騒音難聴の予測に関する実験的研究

その 1. NITTS 成長曲線と NIPTS

東京大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：佐藤靖雄教授）

船坂宗太郎，安部治彦

緒 言

騒音難聴は、産業社会の発展につれ重大な問題となっており、このため音響負荷後の聴器の病態生理や病理については数多くの研究がなされている。一方、騒音難聴はひとたび発症すれば回復はきわめて困難であるため、予防の観点にたった研究の意義は大きい。この一つとして騒音難聴の予測についての研究がある。

周知のように音響負荷後の聴力損失には、聴力損失が一時的であって完全に回復するもの（NITTS）と永久的な聴力損失（NIPTS）とがある。このうちNITTSは ultra-short-term TTS, short-term TTS, ordinary TTS に分けることができ、この 3 者はそれぞれ互に独立した特質をもっているが、ordinary TTS（以下本論文の NITTS はすべて ordinary TTS を指す）は 2 分以上日時の単位まで続く域値変化であって、毛細胞の疲労にもとづく現象と推定されている。このため騒音難聴の予測に関する研究にはよく採り上げられるものである。つまり NITTS を追求し、NIPTS の予測を行なう試みがいくつかなされてきた。

しかし先人達の努力にかかわらず、NITTS と NIPTS との間にはなお明確な関係が発見されておらず、したがって騒音の damage-risk criteria も広く容認されたものはない。この原因として次のものがあげられよう。第 1 は研究方法の制約である。人を対象とする限り、極限状態まで NITTS を追求することはできない。一方 NIPTS は field work に頼らざるを得ないが、この場では NITTS との関連を求めることは困難である。動物実験においては、個体による vulnerability の差のため、同一個体での慢性実験となるが、試行間の差も大きく、再現性、聴力の指標の選択などの問題が生ずる。第 2 は現象の複雑さである。NITTS, NIPTS はともに聴力の低下としてあらわれるが、両者の過程は異なったものである筈である

にもかかわらず、両者を初期から分離してとらえることができない。聴力損失が完全回復したときにこれを NITTS と判断し、永続的に低下した聴力損失値分を NIPTS と表現することができるのみである。また vulnerability の個体差は大きく、しかも NITTS と NIPTS ではこれが異なっている。

著者はこれらの点を考慮し、先人の研究を調べた結果次のように考えた。すなわち、1) NITTS と NIPTS は恐らく複数の因子で関連しあっており、群としては相関をもつが、個体個体では簡明な法則樹立が困難なものである。2) 単に NITTS 値のみばかりでなく、その成長曲線、回復曲線、振動数別差異を検討して、いわば総合的な観点から両者の関連を追求することが必要であろう。3) 実験の性質上動物実験が必要である…である。これにもとづき条件反応猫を用いて研究した。今回は主として NITTS 成長曲線と NIPTS 発生との関係について発表し、御批判を仰ぐ次第である。

実験方法

実験動物として、8 匹の雌成猫を用いた。この実験には 1 耳の聴力測定を行なうことが必要で、そのため右耳に迷路破壊を施行した。なお猫では耳介の音響学的影響を無視できないので、測定耳である左耳の耳介は切除した。

聴力測定は running cage による逃避条件反応によった。これは条件反応としては比較的簡単な性質のもので、猫が神経症に陥いることも少ない。しかも反応は確実に安定しているという利点をもつものである。この 8 匹の猫は、いずれも学習が優秀であり、正常時の聴力測定値の変動は 5 dB 以内であった。また域値はすでに発表されている域値と同じ値であった。

負荷騒音として、図 1 に示す 2 種の帯域騒音を用いた。これらをそれぞれ広帯域騒音、狭帯域騒音と呼ぶことにする。なお図 1 と帯域は同じであるが、強さ

図 1 負荷騒音の分析図

が 10 dB 小さい騒音も用い、8 匹の猫を 4 匹づつ 2 群に分け、1 群には spectrum level 82 dB の騒音、他群には spectrum level 72 dB の騒音を負荷した。負荷に際して、猫は頭部固定器のついた特別の容器に収容され、常に一定の条件での負荷を行なった。なお上記の負荷騒音の音圧は猫の外耳導入口部において測定されたものである。騒音負荷のパラメータは負荷時間で、3.75 分、7.5 分、15 分、30 分…と倍々に増加し、NIPTS 発生を見るまで続けた。

負荷後の聴力測定は 1, 2, 4, 8, 16 kHz において行ない、負荷後 30 分、1 時間、4 時間、8 時間、24 時、2 日、4 日…の聴力を測定し、NITTS の消失まで測定を続けた。また聴力が騒音負荷後 3 カ月を経ても、負荷前の域値に戻らないとき、これを NIPTS とした。NITTS が消失した場合、さらに 24 時～48 時間の休息を猫にあたえ、その後負荷を再開した。このようにして同一の負荷条件を 3 回繰返して行ない、この 3 回の NITTS の平均値をもって、各 NITTS 値とした。なお群の値として各 4 匹の値の中央値を採用した。なお条件反応による聴力測定には、200 msec の持続、12 msec の rise decay をもつ純音パーストが用いられた。域値決定は 5 dB 段階の下降法によるものである。

結 果

1. 負荷騒音と NITTS オーディオグラム

短時間の負荷から NIPTS 発生的一段階前の負荷時間に至るさまざまな持続の騒音と NITTS オーディオグラムとの関係を検討した。この場合 NITTS 値として負荷後 30 分の値を採用した。

spectrum level 72 dB の強さの狭帯域騒音を負荷したときの NITTS オーディオグラム（群の中央値）を図 2 に示した。この図にみられるように聴力損失が NITTS に止まる限り、4 kHz に最大の聴力損失があ

図 2 NITTS オーディオグラム（4 匹の中央値）
NITTS は負荷後 30 分の値である。右肩の
数字は負荷時間を示す。負荷騒音 sp. level
72 dB, 狭帯域。

る。ただし負荷時間が大きくなるにつれて、8 kHz, 16 kHz の聴力損失の割合が大きくなり、いわば V 字形のオーディオグラムから高い振動数に底の広がった逆八型のオーディオグラムとなった。同じく spectrum level 72 dB の広帯域騒音では、短時間負荷では 8 kHz に最大の聴力損失があるが、負荷時間が增大するにつれて 4 kHz, 16 kHz の聴力損失が大きくなり、高音低下型のオーディオグラムの型をとるようになった（図 3）。

図 3 NITTS オーディオグラム（4 匹の中央値）
NITTS は負荷後 30 分の値である。右肩の数字は負荷時間を示す。負荷騒音: sp. level
72 dB, 広帯域。

図 4 NITTS オーディオグラム (4 匹の中央値)
NITTS は負荷後30分の値。右肩の数字は
負荷時間を示す。負荷騒音: sp. level 82dB,
狭帯域。

図 5 NITTS オーディオグラム (4 匹の中央値)
NITTS は負荷後30分の値、右肩の数字は
負荷時間を示す。負荷騒音: sp. level 82dB,
広帯域。

音の強さが 10 dB 増加し、spectrum level 82 dB の狭帯域騒音では、短時間負荷の場合 4 kHz に最大の聴力損失が認められるが、負荷時間が延長するにつれて、16 kHz の聴力損失が大きく加速され、その結果として 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz がほぼ等しく低下したオーディオグラムとなった(図 4)。また広帯域騒音では、短時間負荷の条件からすでに 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz の聴力損失があり、負荷時間の増加につれて 16 kHz の聴力損失は他の振動数に比べて大きく、高音漸傾と

なった(図 5)。

要約すると spectrum level 82 dB という強大声の場合、負荷時間が充分に長ければ本実験で用いた騒音では、帯域の幅に関係なくほぼ同じ型の NITTS オーディオグラムとなった。さらに spectrum level が 72 dB であっても負荷時間が延長するにつれて、16 kHz の聴力低下が著しく、同じ型になる傾向がうかがわれた。以上は注目すべき点であるがただし NIPTS オーディオグラムは、NITTS オーディオグラムの型とは必ずしも一致しない。これは両者の発生機構に差のあることを示すものであるが、これについて述べるためには NITTS の回復曲線を検討する必要がある、冒頭に述べたように今回は記述を省略することにした。

2. NITTS の成長曲線

NITTS の成長曲線とは、騒音負荷時間の増大に伴う NITTS の増加の関係を示すものを呼ぶ。各個体においてこの曲線に多少の差異が認められるが、およそその傾向は一致した。これを図 6 に示す。図 6 は群の中央値にもとづくものであるが、NITTS 成長曲線は負荷時間の対数にはほぼ直線的であることが示された。さらにこの関係は騒音のいわば帯域外の振動数、すなわち広帯域騒音負荷時の 16 kHz, 狭帯域騒音負荷時の 8 kHz, 16 kHz においても認められた。

個々の振動数についてみると、広帯域騒音であっても狭帯域騒音であっても刺激条件が同じとなる振動数、すなわち 1 kHz から 4 kHz までは当然この 2 種の騒音による NITTS 成長曲線はほぼ同じものとなった。そして 1 kHz では短時間負荷時の NITTS 値が小さく、成長曲線の勾配も緩やかであること、2 kHz では短時間負荷時の NITTS 値は小さいが、勾配が大きいこと、4 kHz では spectrum level 82 dB で 3.75 分、72 dB で 7.5 分という本実験での最短負荷時間ですでに 20 dB 以上という大きな NITTS 値を示すが勾配はむしろ 2 kHz より小さいことなどが特徴であった。8 kHz では、広帯域騒音の負荷は 4 kHz とほぼ同じ NITTS 成長曲線を生じたが狭帯域騒音の負荷においては、短時間負荷の小さな NITTS 値 (82 dB 3.75 分で 10 dB, 72 dB, 75 分で 12 dB) で初まり、広帯域騒音よりやや急な成長曲線を示した。このことは 16 kHz においてさらに明瞭に認められ、狭帯域騒音負荷時の NITTS 成長曲線はいわば加速された形となることが示された。

以上をまとめると次のようになる。1 kHz では、NITTS 値が小さく、成長曲線勾配も小さい。2 kHz

図 6 NITTS 成長曲線。負荷騒音: sp. level 10 dB の広および狭帯域。

では短時間負荷の NITTS 値は小さいが、成長曲線勾配は大きい。4, 8, 16 kHz では短時間負荷でも NITTS 値は大きい。なお測定振動数が騒音のいわば帯域外にあるときは、短時間負荷の NITTS は小さいが成長曲線は加速された形を示すなどである。

3. NIPTS の発生。

NIPTS の発生をもたらした騒音負荷条件は、spectrum level 82 dB の群では 30 分負荷が 1 匹、60 分負荷が 1 匹、120 分負荷が 2 匹と個体差が著しい。これに反して spectrum level 72 dB の群ではすべて 120 分負荷で生じており、個体差が小さかった。

さて両群を通じて、NIPTS 発生に際し、個体を超えて共通な現象が認められた。それは NITTS 成長曲線に異常勾配、すなわち勾配の急上昇が生ずることである。NIPTS 発生の負荷条件に著名な差のあった spectrum level 82 dB の群にあっても、各個体で 1 つ以上の振動数に成長曲線勾配の明瞭な急上昇が認められた。うち一匹においては NIPTS を生じた負荷時間の半分の持続の負荷で、すでに 4 kHz, 8 kHz に急上昇をみたが、この猫における NIPTS の値は 1 kHz

が 30 dB, 2 kHz が 50 dB, 4 kHz が 90 dB, 8 kHz が 90 dB 以上、16 kHz が 77 dB 以上と異常に大きく、他の 3 匹とは著しい差異を示した。

NIPTS 発生の騒音負荷条件に個体差の少なかった spectrum level 72 dB の群においては、群としての中央値においても、NITTS 成長曲線の急上昇が NIPTS 発生を意味するものであることが明瞭に示された (図 7)。もちろん個々の猫においては例外なく 1 つ以上の振動数に成長曲線の急上昇を認めた。つまり、NITTS 成長曲線のいわば規則性が破れ、いわば不連続となったときに、NIPTS が発生することが明らかとなった。さらに成長曲線の急上昇の前になんらかの変化が成長曲線にあらわれることもある。たとえば 4 kHz, 8 kHz によくみられることであるが、成長曲線がまず飽和状となり、ついで急上昇を示すことがあり、また 1 kHz や 2 kHz においては、ときに急上昇の前に僅かに加速された状態がみられることもあった。

注目すべきは、成長曲線に変曲点を生じ勾配の急上昇を生じた振動数に NIPTS が発生するとは限らないことであった。たとえば spectrum level 82 dB の

図 7 NITTS 成長曲線と NIPTS 発生, 負荷騒音: sp. level 72 dB の広および狭帯域, 矢印は NIPTS を生じた負荷時間を示す。

群にあっては、1 kHz に明瞭な急上昇を示しながら、その振動数には NIPTS は認められず、16 kHz で勾配の急上昇が認められないにもかかわらず 50 dB という NIPTS が生じた例がみられた。また spectrum level 72 dB の群では総じて成長曲線の急上昇は 1 kHz, 2 kHz という低い振動数にもよくみられ、16 kHz ではむしろ少ないが、NIPTS は 2, 4, 8, 16 kHz に高頻度で発生することが示された。

以上 NIPTS 発生については次のように要約されよう。すなわち、NIPTS 発生時には NITTS 成長曲線の変化が生じ、飽和または加速に続く勾配の急上昇が認められる。また成長曲線に変化を生じた振動数と NIPTS の発生をみた振動数とは必ずしも一致せず、NIPTS との関連で NITTS 成長曲線の急上昇を見るためには、少なくとも低、中、高の振動数全般にわたって NITTS 成長曲線を作る必要がある。

考 按

緒言で述べたように、本論文で扱った NITTS は ordinary TTS と呼ばれ、回復に長い時間を必要とし、毛細胞の疲労にもとづく現象と考えられている。しかしこの種の NITTS はさらに回復過程からみて

2 つに分たれるという。1 は回復曲線が時間の対数に直線的なもので生理的疲労と呼ばれ、負荷後 2 分の NITTS が 30 dB 以内のものである。他はより大きな NITTS 値を示し、回復過程の曲線は時間の対数と直線関係にないもので、Ward¹⁰⁾ はこれを病的疲労と呼んでいる。私達の扱った NITTS はこれを起した騒音の強さからみて、この両者が含まれているはずである。ちなみに猫の場合、1 kHz から 4 kHz にかけては、その域値が人に比べ約 15 dB 低く、音負荷の実験を行なった Miller⁴⁾ も猫においてはヒトと比較するには 18 dB を加える必要があるとしている。したがって私達の実験は spectrum level で 100 dB と 90 dB, over-all の強さで約 140 dB と 130 dB に相当するものと考えてよい。さてこの種の TTS は、それが毛細胞の生理的疲労であれ病的疲労であれ、とにかく毛細胞で起った現象であるので、他の短い持続の TTS と異なり、NIPTS (これは毛細胞の消耗、破壊によると考えられている) となんらかの関連があることが強く推定される。この NITTS の特質の一つに exposure-equivalent rule がある。たとえばある量の NITTS がすでにあったとして、その値がある騒音の 10 分間負荷に等しいものであった場合、さらに 15 分間

負荷したときの値は、最初に NITTS がなかった場合の25分間負荷に等しいという。一方騒音による聴力損失は、Vosteen⁸⁾によると代謝物消耗の蓄積の結果であるという。これが時として毛細胞の破壊を生ずるのであるが、これらの点を考慮すると、ある面ではこの種の NITTS は単に NIPTS のいわば precursor のみでなく、現象的に相似の点があってよい。NITTS オーディオグラムを検討すると、私達に周知の騒音難聴のオーディオグラムと類似点のあるのが興味深い。人の騒音難聴は C_0 dip で初まるが、必ずしも C_0 のみでなく 3~6 kHz に最大聴力損失をもつものも少からずある。今回得た NITTS オーディオグラムでは NITTS は 4~8 kHz の最大値をもって初まり、しかも負荷時間の延長につれて高音域の損失が著明となった。これは驚くべき類似といえる。

しかしながらこのような類似性をもつ NITTS をもってしても、NIPTS の予測は必ずしも成功していない。もともと NITTS にしろ NIPTS にしろ音負荷による聴力損失はきわめて個体差の大きいものである²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。また可逆性である NITTS から非可逆性の NIPTS への移行点も当然個体差の大きいものであろう。したがって、ある時点の NITTS 値のみをもって NIPTS 値を予測することができないのはむしろ当然といえよう。しかし一方騒音難聴発生の過程は、個体差を超えた共通なものがあることもまた確かである。私達は、これに関して Burns¹⁾の研究を想起せざるを得ない。彼は NITTS の相違によって対象者を群別し、群として NITTS 値と NIPTS 値の相関を検討した。その結果個人々人ではきわめて低かった相関が、群の平均値で処理すると高くなることが示され、しかも 1 kHz, 2 kHz の NITTS 値と、3, 4, 6 kHz の NIPTS 値とがもっとも大きな相関をもつことが明らかとなった。このことは私達の推定を裏付けるものである。とすれば個体において、個体差を超えた特質の検討を可能とすれば NIPTS の発生を予測、あるいは少なくとも発生初期に確言できる可能性がある。私達は共通の特質の一つとして、NITTS 成長曲線を選んだ。これは負荷時間と対応して直線的に増大する性質があり、試行ごとの差は同一条件を繰返すことによって克服できる。そして NITTS と NIPTS とは発生機構が異なるため、NITTS 値に NIPTS 値が重なれば、おそらく成長曲線上ならぬかの不規則性が出現する筈である。また Burns の研究を参照すれば少なくとも 4~5 の振動数において測定すべきであろう。

以上のように考え実験した結果が結果の 2) および 3) となった。すなわち NITTS の値は騒音の振動数上限域において大きい。また成長曲線勾配も高音域で大であるが、ときとして飽和を示すこともある。この飽和現象は、NITTS の限界を示すものと推定される。また 1, 2 kHz ではときとして加速された形をとることがある。16 kHz での加速と異なり、これも NITTS の一つの異常機構を示すものであるとすれば、一つの危険信号と考えられる。さてこれらに続いて、成長曲線の急上昇が認められたときは、例外なく NITTS が発生した。単純に考えれば、急上昇はある過程から別の過程への変換が生じた結果、つまり NITTS に NIPTS が重畳した結果と解釈できよう。しかし、成長曲線勾配に急上昇が生じた振動数に必ずしも NIPTS が発生するものではない事実がある。この点は Burns の 1, 2 kHz の NITTS が、3, 4, 6 kHz の NIPTS ともっとも相関が高かったという点と同様に解釈に苦しみ点である。私達はこの点の解明のため、現在回復曲線を検討中である。

ともあれ、試行差を少なくするため、同一条件下での測定を何回か繰返して行ない、その結果にもとづいて NITTS 成長曲線を求め、その曲線の飽和しないしは低音域での加速現象は危険信号であり、急上昇勾配は NIPTS 発生を示すものであることが明らかとなった。これは騒音難聴予測に対し一つの可能性をもつ方法といえよう。

結 語

騒音難聴の予測に関する研究のため騒音を負荷したのちの聴力損失を、1 時的な聴力損失から永久的な聴力損失まで系統的に追求した。すなわち spectrum level 82 dB および 72 dB の広帯域、狭帯域騒音を条件反応猫に負荷して聴力測定を行ない、負荷時間を増大したときどのように聴力損失が変化するかを検討した。

その結果次のような結論を得た。

1) 1 時的な聴力損失は、騒音帯域の上限付近でもっとも大きく、負荷時間の延長につれて、高音域の損失値が大きくなった。したがってオーディオグラムはヒトの騒音難聴の進行のそれと似た形を示した。

2) 騒音負荷時間の増大と聴力損失値との関係—いわゆる一時的聴力損失の成長曲線—を各振動数について追求した。dB 表示の聴力損失は負荷時間の対数に直線関係を示した。1 kHz では短時間負荷時の損失値

が小さく、成長曲線の勾配も小さい。2 kHz では短時間負荷時の値は小さいが、勾配は大きくなる。4, 8, 16 kHz では短時間負荷時での聴力損失が大きい。ある負荷時間以上になると、1 kHz, 2 kHz では多少加速された曲線となり、1 kHz, 2 kHz では飽和状を示す曲線となった。

3) 永久的聴力損失を示す場合には成長曲線勾配の急上昇がみられる。しかしこの現象を生じた振動数に永久的聴力損失が起るとは限らない。

4) 以上について考察を加えた結果、成長曲線を4~5の振動数について求めることは、騒音難聴の予測への可能性をもつ一つの方法であると結論された。

稿を終わるにあたり、本実験にたえず激励、助言をいただいた Wayne State University, D. N. Elliott 教授に心からの謝意を捧げる。また御校閲をいただいた佐藤靖雄教授に厚く御礼申し上げる。

本論文の要旨は、1975年第20回日本オーディオロジー学会総会で発表した。

An Experimental Study on NITTS Growth Curve and NIPTS Occurrence

S. Funasaka and H. Abe

Dpt. of Otolaryngology, Branch Hospital,
University of Tokyo

Prevention of noise induced hearing damage is assuming great importance and this study was performed to uncover the relations between NITTS and NIPTS.

NITTSs were examined after exposing cats to wide and narrow bands of noise for increasing durations. NITTS audiogram showed that hearing loss was greatest at the highest frequency of bands of noise at the shorter exposure, however, there was a progressive high frequency loss at the longer exposure.

The growth curves of NITTSs were almost linear with logarithmic exposure time. However, the curves at 16 kHz showed an accelerated rate for the narrow band noise. The growth rate was smaller at 1 kHz than the ones at 2, 4, 8, and 16 kHz.

On the occurrence of NIPTS, the NITTS curve had a distinct acceleration at growth rate following a saturation or a slight acceleration. Curiously enough, NIPTS did not necessarily appear at the frequencies of the distinct acceleration.

参考文献

- 1) Burns, W.: The relation of temporary to permanent threshold in individuals, in occupational hearing loss. (ed. D. W. Robinson.) Acad. Press, London, p. 63, 1971.
- 2) Davis, H. et al.: Temporary deafness following exposure to loud tones and noise. Acta Otolaryngol. Suppl., 88; 57 pp., 1950.
- 3) 船坂宗太郎: 騒音負荷による域値の推移に関する実験的研究. Audiology Japan, 12: 473—477, 1969.
- 4) Miller, J. D. et al.: Deafening effects of noise on the cat. Acta Otolaryngol. Suppl., 176; 91 pp., 1963.
- 5) Peters, E. N.: Temporary shifts in auditory threshold of Chinchilla after exposure to noise. J. Acoust. Soc. Amer., 37; 831—833, 1965.
- 6) Riach, W. D. et al.: Effect of repeated exposure to high intensity sound. J. Acoust. Soc. Amer., 36; 1195—1198, 1964.
- 7) Schuknecht, H. F. and Tonndorf, J.: Acoustic trauma of the cochlea from ear surgery. Laryngoscope, 70; 479—505, 1960.
- 8) Vosteen, K. H.: Die Ershöpfung der Phono-receptoren nach funktioneller Belastung. Arch. Ohren. Heilk. Z. Halsheilk., 172; 489—512, 1958.
- 9) Ward, W. D.: Temporary threshold shift and damage risk criteria for intermittent noise exposures. J. Acoust. Soc. Amer., 48; 561—574, 1970.
- 10) Ward, W. D.: Adaptation and fatigue. in Modern Developments in Audiology. (ed. J. Jerger) Second Edition, Acad. Press, New York, p. 301, 1973.

(受付 50, 12, 30)