

技術ノート

キーワード

航空機騒音
ヘリコプター
騒音対策

ヘリコプターの騒音とその対策

Helicopter Noise and Its Reduction

藪 勉*
Tsutomu YABU中 嶋 良 樹**
Yoshiki NAKAJIMA川 田 忠 裕**
Tadahiro KAWADA

1. まえがき

ヘリコプターの騒音は、固定翼機(例えばジェット機)と比較すると、決して激しいものではない。しかし、ヘリコプターは、比較的低い高度での飛行を得意とし、都市環境のような狭い場所でも容易に離発着できるため、しばしば都市上空を飛来し、騒音問題を引き起こす。

近年、主として騒音対策のために、飛行場が都市と分離する傾向にある反面、ヘリコプターが都市と飛行場のアクセスとして注目を集めている。このため、将来の都市周辺の航空機騒音の主役は、固定翼機からヘリコプターへと移り変わりつつあるといわれている。

本文は、現在、著者らが扱っているヘリコプター「ロビンソンR22」の騒音測定ならびに解析を行うための基礎資料とする目的で、文献などを調査して、騒音の発生源別にそれぞれの騒音対策について検討したものである。

2. 騒音の評価方法

騒音とは、多分に主観的かつ心理的な問題である。例えばモーツァルトの美しい調べでも、仕事に熱中している人にとっては騒音に聞こえることもあるし、F15戦闘機の出す爆音でも、エアショーの観客にとっては、好ましい音に聞こえることもある。つまり、騒音とは単に音の圧力や周波数を計測することによって直ちに求められる数値ではなく、それにいくつかの感覚的な補正を行って、はじめて得られるものなのである。

(1) 音圧と音圧レベル

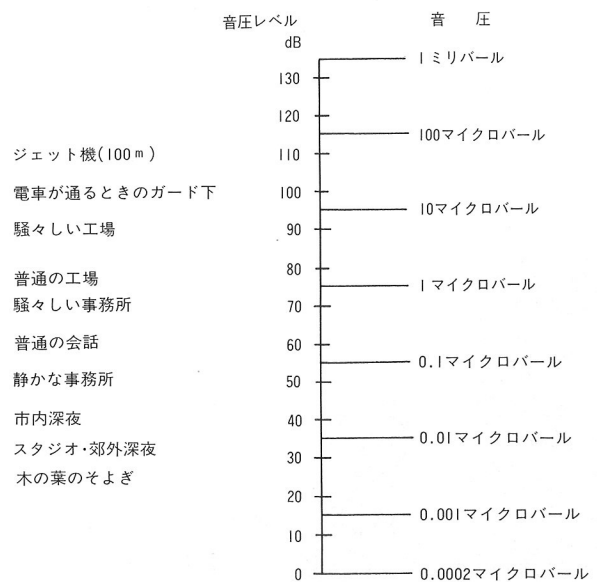
音とは、非常に小さな気圧変動による空気の粗密波であって、その気圧差によって音の強さを表すことができ

る。これを音圧といい、単位はマイクロバルが使われる。例えば、一般の会話程度だと約1マイクロバル、人間の可聴範囲は0.0002マイクロバルから1ミリバル(1000マイクロバル)とされている。このように音の強さを音圧で表すと、数値の範囲が広く取り扱いにくいので、これを対数尺度で次式によって表す。これを音圧レベル(SPL)といい、単位はデシベル(dB)を用いる。

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0} \text{ (dB)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P は測定した音圧、 P_0 は最小可聴音圧(0.0002マイクロバル)である。音圧、音圧レベルおよび身近にある騒音の例を、図-1に示す。

なお、人間の可聴範囲を周波数で表すと、約20Hzから20000Hzまでである。

図-1 音圧と音圧レベル¹⁾

*川田工業(株)航空事業部開発課課長 **川田工業(株)航空事業部開発課

(2) 航空機騒音の測定単位

騒音の大きさは、音の大きさを耳の感覚で補正することによって求められるものである。航空機騒音の測定単位として、わが国ではホン(A)が使われている。これは日本工業規格(JIS)で規格化された耳の聴感補正回路のうち、A回路で補正された騒音の単位で、国際的に用いられるdB(A)と同じ単位である。

一方、航空機騒音のやかましさをさらに的確に表現するために、国際標準化機関(ISO)が採用している単位として、感覚騒音レベル(PNL, 単位PNdB)がある。図-2は、人間の耳が等しいやかましさを感ずる、音の周波数と音圧レベル(SPL)との関係を表している。例えば人間の耳の感覚では、SPL40dBで1 000Hzの騒音は、SPL80dBで20Hzの騒音と同程度のやかましさに聞こえるのである。感覚騒音レベルは、このような周波数によって異なるやかましさを度合いに補正を加えたものである。

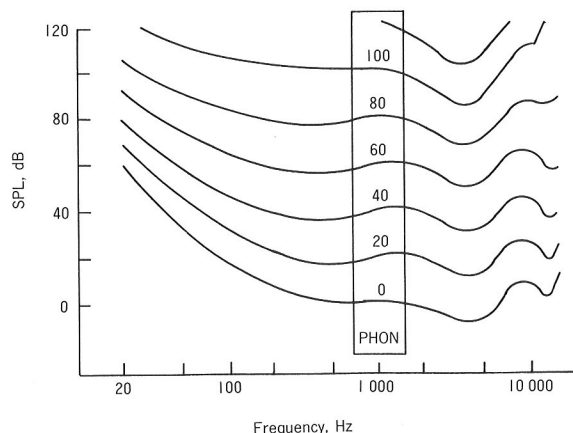


図-2 等しいやかましさをの線^{2),3)}

さらに、感覚騒音レベルに航空機騒音の継続時間とスペクトルの不規則性を加え、航空機騒音のやかましさを一層正確に表現する単位として、実効感覚騒音レベル(EPNL, 単位EPNdB)がある。これは現在、航空機の騒音基準適合証明制度(後述)に使用されている。

(3) 航空機騒音の評価単位

飛行場周辺の航空機騒音を客観的に評価するためには、航空機の離発着回数や飛行の時間帯を考慮に入れなければならない。航空機騒音が社会問題となっている先進諸国では、各国が独自に開発した種々の評価単位が発表され実用化されている。これらの評価単位を国際的に統一するために、ICAO(国際民間航空機関)が開発した単位がECPNLである。これは評価したい期間(例えば1日、1年など)に観測された航空機数によって、騒音を補正している。

ECPNLは、ある期間における騒音の評価単位であるが、昼と夜の騒音の影響差を考慮していない。この相違

を補正して表す評価単位として、WECPNLが考案された。わが国においても、航空機騒音にかかわる騒音基準(後述)の評価単位として使用されている。

3. 航空機騒音に関する規制

(1) 日本における航空機の騒音規制

日本における航空輸送は、昭和30年代後半から本格化したジェット旅客機の就航によって、短期的に急速な発展を遂げ、それによりもたらされる航空機騒音が空港周辺に大きな社会問題を引き起こした。このような航空機騒音に対処するため、昭和40年代より以下のような騒音に関する規制が実施された。

a) 航空機騒音防止法(昭和42年制定)

公共用飛行場周辺(羽田、成田、大阪など16カ所)の航空機騒音による障害の防止、障害による損失の補償を目的としている。

b) 航空機騒音にかかわる騒音基準(昭和48年制定)

公害対策基本法に基づいて環境庁長官告示として公布された、航空機騒音の具体的目標値であり、その基準値を表-1に示す。

c) 騒音基準適合証明制度(航空法第20条)

ターボジェットエンジンを装備するすべての航空機は、この証明書を持たなければ航空の用に供してはならない。

d) 飛行場設置に関する公聴会の実施(航空法第39条)

飛行場の設置に関し利害関係を有するものに、意見を述べる機会を与えるもので、当然騒音を含む環境問題が意見陳述の主な対象となる。

e) 環境アセスメント

各地方自治体が独自の条例によって設置しており、例えば東京都の場合、対象とする事業としては飛行場、ヘリポートの設置・変更が、また評価項目として騒音が含まれている。

表-1 航空機騒音にかかわる騒音基準¹⁾

地域の類型	基準値(単位:WECPNL)
I	70以下
II	75以下

(備考) I 類型: 専ら住居の用に供される地域

II 類型: I 以外の地域であって、通常の生活を保全する必要がある地域

(2) ヘリコプターの騒音に関する規制

近年、固定翼機(主としてジェット旅客機)の騒音対策が充実されるにつれて、ヘリコプターの騒音問題が浮き彫りにされつつある。しかし、日本では現在のところヘリコプターやヘリポートを特定した騒音規制はない。も

ちろんヘリポートを新設する際には、前項で述べた騒音基準が適用されるし、公聴会開催の義務も生じる。しかし、例えばヘリコプター騒音で最も問題となるスラップ音については、水平飛行以外の特定な飛行状態でしか発生しないため、上述の騒音基準では騒音を把握しきれない面がある。

このような、ヘリコプター騒音の特徴を考慮した騒音基準が、ICAOによって1980年に制定された。しかし、この基準では、現存する機体の中でもクリアできないものがあり、また基準達成のためのコスト増、安全性への影響などが心配され、1985年に緩和された。表-2はICAOのヘリコプター騒音基準であるが、わが国においても遠からず適用されると思われる。この基準では、ヘリコプターの最大離陸重量によって3段階に分けられ、また離陸時、水平飛行時、着陸時の3通りの飛行方式によって騒音基準が設定されている。

飛行試験の騒音測定は図-3にしたがって行われ、単位はEPNdBで測定される。また図-4は、ICAOのヘリコプター騒音基準と、実機の騒音測定値である。これによると、現存する機体の何機かが騒音基準を超えているが、1985年1月以降に型式証明が申請されるヘリコプター、および騒音に影響する設計変更が申請されるヘリコプターには、この基準が適用されている。しかしながら、農業用、消防用、および機外貨物用ヘリコプターは適用除外となっている。

表-2 ICAOのヘリコプター騒音基準⁴⁾

最大離陸重量 M(t)	0.788以下	0.788~80	80以上
離陸時(EPNdB)	89.0	$90.03 + 9.97 \log M^*$	109.0
水平飛行時(EPNdB)	88.0	$89.03 + 9.97 \log M^*$	108.0
着陸時(EPNdB)	90.0	$91.03 + 9.97 \log M^*$	110.0

(注) *重量半減につき3EPNdBの割で減少。

EPNdBは、実効感覚騒音レベル

離陸		最大離陸重量 最良上昇速度(V_T)、または最小許容離昇速度のいずれか高い速度 最大ロータ回転数
水平飛行		最大離陸重量 $0.9V_M, 0.9V_{MC}, 0.45V_M \div 65KT, 0.45V_{MC} \div 65KT$ の中で最も低い速度 最大ロータ回転数 V_M =最大巡航速度 V_{MC} =超過禁止速度 対気速度と対地速度の差の平均は4KT以下
着陸		最大着陸重量 V_T または最小許容進入速度のいずれか高い速度 最大ロータ回転数

図-3 騒音測定のための飛行試験⁴⁾

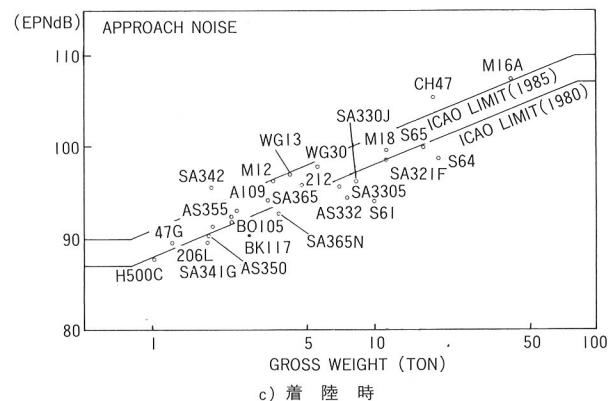
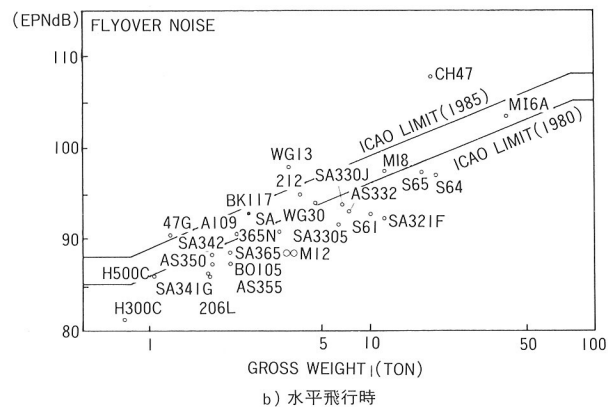
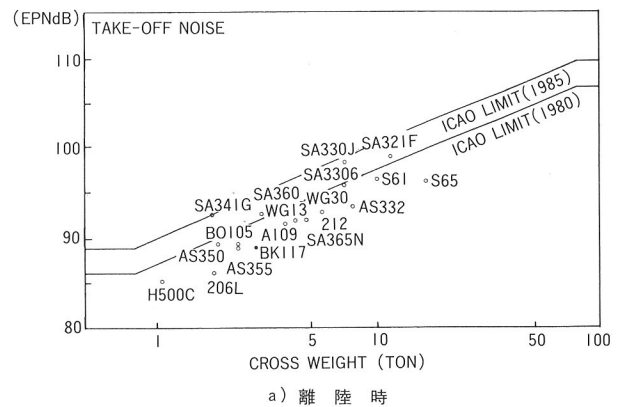


図-4 ICAOのヘリコプター騒音基準と実機の測定値⁴⁾

また図-4の騒音測定データの中に、「ロビンソンR22」のデータが抜けているが、これは近く著者らが騒音測定を行う予定なので、次の検討項目とする。

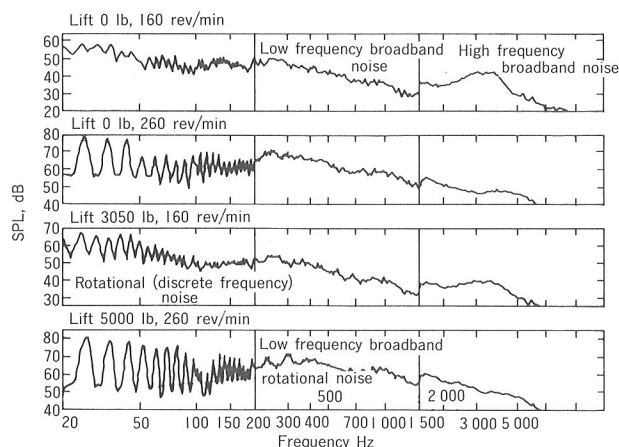
4. ヘリコプターの騒音の特徴

ヘリコプターはエンジンの出力をトランスミッションで減速し、メインローターやテイルローターを回転させるという複雑な構造になっているため、可動部分が多くしたがって騒音源も多い。ヘリコプターの騒音源として主なものはメインローター、テイルローター、エンジン、トランスミッションの四つである。

(1) メインローターの騒音

ヘリコプターは、メインローターが周囲の空気を押し下げる反作用として、空を飛んでいる。したがってメインローターは、できるだけたくさんの空気を押し下げるために、翼端では音速に近いほどの速度で高速回転しており、ヘリコプターの騒音に最も大きな影響を与えている。

ローターの回転にともなう生ずる1次的な騒音には、回転騒音と渦騒音とがある。図-5は、タワーで回転中のローターから出た、騒音のスペクトル分布である。200Hz以下の低周波数域では、ローターの回転数と同期した周波数の騒音が顕著であり、これが回転騒音である。これはローターの回転面内にある空気が、ブレードによって瞬間的に下方に押し下げられて圧力変動を生じ、音源となるためである。回転騒音は、通常ローター推力の2～3乗に比例して増大するとされている。すなわち、図-5でも見られるように、ブレードの揚力と回転数に強く影響されている。



マイクロホン設置場所：ローター回転面下 11.5', 76m (250ft)
使用バンド・パス・フィルタ：2 Hz, 20～200Hz, 5 Hz, 200～1.5kHz,
20Hz, 1.5～15kHz

図-5 ローターの騒音スペクトル^{2),8)}

一方、200Hz以上では、ローターの回転数に同期していない、広帯域騒音が顕著である。これはローターが揚力の発生にともなう、ブレード面上およびその後流に高い周波数の渦を発生させ、これが圧力変動となって騒音源となるためで、渦騒音といわれている。渦騒音はブレードの揚力にあまり影響を受けないが、周波数は図-5にも見られるように、回転速度によって異なる。

ローターの回転にともなう生ずる2次的な騒音に、ブレードスラップ音がある。この騒音は水平飛行以外の運航時、例えば旋回とか降下などの時、あるいは高速度飛行の運航時に多く発生する。図-6は、中型ヘリコプターが、どのような運航状態の時スラップ音を発生するかを

表している。この例では、速度60～80ノットで200～400 fpmの降下飛行、110ノット以上の高速飛行、および1.5g以上の水平旋回時に、スラップ音が発生している。

スラップ音は、衝撃性を持っている点でほかの航空機騒音と異なり、ヘリコプター騒音の大きな特徴となっている。一般の人たちにヘリコプターの音はどんな音かとたずねると、決まって「パタパタ」とか「バタバタ」といった言葉で表現する。これがアメリカ人には“Slap Slap”といった繰り返し音に聞こえるらしく、スラップという言葉の由来だそうである。

スラップが発生する原因のひとつは、先行するブレードが出した渦の中に後続のブレードが突入して、渦の周りの強い吹き上げ吹き下ろしの場を短時間に通過するために、激しい圧力変動が生じて音源となるためである(降下および旋回時)。もうひとつの原因は、高速飛行中の前進側ブレードが臨界マッハ数近くになり、局部的に生じた衝撃波が音源となる場合である(高速飛行時)。いずれにしても、スラップ音が発生した場合、ほかのすべての騒音に優先して地上に大きな影響を与えるため、十分に注意しなければならない。

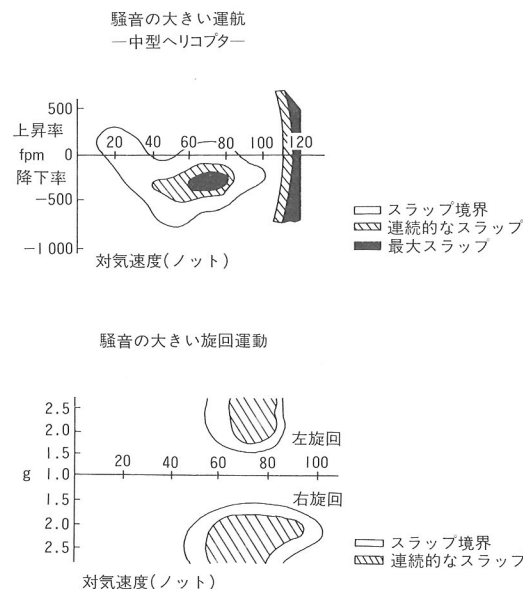


図-6 運航状態によるスラップ音の発生⁴⁾

(2) その他の騒音

a) テイルローター

現在、運航されているほとんどすべてのヘリコプターは、胴体に固定されたエンジンおよびトランスミッションがメインローターを回転させている。したがって、ヘリコプターがいったん地面を離れると、メインローターのトルクによって胴体が回転させられてしまうため、これをテイルローターによって打ち消してやる必要がある。テイルローターによって消費されるパワーは、ホバ

リング状態で7%程度であり、無視できない大きさである。したがって、テイルローターも効率を良くするため、翼端では音速に近い速度で回転しており、ヘリコプターの騒音源のひとつになっている。

図-7は、代表的なヘリコプターの騒音スペクトル分布であるが、テイルローターの発生する音の周波数はメインローターの周波数よりも高くなっている。テイルローターは、メインローターに比べて直径が小さいために回転速度が速く、したがって周波数も高くなるためである。

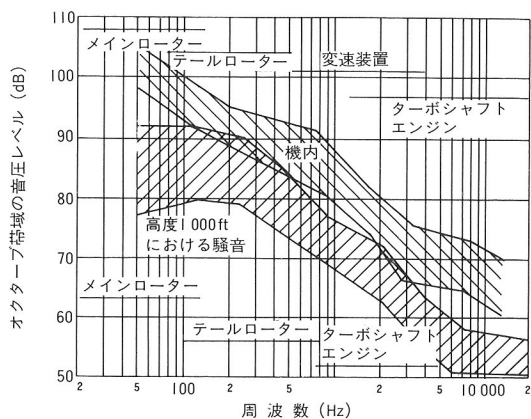
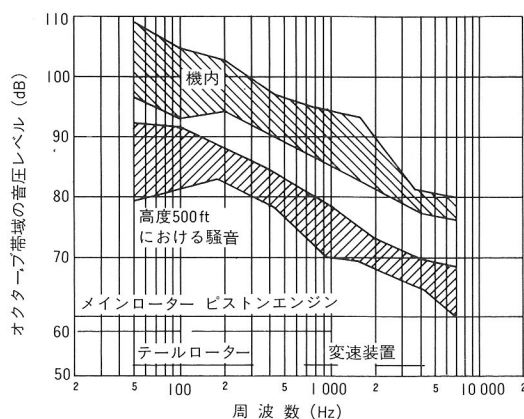


図-7 代表的なヘリコプター騒音のスペクトル分布⁶⁾

b) エンジン

ヘリコプターのエンジンには、ピストンエンジンとターボシャフトエンジンの2種類が使われている。前者は安価なため、主として低価格な小型ヘリコプターに用いられ、後者はそれ以外のヘリコプターに用いられている。

図-8は、ピストンエンジン機とターボシャフトエンジン機の騒音比較である。これによると、ピストンエンジン機の方が、同じ重量のターボシャフトエンジン機よりも、10dB(A)ほど騒音が高くなっている。また図-7でも明らかなように、ピストンエンジンの周波数はターボシャフトエンジンよりも低いいため、空気減衰が悪く地表への影響も大きい。

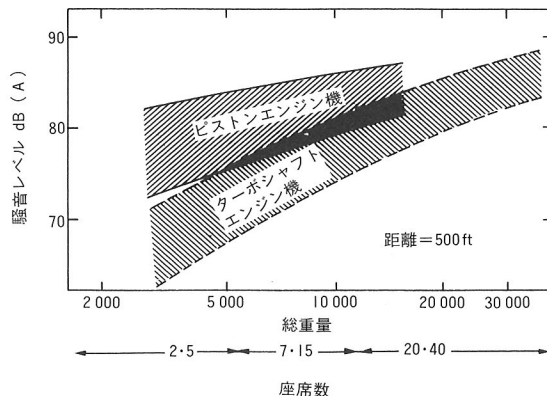


図-8 ピストンエンジン機とターボシャフトエンジン機の騒音比較⁶⁾

c) トランスミッション等

ヘリコプターの乗員や乗客にとって辛い騒音は、トランスミッションのギヤ音やポンプといった、メカニカルなノイズである。これは設計者がある程度コントロールできる騒音ではあるが、価格の上昇や重量の増加といった事態を引き起こすため、あまり注意が払われていないのが現状のようである。

(3) ヘリコプター騒音の総合評価

これまで述べてきたように、ヘリコプターには音源となるものが多く存在し、それらが重なり合って複雑な騒音となり、地表に大きな影響をもたらしている。ヘリコプターの騒音の特徴は、図-5や図-7にも見られるとおり、200Hz以下の低周波数成分が多いことである。音は空气中を伝播するときに、空気自身によって減衰させられるが、周波数の低い音は高い音に比べて減衰が悪い。例えば遠くの野球場から聞こえてくる音は、人の歓声やトランペットの音が減衰してしまい、太鼓の音だけが届いたりする。ヘリコプターの騒音対策にとって最も困難な問題は、低周波数成分が多いことであり、すなわち、騒音の空気減衰を、あまり期待できないことである。

またヘリコプターの騒音は、図-7、8からも明らかとおり、機体の重量によってそれほど変化しない。これは、ほかの航空機が重量と騒音レベルがほぼ比例するのに比べて、大きな特徴である。この原因のひとつは、小さな機体ではピストンエンジンが使われることがあるのに対して、大きな機体ではすべてターボシャフトエンジンが使われているためである。もうひとつは、ヘリコプターの大小にかかわらず、ローターの翼端速度はほぼ一定であり、これがヘリコプターの騒音の主要因となっているためである。

5. ヘリコプターの騒音対策

ヘリコプターの騒音対策を考える場合、機体自身の騒

音を低下させる方法と、騒音の少ない運航状態で飛行する方法の、2通りの対策が考えられる。

(1) 機体の騒音対策

ヘリコプターの騒音のなかで最も大きな影響を与えるのが、ローター(メインローター、テイルローター)の騒音である。したがって静かなヘリコプターを設計しようとする場合、静かなローターを設計することが先決であり、その具体的な方法は次のとおりである。

- ① 翼端速度を遅くする。
- ② ブレード枚数を多くする。
- ③ 翼厚を薄くする。
- ④ 円板荷重を小さくする。
- ⑤ ブレード上の揚力分布を一様にする(翼型、翼平面形、振り下げ)。
- ⑥ 翼端渦の発生を抑える(翼端形状の改良)。

しかし、ローターの騒音を抑えることは、直接的間接的にヘリコプターの性能低下につながる。例えば翼端速度を低下させれば、同じ推力を出すためにはブレード面積を増す必要があり、ブレードの重量増加につながる。また、ローターの回転数を下げれば、ギヤの減速比も大きくなり、トルクも増すためトランスミッションとドライブシャフトの重量も増加する。さらに高速飛行時に、後退側ブレードの失速を招く危険性があり、最高速度も低下する。

このように、低騒音のローターを設計することは、ヘリコプターの性能を犠牲にすることにつながり、出来上がった設計は、常に両者の妥協の範囲内で、高性能と低騒音の折衷した形となる。

一方、スラップ音を減少させるために、翼端渦の発生を抑えることは、ヘリコプターの性能低下をきたすことなしに実現可能である。その解決策のひとつは、翼端から空気を吹き出すことによって、渦を拡散させるか渦を後ろからくるブレードの外側に移動させるかして、スラップ音の原因であるブレードと渦の干渉を避ける方法である。もうひとつは、翼端の平面形を改良する方法である。図-9は、一般的な矩形翼、後退翼、2重後退翼の騒音比較であるが、翼端の平面形を改良することが騒音低下に有効であることを表している。

エンジンはヘリコプターの騒音源のひとつであるものの、具体的な騒音対策はそれほどとられていないのが現実である。特に、レシプロエンジンの場合、周波数も低く地表への影響も大きいのであるが、消音効果の高いマフラーをエンジンに取り付けることは、エンジンの馬力低下をもたらす、マフラーの重量も増加するため、実際には消音効果の高いマフラーはほとんど用いられていないようである。

ターボシャフトエンジンの騒音は、周波数が非常に高

く空気減衰効果も大きいので、地表への影響はそれほど大きくない。しかし、ヘリコプターの乗客や乗務員、さらには空港やヘリポート周辺地域での影響はかなりのものがあり、今後の騒音低減対策が期待されるところである。

トランスミッションのギヤ音やポンプから発生する騒音は、ヘリコプターの内部騒音として、乗客や乗務員に影響を与える。これは、ギヤやポンプの騒音源の静粛化、回転部分とキャビンとの間に金属的なつながりをもたせない、防音壁を設けるなどによって、かなり改善することが可能である。

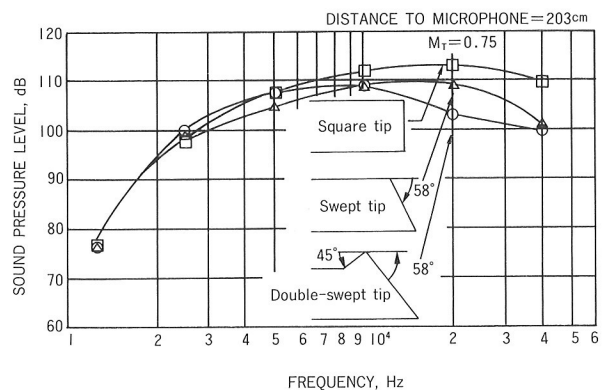


図-9 翼端平面形状の効果($R=20.3\text{cm}$, $\theta=8^\circ$)^{2),7)}

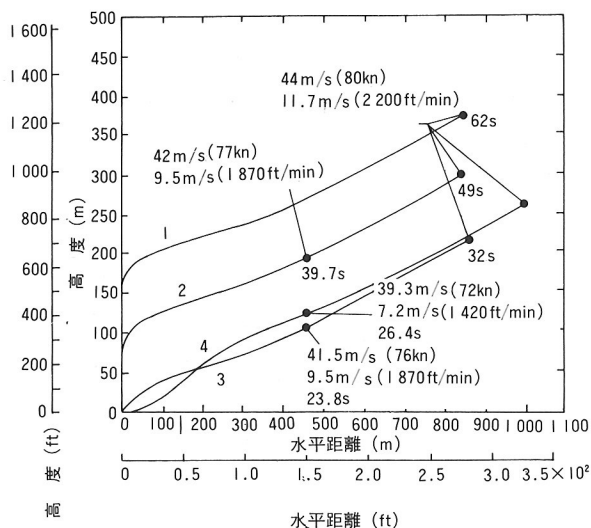
(2) 運航方式による騒音対策

図-10, 11は、さまざまな離陸方式における騒音コンターである。例えば、垂直離陸によれば、進行方向の騒音を低下させることができるし、低角度離陸によれば、側方や後方の騒音を低下させることができる。このように、ヘリコプターは運航方法を変更することにより比較的自由に騒音コンターを制御できる。

ただし、スラップ音が発生すると、ヘリコプターにおけるほかのいかなる騒音にも増して、地表に大きな影響を与える。スラップの起こりやすい運航状態については、既に図-6に示したが、パイロットはこのような運航状態を極力避けるべきであり、どうしても避けられない場合は、この範囲を速やかに通過すべきである。このほかに地表への騒音の影響を最小にするために、パイロットは以下のことを心がけるべきである。

- ① 市街地での離着陸は高い高度から高角度で行う。
- ② 飛行場やヘリポートへの飛行経路は、市街地を避け人口の少ない所を選ぶ。
- ③ 病院、学校など騒音に敏感な施設の上空を飛行しない。
- ④ 交通量の多い道路や鉄道に沿って飛行する。
- ⑤ 市街地の上空では100ノット以下の速度で飛行する。

このような騒音軽減運航方式によって飛行すれば、地表における騒音の影響は、かなり改善されるはずである。ヘリコプターの騒音軽減対策は、機体の騒音対策がなかなか困難なため、むしろ運航方式による騒音対策に頼っているのが現状である。



- 1 152 m (500 ft) まで垂直上昇
2 76 m (250 ft) まで垂直上昇
3 通常の運航
4 速度が10.3 m/s (20 kn) になるまで水平飛行

図-10 ヘリコプターの運航方式⁶⁾

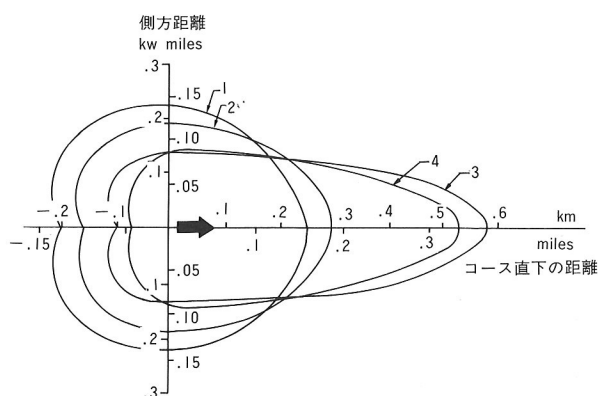


図-11 各種の運航方式による騒音コンター(図-10に対応)⁶⁾

6. あとがき

近年ヘリコプターが、都市型の航空機として注目を集め始めている。ヘリコプターは本来、VTOL機としては静かな乗り物であるが、低周波数成分の多い特徴的な騒音を発生するため、次第に騒音問題の主役になりつつある。しかしながら、日本にはヘリコプターやヘリポートを特定した騒音規制はなく、いわば野放し状態にされているのが現状である。

ヘリコプターが今後とも都市型航空機の主役として君臨し、さらに将来都市の主要な交通手段として発展する

ためには、騒音問題の解決は必要不可欠な条件である。そのためにも、ヘリコプターの特徴を十分に考慮した騒音の評価方法を1日も早く整備し、ヘリコプターの発生する騒音を適切に判断して、具体的な騒音対策を実施すべき時期に達しているものと思われる。

なお次回の報告では、著者らが進めている「ロビンソンR22」による騒音測定の結果ならびに解析状況を報告する予定である。

参考文献

- 1) 財航空振興財団：飛行場概論(四訂版)，昭和61年4月。
- 2) 東 昭：ヘリコプターの騒音，日本航空宇宙学会誌，第23巻，第254号，1975年3月。
- 3) Davidson, I. M. and Hargest, T. J.: Helicopter Noise, Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol.65, No.5, pp.325~336, 1965.
- 4) 財日本航空宇宙工業会：昭和62年度ヘリコプター事業調査報告書，昭和63年3月。
- 5) Leverton, J. W.: The Noise Characteristics of a Large "Clean" Rotor, Journal of Sound and Vibration, Vol.27, No.3, pp.357~376, 1973.
- 6) 西宮 元：ヘリコプター騒音，日本音響学会誌，32巻8号，1976年。
- 7) Tangler, J. L., Wohlfeld, R. M. and Miley, S. J.: An Experimental Investigation of Vortex Stability, Tip Shapes, Compressibility, and Noise for Hovering Model Rotors, NASA CR-2305, 1973.
- 8) Johnson, W.: Helicopter Theory, Princeton University Press, pp.903~959, 1980.
- 9) Yoshiya Nakamura: The Analysis of Helicopter Rotor Noise, Institute of Space and Aeronautical Science University of Tokyo, No.549, 1977.