsu, M., Experimental results of converted NAH to plane sound wave, The Second International Symposium on Advanced Technology of Vibration and Sound (2007), pp.52-55.
- Williams, E.G., Fourier acoustics – Sound radiation and nearfield acoustical holography, Academic Press (1999).