

作動温度を考慮したアイドリング時のモータファン騒音の 予測手法開発

Development of Motor Fan Noise Prediction Method in Consideration of
Operating Temperature during Engine Idling

鈴木 康仁*
Yasuhito Suzuki

清水 昌弘*
Masahiro Shimizu

要 旨

近年、車両の燃費性能向上の要求が高まっており、モータファンとしても、省動力化の為に低回転作動を含んだ多段制御を採用し対応している。更に HEV 化やアイドリングストップの採用車種が増えており、暗騒音の低いエンジン停止状態でモータファンが作動する。その為モータファンに、より高い静粛性が求められ、また雰囲気温度が低下する事から、保証すべきモータファンの使用温度域が広がっている。これらの状況に対応する為、あらゆる使用温度域・作動回転域での騒音予測手法の開発を行った。

Abstract

In these years there is an increasing demand for improvement in vehicle fuel efficiency. In light of this trend, more and more motor fans are designed to adopt multi stage control including operation at low rotation speed for power saving. Furthermore HEV models with idling stop function are increasing, which requires motor fans to be quieter. Since these motors have to operate at lower temperature with low background noise under the engine room, the motor fan design needs to cover the wider operating temperature range. To meet these requirements, we have developed a fan noise prediction method at all operating ranges in terms of both temperature and speed.

Key Word : Heat exchanger, Electric motor, Temperature / Fan noise

1. はじめに

1.1. モータファンの概要

モータファンの機能は、車両状態（車速、ラジエータ水温、コンデンサ冷媒圧力等）に合わせて回転制御され、熱交換器を冷却する風を送る事であり、構成部品は、モータ、樹脂製ファン、樹脂製シュラウドである (Fig. 1)。

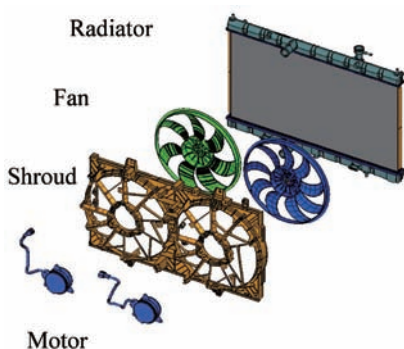


Fig. 1 Structure of motor fan system

モータファンには主に送風性能と騒音性能の二つが要求される。まず送風性能ではエンジン冷却と空調性能に応じて、必要とされる風量をラジエータ、コンデンサに送る事が要求される。騒音性能では特にアイドリング時の静粛性が重要視され、それぞれの車両要求値に応じた製品開発を行っている。

1.2. モータファンの作動環境の変化

近年、燃費性能の向上を目的とした省動力化、車両造形要求からのレイアウト変更により、モータファンの作動回転域や使用温度域、ファン径に対する要求風量に変化してきている。以下に詳細を示す。

(1) 燃費性能向上を目的とした省動力化

燃費向上を図る為、モータファンの回転速度制御を多段化し低回転作動による省動力化、低騒音化を図っている (Fig. 2)。

(2) エンジンルーム内の温度変化

HEV 車の EV 走行時やアイドリングストップなどのエンジン停止により、エンジンルーム内の温度が低下するなど、モータファンが従来に比べ幅広い雰囲気温度で使用される (Fig. 2).

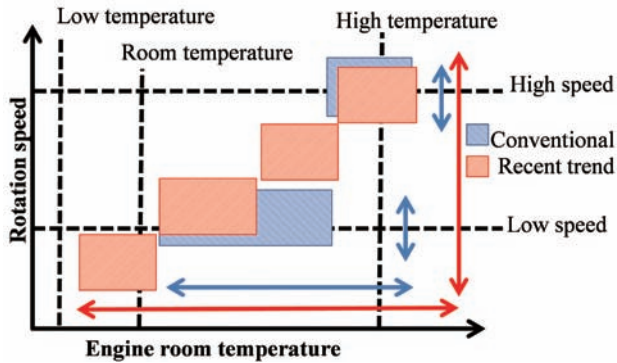


Fig. 2 Example of motor fan operating Range

(3) 車両のレイアウト要求による二連ファン化

車両の低フード化により熱交換器の高さ寸法が制限される傾向にあり、一方で送風性能の要求は高くなっている。これらの要求に対応する為、同じ放熱面積でも風速分布の良い二連ファンの採用が増加している (Fig. 3).

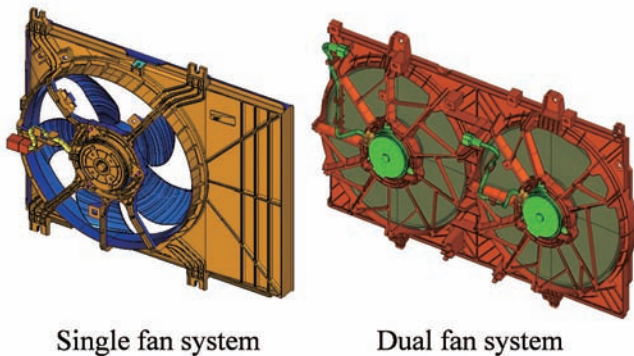


Fig. 3 Comparison of single and dual fan system

(1) ~ (3) の変化を考慮し、モータファン騒音を評価する必要がある。

1.3. モータファン騒音性能への影響

ファンはその形状や材質上、必ず作動域に固有振動数を持ち、モータファンがその周波数で回転すると、共振現象を起こし、ピーク騒音を発生させる。特に二連ファンは熱交換器の風速分布を考慮し、左右同一回転速度で作動させる。その為左右のファンが固有振動数で同時に共振すると、ピーク騒音が重なり、うなり音が目立つようになる (Fig. 4).

うなり音の対策をする場合、ファンは標準部品である為、ファンに車種毎の対策をするよりも、制御側で対策を行い、あらゆる雰囲気温度下でも、ファンをピーク騒音が発生しない回転速度で作動させた方が合理的かつ効果的である。しかし、車種、仕向け毎に車両で使用される温度域と作動回転速度を全て評価する事は非常に煩雑であり、現実的なアプローチであると言えない。その為、うなり音が目立つ回転域を正しく予測し、モータファンの制御に適用する必要がある。その為にはうなり音の変化メカニズム、雰囲気温度、作動回転速度の関係を正しく理解する事が必要である。

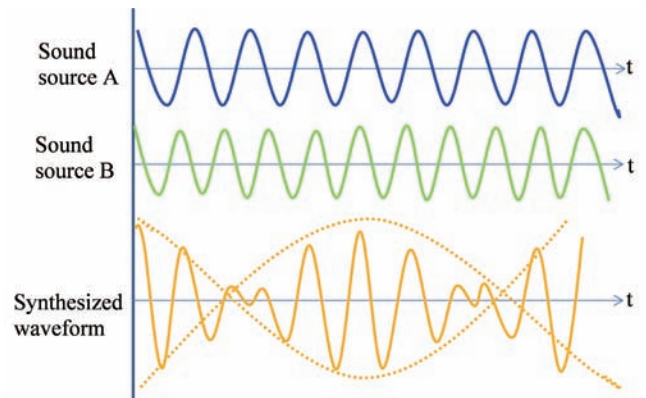


Fig. 4 Generation of beat sound

2. 検討結果

2.1. 使用温度域の変化に対する現象の把握

うなり音の変化メカニズム、雰囲気温度、作動回転速度の関係を正しく理解する為、雰囲気温度違いで二連ファンの騒音特性を測定し、聴感確認を行った。

聴感の結果、モータファンの車両作動回転域で常温の評価ではうなり音は確認されなかったが、走行後のアイドリングを想定した高温時の評価でうなり音が確認された。

また、測定結果が Fig. 5 となり、モータファンの騒音特性は雰囲気温度が常温から高温になる事で、下の二つの現象が起きて変化しているものと考えられる。

- 1) ピーク騒音の発生回転速度の低下 (Fig. 5 の赤色の領域)
- 2) 同一電圧時の作動回転速度の上昇 (Fig. 5 の灰色の領域)

である。

- 1), 2) の現象が発生したメカニズムを解明していく。

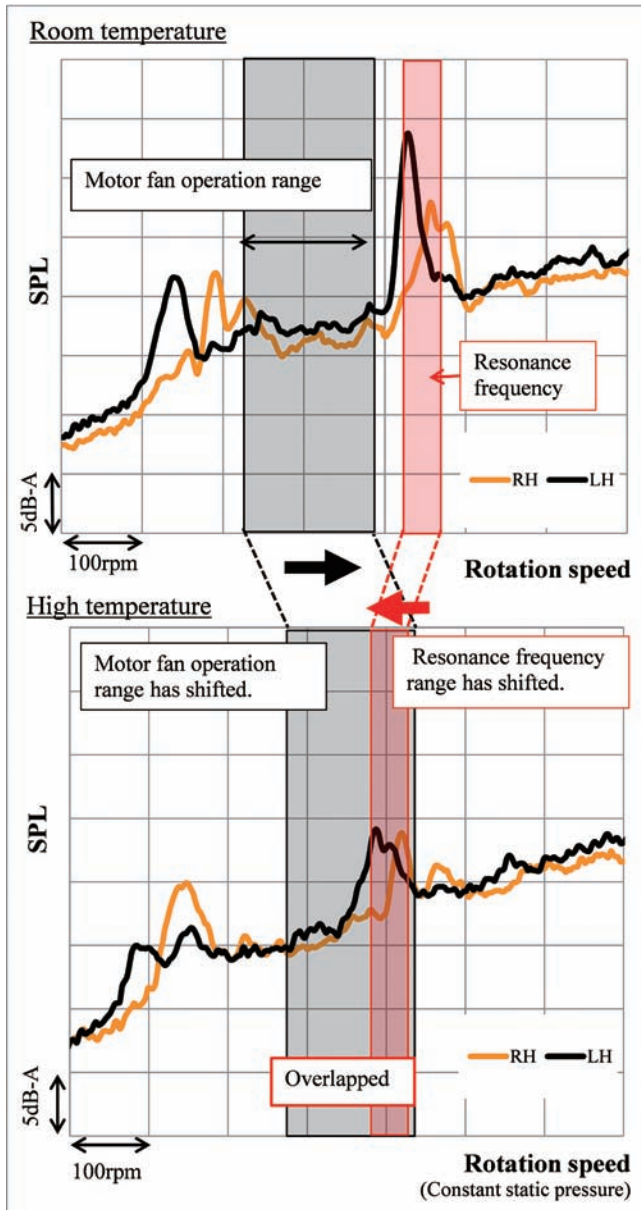


Fig. 5 Characteristic of motor fan noise (Bench test)

2.2. ピーク騒音の発生回転速度変化について

(1) ピーク騒音の変化に関する仮説

まずピーク騒音について考えていく、ピーク騒音はモータが回転する事で起きる振動がファンに伝わり、ファンの固有振動数と共振する事で発生する現象である。以下に固有振動数を式(1)に示す。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

f : 固有振動数 [Hz], k : バネ定数 [N/m], m : 質量 [kg]

ここでバネ定数 k はファン構造とファン材のヤング率で決定される。その為、温度が上昇する事で、ヤング率が減少し、固有振動数 f も低下する。そしてうなり音の発生回転速度も減少すると考えられる。

(2) ピーク騒音の変化に関する検証

仮説を検証する為、ファンの雰囲気温度違いによる固有振動数の測定を行った。(Fig. 6)

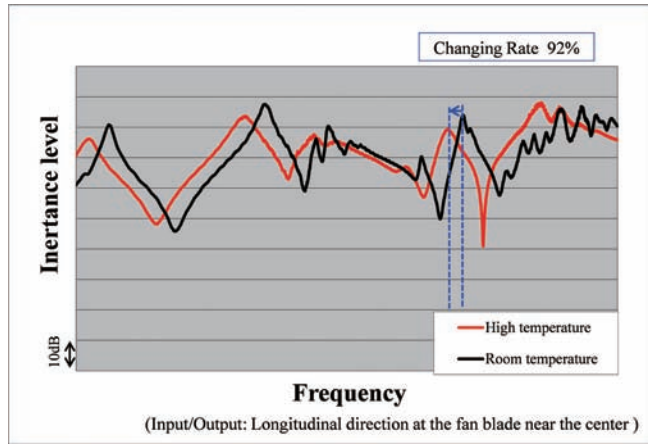


Fig. 6 Frequency response function of motor fan

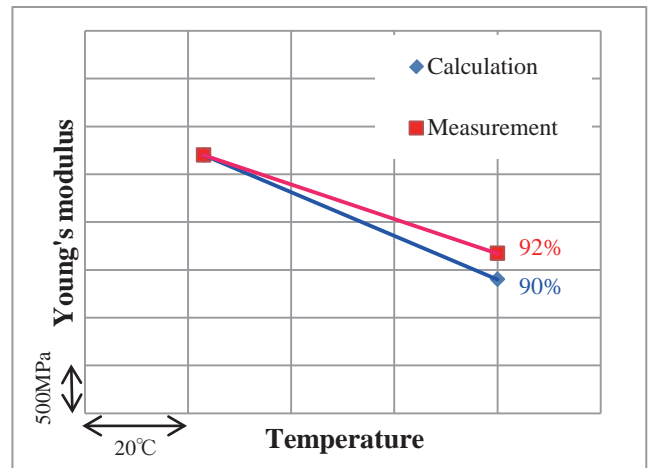


Fig. 7 Changing rate of Young's modulus

Fig. 6の実験結果と式(1)の机上計算結果を比較した。その結果、温度変化による実験の変化率が92%だったのに対し机上計算の変化率が90%と同等の変化率となった。ヤング率の変化でバネ定数が減少し、ピーク騒音の発生回転速度が変化したと推定できる(Fig. 7)。

2.3. モータファンの作動回転速度の変化について

モータファンの作動回転速度は、ファンの回転トルク(抵抗)とモータの回転トルク(出力)の組合せで決まる。その為、温度の影響を受けて各 부품の回転トルク特性がどう変化するか仮説を立て、検証を行った。

(1) ファンの回転トルクに関する仮説

ファンの回転トルクは翼部の表面積と翼角度で決まる。翼角度の温度変化分を比振じれ角とし、翼端部にかかる回転トルクと材料物性値の関係式を式(2)、式(3)に示す。

$$\omega = \frac{T}{(G \times I_p)} \quad (2)$$

ω : 比捩じれ角 [rad/m],
 T : 翼端部にかかる回転トルク [N・m]
 G : 横弾性係数 [Pa], I_p : 断面二次モーメント [m⁴]

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (3)$$

E : ヤング率, ν : ポアソン比

2.2. 節と同様、温度上昇により樹脂のヤング率が低下し、軟らかくなる事で回転中の翼角度が小さくなり、送風量が減少する。その結果、ファン自体の回転トルクが低下し、ファンとしての作動回転速度が上昇すると考えられる。

(2) ファン回転トルクに関する検証

仮説を検証する為、ファンの雰囲気温度違いによる一定回転時のトルク測定を行った。(Fig. 8) 高温にすることで同じ回転トルクで見ると9% 回転速度が上昇し、同じ回転速度で見るとトルクが10% 減少する。

Fig. 8の実験結果と、式(2)、式(3)の計算結果を比較した所、温度違いの変化率が実験結果では90% に対し机上計算結果では85% となり、共に温度上昇に対しトルクが低下する傾向であった(Fig. 9)。

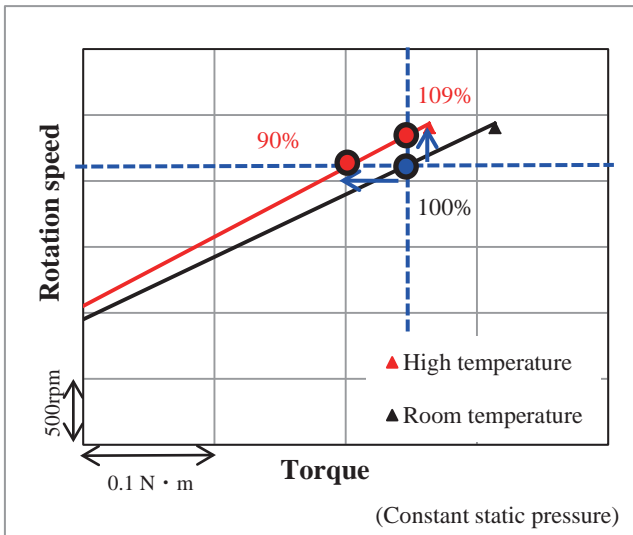


Fig. 8 Characteristic of fan torque (Bench test)

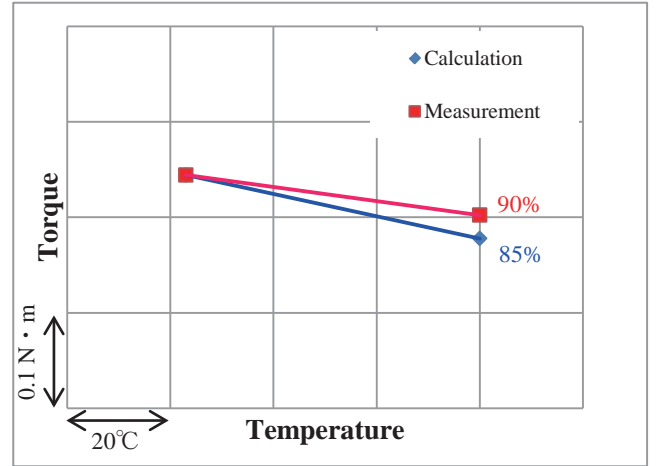


Fig. 9 Changing rate of fan torque

(3) モータの回転トルクに関する仮説

モータの回転トルクは電磁力に起因しており、温度の影響を受ける要因として、モータの構成部品である磁石の磁力とコイルに流れる電流がある。関係式を以下に示す。

$$P = 2 \times \pi \times N \times \frac{T}{60} \quad (4)$$

P : モータ出力 [W], N : 回転速度 [rpm],
 T : 回転トルク [N・m]

$$T = 2 \times F \times R \quad (5)$$

F : 電磁力 [N], R : 回転中心からコイルまで距離 [m]

$$F = I \times B \times R \quad (6)$$

B : 磁束密度 [T], I : 電流値 [A]

式(4)、式(5)、式(6)を変形すると

$$N = \frac{30}{(2\pi \times I \times B \times R^2)} \quad (7)$$

となり、磁力と電流が作動回転速度に反比例する事がわかる。一般的に温度が上昇すると磁力は低下し、電流値も下がる為、式(7)の分母が常温に対し低下する事がわかる。よって温度上昇により回転トルクが低下し、作動回転速度が上昇すると仮定した。

(4) モータの回転トルクに関する検証

仮説を検証する為、モータの雰囲気温度違いによる回転トルクの測定を行った(Fig. 10)。

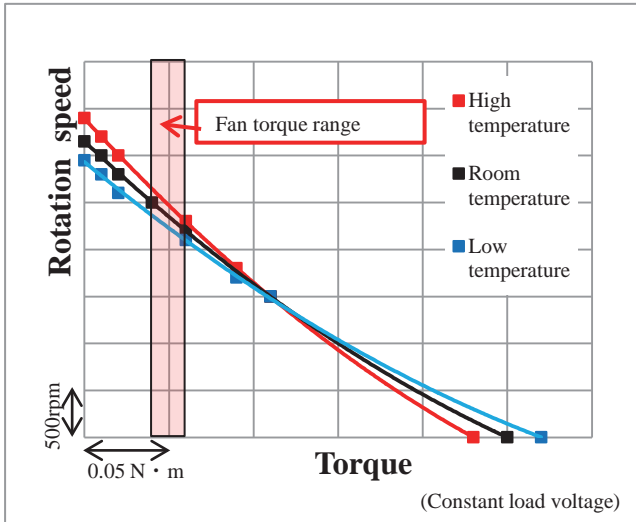


Fig. 10 Characteristic of motor torque (Bench test)

Fig. 10 の実測結果を見ても、実際に使用するファンの回転トルク領域では高温時、作動回転速度が上昇する事が確認できた。

2.4. 作動回転速度の予測可否検討

雰囲気温度が変化した時のモータファン作動回転数が各部品の実験結果から予測可能か判断する為に、実際にアッセンブリしたモータファンの実験結果と比較した。作動点は各部品の回転-トルク線図が交差する点となる (Fig. 11)。

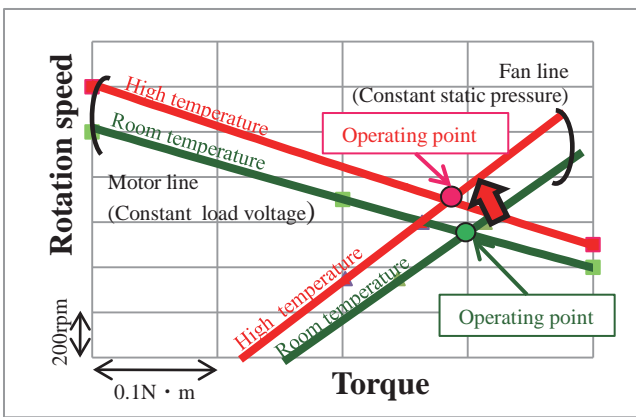


Fig. 11 Operating point analysis

比較した結果、温度変化による変化率が実測値では104%、計算値では106%となり同様の結果となった (Fig. 12)。

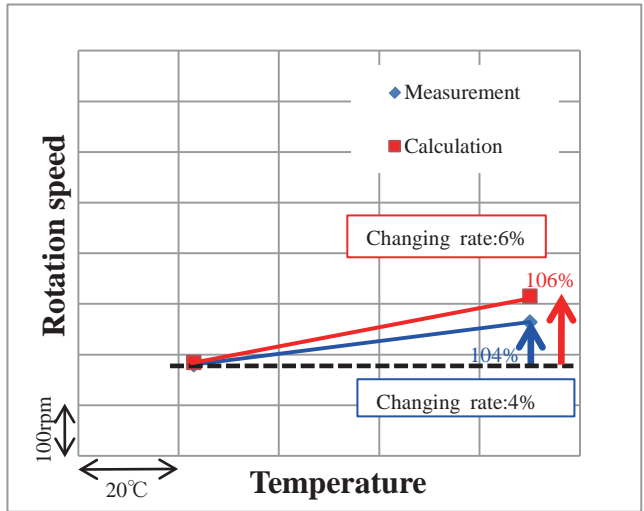


Fig. 12 Comparison of operating point

2.5. うなり音の発生領域の推定

上記検討結果から2.1. 項の二つの仮説は妥当であり、温度変化に対するピーク騒音と作動回転速度の変化を予測できる事が示された。

そこでこれらを基にマッピングを行い、あらゆる作動回転域、使用温度域でのうなり音が目立つ領域を推定した。Fig. 13 のマップでそれぞれの領域を図示する。領域 (A) がファンの固有振動数の温度変化、領域 (B) がモータファンの作動回転速度の温度変化をそれぞれ示した物であり、この交差する領域 (C) がうなり音の目立つ回転速度と温度の領域となる。

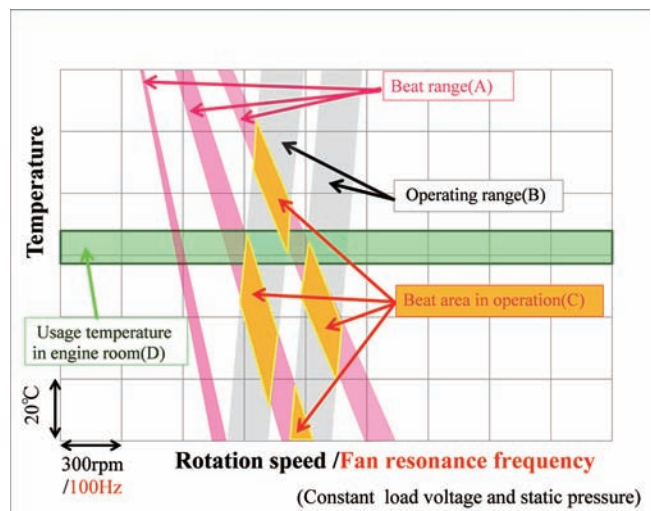


Fig. 13 Peak noise map of fan

うなり音を目立たせない為には、領域 (C) が車両で使われる使用温度 (D) と重ならないように、モータファンの作動回転域 (B) を設定する必要がある。

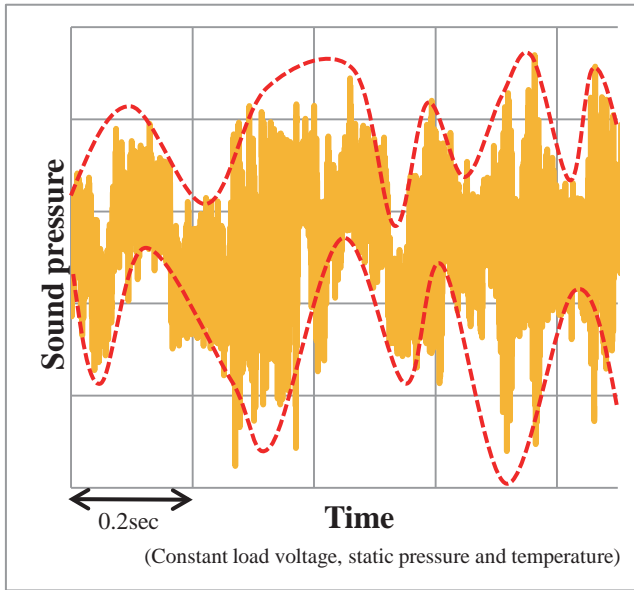


Fig. 14 Beat noise data of dual fan

実際に二連ファンを黄色の交差領域で作動させた際に、うなり音を聴感で確認でき、このマップの考え方が正しいことが示された (Fig. 14).

この結果、ファンとモータの温度違いの回転-トルク特性、常温時の騒音特性、材料物性データがあれば、あらゆる領域でうなり音が推定できる。今後は机上検討のみでうなり音が目立つ領域が推定できるように精度を向上させる。

3. 結論

車両アイドル時のモータファンうなり音による騒音悪化を未然に防ぐ為に、以下の検証を行い車両で想定されるあらゆる使用環境を考慮したモータファンの騒音予測手法を構築した。

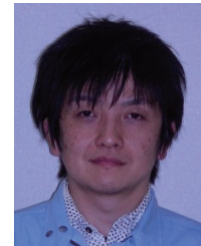
- (1) モータファンは雰囲気温度によって、うなり音が目立つ回転速度とモータファンの作動回転速度が変化する。
- (2) 変化する要因は以下である。
 - ・ファンの剛性値変化による固有振動数と回転トルクの変化
 - ・モータの磁力と電流値変化による回転トルクの変化
- (3) 常温の騒音特性と材料物性や回転-トルク特性のデータからマップを作成する事で、机上でうなり音が目立つ領域の予測が可能である。
- (4) この予測手法を適用する事で、うなり音が目立たない回転制御の検討が可能である。

4. おわりに

今回検証実験にあたり、ご協力頂いた社内外の関係各位に深く感謝いたします。



鈴木 康仁



清水 昌弘