

動的モデルによる道路交通騒音の
予測・評価手法に関する研究

**Study on the prediction and evaluation method
for road traffic noise based on a dynamic model**

丸山光信

Mitsunobu Maruyama

目次

1 章	道路交通騒音の予測・推定モデルとその問題点	1
1.0	基本的な評価量と定義	1
1.0.1	時間重みづけと周波数重みづけされた音圧レベル	1
1.0.2	最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax}	2
1.0.3	時間率騒音レベル L_{AFNT}	2
1.0.4	等価騒音レベル L_{AeqT}	3
1.0.5	単発騒音暴露レベル L_{AE}	3
1.0.6	ピーク音圧レベル L_{Cpeak}	4
1.0.7	時間帯	6
1.0.7(a)	基準時間帯	6
1.0.7(b)	観測時間帯	6
1.0.7(c)	測定時間帯	7
1.1	序論	8
1.2	代表的なモデルの紹介とその開発の経緯	14
1.2.1	一列等間隔等パワーモデル	14
1.2.2	指数分布・Poisson 分布モデル	16
1.2.3	Γ 分布モデル(アーラン分布モデル)	17
1.2.4	ASJ Model 1975 — ASJ RTN-Model 2003	17
1.2.4(a)	ASJ Model 1975	17
1.2.4(b)	ASJ 1993, ASJ Model 1998 及び ASJ RTN -Model 2003	18
1.3	欧米諸国における実務的なモデル	20

1.3.1	FHWA モデル(USA)	20
1.3.2	CoRTN モデル(UK)	22
1.3.3	RLS90 モデル(Germany)	22
1.3.4	MITHRA (France)	23
1.4	最近の国内外の予測・推定モデルの動向	25
1.4.1	最近接音源モデル	25
1.4.2	ASJ RTN-Model 2008	26
1.4.3	P. Pamanikabud らによる <i>Leq</i> 20s モデル	26
2	2 章 道路交通騒音の動的モデルの提案	28
2.1	モデル化の方法	29
2.1.1	道路を小区分に等分割する交通流モデル	29
2.1.2	1 区分 ΔX_j の長さとお観測距離 d_0 との関係	30
2.1.3	有効区分の範囲	31
2.1.4	音の強さと適切な積分時間	32
2.2	観測点での音の強さと A 特性音圧レベル L_{pA}	35
2.2.1	時刻 $t - d_0/c$ における各仮想点音源の音響パワー	35
2.2.2	時刻 t において観測される音の強さと音圧レベル	36
2.3	実測値との対応	36
2.3.1	瞬時騒音レベル $L_{pA}(t)$ に関する実測値との比較検討	36
2.3.1(a)	L_{pA} の測定方法	36
2.3.1(b)	L_{pA} の計算方法	37
2.3.2	実測との比較	40
2.3.3	一日における L_{Aeq1h} の時間推移	44
2.3.3(a)	L_{Aeq1h} の測定方法	44

2.3.3(b) L_{Aeq1h} の計算方法	44
2.3.4 検討	45
2.4 まとめ	49
3 章 各種交通条件が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響と 実測時間長 T の検討	50
3.1 各種交通条件が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響	50
3.1.1 交通量の影響	52
3.1.2 大型車混入率の影響	55
3.1.3 平均車速度の影響	55
3.1.4 通過車両台数の影響	58
3.2 各種交通条件による L_{AeqT} の信頼区間に関する検討	61
3.3 安定な L_{Aeq1h} を得るのに要する時間長 T^*	64
3.4 最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の出現間隔に関する検討	65
3.4.1 L_{AFmax} 間の平均時間間隔 \bar{t}	65
3.4.2 ΔX 又は d_0 と D_{min} の関係	69
3.4.3 主要区分	70
3.4.4 平均継続時間 H	70
3.4.5 L_{AFmax} の平均再来時間 $\tilde{\Theta}$	71
3.5 結果及び検討	72
3.5.1 大型車混入率 p 及び平均車速度 \bar{V} の影響	73
3.5.2 交通量 Q の影響	73
3.5.3 通過車両台数 n との関係	76
3.6 まとめ	77

4 章	最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} と等価騒音レベル L_{AeqT} との関係	79
4.1	昼間と夜間の L_{AeqT} のレベル差 ΔL_{AeqT}	79
4.1.1	理論的考察	80
4.1.2	実測及びシミュレーション計算結果との比較検討	80
4.2	昼夜間における L_{AFmax} の差 ΔL_{AFmax}	84
4.2.1	理論的考察	84
4.2.2	実測及びシミュレーション計算結果との比較	85
4.3	L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差 $\Delta L_{AFmax/eq}$	87
4.3.1	レベル差 $\Delta L_{AFmax/eq}$ の上限 $\Delta L_{max/eq}^{(\infty)}$	87
4.3.2	レベル差 $\Delta L_{AFmax/eq}$ の下限 $\Delta L_{max/eq}^{(1)}$	88
4.3.3	実測及びシミュレーション結果	90
4.4	まとめ	93
5 章	昼間と夜間における L_{AFmax} の発生状況	94
5.1	シミュレーションによる検討	94
5.1.1	交通量(大型車)と L_{AFmax}	94
5.1.2	大型車混入率と L_{AFmax}	97
5.1.3	車速度と L_{AFmax}	97
5.2	L_{AFmax} の発生回数に関する簡易計算法	97
5.2.1	主要区分内の大型車が 1 台の場合	98
5.2.2	主要区分内の大型車が 2 台の場合	99
5.2.3	主要区分内の大型車が 3 台の場合	101
5.3	シミュレーション計算と簡易計算結果	102
5.4	まとめ	105

6章	道路交通騒音の変動幅とその簡易計算	106
6.1	主要区分内の大型車による観測点での音の強さ $I^{(M)}$	106
6.2	最近接音源とダイナミックレンジ	108
6.3	残留騒音源による音の強さ ΔI_N	109
6.4	残留騒音源による補正	111
6.5	騒音レベル L_{pA} の変動幅(R_{90} 及び R_{95})	113
6.6	シミュレーション実験による変動幅の照合	113
6.6.1	夜間における L_{pA} の累積度数分布と変動幅	114
6.6.2	昼間における L_{pA} の累積度数分布と変動幅	117
6.7	観測距離と変動幅	120
6.8	まとめ	122
7章	総括	123
7.1	研究成果のまとめ	123
7.2	今後の課題	126
	Appendix 1 MCMC 法アルゴリズム	127
	Appendix 2 静的モデルによる高速道路沿道での 予測式(A-1)の導出	129
	謝辞	130
	参考文献	131

1 章 道路交通騒音予測・推定モデルとその問題点

1.0 基本的な評価量と定義

この節では、環境騒音、主として道路交通騒音でよく用いられる基本的な評価量について概説すると共にそれらの定義について述べる[1-2]。

1.0.1 時間重みづけと周波数重みづけされた音圧レベル(time-weighted and frequency-weighted sound pressure level)

IEC 61672-1 規格に示さる騒音計の実効値検出回路の標準となる時間重み特性フィルタには応答が速い特性(F 特性)と遅い特性(S 特性)とがある。JIS C 1505 及び JIS C 1502 には前者の時定数を 125 ms に、後者のそれを 1s に規定している。対象とする騒音の変動特性によって使い分けられる。また周波数重み特性フィルタには A 特性(人間の聴覚の特性のひとつである、音の大きさ(loudness)を考慮した特性)と C 特性とがある。現在市販されているほとんどの騒音計(sound level meter)にはこれらすべてのフィルタが内蔵されており、これらの騒音計を用いて測定した実効値音圧 p_A (A 特性音圧)と基準の音圧 p_0 の比の 2 乗をレベル表示した量[dB]で表す。特に、 L_{pAF} の添字 p 又は F を省略した、記号 L_{pA} 及び L_A を A 特性音圧レベルという。また単に騒音レベルともいい、次式で定義される。

$$L_{pA} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{p_A}{p_0} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (1.1)$$

ここで、 $p_0 = 20[\mu\text{Pa}]$ 。

1.0.2 最大 A 特性音圧レベル (maximum time-averaged and frequency-weighted sound pressure level)

騒音計の速い時間重みづけ特性(F 特性)を使って測定した騒音レベルの最大値を表わす量である。因みに、遅い時間重みづけ特性(S 特性)を使って測定した最大騒音レベルは L_{ASmax} なる記号で表す。時に道路交通騒音を取り扱った文献・資料には、 L_{AFmax} の添字 $_{AF}$ を省略して L_{max} と略記していることがある。以前、この量はピーク(音圧)レベルと呼ばれていたが、真の音圧のピークレベルと区別するために最近よく用いられるようになった。

1.0.3 時間率騒音レベル L_{AFNT} (percent exceedance level)

騒音計の F 特性で測定された騒音レベルの値が考慮している時間帯 T の $N\%$ にわたって超えている場合、そのレベルを $N\%$ 時間率騒音レベルという。 L_{ANT} の添字 $_{AT}$ 又は $_T$ を省略して、例えば実測時間 T 中の騒音レベルの中央値を L_{A50} 、 L_{50} 等と記述することがある。

1.0.4 等価騒音レベル L_{AeqT} (equivalent-continuous sound pressure level)

変動する騒音の A 特性瞬時音圧 $p_A(t)$ と基準の音圧 p_0 の比の 2 乗を考慮される時間帯 $T = t_2 - t_1$ [s] にわたって積分し、かつその時間で時間平均し、レベル表示した量 [dB] で表し、次式のように定義される。

$$L_{AeqT} \equiv 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad [\text{dB}] \quad (1.2)$$

ここで、 T は時刻 t_1 から時刻 t_2 までの実測時間長、 $T = t_2 - t_1$ である。

式(1.2)は、実測時間 T 中の変動騒音の総エネルギーはこの時間帯中の定常騒音のエネルギーと等価であることを意味する。1.0.3 と同様に L_{AeqT} の添字 AT 又は T は省略され L_{Aeq} , L_{eq} と記述されることがある。

1.0.5 単発騒音暴露レベル L_{AE} (single-event sound exposure level)

単発騒音レベルは、考慮される騒音が単発的である場合(間欠騒音、衝撃騒音、時間交通量が極めて少ない道路交通騒音等)、A 特性瞬時音圧 $p_A(t)$ と基準の音圧 p_0 との比の 2 乗を時刻 t_1 から時刻 t_2 までの対象とする騒音の継続時間を含む時間にわたって積分し、単位時間 $T_0=1$ [s] で基準化してレベル表示した量 [dB] で定義される:

$$L_{AE} \equiv 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right\} \quad [\text{dB}] \quad (1.3)$$

L_{AE} の添字 A は省略して L_E と略記することがある。又、単に騒音暴露レベルと言うことがある。

1.0.6 ピーク音圧レベル L_{Cpeak} (peak sound pressure level)

ピーク音圧と基準の音圧の比の 2 乗をレベル表示した量[dB]で定義される。ここで、ピーク音圧とは標準化された周波数重みづきの騒音計で測定され、記述される時間帯中の瞬時音圧の最大絶対値である。ISO 1996-1: 2003(E)の注には、次のように述べている: ピーク音圧レベルは IEC 61672 によって定格化した検出器(騒音計)で決定されるべきである。IEC 61672 では C 特性を使った騒音計の精度のみを指定する[1-2]。

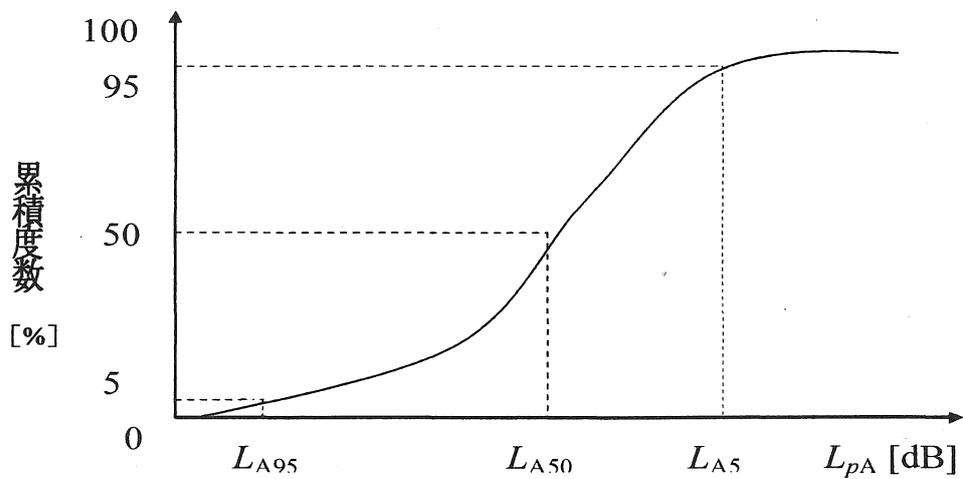


図 1-1 騒音レベル L_{pA} の累積度数分布

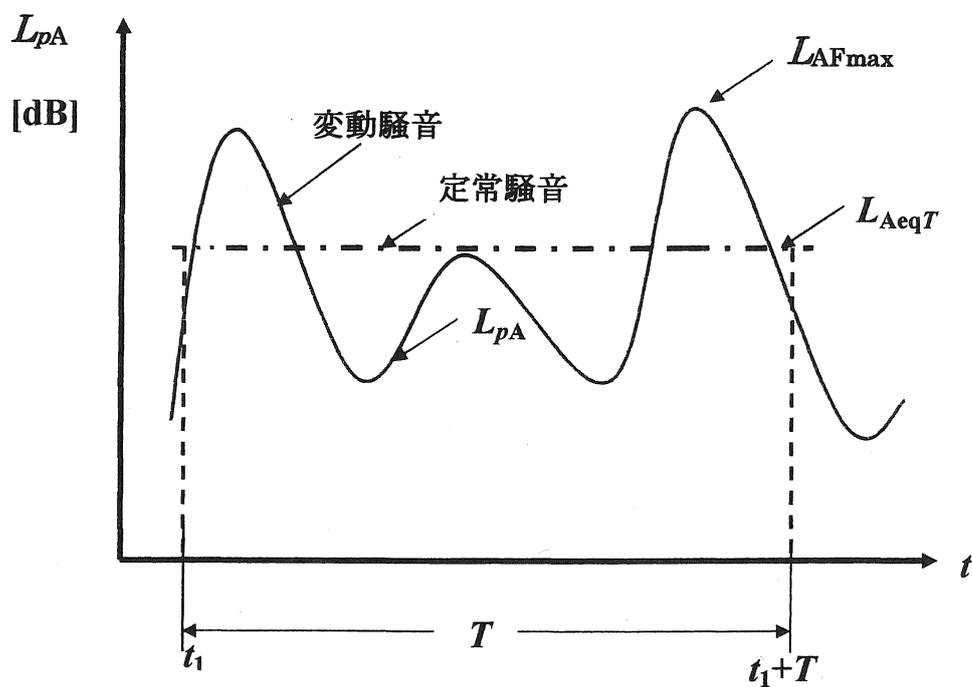


図 1-2 変動騒音と等価騒音レベル L_{AeqT} の関係

1.0.7 時間帯(time interval)

1.0.7(a) 基準時間帯(reference time interval)

対象とする騒音を評価する際に参照となる時間帯のことである。ISO 1996-1:

2003(E)には注として次のように記述している:

基準時間帯は代表的な人間活動と音源操作における変動にわたっているために国家、国際標準または地方の当局者によって指定してもよいとしている

[1-2]。基準時間帯は例えば、一日の一部(1時間毎、昼間、夜間等)、まる一日(一日24時間)、または全一週間にとってもよいとしている。基準時間帯は国によっては更に長い時間帯に決めることがある(図1-3を参照)。

1.0.7(b) 観測時間帯(observation time interval)

基準時間をいくつか分割し、個々の分割した時間間隔を観測時間帯という。なお、観測時間帯は必ずしも連続的にとる必要はなく、離散的にとってもよい。また、基準時間帯を分割しないで、基準時間帯と観測時間帯とを同じ時間長にとる場合がある[3]。

1.0.7(c) 測定時間帯(measurement time interval)

測定時間帯は各基準時間帯(または観測時間帯)内で 1 回もしくはそれ以上にわたって連続的に測定する時間長のことである。測定時間帯は実測時間帯、実測時間長または単に測定時間、実測時間ということがある。

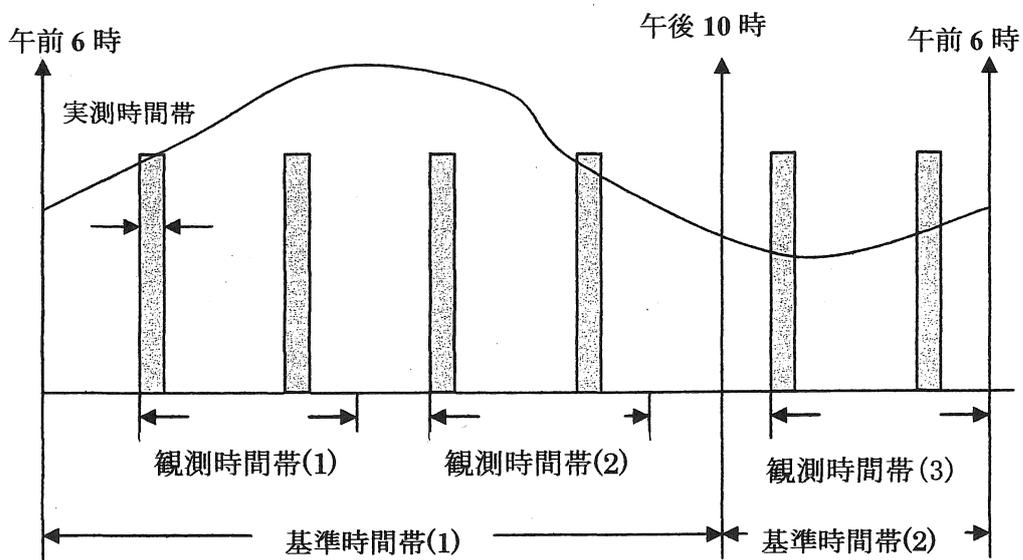


図 1-3 基準時間帯、観測時間帯及び実測時間帯との関係

1.1 序論

平成 11 年 4 月 1 日、等価騒音レベル L_{AeqT} に基づく新しい環境基準が施行された。道路に面する地域における環境基準値は、幹線道路に近接する空間で昼間(6:00–20:00)と夜間(20:00–6:00)の両時間帯で、各々 70dB 以下[45dB 以下]、65dB 以下[40dB 以下]に定められている。但し、[]内は屋内基準値である。

平成 21 年 12 月 18 日、前年度の自動車騒音の環境基準達成状況が環境省から発表された[4]。報告書によると、幹線道路に近接する空間において、一般国道の 25% (565.1 千戸中 140.7 千戸)の住居戸数が昼間又は夜間の基準値を超えていた。又夜間のみ限定すると更にその割合が増加し、52% (2269 の測定地点中 1179 地点)の一般国道が夜間の基準値 65dB を超過していた。また約 15% (2269 の測定地点中 322 地点)の一般国道が 6dB 以上基準値を超えていた。高速自動車国道でも 15% (144 の測定地点中 22 地点)が基準値を超過していた。このような状況下にあつて環境に配慮した新たな道路交通計画が早急に望まれる。そのためには沿道の近接空間において、騒音レベルと交通条件(交通量、大型車混入率、平均車速度)との関係、特に L_{AeqT} のみならず最大 A 特性音圧レベル(騒音レベルの最大値) L_{AFmax} や変動幅を考慮した道路交通騒音の適切な予測・評価手法の確立が望まれる。

道路交通騒音(以後 RTN と略す)を予測するための数学モデルを大別すると、静的モデルと動的モデルに分類される。静的モデルは L_{AeqT} や中央値 L_{A50} などある特定の

騒音評価量を算定するために RTN の動的な面を無視して考案されたモデルである。

後に述べる等間隔・等パワーモデル、線音源モデルなど実用性を重要視した既存のモデルのほとんどが静的モデルである。

一方、動的モデルは時々刻々と変動する RTN の現実の姿、時間的变化の様子を表現するモデルである。このモデルは、 L_{AeqT} 、時間率騒音レベル L_{ANT} 、 L_{AFmax} やその出現頻度、騒音レベルの変動、累積度数分布など RTN に関するあらゆる量を求めることができる。その方法は、モンテカルロシミュレーションにより交通流を発生させ、その時間的变化に伴う沿道の騒音レベル L_{pA} を追跡する。つまり、計算機上で、交通流や音の伝搬を適切に模擬し、沿道における騒音の瞬時レベルを算定(計測)することによって、RTN 予測に関する総合的なアプローチを可能にしている。

静的モデルの特徴は適用範囲を限定し簡易で実用的な予測を実現している反面、騒音の有する動的な諸特性を取り扱うことができない。一方、動的モデルの特徴は現場実測と同様、時々刻々と変動する騒音レベル L_{pA} の瞬時値を追跡することによりあらゆる評価値を算定できるが、反面結果の数式表示(因果関係を把握すること)は困難である。

RTN は等価騒音レベル L_{AeqT} による評価が国内外で主流となっているが、目下のところ次のような課題が残されている。

1. 安定した L_{AeqT} を得るための観測時間(実測時間)長 T をどの様に設定すべきか?

2. 騒音暴露の概要や騒音に対する日常的な印象は L_{AeqT} で評価できるにしても、
全て L_{AeqT} で評価できる訳ではない。特に夜間の睡眠への影響を評価する場合
には最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の挙動や騒音の変動幅に関する情報が必要不
可欠である。

既存の予測モデル(静的モデル)では L_{AeqT} の算定はできても上記計測上の問題(T の
選定)や変動騒音の評価に重要な最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} や騒音レベルの変動幅
の予測には無力である。

本論文は時々刻々と変動する高速道路・幹線道路沿道での騒音を予測・推定するた
めの適切な動的モデルを提案し、上記課題の解決を目指すものである。

1 章では従来提案された国内外の代表的な静的モデルの予測・推定手法の特徴を概
観すると共にその手法の問題点を整理する。

2 章では高速道路沿道での騒音を予測・推定するための動的モデルの提案を行う。
更に、提案するモデルの有効性を検証するためにシミュレーション実験を行う。シ
ミュレーション結果を、実測結果と国内外の代表的静的モデルより推定された計算結
果と比較検討する。

3 章では信頼できる等価騒音レベルの値を推定するために、適切な実測時間長 T の
選定方法について提案する動的モデルに基づくシミュレーション実験により検討し、
その有効性を検証する。

4 章では昼間と夜間の L_{AeqT} のレベル差及び各時間帯での L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差

に関する知見を得るために、動的モデルによるシミュレーション計算を行うと共に簡易計算手法を提案し、これらの計算結果と実測結果を比較検討する。また、簡易計算手法の有効性を示す。

5章では昼間と夜間の L_{AFmax} の発生状況(発生頻度や発生回数など)を把握するために、動的モデルにもとづくシミュレーション実験を行うと共に簡易計算手法を提案し、両者の結果を比較検討する。また、簡易計算手法の有効性を検証する。

6章では RTN の変動幅を見積る簡易な予測計算手法を提案し、その有効性をシミュレーション実験により比較検討する。

7章では本研究で得られた知見や成果を要約すると共に今後の課題について言及している。

尚、本研究の流れを要約すれば図 1-4 の様に示される。

1章 道路交通騒音の予測・推定モデルとその問題点

- ・ 代表的モデルの紹介とその開発の経緯
- ・ 欧米諸国の実務的なモデル
- ・ 最近の国内外の予測・推定モデルの動向

2章 道路交通騒音の動的モデルの提案

- ・ モデル化の方法

道路の等分割 交通流のモデル化 有効区分の範囲
音の強さの積分時間 1区分の長さ と有効区分の範囲

- ・ 観測点での音の強さと A 特性音圧レベル L_{pA}
仮想点音源の音響パワー 観測点での音の強さ(音圧レベル)
- ・ 実測値と既存の静的モデルとの比較検討 L_{pA} L_{Aeq1h}

3章 各種交通条件が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響と実測時間長 T の検討

- ・ 交通条件が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響
交通量 大型車混入率 平均車速度 通過車両台数
- ・ L_{AeqT} の信頼区間
- ・ 実測時間長 T の検討
- ・ L_{AFmax} 間の平均時間間隔 \bar{t} と平均再来時間 $\bar{\theta}$ の検討

次頁

へ

前頁
から

4章 最大A特性音圧レベル L_{AFmax} と等価騒音レベル L_{AeqT}

- ・ 昼間と夜間の L_{AeqT} のレベル差
実測及びシミュレーション実験による検討
- ・ 大型車による騒音の最大A特性音圧特性 L_{AFmax}
- ・ L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差
実測及びシミュレーション実験による検討

5章 昼間と夜間における L_{AFmax} の発生状況

- ・ 各種交通条件と L_{AFmax} の発生状況との検証
- ・ シミュレーション実験による L_{AFmax} の発生状況の検証
- ・ L_{AFmax} の発生回数に関する簡易計算式の提案
- ・ シミュレーション計算と簡易計算結果

6章 道路交通騒音の変動幅とその簡易計算式

- ・ 大型車と残留騒音による時間率騒音レベル
- ・ 小型車と残留騒音による時間率騒音レベル
- ・ シミュレーション実験と簡易計算式による変動幅との照合
- ・ 観測距離と変動幅の比較検討

7章 総括

- ・ 研究成果のまとめ
- ・ 今後の課題

図1-4 研究の流れ図

1.2 代表的なモデルの紹介とその開発の経緯

この節では、既存の代表的なモデルについて概説するとともに日本音響学会を中心とした我が国におけるモデル開発の経緯を述べる。

1.2.1 一列等間隔等パワーモデル

このモデルは 1963 年庄司、山本、中村によって提案された。その 5 年後に Johnson と Saunders によってほぼ同じ式が発表され、国内外で広く普及することとなった[5-6]。図 1-5 に示すように、このモデルは無限に長い一直線上を等しい音響パワーを有する車群(無指向性点音源)が等間隔(従って、等速度)で図の左側から右側へ定常走行していることを仮定している。

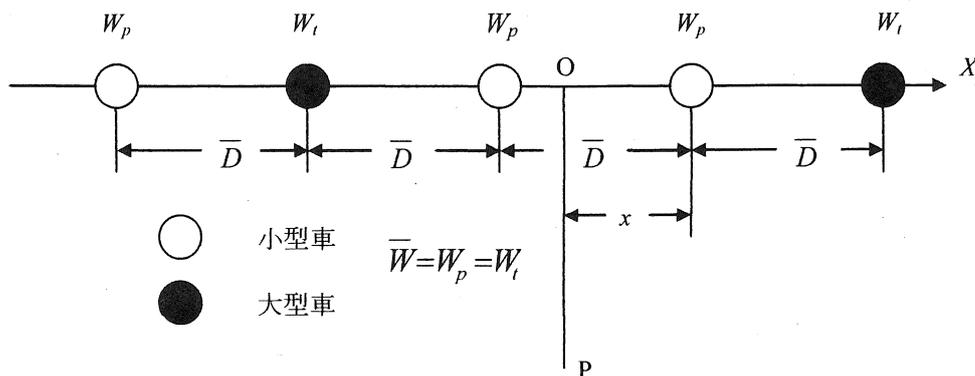


図 1-5 一列等間隔・等パワーモデル模式図

点 P における音の強さ I_p は、

$$I_p = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\bar{W}}{2\pi} \times \frac{1}{d_0^2 + (x+n\bar{D})^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.4)$$

ここに、 \bar{W} : 音源(車)の平均音響パワー[W]。 d_0 : 観測距離[m]。 \bar{D} : 平均車間間隔[m]。 式(1.4)は双曲線関数を用いて

$$I_p = \frac{\bar{W}}{2d_0\bar{D}} \times \frac{\sinh \frac{2\pi d_0}{\bar{D}}}{\cosh \frac{2\pi d_0}{\bar{D}} - \cos \frac{2\pi x}{\bar{D}}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.5)$$

と表せる[7]。 (1.5)式をレベル表示すると、騒音レベル L_{pA} は

$$L_{pA} = 10 \log_{10} \frac{I_p}{I_0} = L_{\bar{W}} - 10 \log_{10}(2d_0\bar{D}) + 10 \log_{10} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi d_0}{\bar{D}}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d_0}{\bar{D}}\right) - \cos\left(\frac{2\pi x}{\bar{D}}\right)} \quad [\text{dB}] \quad (1.6)$$

となる。ただし、 x は観測点に最も近い音源(車両)の座標を表す。 I_0 は基準となる音の強さで、 $I_0 = 10^{-12} [\text{W/m}^2]$ 。 $L_{\bar{W}}$ は車(点音源)のパワーレベル[dB]。

このモデルに対する観測点の等価騒音レベル $L_{\text{Aeq}T}$ は

$$L_{\text{Aeq}T} = L_{\bar{W}} - 10 \log 2d_0\bar{D} \quad [\text{dB}] \quad (1.7)$$

となることを考慮し、式(1.7)を変形すれば、騒音レベル L_{pA} は

$$L_{pA} = L_{\text{Aeq}T} + 10 \log_{10} \frac{\sinh\left(\frac{2\pi d_0}{\bar{D}}\right)}{\cosh\left(\frac{2\pi d_0}{\bar{D}}\right) - \cos\left(\frac{2\pi x}{\bar{D}}\right)} \quad [\text{dB}] \quad (1.8)$$

によって与えられる。騒音レベルの中央値 L_{A50} は上式に $x = \frac{\bar{D}}{4}$ を代入することにより、

$$L_{A50} = L_{\bar{w}} - 10 \log_{10} (2d_0 \bar{D}) + 10 \log_{10} \left\{ \tanh \left(\frac{2\pi d_0}{\bar{D}} \right) \right\} \quad [\text{dB}] \quad (1.9)$$

となり、容易に算定できる。この様に等間隔モデルは直感的でわかりやすく計算式も簡単であり、実用的にも学術研究にもその後のRTN予測モデルのさきがけとなった[8]。実際、後に述べるように、1975年に日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会によって提案された方法、通称音響学会式はこのモデルを基に作られた。しかし、RTNの調査・研究が進むにつれて、交通流や車の音響出力等に関し現実とのギャップが様々な指摘されるようになり、モデルに含まれるパラメータの修正や新たなモデルに対する検討が開始されることになった[9]。

1.2.2 指数分布・Poisson 分布モデル

現実の道路を車が他の車の影響を受けずに自由に走行している場合の車間距離は指数分布すると言われている。なお、道路上のあらかじめ定められた区間内に存在する車両台数 n [台/m] 又はある一定時間内に観察点を通過する車両台数 N [台/s] が Poisson 分布することと車間距離 D [m] が指数分布することは同じであることが知られている。 D 、 n (または N) の分布が各々指数分布、Poisson 分布することを仮定したモデルには、Weiss、Kurze、高木ら、久野ら、太田らの研究がある[10–22]。多くの研究者は受音点での音の強さ I の分布及びこれに対応する音圧レベル SPL の確率密度関数を解析的に導出し、その平均値、標準偏差などの統計量を算出することに主要な関心が注がれたが、実用的な結果を得るまでには至らなかった[21–22, 23–24]。

1.2.3 Γ 分布モデル(アーラン分布モデル)

一般に、上述した2つの特別な音源配置の分布(等間隔分布及び指数分布)を包括した確率分布を Γ 分布という。通信工学の分野では、電話の呼と呼の間の時間間隔の分布がこの分布に従うことから研究者の名にちなんでアーラン分布と呼んでいる。この分布モデルは、車間間隔の分布と音の伝搬法則(逆自乗則)を基に音の強さや音圧レベルの分布を導出しようとするモデル化の手法は論理的であるが、実務的な予測計算式を得るのが困難な場合が多い。またRTNの評価の中心が等価騒音レベル L_{AeqT} に移行するにつれて、車間間隔分布の重要性が薄れ、この種のモデルの開発は目下のところあまり進んでいないのが実状である[25]。

1.2.4 ASJ Model 1975—ASJ RTN-Model 2003

1.2.4(a) ASJ Model 1975

このモデルは、観測点での騒音レベルの中央値(L_{A50})を予測・推定することを主たる目的として1975年日本音響学会によって提案され、通称音響学会式と呼ばれている。 L_{A50} は次式(1.10)により算定される。

$$L_{A50} = L_{\bar{w}} - 8 - 20 \log_{10} d_0 + 10 \log_{10} \left(\frac{\pi d_0}{\bar{D}} \tanh \frac{2\pi d_0}{\bar{D}} \right) + \alpha_d + \alpha_i \quad [\text{dB}] \quad (1.10)$$

ここに、 $L_{\bar{w}}$: 一台の車両の平均パワーレベル[dB] d_0 : 車線から観測点までの距離[m] \bar{D} : 平均車間距離[m] α_d : 回折による補正值 α_i : 沿道における地表面条件等種々の原因による補正值である。なお \bar{D} は時間交通量 Q [台/h]及び平均車速度

\bar{V} [km/h]を用い $\bar{D} = \frac{1000\bar{V}}{Q}$ と表される。過度な理想化に伴う実測値との不整合(ギャップ)は種々の原因による補正 α_i を導入することで吸収している。 α_i は道路構造別、距離別、高さ別に整理し、与えられている。この予測式は、現実の道路交通騒音を理想化した状況下で構築しており電卓と補正量 α_d と α_i に関する図表があれば現場で容易に算出でき、実務的である。我が国ではアセスメント等において L_{A50} を予測するために広く用いられてきたが、環境基準の改定により L_{Aeq} に関する予測値が必要となり、新たな予測モデルの開発が日本音響学会を中心に進められることになった[26-28]。

1.2.4(b) ASJ Model 1993, ASJ Model 1998 及び ASJ RTN-Model 2003

ISO1996-part1「環境騒音の記述と測定」が1982年に、part2及びpart3はその5年後1987年に公表され、環境騒音の評価量として等価騒音レベル L_{Aeq} を採用している[29-30]。これに伴い、我が国でもJIS Z 8731「騒音レベル測定法」の全面的改定がおこなわれ、評価量の1つとして L_{Aeq} が採用されることになった[31]。日本音響学会ではこれに対して、予測式の見直しを行ない、平成5年に L_{Aeq} に関する新たな計算式ASJ Model 1993を提案した[32]。

このモデルは、1台の車両が道路上を単独走行したときの予測点(観測点)における騒音レベルの時間的变化(ユニットパターン)及びその時間積分値を求めることを基本としている。観測時間長を T とした場合の等価騒音レベル L_{AeqT} を計算する手順の概

略は次のとおりである。

- (1) 対象とする道路を幾つかの区分に分割する。
- (2) i 番目の区分内に存在する音源(車両)から放射する音響パワー W_i 又はこれに対応するパワーレベル P_{W_i} を設定し、車がこの区分内に存在する時間 Δt_i の予測点における2乗音圧 p_i^2 の時間積分値を計算する。

$$E_i = p_i^2 \Delta t_i = p_i^2 \frac{\Delta \ell_i}{v_i} \quad [\text{Pa}^2 \cdot \text{s}] \quad (1.11)$$

ここに、 $\Delta \ell_i$: i 番目の区分の長さ[m] v_i : i 番目の区分内の車の車速度[m/s]

- (3) 車が道路を通過する間に予測点が暴露される2乗音圧の時間積分値の総量 E を算出する。

$$E = \sum_i^n E_i = \sum_i^n p_i^2 \frac{\Delta \ell_i}{v_i} = \sum_i^n p_i^2 \frac{3.6 \Delta \ell_i}{V_i} \quad [\text{Pa}^2 \cdot \text{s}] \quad (1.12)$$

ここに、 V_i : i 番目の区分内の車の車速度[km/h] ($v_i = V_i / 3.6$ [m/s])

- (4) 式(1.12)をレベル表示し単発騒音暴露レベル L_{AE} を求める。

$$L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0} \quad [\text{Pa}^2 \cdot \text{s}] \quad (1.13)$$

ここに、 $E_0 = p_0^2 \times 1$ [$\text{Pa}^2 \cdot \text{s}$] 基準となる騒音暴露量、 $p_0 = 20$ [μPa]である。

- (5) 式(1.13)を変形して、単位時間あたりの交通量 Q [台/h]を考慮すると、 L_{AeqT}

は次式(1.14)で与えられる。

$$L_{AeqT} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{AE}}{10}} \cdot \frac{Q}{T} \right) = L_{AE} + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{T} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.14)$$

ここに、 T は測定時間長[s]。

L_{AeqT} の予測精度を上げるには一台の走行車両のユニットパターンを如何に正確に算出するかに尽きる。ユニットパターンが精密に得られれば、その積分値と交通条件から容易に L_{AeqT} を算定することができる。その後、このモデルは ASJ Model 1998、ASJ RTN-Model 2003 と 5 年毎に改定がおこなわれ、一般道路の騒音から道路特殊箇所騒音予測、高架構造物音の予測、建物背後における騒音予測など適用範囲を拡大している[33-34]。モデルの構造は単純明解であるが、ユニットパターンの算出精度向上のため多くの回帰式を導入し、計算機の使用を前提としたソフトが販売されている。

1.3 欧米諸国における実務的なモデル

この節では、欧米諸国において RTN を予測・推定する実務的なモデルについて解説する。

1.3.1 FHWA モデル(USA)

FHW (Federal Highway Administration) モデルに関してはレポート番号: FHWA-RD-77-108 というタイトルの報告書が Barry と Regan によって提出されている。代表的な静的モデルであり、その後多くの改定がなされ、現在世界各国で最も普及しているモデルである[35-39]。

このモデルは基本的に次の 3 つの仮定から構成されている。

- (1) 道路上の車群は点音源によって表される。
- (2) 各車種(1:乗用車、2:中型トラッ、3:大型トラック)内の音響パワーレベルは正規分布に従う。
- (3) 伝搬損失は各音源からの距離 R のべき乗に反比例する。実際には車種別 ($i = 1, 2, 3$)に L_{Aeq1h} を次式(1.15)により求める。

$$L_{Aeq1h} = \bar{L}_0 + 0.115\sigma^2 + 10\log_{10} \frac{N\pi D_0}{TS} + 10\log_{10} \left[\frac{D}{D_0} \right]^{1+\alpha} + 10\log_{10} \left(\frac{\psi_{\alpha(\varphi_1, \varphi_2)}}{\pi} \right) + \Delta_S \quad [\text{dB}] \quad (1.15)$$

$L_{Aeq}(1h)_i$: i 番目の車種の 1 時間の等価騒音レベル $L_{Aeq}(1h)_i$ [dB] \bar{L}_0 : 参照距離 D_0 における i 番目の車種の平均音圧レベル [dB] σ_i^2 : i 番目の車種の音圧レベルの分散 D_0 : 参照距離で通常 15[m] D : 車線の中央から受音点までの距離 [m] N_i : 測定時間 T 中に通過した i 番目の車種の車両台数[台] α : 測定地点に依存する地表による超過減衰パラメータ ($0 < \alpha < 1$) S_i : i 番目の車種の平均車速度 [km/h] T : 測定時間(通常 1[h]) φ_1 と φ_2 : 観測点から道路を見通した角度[度] $\psi_{\alpha(\varphi_1, \varphi_2)}$: $\psi = \varphi_1 + \varphi_2$ [度]とおくと、 $\psi_{\alpha(\varphi_1, \varphi_2)} = \frac{\pi}{180} \psi$ [rad] Δ_S : 障壁、建物、樹木等による超過減衰量[dB]。

このモデルの精度は音源(車)から観測点までの距離と車種構成に依存すると言われている。地表面効果を表す減衰パラメータ α は実際には試行錯誤で決められている[38]。計算ソフトとして「STAMINA」が開発、利用されている。

1.3.2 CoRTN モデル(UK)

CoRTN (Calculation of Road Traffic Noise)モデルは Delaney、Harland、Hood、Scholes によって英国環境省において開発された。このモデルは代表的な静的モデルの一つであり、評価量に L_{A10} を採用している。その後、Delaney らによって改定され、Predicting Road Traffic Noise と呼ばれている[40-42]。

自由交通流に対して参照距離における時間あたりの L_{A10} は次式で求められる。

$$L_{A10} = 10 \log_{10} q + 33 \log_{10} (v + 40 + 500/v) + 10 \log_{10} (1 + 5p/v) + 0.3G - 27.6 \quad [\text{dB}] \quad (1.16)$$

ここに、 q : 交通流割合 v : 車速度 p : 大型車混入率 G : 道路勾配

1.3.3 RLS 90 モデル(Germany)

ドイツの自動車専用道路に対する予測式(1990年)に R L S-90 (Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen: Guidelines for Noise Protection on Streets 英語訳)モデルがある。

ドイツの騒音予測に対する匿名の法律基準であり、1990年に発表された。このモデルも典型的な静的モデルである[42, 43]。街路用と高速自動車道路用とに予測式が分かれている。後者の予測式は、各車線に対して、平均レベルは次式(1.17)から計算される:

$$L_m = L_{m,E} + D_{S,\perp} + D_{BM} + D_B \quad [\text{dB}] \quad (1.17)$$

ここに、 L_m は平均レベル $L_{m,E}$: パワーレベル $D_{S,\perp}$: 距離と吸収による減衰
 D_{BM} : 地表面と大気効果による減衰 D_B : 地形と建物の寸法による回折減衰

パワーレベル $L_{m,E}$ は次式(1.18)から計算される:

$$L_{m,E} = L_m^{(25)} + D_V + D_{StrO} + D_{Stg} + D_E \quad [\text{dB}] \quad (1.18)$$

ここに、 D_V ：車速制限に対する補正 D_{StrO} ：路面に対する補正 D_{Stg} ：上りと下りの補正 D_E ：建物面による吸音特性の補正である $L_m^{(25)}$ ：25m 地点での A 特性音圧レベルであり次式(1.19)で与えられる。

$$L_m^{(25)} = 37.3 + 10 \log_{10} \{M(1 + 0.082p)\} \quad [\text{dB}] \quad (1.19)$$

M は対象とする高速道路が連邦道路、州立、地区・管区または地方自治体道路かによって、基準化した交通流である。また p は大型車の混入率である。

1.3.4 MITHRA (France)

MITHRA はフランスの民間会社で作成された計算ソフトである。地形、建物、障害物と共に大気の影響や地表面効果、反射、回折等を考慮した音線追跡を一括して行える。交通流は線音源が仮定されている。道路は5種類に分類されており6タイプの路面が考慮されている。尚、MITHRA は鉄道からの騒音予測計算にも適用される[42]。単位長さあたりのパワーレベルは次のように計算される。

$$L_w = L_{w,vl} + 10 \log_{10} \left[\frac{\text{flow} + \text{flow} \% PL \cdot (EQ - 1) / 100}{V_{50}} \right] - 30 \quad [\text{dB}] \quad (1.20)$$

ここ、 $L_{w,vl}$ ：小型車のパワーレベル flow ：一車線あたりの時間交通量

$\% PL$ ：大型車混入率 EQ ：小型車換算時間交通量 V_{50} ：車速

小型車のパワーレベルは次式(1.21)から得られる。

$$L_{w,vl} = 46 + 30 \log_{10} V_{50} + C \quad [\text{dB}] \quad (1.21)$$

ここに、 $V_{50} < 30 \text{ km/h}$ のとき車速 V_{50} は 30 に置き換える。 C は交通流のタイプにより

3 タイプに分類される。 EQ は車速と道路勾配に依存、表で与えられている。

1.4 最近の国内外の予測・推定モデルの動向

この節では、久野、野呂らによって開発された時間率騒音レベル L_{ANT} を算出する簡易な方法(最近接音源モデル)について述べる[44–46]。更に、現在我が国において環境アセスメント等に用いられている日本音響学会提案の、ユニットパターン(単独車走行波形)に基づく ASJ RTN-Model 2008 等について概説する[47–48]。

1.4.1 最近接音源モデル

1.2.1 の 1 列等間隔等パワーモデル及び 1.2.2 の指数分布モデルのところでも述べたように時間率騒音レベル L_{ANT} のうち L_{A50} を厳密に計算ができるモデルは 1 列等間隔等パワーモデルの場合のみに限られている。従って、それ以外の L_{ANT} の値を求めるには近似的解法に依らざるを得ない。近似方法としては高木らの研究もあるが、ここでは物理的に簡潔明快な久野、野呂らが開発した、最近接音源に基づく方法について概説する[44–46]。尚、本論文の 6 章ではこの近似法を適用して高速道路沿道での L_{pA} の変動幅を導出する[49]。

この方法によれば沿道の L_{A50} ばかりでなく、 L_{A5} 、 L_{A90} 、 L_{A95} 等を近似的にかつ容易に算出することができる。

観測点に最も近い位置にある車両(最近接音源)による音の強さの上位 N %値を \tilde{I}_N とする。その他の車両はバックグラウンド(残留騒音源)と見なし線音源で近似する。この線音源による音の強さを ΔI_N とすれば、観測点での音の強さの上位 N %値 I_N は次式

で近似される:

$$I_N = \tilde{I}_N + \Delta I_N \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.22)$$

これより時間率騒音レベル L_{ANT} は

$$L_{ANT} = 10 \log_{10} \frac{I_N}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (1.23)$$

と表される。更に、この近似法を適用することにより L_{ANT} と L_{AeqT} との関係も容易に求められる。

1.4.2 ASJ RTN-Model 2008

このモデルは ASJ RTN-Model 2003 と基本的な変更はないが、(1) 音源特性 (2) 伝搬計算 (3) 道路特殊箇所の騒音 (4) 高架構造物音 (5) 建物・建物群背後における騒音等について改定をおこなっている[47-48]。

1.4.3 P. Pamanikabud による $L_{eq}20s$ モデル

最近、P. Pamanikabud らによって高速道路上を自由に走行する車群からの騒音の L_{AeqT} を精度良く予測するモデルが提案された[50-51]。Pamanikabud らは L_{Aeq} に関する車種別の 20 秒間の実測値が得られれば、 $L_{eq}(1h)$ は交通条件から精度良く算定できることを述べている。その予測式は次式(1.24)で与えられる。

$$L_{eq}(1h)_{,i} = L_{eq}(20s)_{,i} + 10 \log_{10} \left(\frac{D_0}{D} \right)^\epsilon + 10 \log_{10} N_i - 22.553 \quad [\text{dB}] \quad (1.24)$$

ここに、 $L_{eq}(1h)_i$: 1時間中の*i*車種の等価騒音レベル[dB] $L_{eq}(20s)_i$: 20s間中の*i*車種の等価騒音レベル[dB] N_i : 1時間あたりの*i*車種の車両台数[台/h] ε : 伝搬及び地表面効果係数 D : 観測点から車線中央までの距離[m] D_0 : 放射音レベルが測定された参照距離 (15[m]) i は次の9車種の番号である。(1: 乗用車 2: 軽トラック 3: 中型トラック 4: 大型トラック 5: 全トレーラー 6: 半トレーラー 7: バス 8: 自動二輪車 9: tuk-tuk) 但し、各車種別の $L_{eq}(20s)$ と車速度 km/h との回帰式は表に示されている。 ε は試行錯誤で定められるが、最適値を $\varepsilon=0.66$ にとれば式(1.24)は

$$L_{eq}(1h)_i = L_{eq}(20s)_i + 10 \log_{10} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0.66} + 10 \log_{10} N_i - 22.553 [\text{dB}] \quad (1.25)$$

と表される。なお、 $L_{eq}(1h)$ を交通条件から精度良く算定するためには、短時間(20 s)の実測値が必要である。

2 章 道路交通騒音の動的モデルの提案

沿道における騒音レベルは交通量、車種混入率、車速度、車間距離のような交通条件及び道路からの距離、地表面性状さらには、気象条件(風向・風速、温度・湿度、大気圧)によっても大幅に変動する。出来るだけ多くの変動要因を考慮すべきであるが、あまり多いと却って推定が複雑となるため、これまで提案されたほとんどの数学モデルは主要な2、3の変動要因のみを考慮している。

前章で述べたように沿道での L_{AeqT} を予測するためにこれまで提案されたほとんどのモデルは、観測時間中道路は音源として一定の音を放射していることを仮定している。すなわち、これらのモデルは L_{AeqT} が与えられた条件に応じて一意に決定される静的モデルである[1-6]。これに対し時々刻々変動する沿道の騒音レベルの様子(姿)をできるだけ忠実に表現する方法として動的モデルがある。これは計算機上で交通流を発生させ、音の伝搬則を加味し、観測点における騒音レベルの変動を追跡(シミュレート)するものである。これにより L_{AeqT} 及びその観測時間長 T への依存性を始め、最大 A 特性音圧レベル L_{AeqT} の挙動やレベル変動幅など RTN に係わる様々な情報を取得することができる。本章では安全な車間距離を保ち高速道路を走行する交通流を模擬した動的モデルを提案し RTN 予測におけるその有用性を示す[7-8]。

2.1 モデル化の方法

2.1.1 道路を小区分に等分割する交通流モデル

高速道路上を一定の車速度で自由走行している車群の車間距離が指数分布に従うとし、指数乱数を発生させた場合、車間距離が零または極めて短くなるという不都合がしばしば起こる。提案するモデルでは以下に述べるごとくそのような不都合を避ける配慮をしている。図 2-1 に示すように、道路の中心線を X 軸にとり観測点 P から X 軸に下ろした垂線の足を原点 O、垂線 \overline{OP} の長さを d_0 [m] とする。全ての車は安全な車間距離を保ちながら左側から右側へと X 軸に沿って一定の車速度 \bar{v} [m/h] で走行し、追い越しはないものとする。高速道路上でこの仮定を満足するために要求される最小許容車間距離を D_{\min} [m] とする。

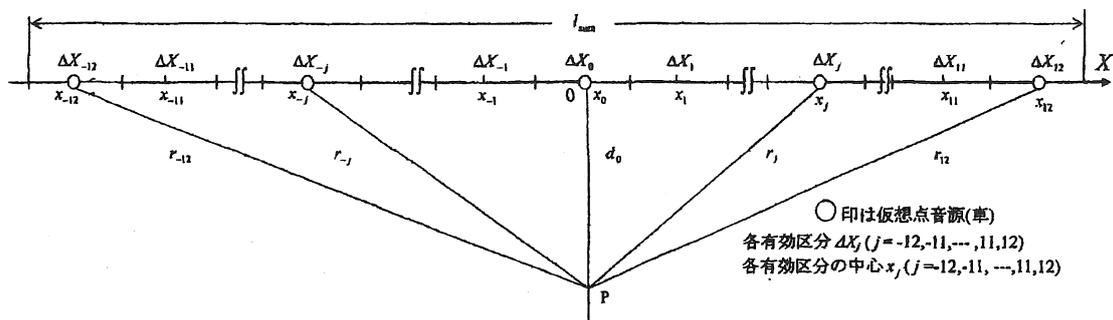


図 2-1 道路上の有効区分の配置

一般に、高速道路を安全に走行するために要求される車間距離はおよそ $\bar{v} \times 10^{-3} \text{ m}$ かそれ以上にとられる。例えば、車が $\bar{V} = 80, 100, 120[\text{km/h}]$ の平均車速度で走行しているならば、 D_{\min} は各々 80、100、120m となる[8]。

平均車速度 $\bar{V} [\text{km/h}]$ と \bar{v} には $\bar{v} = 1000 \bar{V}$ の関係がある。車間距離 D の確率密度関数は

$$P(D) = \lambda_D \exp(-\lambda_D(D - D_{\min})) \quad (D \geq D_{\min}) \quad (2.1)$$

によって与えられる。ここで、平均車間距離 $\bar{D} = 1/\lambda_D + D_{\min}$ 、 $\lambda_D = Q/(\bar{v} - Q \cdot D_{\min})$ 。 Q [台/h] は平均交通量である。更に、(1) 車は点音源とし、(2) 車以外の騒音源はない、(3) 音の伝搬経路上に障害物はない、(4) 気象等による騒音のレベル変動はないものとする。今、図 2-1 に示すように対象とする道路を ΔX_0 を中心に順次等分割 ΔX_j ($j = \pm 1, \pm 2, \dots$) し、各区分の中心を原点 $O(x_0)$ に対して対称に $x_{\pm 1}, x_{\pm 2}, \dots$ にとる。もし、 j 番目の区分の長さ ΔX_j を観測距離 d_0 に対し適切に選択すれば、その区分内の車からの音の全レベルはその区分の中心である、 x_j に置かれた音響パワー $W_j [\text{W}]$ の単一音源からのそれに置き換えて取り扱うことができる。ここで、 W_j は区分 ΔX_j 内に存在する全ての車から放射する音響パワーの和である。

2.1.2 1 区分 ΔX_j の長さと観測距離 d_0 との関係

一定の音響パワー W をもった 1 台の車が ΔX_j の中心 x_j に置かれているとして、同じ音響パワーを有する別の車はその区分の端 $x_j \pm \Delta X_j/2$ のいずれかに置かれているとき、点 P での両車両からの音のレベル差は次のように表される。

$$\Delta L_j = 10 \log_{10} \left[\frac{W/2\pi(d_0^2 + x_j^2)}{W/2\pi\{d_0^2 + (x_j \pm \Delta X_j/2)^2\}} \right] \quad (2.2)$$

いま、

$$|\Delta L_j| \leq 1 \quad [\text{dB}] \quad (2.3)$$

ならば、両方の音源は音の放射において近似的に(実用上)等価と見做されよう。

式(2.2)を式(2.3)に代入すると

$$x_j^2 \pm 4\Delta X_j x_j + (d_0^2 - \Delta X_j^2) \geq 0 \quad (2.4)$$

が成り立つ。式(2.4)を満足する為に要求される判別式 D は

$$D = 4\Delta X_j^2 - (d_0^2 - \Delta X_j^2) \leq 0 \quad (2.5)$$

式(2.5)から ΔX_j は

$$0 \leq \Delta X_j \leq \frac{d_0}{\sqrt{5}} \left(\cong \frac{d_0}{2} \right) \quad (2.6)$$

となる。これより、任意の j 番目の区分に対して ΔX_j が $d_0/2$ に近似的に等しいならば、

前項 2.1.1 で述べた置換が可能である。

2.1.3 有効区分の範囲

P 点に到達する音の強さは理論上は各位置 x_j ($-\infty < j < +\infty$) に置かれた無限に多くの仮想点音源からの音の強さの重ね合わせから成る。しかし、実際上は P 点に寄与する有効な音源としては、 ΔX_0 及び接近したいいくつかの区分内の音源を考慮すれば十分である。以後このような区分を有効区分と呼ぶことにする。音響パワー W_p を有する n_p 台の小型車と W_l を有する n_l 台の大型車が ΔX_j 内に存在する場合、一台当た

りの車の平均音響パワー \bar{W} は

$$\bar{W} = \frac{W_p \bar{n}_p + W_t \bar{n}_t}{\bar{n}_p + \bar{n}_t} \quad [\text{W}], \quad (2.7)$$

で与えられる。これより P 点での音の強さの平均値は各区分内の中心に置かれた仮想点音源から到来する音の強さの平均値の重ね合わせとして得られる。

$$\bar{I}_{\pm\infty} = \sum_{j=0}^{\pm\infty} \frac{\bar{n} \cdot \bar{W}}{2\pi} \cdot \frac{1}{d_0^2 + (j\Delta X_0)^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.8)$$

ここに、 $\bar{n} = \bar{n}_p + \bar{n}_t$ である。

一方、有効区分数を $2J+1$ とすれば $j=0$ から $\pm J$ 迄の区分内の車による P 点での音の強さの平均値は

$$\bar{I}_{\pm J} = \sum_{j=0}^{\pm J} \frac{\bar{n} \cdot \bar{W}}{2\pi} \cdot \frac{1}{d_0^2 + (j\Delta X_0)^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.9)$$

となる。もし、次式(2.10)が満足されれば、上述の $2J+1$ 個の区分を実用的には全有効区分数と見做すことができよう。

$$10 \log_{10} \left(\frac{\bar{I}_{\pm J}}{\bar{I}_{\pm\infty} - \bar{I}_{\pm J}} \right) \geq 10 \quad [\text{dB}] \quad (2.10)$$

式(2.8)と式(2.9)を式(2.10)に代入し J を決定すれば $J=12$ 、即ち全有効区分数として 25 が得られる。

2.1.4 音の強さと適切な積分時間

図 2-1 に示すように各仮想点音源から放射される音のパワーは時刻 $t-d_0/c$ のとき、 W_{-12} 、---、 W_j 、---、 W_0 、---、 W_j 、---、 W_{12} であるとする。 ΔX_j 内の音源の音

響パワー W_j の変化は、 $\Delta X/v$ [s] 毎に瞬時に左から右へと車線に沿って移動する音源によって近似する。すなわち、時刻 $t - d_0/c$ に x_j に置かれた音源の音響パワー W_j は、 $t - d_0/c + d_0/2v$ 迄一定にとどまる。そして瞬時に W_{j-1} に変化し、続く $d_0/2v$ の間一定にとどまる。ここで、 v [m/s] は 1 秒間あたりの平均車速度である。 v と \bar{v} [m/h] には、 $v = \bar{v}/3600$ の関係にある。表 2-1 は音が各仮想点音源から放射される時刻と時刻 t から時刻 $t + d_0/2v$ までの間に観測点で積分される音のエネルギーを示している。従って、時刻 t から $t + d_0/2v$ までの間に点 P で積分される音のエネルギー $J_p(t; d_0/2v)$ は

$$J_p(t; d_0/2v) = \sum_{j=-12}^{12} \frac{J_j(t; d_0/2v)}{2\pi r_j^2} \quad (2.11)$$

$$\text{ただし、 } r_j^2 = d_0^2 + \left(j \frac{d_0}{2}\right)^2 = d_0^2 \left(1 + \frac{j^2}{4}\right)$$

$$J_j(t; d_0/2v) = n_{j+1} W_{j+1} \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right\} + n_j W_j \cdot \left\{ \frac{d_0}{2v} - \frac{d_0}{c} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right) \right\} \quad (2.12)$$

とする。上式は、さらに

$$J_j(t; d_0/2v) = n_j W_j \left(\frac{d_0}{2v}\right) + \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right\} (n_{j+1} W_{j+1} - n_j W_j) \quad (2.13)$$

と変形される。尚、 n_j と n_{j+1} は各々 x_j と x_{j+1} に置かれた区分内の車両台数であり、 c は音速 342[m/s] である。式(2.13)は、 t から $t + d_0/2v$ の時間中に区分 j に置かれた仮

仮想点音源から観測点 P に到達する音のエネルギーを表す。要するに、式(2.12)と式(2.13)は、時刻 t に区分 ΔX_{j+1} 内にある音源が $d_0/2v$ 時にはあらかじめ区分 ΔX_j 内にいたことを意味し、かつその音源は $d_0/2v$ 中 j 番目の区分から P 点に到来する音のエネルギーに寄与することを示す。もし $c \gg v$ ならば、 j 番目の区分に位置する仮想点音源による音のエネルギーは、 $j+1$ 番目の区分に位置する音源とは無関係となり、 t と $t + d_0/2v$ 間の時間中に P 点に到達する音のエネルギー $J_p(t; d_0/2v)$ は、道路の各有効区分内に位置する仮想点音源から到来する音の強さを積分することによって得られる。

表 2-1 各点音源位置から放射される時間と音の放射エネルギー

仮想点音源の位置	時間	音の放射エネルギー
x_0	$\left(t - \frac{d_0}{c}\right) \sim \left(t - \frac{d_0}{c} + \frac{d_0}{2v}\right)$	$J_0 = n_0 W_0 \frac{d_0}{2v}$
$x_{-1} \quad x_1$	$\left(t - \frac{d_0}{c} \sqrt{1 + \frac{1}{4}}\right) \sim \left(t - \frac{d_0}{c} \sqrt{1 + \frac{1}{4}}\right) + \frac{d_0}{2v}$	$J_{-1} = n_0 W_0 \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} - 1 \right\} + n_{-1} W_{-1} \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} - 1 \right\} \right\}$ $J_1 = n_2 W_2 \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} - 1 \right\} + n_1 W_1 \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} - 1 \right\} \right\}$
\vdots	\vdots	\vdots
$x_{-j} \quad x_j$	$\left(t - \frac{d_0}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2}\right) \sim \left(t - \frac{d_0}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2}\right) + \frac{d_0}{2v}$	$J_{-j} = n_{-j+1} W_{-j+1} \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right\} + n_{-j} W_{-j} \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right\} \right\}$ $J_j = n_{j+1} W_{j+1} \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right\} + n_j W_j \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2}\right)^2} - 1 \right\} \right\}$
\vdots	\vdots	\vdots
$x_{-12} \quad x_{12}$	$\left(t - \frac{d_0}{c} \sqrt{1 + 6^2}\right) \sim \left(t - \frac{d_0}{c} \sqrt{1 + 6^2}\right) + \frac{d_0}{2v}$	$J_{-12} = n_{-11} W_{-11} \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + 6^2} - 1 \right\} + n_{-12} W_{-12} \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + 6^2} - 1 \right\} \right\}$ $J_{12} = n_{13} W_{13} \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + 6^2} - 1 \right\} + n_{12} W_{12} \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c}\right) \left\{ \sqrt{1 + 6^2} - 1 \right\} \right\}$

2.2 観測点での音の強さと A 特性音圧レベル L_{pA}

2.2.1 時刻 $t-d_0/c$ における各仮想点音源の音響パワー

もし、時刻 $t-d_0/c$ において区分 ΔX_j 内に存在する車の台数と車種が確率的に推定されるならば、 x_j に位置する仮想音源の全音響パワーも又、次式によって確率的に推定される。

$$W_j = \frac{(n_p)_j W_p + (n_l)_j W_l}{(n)_j} \quad [\text{W}] \quad (2.14)$$

ここで、 $(n)_j = (n_p)_j + (n_l)_j$ 。 $(n_p)_j$ 、 $(n_l)_j$ 及び $(n)_j$ は各々 ΔX_j 内に存在する小型車、大型車及び全車両台数である。 W_p と W_l は各々小型車と大型車の平均音響パワーを表わす。 W_j は区分 ΔX_j 内に位置する車 1 台あたりの音響パワーであるが、式(2.7)の平均音響パワー \bar{W} 及び有効区分数を推定するために使った音響パワー W とは異なる。式(2.14)中の W_j は、与えられた時刻に区分 ΔX_j 内に存在する小型車と大型車の台数に対応して時間と共にランダムに変動する。一方、式(2.7)中の \bar{W} は時間に依らない、ある一定値を示す。ここで、

$$n_j W_j = (nW)_j = (n_p)_j W_p + (n_l)_j W_l \quad (2.15)$$

とおけば、式(2.12)は

$$J_j(t; d_0/2v) = (nW)_{j+1} \left(\frac{d_0}{c} \right) \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2} \right)^2} - 1 \right\} + (nW)_j \left\{ \frac{d_0}{2v} - \left(\frac{d_0}{c} \right) \left(\sqrt{1 + \left(\frac{j}{2} \right)^2} - 1 \right) \right\} \quad (2.16)$$

と表される。

2.2.2 時刻 t において観測される音の強さと音圧レベル

点 P で平均積分時間 $d_0/2v$ [s] 毎に観測される音の強さは式(2.9)と式(2.14)より、

$$I_P(t) = \frac{2v}{d_0} J_P\left(t; \frac{d_0}{2v}\right) = \frac{2v}{d_0} \sum_{j=-12}^{12} \frac{J_j\left(t; \frac{d_0}{2v}\right)}{2\pi r_j^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.17)$$

$r_j^2 = d_0^2 \left(1 + \frac{j^2}{4}\right)$ と表される。従って、時刻 t における点 P での音の強さのレベルは、

$$L(t) = 10 \log_{10} \left(\frac{I_P(t)}{I_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.18)$$

$I_0 = 10^{-12}$ [W/m²] で与えられる。

式(2.16)～式(2.18)が提案するモデル式である。なお、音の強さのレベルは音源の極近くを除けば實際上音圧レベルと等しいから、実測値との対応を考慮し上式を音圧レベルと見なすことにする。

2.3 実測値との対応

2.3.1 瞬時騒音レベル $L_{pA}(t)$ に関する実測値との比較検討

本モデルの有効性を検証するために、高速道路近傍で騒音レベル(A特性音圧レベル) L_{pA} の実測を行ない、式(2.18)から得られるシミュレーション値と比較検討した。

2.3.1 (a) L_{pA} の測定方法

測定は中央自動車高速道(片側2車線、平坦、アスファルト舗装)の建屋・樹木等の障害物がない見通しの良い地点で行った[写真2-1]。一時間あたりの交通量は最大で

も 1000 台またはそれ以下になることを予備調査で確認した。5 分間にわたり L_{pA} のサンプル値を 1 秒間毎に収録すると共に、対象とする片側 2 車線の全ての車の車速度 V [km/h] を測定した。 V は 90–110 km/h の範囲にあり、道路周辺の残留騒音は昼間約 50–52 dB、夜間約 40–42 dB であった。

2.3.1(b) L_{pA} の計算方法

観測点 P での L_{pA} は式(2.18)に基づき数値計算を行った。車間距離、車速度と車の配置順序は L_{pA} を測定したときと全て同じ値を用いた。サンプリング間隔、測定時間についても L_{pA} を測定したときと同じ値を用いた。小型車と大型車のパワーレベルは、RTN を推定するために日本音響学会によって提案された、次式(2.19) “ASJ RTN Model 1993” から求めた[9]。

$$PWL = A * \log_{10} V + B * \text{ [dB]} \quad (2.19)$$

式(2.19)中の車種別回帰係数を表 2-2 に示した。図 2-2 は昼間の、図 2-3 は夜間の L_{pA} の測定データと計算データの比較である。高速道路から 56 m 離れた地点での観測結果であり、参照レベル(0dB)は昼間 50 dB、夜間 47dB とした。

中央自動車道甲府昭和IC竜王付近

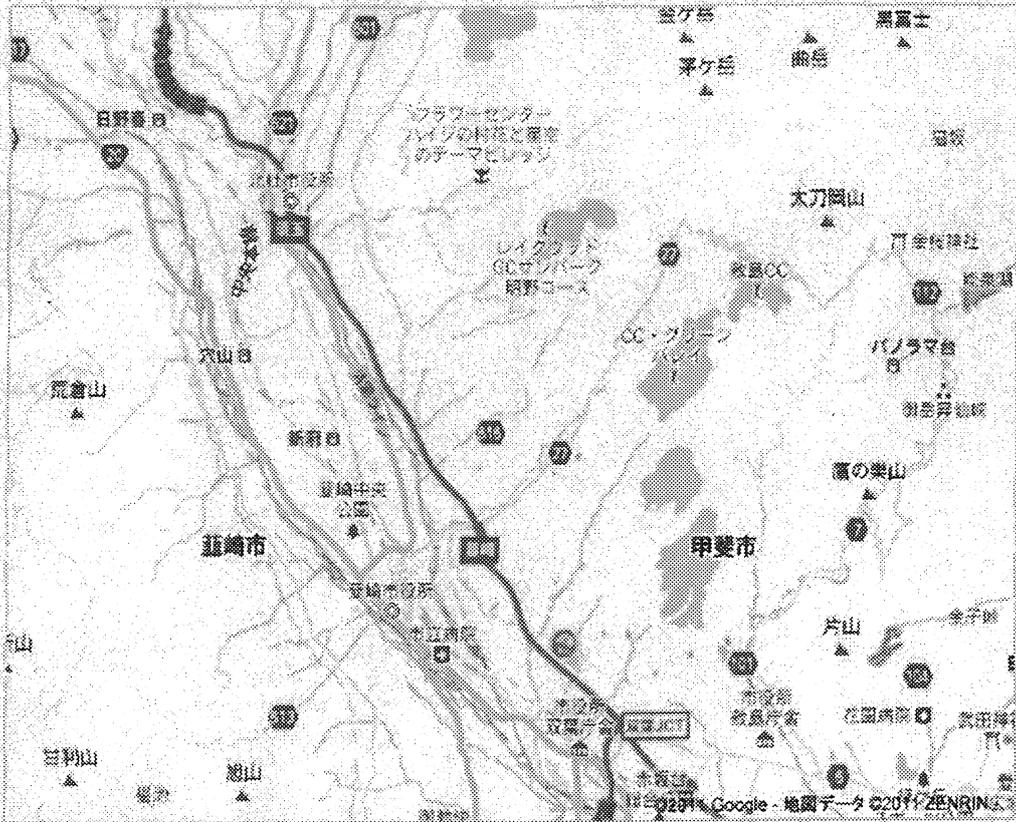


写真 2-1 測定現場地点

表 2-2 ASJ Model 1993 における車種別パワーレベル式の係数 (定常走行)

分類	車種	$PWL = A * \log_{10} V + B * 60\text{km/h} \leq V \leq 120\text{km/h}$	
		A*	B*
3車種 分類	大型車	20	71.6
	小型貨物車	20	66.5
	乗用車	20	64.7
2車種 分類	大型車	20	71.5
	小型車	20	65.1

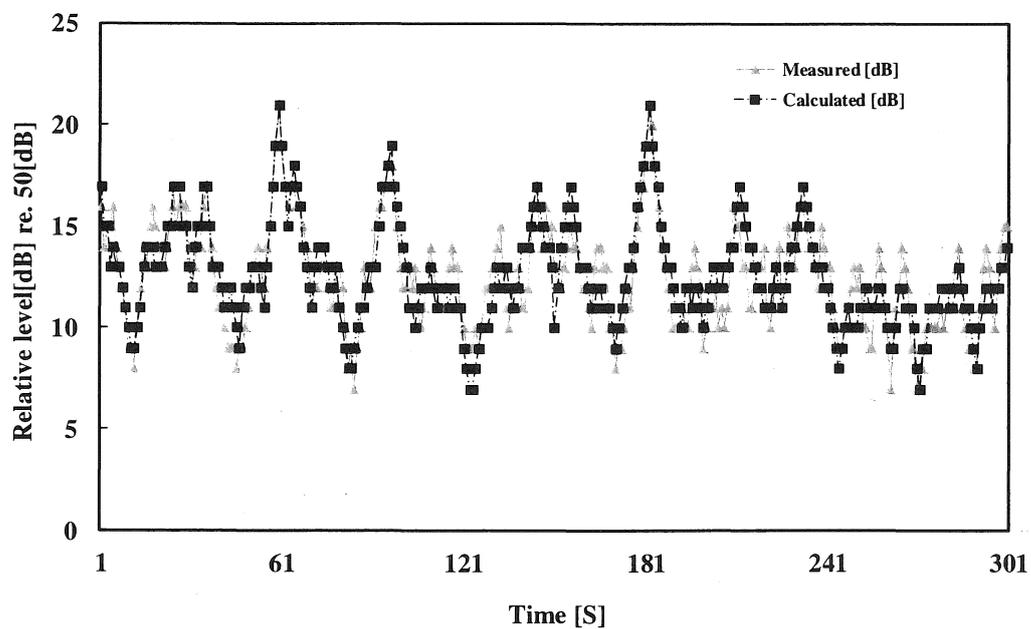


図 2-2 道路から 56m 離れた観測点での L_{pA} (昼間)

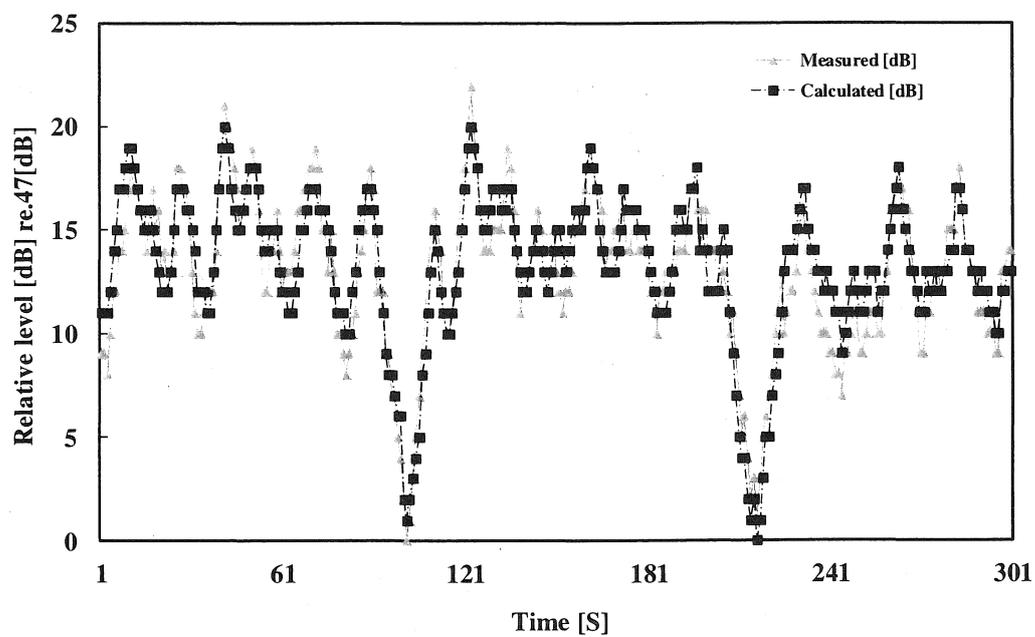


図 2-3 道路から 56m 離れた観測点での L_{pA} (夜間)

2.3.2 実測との比較

図 2-2、図 2-3 より計算値は実際のレベル変動の様子を昼夜ともほぼ忠実に (2dB 以内の誤差で)再現していることがわかる。

次に騒音レベル L_{pA} の累積度数分布に関する計算値(シミュレーション結果)と実現値との対応状況について述べる。 L_{pA} の値は式(2.18)に基づくマルコフチェーンモンテカルロ法(Markov Chain Monte Carlo Method)により求めた(Appendix 1 参照)。以後 MCMC 法と略す[10-11]。図 2-4 は道路から 50m 地点における昼間の、また図 2-5 は夜間の累積度数分布である。昼間の交通量は 837 台/h(小型車 721 台、大型車 116 台)、夜間の交通量は 374 台/h(小型車 313 台、大型車 61 台)である。昼夜間とも累積度数分布のシミュレーション結果は実測と良い一致を示している。騒音レベルの中央値 L_{A50} 及び90%レンジの上下端値(L_{A5} 、 L_{A95})は昼間 65dB(70dB、62dB)、夜間 62dB(69dB、55dB)であり、夜間の交通量は昼間よりかなり少ないにも係わらず、 L_{A5} はほとんど差がないことがわかる。しかしながら、変動幅 90%レンジ(L_5-L_{A95})は、昼間は 8dB、夜間は 14dB と大きく異なり、昼夜の交通量の差異を反映している。

同様に道路から倍距離 100m 地点における昼間及び夜間の累積度数分布をそれぞれ図 2-6、図 2-7 に示す。交通量は昼間 777 台/h(内大型車 77 台)であり、夜間の交通量は 385 台/h(内大型車 68 台)である。何れもシミュレーション結果は実測と良く一致している。騒音レベルの中央値及び90%レンジの上下端値 L_{A50} (L_{A5} 、 L_{A95})は昼間 62dB(66dB、59dB)、夜間 59dB(65dB、53dB)であり、変動幅は夜間において大きいことが

知られる。

夜間の変動幅が大きくなる理由は昼間に比べ交通量が減少し、 L_{A95} (残留騒音レベル)が大幅に低下することにある。 L_{A5} (騒音レベルの最大値)は主として観測点直前を走行する1-2台の大型車により決まることから交通量に余り依存しない[12-13]。

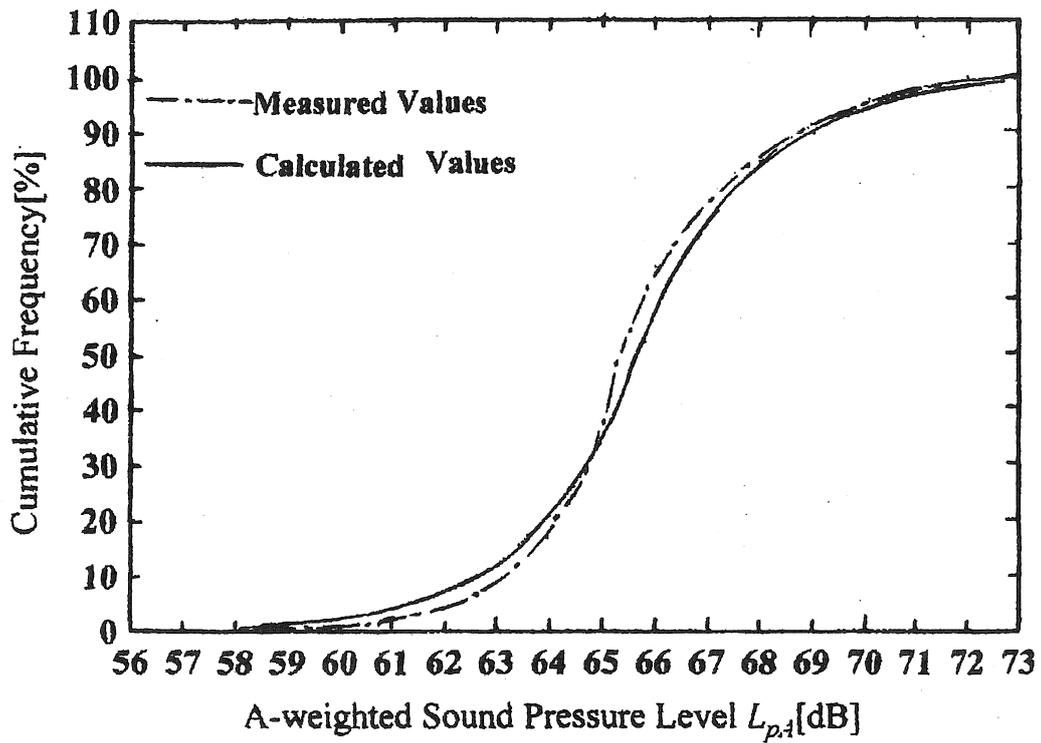


図 2-4 道路から 50m 離れた観測点での L_{pA} の累積度数分布(昼間)

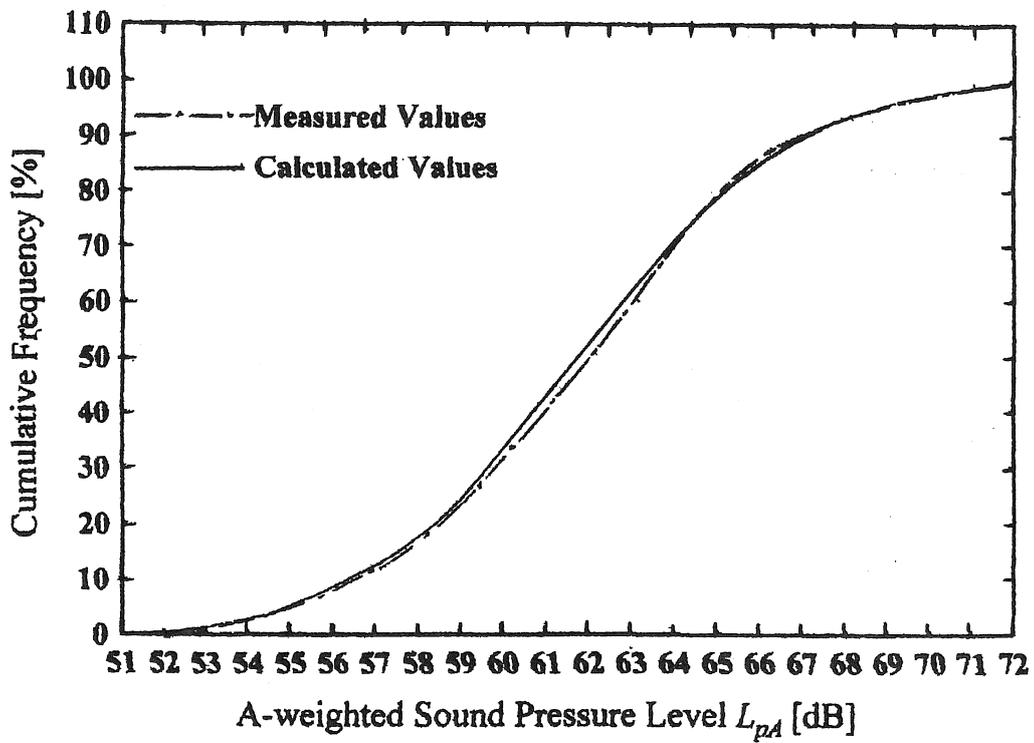


図 2-5 道路から 50m 離れた観測点での L_{pA} の累積度数分布(夜間)

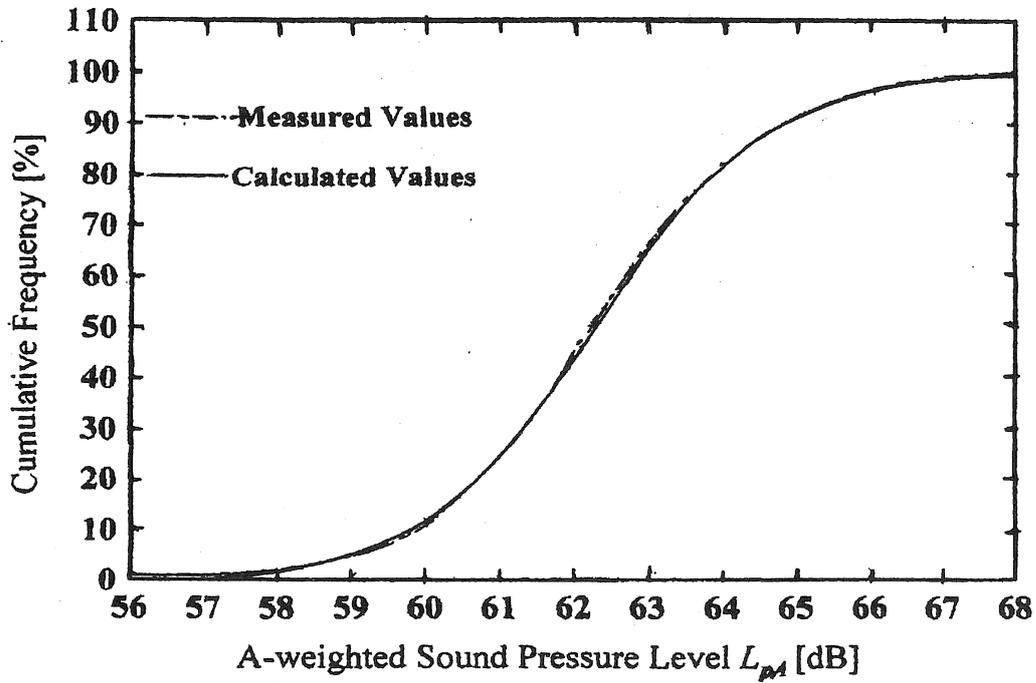


図 2-6 道路から 100m 離れた観測点での L_{pA} の累積度数分布(昼間)

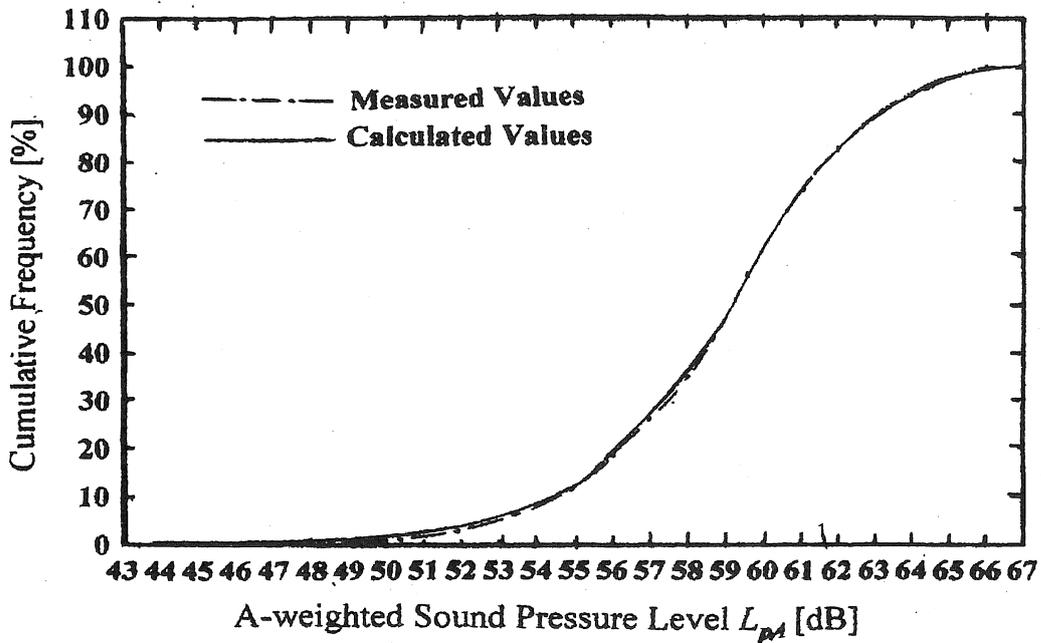


図 2-7 道路から 100m 離れた観測点での L_{pA} の累積度数分布(夜間)

2.3.3 一日における L_{Aeq1h} の時間推移

提案する動的モデルの有効性を更に検証するために、式(1.18)に基づくシミュレーション計算より求めた L_{Aeq1h} の値を、一日 24 時間にわたり測定した実測値並びに他の予測モデル(FHWA モデル式、ASJ RTN Model 1993)を用い算出した値と比較検討した[14-16]。

2.3.3(a) L_{Aeq1h} の測定方法

前述の高速道路の中心から 50 m 離れた地点で L_{Aeq1h} を 24 時間に亘り測定するとともに、各時間帯における交通量、車種、混入率及び車速度の測定をおこなった。車種は 2 カテゴリー、すなわち小型車と大型車の 2 車種に分類した。同様な測定、調査を別の日に道路から 100 m 離れた地点においても実施した。

2.3.3(b) L_{Aeq1h} の計算方法

シミュレーション計算では、車間距離は式(2.1)に従う指数乱数を車種混入率(2 車種構成の割合)には 2 項乱数を用いた。測定した車両及び車種の台数と同数の乱数を発生させた。瞬時騒音レベル $L_{pA}(t)$ のシミュレーション値を基に次式により等価騒音レベル

$$L_{AeqT} \equiv 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right] \quad [\text{dB}] \quad (2.20)$$

を算出した。なお、定常確率過程では上式は集合平均

$$L_{AeqT} = 10 \log_{10} \left\langle \exp \left(\frac{\ln 10}{10} L_{pA}(t) \right) \right\rangle \quad [\text{dB}] \quad (2.21)$$

に等しく、キユムラントを用いて、観測時間長を $T=1\text{h}$ とすれば

$$L_{Aeq1h} = \gamma_1 + 0.115\gamma_2 + 0.0088\gamma_3 + 0.0005\gamma_4 + O(\gamma_5) \quad (2.22)$$

の如く展開される[16]。

ここに、 $\gamma_1 = m$ 、 $\gamma_2 = \sigma^2$ 、 $\gamma_3 = \overline{X^3}$ 、 $\gamma_4 = \overline{X^4} - 3(\overline{X^2})^2$ 、 $X' = L_{pA} - m$ である。ただし、 m 及び σ^2 は各々 $L_{pA}(t)$ の平均と分散を表す。 L_{Aeq1h} の算出には $L_{pA}(t)$ のシミュレーション値と式(2.22)を用いた。

2.3.4 検討

道路から 50m 地点における L_{Aeq1h} 値の実測値とシミュレーション値の一日 24 時間の推移を図 2-8 に示す。シミュレーション値がわずかに高いが、その差は 1dB 以内である。図には FHWA モデル及び ASJ RTN Model 1993 による予測計算結果も併記した。これらの静的モデルによる計算値も実測値とほぼ一致している。図 2-9 は対象とする道路の騒音測定日の時間交通量の推移である。

同様に道路から 100m の地点における L_{Aeq1h} の実測値とシミュレーション値及び静的モデルによる予測計算値との比較を図 2-10 に、また時間交通量の推移を図 2-11 に示す (Appendix 2 参照)。この場合も、シミュレーション値は実測値と良く一致しており、その差は 1dB 以内である。時間交通量は昼間のピーク時には 900 台/h を超えるが夜間では 300 台/h まで減少し、 L_{Aeq1h} の昼夜のレベル差は 100m 地点で 5dB

程度となっている[17-20]。

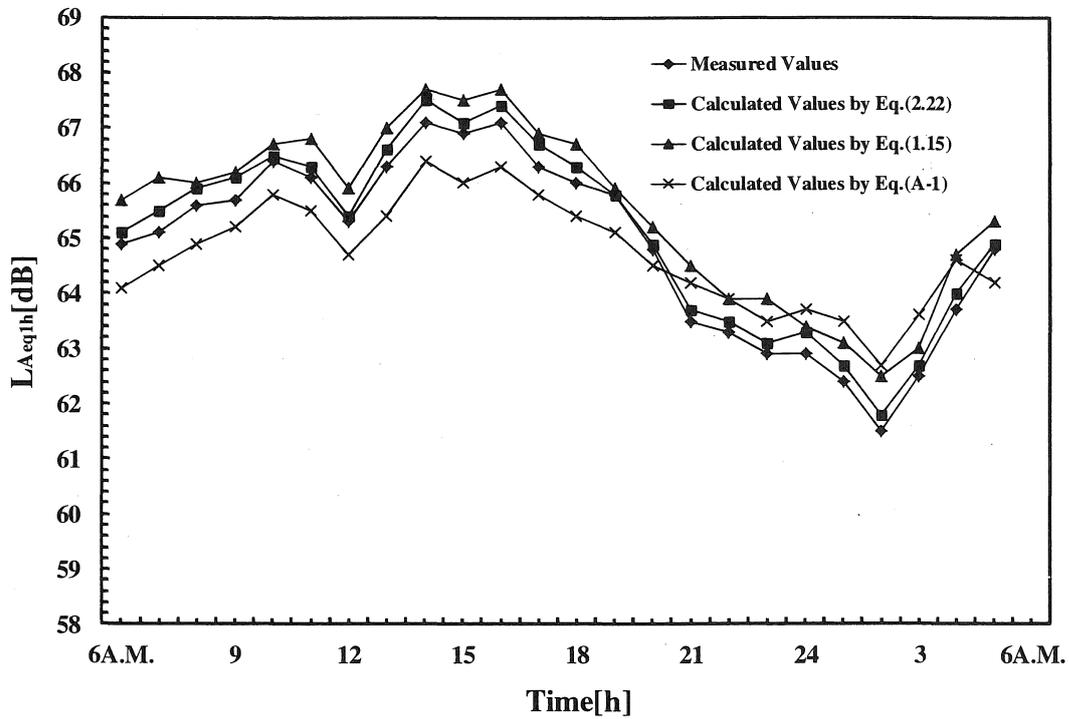


図 2-8 道路から 50m 離れた観測点での L_{Aeq1h} の時間的推移

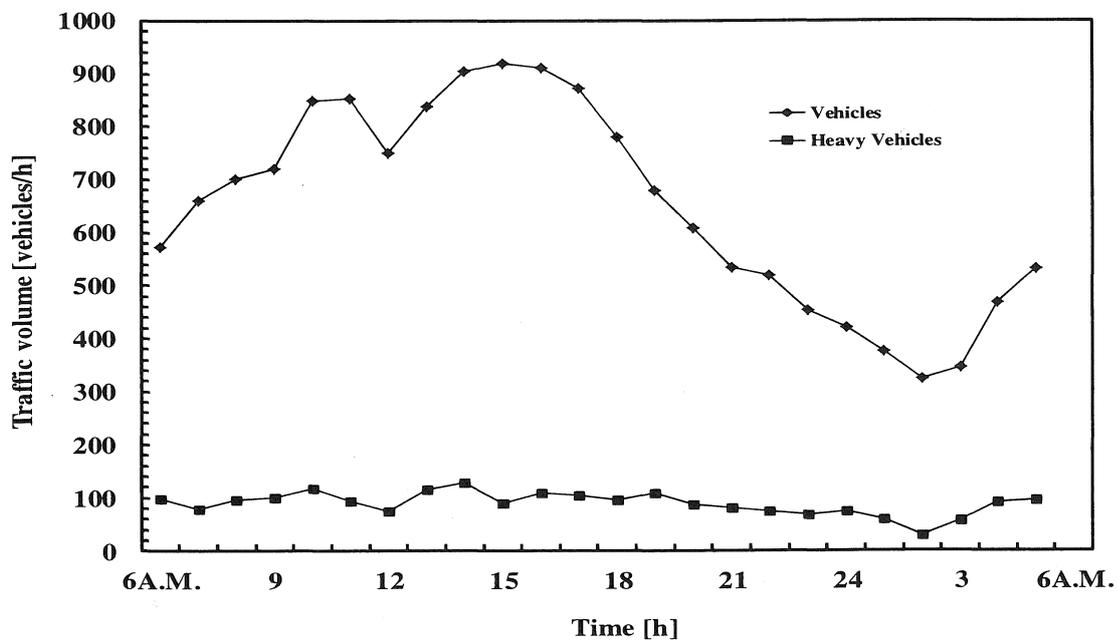


図 2-9 図 2-8 に対応する交通量と大型車の時間的変動

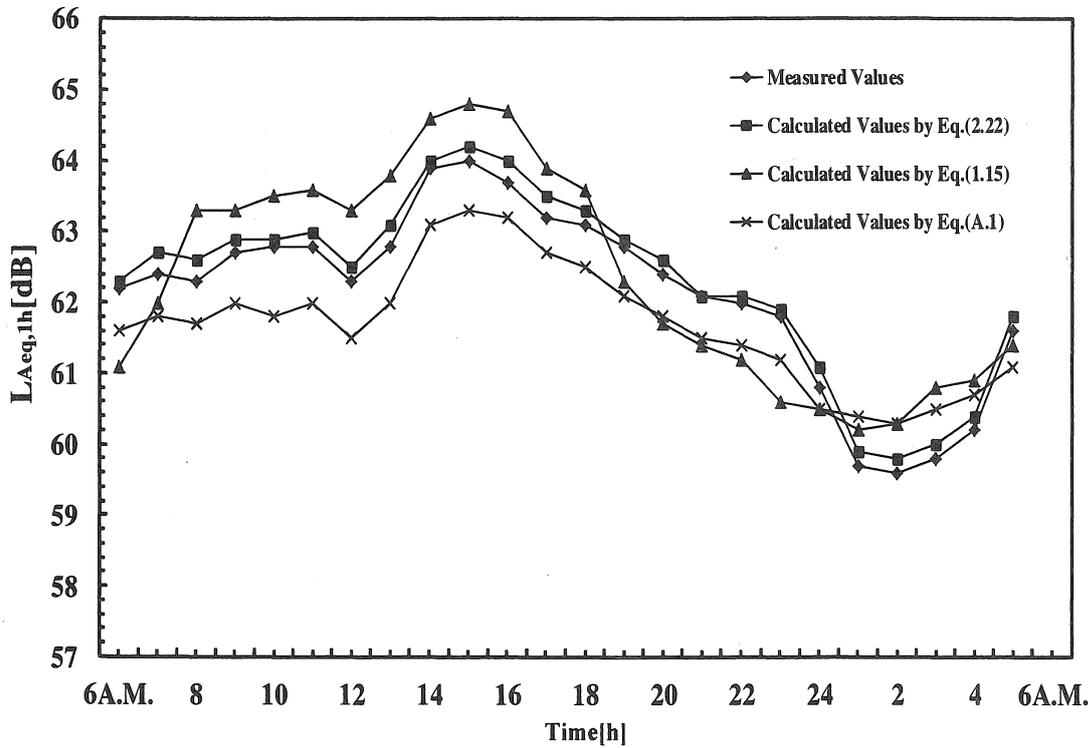


図 2-10 道路から 100m 離れた観測点での $L_{Aeq,1h}$ の時間的推移

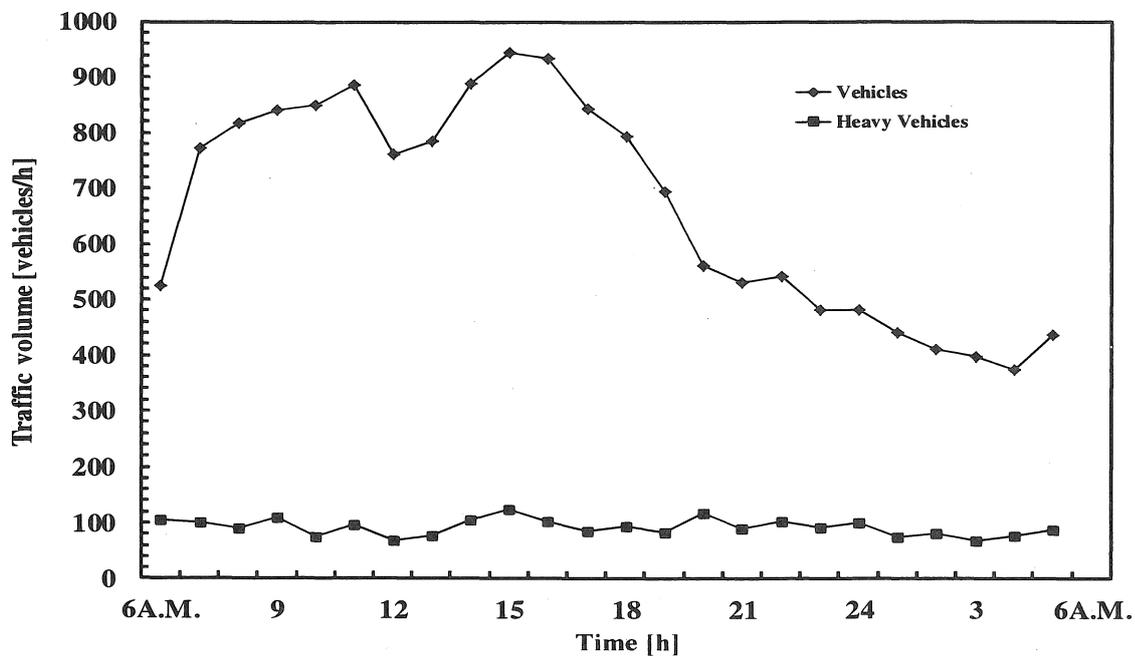


図 2-11 図 2-10 に対応する交通量と大型車の時間的変動

2.4 まとめ

交通流と共に時々刻々変動する RTN を模擬する動的モデルを提案し、平坦道路近傍の実測データと比較検討し、

- [1] シミュレーション値は騒音波形の瞬時レベルの変化(実測値)を誤差 2dB 以内で再現できること
- [2] 種々の交通条件(交通量、車速度、大型車混入率)に対し騒音レベルの累積度数分布を精度良く求め得ること
- [3] $L_{Aeq,1h}$ の 1 日の時間変化を誤差 ± 1 dB 以内で算定できること
- [4] 1 章の序論でも述べたように、RTN に関するある特定の評価量だけでなく、プログラムをわずかに追加・変更するだけで種々の評価量を容易にシミュレートすることが可能である

などを確認し、本モデルの有効性を示した。

なお、これらの確認事項は、本モデルが以下に示す式または物理量で表わされていることに依存しており、静的モデルとの違いを特徴づけている：① 式(2.16)–式(2.18)に示すように、時々刻々変化する音の放射エネルギー J 、音の強さ I 及び音の強さのレベル(音圧レベル) L など、音のエネルギーに関する量は全て時間 t の関数として示されている ② しかも、これらの式はいずれも添字 j が付いた漸化式で表している ③ 仮想点音源位置 x 、音響パワー W 、一有効区分内に存在する車両 n 、小型車 n_p 、大型車 n_l 等、時間と共に変化する物理量には添字 j が付いている。

3 章 各種交通条件が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響と実測時間長 T の検討

この章では現場等で信頼できる安定な L_{AeqT} 値を得るために過不足なく適切な実測時間長 T を選定する方法を、前章で提案した動的モデルを使って検討する。即ち、 L_{AeqT} の T への依存性を明らかにするために交通量 Q 、大型車混入率 p 、平均車速度 \bar{V} 、通過車両台数 n の 4 つの交通条件が、測定時間 T 中の L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響を調査する。さらに、 T 中の通過車両台数 n と L_{AeqT} の関係を、統計的推定法を用いて詳しく考察する。通常、時間の経過と共に騒音レベル L_{pA} の最大値 L_{AFmax} は基準測定時間内に何度か出現するがこれに対応する交通流の挙動、特に 1 台又は継続する 2 台の大型車が観測点の正面を通過する際の配置状態に注目したシミュレーション実験を MCMC 法で行う。 L_{pA} の最大値 L_{AFmax} の時間間隔を表す 2 つの動的統計量として平均時間間隔(\bar{t})[s]及び平均再来時間($\tilde{\Theta}$)[s]を導入し、安定な L_{AeqT} を求めるために必要とされる最小測定時間長について検討する。

3.1 各種交通条件が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響

仲、野呂、久野らは交通条件(交通量 Q 、大型車混入率 p 、車速度 V 、車間距離 D)の変化が L_{AeqT} 及び時間率騒音レベル L_{ANT} に及ぼす影響について詳細な検討を行った[1-3]。また、これらの論文では交通条件相互の間に密接な関連があり、それらに留

意して騒音評価量の予測計算を行うことが重要であることを指摘した。特に $Q-V$ 曲線(交通量と車速度の関係式)を導入することにより、 Q の変化は L_{AeqT} 、 L_{ANT} 等の予測値に直接影響するばかりでなく、 Q による V 及び D の変化を介して間接的にも影響を与えることを示した。

一般に、高速道路では一日の時間帯において昼間は交通量が多く夜間は少ない。

また、夜間は大型車の混入率が高い傾向にある[4-9]。

本節では交通条件の相違、すなわち交通量 Q の多少、大型車混入率の相違、平均車速度 \bar{V} の増減、観測点の正面を通過する車両台数 n [台]の増加が測定時間長 T の経過と共に L_{AeqT} のレベル変動にどのような影響を及ぼすかを前章で提案した動的モデルに基づくシミュレーション実験により検討する。実験は $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$ 内で行い、 $T_{\min} = 0$ 、 $T_{\max} = 1$ [h](基準測定時間帯)に設定した。

シミュレーション実験において車速と混入率は不変(一定)であるが、通過車両台数 n は T の経過($0 \leq T \leq 1$ [h])につれて不規則に増加するランダム変数である。

なお、観測点Pにおける L_{AeqT} は前章で定義した式(2.20)の代わりに

$$L_{AeqT} \equiv L_{Aeq}(T) = 10 \log_{10} \frac{I_{Aeq}(T)}{I_0} \quad (3.1)$$

のように表すこともでき、 $L_{Aeq}(T)$ 及び $I_{Aeq}(T)$ は T に依存するランダム変数とみなされる。ここに、 $I_{Aeq}(T)$ は $L_{Aeq}(T)$ に対応するP点での等価な音の強さであり、次式で与えられる。

$$I_{Aeq}(T) \equiv \frac{1}{T} \int_0^T I_A(t) dt \quad (3.2)$$

ただし、 $I_A(t)$ は音の強さの瞬時値である。

更に、定常的な交通流に対してはエルゴード仮説を適用すれば近似的に次式が導びかれる[10]。

$$\begin{aligned}\Delta L_{Aeq,T} &= L_{Aeq}(T) - L_{Aeq}(\infty) = L_{Aeq}(T) - \langle L_{Aeq,T} \rangle \\ &= 10 \log_{10} \frac{I_{Aeq}(T)}{\langle I_{Aeq}(T) \rangle} \cong 10 \log_{10} \frac{n}{\langle n \rangle}\end{aligned}\quad (3.3)$$

ここで、 $L_{Aeq}(\infty)$ は $L_{Aeq}(T)$ の長時間平均値 $\lim_{T \rightarrow \infty} L_{Aeq}(T)$ であり、 $\langle L_{Aeq,T} \rangle$ は $L_{Aeq}(T)$ の集合平均である。又、式(3.1)に留意すれば上式の三番目の関係が成り立つ。更に $I_{Aeq}(T)$ は通過車両台数 n に比例することから四番目の関係が得られる。

3.1.1 交通量の影響

図3-1は、1時間の基準測定時間内で大型車の混入率が30%と比較的高い場合に対し、 Q が $L_{Aeq}(T)$ のレベル変動に及ぼす様相を示している。観測距離 d_0 は全て50[m]である。

Q が少ない340[台/h]と240[台/h]の場合、 $L_{Aeq}(T)$ の測定開始時刻 $t=0$ から $L_{Aeq}(T)_{\max}$ の値に至る迄に各々20分、25分経過している。以後、この時間長を所要時間と呼ぶことにする。又、 $L_{Aeq}(T)_{\min}$ から $L_{Aeq}(T)_{\max}$ 至る時間は各々17分、22分である。この時間長のことを到達時間(RMTI)と呼び、所要時間と区別することにする。

図において、所要時間と到達時間の差は約3分であり $L_{Aeq,T}$ の変動幅は何れの交通量についても最大2.3-2.5[dB]とほぼ同じ値を示している。

ここで、前項の表示に従い、 $L_{Aeq}(T)$ と基準測定時間 $T_{max}=1[h]$ における $L_{Aeq}(1h)$ との差、 $L_{Aeq}(T)-L_{Aeq}(1h)$ を $\Delta L_{Aeq,T}$ とおき、 T の増加に伴うそのレベル差の挙動について調べることにする。

$L_{Aeq}(T)$ は $L_{Aeq}(T)_{min}$ から $L_{Aeq}(T)_{max}$ に到る過渡状態を経て定常的状态に入り、その後は $\Delta L_{Aeq,T} = 1[dB]$ の範囲内でゆるやかに変動している。

一方、 Q が 630[台/h]及び 820[台/h]と比較的多い場合、所要時間はいずれも 15 分、RMTI は共に 12 分、その差は 3 分である。又、 $\Delta L_{Aeq,T}$ は定常域で 0.5-1[dB]の範囲内で緩やかに変動している。

次に図 3-2 は、大型車の混入率が 10%と低い場合の結果である。 $L_{Aeq}(T)$ や $\Delta L_{Aeq,T}$ の変動の様子は、混入率よりも Q の多少に大きく依存していることがわかる。

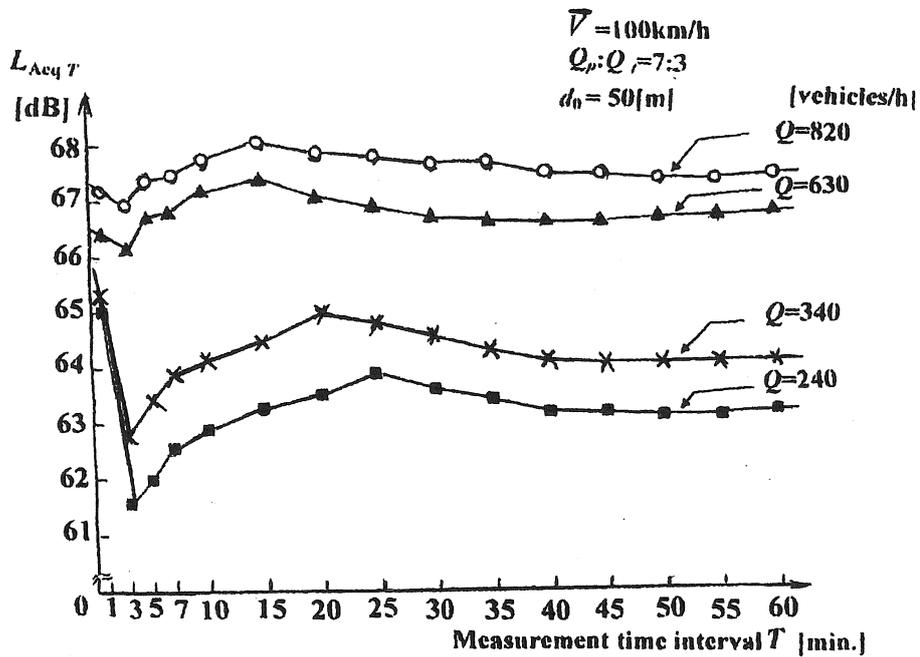


図 3-1 交通量が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響
 (大型車混入率が大きい場合)

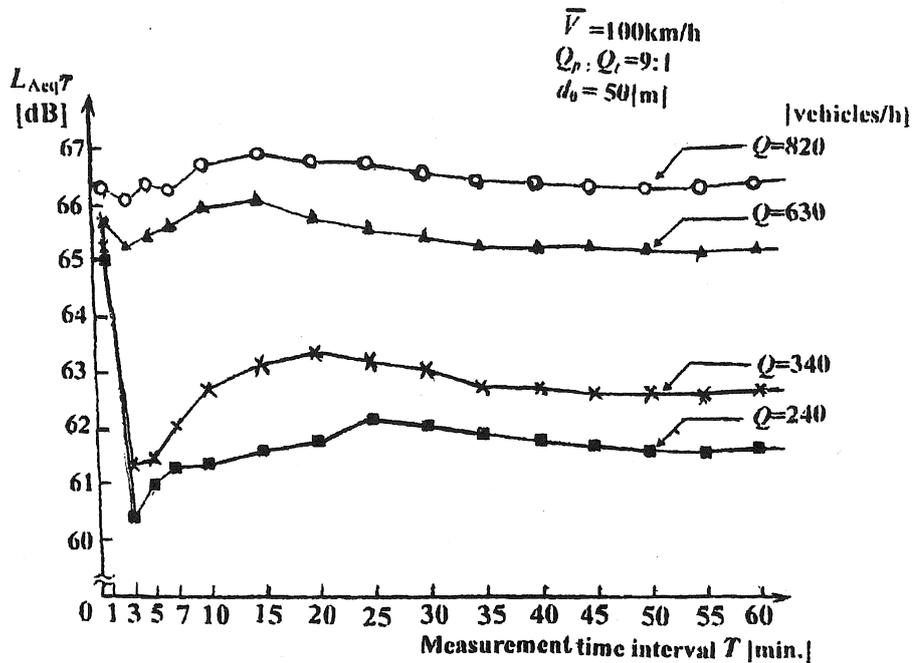


図 3-2 交通量が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響
 (大型車混入率が小さい場合)

3.1.2 大型車混入率の影響

交通量 Q が比較的多い場合、混入率の相違が $L_{Aeq}(T)$ のレベル変動に及ぼす様相を図3-3に示す。到達時間は混入率の相違によらず、いずれも12分程度である。一方、変動幅は混入率の増加につれ大きくなる傾向を示している。また、 $(L_{AeqT})_{max}$ に到達後の $L_{Aeq}(T)$ の値は混入率によらず $\Delta L_{AeqT}=0.5[\text{dB}]$ の範囲内にある。

図3-4は Q が少ない場合の $L_{Aeq}(T)$ の変動パターンである。大型車の混入率によらず到達時間は22分と同じ値であり、 $(L_{AeqT})_{max}$ 到達後の $L_{Aeq}(T)$ の変動幅は大型車混入率が高いほど大きくなる傾向にある。

以上、大型車混入率は到達時間に影響を与えないもの、混入率の増加は $L_{Aeq}(T)$ の変動幅を大きくする傾向が見られる[1-5,9-10]。

3.1.3 平均車速度の影響

図3-5は交通量 Q が多い場合、図3-6は Q が少ない場合に対し平均車速度 \bar{V} が $L_{Aeq}(T)$ のレベル変動に及ぼす様相を示す。図より \bar{V} の増加は $L_{Aeq}(T)$ のレベルを持ち上げ増大させるがレベル変動パターンには殆ど影響を与えないことが知られる。

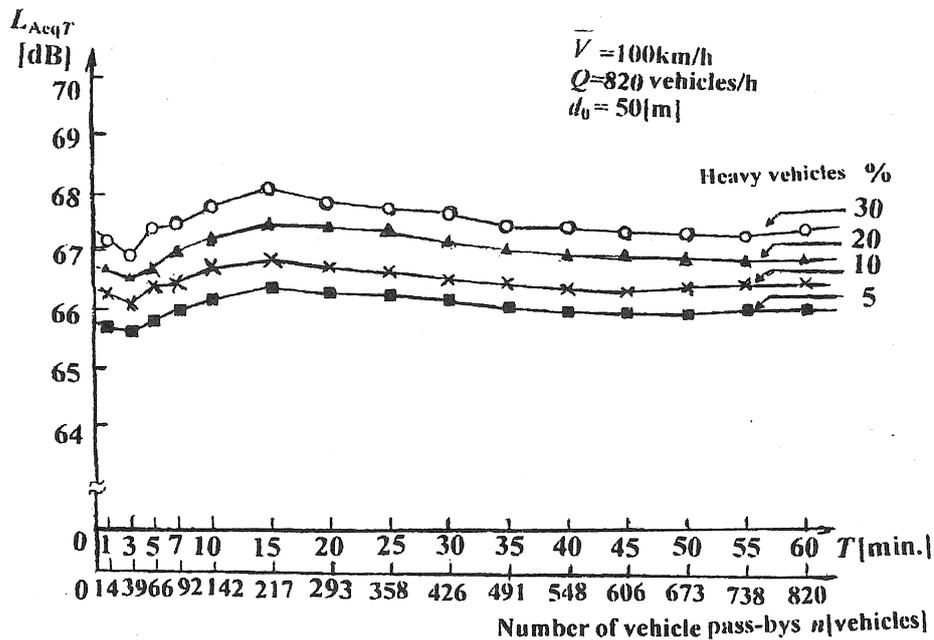


図 3-3 大型車混入率が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響
 (交通量が比較的多い場合)

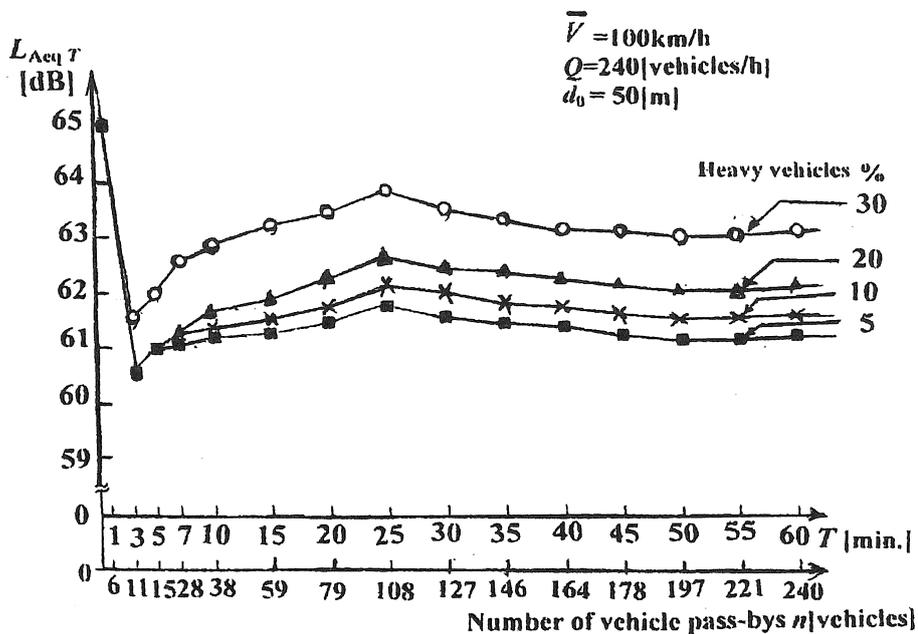


図 3-4 大型車混入率が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響
 (交通量が比較的小さい場合)

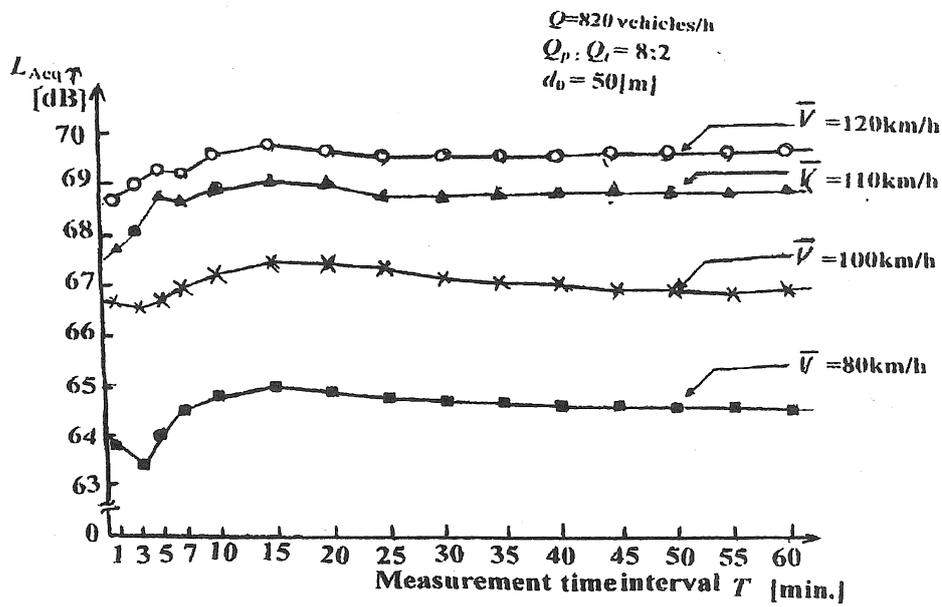


図 3-5 平均車速度が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響

(交通量が比較的多い場合)

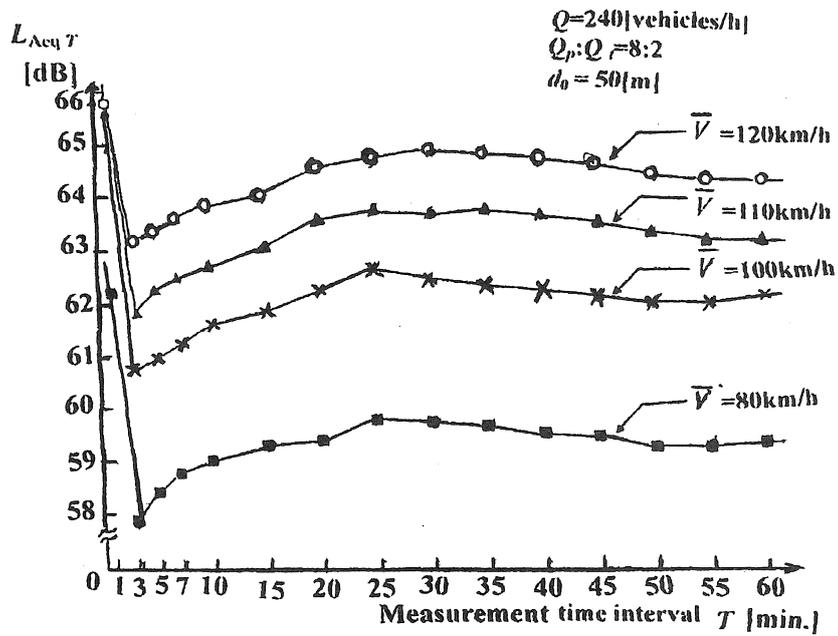


図 3-6 平均車速度が L_{AeqT} のレベル変動に及ぼす影響

(交通量が比較的小さい場合)

3.1.4 通過車両台数の影響

測定時間中に観測点の正面、道路上の原点 O を通過する車両台数が $L_{Aeq}(T)$ のレベル変動 $\Delta L_{Aeq,T}$ に及ぼす影響について検討する。

式(3.3)で通過車両台数 n の集合平均を $\langle n \rangle = \mu \times T$ [台]とおけば、 $\Delta L_{Aeq,T}$ は次式のように書き直される。

$$\Delta L_{Aeq,T} = L_{Aeq}(T) - \langle L_{Aeq,T} \rangle \cong L_{Aeq}(T) - L_{Aeq}(1h) \cong 10 \log_{10} \frac{n}{\mu T} \quad (3.4)$$

ここで、 μ [台/s]は単位時間あたりの平均通過車両台数である。

図3-7～図3-10に各種交通条件下における通過車両台数 n とレベル差 $\Delta L_{Aeq,T}$ の関係を示す。横軸は n をその最大値 n_{max} で規格化している。図3-7と図3-8より、 \bar{V} と Q を固定すれば $\Delta L_{Aeq,T}$ の変動パターンはどれも極めて類似していることがわかる。一方、大型車混入率の増加は $L_{Aeq}(T)$ を増大させるが、その傾向は Q が少ない場合に特に顕著である。

また、交通量 Q が多く、混入率が一定の場合(図3-9)、 n による $\Delta L_{Aeq,T}$ の変動パターンは何れの平均車速 \bar{V} に対しても $\Delta L_{Aeq,T} = \pm 0.5$ [dB]の範囲内で緩やかに変化している。しかも、 \bar{V} の増加に伴い $\Delta L_{Aeq,T}$ 値は減少する傾向にある。交通量 Q が少なく、混入率が一定の場合(図3-10)、何れの \bar{V} に対しても $\Delta L_{Aeq,T}$ 値は-1.5[dB]から0.5[dB]の範囲内で大きく変動している。これらの図から、測定時間中の通過車両台数 n の増加に起因する $L_{Aeq}(T)$ 及び $\Delta L_{Aeq,T}$ の変動の様子が読みとれる[4-9]。

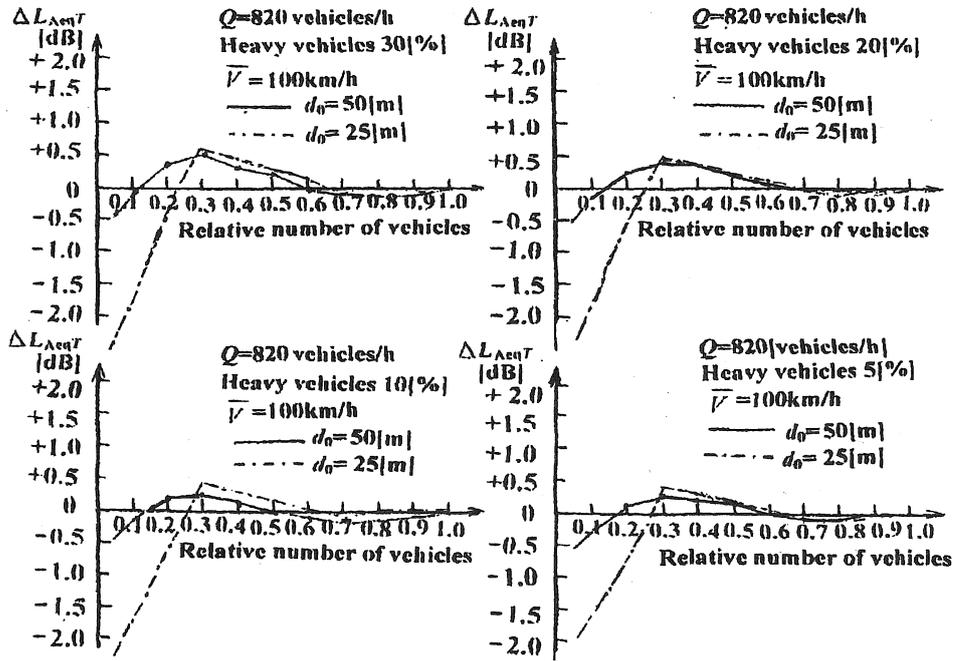


図3-7 混入率の違いによる車両台数が ΔL_{AeqT} に及ぼす影響

(交通量が比較的多い場合)

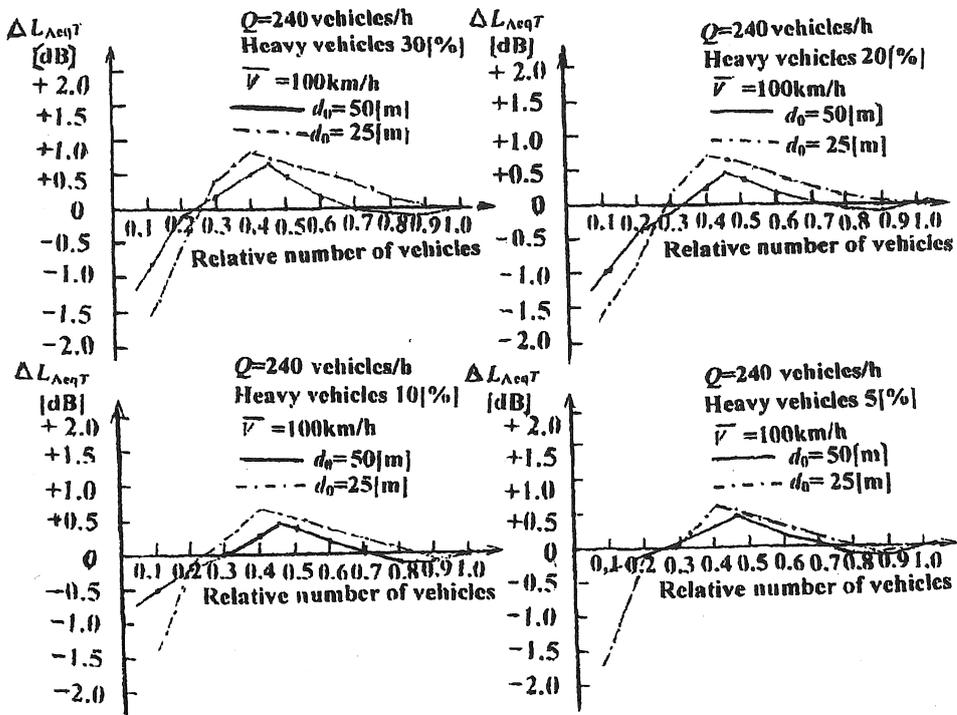


図3-8 混入率の違いによる車両台数が ΔL_{AeqT} に及ぼす影響

(交通量が比較的小さい場合)

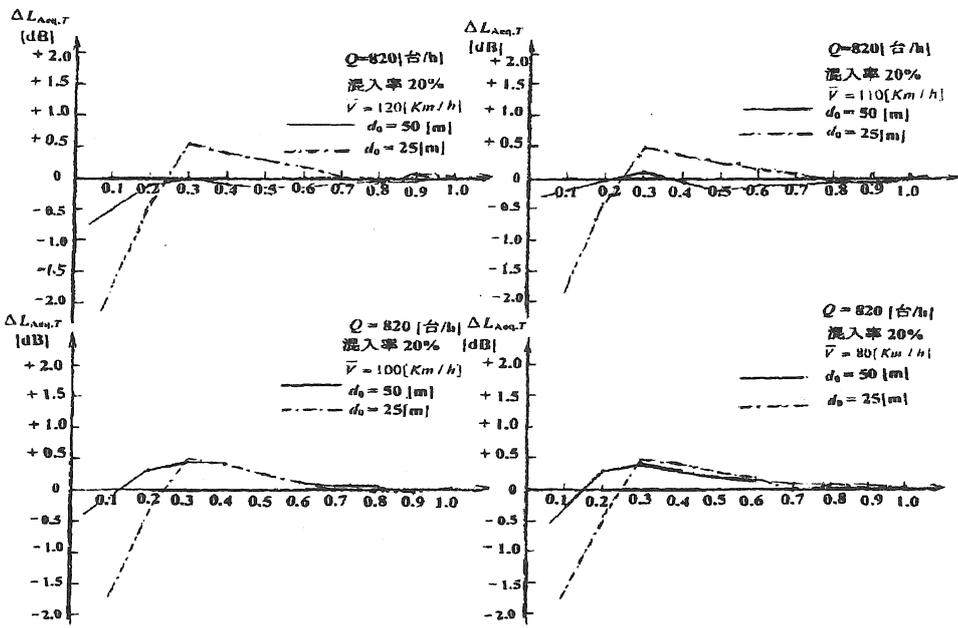


図3-9 平均車速度の違いによる車両台数が ΔL_{AeqT} に及ぼす影響
(交通量が比較的多い場合)

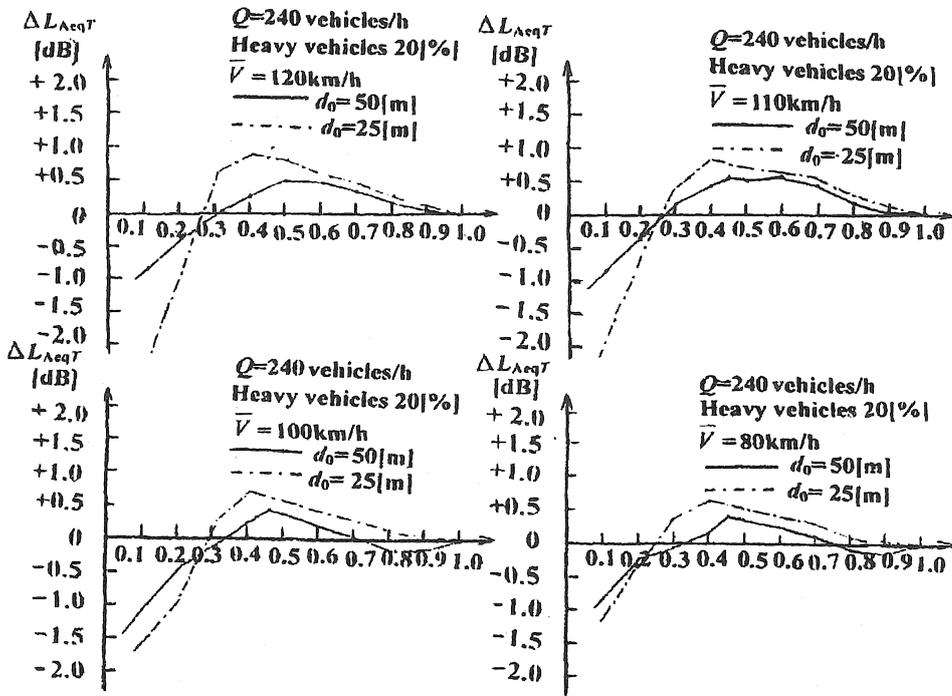


図3-10 平均車速度の違いによる車両台数が ΔL_{AeqT} に及ぼす影響
(交通量が比較的多い場合)

3.2 各種交通条件による L_{AeqT} の信頼区間

前節では種々の交通条件が $L_{Aeq}(T)$ のレベル変動およびレベル差 ΔL_{AeqT} に及ぼす影響について検討した。次にこれらの交通条件下で、 $L_{Aeq}(T)$ の値が許容誤差の範囲内で観測されるために必要とされる車両台数を推測統計学の手法を使って検討することにしよう[10-19]。

これまでの議論では、車間距離 D の確率分布として指数分布を仮定してきたが、通過車両台数 n [台] はこの場合次式(3.5)に示す Poisson 分布に従う。

$$P = \frac{(\mu T)^n}{n!} \cdot \exp(-\mu T) \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3.5)$$

n の平均値 m 及び分散 σ^2 は、 μ [台/s] を単位時間あたりの平均通過車両台数とすれば $m = \sigma^2 = \mu T$ で与えられる。

Chebyshev の不等式から、 n の値がその平均値 $m = \mu T$ から標準偏差 $\sigma = \sqrt{\mu T}$ の k 倍以内に入る確率は

$$P_r \left\{ \left| \frac{n - \mu T}{\sqrt{\mu T}} \right| < k \right\} \geq 1 - \frac{1}{k^2} \quad (3.6)$$

式(3.6)の左辺の括弧内は式(3.4)の関係を使用すれば

$$-4.34 \frac{k}{\sqrt{\mu T}} < 10 \log_{10} \frac{n}{\mu T} < 4.34 \frac{k}{\sqrt{\mu T}} \quad (3.7)$$

と表せる。従って、式(3.6)は

$$P_r \left\{ -4.34 \frac{k}{\sqrt{\mu T}} < \Delta L_{\text{Aeq}T} < 4.34 \frac{k}{\sqrt{\mu T}} \right\} \geq 1 - \frac{1}{k^2} \quad (3.8)$$

となり、 $4.34 \frac{k}{\sqrt{\mu T}} < 1$ とおけば $L_{\text{Aeq}}(T)$ の値は $1 - \frac{1}{k^2}$ 以上の確率で ± 1 dB の許容誤差の

範囲内にある。 $k=2$ 、即ち 75%以上の確率でこの条件を満たすためには $\mu T \cong 70$ [台] のサンプル数の車両をとる必要がある。又、 $k=3$ とし、 $L_{\text{Aeq}}(T)$ 値が 90%以上の確率で同じ許容誤差範囲内に入るためには $\mu T \cong 170$ [台] の車が通過するまでの測定時間長 T が必要である。尚、 $1 \ll \mu T$ (例えば $\mu T \approx 50$) であれば式(3.5)の Poisson 分布は正規分布で近似されることから、上述の $\Delta L_{\text{Aeq}T}$ は $k=2$ に対しては 95.5%、 $k=3$ に対しては 99.7%の確率で ± 1 dB の範囲に入るものと考えられる。

図 3-11 は、観測距離 $d_0 = 25\text{m} - 50\text{m}$ において、様々な交通条件(交通量: $240 < Q < 820$ [台/h]、大型車混入率: 5% - 30%、平均車速度: $80 < \bar{V} < 120$ [km/h]) 下で本モデルを適用しシミュレーション実験を行った結果をプロットしたものである。測定時間長 T の上限は、基準測定時間の $T_{\text{max}} = 1$ [h] とした。図から、通過車両台数が 70 台を越えれば、 $\Delta L_{\text{Aeq}T}$ はほぼ ± 1 dB の範囲内にあることがわかる。更に 170 台を越えれば、 $\Delta L_{\text{Aeq}T}$ はほとんど全て ± 1 dB の許容誤差範囲内に入っていることがわかる。

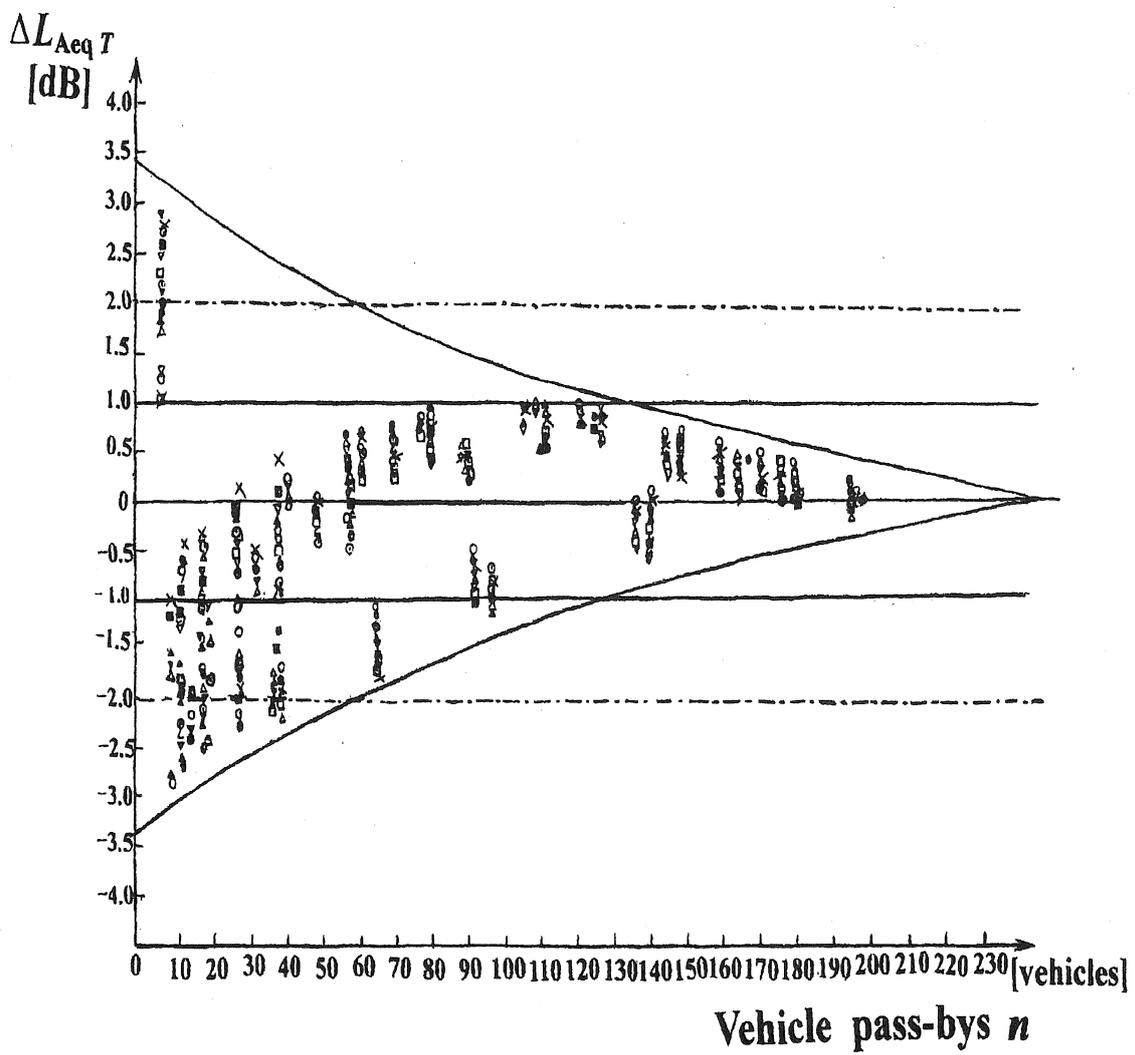


図 3-11 種々の交通条件における車両台数の増加が ΔL_{AcqT} に及ぼす影響

3.3 安定な L_{Aeq1h} を得るのに要する時間長 T^*

前節 3.2 の結果を参照すれば、基準時間 1h に対する安定な L_{Aeq1h} の測定値(許容誤差 1dB)を得るために必要とされる通過車両台数は概ね $n^* = 100$ 台と見積られる。原点 O を通過する車の台数が 100 台に達するまでの時間長 T^* を実測時間長に設定すればよい。時間交通量 Q [台/h] から T^* は次のように算定される。通過車両台数は観測時間長に大略比例することから

$$Q : n^* \cong 3600 : T^* \quad (3.9)$$

即ち、

$$T^* \cong 3600 \times \frac{n^*}{Q} = \frac{36 \times 10^4}{Q} \text{ [s]} \quad (3.10)$$

と表される。従って、時間交通量 Q を与えれば T^* は表 3-1 のように見積られる。

表 3-1 時間交通量 Q と観測時間長 T^* との関係

Q [台/h]	100	200	300	500	1000
T^* [s]	1h	30分	20分	12分	6分

なお、許容誤差を 2dB とすれば、観測に必要な通過車両台数は $n^* \cong 50$ 台となり(図 3-11 を参照)、測定時間長 T^* は上表 3-1 の 1/2 程度に短縮されよう。

3.4 最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の出現間隔に関する検討

ISO 1996-Part 2 には、 L_{AeqT} の測定時間 T は、騒音の放射と伝搬の主要な変動を含むように選定すべきであることが記述されている[16-17, 18-19]。

この節では、交通流の挙動、特に 1 台の大型車又は継続する 2 台の大型車が観測位置の正面を通過する際に発生する最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} とその時間間隔に注目する。 L_{AFmax} に関する事象は安定な L_{AeqT} を得るために必要とされる情報(騒音レベルの主要な変動)を提供するからである。これらの騒音レベル L_{pA} の最大値の時間間隔を表す 2 つの動的統計量、平均時間間隔(\bar{t})[s]と平均再来時間($\tilde{\Theta}$)[s]を導入し、シミュレーション実験により、その挙動を把握する[20-23]。

3.4.1 L_{AFmax} 間の平均時間間隔 \bar{t}

これらの事象を検証するために 3.1 節と同様、種々の交通条件下で、動的モデルによるシミュレーションを実施し、騒音レベル $L_{pA}(t)$ の時間変化を求めた。但し、観測距離 d_0 は 50m とした。

図 3-12 は直線道路上の交通流を表し、車群は時間の経過と共に左から右へ移動する。道路上の各小区分の長さ ΔX [m] は観測点 P から下ろした垂線の長さ d_0 [m] の 1/2 に設定され、縦軸の時間長 $d_0/2v = (\Delta X/v)$ [s] は、各小区分の中心に置かれた仮想点音源から放射される音響エネルギーの積分平均時間を表す。図中の白丸(○)は小型車を、黒丸(●)は大型車を、また×印はその区分内に車が存在しないことを示す[20-21]。

図3-13は、騒音レベルの最大値 L_{\max} が観測される典型的な車群配置(1)–(6)を模式的に表している。(1)は、ある大型車が観測点を通過してから t_1 [s]後に他の大型車が通過する場合。(2)は、大型車と小型車が D_{\min} の間隔を保って通過してから t_2 [s]後に同じ事象が繰り返される場合。(3)は、2台の大型車が D_{\min} の間隔を保って通過してから t_3 [s]後に同じ事象が繰り返される場合。(4)は、 D_{\min} の間隔を保った小型車、大型車、小型車の配列が t_4 [s]後に繰り返される場合。(5)は、大型車、大型車、小型車と続く同様な配列が t_5 [s]後に繰り返される場合。(6)は、 D_{\min} の間隔を保った3台の大型車の配列が t_6 [s]後に繰り返される場合である。

上記(1)–(6)の場合に対し、一時間の基準測定時間内に實際上 $L_{AF\max}$ 値が繰り返し観測される可能性のあるのは(1)–(5)の場合であろう。(6)の場合は、交通量を1000台/h以下とすれば、1[h]の基準測定時間内にはめったに生起しないし、仮に起きたとしても $L_{AF\max}$ の観測値は、(5)の場合との差は高々1dB程度である。従って、以下では一時間の基準測定時間内で、(1)–(5)の事象が起こる場合に注目してシミュレーション実験を行った。実験後、得られた時系列データを次式に代入することにより $L_{AF\max}$ の平均時間間隔を算出した。

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{j=1}^{q_i} (t_i)_j}{q_i} \quad [\text{s}] \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (3.11)$$

ここで、 t_i は基準測定時間帯内において Case(i)が起こる時間間隔である。 q_i はその総サンプル数である。

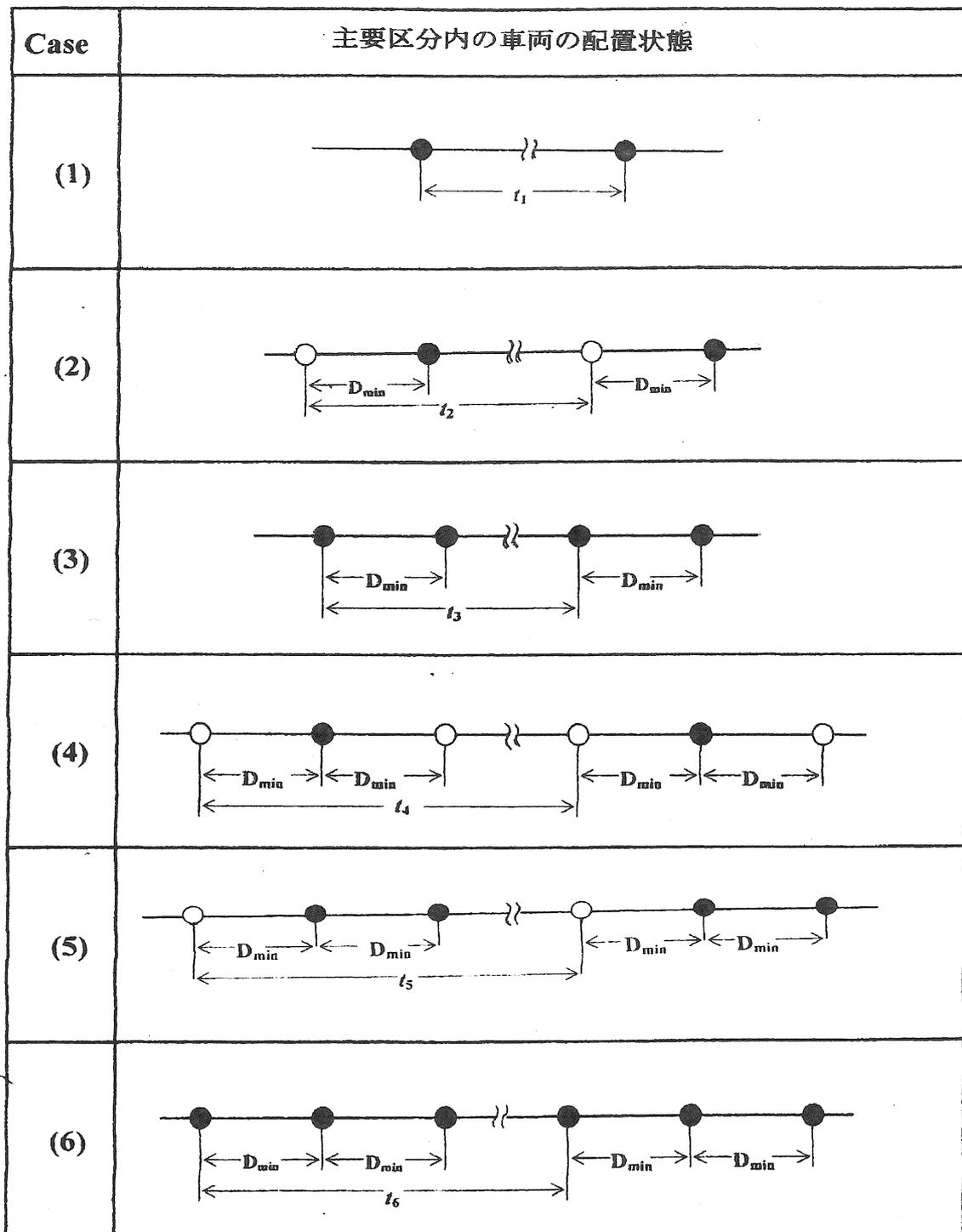


図 3-13 測定時間中 L_{AFmax} が発生する場合の典型的な車群配置

3.4.2 ΔX 又は d_0 と D_{\min} の関係

交通流の挙動を更に検討する前に、一小区分長 ΔX 又は観測距離 d_0 と最小許容車間距離 D_{\min} との関係を整理しておこう。本モデルでは既に述べたように、 ΔX の区間長として $\ell = d_0 / 2$ [m] を採用している。従って、 ℓ 又は d_0 と D_{\min} の大小関係は次のように2分類される。

$$nD_{\min} \leq \ell < (n+1)D_{\min} \quad (3.12a)$$

又は、

$$2nD_{\min} \leq d_0 < 2(n+1)D_{\min} \quad (3.12b)$$

と

$$n\ell \leq D_{\min} < (n+1)\ell \quad (3.13a)$$

又は、

$$nd_0 \leq 2D_{\min} < (n+1)d_0 \quad (3.13b)$$

ここで、 n は整数で $n = 1, 2, \dots$ の値をとる。全有効区分長 $\ell_{sum} = 25\ell$ [m]。

式(3.12a) 又は式(3.12b)においては、観測点が道路から遠く離れるため車群による騒音のレベル変動は小さくなる。従って、以下では L_{AFmax} 値が明確に現れる観測距離 d_0 と最小許容車間距離 D_{\min} との関係が式(3.13a)又は式(3.13b)で表される場合に注目し、検討を進める。

3.4.3 主要区分

式(3.13)の条件が満たされる場合、区分 ΔX_j 内に存在する車の台数は高々1[台]である。但し、車が ΔX_j の境界上にある場合は原点Oに近い方の区分に入れるものとする。また、 ΔX_j 内の車とその後方 ΔX_{j+k} ($k=1, 2, \dots$)内にある車との間の距離は D_{\min} であると考えられる。これより、道路上の区分 ΔX_j ($j=-12, \dots, -11, \dots, 0, \dots, 11, 12$)のうち、点Pで観測される騒音レベルの最大値 $L_{AF \max}$ に大きく寄与する部分は、原点Oを中心とする高々11個の区分 ΔX_j ($j=0, \pm 1, \dots, \pm 5$)に限定される。以下これらの区分を主要区分と呼ぶことにする。主要区分内の車両台数 n [台]は、 $D_{\min} \cong \bar{V} \times 10^{-3}$ [m]なる関係に留意すれば、 $n=0, 1, 2, 3$ [台]に制限される。これより、 $\bar{V}=80-90, 100-110$ 及び 120 [km/h]に対する主要区分数は各々7, 9及び11[個]となる。

3.4.4 平均継続時間 H

主要区分内に n [台]の車が存在する場合を n -状態、その他を m -状態とする。時間の経過と共に主要区分内の車の台数は刻々と推移する。この台数の変化(状態の推移)には以下の4通りの条件付確率 $P(n|m), P(m|m), P(m|n), P(n|n)$ が対応する。今、主要区分内を n [台]の車が D_{\min} [m]の間隔を保って $(k-1)\tau$ [s]の時間走行し、 $k\tau$ [s]後にその車両台数が m 台に変化する確率を $\varphi(k\tau)$ とすれば、

$$\varphi(k\tau) = P^{k-1}(n|n)P(m|n), (n, m = 0, 1, 2, 3) \quad (3.14)$$

で与えられる。ここで、 τ は車と車の時間間隔を表す。 $P(n|n)$ はある時刻 t において

n [台]の車が主要区分内に存在するという条件の下で、 τ [s]後も n [台]の車がその区分内に留まる確率を表す。同様に $P(m|n)$ は τ [s]後に m 台に推移する確率である。これより主要区分内における n [台]の車の平均継続時間 $H(n)$ は

$$\begin{aligned} H(n) &\equiv \sum_{k=0}^{\infty} k\tau\varphi(k\tau) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} k\tau P^{k-1}(n|n)P(m|n) = \frac{\tau}{1 - P(n|n)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

で定義される。

3.4.5 L_{AFmax} の平均再来時間 $\tilde{\Theta}$

この項では、基準測定時間内に通過した車両台数の確率分布と推移確率があらかじめわかっているとき、3.4節で述べた平均時間間隔 \bar{t} に対応して確率的に計算できる動的統計量として平均再来時間 $\tilde{\Theta}$ を導入する[19-20,22-23]。

主要区分内の車両台数が $m(\neq n)$ 台の状態が $(s-1)\tau$ [s]継続し、 $s\tau$ [s]後に n [台]となる確率を $\psi(s\tau)$ とすれば

$$\psi(s\tau) = P^{s-1}(m|m)P(n|m) \quad (n, m = 0, 1, 2, 3) \quad (3.16)$$

と表される。ここに、 $P(m|m)$ は主要区分内の車の台数が m に留まる確率、 $P(n|m)$ は m から n に移る確率である。 $s\tau$ の時間間隔で許容車間距離 D_{\min} を保ち走行する n 台の車群を考え、次式(3.17)により車群 n に対する平均再来時間を定義する。

$$\tilde{\Theta}(n) \equiv \sum_{s=0}^{\infty} s\tau\psi(s\tau) \quad (3.17)$$

式(3.15)は平均継続時間 $H(n)$ を使って次式(3.18)のように表される。

$$\Theta(n) \equiv H(n) \times \frac{1 - P(n)}{P(n)} \quad (3.18)$$

ここで、 $P(n)$ 主要区分内にいる車両台数の確率分布である。

なお上述の平均継続時間 $H(n)$ 及び平均再来時間 $\Theta(n)$ は車種を区分しない場合の結果である。大型車の出現頻度を考慮すれば、次式が導かれる。

$$\tilde{H}_i(n) = \frac{\tau}{1 - {}_n C_x Q_p^x Q_l^{n-x} P(n|n)} \quad (3.19)$$

$$\tilde{\Theta}_i(n) = \tilde{H}_i(n) \times \frac{1 - {}_n C_x Q_p^x Q_l^{n-x} P(n)}{{}_n C_x Q_p^x Q_l^{n-x} P(n)} \quad (3.20)$$

ただし、 $\tilde{H}_i(n)$ と $\tilde{\Theta}_i(n)$ は、各々3.4節で述べた Case(i)に対する平均継続時間と平均再来時間である。 ${}_n C_x$ は組合せの記号、 Q_p は小型車の、 Q_l は大型車の混入率を表す。

3.5 結果及び検討

交通量の多少と混入率の相違によって、図3-13に示した Case(1)–Case(6)うち、測定時間帯中に観察される事象をもとに $\tilde{\Theta}_i$ 値と \bar{t}_i 値を算出し、比較検討した。まず、交通量が $Q = 820$ [台/h]と比較的多い場合、大型車混入率が20%と30%のときは Case(1)–Case(5)に関する平均時間間隔 \bar{t}_i 及び平均再来時間 $\tilde{\Theta}_i$ を、また大型車混入率が5%–15%と低いときは Case(1)–Case(4)に関する \bar{t}_i 、 $\tilde{\Theta}_i$ を求め各々 \bar{t}_i の算術平均値を \bar{t} 、 $\tilde{\Theta}_i$ の算術平均値を $\tilde{\Theta}$ とした。一方、交通量が $Q = 240$ [台/h]と比較的少ない場合については、各混入率に対して Case(1)と Case(2)に関し、同様な計算を行い

各々 \bar{t} と $\tilde{\Theta}$ を求めた。

3.5.1 大型車混入率 p 及び平均車速度 \bar{V} の影響

図3-14-図3-16は平均車速度 \bar{V} 及び大型車混入率 p が $\tilde{\Theta}$ 及び \bar{t} に与える影響を見たものである。図中一点鎖線は $\tilde{\Theta}$ を、実線は \bar{t} を表す。図より、① $\tilde{\Theta}$ と \bar{t} は良く一致している ②混入率が減少するにつれて $\tilde{\Theta}$ と \bar{t} は急激に長くなる(混入率が30%から5%に減少すると、 $\tilde{\Theta}$ 及び \bar{t} は約2倍に増加する) ③平均車速度 \bar{V} が増加すると、 $\tilde{\Theta}$ と \bar{t} は長くなる傾向があり、混入率 p が低い程顕著である。

3.5.2 交通量 Q の影響

図3-17-図3-19は、 $\tilde{\Theta}$ 及び \bar{t} に対する交通量の影響を見たものである。図より① $\tilde{\Theta}$ と \bar{t} は良く一致している ②交通量が少なく、混入率が低いほど $\tilde{\Theta}$ 及び \bar{t} は長くなる。特に Q が少ないと顕著である。

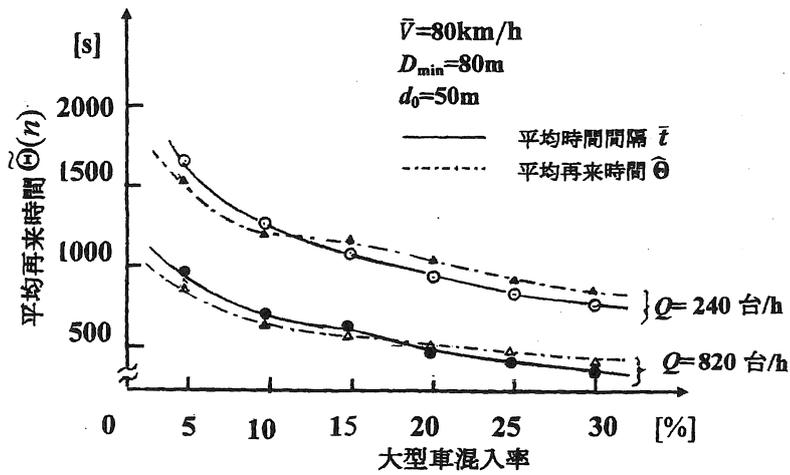


図 3-14 交通量の違いによる大型車混入率と平均再来時間の関係 ($\bar{V}=80\text{km/h}$)

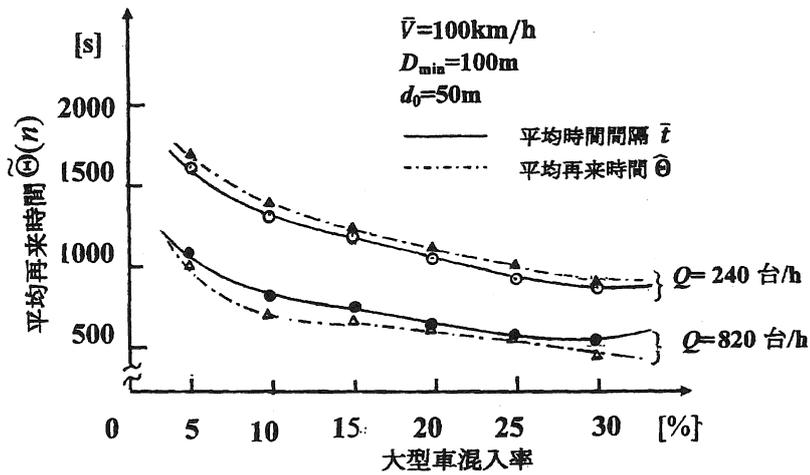


図 3-15 交通量の違いによる大型車混入率と平均再来時間の関係 ($\bar{V}=100\text{km/h}$)

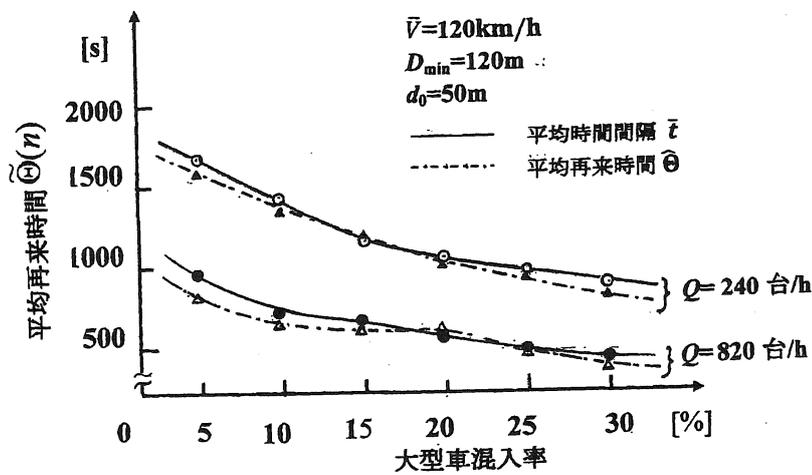


図 3-16 交通量の違いによる大型車混入率と平均再来時間の関係 ($\bar{V}=120\text{km/h}$)

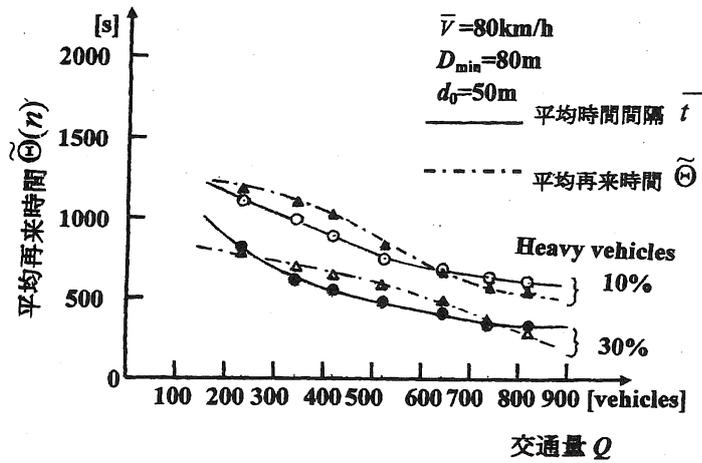


図 3-17 大型車混入率の違いによる交通量と平均再来時間の関係 ($\bar{V}=80\text{km/h}$)

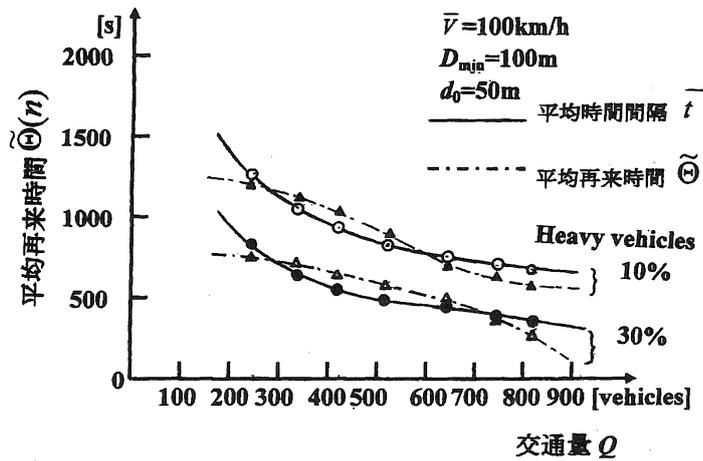


図 3-18 大型車混入率の違いによる交通量と平均再来時間の関係 ($\bar{V}=100\text{km/h}$)

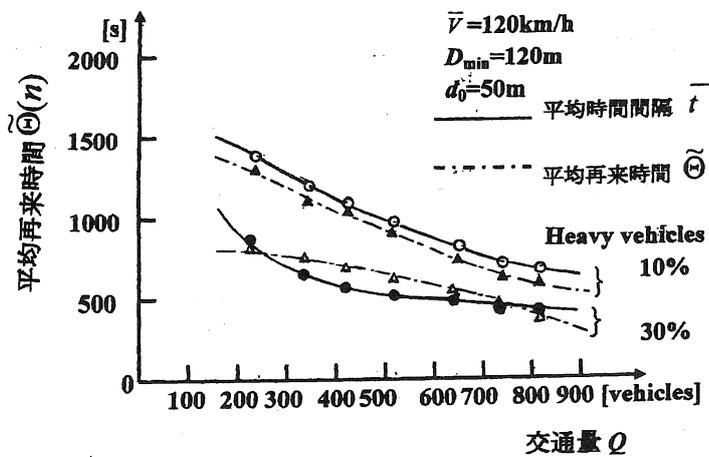


図 3-19 大型車混入率の違いによる交通量と平均再来時間の関係 ($\bar{V}=120\text{km/h}$)

3.5.3 通過車両台数 n との関係

3.2 節で述べたように観測点を通過する車両台数の確率分布が Poisson 分布に従う場合、75% の信頼度で L_{AeqT} の値を ± 1 dB の精度で推定するためには約 70 台の車両を、また同じく 90% の信頼度で推定するためには約 170 台の車両を測定対象とする必要がある。図 3-3 に示したように、交通量が $Q=820$ [台/h] と多い場合にはそれぞれ 5-7 分、及び 12-13 分の測定時間に相当する。またこれらの所要時間は図 3-18 より、 $\tilde{\Theta}$ とほぼ同じ値であることがわかる。

一方、 $Q=240$ [台/h] と少ない場合の所要時間は 75% の信頼度に対しては 19 から 20 分、90% の信頼度に対しては約 40 分である(図 3-4 参照)。これらの所要時間は、 $\tilde{\Theta}$ の 1-3 倍に相当する(図 3-18 参照)。

3.6 まとめ

高速道路近傍における等価騒音レベルを安定で精度良く求めるために必要とされる観測時間長 T について検討した[18-23]。シミュレーション実験により各種交通条件下における L_{AeqT} の通過車両台数 n 及び T への依存度を調べた結果、Poisson 交通流(ランダムな交通流)に対して $n = 70$ 台とすれば 75 % 以上の信頼度で L_{AeqT} を精度良く (± 1 dB 以内の誤差で)測定できる。また、 $n = 170$ 台とすれば 90 % 以上の信頼度が得られることが分かった。なお、通過車両台数 ($1 \ll n$) は多くなるにつれて正規分布で近似されることから上記信頼度 75 % 及び 90 % は実際上それぞれ 95.5 % 及び 99.7 % と看做されよう。次に測定時間長 T と通過車両台数 $1 \ll n$ 及び時間交通量 Q の間には

$$T : n \cong 3600 : Q \quad (3.19)$$

なる関係がある。これより所望の精度と信頼度を有する L_{AeqT} を得るために必要とされる実測時間長 T は通過車両台数 n と時間交通量 Q から簡単に

$$T \cong 3600 \times \frac{n}{Q} [\text{s}] \quad (3.20)$$

と求められる。また測定時間中繰り返し何度か出現する L_{pA} の最大値 L_{AFmax} の平均再来時間 $\tilde{\Theta}$ に関する理論的考察から、 $\tilde{\Theta}$ と上述の実測時間長 T との間には

$$T \cong (1 \sim 3) \tilde{\Theta} \quad (3.21)$$

なる関係があることを示した。このことは、交通条件(大型車混入率、時間交通量、平

均車速度)及び通過車両台数の確率分布が既知のとき、図3-14-図3-16及び図3-

17-図3-19を利用して、直接 $\tilde{\Theta}$ から実測時間長 T を選定できることを意味する。

4 章 最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} と等価騒音レベル L_{AeqT} との関係

RTN の基準値は、現在わが国では法制上、等価騒音レベル L_{AeqT} を用いて定められている。騒音の暴露エネルギーの時間平均レベルを計測、評価するもので国際的にも広く用いられている。しかしながら、平均的な L_{AeqT} のみならず時間帯(昼夜)による変動、最大騒音レベル L_{AFmax} やその発生頻度等の影響を無視することはできない[1-3]。特に道路近傍においては L_{AeqT} に加え、騒音の変動特性や L_{AFmax} 等の影響を適切に評価することが望まれる。本章では昼間と夜間の L_{AeqT} のレベル差及び L_{AFmax} と L_{AeqT} の関係等に関する基礎的知見を得るための簡易な計算手法を提案し、動的モデルに基づくシミュレーション実験を行いその有効性を示す。

4.1 昼間と夜間の L_{AeqT} のレベル差 ΔL_{AeqT}

丸山、久野、曾根は、高速道路近傍において 1 日 24 時間にわたって L_{Aeq1h} の測定を 1 時間毎に行った。更に、測定時間帯中の代表的な交通条件に対して交通流を模擬した動的モデルに基づくモンテカルロシミュレーション実験を行った[4]。本節では、昼間と夜間における L_{AeqT} のレベル差 ΔL_{AeqT} に着目して高速道路沿道での RTN の暴露状況と交通流の関係について考察する。

4.1.1 理論的考察

実測時間長 T が十分長いとき、平坦な直線道路周辺における L_{AeqT} は、次式(4.1)で与えられる[5]。

$$L_{AeqT} = L_W - 10 \log_{10}(2d_0 \bar{D}) \quad [\text{dB}] \quad (4.1)$$

ここで、 L_W は走行する車両の平均パワーレベル、 \bar{D} は平均車間距離、 d_0 は観測距離である。昼間と夜間における L_{AeqT} のレベル差を ΔL_{AeqT} とすると、 ΔL_{AeqT} は次式により求められる。

$$\Delta L_{AeqT} = (L_{AeqT})_1 - (L_{AeqT})_2 = 10 \log_{10} \mu_1 \bar{W}_1 - 10 \log_{10} \mu_2 \bar{W}_2 \quad (4.2)$$

但し、 $\mu_i \bar{W}_i$ は道路単位長あたりの音源出力である。添字 $i = 1$ は昼間、 $i = 2$ は夜間を表す。更に上式は昼間と夜間の交通量 Q 、平均車速度 \bar{V} 及び大型車混入率 p を用いて

$$\Delta L_{AeqT} = 10 \log_{10} \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{1 + 4p_1}{1 + 4p_2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4.3)$$

と書き表され、道路からの距離 d_0 に依らないことがわかる[4-5]。

4.1.2 実測及びシミュレーション計算結果との比較検討

式(4.2)に示すように、 ΔL_{AeqT} は昼夜間において $\Delta L_{AeqT} > 0$ 、 $\Delta L_{AeqT} = 0$ 、または $\Delta L_{AeqT} < 0$ の3つの場合が起こり得る。式(4.2)と式(4.3)に示すように、 L_{AeqT} が昼間と夜間でほとんど変化がないとき、 ΔL_{AeqT} は0に近づく。これは現実の高速道路における交通条件(交通量、車速、大型車混入率)がある種の関係を満たすとき起きる。

表4-1と表4-2は、対象とする道路から $d_0 = 50\text{m}$ 離れた地点で各々昼間と夜間

の基準時間帯中に L_{Aeq1h} を測定したときの 4 種類の交通条件を示す。又、表 4-3 はその場合に以下の (1)–(3)の方法で求めた ΔL_{AeqT} 値である。

- (1) 測定した L_{Aeq1h} の値を直接式(4.2)に代入する。
- (2) シミュレーション実験から計算された L_{Aeq1h} 値を式(4.2)に代入する。
- (3) 両時間帯での交通条件を各々式(4.3)に代入する。

表 4-3 からわかるように、夜間の交通量が昼間の半分以下に減少し、しかも大型車が昼間より 10–36 台減少しているにもかかわらず、両時間帯でのレベル差 ΔL_{AeqT} は 1–2dB と小さく、いずれの方法から得られた値もほぼ一致している。このことは式(4.3)が示すように、夜間交通量の減少は車速及び大型車混入率の増加を促し L_{AeqT} に対する影響を相殺することを物語っている。

表4-1 夜間の交通条件

SAMPLE (10)		SAMPLE (20)	
時間帯	午後11時～午前0時	時間帯	午前2時～午前3時
交通量 Q	419 [台/h]	交通量 Q	346 [台/h]
大型車 Q_t	86 [台/h]	大型車 Q_t	67 [台/h]
小型車 Q_p	333 [台/h]	小型車 Q_p	219 [台/h]
大型車混入率		大型車混入率	
大型車 p	0.205	大型車 p	0.194
小型車 q	0.795	小型車 q	0.806
平均車速度 \bar{V}	96.5 [km/h]	平均車速度 \bar{V}	104 [km/h]

表4-2 昼間の交通条件

SAMPLE (30)		SAMPLE (40)	
時間帯	正午～午後1時	時間帯	午前11時～正午
交通量 Q	677 [台/h]	交通量 Q	763 [台/h]
大型車 Q_t	96 [台/h]	大型車 Q_t	103 [台/h]
小型車 Q_p	581 [台/h]	小型車 Q_p	660 [台/h]
大型車混入率		大型車混入率	
大型車 p	0.142	大型車 p	0.135
小型車 q	0.858	小型車 q	0.865
平均車速度 \bar{V}	91.5 [km/h]	平均車速度 \bar{V}	92.9 [km/h]

表 4-3 昼間と夜間での ΔL_{Aeq1h} 値

[dB]

SAMPLE(10)		SAMPLE(30) - SAMPLE(10)	
$(L_{Aeq1h})_{measured}$	62.6	(1) $(\Delta L_{Aeq1h})_{measured}$	1
$(L_{Aeq1h})_{simulated}$	62.7	(2) $(\Delta L_{Aeq1h})_{simulated}$	1.1
		(3) $(\Delta L_{Aeq1h})_{calculated}$	1
SAMPLE(20)		SAMPLE(30) - SAMPLE(20)	
$(L_{Aeq1h})_{measured}$	62.4	(1) $(\Delta L_{Aeq1h})_{measured}$	1.2
$(L_{Aeq1h})_{simulated}$	62.7	(2) $(\Delta L_{Aeq1h})_{simulated}$	1.1
		(3) $(\Delta L_{Aeq1h})_{calculated}$	1.3
SAMPLE(30)		SAMPLE(40) - SAMPLE(10)	
$(L_{Aeq1h})_{measured}$	63.6	(1) $(\Delta L_{Aeq1h})_{measured}$	1.8
$(L_{Aeq1h})_{simulated}$	63.8	(2) $(\Delta L_{Aeq1h})_{simulated}$	1.8
		(3) $(\Delta L_{Aeq1h})_{calculated}$	1.6
SAMPLE(40)		SAMPLE(40) - SAMPLE(20)	
$(L_{Aeq1h})_{measured}$	64.4	(1) $(\Delta L_{Aeq1h})_{measured}$	2
$(L_{Aeq1h})_{simulated}$	64.5	(2) $(\Delta L_{Aeq1h})_{simulated}$	1.8
		(3) $(\Delta L_{Aeq1h})_{calculated}$	1.8

4.2 昼夜における L_{AFmax} のレベル差 ΔL_{AFmax}

本節では、昼夜における交通流の変化が最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} に与える影響について検討する。

4.2.1 理論的考察

道路に近い観測点では最大騒音レベル L_{AFmax} は直前を通過する大型車によりほぼ決定される。そしてこの L_{AFmax} は大型車のパワーレベル L_{W_i} と騒音の伝搬特性から求められる。従って同じ観測点では L_{AFmax} の昼間と夜間のレベル差は主として大型車の昼夜におけるパワーレベル差により決定される。一方、大型車のパワーレベルは実測調査によれば走行速度 V_i に依存し次式で与えられる[6]。

$$L_{W_i} = 20 \log_{10} V_i + 71.5 \text{ [dB]} \quad (4.4)$$

ここで、 V_i は大型車の走行速度、 L_{W_i} はパワーレベルである。

大型車の昼間の車速を V_{t_1} 、夜間の車速を V_{t_2} とすれば、昼夜における L_{AFmax} のレベル差 ΔL_{AFmax} は概略、

$$\Delta L_{AFmax} \cong 20 \log_{10} \left(\frac{V_{t_2}}{V_{t_1}} \right) \text{ [dB]}, \quad (V_{t_1} < V_{t_2} \text{ のとき}) \quad (4.5)$$

と見積られる。

4.2.2 実測及びシミュレーション計算結果との比較

RTN の実測及びシミュレーション計算を基に上記の考察の妥当性について検討する。そのため実測及びシミュレーション計算において騒音レベルの累積度数分布を求め、便宜上最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} として L_{A5} を採用し、その昼夜間のレベル差 $\Delta L_{A5} = (L_{A5})_2 - (L_{A5})_1$ を用いてレベル差 ΔL_{AFmax} を評価するものとしよう。表 4-4 にはこの様にして得られた ΔL_{AFmax} ($\cong \Delta L_{A5}$) の実測及びシミュレーション結果と式(4.5)から求めた結果を併記している。これらの結果は良く一致しており、理論的考察の妥当性を示している。交通量の減少に伴う車速の増加は夜間における L_{AFmax} を若干持ち上げる傾向が見られる。

表 4-4 昼間と夜間での ΔL_{AFmax} [dB]

SAMPLE(10)		SAMPLE(10) – SAMPLE(30)	
$\overline{(L_{AFmax})}$ measured	69	(1) (ΔL_{AFmax}) measured	0.5
$\overline{(L_{AFmax})}$ simulated	69.5	(2) (ΔL_{AFmax}) simulated	0.6
大型車音響パワー W_i [W]	0.132	(3) (ΔL_{AFmax}) calculated	0.5
SAMPLE(20)		SAMPLE(20) – SAMPLE(30)	
$\overline{(L_{AFmax})}$ measured	70	(1) (ΔL_{AFmax}) measured	1.5
$\overline{(L_{AFmax})}$ simulated	70.3	(2) (ΔL_{AFmax}) simulated	1.4
大型車音響パワー W_i [W]	0.151	(3) (ΔL_{AFmax}) calculated	1.1
SAMPLE(30)		SAMPLE(10) – SAMPLE(40)	
$\overline{(L_{AFmax})}$ measured	68.5	(1) (ΔL_{AFmax}) measured	0
$\overline{(L_{AFmax})}$ simulated	68.9	(2) (ΔL_{AFmax}) simulated	0.1
大型車音響パワー W_i [W]	0.117	(3) (ΔL_{AFmax}) calculated	0.3
SAMPLE(40)		SAMPLE(20) – SAMPLE(40)	
$\overline{(L_{AFmax})}$ measured	69	(1) (ΔL_{AFmax}) measured	1
$\overline{(L_{AFmax})}$ simulated	69.4	(2) (ΔL_{AFmax}) simulated	0.9
大型車音響パワー W_i [W]	0.123	(3) (ΔL_{AFmax}) calculated	0.9

4.3 L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差 $\Delta L_{Amax/eq}$

本節では各時間帯における L_{AeqT} と L_{AFmax} との関係、即ち両者のレベル差 $L_{AFmax} - L_{AeqT} \equiv \Delta L_{Amax/eq}$ について検討する。まず $\Delta L_{Amax/eq}$ の上限及び下限を理論的に導出し、その妥当性を実測及びシミュレーション計算により確認する。

4.3.1 レベル差 $\Delta L_{Amax/eq}$ の上限 $\Delta L_{Amax/eq}^{(\infty)}$

L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差 $\Delta L_{Amax/eq}$ の上限 $\Delta L_{Amax/eq}^{(\infty)}$ について検討しよう。 図 4-1

は車群が一定の車速度を保ちながら直線道路上を走行する良く知られた等間隔・等パワーモデルの模式図である。観測点 P での音の強さは次式で与えられる：

$$I(d_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\bar{W}}{2\pi} \times \frac{1}{d_0^2 + x_n^2} = \frac{\bar{W}}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{d_0^2 + (x + n\bar{D})^2}$$

$$= \frac{\bar{W}}{2\pi} \cdot \frac{\sinh(2\pi d_0 / \bar{D})}{\cosh(2\pi d_0 / \bar{D}) - \cos(2\pi x / \bar{D})} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.6)$$

ただし、 \bar{W} [W] は 1 台の車の音響パワー、 d_0 [m] は観測距離である。また \bar{D} は平均車間距離であり、交通量 Q [台/h] 及び平均車速度 \bar{V} [km/h] により $\bar{D} = \frac{1000\bar{V}}{Q}$ [m] と表される

[7-9]。

他方、 L_{AeqT} に対応する観測点 P における音の強さは次式で与えられる。

$$I_{eq} = \frac{\bar{W}}{2d_0\bar{D}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.7)$$

ここで、 \bar{W} [W] は平均音響パワーである。

図 4-2 は図 4-1 に示した道路上のすべての車を大型車で置き換え、かつ 1 台の大型車が x 軸の原点 O に丁度到達した場合の模式図を示す。 W を W_l とおき、 \bar{D} を $\bar{D} = D_0 \cong D_{\min}$ [m]にとれば、 P 点での音の強さは最大となり

$$I_{AFmax}^{(\infty)} = \frac{W_l}{2d_0 D_0} \cdot \coth\left(\frac{\pi d_0}{D_0}\right) = I_{eq} \cdot \frac{\bar{D}}{D_0} \cdot \frac{W_l}{W} \coth\left(\frac{\pi d_0}{D_0}\right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.8)$$

と表される。 上式のレベル表示は L_{AFmax} に対する理論上の最大値を与え、 L_{AeqT} との

レベル差は

$$\begin{aligned} \Delta L_{Amax/eq}^{(\infty)} &= 10 \log_{10} \left(\frac{I_{max}^{(\infty)}}{I_{eq}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_l}{W} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{D}}{D_0} \right) + 10 \log_{10} \coth \left(\frac{\pi d_0}{D_0} \right) \\ &\cong 10 \log_{10} \left(\frac{5}{1+4p} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{1000}{Q} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{\pi d_0}{D_{\min}} \right) \quad [\text{dB}] \end{aligned} \quad (4.9)$$

となる。ただし、 p は大型車の混入率である[4]。

4.3.2 レベル差 $\Delta L_{Amax/eq}$ の下限 $\Delta L_{Amax/eq}^{(1)}$

図 4-3 に示すように、 $D_0 \cong D_{\min}$ 区分内にいる一台の大型車による L_{AFmax} と L_{AeqT}

間のレベル差 $\Delta L_{Amax/eq}^{(1)}$ は次のように与えられる:

$$\begin{aligned} \Delta L_{Amax/eq}^{(1)} &= 10 \log_{10} \left(\frac{I_{max}^{(1)}}{I_{eq}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_l}{W} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{D}}{\pi d_0} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{5}{1+4p} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{1000}{Q} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{D_{\min}}{\pi d_0} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

ここに、 $I_{max}^{(1)} = \left(\frac{W_l}{2\pi d_0^2} \right)$ は直前の 1 台の大型車による受音強度である[4]。

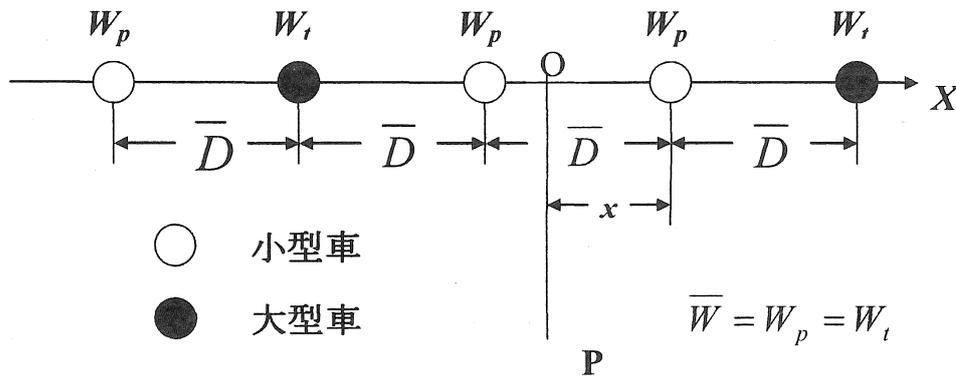


図 4-1 等間隔等パワーモデルに対する音源・観測

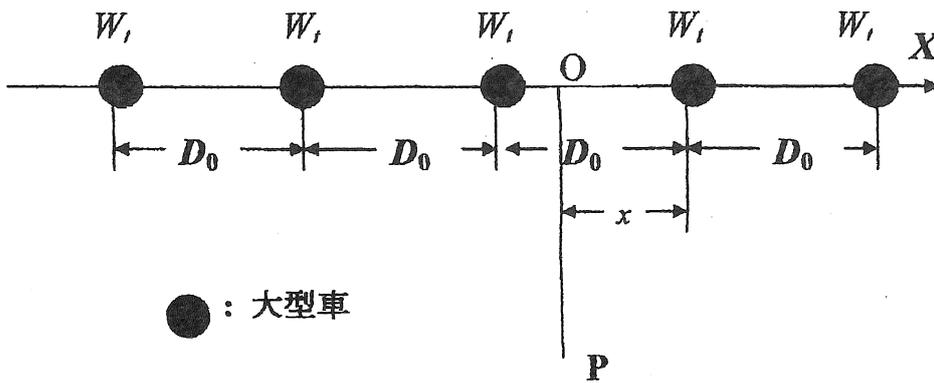


図 4-2 図 4-1 の道路上の車を全て大型車に置き換えた模式図

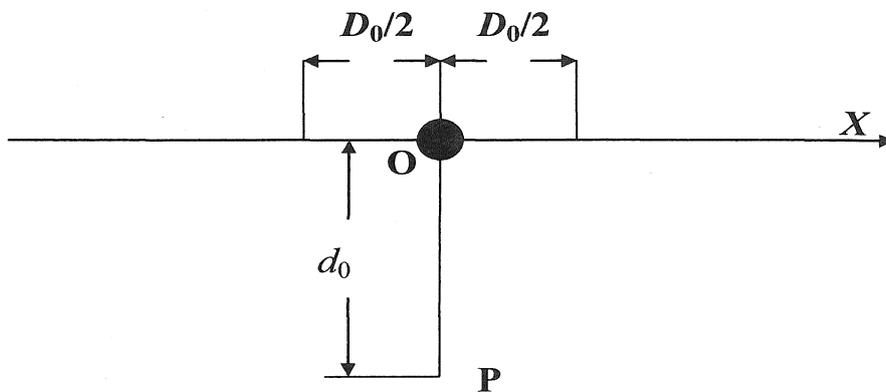


図 4-3 D_0 区分内の原点 O に大型車が 1 台到来したときの模式図

4.3.3 実測及びシミュレーション結果

前項では簡単な推論により、平坦な直線道路近傍における L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル

差 $\Delta L_{Amax/eq}$ の下限および上限は各々、

$$\Delta L_{Amax/eq}^{(1)} = 10 \log_{10} \left(\frac{5}{1+4p} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{1000}{Q} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{D_{min}}{\pi d_0} \right) \quad (4.10)$$

$$\Delta L_{Amax/eq}^{(\infty)} = 10 \log_{10} \left(\frac{5}{1+4p} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{1000}{Q} \right) + 10 \log_{10} \coth \left(\frac{\pi d_0}{D_{min}} \right) \quad (4.9)$$

で与えられることを示した。表 4-5 は $\Delta L_{Amax/eq}$ の実測値及びシミュレーション結果を

上式の結果と比較したものである。表 4-5 から以下のことがわかる。

(1) 実測及びシミュレーション結果は上述の関係

$$\Delta L_{Amax/eq}^{(1)} < \Delta L_{Amax/eq} < \Delta L_{Amax/eq}^{(\infty)} \text{ を満たしている。}$$

(2) $\Delta L_{Amax/eq}$ は $\Delta L_{Amax/eq}^{(\infty)}$ よりも $\Delta L_{Amax/eq}^{(1)}$ に近い。

(3) $\Delta L_{Amax/eq}$ は交通量 Q が少ない時間帯(夜間)で増大する。

(4) 観測点が道路に近いほど、 $\Delta L_{Amax/eq}$ は増大する。

言うまでもなく L_{AFmax} は大型車の配置状況に依存し、最小許容車間距離 D_{min} で走行する大型車の車両台数と共に増大する。しかしながら、次の 5 章及び 6 章で示すように、ある時刻 t に観測点近傍の有効区分内に存在する大型車は通常 2-3 台以下であり、大型車の車両台数の増加による L_{AFmax} の増大は比較的小さい。

表 4-5 各時間帯での $\Delta L_{A \max / eq}$, $\Delta L_{A \max / eq}^{(\infty)}$ 及び $\Delta L_{A \max / eq}^{(1)}$ [dB]

SAMPLE(10)		SAMPLE(20)	
(1) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{measured}}$	6.4	(1) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{measured}}$	7.6
(2) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{simulated}}$	6.8	(2) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{simulated}}$	7.6
(3) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(\infty)})_{\text{calculated 1}}$	8.5	(3) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(\infty)})_{\text{calculated 1}}$	9.5
(4) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(1)})_{\text{calculated 2}}$	6.1	(4) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(1)})_{\text{calculated 2}}$	7.3
SAMPLE(30)		SAMPLE(40)	
(1) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{measured}}$	4.9	(1) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{measured}}$	4.6
(2) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{simulated}}$	5.1	(2) $(\Delta L_{A \max / eq})_{\text{simulated}}$	4.9
(3) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(\infty)})_{\text{calculated 1}}$	7	(3) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(\infty)})_{\text{calculated 1}}$	6.8
(4) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(1)})_{\text{calculated 2}}$	4.4	(4) $(\Delta L_{A \max / eq}^{(1)})_{\text{calculated 2}}$	4

尚、 $\Delta L_{A \max/eq}^{(\infty)}$ と $\Delta L_{A \max/eq}^{(1)}$ のレベル差は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta L &= \Delta L_{A \max/eq}^{(\infty)} - \Delta L_{A \max/eq}^{(1)} = 10 \log_{10} \coth \left(\frac{\pi d_0}{D_{\min}} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{D_{\min}}{\pi d_0} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left\{ \frac{\coth \left(\frac{\pi d_0}{D_{\min}} \right)}{\frac{D_{\min}}{\pi d_0}} \right\} = 10 \log_{10} (d_0^* \coth d_0^*) \quad [\text{dB}] \end{aligned} \quad (4.11)$$

ただし、 $d_0^* = \frac{\pi d_0}{D_{\min}}$ である。図 4-4 に、 d_0^* と ΔL との関係を示す。 $L_{AF \max}$ 値が問題

となる道路近く ($d_0/D_{\min} < 1$) では、上下限値のレベル差は 5dB 以下であり、観測点が

道路に近づくにつれ ($d_0^* \rightarrow 0$)、両者のレベル差は 0 になることが知られる [7]。

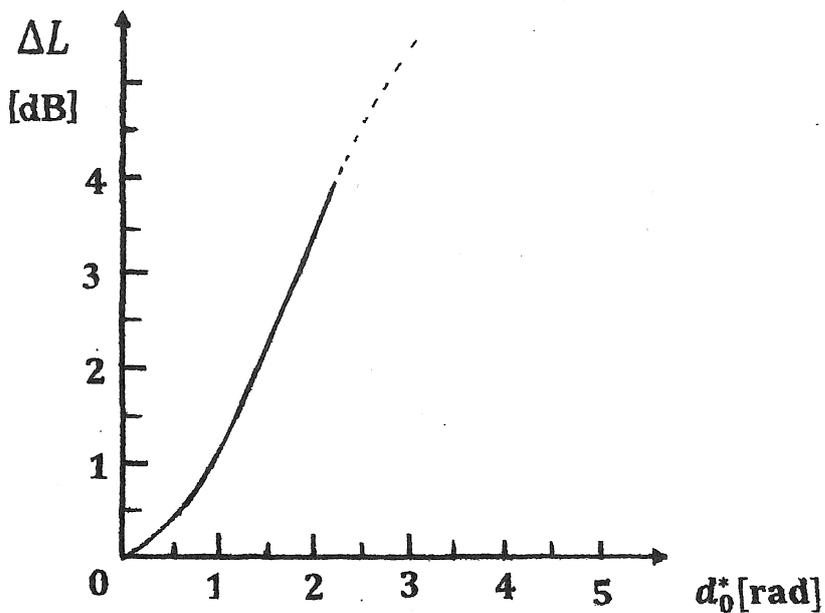


図 4-4 換算観測距離 d_0 とレベル差 ΔL との関係

4.4 まとめ

道路交通騒音の主要な評価量である L_{AeqT} 及び L_{AFmax} について理論と実測並びにシミュレーション実験に基づき検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 夜間における交通量の減少は車速、大型車混入率の増加により L_{AeqT} の減少には余り結びつかない。
- (2) L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差 $\Delta L_{Amax/eq}$ は昼間よりも夜間、道路に近いほど大きい。
- (3) 最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} は主として大型車のパワーレベル(車速)に依存し、交通量や大型車混入率の寄与は小さい。

5章 昼間と夜間における L_{AFmax} の発生状況

L_{AeqT} と L_{pA} の測定において、関心の高い事象の1つに L_{pA} の最大値の発生状況がある。RTN の評価において最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の値やその挙動を把握することは極めて重要である[1-5]。本章では昼間と夜間において交通条件(交通量、大型車混入率、車速度)が L_{AFmax} の発生にどのような影響を及ぼすかについて検討する。更に、大型車による L_{AFmax} の発生頻度・発生回数を簡易に算定する手法を提案し、動的モデルによるシミュレーション実験を行い比較検討する[6]。

5.1 シミュレーションによる検討

本節では、動的モデルによるシミュレーション実験を基に昼間と夜間における大型車による L_{AFmax} の発生状況について検討する。

5.1.1 交通量(大型車)と L_{AFmax}

図 5-1 及び図 5-2 は、各々夜間と昼間の RTN のシミュレーション結果から得られた L_{AFmax} の度数分布である。図から、① 通過した大型車の車両台数に比例して L_{AFmax} の発生回数も多くなる ② 実際に通過した大型車の車両台数よりも発生した L_{AFmax} の個数の方が多くなる ③ 夜間より昼間の方が L_{AFmax} の発生回数が多い。これらの原因として、大型車が観測点を通過する際の以下の車両配置が考えられる。

- (1) 1台の大型車が単独で観測点を通過する場合

(2) 2台又は3台以上の大型車の群れが最小許容車間距離 D_{\min} を保ちながら観測点を通過する場合

上記(1)、(2)のケースでは、交通量の多少に関係なく大型車の出現度数と $L_{AF\max}$ の発生回数は極めて良く一致する。しかしながら、後の 5.2 節でも述べるように、以下の(3)–(5)の場合にも当然 $L_{AF\max}$ は発生する。

(3) 1台の大型車と1台の小型車が D_{\min} を保ちながら観測点を通過する場合

(4) 1台の大型車と2台の小型車が各々 D_{\min} を保ちながら観測点を通過する場合

(5) 2台の大型車と1台の小型車が各々 D_{\min} を保ちながら観測点を通過する場合

一般に、交通量が多くなると車間距離が短くなり、(3)–(5)の出現頻度(確率)が増加し、 $L_{AF\max}$ 及びこれに準ずる L_{pA} の値も複数観測される。一方、交通量が少なくなると車群(3)–(5)の出現度数は減少し、 $L_{AF\max}$ の発生回数も抑制される。なお、4章の表 4-1 と表 4-2 に示した昼間と夜間の交通条件及び図 5-1 と図 5-2 から、昼間の交通量の増加は $L_{AF\max}$ の値そのものにはあまり影響しないことがわかる[7]。

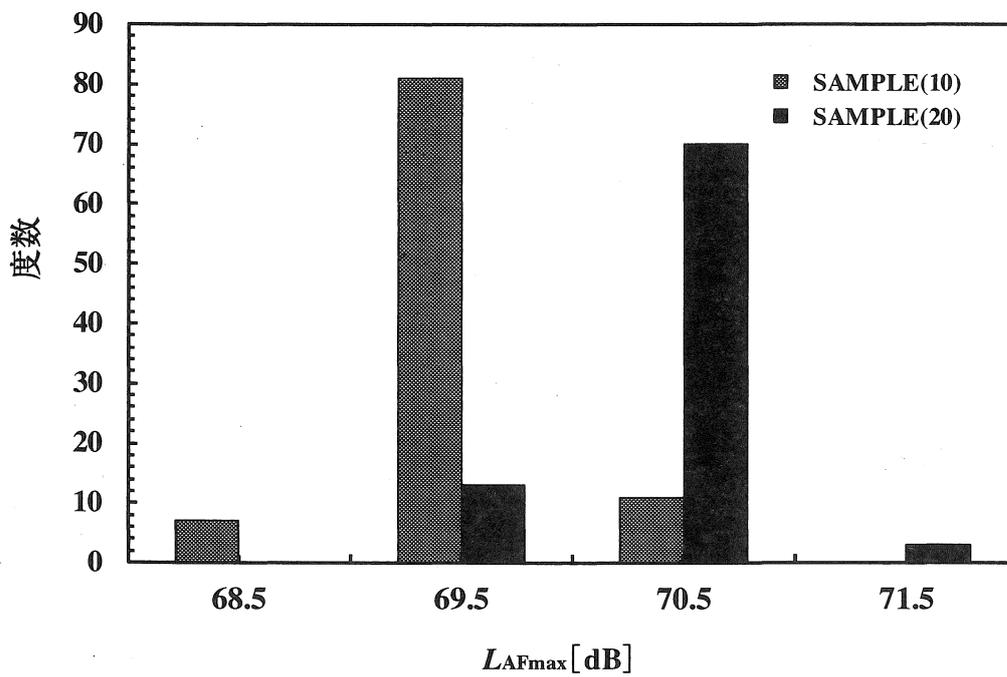


図 5-1 夜間の L_{AFmax} の度数分布

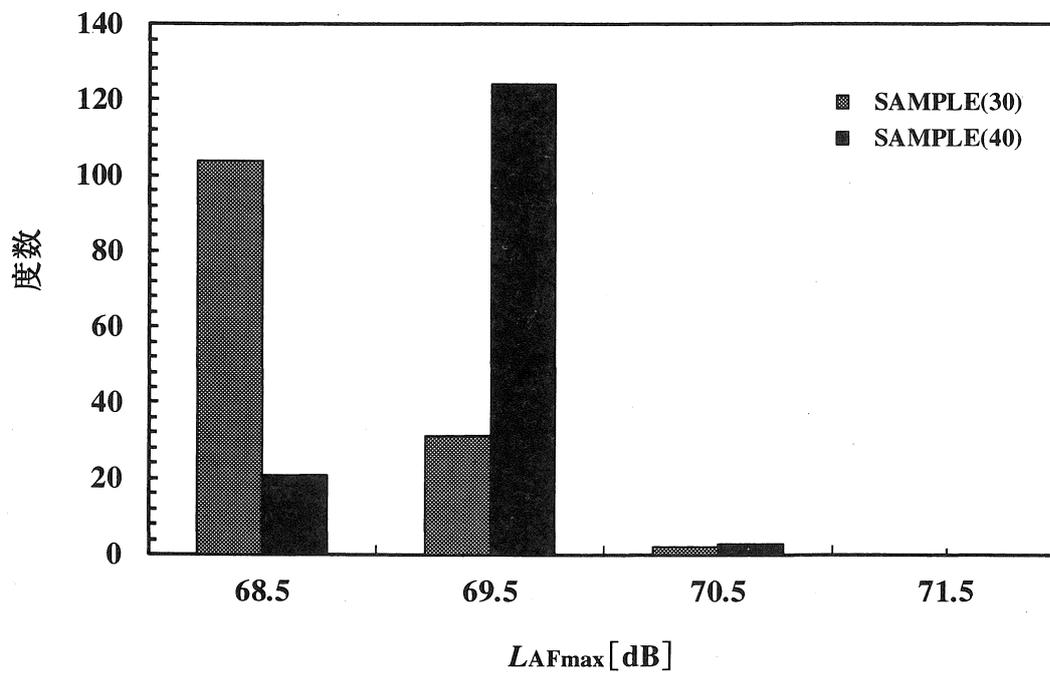


図 5-2 昼間の L_{AFmax} の度数分布

5.1.2 大型車混入率と L_{AFmax}

5.1.1 項で述べた現象は、交通量が同一でも大型車の混入率が大幅に増加すると起こりうる。又、大型車混入率が大幅に増加すると、1台の大型車が単独で観測点を通過する確率はもとより2台又はそれ以上の大型車群が最小許容車間距離 D_{min} を保ちながら継続して通過する確率も高くなり、 L_{AFmax} の発生個数も多くなる。尚、前項でも述べたように大型車混入率の多少は L_{AFmax} の値自体にはさほど影響しない。

5.1.3 車速度と L_{AFmax}

車速度の増減は、 L_{AFmax} の発生個数には影響しないが、4章でも述べたように大型車のパワーレベルの増減に直接関係し、受音点での L_{AFmax} の値に影響を与える。図5-1、図5-2のシミュレーション結果が示すように、 L_{AFmax} の値は昼間よりも夜間の方が高くなる傾向が見られる。

5.2 L_{AFmax} の発生回数に関する簡易計算法

3章では L_{pA} の測定時間帯中、 L_{AFmax} が観測される種々の車の配置状態に対する平均時間間隔 \bar{t} 及び平均再来時間 $\tilde{\Theta}$ について考察を行い、大型車に注目した平均再来時間を算出する方法を示したが、必ずしも実務的とは言い難いものであった[6]。

本節では、大型車に着目し現場等で L_{AFmax} の出現回数等を平易に推定する簡便な方法について考える[7]。3.4節では、騒音レベル L_{pA} の測定時間中に L_{AFmax} が観測さ

れる車群配置には(1)–(6)のケースがあることを述べた(図 3–13)。 L_{AFmax} の値は主要区分内の大型車の台数により主として決定されることから、上記(1)–(6)のケースを大型車の台数に基づき大きく 3 分類に集約する(束ねる)ことにした。また当然のことながら、交通量が増加すれば平均車間距離 \bar{D} は短く減少すれば長くなる。対象とする高速道路では交通量の増減により最小許容車間距離 $D_{min}(=D_0)$ と \bar{D} の間に $\bar{D} > D_0$ なる時間帯(夜間)と $\bar{D} \approx D_0$ なる時間帯(昼間)とが存在する。この点に留意し、主要区分内を走行する大型車の出現頻度及び出現回数を推定する簡易な方法を提案し、シミュレーション実験によりその妥当性を検討する[7–8]。

5.2.1 主要区分内の大型車が 1 台の場合

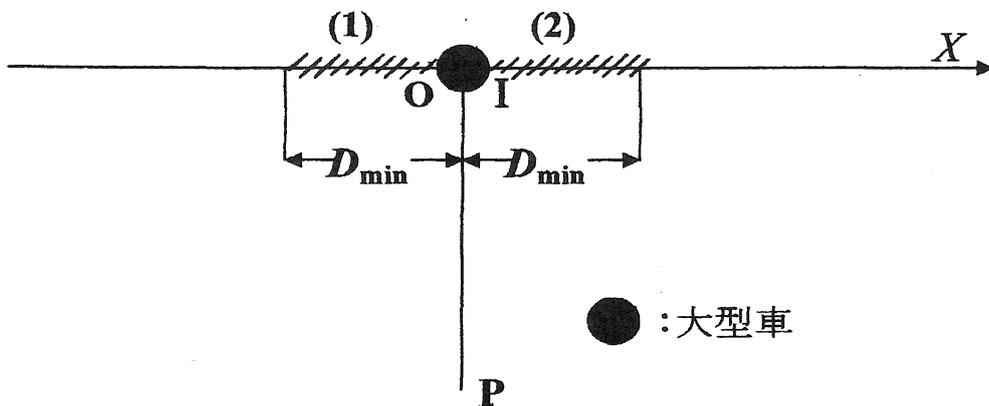


図 5–3 観測点 P の正面に 1 台の大型車が出現した場合の模式図

図 5–3 は、観測点 P の正面(原点 O)に 1 台の大型車が到来したときの模式図である。

[1] $\bar{D} > D_{\min}$ なる時間帯、すなわち交通量が昼間に比べて大幅に減少する夜間では、斜線(1)の D_{\min} 区間内に大型車がない確率は $1 - p\mu D_{\min}$ で与えられる。

ここに、 p は大型車混入率、 $\mu (=1/\bar{D})$ は単位長あたりの平均車両台数である。

同様にして、斜線(2)の区間に大型車がない確率も $1 - p\mu D_{\min}$ で与えられる。これより、主要区分距離 R [m]内に他に1台の大型車もない確率はこれらの確率の相乗積 $\left(1 - p\frac{D_{\min}}{D}\right)^2$ で与えられる。

[2] $\bar{D} \approx D_{\min}$ なる時間帯、すなわち交通量が夜間に比べて大幅に増加する昼間では、斜線(1)の D_{\min} 区間内に大型車がない確率は $\left[1 - p\left\{1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right\}\right]$ で与えられる。

斜線(2)についても同様である。これより、長さ R の主要区分距離内に大型車がない確率はこれらの確率の相乗積 $\left[1 - p\left\{1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right\}\right]^2$ となる。従って、主要区分内に

大型車が1台存在する頻度は、夜間においては $p\left(1 - p\frac{D_{\min}}{D}\right)^2$ 、昼間においては $p\left\{1 - p\left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right)\right\}^2$ で与えられる。この頻度に時間交通量 Q をかければ、1

時間あたりに上記事象が出現する回数は夜間 $Q \times p\left(1 - p\frac{D_{\min}}{D}\right)^2$ 、昼間 $Q \times p\left\{1 - p\left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right)\right\}^2$ と見積られる。

5.2.2 主要区分内の大型車が2台の場合

図5-4は継続する2台の大型車が D_{\min} の間隔を保って、観測点の正面に到来したときの模式図である。原点 O に大型車Ⅰが有り、続く D_{\min} の間に大型車Ⅱが出現

するが、I の前及びIIの後 D_{\min} の間には大型車は無い。

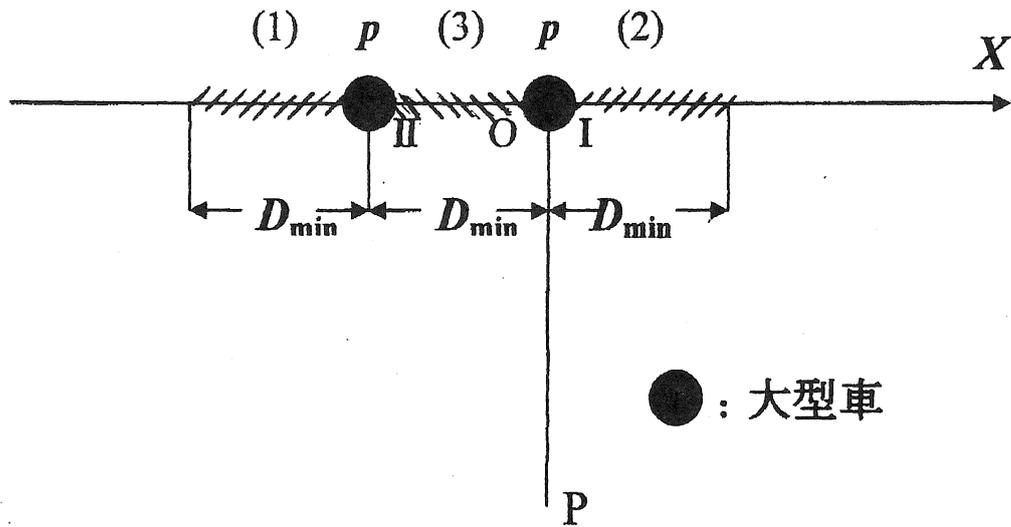


図 5-4 観測点 P の正面に 2 台の大型車が出現した場合の模式図

[3] $\bar{D} > D_{\min}$ なる時間帯、すなわち夜間では、図 5-4 の斜線(1)と(2)に大型車無しの確率はいずれも $1 - p\mu D_{\min}$ である。また斜線(3)の部分に車両有りの確率は

$1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right) \cong \frac{D_{\min}}{D}$ である。これより、斜線(1)と(2)に大型車が無く、斜線(3)の区

分内に車両が有る確率は、これらの確率の相乗積 $\frac{D_{\min}}{D} \times \left(1 - p\frac{D_{\min}}{D}\right)^2$ で与えられる。

[4] $\bar{D} \approx D_{\min}$ なる時間帯、すなわち昼間では斜線(1)と(2)の部分に大型車無しの確率は

いずれも $1 - p(1 - \exp(-\mu D_{\min})) = 1 - p\left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right)$ となる。また斜線(3)の部分に 1

台の車両が有る確率は $1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)$ である。これより斜線(1)と(2)に 1 台の大型車

が無く、斜線(3)の区分内に大型車が有る確率は、これらの確率の相乗積

$\left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right) \left\{1 - p \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right)\right\}^2$ となる。従って、主要区分距離内に2台の大型

車が出現する頻度は、夜間 $p^2 \left(\frac{D_{\min}}{D}\right) \left(1 - p \frac{D_{\min}}{D}\right)^2$, 昼間 $p^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right) \times$

$\left\{1 - p \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right)\right\}^2$ で与えられる。これより、夜間と昼間において2台の大型

車の出現する回数は1時間あたり各々 $Q \times p^2 \left(\frac{D_{\min}}{D}\right) \left(1 - p \frac{D_{\min}}{D}\right)^2$,

$Q \times p^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right) \left\{1 - p \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right)\right)\right\}^2$ と見積られる。

5.2.3 主要区分内の大型車が3台の場合

交通量が増加すると、主要区分内に D_{\min} の車間距離を保って3台の大型車が出現する場合も起こりうる。

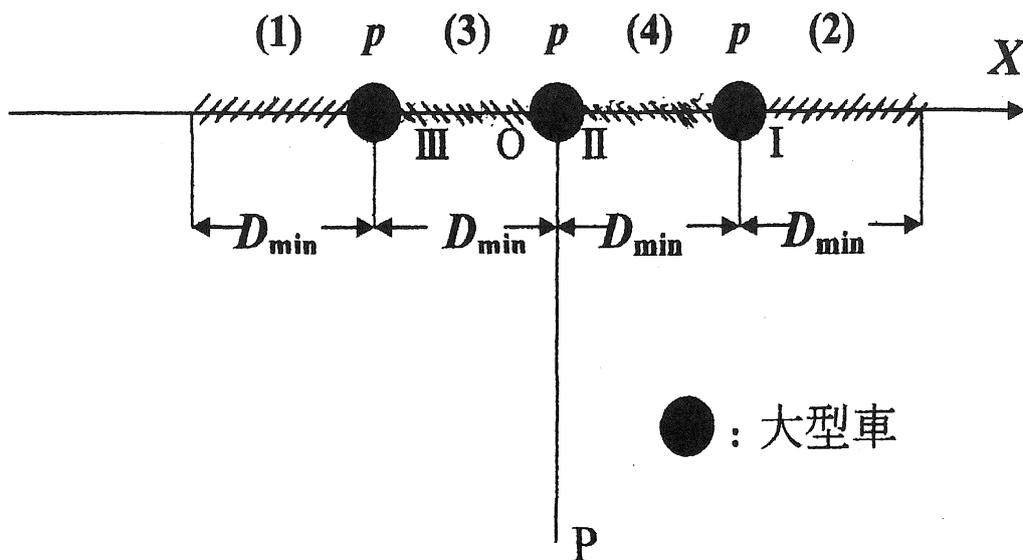


図5-5 観測点Pの正面に3台の大型車が出現した場合

図 5-5 は連続する 3 台の大型車が各々 D_{\min} の間隔を保って、観測点の正面に到来したときの模式図である。大型車 I に続く区間 D_{\min} 内に大型車 II が、更に続く区間 D_{\min} 内に大型車 III が出現し、I の前及び III の後 D_{\min} 内には大型車が無い状態である。

[5] $\bar{D} > D_{\min}$ なる時間帯、すなわち夜間では、斜線(1)と(2)の部分に大型車が無い確率は各々 $1 - p\mu D_{\min}$ であり、斜線(3)と(4)の部分に大型車が 1 台有る確率は各々 $p\mu D_{\min}$ である。これより、図 5-5 の事象が起きる確率は $p(p\mu D_{\min})^2 \times (1 - \mu p D_{\min})^2$ で与えられる。

[6] $\bar{D} \approx D_{\min}$ なる昼間では、斜線(1)と(2)の部分に大型車の無い確率は各々 $1 - p(1 - \exp(-\mu D_{\min}))$ 、斜線(3)と(4)の部分に大型車が 1 台有る確率は各々 $p \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right) \right\}$ である。これより、図 5-5 の事象が起こる確率は、

$p \left[p \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right) \right\} \right]^2 \times \left\{ 1 - p \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right) \right) \right\}^2$ で与えられる。従って、時

間交通量を Q [台/h]とすれば 3 台の大型車の群れが出現する回数は 1 時間あたり夜間

$Q \times p^3 \left(\frac{D_{\min}}{D} \right)^2 \left(1 - p \frac{D_{\min}}{D} \right)^2$, 昼間 $Q \times p^3 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right) \right\}^2 \times \left\{ 1 - p \left(1 - \exp\left(-\frac{D_{\min}}{D}\right) \right) \right\}^2$

となる。

5.3 シミュレーション計算と簡易計算結果

主要区分内の交通流における大型車の出現状況をシミュレーション実験により求め、前節の簡易計算の結果と共に表 5-1 に示す。両者は良く一致しているが、交通

量の少ない夜間の方が昼間より一致度が高いことが分かる。詳しくながめると、大型車 1 台の出現回数は簡易計算において、2 台の出現回数はシミュレーション計算において多くなっているが、全体の出現回数にはほとんど差がないことが知られる。従って、実際にシミュレーションを行わなくても、交通流における大型車の発生状況、即ち最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の発生頻度の概要を把握することができる。

表 5-1 主要区分内を通過する大型車の出現状況

分類と 出現項目	SAMPLE(10)		SAMPLE(20)		SAMPLE(30)		SAMPLE(40)	
	シミュレ- ション値	推定値	シミュレ- ション値	推定値	シミュレ- ション値	推定値	シミュレ- ション値	推定値
[1] 主要区分内を通過する 1 台の大型車								
出現頻度	0.164	0.171	0.125	0.17	0.186	0.123	0.2	0.117
出現回数(回)	68	72	57	59	76	83	83	89
出現台数(台)	68	72	57	59	76	83	83	89
[2] 主要区分内を通過する 2 台の大型車								
出現頻度	0.021	0.015	0.011	0.011	0.025	0.09	0.024	0.083
出現回数(回)	9	6.3	5	3.8	10	6	10	6.3
出現台数(台)	18	13	10	8	20	12	20	13
[3] 主要区分内を通過する 3 台の大型車								
出現頻度	0	0.0012	0	0.0009	0	0.0006	0	0.0006
出現回数(回)	0	0.5	0	0.3	0	0.4	0	0.5
出現台数(台)	0	2	0	1	0	1	0	2

5.4 まとめ

RTNの主要な騒音レベルの最大値 L_{AFmax} を決定する大型車の挙動(出現回数や車群配置等)を交通流に関するシミュレーション実験及び簡易計算手法を検討し、以下の知見を得た。

- (1) L_{AFmax} の値は交通量や大型車混入率よりも車速への依存度が高い。
- (2) L_{AFmax} の発生回数は交通量や大型車混入率に依存するが車速には依存しない。
- (3) 大型車の挙動に関するシミュレーションと簡易計算の結果とは良い一致を示した。従って、交通条件を基に最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の挙動を推測することが可能である。

6章 道路交通騒音の変動幅とその簡易計算

4章では、RTNの最大A特性音圧レベル L_{AFmax} に注目し、その挙動及び L_{AeqT} とのレベル差等について考察した。 L_{AFmax} 、 L_{AeqT} とも交通量への依存度は比較的lowく、昼夜における両者のレベル差は、両者とも交通量の差から期待されるほど大きくないことを確認した。一方、周知のごとく夜間における交通量の減少は騒音のダイナミックレンジ(変動幅)に大きな変化をもたらす。この章では、沿道における低位の騒音レベル(L_{A95} , $L_{A97.5}$)と、高位のレベル(L_{A5} , $L_{A2.5}$)の差に注目し、道路交通騒音の変動幅の特性を明らかにする。最近接音源に基づく近似法(最近接音源法)を適用し、変動幅(ダイナミックレンジ)に関する簡易な計算式を導き、シミュレーション実験によりその有用性を示す[1-3]。

6.1 主要区分内の大型車による音の強さ $I^{(M)}$

2章で述べたように、道路上全25個の有効区分 ΔX_j ($j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 12$)のうち受音点Pのレベル変動に大きく寄与する領域は、原点Oを含む ΔX_0 及びこれと対称な高々10個の区分 $\Delta X_{\pm 1}, \Delta X_{\pm 2}, \dots, \Delta X_{\pm 5}$ に限定される[4]。しかも、 L_{AFmax} の値に主として寄与する音源の配置は、 ΔX_0 区分内の中心(原点O)に1台の大型車が到来したときであり、かつ観測点Pが道路に近いほどその寄与は顕著である[1]。簡単のためRTNのダイナミックレンジの主要な部分は観測点Pに最も近い車(最近接音源)により決定

されるものと考えことにする。原点 O の周りの道路区間長 x に車が存在する確率はポアソン交通流に対しては $1 - \exp(-x/\bar{D})$ で与えられる。この場合、騒音のダイナミックレンジは大型車が原点 O にあるときの音の強さと小型車が全有効区分の両端 $x = (\pm l_{sum} / 2)$ のいずれかにあるときの音の強さ

$$I^{(M)} = \frac{W_l}{2\pi d_0^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.1)$$

及び

$$I^{(m)} = \frac{W_p}{2\pi(d_0^2 + x^2/4)} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.2)$$

のレベル差(相対レベル)により表される。ここに、 d_0 は観測距離[m]、 l_{sum} は全 25 個の有効区分距離で $l_{sum} = 25l$ [m]、 W_l は大型車の音響パワー[W]、 W_p は小型車の音響パワー[W]である。

このレベル差(ダイナミックレンジ)の出現確率が $N\%$ となる道路上の区間長を x_N とすれば

$$1 - \exp(-x_N/\bar{D}) = \frac{N}{100} \quad (6.3)$$

すなわち、

$$x_N = -\bar{D} \ln\left(1 - \frac{N}{100}\right) = \bar{D} \ln\left(\frac{100}{100 - N}\right) \quad (6.4)$$

で与えられる。また、上記区間外の残留騒音源からの寄与を求め、 $I^{(M)}$ 及び $I^{(m)}$ に加算することにより、ダイナミックレンジを補正することができる[1-3]。

なお、2 章の図 2-1 に示した道路上の有効区分における車群の配置を以下では、

便宜上、原点 O を含む X 軸の片側、正方向のみに存在するものとして議論する。ただし、音源密度は 2 倍(平均車間距離を $\bar{D}/2$)とする。

6.2 最近接音源とダイナミックレンジ

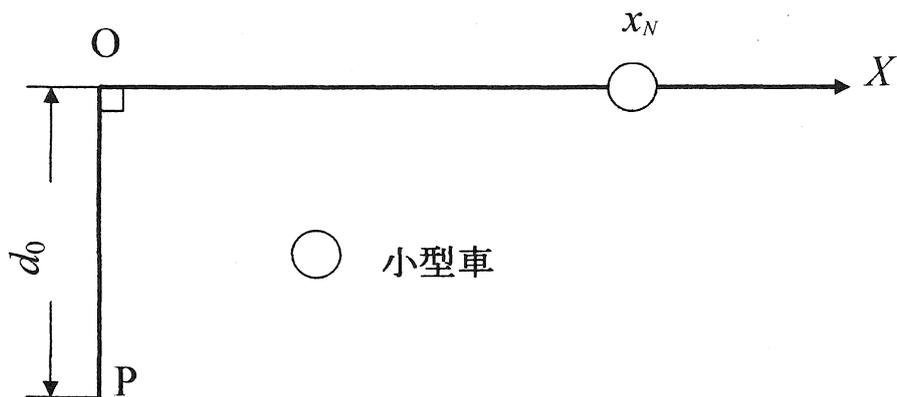


図 6-1 x_N の位置における小型車と受音点

RTN のレベル変動は主として最近接音源(原点 O に最も近い車の挙動)により決定される。

図 6-1 に示すように、区間 $0 < x < x_N$ 内に最近接音源が存在する確率はポアソン交通流に対しては $1 - \exp(-2x_N / \bar{D})$ で与えられる。1 台の車による音の強さの最大値 $I_N^{(M)}$ は原点 O に大型車がある場合に、最小値 $I_N^{(m)}$ は全有効区分の右端 $x = l_{\text{sum}} / 2$ に小型車がある場合に観測され、ダイナミックレンジ(変動幅)は両者のレベル差により定まる。

上記の確率が 90% であれば、このレベル差は 90% レンジ R_{90} に、また 95% であれば 95% レンジ R_{95} に対応すると考えられる。従って、最近接音源による $N\%$ レンジ R_N に対応

する音の強さの最大値 $I_N^{(M)}$ 及び最小値 $I_N^{(m)}$ は各々前節の式(6.1)と(6.4)を参照すれば、

$$I_N^{(M)} = \frac{W_t}{2\pi d_0^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.5)$$

$$I_N^{(m)} = \frac{W_p}{2\pi(d_0^2 + x_N^2)} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.6)$$

と表される。ただし、

$$x_N = \frac{\bar{D}}{2} \ln\left(\frac{100}{100-N}\right), \quad (6.7)$$

とする。

6.3 残留騒音源による音の強さ ΔI_N

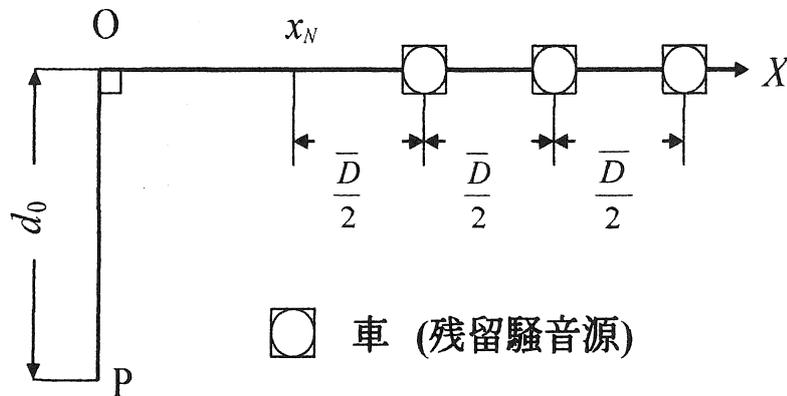


図 6-2 残留騒音源と受音点

今、図 6-2 に示すように、 $0 < x < x_N$ の範囲には上述の大型車又は小型車の他には車は 1 台も存在しないものとする。この場合、外部($x > x_N$)の車群は残留騒音源(バックグラウンド音源)として、主要区分内の最近接音源(大型車又は小型車)による点 P

での音の強さ $I_N^{(M)}$ と $I_N^{(m)}$ をわずかに上昇させる。しかしこれらの音源は受音点からある程度以上離れているためその配置を多少移動しても点Pの音の強さはほとんど変化しないものと思われる[3-5]。

従って図 6-3 に示すように、平均車間距離 $\bar{D}/2$ [m] で並んだ平均音響パワー \bar{W} [W] の残留点音源群を、これと等価な線密度 $\rho(x) = 2\bar{W}/\bar{D}$ [W/m] の線音源で近似することができる[3]。

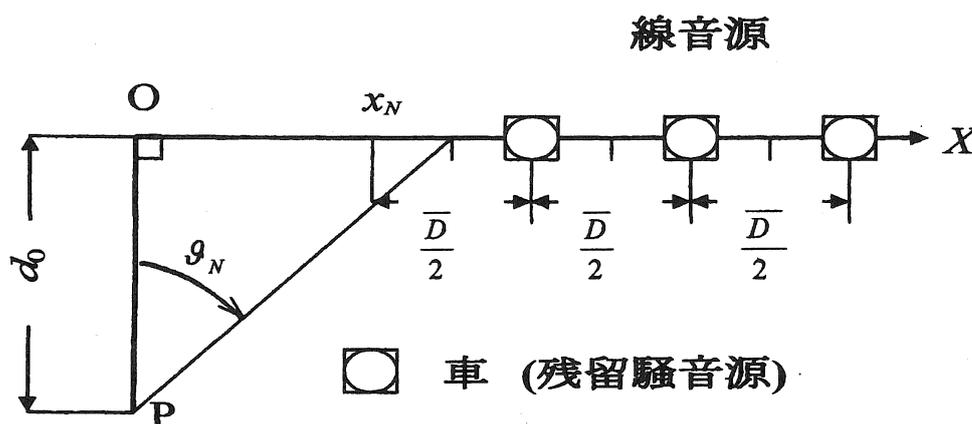


図 6-3 残留騒音源の線音源化

残留騒音源による点 P での音の強さ ΔI_N は、 $x_N + \frac{\bar{D}}{4} < \frac{l_{\text{sum}}}{2}$ のとき

$$\Delta I_N = \int_{x_N + \frac{\bar{D}}{4}}^{\infty} \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\rho(x)}{d_0^2 + x^2} dx = \frac{1}{\pi} \times \frac{\bar{W}}{d_0 \bar{D}} \left(\frac{\pi}{2} - \vartheta_N \right)$$

$$= \frac{1}{\pi} \times \frac{\lambda_D (1 + 4p) W_p}{1 + \lambda_D D_{\min}} \cdot \frac{1}{d_0} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{x_N + \frac{\bar{D}}{4}}{d_0} \right) \right)$$

$$= \frac{1}{\pi} \times \frac{\lambda_D(1+4p)W_p}{1+\lambda_D D_{\min}} \cdot \frac{1}{d_0} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{x_N + \frac{\bar{D}}{4}}{d_0} \right) \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.8)$$

で与えられる。ただし、 $\vartheta_N = \tan^{-1} \left(\frac{x_N + \frac{\bar{D}}{4}}{d_0} \right)$ [rad]、 $\bar{W} = qW_p + pW_t =$

$(1+4p)W_p$ である。また、 $x_N + \frac{\bar{D}}{4} \geq \frac{\ell_{\text{sum}}}{2}$ のときは $\Delta I_N = 0$ とおく。

6.4 残留騒音源による補正

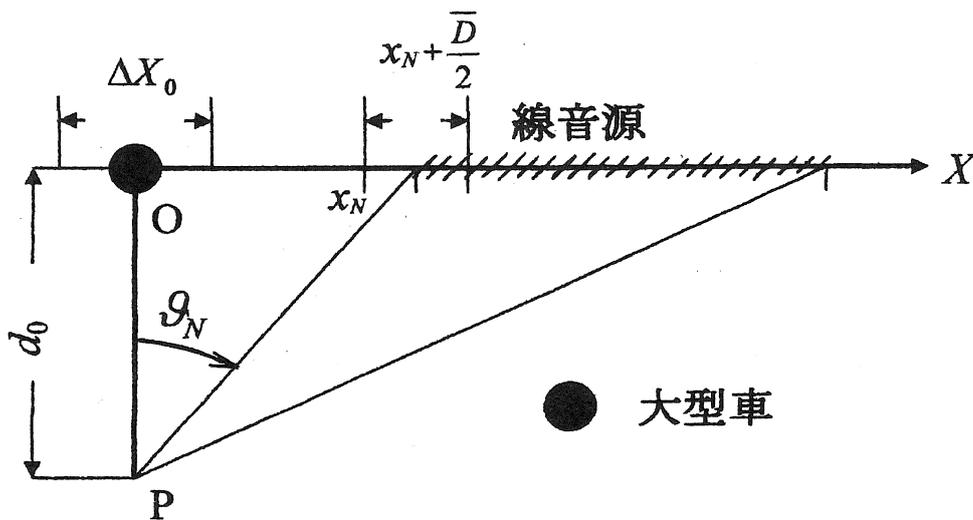


図 6-4 最近接音源(大型車)と線音源(残留騒音源)

最近接音源による音の強さに、残留騒音源による音の強さを加算し補正を行う。

図 6-4 に示すように、原点 O に位置する 1 台の大型車と残留騒音源による音の強さは、

$$I_N^{(M)*} = I_N^{(M)} + \Delta I_N$$

$$= \frac{W_t}{2\pi d_0^2} + \frac{1}{\pi} \times \frac{\bar{W}}{d_0 \bar{D}} \left(\frac{\pi}{2} - \vartheta_N \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.9)$$

で与えられる。

同様に、 X 座標軸上の位置 x_N を走行する 1 台の小型車と残留騒音源(図 6-5)による音の強さは両者の寄与の和として、

$$I_N^{(m)*} = I_N^{(m)} + \Delta I_N$$

$$= \frac{W_p}{2\pi} \cdot \frac{1}{d_0^2 + x_N^2} + \frac{1}{\pi} \times \frac{\bar{W}}{d_0 \bar{D}} \left(\frac{\pi}{2} - \vartheta_N \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.10)$$

と表される[4]。

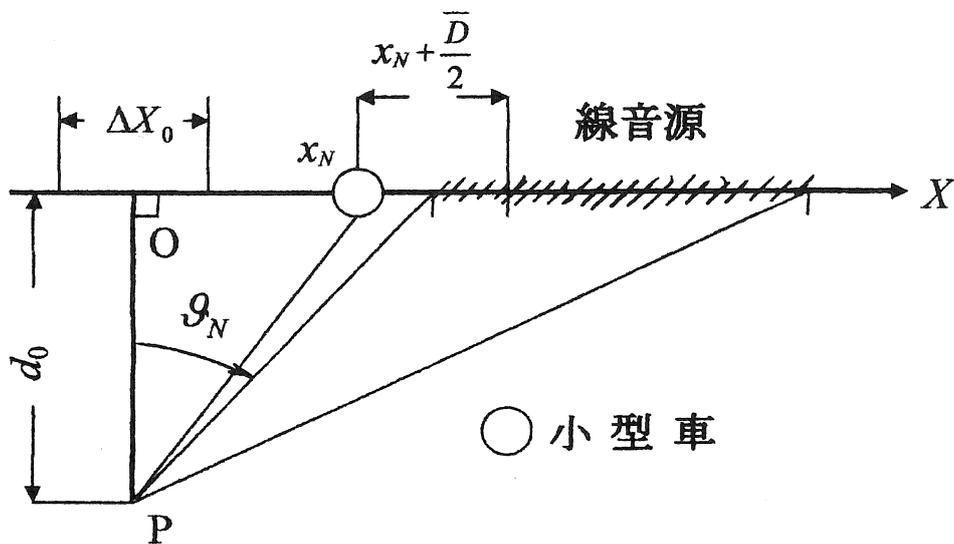


図 6-5 最近接音源(小型車)と線音源(残留騒音源)

6.5 騒音レベル L_{pA} の変動幅 (R_{90} 及び R_{95})

騒音レベルの変動幅の目安としては95%レンジ R_{95} 又は90%レンジ R_{90} が用いられることが多い。前節の結果を用いれば R_{95} 及び R_{90} はそれぞれ次式で算定される[4]。

$$\begin{aligned} R_{95} &= 10 \log_{10} \frac{I_{95}^{(M)*}}{I_{95}^{(m)*}} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{I_{95}^{(M)} + \Delta I_{95}}{I_{95}^{(m)} + \Delta I_{95}} \right) \text{ [dB]} \left(x_{95} + \frac{\bar{D}}{4} < \frac{\ell_{sum}}{2} \text{ のとき} \right) \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{I_{95}^{(M)}}{I_{95}^{(m)}} \right) \text{ [dB]} \left(x_{95} + \frac{\bar{D}}{4} \geq \frac{\ell_{sum}}{2} \text{ のとき} \right) \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} R_{90} &= 10 \log_{10} \frac{I_{90}^{(M)*}}{I_{90}^{(m)*}} \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{I_{90}^{(M)} + \Delta I_{90}}{I_{90}^{(m)} + \Delta I_{90}} \right) \text{ [dB]} \left(x_{90} + \frac{\bar{D}}{4} < \frac{\ell_{sum}}{2} \text{ のとき} \right) \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$= 10 \log_{10} \left(\frac{I_{90}^{(M)}}{I_{90}^{(m)}} \right) \text{ [dB]} \left(x_{90} + \frac{\bar{D}}{4} \geq \frac{\ell_{sum}}{2} \text{ のとき} \right) \quad (6.14)$$

6.6 シミュレーション実験による変動幅との照合

上述の簡易計算式の有効性と妥当性を検証する為に、種々の交通条件の下でシミュレーション実験を行った。本節ではまず現場実測に基づくシミュレーションにより変動幅 R_{95} 及び R_{90} を求め、簡易計算の結果と照合する。

6.6.1 夜間における L_{pA} の累積度数分布と変動幅

表 6-1 は、観測距離 $d_0 = 50 \text{ m}$ の実測地点において等価騒音レベル L_{Aeq1h} と時間率騒音レベル L_{AN1h} をシミュレートしたときの夜間の交通条件である[4,5]。

表 6-2 に得られた L_{AN1h} 及び変動幅を示す。また SAMPLE (10) と SAMPLE (20) に対する騒音レベル L_{pA} の累積度数分布を図 6-6 及び図 6-7 に示す。表 6-2 からわかるように、変動幅($R_{90} : R_{95}$) 及び上下端値($L_{A2.5}, L_{A97.5} : L_{A5}, L_{A95}$) も簡易計算とシミュレーション値との差は高々 2dB 以内であり、両者は良く一致している。

表 6-1 夜間の交通条件

SAMPLE(10)		SAMPLE(20)	
時間帯	午後 11 時～午前 0 時	時間帯	午前 2 時～午前 3 時
交通量 Q	419[台/h]	交通量 Q	346[台/h]
大型車 Q_t	86[台/h]	大型車 Q_t	67[台/h]
小型車 Q_p	333[台/h]	小型車 Q_p	219[台/h]
大型車混入率		大型車混入率	
大型車 p	0.205	大型車 p	0.194
小型車 q	0.795	小型車 q	0.806
平均車速度 V	96.5 [km/h]	平均車速度 V	104[km/h]

表 6-2 夜間における $L_{AN 1h}$, R_{90} 及び R_{95}

単位[dB]

項目	SAMPLE(10)	SAMPLE(20)
$L_{A2.5 1h}$	69 (シミュレーション)	69.5 (シミュレーション)
	69.3 (簡易)	69.9 (簡易)
$L_{A5 1h}$	67.5 (シミュレーション)	68.5 (シミュレーション)
	69.3 (簡易)	69.9 (簡易)
$L_{A97.5 1h}$	47.8(シミュレーション)	46.1 (シミュレーション)
	46(簡易)	44.4 (簡易)
$L_{A95 1h}$	48.5 (シミュレーション)	47.3 (シミュレーション)
	48.2 (簡易)	46.6 (簡易)
R_{90}	19 (シミュレーション)	21.2 (シミュレーション)
	21.1 (簡易)	23.3(簡易)
R_{95}	21.2 (シミュレーション)	23.4 (シミュレーション)
	23.3 (簡易)	25.5 (簡易)

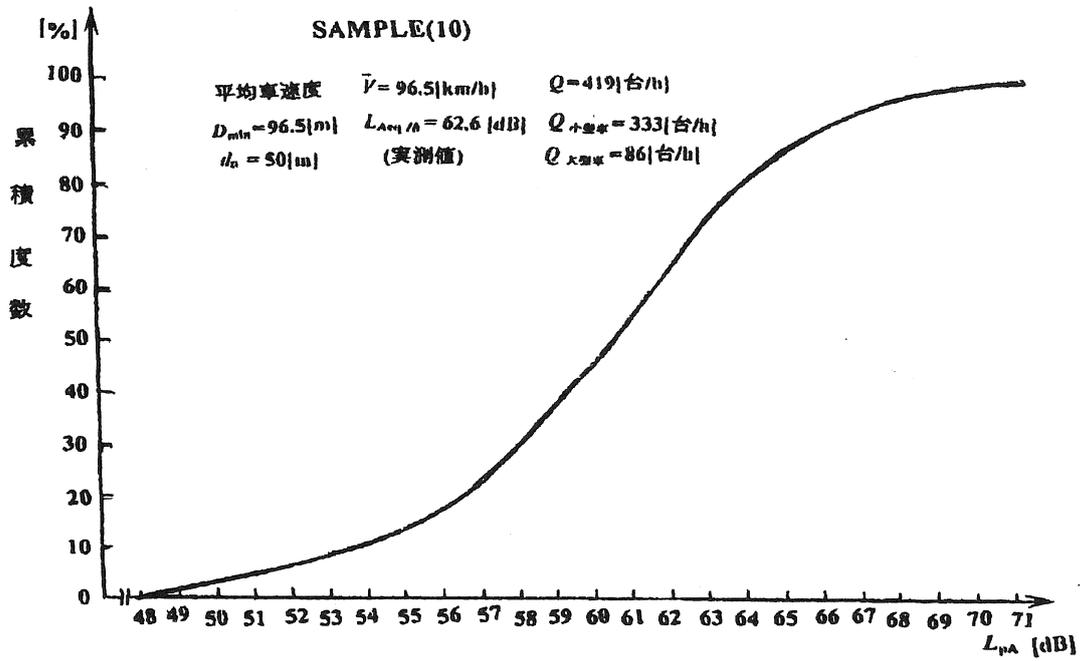


図 6-6 L_{pA} の累積度数分布(夜間)

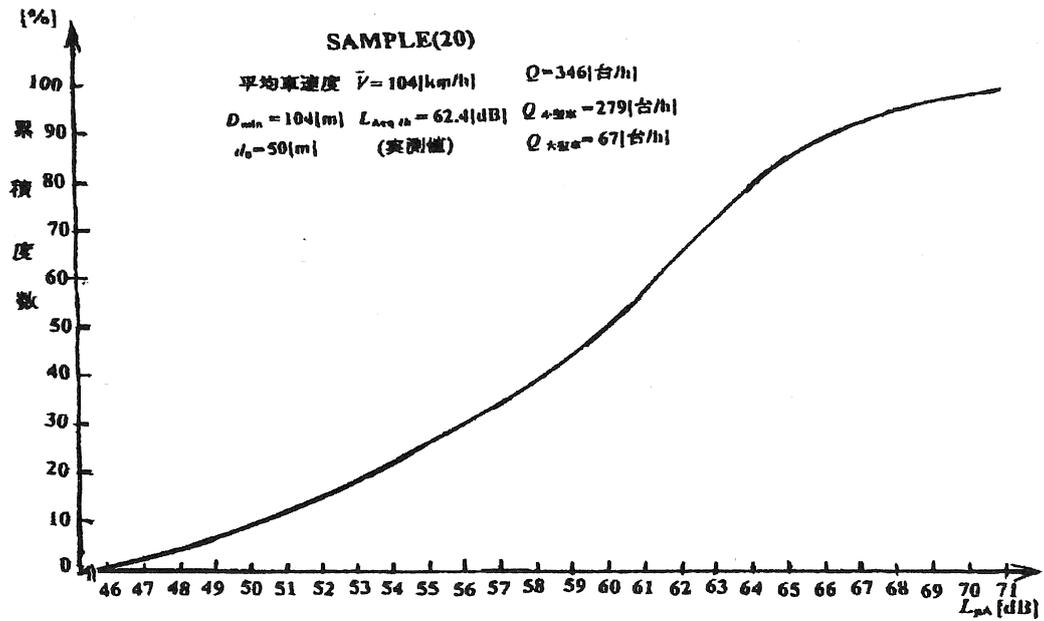


図 6-7 L_{pA} の累積度数分布(夜間)

6.6.2 昼間における L_{pA} の累積度数分布と変動幅

表 6-3 は夜間と同じ観測地点における昼間の交通条件を示す。表 6-4 は昼間の L_{AN1h} と R_{90} 及び R_{95} である。また図 6-8 及び図 6-9 は、各々SAMPLE (30) 及びSAMPLE (40)に対する騒音レベル L_{pA} の累積度数分布を示す。表からわかるように、夜間の場合と同様、簡易計算法により求めた R_{95} 及び R_{90} の変動幅はシミュレーションより求めた結果と良い一致を示し、その差は 2dB 以内である。なお、昼間と夜間の変動幅を比較した場合、交通量の少ない夜間において変動幅はより大きいことが知られる。

表 6-3 昼間の交通条件

SAMPLE(30)		SAMPLE(40)	
時間帯	正午～午後1時	時間帯	午前11時～正午
交通量 Q	677[台/h]	交通量 Q	763[台/h]
大型車 Q_t	96[台/h]	大型車 Q_t	103[台/h]
小型車 Q_p	581[台/h]	小型車 Q_p	660[台/h]
大型車混入率		大型車混入率	
大型車 p	0.142	大型車 p	0.135
小型車 q	0.858	小型車 q	0.865
平均車速度 V	91.5[km/h]	平均車速度 V	92.9[km/h]

表 6-4 昼間における L_{A1h} , R_{90} 及び R_{95}

単位[dB]

項目	SAMPLE(30)	SAMPLE(40)
$L_{A2.5 1h}$	68 (シミュレーション)	68.4 (シミュレーション)
	68.9 (簡易)	69.1 (簡易)
$L_{A5 1h}$	67.5 (シミュレーション)	68 (シミュレーション)
	69 (簡易)	69.1 (簡易)
$L_{A97.5 1h}$	55.5 (シミュレーション)	59 (シミュレーション)
	57.1 (簡易)	57.9 (簡易)
$L_{A95 1h}$	57 (シミュレーション)	60 (シミュレーション)
	58.3 (簡易)	59.1 (簡易)
R_{90}	10.5 (シミュレーション)	8 (シミュレーション)
	10.7 (簡易)	10 (簡易)
R_{95}	12.5 (シミュレーション)	9.4 (シミュレーション)
	11.8 (簡易)	11.2 (簡易)

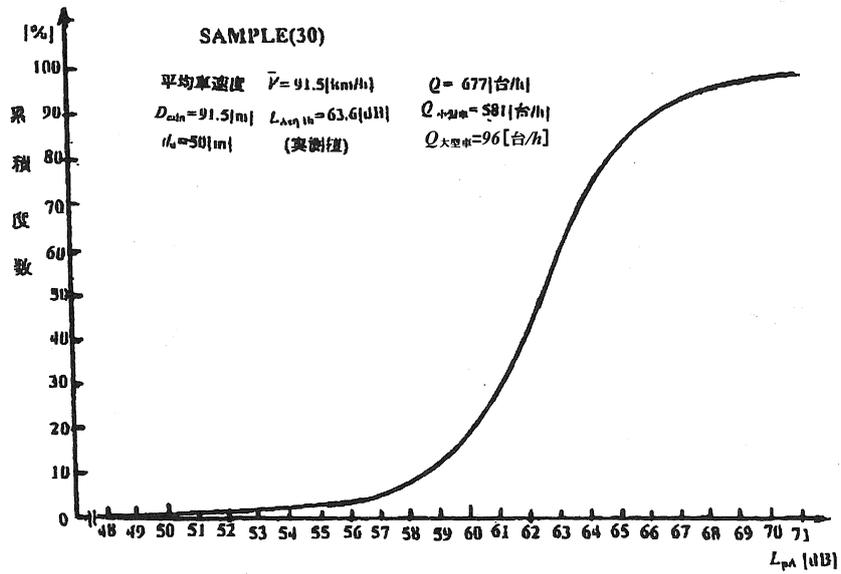


図 6-8 L_{pA} の累積度数分布(昼間)

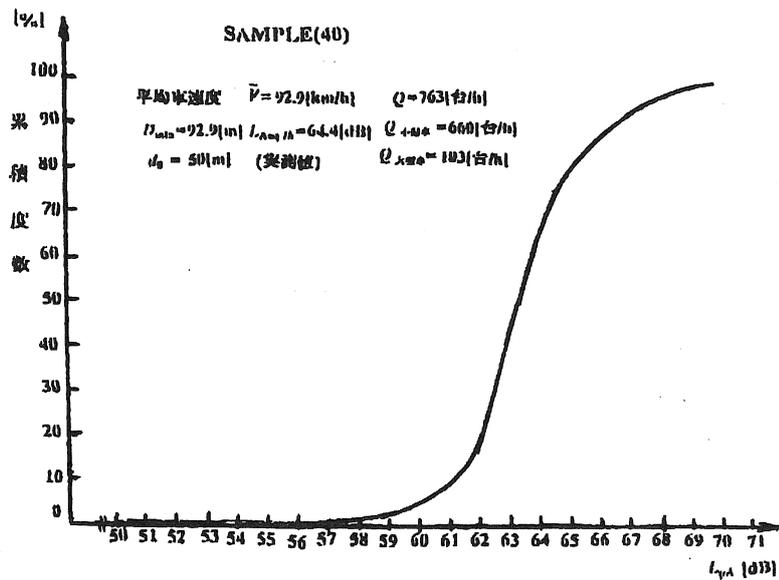


図 6-9 L_{pA} の累積度数分布(昼間)

6.7 観測距離と変動幅

観測距離はRTNの変動幅に大きな影響を与える。一般に近距離では変動幅は大きく、遠距離では小さくなる。本節においてはこの点についてシミュレーション及び簡易計算の結果を比較検討する。

表6-5は夜間の、表6-6は昼間における観測距離と騒音レベルの変動幅(R_{90}, R_{95})との関係をシミュレーション及び簡易計算により求めた結果である。

これより、

- (1) 騒音レベルの変動幅は道路から 25m, 50m, 100m と離れるにつれて夜間では大略 25dB, 20dB, 10dB、昼間では 20dB, 10dB, 7dB と次第に減少する、
- (2) 交通量の少ない夜間の方が変動幅は大きい、
- (3) 簡易計算とシミュレーションの結果の差は概ね 2dB 以内であり、両者の対応は良好であること

などが知られる。

表 6-5 近距離音場と遠距離音場の変動幅(夜間)

[dB]

観測距離 [m]	項目	SAMPLE(10)		SAMPLE(20)	
		シミュレーション	簡易式	シミュレーション	簡易式
25	R ₉₀	25	27	26.9	29.2
	R ₉₅	26.8	29	29	31.5
50	R ₉₀	19	21.1	21.2	23.3
	R ₉₅	21.2	23.3	23.4	25.5
100	R ₉₀	9.7	9.1	11.7	11.2
	R ₉₅	10.9	10.2	12.8	12.3

表 6-6 近距離音場と遠距離音場の変動幅(昼間)

[dB]

観測距離 [m]	項目	SAMPLE(30)		SAMPLE(40)	
		シミュレーション	簡易式	シミュレーション	簡易式
25	R ₉₀	20.2	22.3	19.8	21.7
	R ₉₅	22.8	24.6	22	24
50	R ₉₀	10.5	10.7	8	10
	R ₉₅	12.5	11.8	9.4	11.2
100	R ₉₀	6.6	6.1	6	5.6
	R ₉₅	7.5	6.7	6.9	6.2

6.8 まとめ

沿道における騒音レベルの変動幅(90%レンジ R_{90} 及び 95%レンジ R_{95})を推定するための簡易な計算法を提案し、シミュレーション実験によってその有効性を確認した。

その結果、

- (1) 変動幅は主として交通量と観測距離により決定される
- (2) 交通量が少ない程、また観測距離が道路に近い程最近接音源の影響が強く、
変動幅は大きくなる。従って、夜間(深夜)における道路近傍の変動幅が問題
となる、
- (3) 一方、交通量が多い程、また道路から離れる程バックグラウンド音源(最近接
音源以外の車群)の影響が強くなり、変動幅は小さくなる

などの知見が得られた。

7章 総括

7.1 研究成果のまとめ

道路交通騒音は等価騒音レベル(L_{AeqT})による評価が国内外で主流となっているが、以下のような課題がある。

(1) 安定した L_{AeqT} を得るための実測時間長 T をどの様に設定すべきか?

(2) 騒音暴露の概要や騒音に対する日常的な印象は L_{AeqT} で評価できるに

しても、全てが L_{AeqT} で評価できる訳ではない。特に夜間の睡眠への影響を評価する場合には騒音レベルの最大値 L_{AFmax} の挙動や変動幅に関する情報が必要不可欠である。既存の予測モデル(静的モデル)では L_{AeqT} の算定はできても上記計測上の問題(T の選定)や変動騒音の評価に重要な L_{AFmax} 値や変動幅を求めることは困難である。

本研究ではこれらの課題に対し、交通流を模擬した道路交通騒音の動的モデルを提案し、その有効性を示すと共に、安定な L_{AeqT} を得るための実測時間 T をはじめ、道路交通騒音の L_{AFmax} や変動幅 R_{90}, R_{95} 等に関する多くの知見を得た。またこれら実測時間 T や L_{AFmax} , 変動幅 R_{90}, R_{95} 等を算定する簡便で実務的手法を開発した。

1章では、道路交通騒音(RTN)を予測・推定するためにこれまで国内外で開発された代表的な数学モデルを紹介するとともにその開発の経緯について述べた。更に、静的モデルによる予測・推定手法の特徴を概観すると共にその問題点を要約した。ま

た、最近のモデル開発の動向についても言及した。

2章では、変動する RTN の現実の姿(時間的变化の様子)に即した動的モデルを提案した。RTN に対する動的モデルの有効性を検証するために、実測時の車群配置を考慮し、本モデルに基づく A 特性音圧レベル L_{pA} のシミュレーション計算を行い、実測騒音波形を精度良く(許容誤差 2dB)、再現できることを示した。さらに、 L_{Aeq1h} の一日の各時間帯における、実測値と本モデルによるシミュレーション結果とは ± 1 dB の許容誤差の範囲内にあることを示した。

3章では、提案する動的モデルを用い、現場等で過不足なく適切な実測時間長 T を選定し、かつ T を含む基準時間長での安定な L_{Aeq1h} の値を推定するための方法について検討した。即ち、交通量 Q 、大型車混入率 p 、平均車速度 \bar{V} 、通過車両台数 n の4つの交通条件が、測定時間 T 中の L_{AeqT} のレベル変動及び L_{Aeq1h} とのレベル差 ΔL_{AeqT} に及ぼす影響をシミュレーション実験により考察した。また、 T 中の通過車両台数 n と L_{AeqT} の関係を統計的推定法を用い検討を行った。さらに騒音レベルの最大値 L_{AFmax} に関する平均時間間隔(\bar{t})及び平均再来時間($\tilde{\Theta}$)を導入し、安定した L_{AeqT} を得るために必要とされる最小測定時間長についてシミュレーション実験に基づき検討を行った。その結果、

- (1) Poisson 交通流(自由走行車群)に対して L_{Aeq1h} を精度良く計測するためには 70 台程度の車両が通過する時間長を設定すればよいこと
- (2) 最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の平均再来時間 $\tilde{\Theta}$ と上述の測定時間長 T との

間には $T \cong (1-3)\tilde{\Theta}$ なる関係があることが判明した。

4 章では、シミュレーション実験により昼間と夜間の L_{AeqT} のレベル差及び各時間帯での L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差に関する検討を行うと共に、簡易計算手法を提案し、シミュレーション結果と比較検討した。シミュレーションと簡易計算による結果の対応は良好であり、

- (1) 高速道路沿道における L_{AeqT} は交通量のみならず大型車混入率や平均車速に依存し、交通量が減少しても夜間の L_{AeqT} はさほど低下しない
- (2) 最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} は主として車速度に依存すること、従って昼間より夜間において高くなることがある
- (3) L_{AFmax} と L_{AeqT} のレベル差 $\Delta L_{Amax_{eq}}$ は昼間より夜間、また道路に近いほど増加する

等の知見を得た。

5 章では、RTN の昼間と夜間における最大 A 特性音圧レベル L_{AFmax} の発生状況(発生頻度及び発生回数)を把握するためにシミュレーション実験を行うと共に L_{AFmax} の出現頻度及び発生回数を簡易に計算する手法を提案し

- (1) L_{AFmax} の値は交通量や大型車混入率よりも主として車速度に依存する。
- (2) L_{AFmax} の発生回数は交通量や大型車混入率に依存するが車速度には依存しない
- (3) 大型車の挙動に関するシミュレーション実験と簡易計算の結果は良く一致し、 L_{AFmax} の発生回数等を容易に予測できる、ことなどを確認した。

6章では、最近接音源法を適用して道路交通騒音の変動幅(90%レンジ R_{90} や 95%レンジ R_{95})を簡便に算定する手法を提案し、

- (1) 昼間、夜間のいずれの時間帯でもシミュレーション実験より求めた結果と良く一致し、差は 2dB 以内である
- (2) 変動幅は主として交通量と観測距離により決定される
- (3) 交通量が少ない程、また道路に近い程最近接音源の影響を強く受け、変動幅は大きくなる
- (4) 交通量が多い程、また観測距離が道路から遠い程残留騒音源(最近接音源以外の音源)の影響が強くなり、変動幅は小さくなる

などの知見を得た。

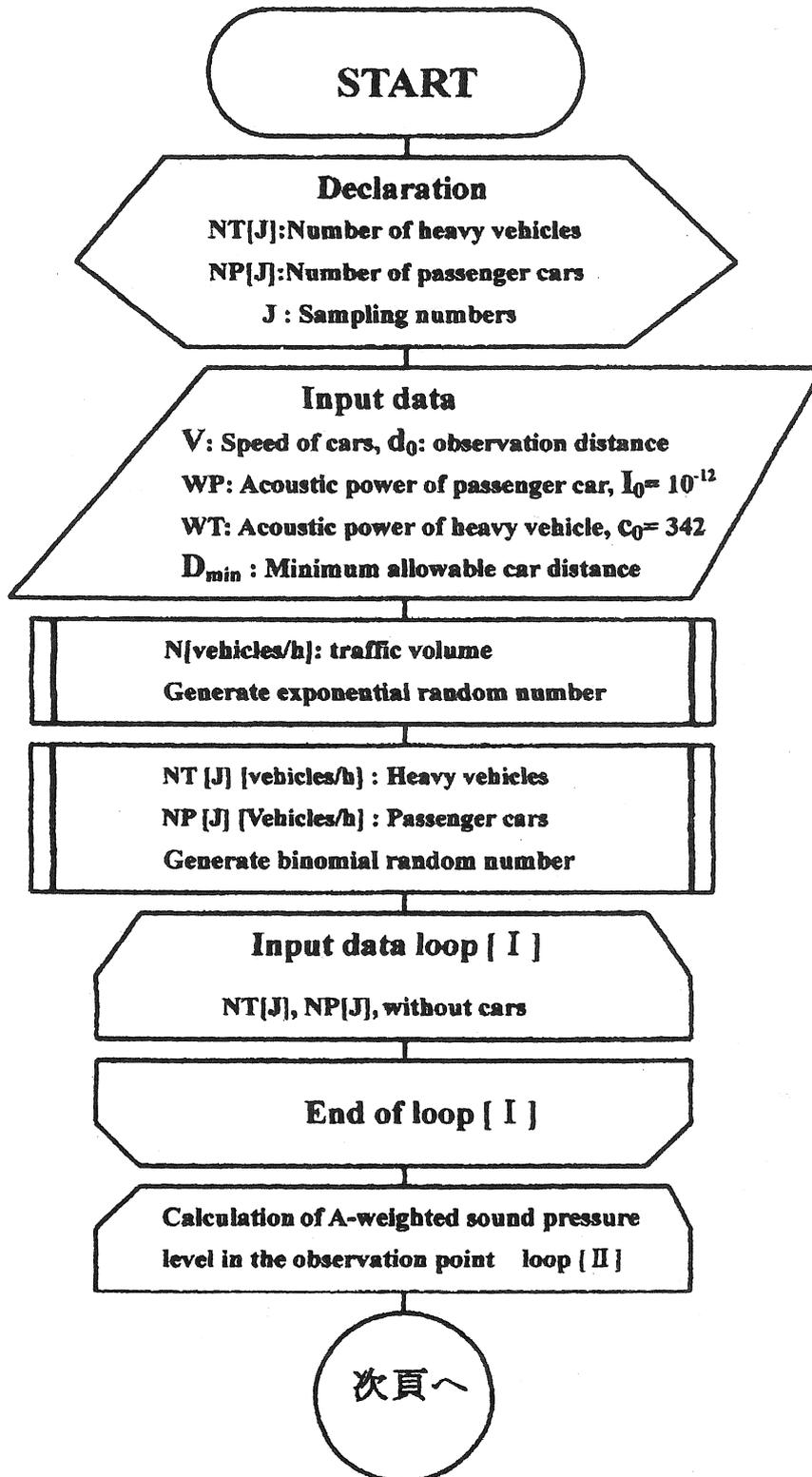
7.2 今後の課題

上述の様に本研究では時々刻々変化する道路交通騒音を模擬する動的モデルを提案し、その有効性を示すと共に騒音の測定及び予測・評価に関する基本的な課題を取り上げ種々の成果を得た。なお今後の研究課題としては

- (1) 沿道の建物など音響障害物による騒音低減効果について検討すること
- (2) 騒音レベルの最大値 L_{AFmax} や変動幅が睡眠などに与える影響について調査研究を進め、よりよい評価基準の構築を計ること

等が挙げられる。

Appendix 1 MCMC 法アルゴリズム



前頁
から

Calculation of sound intensity in the observation point
IPH_Sum: Sound intensity sum of the heavy vehicles
IPP_Sum: Sound intensity sum of the passenger cars

Calculation of A-weighted sound pressure level in the observation point
 $LP[J] = 10 \log_{10}((IPH_Sum / I_0 + IPP_Sum / I_0)) / \log_{10} I_0$

Output data
Number of heavy vehicles and passenger cars for the effective subsections
NT[J]; Number of heavy vehicles
NP[J] : Number of passenger cars

Output data
LP[J]: A-Weighted Sound pressure level in the observation

End of loop [II]

End

Appendix 2 静的モデルによる高速道路沿道の予測式(A-1)の導出

$$L_{Aeq1h} = 10\log_{10} Q^* + 10\log_{10} V - 10\log_{10} d_0 + 32.1 \quad [\text{dB}] \quad (\text{A.1})$$

ここで、 Q^* は小型車換算時間交通量であり

$$Q^* = (r_1 + Mr_2)Q \cong (1 + 4r_2)Q \quad (\text{A.2})$$

で与えられる。

観測時間長 T が $T=1[\text{h}]$ と十分長いとき、指数分布モデルに対する等価騒音レベル

L_{AeqT} は等間隔等パワーモデルに対する結果と一致し、次式で与えられる。

$$L_{Aeq1h} = PWL - 10\log_{10}(2d_0\bar{D}) \quad [\text{dB}] \quad (\text{A.3})$$

ここで、パワーレベル PWL として ASJ Model 1993 の式を採用すると、 PWL は

$$PWL = 20\log_{10} V + 65.1 + 10\log_{10}(q + M \cdot p) \quad [\text{dB}] \quad (\text{A.4})$$

で与えられる。平均車頭間隔 \bar{D} は

$$\bar{D} = \frac{1000V}{Q} \quad (\text{A.5})$$

となる。式(A.3)に式(A.4)と式(A.5)を代入すると、

$$\begin{aligned} L_{Aeq1h} &= 20\log_{10} V + 65.1 + 10\log_{10}(q + M \cdot p) + 10\log_{10}\left(\frac{1}{2d_0} \cdot \frac{Q}{1000V}\right) \\ &= 10\log_{10} Q + 10\log_{10}(q + M \cdot p) + 10\log_{10} V - 10\log_{10} d_0 + 65.1 - 33 \\ &= 10\log_{10} Q^* + 10\log_{10} V - 10\log_{10} d_0 + 32.1 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となり式(A.1)と一致する。

謝辞

本研究は、筆者が東北大学 工学部電気工学科に研究生として在学し、今日に至るまでの研究成果を纏めたものである。この間、多くの方々から激励と多大なご支援をいただきました。

本論文をまとめ・作成するにあたり、多大な労を厭わず終始懇切丁寧なご指導ご教示を賜りました 三重大学 久野和宏名誉教授に対し、ここに深甚なる謝意を表します。本論文を作成し発表するにあたり、数多くの貴重なご助言とご意見を賜りました 愛知工業大学 工学部電気学科 江口一彦教授、飯吉 僚教授、本論文を注意深く丁寧に読んでいただき多くの有益なご助言とご教示を賜りました 同学部機械学科 安田仁彦教授に対し、厚く感謝の意を表します。本論文をまとめ・作成するにあたり、多大な労を厭わず細心のご配慮をいただき、終始適切なご助言と懇切丁寧なご教示を賜りました 同学部電気学科 井 研治教授に対し、心から謝意を申し上げます。

筆者が在学当初から今日まで研究の機会を与えられ、終始親身になって熱心にご指導ご教示を賜りました 東北大学 曾根敏夫名誉教授、本研究を進めるにあたり、いつも精神的支えになっていただき有益なご助言を賜り、励まして下さいました 熊本大学 江端正直名誉教授、いつも気さくにご相談にのっていただき適切なご助言を賜り、励まして下さいました 東北文化学園大学 香野俊一教授に対し、心から感謝の意を表します。また、本研究を進めるにあたり、有益なご助言とご意見を賜りました 仙台電波工業高等専門学校 熊谷正純名誉教授、細心のご配慮をいただき終始暖かく見守り続けて下さいました 東北大学 電気通信研究所 鈴木陽一教授、同研究所 齋藤文孝技官に対し、深謝致します。

文献資料の収集並びに作成にあたり、多大なご支援とご助言をいただきました 小林理学研究所 木村和則主任研究員、貴重な資料を提供して下さいました 三重大学 工学部 物理工学科 野呂雄一准教授に対し、感謝の意を表します。

筆者がサレジオ工業高等専門学校に在職中、常に適切なご助言と数多くの有益なご教示を賜りました 東京農工大学 仁田周一名誉教授、いつも困難な問題が生じたとき精神的支えになっていただき数多くの貴重なご助言を賜り、励まして下さいました こども教育宝仙大学 市村 洋教授に対し、心から厚くお礼申し上げます。

参考文献

1 章

- [1] ISO 1996-1 Acoustics-Description, measurement and assessment of environmental noise — Part 1: Basic quantities and assessment procedures (2003)
- [2] ISO1996-2 Acoustics -Description, measurement and assessment of environmental noise — Part2 : Determination of environmental noise levels (2007)
- [3] 橘 秀樹、矢野博夫、「環境騒音・建築音響の測定」、3 章～5 章、pp.26～78,コロナ社(2004)
- [4] 環境省、「平成 20 年度自動車交通騒音の状況について」
<http://www.env.go.jp/press.php?serial=119196&moded=print>
- [5] 庄司 光、山本剛夫、中村隆一、「街頭騒音とくに交通騒音に関する研究—第一報 車種別騒音の特性と交通騒音の距離による減衰」、日本音響学会誌、Vol.19, pp.97-105, (1963)
- [6] D.R. Johnson and E.G. Saunders, “The evaluation of noise from freely flowing road traffic”, J. Sound and Vib, Vol 7, pp.287-309, (1968)
- [7] 森口繁一、他著「数学公式Ⅱ」3 章、pp. 203-227、岩波書店(1990)
- [8] F. Blandamura and R. Spagnolo, “ A Mathematical model for predicting the noise of freely flowing traffic ”, Acustica , Vol. 30, pp.236-240, (1974)
- [9] 久野和宏、奥村陽三、「道路交通騒音予測のこと[IX] 一等間隔モデルについて」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-96-07, (1996)
- [10] G. H. Weiss, “On the noise generated by a stream of vehicles ”,Transport Research Vol.4, pp229-233, (1970)
- [11] U. J. Kurze, “Statistics of road traffic noise”,J. Sound Vib, Vol.18 No.2, pp171-195, (1971)
- [12] U. J. Kurze, “Noise from complex road traffic noise”, J. Sound Vib, Vol.19 No.2, pp.167-177,(1971)

- [13] U. J. Kurze, “Frequency curves of road traffic noise”, J. Sound Vib, Vol. 33 No.2, pp.171-185, (1974)
- [14] K. Takagi, K. Hiramatsu and T. Yamamoto, “Investigation on road traffic based on an exponentially distributed vehicles model —single line flow of vehicles with same acoustic power”, J. Sound and Vib, Vol.36 No.3, pp.417-431, (1974)
- [15] 高木興一、藤木 修、平松幸三、山本剛夫、「指数分布モデルにおける L_{α} 」, 日本音響学会誌、Vol.38 No.8, pp.468-476, (1982)
- [16] 高木興一、平松幸三、山本剛夫、橋本和平、「指数分布モデルに基づく道路交通騒音の研究」、日本音響学会誌、Vol.33 No.6, pp.325-331, (1977)
- [17] 久野和宏、池谷和夫、「不規則点音源流から放射される音響パワーに関する統計的考察」、日本音響学会誌、Vol.29 No.11, pp.662-671, (1973)
- [18] 久野和宏、池谷和夫、三品善昭、「ランダムに分布した点音源群から放射される音響パワーの確率分布」、日本音響学会誌、Vol.30 No.5, pp.268-275, (1974)
- [19] 久野和宏、奥村陽三、大宮正昭、「道路交通騒音予測のこと[VII] —指数分布モデルについて(四) —」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-95-33, (1995)
- [20] 太田光雄、「不規則騒音のレベル変動に関する統計的研究[I] ～[VII]」、日本音響学会誌、Vol. 21 No.5, pp.281-294, (1965), Vol. 21 No.6, pp.333-346, (1965), Vol.23 No.2, pp.80-90, (1967), Vol.24 No.3, pp.134-142, (1968), Vol. 24 No.4, pp.240-248, (1968), Vol.25 No.2, pp.60-68, (1969), Vol.25 No.6, pp.313-318, (1969)
- [21] 太田光雄、山口静馬、広光清次郎、畠山一達、「道路新設に伴う市街地騒音レベル分布 —予測理論とシミュレーション実験—」、日本音響学会誌、Vol.31 No. 2, pp.72-80, (1975)
- [22] M. Ohta, S. Miyata, O. Nagano, “A Comparison of Different Fluctuation Probability Expressions Based on the dB Scale Measurement of the Noise Environment of Road Traffic”, Acustica, Vol.73, pp. 263-270, (1991)
- [23] Dimitris Skarlatos, Emmanuel Manatakis, “Noise Probability Density Function for Poisson Type Traffic Flow”, Applied Acoustics, Vol. 27, pp. 47-55, (1989)
- [24] Dimitris Skarlatos, “A numerical Method for Calculation of Probability Density Function of Equivalent Level in the Case of Traffic Noise”, Applied Acoustics, Vol.38,

pp.37-50, (1993)

- [25] 山口静馬、加藤裕一、「車両台数計測に基づく車等間隔分布の推定 —アーラン分布モデルの場合—」、日本音響学会誌、Vol. 44 No.11, pp.861-864, (1988)
- [26] 石井聖光、「道路交通騒音予測方法に関する研究(その 1) — 実用的な計算式について—」、日本音響学会誌、Vol.31, pp.507-517, (1975)
- [27] 石井聖光、「道路交通騒音予測方法に関する研究 —高さ別 α_i について—」、日本音響学会誌、Vol.33, pp.426-430, (1977)
- [28] 松井利仁、山村晃太郎、東 一樹、高木興一、「道路騒音の予測における L_{Aeq} から L_{50} への変換法 —ユニットパターンを利用した簡易変換式—」、日本音響学会誌、Vol.52 No.7, pp.503-509, (1996)
- [29] 五十嵐寿一、「騒音に関する ISO の動向」、日本音響学会誌、Vol.35 No.5, pp.268-272, (1979)
- [30] 曾根敏夫、「環境騒音の記述と測定 —ISO 1996—」、日本音響学会誌、Vol.44 No.11 pp.865-870, (1988)
- [31] 五十嵐寿一、「JIS-Z8731: 騒音レベル測定方法制定の経過」、日本騒音制御工学会、Vol.21 No.2, pp73-76, (1997)
- [32] 橋 秀樹、佐々木 實、「道路騒音の予測:道路一般部を対象としたエネルギーベース騒音予測法(日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告)—II 予測計算法の概要」、日本音響学会誌、Vol.50 No.3, pp.229-232, (1994)
- [33] 日本音響学会道路交通騒音委員会、「日本音響学会道路交通騒音予測モデル“ASJ RTN-Model 1998” —日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告—」、日本音響学会誌、Vol.55 No.4, pp. 281-324, (1999)
- [34] 日本音響学会道路交通騒音委員会、「日本音響学会道路交通騒音予測モデル“ASJ RTN-Model 2003”」、日本音響学会誌、Vol.60 No.4, pp.192-241, (2004)
- [35] FHWA Highway traffic noise prediction model, Report FHWA-RD-77-108: Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA, (1977)
- [36] FHWA traffic noise prediction model, USA. Washington: Department of Transportation, Federal Highway Administration National Technical Information Service, Washington, (1978)

- [37] <http://www.fhwa.dot.gov>
- [38] Thanaphan Suksaard, Phaka Sukasem, S. Monthip Tabucanon, etl., “Road traffic noise prediction model in Thailand”, Applied Acoustics, Vol.58, pp.123-130, (1999)
- [39] Bengang Li, Shu Tao, R.W.Dawson, “Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing”, Applied Acoustics, Vol.63, pp.1137- 1142,(2002)
- [40] Sh. Givargis , M. Mahmoodi, “Converting the UK calculation of road traffic noise(CoRTN) to a model capable of calculating $L_{Aeq,1h}$ for the Tehran’s roads ”, Applied Acoustics, Vol. 69, pp.1108-1113, (2008)
- [41] Vincent O’Malley, Eoin King, Larry Kenny, Chris Dilworth, “Assessing methodologies for calculating road traffic noise levels in Ireland—Converting CoRTN indicators to the EU indicators (L_{den} , L_{night})”, Applied Acoustics, Vol.70, pp.284- 296 , (2009)
- [42] Campbell Steele, “A critical review of some traffic noise prediction models”, Applied Acoustics, Vol. 62, pp.271-287, (2001)
- [43] E. Wetzel, J. Nicolas, Ph. Andre, J.J. Boreux, “Modelling the propagation pathway of street-traffic noise : practical comparison of German guidelines and real-world measurements”, Applied Acoustics, Vol.57, pp.97-107, (1999)
- [44] 久野和宏、奥村陽三、野呂雄一、「道路交通騒音予測のこと[VIII] —最近接音源に基づく予測—」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-95-46、(1995)
- [45] 野呂雄一、山本征夫、井 研治、久野和宏、「最近接音源モデルによる道路交通騒音レベルの予測計算」、日本音響学会誌、Vol.53 No.10, pp.763- 771, (1997)
- [46] 久野和宏、野呂雄一 編、吉久光一他著「道路交通騒音予測 —モデル化の方法と実際—」、8 章、pp.106-124、技報堂出版(2004)
- [47] 日本音響学会道路交通騒音委員会、山本貢平「日本音響学会道路交通騒音予測モデル“ASJ RTN-Model 2008 ” — 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告—」、日本音響学会誌、Vol.65 No.4 , pp.179-232, (2009)
- [48] Yamamoto, K., “Road traffic noise prediction model ASJ RTN-Model 2008”: Report of the Research Committee on Road Traffic Noise, Acoust. Sci. & Tech., Vol.31 No.1, pp.2-55, (2010)
- [49] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音の変動幅とその簡易計算法につ

いて」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2011-22(2011)

- [50] M. Tansatcha, P.Pamanikabud, A.L.Brown, J.K. Affum, “Motorway noise modeling based on perpendicular propagation analysis of traffic noise”, Applied Acoustics, Vol. 66, pp.1135-1150, (2005)
- [51] P. Pamanikabud, M. Tansatcha, A.L.Brown, “Development of a highway noise prediction model using an L_{eq} 20s measure of basic vehicular noise”, J. Sound.Vib., Vol.316, pp.317-330, (2008)

2 章

- [1] 久野和宏、「道路交通騒音予測のこと(I) —予測式の確率統計的側面—」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-93-04(1993)
- [2] 難波精一郎、「等価騒音レベルの定義と問題点」、日本音響学会誌、Vol.52 No.2 pp.125-130, (1996)
- [3] 桑野園子、「環境騒音の評価に関する最近の動向」、日本音響学会誌、Vol.52 No.11, 891-895, (1996)
- [4] 難波精一郎、「主観評価からみた等価騒音レベルによる騒音評価と課題」、日本騒音制御工学会、Vol.20, 80-91, (1996)
- [5] Armando deM.Maroja, Demutiey R. deSousa, SergioL. Garavelli, “Mathematician models for noises emitted by the vehicles traffic in Distrito Federal, Brazil” inter-noise2005, 07-10 August Rio de Janeiro-Brazil, (2005)
- [6] Bengang Li, Shu Tao, R.W.Dawson, “Evaluation and analysis of traffic noise from the main urban roads in Beijing”, Applied Acoustics, Vol.63, pp.1137-1142, (2002)
- [7] Mitsunobu Maruyama, Kazuhiro Kuno and Toshio Sone, “New Mathematical Model to Estimate Road Traffic Noise in View of the Appearance Rate of Heavy Vehicles”, International Journal of Acoustics and Vibration, Vol.16 No.2, pp.64-71, (2011)
- [8] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「大型車の出現頻度を考慮した道路交通騒音を推定するための新しい数学モデル」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2010-23, (2010)

- [9] 曾根敏夫、香野俊一、岩瀬昭雄、「道路騒音の予測:道路一般部を対象としたエネルギーベース騒音予測法(日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告) —III 自動車走行騒音のパワーレベルとスペクトル」、日本音響学会誌、Vol.50 No.3, pp. 233-239, (1994)
- [10] Dani Gamerman and Hedibert F. Lopes, “Markov Chain Monte Carlo”, Chapman & Hall/CRC (2006)
- [11] John G. Kemeny and J. Laurie Snell, “Finite Markov Chains”, D. Van Nostrand Co. pp. 69-98 (1960)
- [12] 大宮正昭、久野和宏、三品善昭、大石弥幸 他、「 L_{50} 及び L_{Aeq} に基づく環境騒音の評価方法に関する研究」、日本音響学会誌、Vol.55 No.2, pp.100-109, (1999)
- [13] 石井 貢、橘 秀樹、「道路交通騒音における L_{Aeq} と L_x の特徴及びその関係について」、日本騒音制御工学会、Vol.21 No.2, 97-99, (1997)
- [14] FHWA Highway traffic noise prediction model, Report FHWA-RD-77-108: Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA, (1977)
- [15] 久野和宏、野呂雄一 編著、吉久光一他著「道路交通騒音予測 —モデル化の方法と実際—」、10 章、pp.150-152, 技報堂出版(2004)
- [16] M. Maruyama and T. Sone, “A study on the estimation of L_{AeqT} in residential areas”, J. Acoust.. Soc. Jpn(E), Vol.6 No3, pp. 235-240, (1985)
- [17] 野呂雄一、浜田耕一、井 研治、久野和宏、「騒音計測における統計処理—幹線道路沿いにおける常時観測データの解析」、日本音響学会誌、Vol.50 No.2, pp.133-139, (1994)
- [18] 高木直樹、山下恭弘、渡嘉敷健、森田 大、松井昌幸、「地方都市における道路交通騒音の経年変化」、日本音響学会誌、Vol.53 No.3, pp. 829-836, (1997)
- [19] 龍田健次、吉久光一、久野和宏、「幹線道路沿道における L_{Aeq} の分布特性と代表値に関する検討」、日本騒音制御工学会、Vol.25 No.1, pp.39-45,(2001)
- [20] Joel Manoel, Alves Filho, Arcanjo Lenzi, Paulo Henrique Trombetta Zannin, “Effects of traffic composition on road noise: a case study”, Transportation Research Part D, Vol.9, pp.75-80, (2004)

3 章

- [1] 仲 功、野呂雄一、久野和宏、「道路交通条件と L_{eq} の関係 — $Q-V$ 曲線を用いた検討—」、日本音響学会誌、Vol.55 No.7, pp.467-473, (1999)
- [2] 仲 功、野呂雄一、久野和宏、「交通量と時間率騒音レベルの関係 — $Q-V$ 曲線を用いた検討—」、日本音響学会誌、Vol.56 No.6, pp.301-307, (2000)
- [3] 為末隆弘、山口静馬、佐伯徹郎、加藤裕一、「走行車両の速度とパワーレベルのばらつきが L_{Aeq} 予測値に及ぼす影響」、日本音響学会誌、Vol.56 No.12, pp.835-838, (2000)
- [4] 龍田健次、吉久光一、久野和宏、「幹線道路沿道の常時観測データにみられる L_{Aeq} と交通量との関係」、日本音響学会誌、Vol.56 No.9, pp.648-652, (2000)
- [5] 龍田健次、吉久光一、久野和宏、「市街地における沿道の L_{Aeq} と道路交通条件 —名古屋市域における調査データに基づく検討—」、日本音響学会誌、Vol.59 No.7, pp.388-394, (2003)
- [6] Javier Alberola, Ian H. Flindell, Andrew J. Bullmore, “Variability in road traffic noise levels”, Applied Acoustics, Vol.66, pp.1180-1195, (2005)
- [7] Luigi Maximilian Caligiuri, “The evaluation of uncertainty in urban traffic noise measurement according to the ISO Guide”, inter-noise 2005, 07-10 August Rio de Janeiro-Brazil, (2005)
- [8] Luigi Maximilian Caligiuri, “The European official computation method for road traffic noise XP S31-33: a study of accuracy of the calculated L_{Aeq} values with respect to input parameters and comparison with experimental data”, inter-noise2005, 07-10 August Rio de Janeiro-Brazil, (2005)
- [9] 龍田健次、吉久光一、久野和宏、「 L_{Aeq} の測定値に及ぼす観測時間長等の影響 —幹線道路沿道の常時観測データの振る舞い—」、日本音響学会誌、Vol.54 No.8 , pp.554-560, (1998)
- [10] 久野和宏、野呂雄一 編著、吉久光一他著「道路交通騒音予測 —モデル化の方法と実際—」、11 章、pp.189-211, 技報堂出版(2004)
- [11] 久野和宏、野呂雄一、「道路交通騒音予測のこと[X] — L_{eq} 観測上の諸問題—」、

日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-96-08, (1996)

- [12] Mitsunobu Maruyama, Kazuhiro Kuno and Toshio Sone, “ Estimation of L_{AeqT} based on a dynamic model for road traffic noise”, inter-noise2011,4-7 September Osaka Japan, (2011)
- [13] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「不規則変動騒音に係る L_{AeqT} の観測時間長 T に関する検討」日本音響学会講演論文集 平成 24 年 3 月
- [14] 久野和宏、野呂雄一 編著、「道路交通騒音予測 —モデル化の方法と実際 —」、13 章、pp.189-211, 技報堂出版(2004)
- [15] 柴田文明著、“確率・統計”、pp.49- 68, 岩波書店(1996)
- [16] ISO 1996-1 Acoustics —Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 1 : Basic quantities and assessment procedures (2003)
- [17] ISO 1996-2 Acoustics —Description, measurement and assessment of environmental noise —Part2 : Determination of environmental noise levels (2007)
- [18] D. Skarlatos, P. Drakatos, “On selecting the minimum obserbation time for determing the L_{eq} of a random noise with a given level of confidence”, J. Sound and Vib, Vol. 152 No.1, pp.141-148, (1992)
- [19] Mitsunobu Maruyama, Kazuhiro Kuno and Toshio Sone , “The minimum measurement time for estimating L_{AeqT} of road traffic noise from the number of vehicle pass-bys ”, Applied Acoustics, Vol.74 No.3, pp317-324(2013)
- [20] M. Maruyama and T. Sone, “A consideration of the measurement time interval for obtaining a reliable equivalent level of noise from expressway”, 4th Joint Meeting of the ASA and ASJ , (2006)
- [21] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音の動的モデルに基づく L_{AeqT} の推定 —測定時間 T と L_{AeqT} —」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2010-31 (2010)
- [22] John G. Kemeny and J. Laurie Snell.,” Finite Markov Chains”, D. Van Nostrand Co. chap. IV, pp.69-98(1960)
- [23] S. Chandrasekhar,“Stochastic Problems in Physics and Astronomy ”, Rev of Mod. Phys. 15 pp.1-89(1943)

4 章

- [1] M. BJORKAN, “Maximum noise levels in road traffic noise”, J. Sound and Vib., Vol.127 No3, pp.583-587, (1988)
- [2] ISO 1996-1 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise —Part 1 : Basic quantities and assessment procedures (2003)
- [3] ISO 1996-2 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise— Part2: Determination of environmental noise levels (2007)
- [4] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音のピークレベルとその発生状況について」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2010-49(2010)
- [5] 久野和宏、野呂雄一 編著、「道路交通騒音予測 —モデル化の方法と実際—」、7 章、pp. 96-99、技報堂出版(2004)
- [6] 曾根敏夫、香野俊一、岩瀬昭雄、「道路騒音の予測:道路一般部を対象としたエネルギーベース騒音予測法(日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告) —III 自動車走行騒音のパワーレベルとスペクトル」、日本音響学会誌、Vol.50 No.3 , pp.233-239, (1994)
- [7] D.R. Johnson and E.G. Saunders, “The evaluation of noise from freely flowing road traffic”, J. Sound and Vib, Vol. 7, pp.287-309, (1968)
- [8] 久野和宏、奥村陽三、「道路交通騒音予測のこと [IX] —等間隔モデルについて—」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-96-07, (1996)
- [9] 森口繁一、他著「数学公式Ⅱ」3 章、pp. 203-227、岩波書店(1990)

5 章

- [1] I. S. DIGGORY, B. OAKES, “Computer simulation model for the prediction of traffic noise level”, Applied Acoustics, Vol.13, pp.19-31, (1980)
- [2] J. Romeu, S. Jimenez, M. Genesca, T. Pamies, “Night levels estimation in urban environments”, inter-noise 3-6 December, Honolulu,Hawaii, (2006)
- [3] Matthew Stead, Darren Jurevicius, Philip Abnew, “Correlation of rural highway road

traffic noise with vehicle speed and commercial vehicle percentages for the day night time periods”, ICSV14 9-12 July, (2007)

- [4] R. RYLANDER, M. BJORKMAN, “Planning consequences of the maximum dB(A) concept —A perspective”, J. Sound and Vib., Vol.250 No.1, pp.175-179, (2002)
- [5] L.J.M. Jacobs L. Nus, J. J. van Willgenburg, “A computer model to predict traffic noise in urban situations under free flow and traffic light conditions”, J. Sound and Vib., Vol.72 No.4, pp.523-537, (1980)
- [6] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音の動的モデルに基づく L_{AeqT} の推定 —測定時間 T と L_{AeqT} —」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2010-31 (2010)
- [7] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音のピークレベルとその発生状況について」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2010-49, (2010)
- [8] 重井芳治、「電気通信工学」、9章、pp.191-204, 朝倉書店(1982)

6章

- [1] 久野和宏、奥村陽三、野呂雄一、「道路交通騒音予測のこと[VIII] —最近接音源に基づく予測—」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-95-46, (1995)
- [2] 野呂雄一、山本征夫、井 研治、久野和宏、「最近接音源モデルによる道路交通騒音レベルの予測計算」、日本音響学会誌、Vol. 53 No.10, pp.763-771, (1997)
- [3] 久野和宏、野呂雄一 編著、「道路交通騒音予測 —モデル化の方法と実際 —」 8章、pp.106-124, 技報堂出版(2004)
- [4] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音のピークレベルとその発生状況について」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2010-49, (2010)
- [5] 丸山光信、久野和宏、曾根敏夫、「道路交通騒音の変動幅とその簡易計算法について」、日本音響学会騒音・振動研究会資料、N-2011-22, (2011)

関連分野における発表

1. 主論文

- (1) M. Maruyama and T. Sone
“A study on the estimation of L_{AeqT} in residential areas”, J. Acoust. Soc. Jpn (E), Vol.6 No.3, pp.235-240, (1985)
- (2) M. Maruyama, K. Kuno and T. Sone
“New mathematical model to estimate road traffic noise in view of the appearance rate of heavy vehicles”, International Journal of Acoustics and Vibration, Vol.16 No.2, pp.64-71, (2011)
- (3) M. Maruyama, K. Kuno and T. Sone
“The minimum measurement time for estimating L_{AeqT} of road traffic noise from the number of vehicle pass-bys”, Applied Acoustics, Vol.74 No.3, pp.317-324, (2013)

2. 国際会議での発表

- (1) ● M. Maruyama
“Estimation of the values of L_{eq} in residential areas”, 2nd Japan Korea Symposium on Acoustics, 2-3 November, pp.27- 34, Kumamoto, (1983)
- (2) ● M. Maruyama
“On the diffraction effect on noise radiated from moving sources influenced by a semi-infinite barrier”, inter-noise`87, pp.391-394, China, (1987)
- (3) ● M. Maruyama and T. Katoh
“Estimation of L_{AeqT} in the diffracted sound field effected by a semi-infinite barrier against noise radiated from running motor-cars”, Internatinal Seminar on Road Traffic Noise-Evaluation by Model Studies, September 5-6, France, (1988)
- (4) ● M. Maruyama and T. Sone

“A consideration of the measurement time interval for obtaining a reliable equivalent level of noise from expressway”, 4th Joint Meeting of the ASA and ASJ, Hawaii, (2006)

- (5) • M. Maruyama, K. Kuno and T. Sone

“Estimation of L_{AeqT} based on a dynamic model for road traffic noise”, inter-noise 2011, 4-7 September, Osaka, (2011)

(●印:発表者)

3. 国内での学会等発表

- (1) • 丸山光信

「道路交通量の少ない地域での L_{eq} の評価に関する検討」日本音響学会講演論文集 昭和 56 年 10 月 pp.403-404

- (2) • 丸山光信 仁村光延 稲山和博

「道路交通騒音に関する測定と評価法の比較(I) —地域別による相関分析」日本音響学会講演論文集 昭和 57 年 10 月 pp.503-504

- (3) • 丸山光信

「住環境騒音下での L_{eq} の予測に関するモデル —Poisson 分布を仮定した場合—」日本音響学会講演論文集 昭和 58 年 10 月 pp.433-434

- (4) • 丸山光信

「移動音源から放射する騒音の障壁による回折効果(I) — L_{Aeq} の推定とその理論的検討—」日本音響学会講演論文集 昭和 61 年 3 月 pp.421-422

- (5) • 丸山光信 加藤多津生

「移動音源から放射する騒音の障壁による回折効果(II) — L_{Aeq} の推定とその実験的検討—」日本音響学会講演論文集 昭和 61 年 3 月 pp.423-424

- (6) • 丸山光信 久野和宏 曾根敏夫

「大型車の出現頻度を考慮した道路交通騒音を推定するための新しい数学モデル」日本音響学会 騒音・振動研究会資料 N-2010-23 (2010)

- (7) • 丸山光信 久野和宏 曾根敏夫

「道路交通騒音の動的モデルに基づく L_{AeqT} の推定 —測定時間 T と L_{AeqT} —

一」日本音響学会 騒音・振動研究会資料 N-2010-31 (2010)

- (8) ●丸山光信 久野和宏 曾根敏夫
「道路交通騒音のピークレベルとその発生状況について」日本音響学会 騒音・振動研究会資料、N-2010-49 (2010)」
- (9) ●丸山光信 久野和宏 曾根敏夫
「道路交通騒音の変動幅とその簡易計算法について」日本音響学会 騒音・振動研究会資料 N-2011-22 (2011)」
- (10) ●丸山光信 久野和宏 曾根敏夫
「不規則変動騒音に係る L_{AeqT} の観測時間長 T に関する検討」日本音響学会講演論文集 平成 24 年 3 月

(●印：発表者)

4. 高専研究紀要

- (1) 丸山光信 木戸能史
「 L_{eq} の評価手法について道路交通騒音に関する実施例」育英高専研究紀要 昭和 57 年度 8 号 pp.155-158
- (2) 丸山光信
「住環境システムにおける L_{Aeq} の推定に関する考察」育英高専研究紀要 昭和 60 年度 11 号 pp.81-84
- (3) 丸山光信
「明瞭度試験について」育英高専研究紀要 昭和 61 年度 12 号 pp.45-49 (1986)
- (4) 丸山光信
「半無限長障壁による回折減衰量」育英高専研究紀要 平成 7 年度 21 号 pp.113-118
- (5) 丸山光信
「道路交通騒音のシミュレーション計算」育英高専研究紀要 平成 8 年度 22 号 pp.107-110
- (6) 丸山光信
「環境騒音、特に道路交通騒音予測に関する今後の課題」育英高専研究紀要 平成 11 年度 25 号 pp.29-31

5. その他の論文

- (1) ● 斎藤文孝 丸山光信 香野俊一 曾根敏夫 二村忠元
「壁振動による放射音に関する考察(実測結果による検討)」日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 昭和 51 年 12 月 pp.197-200 (1976)
- (2) ● 丸山光信 斎藤文孝 江端正直 香野俊一 曾根敏夫 二村忠元
「大ホールより階下中ホールへの音の伝搬とその対策 —仙台市民会館の改修案—」日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 昭和 52 年 11 月 pp.163-166 (1977)
- (3) ● 斎藤文孝 丸山光信 江端正直 香野俊一 曾根敏夫 二村忠元
「上下に重なった 2 ホール間の遮音に関する考察 —仙台市民会館の現状—」日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集 昭和 52 年 11 月 pp.167-170 (1977)
- (4) 斎藤文孝 丸山光信 江端正直 曾根敏夫 二村忠元
「上下に重なった 2 ホール間の遮音に関する考察」東北大学電通談話会記録 Vol.474, pp.189-195 (1978)
- (5) ● 木村大輔 丸山光信
「視覚情報と聴覚情報が速度感に及ぼす影響」日本音響学会講演論文集 平成 18 年 3 月 pp.91-92 (2006)
- (6) ● 木村大輔 丸山光信
「車内音が速度感に及ぼす影響 —PSE と L_{AeqT} の関係—」日本音響学会講演論文集 平成 19 年 3 月 pp.759-760 (2007)

(●印:発表者)