

機械構造物における高周波騒音源の同定： 改良近距離音響ホログラフィ法の適用

曾我, 明央 / SOGA, Akihisa

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010366>

機械構造物における高周波騒音源の同定 —改良近距離音響ホログラフィ法の適用—

HIGH FREQUENCY NOISE SOURCE IDENTIFICATION OF MACHINE STRUCTURE
-APPLICATIONS OF CNVERTED NEARFIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY-

曾我明央

Akihisa SOGA

指導教員 御法川学

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

There are several types of sound localization methods of which the holographic methods are mainly used for middle frequency sound localization because of its high resolution. While, these methods have a demerit taking long time to measure sound field when applied for the high frequency sound localization. This problem is caused by the sampling law in the spatial domain. We have developed new holographic method converted Nearfield Acoustic Holography method which can quickly measure the high frequency noise. In this paper, as examples, the experiments for a speaker and gears with speed control motor are explained. As a result, it is found that the reconstructed images themselves are not sharp, but nearly indicate the noise source location.

Key Words : Sound localization methods, Neafield acoustic holography

1. 緒論

現在、騒音問題は、機械設計にあたって重要な評価対象の一つになっている。この騒音問題の解決の過程で使用される技術の一つが、騒音源位置を同定するための騒音源探査手法である。

騒音源探査手法の研究はまだ歴史が浅く、初めに提案された手法は音響インテンシティ法であった。これは現在では一般的に普及し、各地の研究所、メーカー等で用いられている。また、最近ではビームフォーミング法(マイクロホンアレー)と呼ばれる遠距離音場で測定する手法も開発され普及している。この手法はマイクロホンを多く使用するため装置が高価である。これらいずれの方法も、人間が敏感に感じる中低周波数の解析には優れているが、高周波数の騒音源位置同定にはいくつかの問題を抱えている。

一方、最も精度の良い手法として、近距離音響ホログラフィ法という近距離音場で測定する方法がある。これは今までの方法とは違い、近距離場で計測・再生されるため、騒音の発生源近くでのみ測定できるエバネッセント波を測定できる。そのため、より騒音源位置の同定精度を上げることができる。ただこの方法も現在のところ、人間に最も敏感な 1kHz 付近の中周波数領域で用いられている。

これに対し人間の聴覚は 10kHz 以上まで聞き分けることが可能であり、近年高周波騒音も問題となってきた

る。高周波騒音の計測は、近距離音響ホログラフィ法では測定する空間上の点を多く取れば計測が可能である。しかし、測定する点を多くすれば当然、測定時間は膨大になる。このことは、機械製品の開発過程で用いる場合には、非常に大きな問題となってくる。

当研究室では、高周波音波の測定において、測定する空間上の点の数を減らすことにより計測時間を短縮した改良近距離音響ホログラフィ法を提案した。この方法は、同定精度の若干の低下と引き替えに、短時間での計測が可能にするものである。この手法により、長時間の騒音計測が極めて難しい、開発途上の機械製品などの高周波騒音計測が可能となる。

本研究では、その改良近距離音響ホログラフィ法を用いて、さまざまな機械を対象に無響室で実験を行い、精度を従来法と比較しその実用性を検証した。

2. 従来の近距離音響ホログラフィ法と改良近距離音響ホログラフィ法

従来の近距離音響ホログラフィ法では、各測定点で計測した音圧をフーリエ変換して複素音圧を求め、その複素音圧に対して 2 次元空間フーリエ変換した後に波数領域で逆伝播を計算している。空間軸上でフーリエ変換をするために、音場内にある計測面上の計測点の間隔はサンプリングの法則に従わなければならない。つまり、計測点の間隔を計測したい周波数の半波長以下にしなければ

ばならない。これは、計測しようとする周波数が低周波の場合には問題がないが、対象とする音波の周波数が高い場合には考慮する必要がある。たとえば、計測しようとする周波数が 1kHz の場合、空気中での音波の半波長は約 17cm になり、それ以下の間隔で測定すればよいが、周波数が 10kHz になると、音波の半波長は約 1.7cm であり、これ以下の間隔で測定する必要がある。そのため高周波領域では計測に長い時間がかかり、実用化されない原因の一つになっていた。一方、本研究の改良近距離音響ホログラフィは、測定点数を減らすかわりに、2次元空間フーリエ変換を行う際に空間周波数を擬似的に増やすことにより測定点数の少なさを補っている。

近距離音響ホログラフィ法ではまず、各測定点で測定した音圧を時間領域でフーリエ変換し、周波数ごとの複素音圧を求める。次に各測定点における解析したい周波数の複素音圧 $p(x, y)$ に対し式 (1) のように空間 2 次元フーリエ変換を行い、波数領域のスペクトル $\hat{p}(k_x, k_y)$ を求める。

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

式(1)における d は計測点間隔、 k_x, k_y は、それぞれ x, y 方向における空間周波数を表しており、式(2), (3)のように定義する。

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

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

上の式において m は x, y における計測点数、つまり空間上でのサンプリング点数である。 b, c は整数であり、従来の近距離音響ホログラフィ法では以下のように定義される。

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

このように従来の近距離音響ホログラフィ法では、フーリエ変換の法則に従って、計測した空間上のデータ点数と同じだけの空間周波数を用いていた。一方、改良近距離音響ホログラフィ法では以下のように空間周波数を余分に算出している。

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

式(5)のように式(4)の式に上下それぞれ n 本余分な空間スペクトルを加えている。この n は整数であり、全体の

空間スペクトル本数が本来必要なスペクトル数と同じになるように調整して使用する。そして、この空間スペクトルに対して以下のように逆伝播の計算と 2 次元空間フーリエ逆変換を行い、再生値を求める。

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

式(6)の G は半自由空間でのグリーン関数であり、式(7)のように定義される。

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

改良近距離音響ホログラフィ法では余分な空間スペクトルを含めた上で同様の計算を行う。

3. スピーカー実験

実験には図 1 に示すマイクロホントラバース装置を用いた。これに 2 本のマイクロホンを用いることで、1 本はトラバース装置により、音源から一定距離離れた 2 次元平面(測定面)で横方向(x 軸方向)、縦方向(y 軸方向)に移動し、計測面上の音波の計測を行う。もう 1 本は位相情報を採取するため、音源から離れた固定位置で測定するよう設定した。



Fig. 1 Microphone traverse device

まず、改良近距離音響ホログラフィ法の基本性能を検証するために、単音源のスピーカーを対象に実験を行った。図 2 に使用したスピーカー、図 3 に実験の様子を示す。実験には当研究室の無響室を使用し、音の伝搬を防ぐために、スピーカーを設置した台には吸音材を敷いた。図 3 のようにスキャンマイクロホンをスピーカー近くに設置し、リファレンスマイクロホンは音源より距離を離れた固定位置に設置した。



Fig. 2 Object of this research

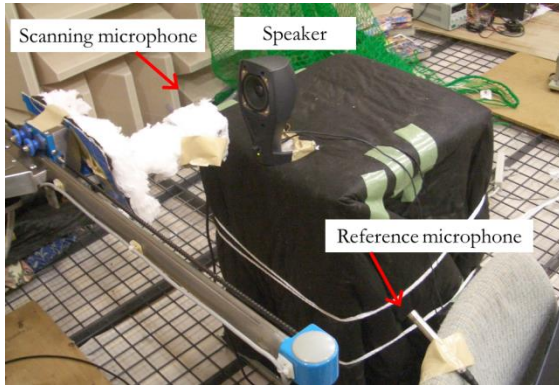


Fig. 3 Overview of experiments

Table 1 Experimental condition

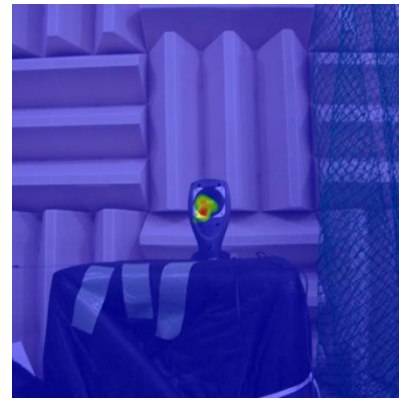
Analysis method	Conventional NAH	
Sampling frequency (kHz)	100	
Measurement distance (m)	0.05	
Size of Measurement Plane (m)	(X)1.00	(Y)1.00
Number of Measurement Points	(X)101	(Y)101
Measurement Pitch (m)	0.01	

Table 2 Experimental condition

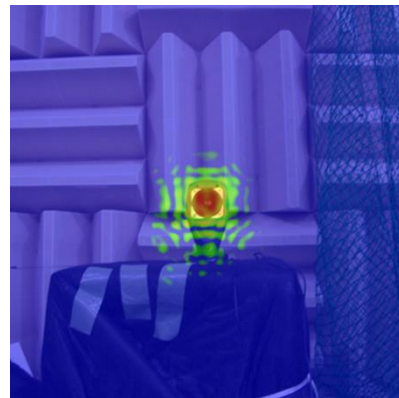
Analysis method	Proposed NAH	
Sampling frequency (kHz)	100	
Measurement distance (m)	0.05	
Size of Measurement Plane (m)	(X)1.00	(Y)1.00
Number of Measurement Points	(X)11	(Y)11
Measurement Pitch (m)	0.10	

表 1, 表 2 は本実験の実験条件である. この実験条件でそれぞれ 10kHz, 12.5kHz, 15kHz の音波をスピーカーより発して音源同定精度と測定時間の比較を行った. 図 4, 図 5, 図 6 はその結果である. 結果を示す図中では, 色が青→緑→黄→赤の順に測定面内で相対的に音圧が高いことになる.

測定時間は, 従来の近距離音響ホログラフィ法では 4 時間 20 分かかったのに対して, 改良近距離音響ホログラフィ法ではわずか 10 分であった.

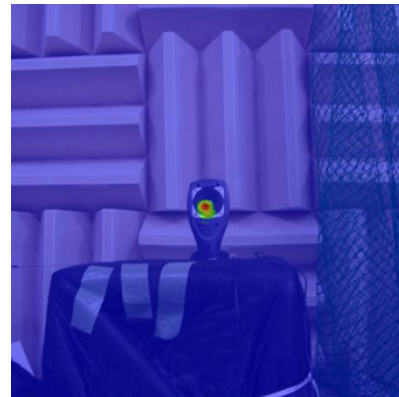


(a)By conventional NAH method

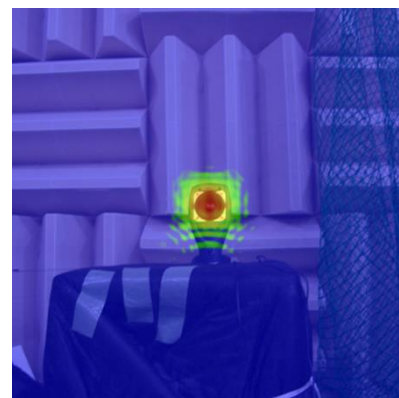


(b)By our proposed method

Fig. 4 Experimental results at 10 kHz

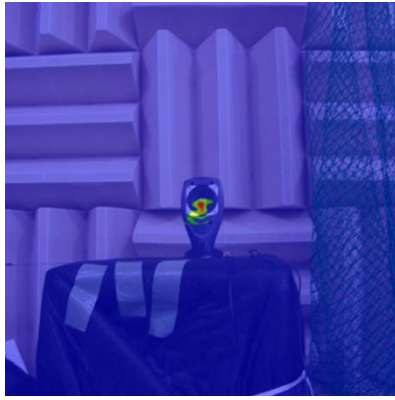


(a)By conventional NAH method



(b)By our proposed NAH method

Fig. 5 Experimental results at 12.5 kHz



(a)By conventional NAH method



(b)By our proposed method

Fig. 6 Experimental results at 15 kHz

以上の実験の結果、近距離音響ホログラフィ法も改良近距離音響ホログラフィ法もスピーカーの音源を特定できている。このことから、圧倒的短時間で、高周波の音源同定ができることが分かった。

4. スピードコントロールモータ付ギア実験

次に実用機械に対しても改良近距離音響ホログラフィ法が適用できるかどうか、スピードコントロールモータ付ギアに対して検証を行った。図 7 に実験対象を示す。このギアは回転数を 300rpm~1200rpm まで設定可能である。

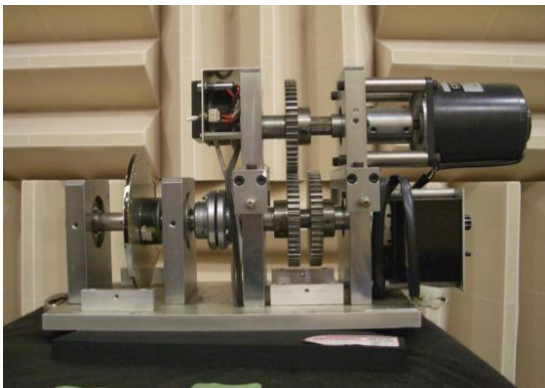


Fig. 7 Object of this research

(1) 周波数分析

回転数による周波数成分の変化を知るために 300rpm, 600rpm, 900rpm と回転数を設定し騒音解析を行った。なお、今回の研究テーマに基づくために実験結果は高周波帯域を表示している。図 8 に各回転数の周波数分析の比較結果を示す。

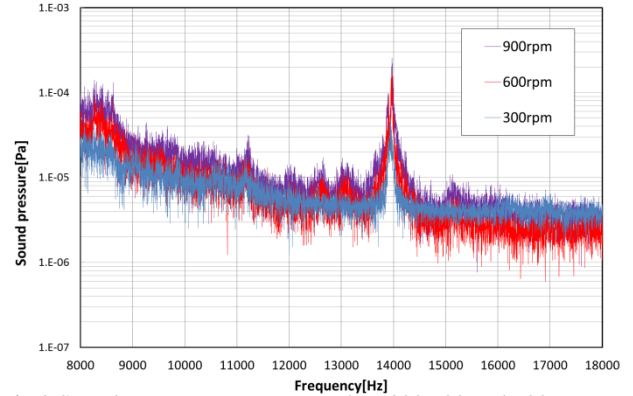


Fig.8 Sound pressure spectrum graph at 300,600 and 900rpm

横軸が周波数(8k~18kHz), 縦軸が音圧(Pa)である。このグラフから、どの回転数の時も 8.5kHz 及び 14kHz 手前付近に音圧のピークがみられることが分かる。

(2) 騒音源探査

周波数分析で得た結果から、特に音圧が高かった周波数を対象に騒音源探査を行った。図 9 に実験風景を、表 3, 表 4 に実験条件を示す。実験は無響室で行い、防振ゴムシートと吸音材を重ねて使用することで、測定対象を設置する台への振動の伝搬を防いだ。

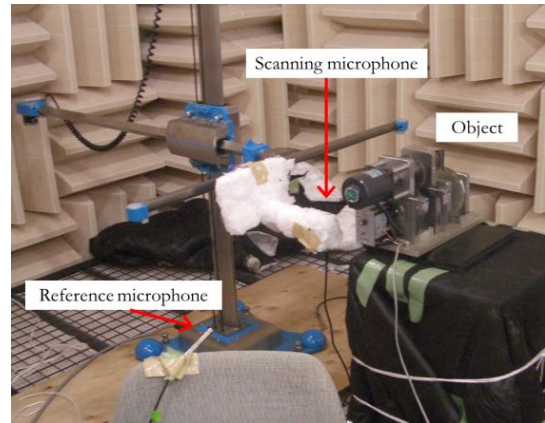


Fig. 9 Overview of experiments

Table 3 Experimental condition

Analysis method	Conventional NAH	
Number of revolution(rpm)	300,600,900	
Sampling frequency (kHz)	200	
Measurement distance (m)	0.055	
Size of Measurement Plane (m)	(X)1.00	(Y)1.00
Number of Measurement Points	(X)101	(Y)101
Measurement Pitch (m)	0.01	

Table 4 Experimental condition

Analysis method	Proposed NAH	
Number of revolution(rpm)	300,600,900	
Sampling frequency (kHz)	200	
Measurement distance (m)	0.055	
Size of Measurement Plane (m)	(X)1.00	(Y)1.00
Number of Measurement Points	(X)11	(Y)11
Measurement Pitch (m)	0.10	

表 3 は従来の近距離音響ホログラフィ法で解析を行う時の実験条件である。8500Hz 以上の周波数を解析対象とするときは計測点間隔を 2cm 未満に設定する必要がある為、計測間隔を 1cm に設定している。その為計測点数の合計が 10201 点と多く必要となる。一方表 4 は改良近距離音響ホログラフィ法で解析を行う場合の実験条件であり、計測点間隔を荒く設定していることで、測定点数の合計は 121 点である。このため、測定時間を比較しても、従来の近距離音響ホログラフィ法では 4 時間 20 分、改良法では 10 分程で実験を行うことができた。

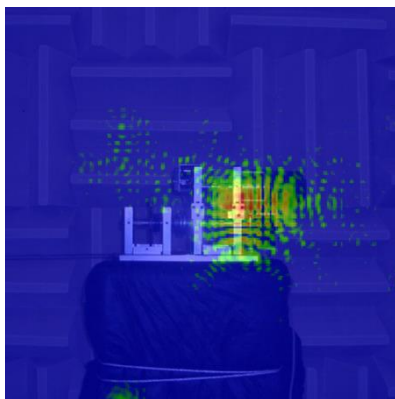
a) 解析結果(300rpm)

図 10 の(a), (b)は、ギアの回転数を 300rpm に設定した時の 13940Hz について解析を行った結果である。

従来の近距離音響ホログラフィ法では、対象のギアの噛み合わせ部分に音源があることがわかる。一方改良法では、同じ位置に音源が特定できていくことがわかる。



(a)By conventional NAH method



(b)By our proposed method

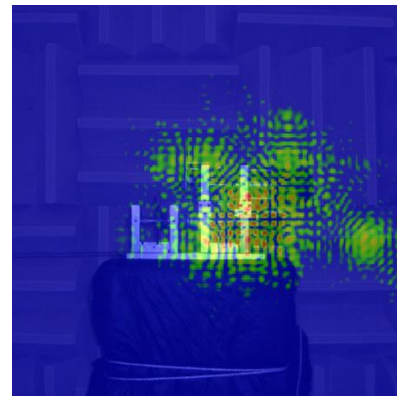
Fig.10 Experimental results at 13940Hz

b) 解析結果(600rpm)

図 11 の(a), (b)はギアの回転数を 600rpm に設定した時の 13910Hz に対して解析を行った結果である。従来の近距離音響ホログラフィ法による解析結果では、対象のギアの噛み合わせ部分に音源があることがわかる。一方改良法による解析結果では、音源像がややぼやけてはいるが、従来法と同じくギア部分に相対的に音圧が高いことを示している。



(a)By conventional NAH method

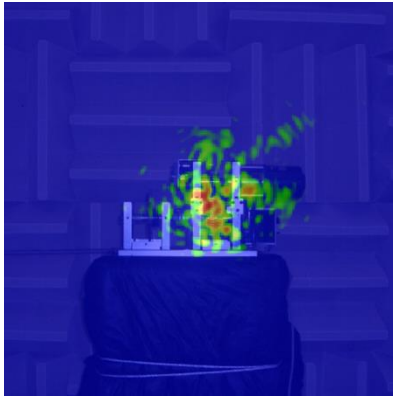


(b)By our proposed method

Fig. 11 Experimental results at 13910Hz

c) 解析結果(900rpm)

図 12 の(a), (b)はギアの回転数を 900rpm に設定して測定を行い、8632Hz に対して解析を行った結果である。従来の近距離音響ホログラフィ法による解析結果では、今までの解析結果と同じくギアの噛み合わせの部分に音圧の高い部分が確認できるが、今までの解析結果と比べても音源が少し左側にずれていることが確認できる。改良法による解析結果でも、同じように左側に音圧の高い部分がずれていて、音源のずれに対応できていると考えられる。



(a)By conventional NAH method



(b) By our proposed method

Fig.12 Experimental results at 8632Hz

5. 結論

本研究では、スピーカーとスピードコントロール付ギアに対し、改良近距離音響ホログラフィ法を用いて、従来の近距離音響ホログラフィ法と解析結果を比較することで、その同定精度の検証を行った。その結果から以下の諸点が明らかになった。

- ・スピーカー対象の実験では、同定精度は問題なく音源を特定することができた。またスピードコントロールモータ付ギア対象の実験では同定精度は若干落ちるものの大まかな騒音源の位置を示すことができた。
- ・従来の方法では、測定にスキャンニング法で4時間20分かかった。つまり、計測のためには機械製品を長時間稼働し続けなければならず、機械に大きな負担をかける必要があった。これに対し提案している改良法では、精度は若干落ちるものの、約10分で測定が完了し、計測時間の圧倒的な短縮を実現することができた。このため、耐久に不安のある試作品段階の機械製品にも負担をかけずに短時間で結果を得ることができていることが証明できた。

- ・従来法では、高周波数音波を測定する際、計測点数を1万点超にしなければならず、マイクロホンアレー法ではほとんど実現不可能であった。これに対しこの改良法近距離音響ホログラフィ法を用いれば計測点数が121点ほどですみ、マイクロホンアレー法にも適用させることができるようになると考えられる。
- ・改良法は、再生イメージの精度こそ落ちるものの従来法と同じ設備で、圧倒的短時間で大まかな音源位置を推定することができるので、従来法の前の仮測定として、高周波音波の音源位置の同定に使用できると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、研究の場を与え、終始懇切かつ丁寧なご指導、御助言を頂いた法政大学理工学部教授、御法川学教授、岩原光男准教授および北海道工業大学の長松昌男准教授に心より感謝いたします。お忙しい中での長松昌男准教授のご教授なしでは本研究の遂行は不可能でした。最後になりましたが、本研究の遂行に当たり協力して下さった振動音響研究室の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 曾我明央：The high frequency noise measurement of an engine by converted nearfield acoustic holography method, 法政大学大学院, *Internoise2013*, 2013
- 2) 高松麻緒：High frequency noise measurement of a mechanical element by converted NAH method, 法政大学大学院, *Internoise2012*, 2012
- 3) 長松昌男：音響2重ホログラフィによる研究, 東京都立大学, 修士論文, 1992
- 4) 長松昌男：改良版近距離音響ホログラフィ法による遠距離計測について, 日本機械学会 *Dynamics and Design Conference 2007*, 2007
- 5) 高田博：近距離音響ホログラフィ法に基づく音源探索システムの研究, 東京工業大学, 学位論文, 1995
- 6) E.G ウィリアムズ：フーリエ音響学, シュプリンガー・フェアラーク東京株式会社, 2005
- 7) 吉川茂：振動と音の可視化技術としての近距離音響ホログラフィ, *日本音響学会誌* 52巻12号 pp.997-1004, 1996
- 8) 吉川茂：近距離音響ホログラフィ後方伝搬による源の可視化, 電子情報通信学会総合大会, pp.496-497, 1998
- 9) 高松麻緒：改良版近距離音響ホログラフィ法による高周波数域の測定, 法政大学大学院, 修士論文, 2012