変動騒音によるTTSの研究

山本 剛夫*, 高木 興一*, 庄司 光**, 齊藤 実***

STUDIES ON TTS PRODUCED BY FLUCTUATING NOISES

Takeo YAMAMOTO†, Koichi TAKAGI†, Hikaru SHOJI††, Minoru SAITO†††

In order to investigate the temporary threshold shift (TTS) produced by fluctuating noises, two experiments were carried out changing the levels of white noise every five seconds in accordance with the previously arranged programs.

In the first experiment eight kinds of noises having the following properties were selected and classified into two groups (A, B) according to the shape of correlogram.

- 1) Fluctuating levels follow the normal distribution with the mean, 95 dB, and the standard deviation, 3.60 dB.

- 2) The number of level-changing is 240.

Consequently, whole exposure time becomes 20 minutes. (240×5 sec)

- 3) Correlogram for each noise is expressed as follows:

noises of Group A

$$a) \rho_k = 1 \text{ for } k=0 \\ = 0 \text{ for } k>0$$

$$b) \rho_k = -\frac{1}{10}k + 1$$

$$c) \rho_k = 0.7^k$$

$$d) \rho_k = 0.775^k [\cos k(58^\circ 54') \\ + 0.151 \sin k(58^\circ 54')]$$

where ρ_k is autocorrelation coefficient and k is integer.
noises of Group B

$$e) \rho_k = 1 \text{ for } k=0$$

$$f) \rho_k = -\frac{1}{20}k + 1$$

$$g) \rho_k = 0.8^k$$

$$h) \rho_k = 0.775^k [\cos k(32^\circ 58') \\ + 0.400 \sin k(32^\circ 58')]$$

Seven subjects were exposed to noises of Group A and other five subjects to noises of Group B. They were also exposed for 20 minutes to steady-state white noise at 95 dB. TTS at 3, 4, 6 and 8 kHz were measured.

Using the analysis of variance technique, TTS data for Group A and for Group B were respectively analyzed. There were no significant differences (level of significance: 0.05) in TTS between the exposure noises.

In the second experiment the levels of exposure noises were changed alternately between S_1 dB and S_2 dB, holding the value of $\frac{S_1 + S_2}{2}$ constant (100 dB). The values of S_1 and S_2 were selected as follows:

$$S_1: 100 \quad 102.5 \quad 105 \quad 107.5 \quad 110 \quad 112.5$$

$$S_2: 100 \quad 97.5 \quad 95 \quad 92.5 \quad 90 \quad 87.5$$

$$S_1 - S_2: 0 \quad 3 \quad 10 \quad 15 \quad 20 \quad 25$$

($S_1 - S_2 = 0$ means that the noise is a steady-state noise at 100 dB). TTS at 2, 3, 4, 6 and 8 kHz produced by ten minutes' exposure to these noises were found to be approximately the same regardless of the temporal characteristics of the exposure noises.

§ 1 は し が き

Ward et al.¹⁾ はレベルが30秒ごとに交互に 106 dB と

*京都大学工学部衛生工学教室

**関西大学工学部土木工学教室

***尼崎市衛生研究所

昭和44年4月28日受付, 普通掲載

†Department of Sanitary Engineering, Faculty of Engineering, Kyoto University.

††Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University.

†††Public Health Institute of Amagasaki City.

Received for publication, April 28, 1969.

96 dB に変化する broad band noise を102分まで暴露した際のTTSが, 101 dB (106 dB と 96 dB との平均のレベル) の定常騒音によるTTSと等しいことから, レベルが変動する騒音によるTTSは, 平均のレベルを持つ定常騒音によるTTSと等しいと報告している。

しかし, より複雑な変動騒音に対して, 平均のレベルを用いる方法が有効であるか否かは明らかでない。

一般に, 変動騒音を規定する要因には, 平均のレベル, レベルの分布, 変動様式(周期的あるいはランダムなど)などが考えられるが, 本編では平均のレベルを一

定に保ち変動の様式をコレログラムによって分類した騒音および平均のレベルが一定で、高低両レベルを繰り返す騒音のそれぞれのレベルを変化させた場合について暴露実験を行なった。

§ 2 コレログラムの異なる変動騒音による T T S

5 秒ごとに測定した工場騒音のレベル変動の様式は、コレログラムによってほぼつぎの 4 種に分類される²⁾。

a) 無相関：自己相関係数が時刻 $T=0$ で 1, $T>0$ で 0。

b) 移動平均型：自己相関係数がある時刻までは直線的に減少し、その後は 0 となる。

c) 1 次の自己回帰型：自己相関係数が時間に対して指数関数的に減少するもの。

d) 2 次の自己回帰型：自己相関係数が時間に対して減衰振動を示すもの。

これらの変動様式の相違による T T S の差を検討するため、以下の実験を行なった。

2.1 実験方法

レベル変動の分布の型、標準偏差および平均のレベルを等しくして、変動様式のみを変化させるために、あらかじめ以下のような特性をもつ暴露音を想定し、後に述べる方法に基づいて、レベルの変動様式を定めた。

- 1) 白色騒音とする。
- 2) レベルは 5 秒ごとに段階的 (ステップ状) に変化する。
- 3) 5 秒ごとのレベルの分布は、いずれも平均値 95 dB, 標準偏差 3.60 dB の正規分布となるようにする。
- 4) 暴露時間は 20 分、したがって変動するレベルの個数は 240 個となる。
- 5) コレログラムの型は前記 a), b), c), d) の 4 種とし、各々について 2 種類の暴露音、計 8 種をえらぶ。

5 秒ごとにレベルを変化させたのは、J I S 規格³⁾における、変動騒音の測定方法を考慮したためであり、標準偏差として 3.60 dB を選んだのは、工場騒音のレベル変動の標準偏差が平均値では 4.0 dB 程度である²⁾ためである。

4 種のレベル変動のうち、b) 移動平均型、c) 1 次の自己回帰型、d) 2 次の自己回帰型に対応する確率変数 Y_t はそれぞれ次式で示される⁴⁾。

$$b) \quad Y_t = \frac{1}{n}(X_{t-n} + X_{t-n-1} + X_{t-n-2} + \cdots + X_t) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$c) \quad Y_t = \alpha_1 Y_{t-1} + X_t \quad \cdots \cdots (2)$$

$$d) \quad Y_t = \alpha_2 Y_{t-1} + \beta Y_{t-2} + X_t \quad \cdots \cdots (3)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \beta$ は定数で、 n は移動平均の個数、 X_t は無相関の確率変数である。 X_t が分散 σ_x^2 をもつ正規分布に従うとき、 Y_t の分散 σ_y^2 ならびにそのコレログラム (ρ_k) はそれぞれ次式で示される⁴⁾。ただし、 k は自己相関係数 ρ を規定する時間間隔内に含まれるレベル変動の個数である。したがって、 $5 \times k$ は時間間隔 (秒) を示す。

$$b) \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sigma_x^2 \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\rho_k = -\frac{1}{n}k + 1 \quad \cdots \cdots (5)$$

(k は 0 から n まで)

$$c) \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{1-\alpha_1} \sigma_x^2 \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\rho_k = (\alpha_1)^k \quad \cdots \cdots (7)$$

$$d) \quad \sigma_y^2 = \frac{1-\beta}{(1-\beta^2)(1-\alpha_2-\beta)(1+\alpha_2-\beta)} \sigma_x^2 \quad \cdots \cdots (8)$$

$$\rho_k = \mu^k \cos k\theta + \frac{1-\mu^2}{1+\mu^2} \mu^k \cot \theta \sin k\theta \quad \cdots \cdots (9)$$

ただし、 μ, θ は λ に関する二次方程式

$$\lambda - \alpha_2 \lambda - \beta = 0 \quad \text{の 2 根を}$$

$$\lambda_1 = \mu e^{i\theta}, \quad \lambda_2 = \mu e^{-i\theta}$$

とおいたときの値である。

σ_y の値をいずれも 3.60 とすれば、 $n, \alpha_1, \alpha_2, \beta$ の値を定めることにより、b), c), d) における σ_x の値が定まる。 n, α_1, α_2 の値を二通り選ぶこととし、暴露音を二つのグループにわけた。

Group A

$$b) \quad n=10$$

$$c) \quad \alpha_1=0.7$$

$$d) \quad \alpha_2=0.8 \quad \beta=-0.6$$

Group B

$$b) \quad n=20$$

$$c) \quad \alpha_1=0.8$$

$$d) \quad \alpha_2=1.3 \quad \beta=-0.6$$

上記の各定数を用い、(4), (6), (8) 式から計算して得たそれぞれの σ_x の値を標準偏差としてもつような正規乱数を 240 個づつ乱数表を用いて選び出した。それらの個々の値から式(1), (2), (3)を用いて Y_t の値をそれぞれ 240 個定めた。

a) の無相関のものについては、5 秒ごとのレベル変動が $\sigma=3.60$ の正規分布となるような 240 個のレベルを 1 dB ステップで選んでおき、乱数表によりランダムにならばかえた。このならべかえを二通り行ない、それぞ

Tab. 1 Average and standard deviation of levels of exposure noise.

Type of fluctuation of exposure noise	Group A		Group B	
	Average level (dB)	Standard deviation (dB)	Average level (dB)	Standard deviation (dB)
Uncorrelated process	95±0.0	3.60	95±0.0	3.60
Process of moving average summation	95+0.1	2.81	95+0.1	3.52
First order autoregression process	95-0.0	3.02	95+0.2	3.46
Second order autoregression process	95-0.0	3.41	95+0.1	3.39

Fig. 1 (a) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise.
Noise of Group A: uncorrelated process
Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

Fig. 1 (b) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise.
Noise of Group A: process of moving average summation
Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

れ Group A, Group B の暴露音とした。

上記の方法によって得た 8 種の暴露音のレベル変動について、平均のレベル、標準偏差、度数分布を求めると

ともに、自己相関係数を計算した。

すなわち Tab. 1 はこれら暴露音の平均のレベルと標

Fig. 1 (c) Correlogram histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise. Noise of Group A: first order autoregression process
Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

Fig. 1 (d) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise. Noise of Group A: Second order autoregression process
Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

準偏差である。平均のレベルははじめに想定した 95 dB にきわめて近い値で、いずれも 0.2 dB 以下の誤差であるが標準偏差は全般に 3.60 dB よりも小さい値を示している。この理由は、理論的には、 X_t を無限にとったときは σ_y が 3.60 となるが、有限の 240 個を取ったためと考えられる。

Fig. 1 の(a)から(h)までに、各々の変動騒音について、そのコレログラム、レベルの頻度分布（ヒストグラム）および最初の約60秒の間のレベル変動の様子を示した。コレログラムの図の実線は理論値（すでに記した ρ_k ）であり、破線は各データーから計算した値である。計算値はいずれも、はじめに想定した ρ_k に近い値を示して

いる。

上記の変動様式にしたがう暴露音を発生させるための装置として、任意音圧発生装置（日本電子測器製、Sound Level Programmer SN-6）を用いた。この装置はテープリーターで7個の減衰器の作動の組合せをすることにより、暴露音のレベルをコントロールすることができる。

被検者は正常聴力をもつ男子学生で、Group A の暴露音については7人、Group B の暴露音については5人である。暴露は Group A, B とともに上述の変動する騒音4種以外に 95 dB の定常騒音についても行なった。

20分間の暴露終了後、10秒たってから3, 4, 6, 8

Fig. 1 (e) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise.

Noise of Group B: uncorrelated process
Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

Fig. 1 (f) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise.

Noise of Group B: process of moving average summation
Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

k Hz の順でそれぞれ40秒ずつTTSの測定を行なった。同一暴露音条件毎に実験を7名(または5名)について行なって得られたTTSの平均値について考察した。

2.2 実験結果

Group A, Group B のそれぞれについて, 横軸にテスト周波数, 縦軸にTTSをとって, 各暴露様式別の成績を示したものが Fig. 2 の(a), (b)である。Group A の騒音では 95 db の定常騒音による TTS がテスト周波数 6kHz をのぞけば, 他の暴露音に比べやや大きい値を示しており, 2 次の自己回帰型のコレログラムをもつ変動騒音による TTS は一般に小さい値を示している。Group B の騒音では, 一次の自己回帰型, 移動平均型

のコレログラムをもつ騒音による TTS が, 前者は 4, 6, 8 kHz で, 後者は 6, 8 kHz で他の暴露音による TTS より少し大きい値を示している。しかし, Group A, B のいずれの暴露音についても TTS の大きさは, 3kHz で 8~13 dB, 4, 6, 8 kHz で 16~22 dB の範囲にはば入っており, 暴露音の相違による TTS の差の最大は約 6 dB をこえていない。

これらの結果を統計的に検討するために, 暴露音の種類と被検者とを要因として 2 元配置法による分散分析を各テスト周波数ごとに行なったが, 暴露音の種類の間には有意な差 (有意水準 0.05) はみられなかった。Tab. 2 は分散分析表を示す。すなわち, 平均のレベルが 95 dB

Fig. 1 (g) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise.

Noise of Group B: first order autoregression process

Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

と一定なら、いずれの変動様式の騒音によるTTSの値も、定常騒音によるTTSの値とほぼ等しいとみなしてさしつかえないと推測される。

§ 3 高低両レベルを繰り返す騒音によるTTS

暴露音のレベルの変動が前節の場合よりも大きいときのTTSを検討するために以下の実験を行なった。

3.1 実験方法

暴露音は白色騒音でそのレベルが5秒ごとに、二つのレベル S_1 , S_2 の値をとる6種を用いた。これらの値をTab. 3に示した。平均のレベルはいずれも100 dBで、

Fig. 1 (h) Correlogram, histogram and an example of sound pressure levels of exposure noise.

Noise of Group B: Second order autoregression process

Solid line in the correlogram shows the theoretical value and open circles calculated values.

$S_1 - S_2$ の値が0 (100 dBの定常騒音), 5, 10, 15, 20, 25 dBである。暴露時間は10分で、暴露終了後、10秒たってから、2, 3, 4, 6, 8 kHzについて、それぞれ40秒ずつ上記の順でテストを行なった。被検者は5名でその片耳を用い、同一暴露音条件で5名のTTSの平均値を求めた。

3.2 実験結果

横軸に二つのレベル差 ($S_1 - S_2$), 縦軸にTTSをとり、テスト周波数をパラメーターとして結果を示したものがFig. 3である。暴露音の平均のレベルが等しい場合に同じ大きさのTTSが生じるとすれば、Fig. 5で

Fig. 2 TTS produced by the fluctuating noises. Parameters are fluctuating types classified by the shape of correlogram.

Tab. 2 Analysis of variance for TTS data produced by noises of Group A and of Group B.

Test freq.	Factor	Group A $F_{0.05}(4, 24)=2.78$				Group B $F_{0.05}(4, 17)=3.01$			
		Sum of squares	Degrees of freedom	Mean squares	Ratio of variance	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean squares	Ratio of variance
3kHz	Type of noise	97.2567	4	24.3142	1.1881	83.8696	4	20.9674	<1
	Subjects	184.9498	6	30.8283		161.0776	4	40.2694	
	Error	491.1431	24	20.4643		438.9376	16	27.4336	
4kHz	Type of noise	114.7985	4	28.6996	<1	56.3720	4	14.0930	<1
	Subjects	500.7900	6	83.4650		886.2680	4	221.5670	
	Error	739.2015	24	30.8001		711.7000	16	44.4813	
6kHz	Type of noise	176.9240	4	44.2310	1.0411	71.0384	4	17.7596	<1
	Subjects	573.2080	6	95.5347		857.0384	4	214.2596	
	Error	1019.6580	24	42.4858		473.0616	16	29.5664	
8kHz	Type of noise	48.5588	4	12.1397	<1	84.3880	4	21.0970	<1
	Subjects	474.9537	6	79.1590		1646.3240	4	411.5810	
	Error	1342.0492	24	55.9187		372.1080	16	23.2568	

は横軸に平行な結果が得られるはずである。実測データについてみると、かなりのばらつきはみられるが、いずれの周波数についても、二つのレベルの差の増加によるTTSの一定の増減の傾向は明らかでない。この点を統計的に分析するため、各テスト周波数ごとに分散分析を行なったがレベル差に関しては有意な差（有意水準0.05）は認められなかった。Tab. 4に分散分析表を示

す。すなわち、この場合にも、平均のレベルを用いれば変動騒音を定常騒音とみなした取扱ができるとしてよい。

§ 4 考 察

騒音の変動様式とTTSとの関係を論じた報告は、これまではほとんどなされていないが、Ward et al.¹⁾は

Tab. 3 Exposure noises in the second experiment. The level of white noise were changed every five seconds alternately between S_1 and S_2 holding the value of $\frac{S_1+S_2}{2}$ constant (100 dB).

S_1 (dB)	100	102.5	105	107.5	110	112.5
S_2 (dB)	100	97.5	95	92.5	90	87.5
S_1-S_2 (dB)	0	5	10	15	20	25

変動様式に関係なく、平均のレベルを用いる方法を提案している。この場合の「平均のレベル」はある基準のレベル S_0 よりも大きいレベルについて時間的な平均をとった値が用いられる。たとえば Fig. 4 の4種の暴露においては、基準のレベル S_0 より大きい部分についての平均のレベルがいずれも等しいので等しいTTSが生じるとしている。ここで S_0 はTTSが生じない最高レベ

Fig. 3 TTS due to ten minutes exposure to white noise of which the level changed every five seconds alternately between S_1 dB and S_2 dB. The value of $\frac{S_1+S_2}{2}$ was held constant at 100 dB. Parameter is test frequencies.

Tab. 4 Analysis of variance for TTS data in the second experiment.

$$F_{0.05}(5, 20) = 2.21$$

Test freq.	Factor	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean squares	Ratio of variance
2kHz	Type of noise	219.5027	5	43.9005	1.2087
	Subjects	215.0447	4	53.7612	
	Error	726.4147	20	36.3207	
3kHz	Type of noise	124.5577	5	24.9115	<1
	Subjects	207.2187	4	51.8047	
	Error	799.8137	20	39.9907	
4kHz	Type of noise	116.7377	5	23.3475	<1
	Subjects	779.0389	4	194.7597	
	Error	1031.2733	20	51.5637	
6kHz	Type of noise	89.6870	5	17.9374	<1
	Subjects	430.2753	4	107.5688	
	Error	1161.0047	20	58.0502	
8kHz	Type of noise	96.7467	5	19.3493	<1
	Subjects	1007.9287	4	251.9822	
	Error	2378.7787	20	118.9389	

ル (S_0 より大きくなればTTSを生じる) である。本研究で行なった実験では変動する騒音のレベルは最小の場合でも 85 dB であり、このレベルではすでにTTSが生じるので、本研究では Ward et al.¹⁾ の結果の適用範囲を検討したことになる。

このような S_0 をとった場合には、断続暴露に対して on fraction rule を用いたTTSの推定値と、平均のレ

ベルを用いる方法による推定値とは理論的に一致する。

したがって平均のレベルを用いる方法の適用範囲について、さらに検討すべき要因は変動の周期である。すなわち、周期Dで二つのレベル S_1 , S_2 を交互にとる騒音に対しては、on fraction rule の場合と同様にDが重要な要因になると推定される。たとえば, Kryter et al.⁵⁾ による CHABA (National Academy of Science—

Fig. 4 Four different types of exposure noise having the same average level. S_0 is the basal level and TTS is produced above this level. S is the average of the levels above S_0 through the exposure.

National Research Council Committee on Hearing, Bioacoustics and Biomechanics) の許容基準における TTS の取扱では、一つのレベルに 2 分以上留まらないような変動騒音に対して、平均のレベルを用いる方法を採用している。また、Ward et al.⁶⁾ のデータにおいても、一つのレベルの持続時間が長い場合には、平均のレベルを用いる方法が適当でないことが示されている。このような場合については今後検討する必要がある。

§ 5 結 論

レベルが変動する騒音の暴露による TTS を検討するため、白色騒音のレベルを 5 秒ごとに变化させて以下の実験を行なった。暴露対象被検人員は 5 名または 7 名である。

1) 暴露音は、レベル変動の分布が平均約 95 dB、標準偏差約 3.60 dB の正規分布で、変動様式がコロログラムにより、a) 無相関、b) 移動平均型、c) 1 次の自己回帰型、d) 2 次の自己回帰型、の 4 種に分類されるものをそれぞれ二通り選んだ。また対照として、95 dB の定常騒音を用いた。暴露時間は 20 分、テスト周波数は 3, 4, 6, 8 kHz である。

2) 二つのレベル S_1 , S_2 を交互にとる変動騒音で、平均のレベルが 100 dB, $S_1 - S_2$ が 0 (定常騒音), 5, 10, 15, 20, 25 dB となる暴露音を用いた。暴露時間は 10 分、テスト周波数は 2, 3, 4, 6, 8 kHz である。

1), 2) のいずれの変動する暴露音についても、TTS は平均のレベルをもつ定常騒音による TTS の値とはほぼ等しく、分散分析の結果に有意な差はみられなかった。5 秒ごとにレベルが変化する騒音に関しては、暴露音のレベルの分布、変動様式に関係なく、平均のレベルをもつ定常騒音による TTS と等しいと推測される。

本研究の概要は第 40 回日本産業医学会において発表した。

文 献

- 1) Ward, W. D., Glorig, A. and Sklar, D. L.: Dependence of Temporary Threshold Shift at 4kc on Intensity and Time. J. A. S. A. 30(10): 944, 1958.
- 2) 山本剛夫, 高木興一: 未発表
- 3) JIS Z 8731-1966 騒音レベル測定方法
- 4) 河田敬義, 丸山文行, 鍋谷清治: 数理統計 IX 装華房 1965.
- 5) Kryter, K. D., Ward, W. D., Miller, J. D. and Eldredge, D. H.: Hazardous Exposure to Intermittent and Steady-State Noise. J. A. S. A. 39(3): 451, 1966.
- 6) Ward, W. D., Glorig, A. and Sklar, D. L.: Temporary Threshold Shift in a Changing Noise Level. J. A. S. A. 32(2): 235, 1960.