

空気による音の吸収*

山 田 一 郎**
(財)小林理学研究所)

1. はじめに

空気中を伝わる音は空気に生じた断熱的な密度変化が周囲へ伝播する現象であるが、音源から離れるにつれ大きさが小さくなる。その減衰の大きさは基本的には空間的に拡散することから説明されるが、屋外での騒音伝搬のように伝わる距離が大きい場合や音の周波数が高い場合などには様々な理由による吸収損失を考えに入れないと辻褄が合わなくなる。そのような要因の中でも基本的なものに空気の粘性や熱伝導によるエネルギーの散逸、分子の緩和現象および有限振幅の影響などによる音の吸収損失がある¹⁾。空気による音の吸収はこれらの現象に他ならない。

空気吸収による音の減衰を精度良く評価することは屋外騒音の制御だけでなく、ホールの音響設計や残響室法吸音率測定、音響模型実験、リモートセンシング、生体の音響計測など、音響に関する幅広い分野で重要な課題である。現在、最も確立された形で空気吸収による音の減衰を計算する方法を示しているのは1978年に出版されたANSI (米国国家規格; AMERICAN NATIONAL STANDARDS)の規格²⁾で、計算精度が良いことと適用範囲が広いことから多くの音響分野(航空機騒音の分野を除く)で利用されるに至っている。1983年になってISO(国際標準機構; INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION)で環境騒音の予測を目的として屋外騒音伝搬の評価方法を規格化する作業が始められ空気吸収の計算方法についても検討が進められている。ANSIの方法の完成度が高いことからそれを基本に草案作りが行われており、しばらく前に草案の第2版が配布されたところである³⁾。検討の主眼は広帯域騒音の場合の計算方法の精度向上に置かれているが、これは航空機騒音への適用を念頭に置いたものである。

ここではISOの検討グループのまとめ役であるカナダのJ. E. Piercyが草案作りの背景を説明するため

に作成した資料⁴⁾などに基づいて空気吸収を計算する方法の歴史的な変遷や現状および問題点を紹介する。

2. 初期の研究⁵⁾

空気吸収による音の減衰の研究は19世紀のStokesやKirchhoffにまで遡ることができる。Stokesは粘性による音の吸収を計算した。Kirchhoffは熱伝導による音の吸収を計算した。現在これらは古典吸収として知られる。時代が下り1930年代にはKnudsenおよびKneserの著名な研究がある。Knudsenは室内で音の減衰を測定して空気吸収の大きさが古典吸収から計算される値より大きいことを示した。その後、Kneserはその違いが酸素分子の振動緩和現象(分子吸収)で説明できることを示した。1970年頃までは空気吸収を考慮しなければならない分野は建築音響が主であり3kHz付近から上の周波数(3~15kHz)を問題にしていたので、古典吸収とKneserの分子吸収理論を若干修正したものだけで用が足りた。

3. 空気吸収の実験室実験

空気吸収の計算式の定数や係数の決定に頻繁に利用されているハリスの実験について簡単に紹介する⁷⁾。ハリスの実験は内径1.68mの鉄球を使って行われた。鉄球は周囲に銅管を取り付けて冷却液を通して一定の温度が保たれた。鉄球内部の空気は常にポンプを使って飽和器を通して循環され湿度が制御された。試験音はバンドノイズで、球壁に取り付けたスピーカからプローブを通して内部へ放射された。空気吸収係数は試験音を止めた後の残響時間を計ることによって調べられた。

4. SAEおよびハリスの方法^{6), 7)}

ジェット機が出現して屋外での長距離騒音伝搬が地域の環境計画に大きな影響を及ぼし始めた1960年頃になると地域騒音を予測する上で2kHz付近から下の可聴周波数(100~1kHz)の音の評価が最も重要になってきたが、この帯域についてKneserの方法では空気吸収を著しく小さく見積もってしまうことがわかった。これを解決するために、新たに2つの

*Absorption of Sound by the Atmosphere

**Ichiro Yamada (Kobayasi Institute of Physical Research)

計算方法が相次いで提案された。SAE/A21 委員会（米国自動車工業会；SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS の委員会）が作成した方法(SAEの方法)とハリスが提案した方法(SAEと似ているが殆ど用いられなかった)である。その頃はまだ低域周波数の音の空気吸収を正しく記述する理論が確立されていなかったため、実験結果と合うように既存の理論を調整するという経験的なやり方で計算方法が確立されているが、工学的に見て十分な実用性を備えている。これらの方法によって低域周波数の計算精度が大幅に改善された。SAE の方法は航空機の騒音証明手順を記述するICAO(国際民間航空連盟；INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION)のANNEX16⁸⁾、ISO 3891⁹⁾などに採用された。1975年にはSAE 法の改訂版が出され、グラフ表示の曖昧さを除くために計算式による算出法が導入されたが、基本的には計算方法も空気吸収係数の値も原版と変わらない。1988年にICAO/ANNEX16の最新版が出版されたが空気吸収の計算方法の記述はISO3891を引用する形からANNEX16

表-1 $\eta(\delta)$ の値

δ	η	δ	η
0.00	0.000	2.30	0.495
0.25	0.315	2.50	0.450
0.50	0.700	2.80	0.400
0.60	0.840	3.00	0.370
0.70	0.930	3.30	0.330
0.80	0.975	3.60	0.300
0.90	0.996	4.15	0.260
1.00	1.000	4.45	0.245
1.10	0.970	4.80	0.230
1.20	0.900	5.25	0.220
1.30	0.840	5.70	0.210
1.50	0.750	6.05	0.205
1.70	0.670	6.50	0.200
2.00	0.570	7.00	0.200
		10.00	0.200

表-2 f_0 の値

1/3オクターブバンド 中心周波数	f_0 の値 (Hz)	1/3オクターブバンド 中心周波数	f_0 の値 (Hz)
50	50	800	800
63	63	1000	1000
80	80	1250	1250
100	100	1600	1600
125	125	2000	2000
160	160	2500	2500
200	200	3150	3150
250	250	4000	4000
315	315	5000	4500
400	400	6300	5600
500	500	8000	7100
630	630	10000	9000

の中に付録として全て記載する形に変えられた。この間の事情には後述する ISOの現状や雰囲気が反映されているものと推測される。

SAE の方法では空気吸収による単位距離当たりの音の減衰量が音の周波数と気温、相対湿度の3つの変数の関数として表および計算式で与えられている。表では変数の範囲は(周波数；50~10000Hz，気温；-10~40℃，相対湿度；10~100%)となっている。計算式の方は周波数；50~10000Hz，気温；2~30℃，相対湿度；30~90%の範囲の測定データに合致するように作られている。参考までに計算式を式(1)に示す(ICA0/ANNEX16/1988⁸⁾より)。

$$\alpha(i) = 10^{**} [2.05 \cdot \log(f_0/1000) + 0.0011394 \times \theta - 1.916984] + \eta(\delta) \times 10^{**} [\log(f_0) + 0.00842994 \times \theta - 2.755624] \quad (1)$$

$$\delta = (1010/f_0)^{1/2} \times 10^{**} [\log H - 1.328924 + 3.179768 \times 10^{-2} \times \theta] \times 10^{**} [-2.173716 \times 10^{-4} \times \theta^2 + 1.7496 \times 10^{-6} \times \theta^3] \quad (2)$$

ただし、 $\alpha(i)$ は i 番目の 1/3オクターブバンドの単位距離(100m)当たりの減衰量である。 $\eta(\delta)$ の値は表-1で、 f_0 の値は 1/3オクターブバンド毎に表-2で与えられる。 θ はセ氏温度、 H は相対湿度である。

5. 空気吸収のメカニズムの確立

その後 2kHz 付近から下の周波数での空気吸収を

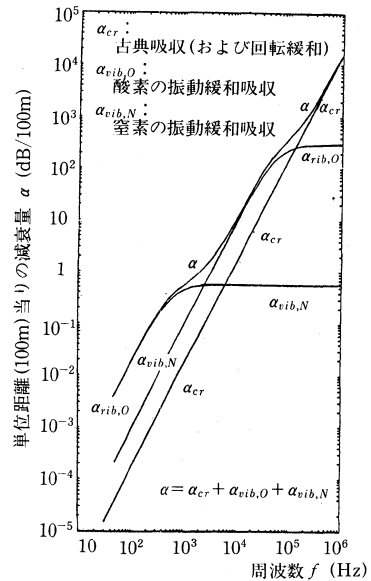


図-1 空気吸収の各要因と周波数の関係

$T = T_0 = 293.15K (20^\circ C)$, $p_s/p_{s,0} = 1$, $h = 1.614\%$
($h_s = 70\%$, 相対湿度)

厳密に記述するには新たな吸収メカニズムを見つけないければならないことが認識され、それは窒素分子の振動緩和であることが発見された。こうして、古典吸収および酸素と窒素の分子レベルのプロセスによる回転緩和、振動緩和という4つの主な吸収メカニズムから成る物理学的に確立された公式に基づいて純音の空気吸収を計算することができるようになった¹⁾。これらの要因による吸収と周波数の関係を図-1に示す²⁾。古典吸収と回転緩和はよく似た振る舞いをし周波数の2乗に比例して大きくなるが、寄与が大きくなるのは超音波領域である。可聴周波数領域で寄与の大きいのは、窒素と酸素（特に窒素）の振動緩和で、周波数が低いところでは周波数の2乗に比例して大きくなるが、高い周波数では一定値になる。

6. ANSIの方法²⁾

上述のように空気吸収メカニズムに関する確立された知識に基づいて ANSI の空気吸収計算の規格が1978年にANSI/S1.26-1978として出版された。SAEの方法の頃に比べて理論的にも十分裏打ちされているし、式の定数や係数を決める際もより信頼性の高い実験データが利用できた（3ヵ国、10種類の異なる実験室実験の結果から成る膨大な測定データに合致するように定数や係数が調整された）ため、減衰量の計算値と測定データとの一致は非常に良い。

ANSIには次に示す3通りの場合の計算方法が示されている。計算には4つの変数（音の周波数と大気条件を表す3つの変数、気温、圧力、湿度あるいは水蒸気量）が必要である。

- 1) 音の伝搬する経路に沿う単位距離当りの純音の減衰がどのくらいになるかを計算式や表から算出する方法。ただし、表は1気圧の場合のみ。
- 2) 広帯域雑音をバンド(1/n オクターブバンド)に分けたときのバンド音圧レベルの減衰を純音の計算式を使い積分して算出する手順。
- 3) 2)の近似法としてバンドパスフィルタの中心周波数の純音の減衰を代用する方法。

純音に対する減衰の計算方法は表と計算式で示されているが、適用範囲が広く実験室データとの比較による計算精度も示されている。表の適用範囲は（周波数；50～10000Hz、気温；0～40℃、相対湿度；10～100%、気圧；海面気圧）であるが、計算精度は±10%と優れている。計算式の方は、表と同一の精度で（周波数/音圧比；40～10⁶ Hz/atm、気圧；2 atm 以下）をカバーするが、気温と相対湿度の範囲は同じである。計算式を式(3)以下に示す。

$$\alpha = 869 \times f^2$$

$$\begin{aligned} & \cdot [1.84 \times 10^{-11} (p_s/p_{s0})^{-1} (T/T_0)^{1/2} \\ & + (T/T_0)^{-5/2} \{1.278 \times 10^{-2} [\exp(-2239.1/T)] \\ & / [f_{r.o} + (f^2/f_{r.o})] + 1.068 \times 10^{-1} \\ & \times [\exp(-3352/T)] / [f_{r.n} + (f^2/f_{r.n})] \}] \\ & \quad \quad \quad (\text{dB}/100\text{m}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_{r.o} &= (p_s/p_{s0}) \\ & \cdot \{24 + 4.41 \times 10^4 h \times [(0.05 + h)/(0.391 + h)]\} \\ & \quad \quad \quad (\text{単位Hz}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_{r.n} &= (p_s/p_{s0}) (T/T_0)^{1/2} \\ & \cdot [9 + 350 \cdot h \cdot \exp(-6.142 [(T/T_0)^{-1/3} - 1])] \\ & \quad \quad \quad (\text{単位Hz}) \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 T , p_s , h , f はそれぞれ、絶対温度(K)、気圧(P_a)、水蒸気モル濃度(%), 周波数(Hz)である。また $T_0=293.15\text{K}$, $p_{s0}=101.325\text{Pa}$ である。

広帯域騒音の減衰はバンドパスフィルタの中心周波数の純音の減衰から推定されているが、減衰の大きい場合（長距離および高い周波数）に誤差が大きくなる。A特性騒音レベルで環境騒音の将来予測を行うような場合は問題ないが、航空機の騒音証明のように様々な大気条件下で観測された騒音の測定値を標準大気条件の値に換算する精密な解析の場合には精度が十分とは言えない。

ANSI/S1.26-1978の出版後、航空機関係の音響技術者や騒音証明試験を行う政府担当者などSAEの方法を利用している人達の間でもANSIの方法（特に純音の空気吸収の計算方法）がSAEの方法に比べて一段と確立された科学的基盤に基づいて作られていることや広い周波数、気温、湿度の範囲にわたって精度良く空気吸収を計算できることは認められるようになったが、広帯域騒音をバンドパスフィルタで解析する場合の計算方法の精度が高いと言えないことや実際の航空機騒音データでANSIとSAEの計算値にどの程度の違いが生じるか調べられていないことからANSIの方法が採用されるには至らなかった。そのため現在でも騒音証明の方法を記述するICAO/ANNEX 16やFAR/Part36では空気吸収の計算にSAEの方法が使われている。

音源から離れたところで測定される広帯域騒音をバンド毎に解析する際の補正に用いるにはもっと精度の高い積分近似法が必要であることはANSIの検討グループ(ANSI/S1/WG2)でも認められていたことであるが、その方法を開発することは実際問題としてなかなか難しい。主な理由の一つは「広帯域騒音の2乗平均音圧スペクトルレベルを音源から離れた受音点で推定する方法に有効なものがないこと」、もう一つは「バンド音圧レベルの測定値からバンドパスフィルタの応答の影響を取り除く方法が解析的にも経験的にもないこと」である。観測される音の

ベクトルに急な傾斜がある（高い周波数や音源からの距離が大きい場合によく起こる）場合にバンドパスフィルタを用いるとかなり大きなレベル誤差を生じることはよく知られている事実である。

7. ISO/DP9613/1

ISO/DP9613/1はISOの空気吸収計算の規格草案で、環境騒音予測を目的にISO/TC43/SC1/WG24が1983年に検討を開始した屋外騒音伝搬の評価方法の規格の一つである。同じ1983年にANSI/S1.26-1978の改訂作業に着手したANSI/S1/WG2と緊密な連絡を取りながら作業が進められている。

ISO/DP9613/1の草案の初版(N578)はANSI/S1.26-1978を基に作成され1987年に委員会メンバーに配布されたが、多くの意見が返されたためそれらを踏まえて草案が書き直され、1989年4月に草案の第2版(N655)が配布された。初版に返された意見は主にSAE/A21委員会(米国代表を介して)が出したものであった。なお、これをきっかけにSAE/A21の方でも航空機騒音の伝搬に関係する現象を委員会の検討対象に含めることとなった。その結果、SAE/A21とISO/TC43/SC1/WG24、ANSI/S1/WG2の間で密接に連絡が保たれるようになった。

SAE/A21の関心は航空機、特に高速で回転する複数のプロペラを持つ最新式の推進システム(超高バイパス比エンジンあるいはプロップファンと呼ばれる;以下ATP;Advanced Turbo Propと省略する)によって発生する騒音が地上の観測者へ伝わる際の減衰を計算する、新しい計算方法にある。ATPは現在のジェット推進型エンジンと同じ巡航速度と巡航高度で航空機を推進させるのに十分な推力を発生することができるものである。ATPから発生する騒音で問題となるのはブレードの通過に伴う離散的な周波数の音でおよそ100~500Hzの範囲にある。巡航時にはブレードが音速に近いチップスピード(ブレード先端の回転速度)で回転するため、非常に大きな音圧となる。そのため、ATPの騒音は10kmもの巡航高度から層状大気を通して伝搬した後でも現在のジェット機より大きな環境騒音問題になる可能性がある。ATP騒音の空気吸収はSAEの方法では精度良く計算できない。SAEの方法は大気圧を変数に含んでいないので、減衰に影響する変数(特に水蒸気量と大気圧)が伝搬経路の途中で大きく変化することを反映できないためである。

ISO/DP9613/1初版(N578)はANSI/S1.26-1978を基本に作成されたが、主な違いは次の通りである。

1) 純音については大きな変更はないが、国際規格に相応な形式に整えるための編集上の手直しがなさ

れた他、減衰係数の計算式の定数と係数の値が調整された。調整はANSIの検討グループとの議論の結果によるもので新しいデータを含む膨大な実験室データに当てはまるように修正されたが、定量的な変化は小さく減衰係数に10%を越える変化をもたらすことは殆ど無い。筆者の手元に資料がないので正確なことは言えないが、この修正は最近改訂されたANSI/S1.26-1978にも反映されているものと考えられる。

2) バンドパスフィルタで解析される広帯域騒音の計算方法については精度別にA~Cの3通りの方法が提示された。これはISO/DP9613/1が航空機の騒音証明にも採用できる精度の高い標準的な方法の構築を目指していることによる。方法AはANSIと同じくバンドパスフィルタの中心周波数の純音の空気吸収から減衰を計算する近似法であるが、誤差を抑えるべく一層の注意が払われた。方法BとCは航空機騒音に関する経験を踏まえて開発されたものである。さらに、ANSIでは層状の大気を伝わる音の減衰の計算は純音に限られていたが、N578では広帯域騒音も含むように拡張された。

次に、ISO/DP9613/1第2版(N655)への主な変更点は以下のとおりである。既に述べたように、初版に寄せられた意見に基づいて修正されたものである。

1) 純音については技術的な変更はないが、編集上の変更が若干あった他、高度20kmからの伝搬に対応できるように温度と絶対湿度の下限が拡張された。ただし、精度は±50%である。

2) バンドパスフィルタで解析される広帯域騒音の計算方法については大幅に書き直された。方法Aは残されたが、BとCは支持されなかったため破棄された。代わりに、ANSI/S1.26-1978の付録Cの「汎用積分法による手順」に置き換えられた。これは純音の減衰に基づく厳密な積分手順を理論的に記述したものである。

N655には新たに付録Cが付け加えられた。これは「広帯域騒音あるいは広帯域騒音と離散周波数の音を組合せた音に対して $1/n$ オクターブバンドのバンドパスフィルタを使って解析する」という特別な場合に適合する幾つかの実用的および標準的な方法を開発するためのものである。目下、ANSI/S1/WG2とSAE/A21の主催のもとに、DP9613/1(N655)付録Cの原理を応用するための近似法および実用法で航空機騒音に関する要求に適合できるものの開発と検証を目指して作業が進められているところである。

8. ISO/DP9613/1第2版とSAEの方法の比較

表-3はSAEとN655の2つの計算方法の違いを定量的に見たものであり、気温-10~+35°C、相対湿

表-3 SABの方法とISO/DP9613/1の方法による
1/3オクターブバンド音圧レベルの空気吸収の比較
(SABの方法とISO/DP9613/1の値の比を示してある)

(気温)(相対湿度)		1/3オクターブバンド中心周波数 Hz							
(°C)	(%)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
35	90	10.3	5.1	2.6	1.56	.92	.85	1.06	1.00
	50	5.8	2.9	1.54	1.00	.84	1.01	1.17	.83
	10	1.33	.87	.82	1.13	1.25	1.22	1.04	0.76
20	90	4.8	2.4	1.45	.97	1.00	1.20	1.13	.71
	50	2.7	1.53	1.00	.96	1.13	1.13	.97	.65
	10	.91	.98	1.29	1.48	1.20	1.04	.94	.97
5	90	2.25	1.31	1.07	1.21	1.24	1.09	.94	.65
	50	1.45	1.06	1.10	1.29	1.27	1.09	.90	.74
	10	1.45	1.50	1.31	1.04	.89	.90	1.05	1.21
-10	90	1.36	1.32	1.52	1.60	1.29	1.06	.99	.95
	50	1.39	1.62	1.57	1.33	1.11	.95	.99	1.08
	10	1.31	.83	.59	.70	.63	.84	1.45	1.15

+5°~+20°の平均:(2.26)(1.46)(1.20)(1.15)(1.11)(1.08)(.99)(.82)

(注)実線で囲んだ範囲は広く活用される気温・相対湿度・周波数を示す。

度10~90%, 周波数バンド; 63~8000Hzの8つのオクターブバンドについて SAB法の計算結果とN655(気圧1atm)の結果の比を算出したものである。減衰の測定や活用が最も頻繁に行われる変数の範囲を実線で囲んで示してあるが、この範囲では2つの方法の計算結果に大きな違いはなく、誤差は10~20%以下である。しかし、この範囲から離れるに従って違いは増大する。絶対湿度の高い湿った空気の中では、低周波数で違いが急激に増大し、例えば周波数63Hz, 気温35°C, 相対湿度90%では930%になる。非常に乾燥した空気の中でも違いは非常に大きく、例えば気温-10°C, 相対湿度10%では周波数によって-40~+31%まで違いが変化する。この違いはSABの方法が経験的に調整された方法であり、四角の領域の外では基礎データが少なく適切な評価式が求められていないために生じる誤差である。

9. さいごに

大気中を伝搬する音の減衰を評価するための空気吸収の計算方法について現在に至るまでの流れや問題点などを簡単に紹介した。常々利用していながら、その減衰のメカニズムや計算式の根拠については振り返る機会はありませんのが現状である。理論的な基礎などを説明するには至らなかったが、参考文献に掲げた資料などで補われたい。

参 考 文 献

- 1) L. C. Sutherland: "Review of Experimental Data in Support of a Proposed New Method for Computing Atmosphere Absorption Losses," DOT-TST-75-87, 1975.
- 2) ANSI/S1. 26-1978: "Method for the Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere".
- 3) ISO/DP9613/1: "Acoustics-Attenuation of Sound during propagation outdoors, Part I: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere", ISO/TC43/SC1 N655.
- 4) J. E. Piercy: "Background Information Concerning Second Version of ISO/DP9613/1".
- 5) H. E. Bass et al.: "Physical Acoustics," Vol. XVII, Chapter 3, ed. W. P. Mason and R. N. Thurston, Academic Press, N. Y. 1984.
- 6) SAB Committee A-21, Aerospace Recommended Practice ARP866 (1964), & revised version, ARP866A (1975).
- 7) C. M. Harris: "Absorption of Sound in Air Versus Humidity and Temperature," J. Acoust. Soc. Am. 40 (1966).
- 8) ICAO ENVIRONMENTAL PROTECTION, ANNEX16, VOL. I, AIRCRAFT NOISE, 2'nd edition (1988).
- 9) ISO3891: "Acoustics-Procedure for describing aircraft noise heard on the ground,".