

## レベル統計量に基づく騒音評価量 ( $L_{eq}$ ) の 簡単且実用的な推定手法

三谷康夫\*, 美禰忠夫\*

A Simple and Practical Estimation Method of  $L_{eq}$  Noise Evaluation  
Index by Use of Statistical Information on Noise Level Fluctuation

Yasuo MITANI and Tadao MINE

### ABSTRACT

As is well-known, the noise evaluation index,  $L_{eq}$ , is very important in the actual field of noise evaluation and regulation problems. On the other hand, an extraction of the lower and/or higher order statistical information has become easier by use of a digital computer. Therefore, as an application of noise evaluation method with the aid of a microcomputer, the authors propose a method for estimating this  $L_{eq}$  evaluation index based on the momentary statistic value of the noise level fluctuation. Furthermore, the environmental noises which one encounters in daily life exhibit various types of probability distribution forms apart from a standard Gaussian distribution, due to the diversified causes of fluctuation. From the above practical points of view, in this treatise, a general explicit expression for estimating the  $L_{eq}$  evaluation index by use of the momentary statistic value of the general types of noise level fluctuations (including non-Gaussian distribution) has been proposed after introducing a general explicit expression of the noise level probability distribution. Finally, the validity of the proposed estimation method has been experimentally confirmed by applying it to actual road traffic noise data.

**Key Words:**  $L_{eq}$  noise evaluation index, statistical information, non-Gaussian, noise level fluctuation, environmental noise

キーワード:  $L_{eq}$  騒音評価量, 統計情報, 非ガウス性, 騒音レベル変動, 環境騒音

#### 1. まえがき

公知のように, 現在, 我が国においても国際的な整合性を旨として環境騒音評価量に等価騒音レベル  $L_{eq}$  が採用され, 従来応用の騒音評価レベル  $L_x$  ( $x=5, 10, 50, 90, 95, \dots$ ) も併用されているが, なるべく  $L_{eq}$  へ統一しておくのが望ましいとされている。騒音評価量としての  $L_{eq}$  は, うるささとの対応が一応よく, 特に物理機構を通した騒音制御への密着度も高いこと<sup>4)</sup>から, 近年ますますその重要性を増している。この  $L_{eq}$  評価量は,

騒音エネルギー変動の観測時間内における平均的尺度として定義され, 騒音レベル変動のサンプリングによる方式<sup>5)</sup>が, その計測法として広く採用されている。すなわち, デジタル計測された騒音レベル変動を一旦逆対数変換によりエネルギー変量に変換した後, その標本平均からデシベル値を算出する手法である。しかし, この方式によると, 逆対数変換により等間隔でのものとデシベル目盛は顕著な不等間隔となり, エネルギー尺度での平均機能は, この不等間隔に基づき本来の平均操作に不忠実と

\* 電子・電気工学科

なる原理上の問題点が生じる。更に、もとのデシベル波形はエネルギー波形へ変換され、激しく起伏が強調されるため、サンプリング間隔を可成り細かくする必要がある。すなわち、振幅の量子化誤差はもちろん時間のサンプリング間隔にも固有な問題が生じる。これらの問題を解決する一つの有力な手段として、逆対数変換を施さぬ等間隔デシベル目盛でのもとの測定値をそのままの形態で利用できるよう、それらの統計量を用いる方法が考えられる。すなわち、平均値 $\mu$ と分散 $\sigma^2$ からなる低次統計量のみを用い、騒音レベル変動分布のガウス性を仮定して導出された公知の関係式<sup>6)</sup>：

$$\text{Leq} = \mu + 0.115 \sigma^2 \quad (1)$$

に着目する。しかし、現実の騒音環境におけるレベル変動は、自然・社会ならびに個々の人為的要因まで絡んで、低次統計量のみを考慮に入れた典型的ガウス分布よりは、むしろ非ガウス性を示すのが常である。従って、騒音レベル変動の統計量に基づきLeq評価量を精度よく推定したい場合には、当然、平均値・分散以外に歪度・尖度…といった3次以上の高次統計量の関与が不可欠である。しかし、目的のLeq評価量と各次統計量の関係を見出すに当っては、これらに間に直接、従来の回帰分析法<sup>7)</sup>を適用するのであれば、データが変わるごとに回帰係数を算出し直す必要があり、一般性に欠ける。すなわち、これらに共通して潜在する確率論理をまず解析の基盤に置いて、これらの関連様式を一般的形態で見出してゆくことが必要となろう。その場合、ガウス分布仮定に基づく公知の関係式をまず否定せず、この関係式を基盤として、低次統計量から高次統計量へと逐次段階的に反影させてゆくのが合理的といえよう。

以上のような工学的背景のもと、本報告では、任意の騒音レベル変動に対処可能な一般的確率論理に基づいて、低次ならびに高次の統計量を用いてLeq評価量を推定する一手法を提案する。具体的には、この一般的確率論理として、ガウス分布を基幹分布として直交展開陽表示した統計的エルミート展開型一般分布表示を導入し、任意の非ガウス性一般騒音変動のもとで適用可能なLeq推定手法を提案する。結果として、導出された推定手法は、ガウス分布仮定に基づく公知の簡易的Leq推定手法を第1近似として含む。最後に、本推定手法を実測された道路交通騒音に適用し、その有効性を実験的に検証する。

## 2. 理論的考察

任意の騒音レベル変動 $x$ に対する確率表現の数学的枠組として、ガウス分布を初項にもつ統計的エルミート展開型一般分布表示を導入すると、Leq評価量を推定するための一般表示が次式のように導出される（導出過程は付録に示す）。

$$\begin{aligned} \text{Leq} = & \mu + \frac{\sigma^2}{2M} + M\ell_n \left[ 1 + \frac{1}{6M^3} \langle (x-\mu)^3 \rangle \right. \\ & + \frac{1}{M^4} \left\{ \frac{1}{24} \langle (x-\mu)^4 \rangle - \frac{\sigma^4}{8} \right\} \\ & + \frac{1}{M^5} \left\{ \frac{1}{120} \langle (x-\mu)^5 \rangle - \frac{\sigma^2}{12} \right. \\ & \left. \left. \times \langle (x-\mu)^3 \rangle \right\} + \dots \right] \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、上式において $\mu$ 、 $\sigma^2$ は $x$ の平均値と分散：

$$\mu \triangleq \langle x \rangle, \quad \sigma^2 \triangleq \langle (x-\mu)^2 \rangle \quad (3)$$

を示し、 $\langle (x-\mu)^n \rangle$  ( $n=3, 4, \dots$ )は $x$ の3次以上の各次中心モーメント統計量を示す。更に、 $\langle \rangle$ は平均操作、 $M$ は自然対数と常用対数の変換定数 ( $M \triangleq 10/\ell_n 10$ )を示す。従って、Leq評価量は任意分布の騒音レベル変動に関する平均値と分散はもちろん、3次以上の各次中心モーメント統計量 $\langle (x-\mu)^n \rangle$  ( $n=3, 4, \dots$ )をも反映させて、(2)式を用いて推定可能となる。特に騒音レベル変動がガウス分布型を示す場合、(2)式の展開補正項が0となることから、(2)式はガウス分布仮定に基づく公知の推定式<sup>6)</sup>：

$$\begin{aligned} \text{Leq} = & \mu + \frac{\sigma^2}{2M} \\ = & \mu + 0.115\sigma^2 \quad (4) \end{aligned}$$

と全く一致する。すなわち、(2)式は第1近似として公知の関係をも含んでおり、回帰分析法による実験式とは異なった展開型一般形式となっている。

一方、近年のデジタル計測技術の発達に伴ない、騒音の実測データもオンライン・リアルタイム形式で逐次演算処理される場合が非常に多い。従って、以下では騒音レベル変動の各次中心モーメント統計量を記憶容量をあまり必要としない形態で抽出する手法を提案する。そのため、まず騒音レベル変動の各次モーメント統計量を次式によって逐次形式での演算処理に置き換える。

$$\langle x^m \rangle_N = \frac{N-1}{N} \langle x^m \rangle_{N-1} + \frac{1}{N} x_N^m \quad (5)$$

すなわち、(5)式によれば、騒音レベル変動 $x$ の $N$ 時刻における $m$ 次モーメント統計量 $\langle x^m \rangle_N$ が $(N-1)$ 時刻の $m$ 次モーメント統計量 $\langle x^m \rangle_{N-1}$ により逐次加算演算を用い算出可能となる。その後、次式の関係を用いて各次モーメント統計量から各次中心モーメント統計量へと変換する。

$$\begin{aligned} \mu \triangleq & \langle x \rangle, \quad \sigma^2 \triangleq \langle (x-\mu)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - \mu^2, \\ \langle (x-\mu)^3 \rangle = & \langle x^3 \rangle - 3\langle x^2 \rangle\mu + 2\mu^3, \\ \langle (x-\mu)^4 \rangle = & \langle x^4 \rangle - 4\langle x^3 \rangle\mu + 6\langle x^2 \rangle\mu^2 \\ & - 3\mu^4, \\ \langle (x-\mu)^5 \rangle = & \langle x^5 \rangle - 5\langle x^4 \rangle\mu + 10\langle x^3 \rangle\mu^2 \\ & - 10\langle x^2 \rangle\mu^3 + 4\mu^5, \quad (6) \end{aligned}$$

結局、各次モーメント統計量をオンラインで逐次演算し、得られた各次モーメント統計量を一旦各次中心モーメント統計量に変換することによって、 $Leq$ が(2)式から具体的に算出されることになる。

3. 実験的考察

3.1 計測システムの構成

本推定理論を具体化するに当たり、特に測定対象が室外における環境騒音の評価を目指すため、小型軽量の計算機を用いる必要がある。従って、電池駆動のハンドヘルド・マイクロコンピュータを用い計測システムを構成した。そのブロック線図をFig.1に示す。デジタル騒音計とマイクロコンピュータは、RS-232C型インターフェースを介し接続され、計測時間は計算機のクロック機能を利用して任意に設定できる。RS-232C型インターフェースの利点としては、通常の汎用マイクロコンピュータに標準装備されている点、何より自動車等から放出される雑音の影響を受け難い点などが挙げられる。尚、本手法はデシベル波形をそのまま処理するため、サンプリング間隔を極度に細かくする必要がなく、通常のベーシック言語で十分処理可能であった。

3.2 測定結果

本推定手法の有効性を検証するために、実環境騒音の

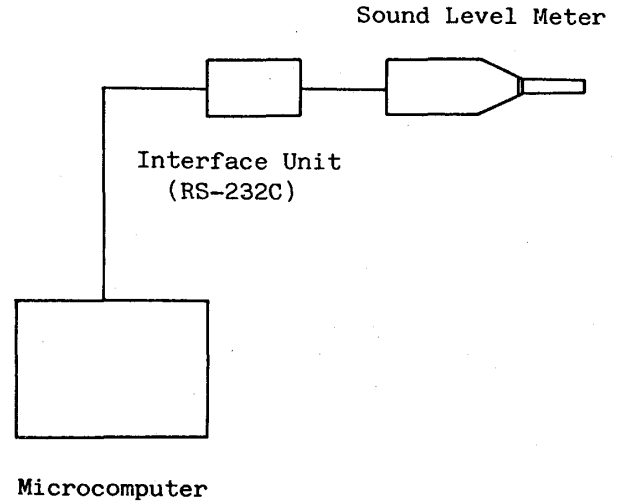


Fig.1 Block diagram of measurement system.

具体例として、現在最も深刻な道路交通騒音問題に着目し、交通量の多い場合と少ない場合を取り上げて考察する。すなわち、交通量の多い場合として、福山市内における国道2号線の道路端で10分間の測定を行なっている (Case A)。一方、交通量の少ない場合として、福山市内の市道の道路端で10分間の測定を行なっている (Case B)。各騒音データは一旦データレコーダに録音し、研究室に持ち帰った後、分析が行なわれた。尚、各データ

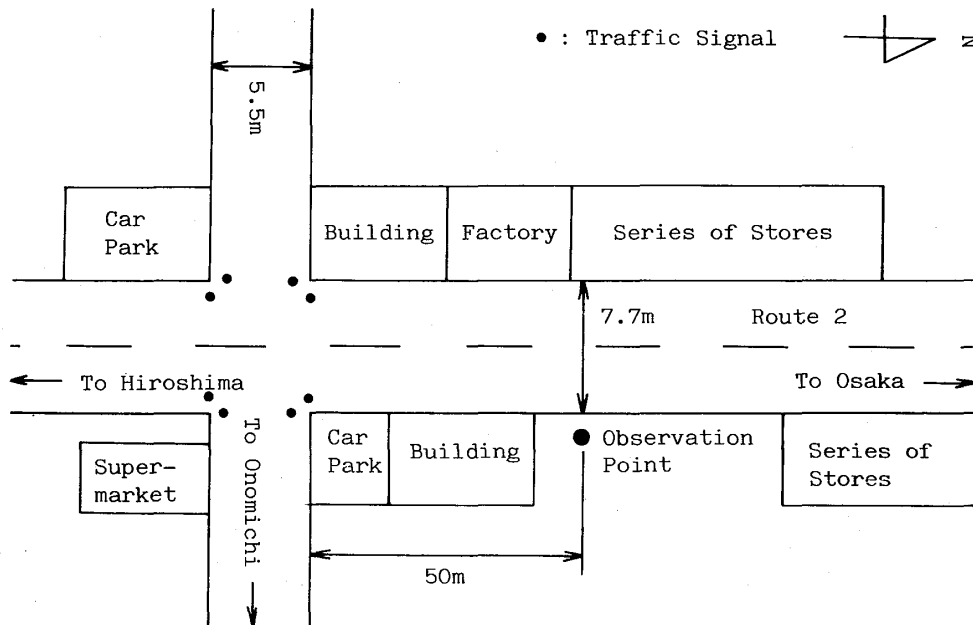


Fig.2 Actual situation of measuring road traffic noise (Case A).

に対する10分間当りの交通量は Case A : 224台, Case B : 19台であった。Fig. 2 及び Fig. 3 に, 各データに対する観測点付近の状況を示す。

Fig. 4 と Fig. 5 に, Case A と Case B における各実測データに対し, ガウス分布 (付録(8)式参照) より得られた理論的累積分布  $Q(x)$  ( $\triangleq \int_{-\infty}^x P(\xi) d\xi$ ) と

実験的累積分布の比較を示す。Case A では, ガウス分布でも可成り理論値が実験値をよく説明しており, 可成りガウス分布に近い場合といえる。一方, Case B では, ガウス分布では理論値が実験値を説明し切れず, 可成り非ガウス性の強い実測データとなっている。

以上, Case A, Case B について,  $L_{eq}$  推定の一般表示(2)式によって得られた推定結果を Table 1 及び

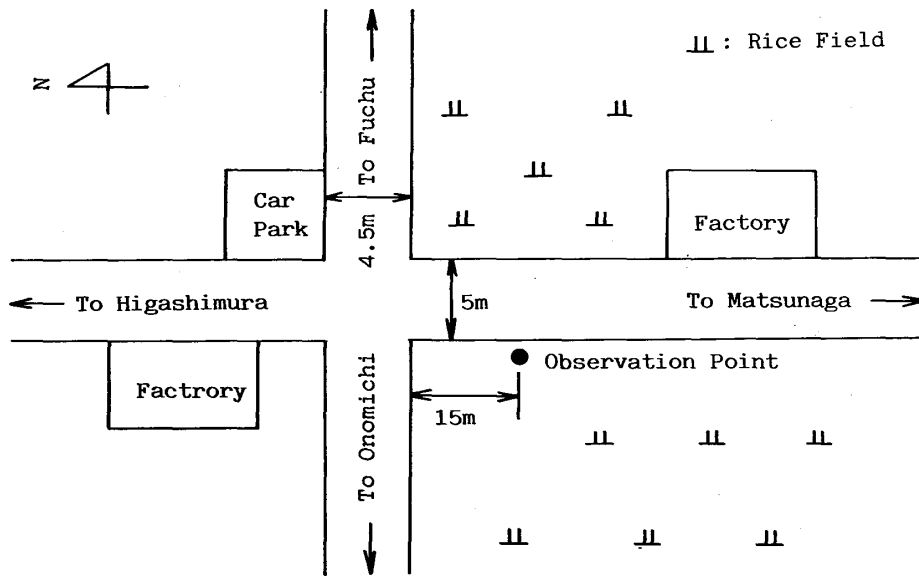


Fig. 3 Actual situation of measuring road traffic noise (Case B)

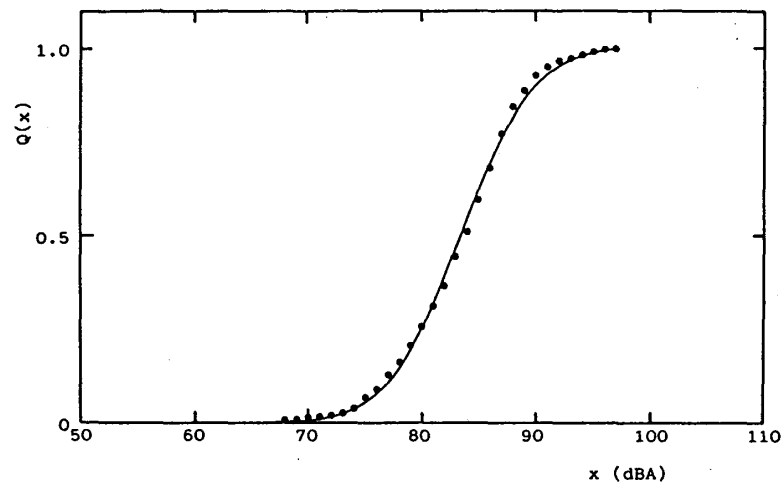


Fig. 4 A comparison between theoretically estimated curve by use of Gaussian distribution and experimentally sampled points for cumulative noise level distribution  $Q(x)$  (Case A). Experimentally sampled points are marked by ● and theoretically estimated curve is shown by the solid line.

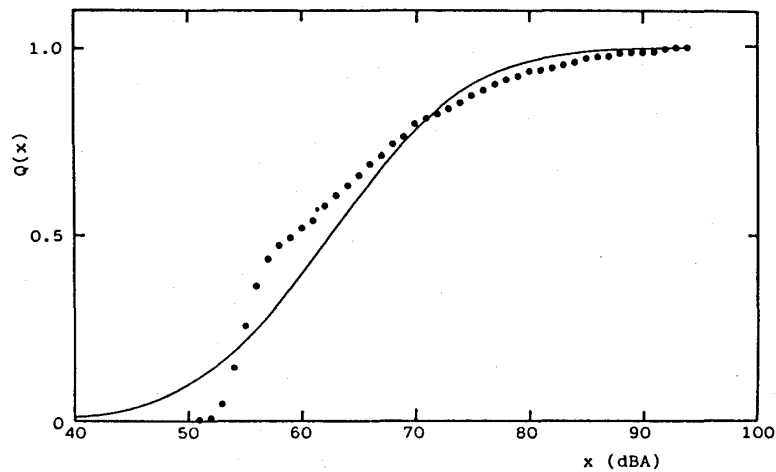


Fig. 5 A comparison between theoretically estimated curve by use of Gaussian distribution and experimentally sampled points for cumulative noise level distribution  $Q(x)$  (Case B). Experimentally sampled points are marked by ● and theoretically estimated curve is shown by the solid line.

Table 1 The estimated results for Leq evaluation index by use of the proposed method (Case A).

Observed value of Leq (dBA)	Estimated value of Leq by use of Eq. (2) (dBA)
86.0	86.3 (First Approx.)
	86.2 (Second Approx.)
	86.2 (Third Approx.)
	86.1 (Fourth Approx.)

Table 2 The estimated results for Leq evaluation index by use of the proposed method (Case B).

Observed value of Leq (dBA)	Estimated value of Leq by use of Eq. (2) (dBA)
76.4	72.9 (First Approx.)
	77.8 (Second Approx.)
	78.6 (Third Approx.)
	76.2 (Fourth Approx.)

Table 2 に示す。尚、(2)式の展開表現において、初項のみを考慮に入れ展開補正項を考慮しない場合（ガウス分布仮定に基づく公知の推定式(4)式に相当）を第1近似、 $n$ 次の中心モーメント統計量まで逐次段階的に考慮した場を第 $(n-1)$ 近似と定義する。尚、Table 1とTable 2においてLeqの観測値としては、精密級の積分騒音計によって得られた測定値を用いている。Table 1 から、もともとガウス分布に近い騒音レベル変動の場合、当然ガウス分布の仮定によって導出された従来型のLeq推定値（第1近似）を用いても可成りの精度で理論値が実験値をよく捉えている。しかし、より詳細に見れば、実用上、問題にならぬ範囲内ではあるが、展開項数を増加させることにより理論値は実験値の方へ微小ながら、より漸近する傾向が認められる。一方、ガウス分から可成り

はずれた騒音レベル変動分布の場合のTable 2 に対しては、非ガウス性を考慮した本手法の有効性が明白に現われている。具体的には、従来型のLeq推定式を用いた第1近似の推定誤差が約4 dBA程度あるにもかかわらず、第4近似まで展開項数を増加させれば、Leq推定値は1 dBA以内の誤差で理論値が実験値をよく説明している。Case A, Case Bとも、展開項の増加と共に理論値が実験値をよく捉えてゆく傾向があり、本手法の有効性が確かにうかがわれる。

#### 4. あとがき

本報告では、デシベル計測に整合した騒音レベル変動の統計情報に基づくLeqの簡単且実用的な推定手法が提案された。次いで、交通量の可成り異なった2種道路交

通騒音の実測データに本手法を適用し、その有効性的一端を確認した。

具体的には、任意の非ガウス性騒音レベル変動に対処可能な確率表現の数学的枠組を導入し、ガウス分布仮定に基づく従来型推定手法を一般化した姿でLeq推定に関する一般理論を提案した。すなわち、本手法においては、騒音レベル変動の各次統計量は、低次から高次へと逐次段階的に反影させた。

本研究は、計算機利用の騒音評価量の推定において、尚、初期的段階に留まっている。従って、今後はまだ多くの解明すべき研究課題をこの上に残している。例えば、

i) 他の様々な騒音データへ本手法を適用して、その有効性をますます確認してゆくこと、

ii) Leq評価のみの考察に留まらず、騒音レベル変動分布に直結した従来応用の $L_x$ 評価量をも一般的に推定する手法を提案すること、

iii) 今後のきめ細かい騒音評価を目指し、本理論を基盤として、 $L_x$ 評価量とLeq評価量に横たわる一般相関理論を見出してゆくこと、

iv) 実用的観点から、非定常な騒音特性をも定量的に把握できるよう、本手法に基づいた任意観測時間毎での長時間オンライン計測システムを構成すること、などが挙げられよう。

## 謝 辞

本研究を行なうに当たり、有益な討論、助言をいただいた広島大学工学部教授・太田光雄博士に深謝の意を表する。更に、実験データの処理において多大の援助をいただいた細谷計氏をはじめ卒業研究生各位にも深謝の意を表する。

## 文 献

- 1) 桑野園子, 加藤徹, 難波精一郎, “レベル変動する複合音の大きさについて—Leq,  $L_a$ , LL, PNL等との関係,” 聴覚研究会資料H-48-1, 6-10 (1978).
- 2) 平松幸三, 若狭宏, 高木興一, 山本剛夫, “変動騒音のうるささ (Leqの妥当性について),” 音響学会誌 34, 641-649 (1978).
- 3) 難波精一郎, 桑野園子, “種々の変動音の評価法としてのLeqの妥当性並びにその適用範囲の検討,” 音響学会誌 38, 774-785 (1982).
- 4) 太田光雄, “騒音予測における評価 $L_a$  ( $\alpha$ :%)とLeqの対比について—物理的意味からみた一見解—,” 音響学会誌 31, 752-753 (1975).
- 5) ISO 1996/1-1982 (E).
- 6) 日本建築学会編, 騒音評価法 (彰国社, 東京, 1981),

P73.

- 7) 例えば, C. G. Don and I. G. Rees, “Road traffic sound level distributions,” J. Sound Vib. 100, 41-53 (1985).
- 8) M. Ohta and T. Koizumi, “General statistical treatment of the response of a nonlinear rectifying device to a stationary random input,” IEEE Trans. Inf. Theory IT-14, 595-598 (1968).

## 付 録 (2)式の導出

解析の出発点として、任意の騒音レベル変動 $x$ に対する確率密度関数 $P_x(x)$ として、次式で示される統計的エルミート展開型一般分布表示を採用することができる。

$$P_x(x) = N(x; \mu, \sigma^2) + \sum_{n=3}^{\infty} A_n H_n\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \times N(x; \mu, \sigma^2),$$

$$A_n \triangleq \frac{1}{n!} \langle H_n\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \rangle \quad (7)$$

ただし、 $H_n(\cdot)$ は $n$ 次のエルミート多項式を示し、 $N(x; \mu, \sigma^2)$ は公知のガウス分布:

$$N(x; \mu, \sigma^2) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

を示す。ここで、騒音レベル変動 $x$ と騒音エネルギー変動 $E$  ( $E_0$ : 基準エネルギー)の関係:

$$x = 10 \log_{10} \frac{E}{E_0} \quad (9)$$

から、無次元化された騒音エネルギー変動 $z$  ( $\triangleq E/E_0$ )に対する確率密度関数 $P_z(z)$ は、(7)式より次のように与えられる。

$$\begin{aligned} P_z(z) &= P_x(x) \left| \frac{dx}{dz} \right|_{x \rightarrow z} \\ &= \frac{M}{\sqrt{2\pi}\sigma z} e^{-\frac{(M\ell_n z - \mu)^2}{2\sigma^2}} \\ &\quad + \sum_{n=3}^{\infty} A_n H_n\left(\frac{M\ell_n z - \mu}{\sigma}\right) \\ &\quad \times \frac{M}{\sqrt{2\pi}\sigma z} e^{-\frac{(M\ell_n z - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10) \end{aligned}$$

従って、Leq算出のために直接必要な $z$ の平均値は、その定義式より次のように求められる。

$$\langle z \rangle \triangleq \int_0^{\infty} z P(z) dz$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{M}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(M\ell_n z - \mu)^2}{2\sigma^2}} dz \\
&+ \sum_{n=3}^{\infty} A_n \int_{-\infty}^{\infty} H_n\left(\frac{M\ell_n z - \mu}{\sigma}\right) \frac{M}{\sqrt{2\pi}\sigma} \\
&\quad e^{-\frac{(M\ell_n z - \mu)^2}{2\sigma^2}} dz \quad (11)
\end{aligned}$$

ここで、積分変数の変換： $\xi \triangleq M\ell_n Z$ を施し、ガウス分布とエルミート多項式の関係：

$$\begin{aligned}
N(\xi; \mu, \sigma^2) H_n\left(\frac{\xi - \mu}{\sigma}\right) \\
= (-1)^n \sigma^n \frac{d^n}{d\xi^n} N(\xi; \mu, \sigma^2) \quad (12)
\end{aligned}$$

を用いると、(11)式は次のように変形される。

$$\begin{aligned}
\langle z \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{\xi}{M}} N(\xi; \mu, \sigma^2) d\xi \\
&+ \sum_{n=3}^{\infty} A_n (-1)^n \sigma^n \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{\xi}{M}} \\
&\quad \times \frac{d^n}{d\xi^n} N(\xi; \mu, \sigma^2) d\xi \quad (13)
\end{aligned}$$

更に、ガウス分布の境界項件：

$$\frac{d^m}{d\xi^m} N(\xi; \mu, \sigma^2) \Big|_{\xi \rightarrow \pm\infty} = 0 \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (14)$$

を考慮し、(13)式の第2項に  $n$  回の部分積分を適用すれば、結局  $z$  の平均値として次式を得る。

$$\langle z \rangle = e^{\frac{\mu}{M} + \frac{\sigma^2}{2M^2}} \left[ 1 + \sum_{n=3}^{\infty} A_n \sigma^n \frac{1}{M^n} \right] \quad (15)$$

従って、上式を  $\text{Leq}$  の定義式に代入すれば、容易に次の関係を見出すことができる。

$$\begin{aligned}
\text{Leq} &\triangleq 10 \log_{10} \frac{\langle E \rangle}{E_0} \\
&= M\ell_n \langle Z \rangle \\
&= \mu + \frac{\sigma^2}{2M} + M\ell_n \left[ 1 + \sum_{n=3}^{\infty} A_n \sigma^n \frac{1}{M^n} \right] \quad (20)
\end{aligned}$$

結局、(7)式より展開係数  $A_n$  が次式：

$$\begin{aligned}
A_3 &= \frac{1}{3!} \langle H_3\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \rangle \\
&= \frac{1}{6\sigma^3} \langle (x-\mu)^3 \rangle, \\
A_4 &= \frac{1}{4!} \langle H_4\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \rangle \\
&= \frac{1}{24\sigma^4} \langle (x-\mu)^4 \rangle - \frac{1}{8}, \\
A_5 &= \frac{1}{5!} \langle H_5\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \rangle \\
&= \frac{1}{120\sigma^5} \langle (x-\mu)^5 \rangle - \frac{1}{12\sigma^3} \\
&\quad \times \langle (x-\mu)^3 \rangle, \\
&\vdots \quad (21)
\end{aligned}$$

のように具体的に示されるため、これを(20)式に代入すれば、(2)式が得られる。