レベル変化音に対する聴覚パーシュート・トラッキング*

中村 敏枝**

This paper describes two experiments concerned with an auditory pursuit tracking. The stimuli are level-changing white noises. They consist of 60 and 61 constituent noises presented continuously, whose sound pressure levels are 42, 50, 58, 66, 74, 82 and 90 dB. Exp. I had 4 stimulus-pattern conditions which differed from each other in the sequence and timing of appearances of 7 levels. One of these 4 conditions was used in Exp. II. Subject was instructed to push the button as quickly and correctly as possible, corresponding to the direction of intensity change of the stimulus. A response box was used with 7 buttons in a line in Exp. I, while in Exp. II with 9 including unused end buttons in order to remove the response cues at both ends. Reaction time (RT) was measured for the constituent noises. The results represent the relation between stimulus pattern and tracking difficulty. That is, mean RT is shortest when both direction and timing of intensity change of the stimulus are regular, and is longest when both are irregular. Also it means that the RT undergoes a systematic decrease with a corresponding increase in predictability the constituent noise has. This fact, especially the effect of predictability derived from the response cue, was confirmed in Exp. II.

聴覚パーシュート・トラッキングに関する実験を行った。刺激は60あるいは61個の構成音からなるレベル変化する白色雑音であり、被験者の課題はレベル変化方向に対応して反応ボタンをできるだけ速く正確に押すことであった。反応時間を指標として結果を分析すると、刺激パターンとトラッキング速度の間の関係が明らかになった。すなわち、反応時間は刺激のレベル変化の方向、タイミングともに規則的である場合に最も速く、両者がともに不規則な場合に最も遅かった。これは、各構成音のもつ予測可能性によって反応時間が規定されることを意味する。この事実、特に反応手がかりに由来する予測可能性の効果については、さらに実験Ⅱにおいて確認した。

1. はじめに

生活体を取り巻く環境は、定常的な状態であることはまれで、たえず変化しており、われわれにとって有効な情報であるのは、刺激の単なる存在よりもむしろ刺激の

変化である。視覚、聴覚、その他すべての感覚についていえるが、特に聴覚の場合、刺激の変化が重要である。音声、音楽、騒音などすべて、時間軸に沿った刺激の細かい変化と、それに対する時々刻々の知覚の追跡があって初めて意味のある情報となる。また、われわれの環境は、特殊な場合は別として、全くの無音状態であることはなく、常に、ある程度のレベルの音が存在する。この暗騒音と呼ばれる音は、われわれの行動決定にとってなら特別な情報を与えず、その存在にすら気づかないことが多い。レベルの上昇、下降、あるいは、周波数の増

* 昭和54年12月23日受付

** 大阪大学 教養部心理学教室
Dept. of Psychology, College of General Education,
Osaka Univ.

図1 カテゴリー連続判断法による実験結果の一例。
太線は刺激のレベル変動，細線は被験者の反応を表す（難波，桑野，中村，1978より引用）

Fig.1 The example of the record of the stimulus level (thick line) and the subject's response (thine line) using the method of continuous judgment by category. Considering the time lag between the stimulus and the response (0.5 to 2 sec), good correlation can be seen between them (From Namba, Kuwano & Nakamura, 1978).

大，減少など，なんらかの変化が加わったとき，その変化事態に適応すべく必要な行動がとられるのである。もし，その変化が危険を意味するものであれば，迅速に対応して適切な行動を取り，危険を避けねばならない。また，自動車のエンジン音の大きさの変化の程度に応じて，アクセルの踏み具合を変化させるというように，刺激の変化に応じた追跡行動も必要である。

このように，聴覚刺激の変化への対応，すなわち，聴覚トラッキングは，日常行動とも密接に関連した重要な問題であるにもかかわらず，これに関するデータはきわめて少ない。視覚トラッキングの研究は盛んであるが，聴覚トラッキングの研究報告はごく少数である¹⁻⁶⁾。周知のごとく，トラッキングには，目標量にできるだけ合わせるように操作部を動かすパーシュート・トラッキング (pursuit tracking) と，目標量と操作量の差である偏差量が与えられて，それを減少させるように動作するコンペンセートリ・トラッキング (compensatory tracking) の2種類がある。しかるに，音の大きさのパーシュート・トラッキングに関する研究論文は筆者の知る範囲内では皆無である。

筆者らは以前に，一般に行われているものとは異なるが，一種のパーシュート・トラッキングともいえる実験を行った⁷⁻⁹⁾。それは，時間とともにレベル変動する聴覚刺激の心理量を測定するために，カテゴリー連続判断法を用いて行った実験である。この方法によって，音楽や騒音などレベル変動音の時々刻々の大きさ (loudness)，

図2 実験Iで用いた刺激パターン例

Fig.2 The example of stimulus patterns used in Exp. I. This experiment has 4 conditions which differ from each other in the direction and timing of intensity change of the stimulus.

あるいは，騒々しさ (noisiness) の変化をとらえることを実証してきた。

図1に以前に行った実験の一例を示す。これは，被験者が自動車走行音を聞いて，時々刻々変化する騒々しさの印象を，7個のカテゴリーボタン（①非常に静かな，②静かな，③やや静かな，④どちらでもない，⑤やや騒々しい，⑥騒々しい，⑦非常に騒々しい）を押すことによって追跡したものである。刺激のレベル変化によく追跡した反応がみられる。ただし，この反応は，物理量の変化に対する単なる検知反応ではなく，検知に伴う印象の変化を範疇判断する過程が含まれているという点で，従来のトラッキング実験のデータとは意味が異なる。

そこで，本論文では，検知反応としての聴覚パーシュート・トラッキングの性質を調べることを試みた¹⁰⁾。ここでは，カテゴリー連続判断法との関連において実験を計画したことと，聴覚刺激のもつ特殊性のために一般に視覚トラッキング実験で行われるような実験手続きやデータの処理法をとっていないが，数少ない聴覚トラッキングの実験の一例として報告する。

2. 実験 I

2-1. 目的

階段状でレベル変化する音に対するトラッキングを調べる。刺激のレベル変化パターンとレベル変化速度を変数とする。

2-2. 方 法

1. 刺 激

白色雑音で人工的に作成したレベル変化音を用いた。刺激は、音圧レベルが42, 50, 58, 66, 74, 82, 90 dBの7種類の構成音、計61個（条件1, 2）、あるいは60個（条件3, 4）の構成音からなる。刺激のレベル変化パターンの条件は4種類とした。各条件の刺激パターンの例を図2に示す。条件1では、レベル変化の方向は規則的で、構成音の持続時間は一定である。すなわち、表1に示すように、条件1-aは各構成音の持続時間が2,000 msecであるから、0.5回/secの速度でレベル変化しながら122秒間連続する刺激パターンである。レベル変化の速度を順次高め、4回/secの条件1-dまではトラッキング可能であったが、8回/secの条件1-eはトラッキングを完遂できなかった。表1の〔 〕付の条件はすべて同じ事情である。条件2では、レベル変化の方向は規則的であるが、構成音の持続時間は一定でなく、4種類をランダムにした。例えば、条件2-aは、3,000, 2,400, 1,800, 1,500 msecの4種類の持続時間がランダムに出現し、レベル変化の平均速度は0.46回/secで、134秒間連続する刺激パターンである。条件3では、構成音の持続時間は一定であるが、レベル変化の方向が不規則で、7種類の音圧レベルの構成音がランダムに出現

する。条件4では、持続時間、レベル変化の方向ともに不規則である。

2. 装 置

実験に用いた装置のブロック・ダイアグラムを図3に示す。白色雑音発生器（Brüel & Kjær, 1405）で発生した音のレベルならびに時間を音刺激制御装置¹¹⁾によってコントロールし、増幅器（SONY 1120 F）を経て、防音室内の被験者の右耳にヘッドホン（Telephonics TDH 49）で呈示した。被験者の反応時点（Tr）と、刺激変化の時点（Ts）は、レベルレコーダ（Brüel & Kjær, 2305）で、同一記録紙上に記され、この記録から Tr と Ts の差を読み取って、反応時間（reaction time：以下 RT と略す）を測定した。

3. 手 続

被験者は刺激のレベル変化に対して、できるだけ速く、正確に手もとの反応盤のボタンを押して反応する。反応盤には7種類の構成音に合わせて、7個の押しボタンが横一列に並んでいる。常時、7本の指（原則として、左3指、右4指）を各ボタンの上に軽く乗せておく。刺激呈示前に、開始音に対する押しボタンを指示しておき、その後、レベルが上昇した場合は右隣りのボタン、下降の場合は左隣りのボタンを押すよう教示した。1回目の試行は練習とし、その後、刺激の最後まで誤りなく追跡できた試行をもって、その条件のデータとした。た

表 1 実験 I の条件

Tab.1 Condition of Exp. I.

Condition	Pattern of level change	Durations of constituent noises (msec)	Rate of change (times/sec)
1- a	regular	constant (2,000)	0.50
b	regular	constant (1,000)	1.00
c	regular	constant (500)	2.00
d	regular	constant (250)	4.00
[e]†	regular	constant (125)	8.00
2- a	regular	variable (3,000, 2,400, 1,800 and 1,500)	0.46
b	regular	variable (2,000, 1,600, 1,200 and 1,000)	0.69
c	regular	variable (1,000, 800, 600 and 500)	1.38
[d]†	regular	variable (500, 400, 300 and 250)	2.76
3- a	irregular	constant (2,000)	0.50
b	irregular	constant (1,000)	1.00
[c]†	irregular	constant (500)	2.00
4- a	irregular	variable (3,000, 2,400, 1,800 and 1,500)	0.46
b	irregular	variable (2,000, 1,600, 1,200 and 1,000)	0.69
[c]†	irregular	variable (1,000, 800, 600 and 500)	1.38

† Any subject could not perform completely the tracking task under this condition of [].

図 3 実験 I で用いた装置のブロック図

Fig.3 Block diagram for Exp. I. Subject was instructed to push the button as quickly and correctly as possible, corresponding to the direction of intensity change of the stimulus. A small box with 7 buttons was used for response. Reaction time (RT) for the constituent noises was measured.

だし、本試行 4 回で成功しない場合は、トラッキング不能としてその条件の実験を打ち切った。記憶による影響を避けるため、ランダム・パターンは 3 種類用意し、同一のパターンを続けて呈示しないようにした。

4. 被験者

聴力に異常のない 20~30 歳代の男性 2 名と女性 4 名。

2-3. 結果と考察

レベル変化に対する RT をトラッキングの測度とし、各条件における全被験者の RT (約 360 回) の平均値を算出した。明白な尚早反応、すなわち、負の RT はデータから除外した。図 4 は横軸に刺激変化速度、縦軸に RT をとって、各条件別に結果を示したものである。レベル変化の方向も時間も規則的で、予測可能である条件 1 の場合に RT は最も短い。レベル変化が時間的に不規則な条件 2、レベル変化の方向が不規則な条件 3、レベル変化の方向、時間ともに不規則な条件 4 と、変化の予測可能性の低下に伴って RT は長くなっている。

さらに、レベル変化の予測可能性が同じなら、すなわち、条件 1~4 の各々において、変化速度が大であるほど RT は短い。これは一種の文脈効果¹²⁾と考えられる。条件 1 の場合は、レベル変化速度に伴う RT の減少が著しい。この条件は、きわめて規則的な変化パターンであるため、刺激変化に対して反応するというよりもむしろ、刺激の変化速度に応じた一定リズムで指を動かしている可能性がある。音刺激に対する単純反応時間—例えば、筆者らの実験結果¹³⁾では、速くとも 170msec—に比べ、条件 1 の RT が極端に短いことは、上記の事実を示唆している。特に、変化速度の速い場合は、刺激に対するトラッキングというよりも、単なる運指反応となる傾向のあったことが、被験者の内観報告からもうかがえた。条件 1-d において、RT が長くなる方向に逆転しているのは運指速度の限界を示唆するものであろう。事実、運指速度を測定した筆者の別の実験¹⁴⁾によると、本実験のような 7 指連続使用の場合の運指の限界は約 4 回/sec であった。

以上のように刺激の変化速度による影響がみられたので、変化速度のほぼ等しい条件 1-a, 2-a, 3-a, 4-a の結果に基づいて、条件差をみようとしたのが図 5 である。レベルが増大する上昇変化の場合と、減少する下降変化の場合とでは RT が異なることを以前の実験¹³⁾で見出しているので、図 5 は上昇、下降別に各構成音に対する RT をプロットしている。

グラフの示すパターンは、刺激のレベル変化の方向が規則的であるか否かで決定されている。すなわち、レベル変化の方向が規則的な条件 1 と 2、不規則な条件 3 と 4 は、それぞれよく似たパターンを呈している。これは、同一条件内でも、各構成音のもつ情報は異なるためである。条件 1 と 2 では、上昇 50dB と下降 82dB でレベル変化の方向が変わり、運指方向が逆転するために RT が長くなったと考えられる。条件 3 と 4 では、レベル変化の方向が不規則であるが、上昇 50dB と下降 82dB のみは変化の方向が 1 つしかなく予測可能である。したがって、RT は著しく減少している。ただ、下降 42dB における RT の減少は原因を見出せない。

条件 1 と 2 で上昇 50→90dB において RT が著しく減少している。前記の運指実験¹⁴⁾においても同様の傾向がみられるので、刺激条件によるというよりも、指の運動特性を反映したものと考えられる。

なお、一般にいわれている刺激強度と RT との間の規則的な関係は、本実験ではみられない。レベル変化ステップが一定であることに起因するのかもしれない。これに関しては刺激の弁別性と RT との関係について別に検討中である¹³⁾。

ところで、条件 3 と 4 において上昇 50dB, 下降 82dB の RT 減少の原因と考えられる予測可能性は、知覚上の手がかりというよりもむしろ反応上の手がかりによるものと思われる。すなわち、刺激系列の両端の刺激であると認知される結果、次の変化方向が予測可能となるというよりも、反応盤の形状によるものであろう。反応盤には 7 つの押しボタンが横に一列に並んでおり、両端にすれば次の反応は二者択一でなくなるために RT が短くな

図 4 実験 I の結果

Fig. 4 Mean RT of 6 subjects in Exp. I. The curves indicate that the more regularly and rapidly the stimulus changes, the shorter RT is, with the exception of Cond. 1-d.

る。もしそうならば、この反応上の手がかりをなくせば上昇 50dB, 下降 82dB における RT の著しい減少はみられなくなるであろう。この点を検討するために次の実験を行った。

3. 実験 II

3-1. 目的

実験 I の条件 3, 4 でみられた RT の著しい減少が反応上の手がかりによるものであるか否かを調べる。なお、精度を上げるためにマイクロ・コンピュータを用いて実験した。

3-2. 方法

1. 刺激

実験 I 条件 3-a と同じ刺激を用いた。すなわち、刺激はランダムに出現する 7 種類の音圧レベルの構成音 60 個からなる。各構成音の持続時間は 2,000msec である。

2. 装置

実験 I の装置で作成した刺激をいったん磁気テープに録音して音源とした。録音、再生に用いたテープデッキは Technics RS 1500U である。RT の測定、記録ならびに誤反応のチェックはマイクロ・コンピュータ (パナファコム LKIT 16) を用いて行った。磁気テープなら

図 5 実験 I の各構成音に対する RT

Fig. 5 Mean RT in Exp. I as a function of the constituent noises of the stimulus. The curves present similar patterns in both Cond. 1 and 2 where the direction of intensity change is regular, and in both Cond. 3 and 4 where it is irregular. In Cond. 1, subjects could predict the direction and timing of intensity change of the stimulus. This predictability could lead to rhythmic responses, resulting in extremely short RT compared with the RT in the previous data for an auditory stimulus. In Cond. 1 and 2, RT increases at increase-50 dB and decrease-82 dB, caused by a reversal of the direction of intensity change of the stimulus. In Cond. 3 and 4, remarkable reduction of RT for increase-50 dB and decrease-82 dB is found, probably because subjects can predict the button to push.

びに反応盤からの信号による割り込みで、それぞれ刺激の変化時点と被験者の反応時点をマイクロ・コンピュータ内蔵のタイマで計測し、RT を算出して順次記憶させた。構成音と反応ボタンが一致しない誤反応あるいは尚早反応の生じた場合は直ちに検出、表示し、試行を打ち切った。こうして、最後まで正しくトラッキングできた試行をもってデータとした (いずれの被験者も 4 回以上やり直し試行をすることはなかった)。このように、マイクロ・コンピュータを用いることによって、RT を自動的に測定、記録することができ、実験の精度と能率は

図 6 実験Ⅱの結果

Fig.6 Mean RT of 4 subjects in Exp. II. The curve of Cond. 1 shows the same pattern as that of Exp. I (Cond. 3). This pattern shows the reduction of RT for increase-50 dB and decrease-82 dB. However this reduction is not seen in Cond. 2. The RT only for them differs significantly in Cond. 1 and 2. In Cond. 2 the response box was used with 9 buttons including unused end buttons in order to remove the response cue at both ends. As a result, subject's response to increase-50 dB and decrease-82 dB took more time with two alternative buttons (Cond. 2) than with one button (Cond. 1).

著しく向上した。

3. 手 続

被験者は防音室内に座り、ヘッドホン（東芝 TR-33）で刺激音を聞き、実験Ⅰと同様にしてトラッキングを行った。ただし、反応に用いる指の種類による影響を除くために、本実験では、人差指のみを用いることにし、反応キーを押したあとは、その上に軽く乗せておいて次の反応に備えることにした。反応の条件は2種類で、条件1では実験Ⅰの場合と同様、反応キーは7個であるが、条件2では9個とした。構成音の種類は7個であるから、実際には用いることのないキーを両端に1つずつ置いたわけである。こうすることによって、条件2は予測可能性に結びつく反応上の手がかりが除去された。

4. 被験者

聴力に異常のない20～30歳代の男性1名と女性3名。そのうち2名は実験Ⅰの被験者である。

3-3. 結果と考察

全被験者の各条件2回ずつのデータ（総数 960）に基づいて結果を整理すると図6のようになる。各プロットは全被験者の平均値を示す。条件1の結果（図6●印）

は、同じ条件である実験Ⅰ条件3-aの結果（図5△印）と比較すると、被験者や手続きなどに若干の相違があるためか、RTの値そのものは異なるが、問題となっている上昇50dBと下降82dBにおける特徴は全く同様である。レベル変化方向の予測が可能なこれらの音に対するRTはやはり著しく減少している。

他方、条件2ではこの傾向はみられない。他の構成音に対するRTは条件1と2の間に有意差がないのに、上昇50dBと下降82dBにおいてのみ、両条件間に有意差がみられる（t検定、 $p < 0.01$ ）。条件2においては、用意された反応キーが、実際には両端まで使用されないため、上昇50dB、下降82dBに対しても他の場合と同様に二者択一の反応となるという点においてのみ条件1と異なるのである。したがって、条件1ならびに前実験においてみられた上昇50dB下降82dBの著しいRT減少は、反応キーを両端まで使用することによって生じる予測可能性に起因するものであり、仮説どおり、正しく反応上の問題であると結論できよう。

4. まとめ

階段状にレベル変化する音に対するトラッキングを、変化への応答速度（RT）を測度として調べたところ、刺激の変化条件とトラッキングの間に規則的な関係のあることがわかった。レベル変化の方向も時間も規則的であるときトラッキングは最も速く、方向が規則的で時間が不規則な条件、方向も時間も不規則な条件の順で、しだいにトラッキング速度は遅くなった。レベル変化の空間的、時間的な予測可能性が大きいほどトラッキングが速くなると考えられる。

また、反応盤の形態もトラッキングに大きな影響を及ぼした。すなわち、レベル変化の方向が規則的な条件においては、変化方向が逆転するところでRTが著しく長くなった。反応盤の形態上、運指方向が逆転したためと考えられる。レベル変化方向が不規則な条件においては、両端の刺激の次ということで、予測が100%可能になる構成音の場合、他の構成音に対するRTに比べて著しく短いRTを示した。この場合の予測可能性は、知覚上というよりもむしろ反応上の手がかりに由来するものであることが実験結果から確認された。

上記のように、刺激のもつ予測可能性によってRTが規則的に変化すると思われるので、Hyman¹⁵⁾にならって、刺激の情報量（bit）とRTの関係をみたところ、高い相関係数（ $r = .944$ ）が得られた。情報量の観点か

らこの問題を検討することの必要性を示唆するものであるが、そのための系統的な実験を行ったうえで改めて詳述したい。

運指の問題、刺激の変化速度の増大に伴ってトラッキングも速くなる文脈効果、上昇変化よりも下降変化の場合のほうが概してRTが長くなることなど興味ある事実が示され、詳細に検討すべき問題が提供された。また、本研究ではトラッキングの速度のみ測定し、誤反応はデータとして取り上げなかったが、これの検討も必要であろう。以上、今後の課題として残された問題である。

終わりに、本研究の遂行にあたり、多くの有益な御助言と御援助をいただいた大阪大学難波精一郎教授、御協力いただいた大阪大学桑野園子助手、実験に御参加いただいた追手門学院大学加藤徹助教授、浜松医科大学宮岡徹枝官に深く感謝致します。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金の助成のもとになされたものである。

参考文献

- 1) T. E. Wempe and D. L. Baty : Human information processing rates during certain multiaxis tracking tasks with a concurrent auditory task. IEEE Transactions on Man-Machine System, MMS-9(4), 129~138, 1968.
- 2) P. B. Mirchandani : An auditory display in a dual-axis tracking task. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-2(3), 375~380, 1972.
- 3) E. W. Vinie and E. T. Pitkin : Human operator dynamics for aural compensatory tracking. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-2(4), 504~512, 1972.
- 4) 甲斐孝一：聴覚トラッキングにおける情報の与え方に関する研究(1), 日本心理学会大会論文集, 329~330, 1976.
- 5) 江間徹郎：聴覚表示による人間の手動制御特性について, 人間工学, 14(1), 39~47, 1978.
- 6) M. Takashima, S. Yoshizawa and J. Nagumo : Human operator dynamics in manual tracking systems with auditory input. Biological Cybernetics, 37, 159~166, 1980.
- 7) 難波精一郎, 中村敏枝, 桑野園子：ピアノ演奏音の解釈一大きさを手がかりとして一, 大阪大学教養部研究集録, 25, 25~43, 1977.
- 8) 難波精一郎, 桑野園子, 中村敏枝：カテゴリー連続判断法による自動車交通騒音の評価, 日本音響学会誌, 34, 29~34, 1978.
- 9) 中村敏枝, 難波精一郎, 桑野園子：カテゴリー連続判断法における判断の法則性について, 心理学研究, 49, 152~158, 1978.
- 10) 中村敏枝, 桑野園子, 難波精一郎：聴覚トラッキングについて, 日本人間工学会第19回大会, 1978.
- 11) 難波精一郎, 中村敏枝, 安田園子：音刺激制御装置の試作, 心理学研究, 43, 307~311, 1973.
- 12) 柿崎祐一：知覚判断, 培風館, 1974.
- 13) 中村敏枝, 桑野園子：反応時間における音圧レベルの変化の効果, 日本心理学会第41回大会発表論文集, 194~195, 1977.
- 14) 中村敏枝：運指方向並びに指の種類と運指速度の関係, 日本人間工学会関西支部大会, 1979.
- 15) R. Hyman : Stimulus information as a determinant of reaction time. Journal of Experimental Psychology, 45(3), 188~196, 1953.