OUKA
Osaka University Knowledge Archive

Title	振幅変調音に対する聴覚情報処理 : 変調周波数ならびに変動パターンの影響
Author(s)	倉片, 憲治
Citation	大阪大学, 1994, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3094109
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

振幅変調音に対する聴覚情報処理

― 変調周波数ならびに変動パターンの影響 ―

倉片 憲治

目次

第１章　はじめに
1. 音の時間的変動　1
　1.1 時間的変動と情報の伝達　1
　1.2 現実の環境音に見られる変動　1
2. 聴覚情景分析　－ 生態学的観点の導入 －　11
　2.1 聴覚の役割　11
　2.2 聴覚情景分析の必要性　12
　2.3 聴覚情景分析に用いられる音響的手がかり　17
　2.4 聴覚情景分析における変動の役割　18
　2.5 聴覚におけるパターン知覚　19
3. 聴覚の時間的側面に関するこれまでの研究　23
4. 本論文の目的　25

第２章　規則的な変動音の知覚　－変調周波数の影響－
1. 本章の目的　27
2. 実験１　－ 広帯域雑音中でのＡＭ音の検知閾 －　28
　2.1 目的　28
　2.2 方法　28
　2.3 結果と考察　35
　　2.3.1 聴覚フィルタとマスキング　35
　　2.3.2 変調周波数と検知閾　37
　　2.3.3 変調度と検知閾　42
3. 実験２　－ ＡＭ音を重畳させた広帯域雑音の大きさ －　45
　3.1 目的　45
　3.2 方法　45
　3.3 結果と考察　49
　　3.3.1 被験者の判断の信頼性　49
　　3.3.2 音の大きさの比較　49
　　音の大きさのレベルについて　49
　　音の大きさのレベルの算出　51

*LLz*とPSEの比較 51
変調周波数と音の大きさ 54
レベル変動音に対するZwickerの方法の適用可能性 61
4. 全体的考察 63
変調音の知覚に及ぼす変調周波数の影響 63
変調音の知覚の研究例 64
1 ～ 4 Hz付近のレベル変動と音声知覚の関係 74
“変調検出器”の存在の可能性 76

第 3 章　不規則的な変動音の知覚　－ 変動パターンの影響 －
1. 本章の目的 80
2. 実験 3　－ レベル変動の検知閾 － 82
2.1 目的 82
2.2 方法 82
2.3 結果と考察 87
変動の不規則性の効果 87
3. 実験 4　－ 変動の不規則性が変動感に及ぼす影響
（特異的な強い音が混じった場合） － 90
3.1 目的 90
3.2 方法 90
3.3 結果と考察 94
3.3.1 被験者の判断の信頼性 94
3.3.2 変動の不規則性の効果 96
3.3.3 規則的変動条件における変動パターンの影響 96
4. 実験 5　－ 変動の不規則性が変動感に及ぼす影響
（全体的なレベル変動を伴う場合） － 100
4.1 目的 100
4.2 方法 100
4.3 結果と考察 104
4.3.1 被験者の判断の信頼性 104
4.3.2 変動の不規則性の効果 106
4.3.3 規則的変動条件における変動パターンの影響 106
5.全体的考察 110

5.1 音刺激系列における変動パターンの知覚 110
5.2 規則的変動における変動パターンの知覚 114
5.3 環境音評価などへの応用 118

第4章　音楽場面における変動音の知覚
1. 本章の目的 119
2. 実験6　－ 熟練したアマチュアピアノ演奏家の演奏分析 － 121
2.1 目的 121
2.2 方法 121
2.3 結果と考察 123
2.3.1 演奏音の強さの分析 123
2.3.2 他の曲での分析例 125
2.3.3 プロのピアニストの演奏分析 128
3. 実験7　－ 「音の強さが揃った」印象の判断 － 132
3.1 目的 132
3.2 方法 132
3.3 結果と考察 135
4. 実験8　－ 音楽的判断との関係 － 138
4.1 目的 138
4.2 方法 138
4.3 結果と考察 141
4.3.1 「上手さ」の判断 141
4.3.2 「好ましさ」の判断 143
5. 全体的考察 150
5.1 変動感と演奏評価 150
5.2 変動パターンの知覚と演奏評価 150
5.3 周波数変動と変動感 151

第5章　まとめと今後の展望
1. まとめ 153
2. 今後の展望 158

謝辞 160

引用文献 161
SUMMARY 168

第１章
はじめに

１.音の時間的変動

１.１ 時間的変動と情報の伝達

これまでの聴覚心理学の研究で用いられてきた音刺激には，強さ・周波数・位相などに時間的変動を伴わない「定常的」な音が多かった．しかし，日常我々が接する音の大半は，それらが時間的に変動する「非定常音」である(難波，１９８４)．

このことは，単に物理学的に見て変化があるという，刺激の特性の記述にとどまらず，心理学的に見ても重要な意味を含んでいる．なぜならば，特に音楽や音声では，その定常的な部分よりも，むしろ時間的変化そのものが情報を伝達している(Ｍｏｏｒｅ，１９８９)と考えられるからである．実際，ひとが音の物理的変化そのものに着目して聞くことはむしろまれで，音のパターンが担っている情報，例えば言葉の意味，音源(もの音)の種類・状態，音楽の流れを一般に認知していると考えられる(Ｇａｒｎｅｒ，１９７４)．

そこで，さまざまな変動音に囲まれ，その中で生活をしている我々にとって，音の変動を知覚し，そこに含まれる情報を処理することは，重要な課題の一つである．

１.２ 現実の環境音に見られる変動

ここで，変動音の個々の問題に入る前に，現実の環境音に見られる変動の例を挙げ，本論文で対象とする音の変動について整理しておく．また，それによって，我々が日常いかに多くの変動音に接しているかが分かるであろう．

音は，物理学的・数学的には，振幅，周波数，位相の３つの次元で記述することができる．したがって，音の変動は，

これら3つの次元上の時間的変化で考えることができる.

ただし，聴感上，位相の変化による効果は非常に小さい.位相は特に音色に影響を及ぼすことが知られているが(宮坂，1984)，ここでは振幅と周波数の変動に的を絞って検討していくこととする.

なお,振幅変動は,実際には音圧レベルの変動として測定・記述されることが多い.そこで，本論文では，振幅変動の代わりに，「レベルの変動」あるいは「レベル変動」の用語を用いることがある.

それでは，以下に現実音に見られる，振幅変動と周波数変動の例を挙げる.

a) 振幅変調音と周波数変調音

変動音には実にさまざまな種類があるが，その中で最も単純なものの一つが振幅変調音と周波数変調音である.

振幅変調音は，搬送波の振幅が変調波の振幅にしたがって変化する音である.搬送波，変調波がともに正弦波の場合，振幅変調音の音圧$P(t)$は次式で表わされる：

$$P(t)=A(1+m\sin 2\pi f_m t)\sin 2\pi f_c t. \qquad (1)$$

A ：振幅
f_c ：搬送周波数
f_m ：変調周波数
t ：時間
m ：変調度

一方，周波数変調音は，搬送波，変調波がともに正弦波の場合，その音圧$P(t)$は次式で表わされる：

$$P(t)=A\sin(2\pi f_c t+\beta\sin 2\pi f_m t). \qquad (2)$$

A ：振幅
f_c ：搬送周波数
f_m ：変調周波数
t ：時間
β ：変調指数

このように，周波数変調音は，振幅は一定で搬送波の周波数が変調音の振幅に比例して変化する音である．これら振幅変調音と周波数変調音の波形の例をFig.1.1a，bに示す．

このような“純粋な”変調音は現実の環境音にはあまり存在しないが，その物理学的・数学的な単純さから，聴覚の基本的な機能の解明，例えば音の強さや周波数の弁別閾や位相の検知能力の測定に多く用いられてきた(例えば，Zwicker，1952；Zwicker and Fastl，1990)．

b）音声

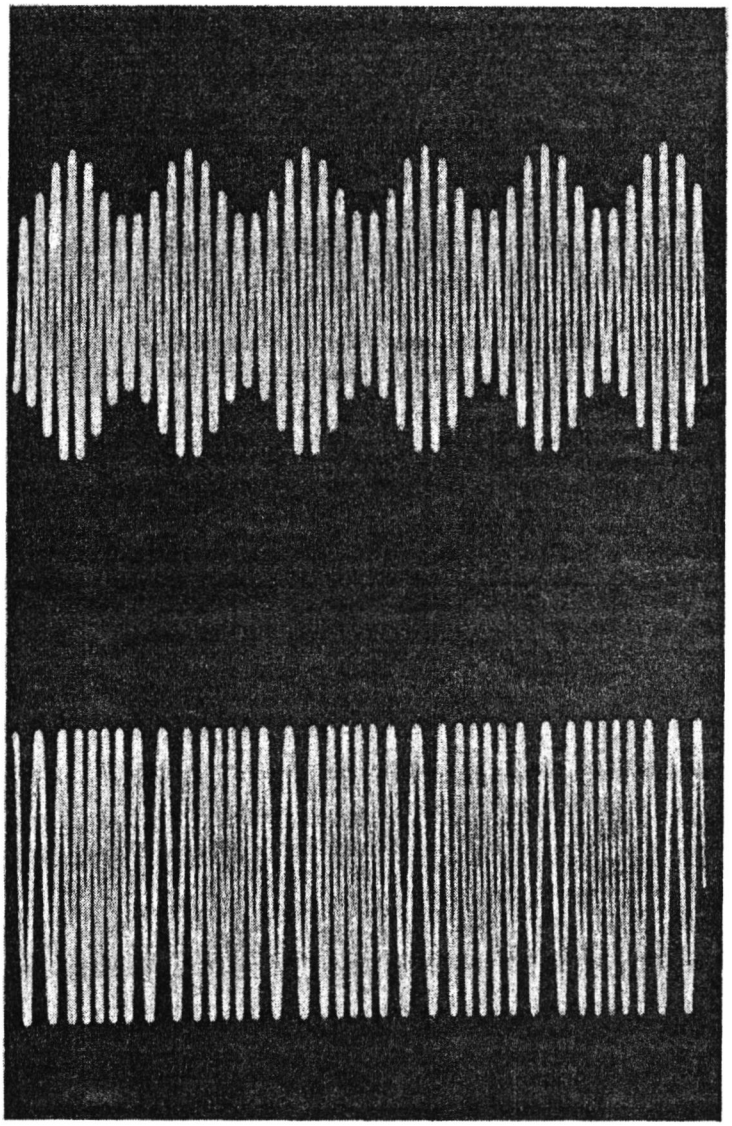
音声では，振幅と周波数の複雑な変化を観察することができる．一例として，音声分析ソフトウェア(音声工房，NTEC)で分析した，アナウンサーの音声の振幅波形とサウンドスペクトログラムをFig.1.2a，bに示す．(サウンドスペクトログラムとは，非定常な音響信号の特性を表現するために，短時間周波数分析されたスペクトル成分の強度を濃淡で示したものである．)

振幅波形を見ると，そこには定常的な部分がほとんど存在しないことが分かる．いくつかの音節ごとに大きな振幅の増減が見られ，また一つの音節の中にも，特に子音と母音の部分でレベルの違いのあることに気づくであろう．

一方，スペクトログラムでは，周波数の変動を見ることができる．子音部分では周波数の高い領域にまでスペクトルが広がり，母音部分では低周波数領域でエネルギーが比較的大きい．

特に重要なのは，子音から母音への移行部分での「フォル

(a)



(b)

Fig.1.1 Examples of the waveform of: (a) amplitude-modulated tone; (b) frequency-modulated tone. From Moore (1989).

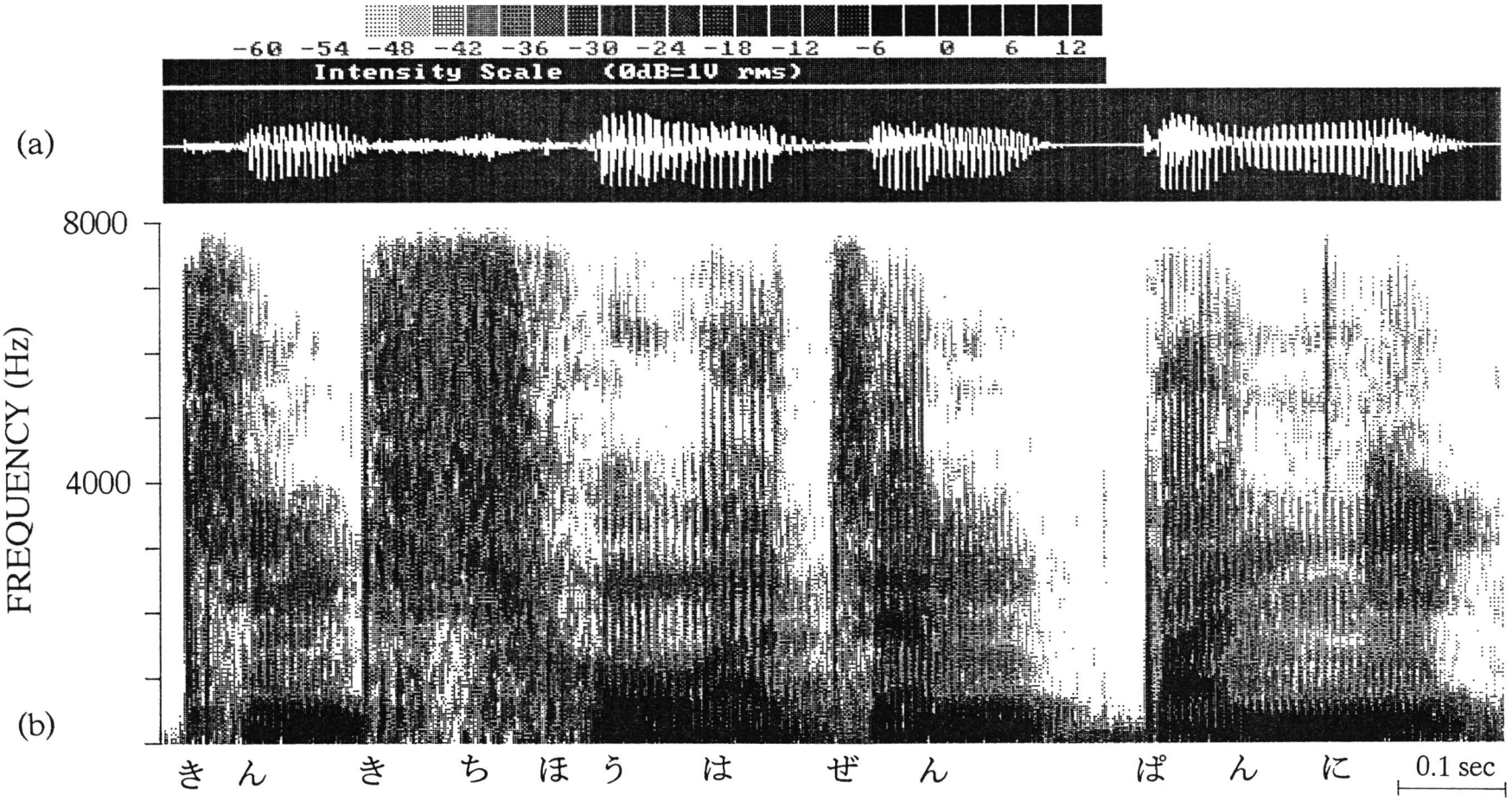


Fig.1.2 (a) Waveform of a male voice. (b) Sound spectrogram of the voice in panel (a).

マント遷移(formant transition)」である．母音には「フォルマント(formant)」と呼ばれるスペクトルのピークが見られ，その周波数位置を手がかりに母音の識別が行われている．そして，母音の前後に子音がくる場合，フォルマント周波数が滑らかに変化する．

このフォルマント周波数の遷移方向と速度は子音によって異なっており，それが子音の識別に役立っていると考えられている．破裂音と鼻子音のフォルマント遷移の例をFig.1.3に示す(斎藤・中田，1981)．また，このフォルマント遷移は，先のFig.1.2bにも見ることができる．

c) 音楽

音楽も，さまざまなレベルと周波数の音の組み合わせから成り立っている．

ピアノ演奏の振幅波形の一例をFig.1.4aに示す．一音鳴らされるごとに振幅が増加し，その後，次の音が鳴るまで緩やかに減衰する，といったレベル変動が常に繰り返されていることが分かるであろう．

一方，曲の旋律とは，まさに周波数の変化に他ならない．五線譜での音符の高さは，音の周波数の高低関係を図示したものということができる(Fig.1.4b)．

さらに，一音一音をとってみても，そこには振幅と周波数の微細な変動が含まれている．これは，楽器そのものの振動特性を反映したものもあるし，また歌声や弦楽器の演奏で用いられるビブラートやトレモロといった技法もその一例である．

このような音のレベルと周波数の変化を，我々は音楽として楽しんでいるのである．

d) その他の環境音

そのほか，我々の身の回りの音，たとえば，鳥や虫の鳴き声，風や波の音，自動車や列車の走行音など，ほとんどすべ

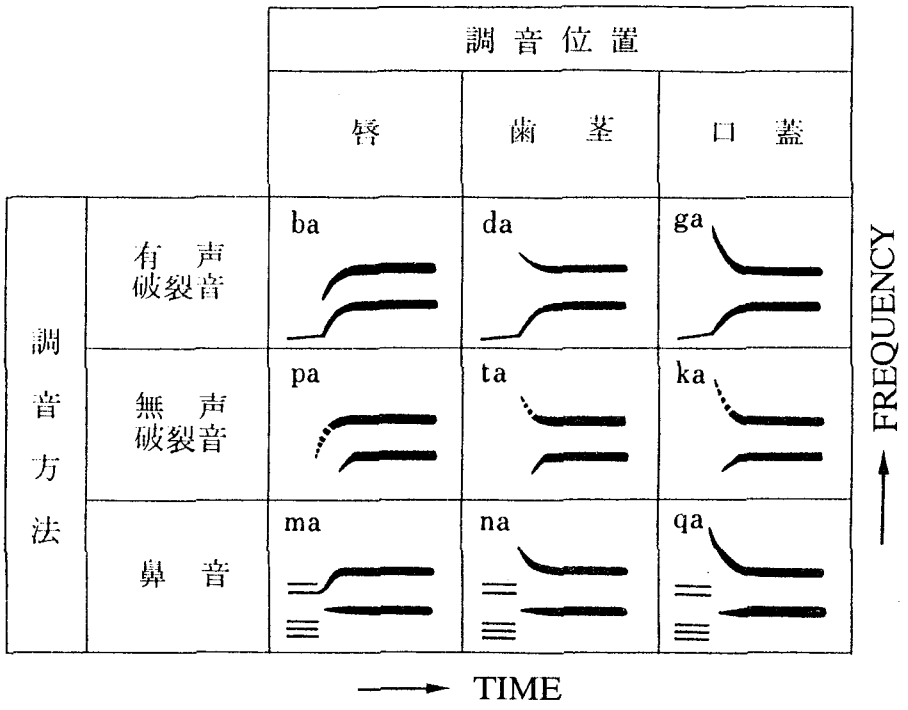


Fig.1.3 Patterns of acoustic cues for the stop and nasal consonants. From Saito and Nakada (1981).

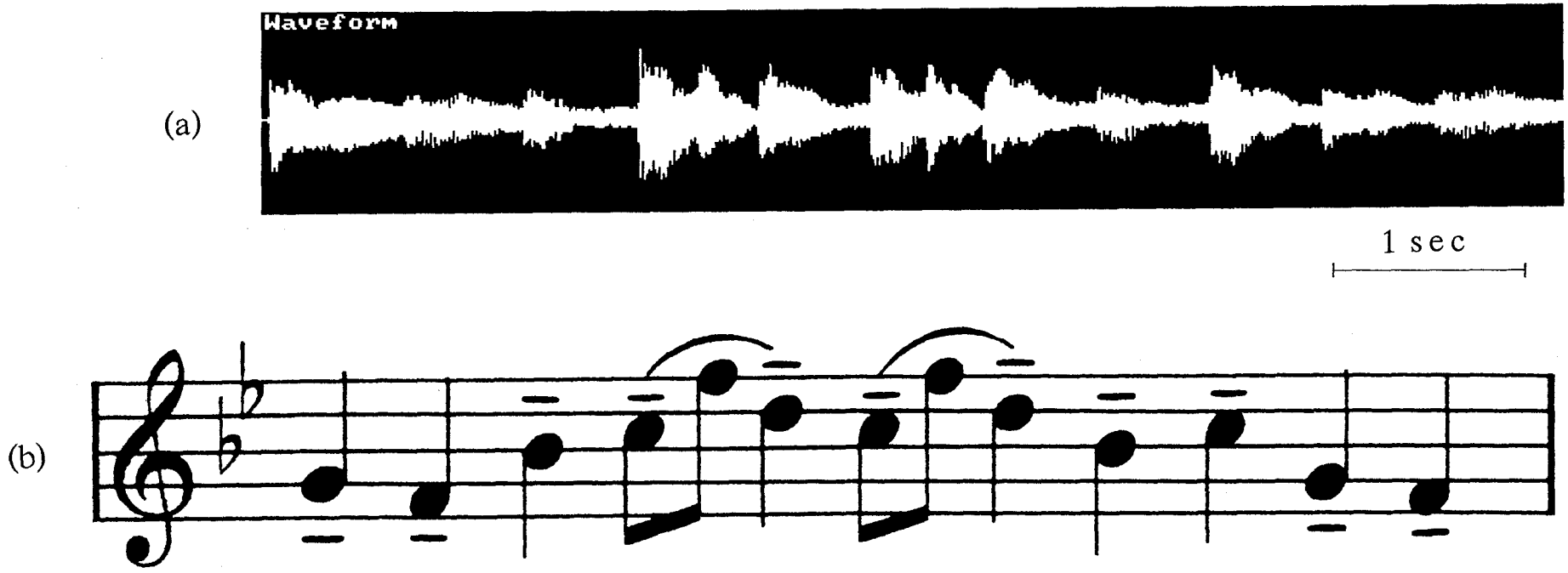


Fig.1.4 (a) Waveform of a piano performance (Moussorgsky, "Bilder einer Ausstellung, 'Promenade'"). (b) Corresponding musical notes.

てがレベルと周波数が時間的に変動する変動音と考えられる．正弦波(純音)が音としては最も単純なものの一つで(Moore, 1989)，一定のレベルと周波数をもつ定常音である．その単調さと比較すると，我々の身の回りの音がいかに変化に富んでいるかが容易に理解できるであろう．

そこで，すべての例を挙げることはできないが，一例として道路交通騒音のレベル変動パターンをFig.1.5に示す．自動車が通過するごとにレベルが急激な上昇と下降を繰り返している様子が見られる．

騒音制御の観点からは，このような複雑でさまざまな変動をもつ環境騒音をどのように評価するかは大きな課題の一つである．レベル変動する音の大きさの評価には対象とする音源や目的ごとにいくつもの方法が提案され，研究が続けられている(例えば，日本建築学会(1981)を参照)．

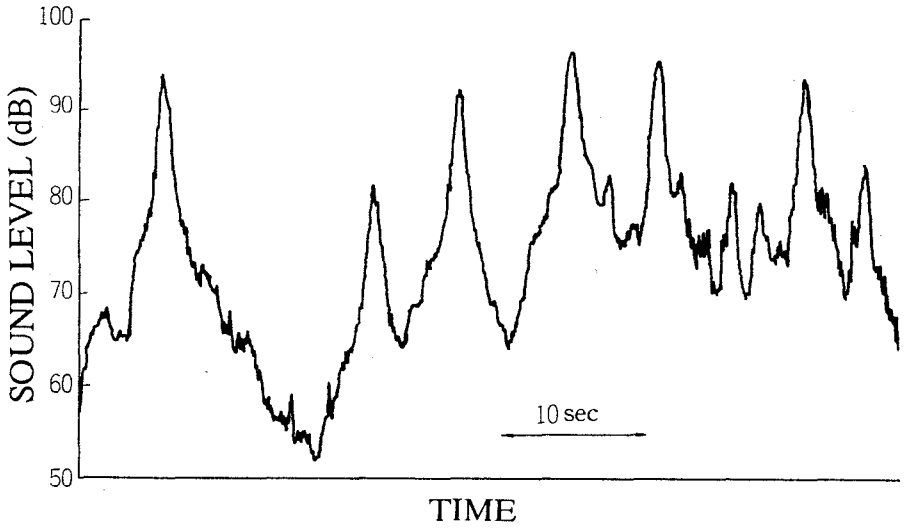


Fig.1.5 Sound level pattern of a road traffic noise. From Namba (1984).

2．聴覚情景分析(auditory scene analysis)
― 生態学的観点の導入 ―
2．1 聴覚の役割

それでは，このような変動は，現実場面における聴覚系の機能とどのように関わっているのであろうか？ここでは，生態学的な観点を導入し，この問題を検討してみたい．

聴覚には，他の感覚(視覚・嗅覚・触覚・味覚など)と比べて特徴的な機能が2つある．

まず1つめは，いわば“レーダー”としての役割である．我々は，聴覚によって，自分の身の回りで何が起こっているかを四六時中観察している．音には回折する性質があるので，自分と対象との間にたとえ障害物があっても，我々はそれが発する音によって対象の存在を知ることができる．そこで，何か身の回りで変化が起きた時，まずそれを耳で察知し，そしてその後それが何であったかを目で見て理解するという行動を我々は一般にとるのである．これが，レーダーとしての役割である．

このことは，聴覚では順応現象がほとんど生じない(Sharf, 1981)ことからも裏付けられよう．もし，聴覚系が周りの環境音に順応してしまい，例えば外敵の接近を意味するその足音に気づかなければ，生存にきわめて不利であることは明らかである．

2つめの機能は，音声によって他者とのコミュニケーションをとることである．聴覚の最大かつ最高の重要性は音声の認知にあると考えられる(吉田・亀田，1980)．これによって知識の共有や文化の伝承が促され，人間が他の動物には見られない高度な社会生活を営むようになった(寺西，1986)．

もちろん，他者とのコミュニケーションは，視覚や触覚など他の感覚モダリティでも不可能ではない(例えば，手話や点字のように)．しかし，自分から離れた者や多数の仲間に同時に情報を伝達するには，回折のような物理的性質から考えて，

音を用いるのが一番効率的であろう．

2.2 聴覚情景分析の必要性

ところで，現実の音環境を考えた場合，聴覚系にとって重大な問題が生じる．それは，目的の音は必ずしも“単独”で聞こえるわけではないという点である．

我々の身の回りには，ほとんど常に何らかの音が発生している．それは，風に草木がそよぐ音であったり，動物の鳴き声であったり，雨音であったりする．現代社会では，さらに空調機の音や，窓の外からは車の通り過ぎる音などが我々の耳に飛び込んでくる．そのような種々雑多な音の混ざり合いの中から，自分の必要とする音だけを間違いなく選んで聞き出さなければならないのである．これは，「カクテルパーティ問題(cocktail party problem)」(Cherry, 1953)として知られる，日常的に経験する状況である．

このことの難しさは，実際の音を物理的に観察することによって明らかとなろう．Fig.1.6aは，Fig.1.2にも示した，アナウンサーの声の波形とサウンドスペクトログラムである．ここに，例えばFig.1.6bのように雑音(図では，白色雑音)が外部から加わったとする．そうすると，その雑音が加わった部分では，元の音声の波形やスペクトルの微細な構造は，図で見る限りほとんど分からなくなってしまう．しかし現実には，そのような雑音の加わった状態でも，我々は目的の音声だけを分離し，誤りなく聞き取ることができる．

また，状態がさらに悪化すると，雑音によって音声の一部が全く失われてしまうこともあろう．これは丁度，電波が弱いために時々雑音の入る状態でラジオを聴いているような状態に相当する．しかし，そのような場合でも，我々はそこにあたかも実際に音声が存在していたかのように修復して聴く能力を持っている．これは，「音素修復(phonemic restoration)」(Warren, 1970)と呼ばれている．

別の例を挙げよう．今はほとんど見かけなくなったが，か

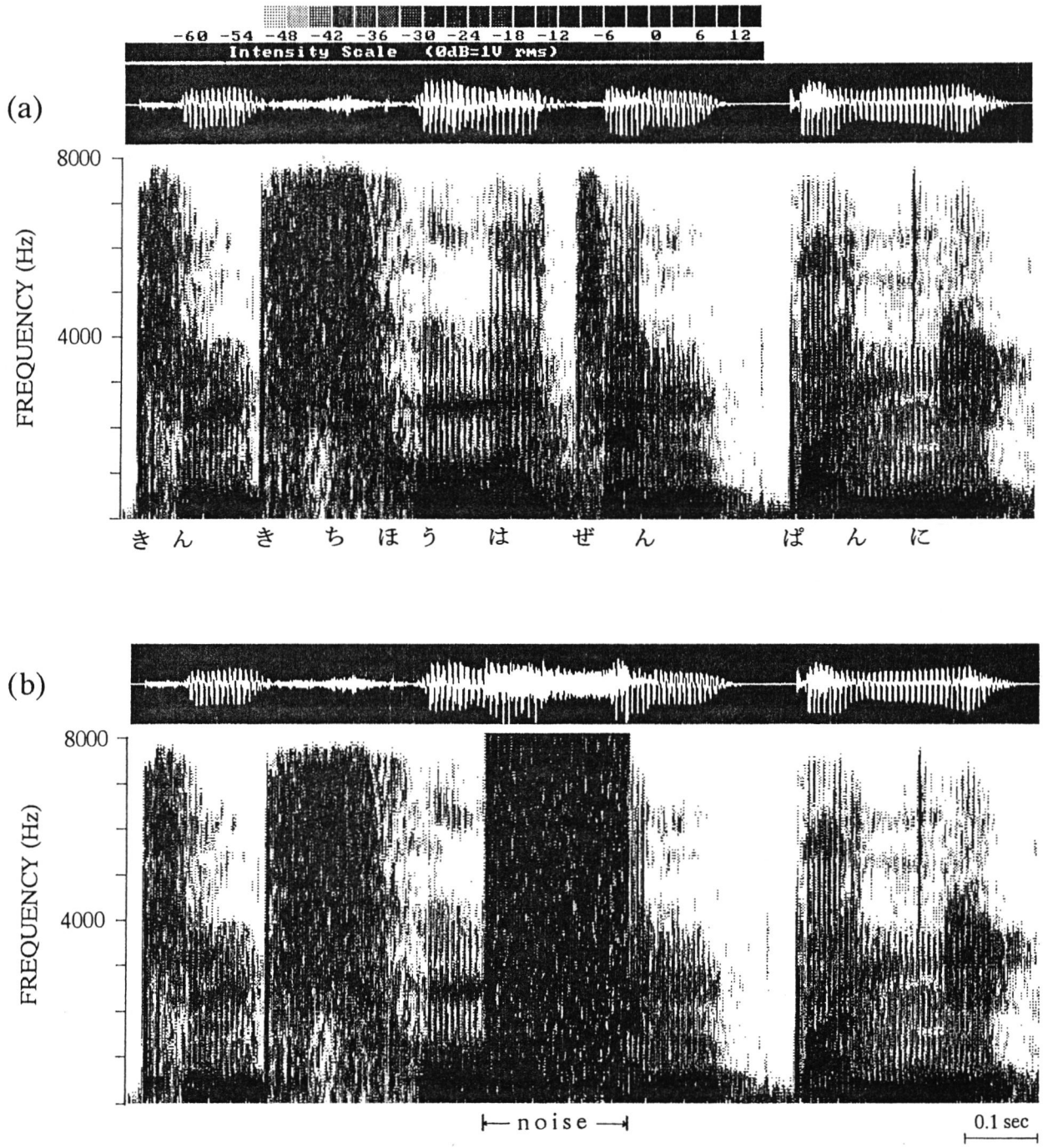


Fig.1.6 (a) Waveform and sound spectrogram of the voice shown in Fig.1.2. (b)The voice contaminated by an external noise.

つて音の記録媒体として「レコード」が用いられていた．これは，音の強さに応じて，その波形を一本の溝に刻んだものである．

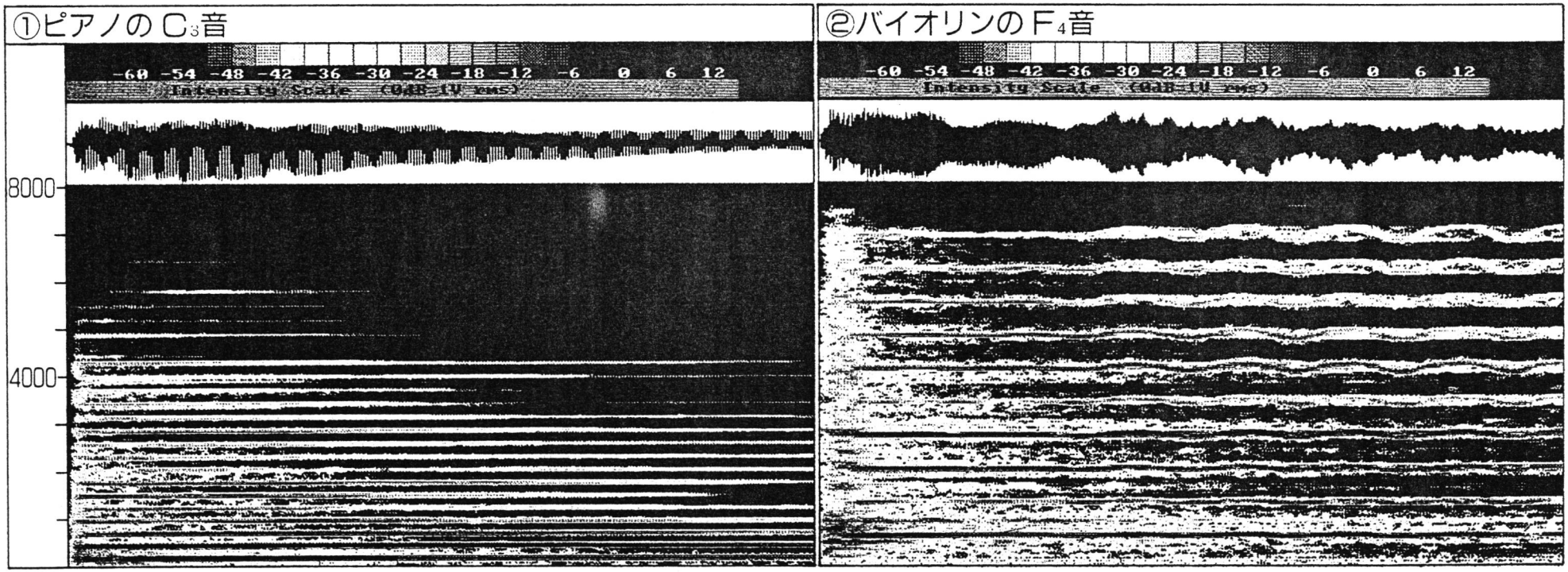
ところで，スピーカからはたくさんの楽器の音が同時に聞こえてくるのに，レコードの溝はなぜ一本で済むのであろうか？他の楽器の音と混じり合ってしまわないように，１つの楽器につき１本ずつ溝を用意する必要はないのであろうか？

これは，結論から言うと，楽器の音は物理的にはすでに混じり合ってしまっているのである．たとえば，Fig.1.7aはピアノで演奏されたC$_3$の音，Fig.1.7bはバイオリンで演奏されたF$_4$の音の波形とサウンドスペクトログラムである(この図では，Fig.1.6などとは逆に，エネルギーの強い部分が白く写し出されている)．

この２音が同時に演奏されるとFig.1.7cのようになる．この図では，２つの楽器の波形やスペクトル成分が混じり合い，どの部分がどちらの楽器から発したものなのか，もはや分からなくなってしまっている．しかし，このFig.1.7cに示される音を聞けば，我々は苦もなく，ピアノとバイオリンという２つの楽器から別々の音が出ていることを知覚できるであろう．

さらに，これよりも多くの音が複雑に入り交じっていても，我々は個々の楽器を識別したり，メロディーを聴き分けたりすることができる．音楽的訓練を受けたものならば，それを聴いて正確に楽譜にすることもできるはずである．しかし逆に，演奏音の波形だけを見て，それを楽譜に書きとめることはまず不可能であろう．そもそも，それが音楽の演奏音だと気づかないかも知れない．

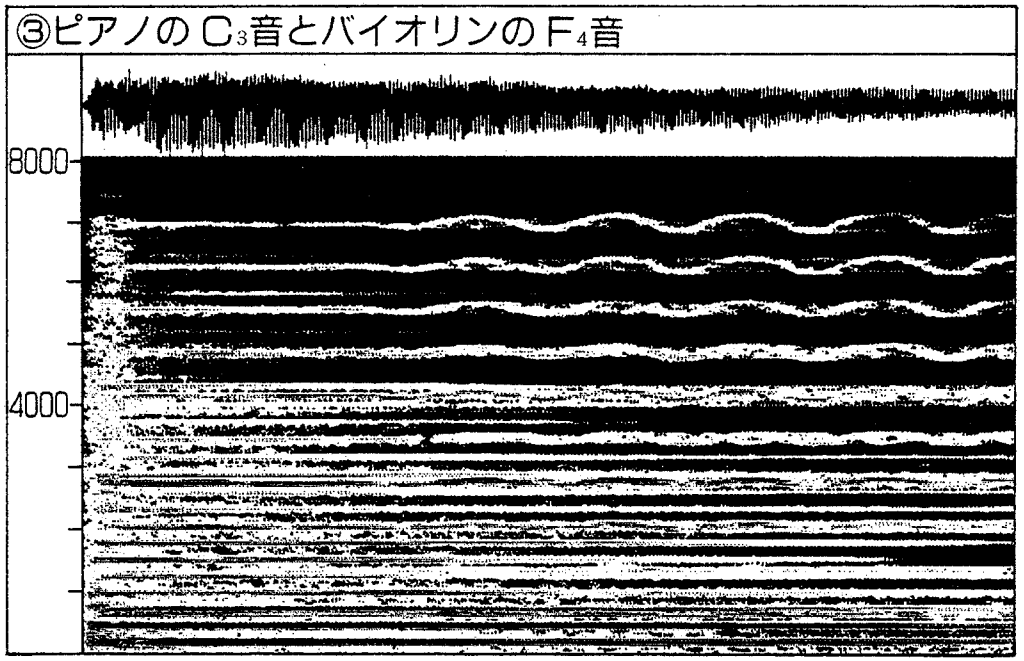
実際に我々の耳に到達する音波は，Fig.1.7cのような波形とスペクトルを持つものである．この図に見られるように，レコードの記録の上では，多くの楽器の音や音声がすでに物理的に混じり合ってしまっている．しかし，それが複数の楽器や歌手から別々に発せられたものであると分離しているの



(a) (b)

Fig.1.7 (a) Waveform and sound spectrogram of a piano. (b) Waveform and sound spectrogram of a violin. (c) Mixture of the tones in panel (a) and (b). From Kashino (1992).

(continued)



(c)

は，実は我々の聴覚系の働きなのである．このような外界の音響事象を解析する聴覚系の機能は，「聴覚情景分析(auditory scene analysis)」と呼ばれている(Bregman，1990)．

聴覚情景分析の問題の重要性と困難さが聴覚研究者の間で認識されるようになってきたのは，ごく最近のことである(柏野，1992)．これには，コンピュータによる複数の話者の音声認識や音楽の自動採譜など，工学的な要請が背景にあろう．現在，この聴覚情景分析機能の解明は，聴覚研究のもっとも重要な課題として盛んに研究が進められている分野の1つとなっている．

2.3 聴覚情景分析に用いられる音響的手がかり

カクテルパーティー問題では，特定の話者の音声にのみに注目して聴取するという「選択的注意(selective attention)」の観点から論じられることが多い(例えば，Neisser，1976)．すなわち，我々は複数の話者からの情報を同時に理解するには，大変な困難を伴うのである．

ただし，それより以前の段階としてまず考えなければならないのは，音の混合の中から，目的とするある特定の音の成分だけを誤りなく抽出するという聴覚系の機能である．

この目的する音の抽出には，様々な音響的手がかりが用いられている(Bregman，1990)．たとえば，まず周波数の側面に目を向けると，音声や楽器などの音(高さの感覚を生じさせる音)には，周波数成分が調波構造を成しているものが多い．すなわち，そこに含まれる成分の周波数は，基本周波数の(ほぼ)整数倍となっている．これを手がかりにすれば，互いに周波数が整数比となる成分は，同じ1つの音源から発したものであると分析することができる．

しかし，自動車の走行音や物を叩いた時の音など，身の回りの環境音は必ずしもそのようなきれいな調波構造を成していない．そのような場合は，時間的側面の手がかりを用いる

ことができるであろう．すなわち，同時に立ち上がり，同時に消えた周波数成分は，共に同じ１つの音源から発した可能性が高い．そこで，それらは一まとまりの音として分析される．

その他，音源の方向の手がかりも重要となろう．我々は，両耳間の音のレベル差と時間差や，頭部，特に耳介による音の遮蔽や反射などから，音源の方向を知覚することができる(境・中山，1978；ブラウエルト・森本・後藤，1986)．そこで，それを手がかりに，異なる方向から聞こえてきた音は別の音源から発したものと解釈することが可能となる．

２．４ 聴覚情景分析における変動の役割

このように，聴覚情景分析には様々な音響的手がかりが用いられている．しかし，上に挙げた手がかりだけでは，ある程度の大ざっぱな分析はできるものの，似たような多くの音源が混じり合った場合には十分な解析ができないことがあろう．

そこで，さらに用いることの可能な音響的手がかりは，音の強さや周波数の変動である．すなわち，定常的な音の中で変動を伴う成分があれば，または他とは異なる変動の仕方を示す成分があれば，それらは別の音源から発したものと解釈することができるのである．

この手がかりが強力なことは，次の例から分かるであろう．音声や楽器の音など調波構造を成す複合音では，それら全体で一つのまとまりのある音として聞こえ，そこに含まれる周波数成分の一つ一つを分離して聞くことは，(不可能ではないにしても)非常に困難である．たとえ，その中のある成分の相対的な振幅を変えたとしても，多くの場合それ単独の変化は知覚できず，全体の音色が変化したように感じられるに過ぎない．

しかし，その成分だけ振幅や周波数を時間的に変動させると，全体を一まとまりとして聞こうとする聴覚の強力な作用

に逆らって，今度はその成分が単独で浮き上がって聞こえるようになる(Moore，1989)．さらに，複数の成分が同期して変動した場合は，それらは元の音の混じり合いから外れて，新たに一まとまりの音と知覚されるようになるのである(McAdams，1982)．このように，聴覚情景分析においては，変動の仕方の違いが大きな手がかりの1つとなっていると考えられる．

変動の手がかりの重要性は，視覚刺激でのアナロジーから示すこともできる．たとえば，Fig.1.8aに示す，ランダムドットパターンを考えてみる．この中から，ある特定の1点だけを探しだすには大変な困難を要する．しかし，その1点だけが図の中を動き回り始めたら，その瞬間にその点の存在に気がつくであろう．

さらに，Fig.1.8bのように，ある領域(図では正方形)のドットが，他の領域(正方形の周り)とは別の方向に同時に移動し始めたとする．すると，これまで一様であった平面が分割され，中央の正方形の領域が周辺から分離した知覚を生じるに違いない．逆に，移動が止まれば，その瞬間に全体が一様なランダムドットパターンに戻ってしまうであろう(佐藤，1992)．

2.5 聴覚におけるパターン知覚

先にも述べたように，現実の環境音はさまざまな時間的変動を伴っている．そして，その変動の仕方，すなわち変動パターンは音源によって異なっている．そこで，聴覚情景分析の観点に立つと，音源を識別するためには，単に変動を知覚するだけではなく，変動の「パターン」を捉えることが重要となってくる．

このようなパターン知覚が聴覚系の機能として存在することは，いくつかの例から示すことができる．例えば，我々は，メトロノームや時計の秒針のような同じ強さの音の系列を聴くと，単に同じ音の連続としてではなく，それらが2つか3

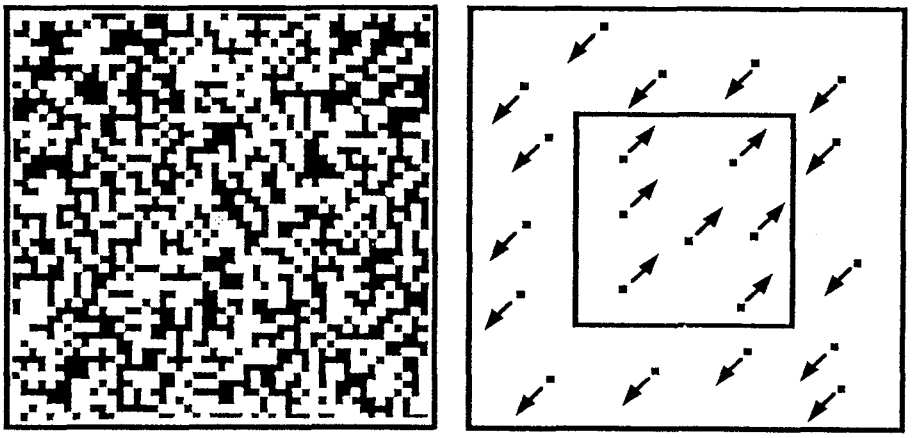


Fig.1.8 (a) An example of random-dot pattern. (b) Segregation of the pattern based on movement. From Sato (1992).

つ，あるいは4つごとにまとまって群を成して聞こえる．そしてさらに，その群ごとに強弱のアクセントのついたリズムを知覚する(時計の例で言えば，チク，タクといったように)．物理的にはこのような強弱のリズムは存在しないので，この現象は「主観的リズム(subjective rhythm)」と呼ばれている(Fraisse，1982)．これは，同じ音の連続の中にも，何らかの構造を見いだそうとする，聴覚系の能動的な働きと考えられる．

また，音声の知覚も一種のパターン知覚といえる側面がある．例えば，Libermanらによると，早口で話される会話では，音素(一つの言語における，言葉の意味の区別を表わす音の最小単位)の生起する速度は，1秒間に30個に達するという(Liberman，Cooper，Shankweiler and Studdert-Kennedy，1967)．この速度では，聴覚系は一つ一つの音素の順序を識別することはもはやできない．そこで，おそらく個々の音素をばらばらに知覚するのではなく，いくつかのまとまり(例えば，音節)ごとにその「パターン」を知覚していると考えられる(Moore，1989)．このように，聴覚の機能を考える上で，音の変動パターンの知覚は重要な観点の一つとなろう．

視知覚においては，このような処理過程に関して，ゲシュタルト心理学者たちが「群化(perceptual grouping)」の現象を指摘している．すなわち，感覚器官から入力された要素はそれぞれ独立に処理されるのではなく，相互にあるまとまりをもって知覚される傾向があるのである．

この群化を規定する要因として，彼らは例えば以下のものを挙げている(大山(1970)より引用)：(1)近接の要因，(2)類同の要因，(3)閉合の要因，(4)よい連続の要因，(5)よい形の要因，(6)共通運命の要因，(7)客観的態度の要因．

ところで，視覚において，これらの要因による群化は，空間におけるパターン知覚の基礎を成すものである．一方，聴覚における群化は，時間軸上でのパターン知覚の基礎である．

空間と時間の違いはあるが，どちらのパターン知覚にも同様の原理が支配していると考えられる．

そこで，ゲシュタルト法則はもともと視覚の研究に端を発したものであるが，この法則は聴覚における知覚にも同様に適用することが可能である(Handel，1989；Bregman，1990)．例えば，先に述べた変動を手がかりにした聴覚情景分析とFig.1.8bに示す視覚における領域の分割は，ともに共通運命の法則の一例といえる．

近年，聴覚におけるゲシュタルト法則の適用可能性が改めて見直され，その観点からさまざまな聴覚現象，例えば共変調マスキング解除(comodulation masking release；Moore，1992)や旋律の知覚(Deutsch，1982b)などを説明する試みが多くなされている．

3．聴覚の時間的側面に関するこれまでの研究

さて，現実音にはさまざまな変動が含まれているにもかかわらず，これまでの聴覚心理学の研究では，強さ・周波数・位相などに時間的変動を伴わない，比較的単純な音を用いることが多かった(吉田・亀田，1980)．例えば，正弦波や白色雑音がその典型である．(正確には，雑音は本質的にランダムな振幅変動を含むものである．しかし，そのような変動は実際には聞き分けられず，主観的には定常的な音と考えるべきであろう．物理的非定常が必ずしも主観的非定常を意味するわけではない(難波，1984)．)

これには，いくつもの理由が挙げられよう．まず第一に，この分野では伝統的に，音の刺激がいかに感受されるかという狭義の感覚研究だけが重視されてきたため(寺西，1984)，聴覚の属性の中でも，音の大きさと高さなど限られた側面に関する研究が圧倒的に進められてきた歴史がある．

そこで，聴覚の時間的側面を対象とした研究でも，音の大きさや高さといった基本的な感覚と刺激の時間条件との関係を扱ったものが多い．例えば，音の大きさは持続時間の増加に伴って次第に大きくなり，およそ150～300msで定常状態に達する(Sharf，1978)．これは，「大きさの加算効果」と呼ばれる．また，1000Hz純音では，持続時間が10ms以下になると次第に純音らしい高さの感じがなくなり，さらに3ms以下では高さの感覚の無いクリックにしか聞こえなくなる(Doughty and Garner，1947)．

これらの研究は，長時間(数百ms以上)であればほぼ一定で変化しない大きさや高さの感覚が，持続時間の短い状況でどのように変化するかを調べることによって，聴覚系の基本的な特性を明らかにしようとしたものである．したがって，音の時間的変化そのものに対する聴覚の動的な特性の研究とは，基本的に立場が異なるものである．

もっとも，過去の研究者達も，時間的変動の重要性に全く

気づいていなかったわけではない．たとえば，音色は音の時間包絡，特に立ち上がり・立ち下がりの過渡部分に大きく影響される．音色の先駆的研究者であるHelmholtzは，今から130年も前にすでにこの点について触れている(Helmholtz, 1863)．しかし，当時の技術水準では，音の細かい時間的制御が困難であり，対象を定常音に限定して研究を進めている(宮坂，1984)．

このように，非定常音の研究が遅れている2つめの理由は，音楽や現実の環境音のような複雑な非定常音を精度よく作成・制御することが困難であったという技術的な側面での制約にあったようである(Deutsch，1982a)．現代ではエレクトロニクス技術の発展によって，パーソナルコンピュータのクラスの機器でも，任意の波形をもつ音を発生させたり，外部から取り込んだ音をほとんど劣化させずに編集・加工できるようになった．

また，音楽演奏においては，1983年に「MIDI(Musical Instrument Digital Interface)」と呼ばれる国際規格によって，電子楽器の演奏情報伝達のフォーマットが統一された(MIDI規格協議会，1988)．これによって，電子楽器からコンピュータに演奏情報を取り込んだり，逆にコンピュータから電子楽器をコントロールすることが自由に行えるようになったのである．そこで，このようなエレクトロニクス技術が進歩した現代になって，ようやく非定常音の研究に本格的に取り掛かるべき時期に達したと言えよう．

4．本論文の目的

先に例示したように，身の回りの環境音にはさまざまな変動が含まれている．そのため，聴覚系にとって変動の知覚は重要な課題であり，また変動パターンに含まれる情報を巧みに処理することによって外界の認知が行われていると考えられる．

したがって，このような変動音に対する聴覚系の情報処理メカニズムを解明することは，聴覚系の機能を明らかにする上で，また環境音の評価やコンピュータによる音楽・音声の合成・認識などの応用面において重要な意味をもつであろう．

そこで，本論文では，特にレベル変動に的を絞り，以下の3つの観点から検討を行うことにする．それを通して，聴覚系における変動の知覚の役割とその処理形態について考察し，レベル変動音に対する聴覚系の情報処理メカニズムの一端を明らかにしたい．

(1) 規則的な変動音の知覚 － 変調周波数の影響 －

レベル変動音には，さまざまな周波数の変動成分が含まれている．そこで，聴覚情報処理における変調周波数の効果を明らかにするために，広帯域雑音中の振幅変調音の知覚を検討する．そして，変動音の知覚の特異性と聴覚情景分析における変動の手がかりの重要性について検討する．

(2) 不規則的な変動音の知覚 － 変動パターンの影響 －

我々の身の回りの音には，時間的に不規則な変動をするものが非常に多い．また，音楽や音声では変動パターンそのものが情報となって伝達されており，聴覚系にとってそのパターンを知覚することは重要な機能の一つと考えられる．

そこで，聴覚情報処理における変動パターンの効果を明

らかにするために，不規則的なレベル変動をもつ音刺激系列の知覚を検討する．

(3) 音楽場面における変動の知覚

上記の実験結果が我々の聴覚系における情報処理の一般的な特性を反映したものであるならば，それらは音楽場面においても同様に適用可能なはずである．

そこで，ピアノ演奏を例にとって音楽場面における変動の知覚を検討し，これまでに得られた実験結果の妥当性を検討する．

第２章
規則的な変動音の知覚
－変調周波数の影響－

１．本章の目的

我々が日常接する音は，それぞれが必ずしも単独で存在しているわけではない．そこで，聴覚系は，さまざまな妨害音の中から目的とする音だけを抽出し，処理しなければならない．

その時に用いることのできる手がかりの一つが，音の変動である．ただし，現実のレベル変動音には，さまざまな周波数の変動成分が含まれている．

そこで本章では，聴覚情報処理における変調周波数の影響を明らかにするために，定常的な広帯域雑音中における振幅変調音の知覚を検討する．そして，変動音の知覚の特異性と聴覚情景分析における変動の手がかりの重要性について検討する．

2.実験1　－ 広帯域雑音中でのＡＭ音の検知閾 －

2.1 目的

目的とする音(信号音)が他の音の存在によって聞こえにくくなる，あるいは全く聞こえなくなる現象は「マスキング(masking)」と呼ばれる．この時，信号音が聞こえるようにするためには，その音のレベルを上げてやらねばならない．すなわち，マスキングによって閾値が上昇するのである．この時の閾値は，絶対閾と区別して「マスク閾(masked threshold)」と呼ばれる．ただし，ここではマスキングの影響そのものではなく信号音の検出にむしろ関心があるので，以下では，この閾値を「検知閾(detection threshold)」と呼ぶことにする．

定常音(純音など)の検知閾は，数多くの研究によって検討されている(例えば，Wegel and Lane，1924；Egan and Hake，1950)．しかし，変動音の閾値については，あまり多くの研究はなされていない．第1章で提起した聴覚情景分析の観点から考えると，妨害音の中で目的とする音を抽出する機能は，聴覚系にとって不可欠であると考えられる．

そこで，振幅変調音に対する聴覚情報処理の一歩として，定常的な広帯域雑音中におけるＡＭ音の検知閾を測定する．特に，変調周波数による検知閾の変化を明らかにし，聴覚系における変動音の処理機能について検討を行う．

2.2 方法

刺激

a) 振幅変調音(ＡＭ音)

振幅変調音(Amplitude-Modulated tone：ＡＭ音)とは，第1章で示した，搬送波の振幅が変調波の振幅にしたがって変化する音である．本実験では，搬送波，変調波ともに正弦波のＡＭ音を用いた(第1章，式(1))．

まず，ファンクション・シンセサイザ(ＮＦ，ＤＦ1９1)で搬

送波となる正弦波を発生させた．その出力をプログラマブル・アッテネータ・コントローラ(AD system)とパーソナルコンピュータ(NEC, PC-9801RX)を用いて振幅を変調し，DAT(Digital Audio Tape ; Sony, DTC-1000ES)に録音した．

搬送周波数(Carrier Frequency：CF)は125，250，500，1000Hzの4種類，変調周波数(Modulation Frequency：MF)は1，2，4，8，16Hzの5種類，変調度(Degree of Modulation：DM，変調の深さm×100(%))は50，100%の2種類である．さらに，振幅変調させていない条件(4種の搬送周波数の純音)を加えた．

したがって，刺激条件は4(CF)×5(MF)×2(DM)＋4(純音)＝44種類である．実験に用いたAM音の条件をTable 2.1に，波形の一例をFig.2.1a，bに示す．(純音は，変調周波数0HzのAM音と考える．そこで，以下，特に断わらない限り，実験刺激のAM音と表記した場合には純音も含むものとする．)

b) 広帯域雑音

現実の環境騒音，例えば都市騒音や交通騒音などの長時間スペクトルを見ると，低周波数成分のレベルが高く，高域にいくにしたがって緩やかに減衰するものが多い(例えば，日本音響材料協会(1966)を参照)．そこで，以下のように定常的な広帯域雑音を作成した．

まず，ノイズジェネレータ(Ono Sokki, CF-350)より，一定のレベルのピンクノイズを発生させた．それを，デジタルフィルタ(MTT, DSP5200AL/24)を用いて，目的の周波数特性になるように加工した．FFT(Ono Sokki, CF-350)で測定した，広帯域雑音の周波数特性をFig.2.2に示す．

装置

実験装置の概略をFig.2.3に示す．あらかじめDATに録音

Table 2.1 Amplitude-modulated tones used in Experiment 1.

No.	CF (Hz)	MF (Hz)	DM (%)	No.	CF (Hz)	MF (Hz)	DM (%)
1	125	0	0	23	500	0	0
2	125	1	50	24	500	1	50
3	125	1	100	25	500	1	100
4	125	2	50	26	500	2	50
5	125	2	100	27	500	2	100
6	125	4	50	28	500	4	50
7	125	4	100	29	500	4	100
8	125	8	50	30	500	8	50
9	125	8	100	31	500	8	100
10	125	16	50	32	500	16	50
11	125	16	100	33	500	16	100
12	250	0	0	34	1000	0	0
13	250	1	50	35	1000	1	50
14	250	1	100	36	1000	1	100
15	250	2	50	37	1000	2	50
16	250	2	100	38	1000	2	100
17	250	4	50	39	1000	4	50
18	250	4	100	40	1000	4	100
19	250	8	50	41	1000	8	50
20	250	8	100	42	1000	8	100
21	250	16	50	43	1000	16	50
22	250	16	100	44	1000	16	100

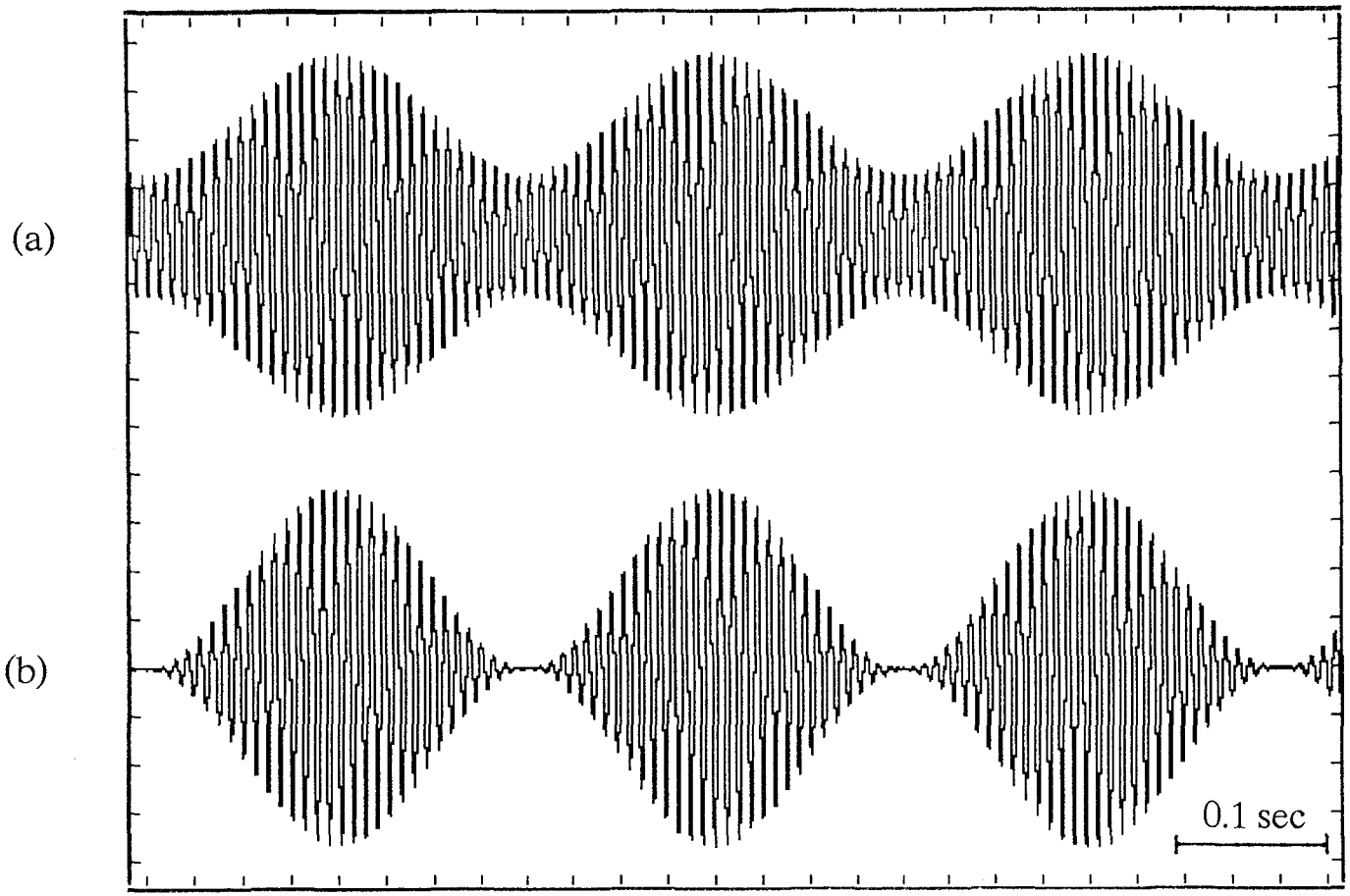


Fig.2.1 Examples of the waveform of the amplitude-modulated tones used in Experiment 1 and 2. Carrier frequency:125 Hz, modulation frequency: 4 Hz, degree of modulation: (a) 50%, (b) 100%.

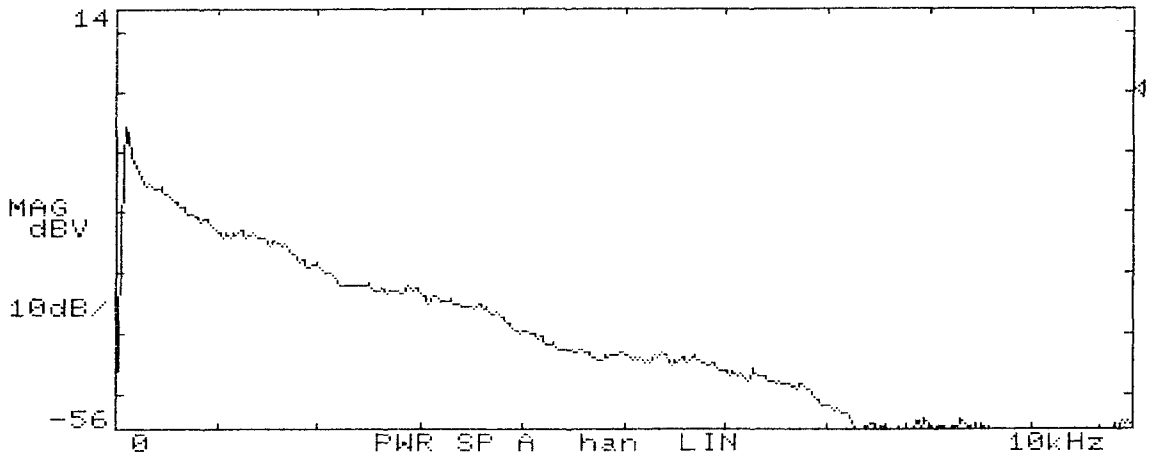


Fig.2.2 Frequency characteristics of the broad-band noise used in Experiment 1 and 2.

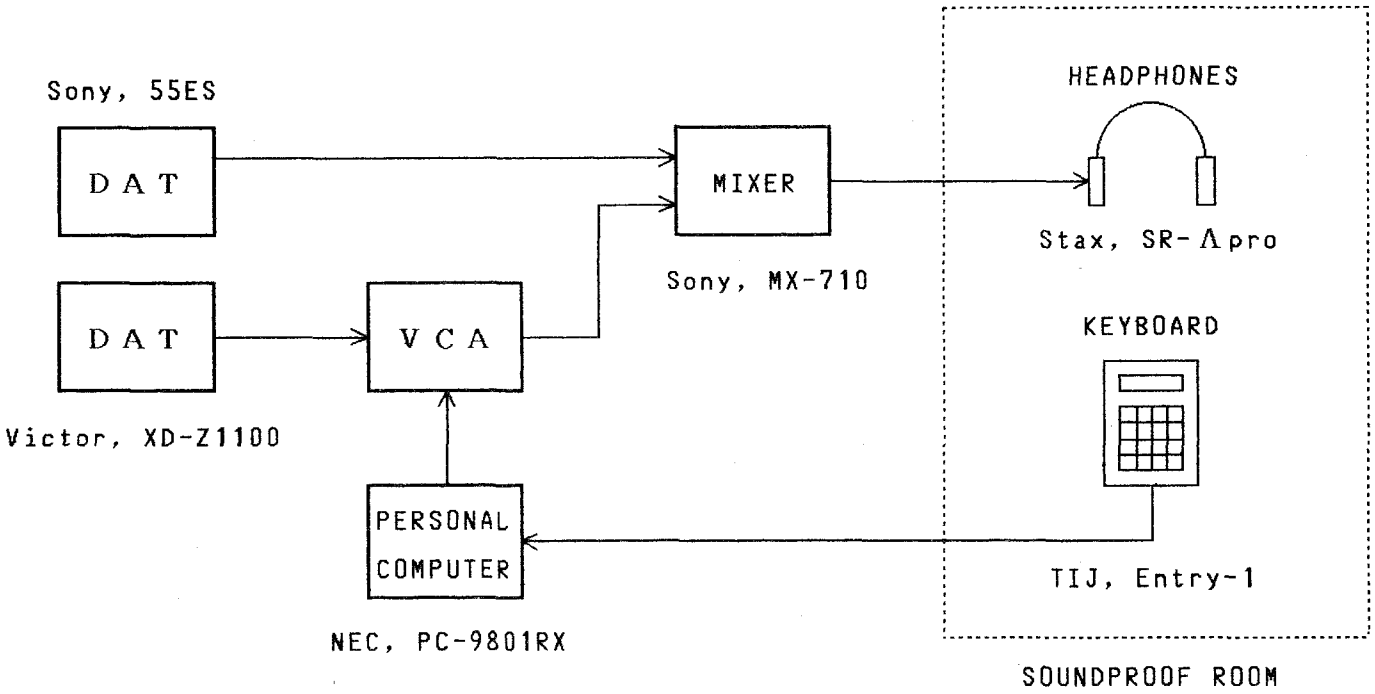


Fig.2.3 Block diagram of the apparatus used in Experiment 1.

しておいた広帯域雑音とＡＭ音を，ＤＡＴデッキ(Ｓｏｎｙ，55ES；Victor，ＸＤ-Ｚ1100)から再生した．ＡＭ音のレベルは，パーソナルコンピュータ(ＮＥＣ，ＰＣ-9801ＲＸ)とD/Aコンバータ(Ｎｅｏｌｏｇ電子，ＰＣＮ-３０９８)に制御されたVCA(Voltage-Controlled Amplifier；自作)によってコントロールした．その後，広帯域雑音とＡＭ音をミキサ(Ｓｏｎｙ，ＭＸ-710)でミックスし，ヘッドホン(Ｓｔａｘ，ＳＲＤ-Ｘ pro + ＳＲ-Λpro)を通じて，防音室(大阪大学教養部心理学実験室)内の被験者の両耳に呈示した．

被験者の反応は，パーソナルコンピュータ(ＮＥＣ，ＰＣ-9801ＲＸ)に接続された拡張キーボード(日本テクニカル工業，Ｅｎｔｒｙ-1)よりコンピュータに取り込んだ．

手続き

極限法により，ＡＭ音の検知閾を測定した．まず，広帯域雑音を40dBAの一定のレベルで連続的に呈示した．その中にＡＭ音を連続的に呈示し，そのレベルを２秒ごとに１dBステップで増加，または減少させた．

被験者は，ＡＭ音が聞こえている間，手元のキーボードのキーを押し続けて反応した．各被験者は，数回の練習試行の後，全刺激につき上昇・下降系列各４試行，計８試行ずつ測定を行なった．

教示

以下の教示を用紙に印刷し，被験者に呈示した：

「この実験は，音が聞こえるか聞こえないかのさかいめ，すなわち検知閾を測定するものです．

まず，ターゲットの音が背景雑音の中に呈示されます．その音は，明らかに大きなところから始まって徐々に小さく，もしくは全く聞こえないところから始まって徐々に大きく，と絶えず大きさが変化していきます．そこで，ターゲットの音が聞こえている間は“ｖ”のキーを押し続けてください．

もし聞こえない場合は，キーを離していて下さい．」

被験者

聴力の正常な26～44歳の男性1名，女性4名の計5名．この内の4名は，以前にも同様の検知閾の測定実験に参加しており，心理物理学的実験には十分な経験を有していた．

2.3 結果と考察

2.3.1 聴覚フィルタとマスキング

測定結果の検討に入る前に，マスキングの基本的概念となる聴覚フィルタとそれによるマスキングの説明を簡単にまとめておく．

我々が聴く音には，低い周波数から高い周波数までさまざまな成分が含まれている．しかし，聴覚系では，それらの異なる周波数成分が必ずしもすべて一括して処理されているわけではない．マスキングや音の大きさなどのさまざまな実験結果から，聴覚末梢系には帯域が重なりあう帯域通過フィルタ群の存在することが仮定されている(Fletcher, 1940)．すなわち，各周波数成分はある限られた周波数帯域ごとに別々のフィルタに入力され，その上で処理が行なわれていると考えるのである．このフィルタは，現在では「聴覚フィルタ(auditory filter)」と呼ばれている(Moore, 1989)．

したがって，マスキングにおいては次のような現象が生じる．妨害音(マスカ)が広帯域であっても，そのエネルギー全てがマスキングに寄与するわけではない．ターゲットの音(信号音)の周りの限られた周波数範囲のエネルギーのみが影響するのである．(この周波数範囲は，「臨界帯域幅(critical bandwidth)」と呼ばれる．)したがって，マスカの帯域がその周波数範囲を越えると，マスカ全体のエネルギーが増加しても信号音の閾値はほとんど変化しなくなる(Fig.2.4)．すなわち，信号音の閾値は，その周波数を中心とする聴覚フィルタにおける，ある特定の信号対雑音比(S/N)に対応すると

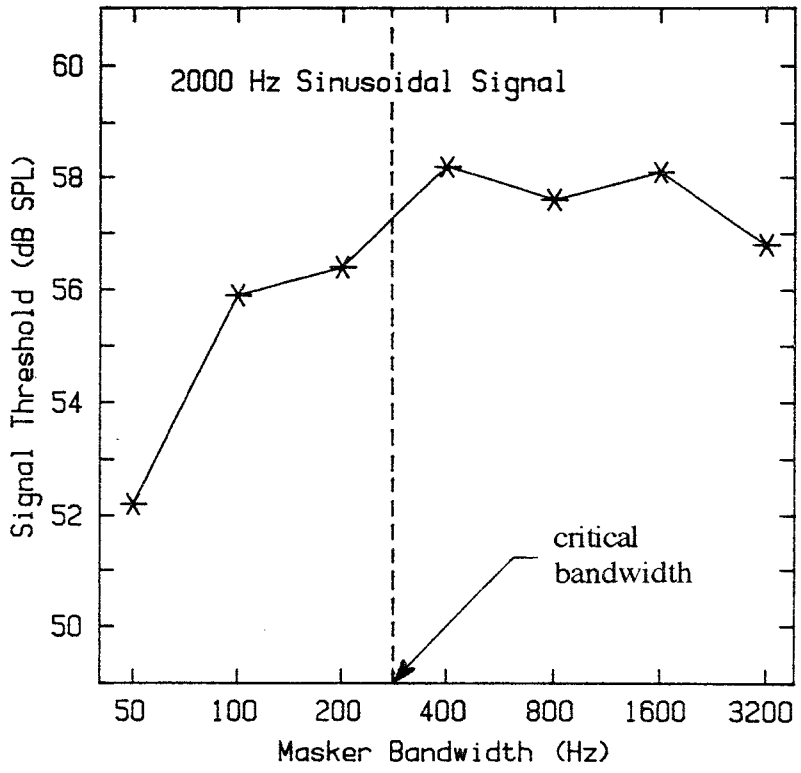


Fig.2.4 Threshold of a 2000 Hz sinusoidal signal plotted as a function of the bandwidth of a noise masker centered at 2000 Hz. Adapted from Schooneveldt and Moore (1989).

考えられる．この一連の仮定は，マスキングの「パワースペクトルモデル」(Patterson and Moore, 1986)と呼ばれる．

2.3.2 変調周波数と検知閾

変調周波数と検知閾の関係を，搬送周波数ごとにFig.2.5a～dに示す．縦軸は純音での閾値を基準とした時の，相対音圧レベルを示す．なお，AM音のレベルは，エネルギー平均値(AM音と等しい継続時間において，等しい総エネルギー量をもつ定常音のレベル)によって示す．これによって，物理的なエネルギー量の比較において，純音と同等に扱うことができる．

これを見ると，変調周波数によって検知閾に差のあることが分かる．どの中心周波数と変調度においても，変調周波数が1～4Hzの範囲で検知閾が低下しており，その変化幅は最大で約4dBに達している．一方，変調周波数が8Hz以上になると変調のない場合(変調周波数0Hz)とほぼ同じ閾値になり，変調の効果は認められない．

この現象は，従来の聴覚フィルタに基づくマスキングのモデルでは説明することができない．単に，聴覚フィルタ内のS/Nでマスキングの程度が決まるのであれば，変動の有無にかかわらず，検知閾は一定の値になるはずである．(変調周波数が最大の16Hzでも，上下の側帯波の周波数幅は32Hzであるので，AM音のエネルギーはすべて1臨界帯域内に収まる．したがって，この実験の刺激条件では，1つの聴覚フィルタ内でのS/Nを問題にすればよいことになる．)

Moore(1989)は，同様のマスキング状況において，連続音と断続音とでは被験者の方略が異なることを指摘している．すなわち，連続音の検出課題では，被験者は広帯域雑音による聴覚神経系の興奮パターンの中に，ターゲットとなる音が加わったことによって生じた興奮パターンの“小さな山”を探し出さなければならない．

一方，断続音では，ターゲットの含まれている時と含まれていない時の興奮パターンの“違い”を検出するだけでよい

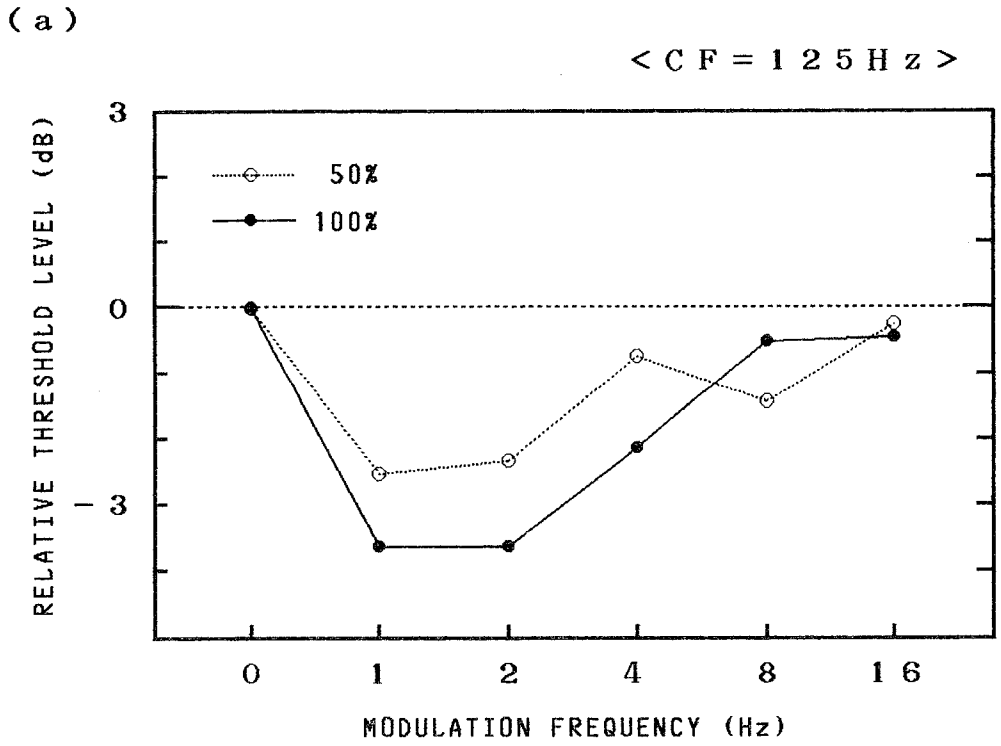
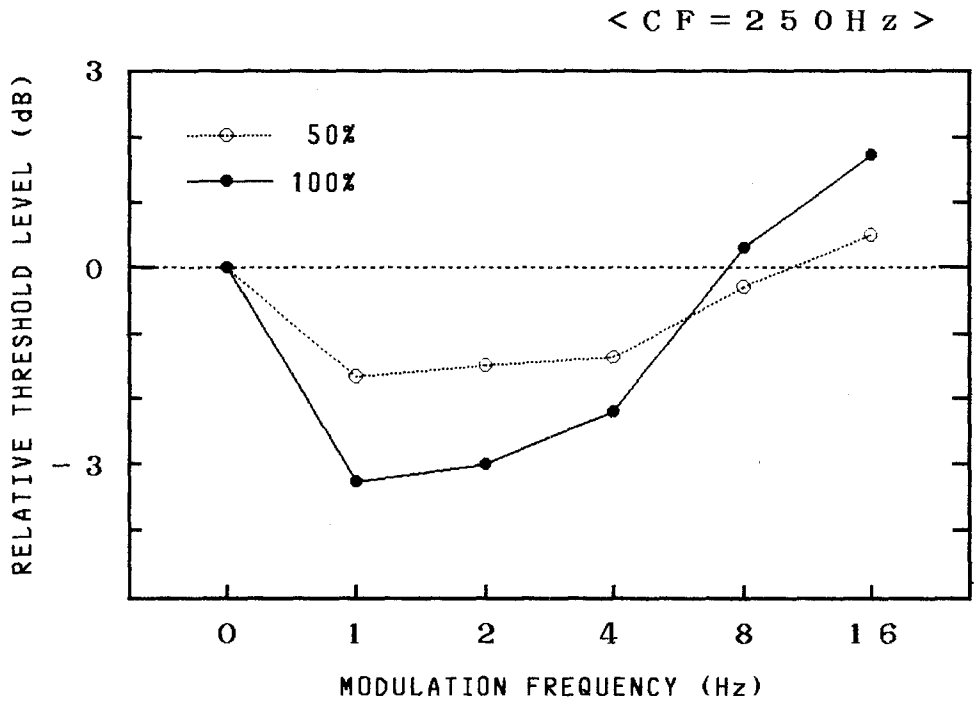


Fig.2.5 Threshold for detecting amplitude-modulated tone in broad-band noise as a function of modulation frequency. Carrier frequency: (a) 125 Hz, (b) 250 Hz, (c) 500 Hz, (d) 1 kHz.

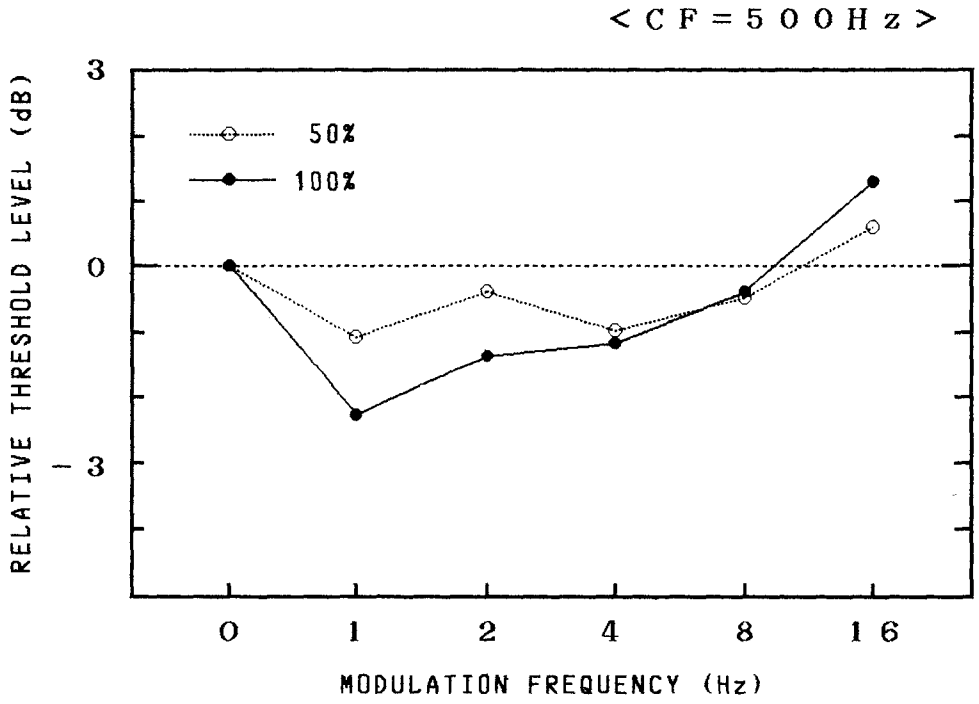
(continued)

(b)


< C F = 2 5 0 H z >
3
0
− 3
RELATIVE THRESHOLD LEVEL (dB)
50%
100%
0
1
2
4
8
16
MODULATION FREQUENCY (Hz)

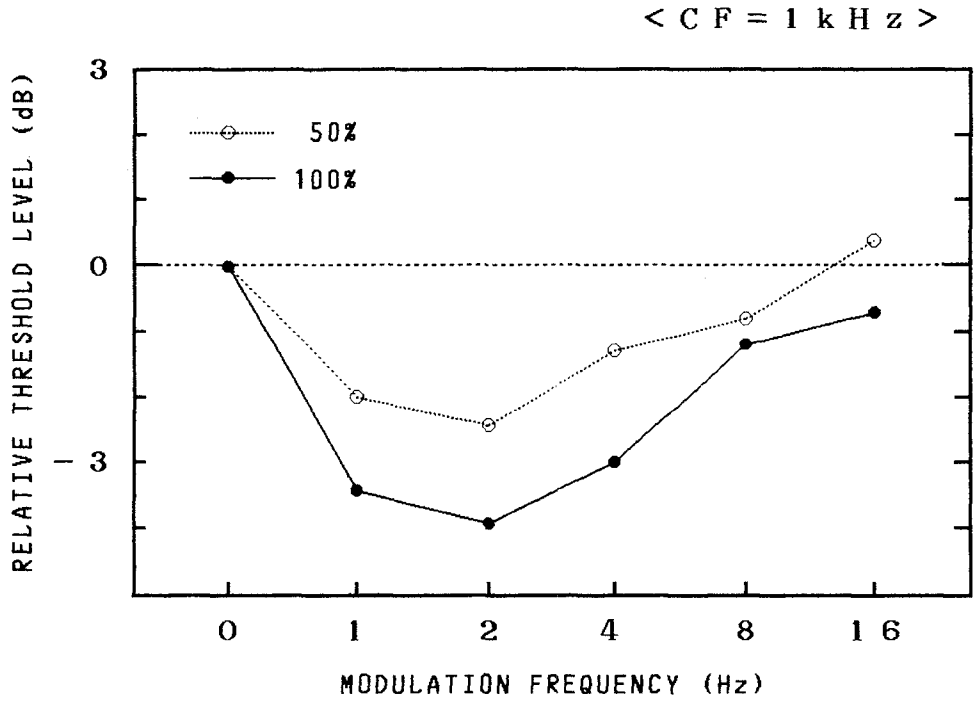
(continued)

(C)


< C F = 5 0 0 H z >
RELATIVE THRESHOLD LEVEL (dB)
3
0
− 3
50%
100%
0
1
2
4
8
16
MODULATION FREQUENCY (Hz)

(continued)

(d)


< C F = 1 k H z >
RELATIVE THRESHOLD LEVEL (dB)
3
0
− 3
50%
100%
0
1
2
4
8
16
MODULATION FREQUENCY (Hz)

のである．したがって，断続音の方が検知閾は下がる傾向が見られる．プロフィール分析(Green，1988)に見られるスペクトルパターンの弁別の鋭さから推測されるように，このような興奮パターンの違いの検出が聴覚系にとって容易であることは明らかである．

この現象の実際の測定例が，Nambaらによって報告されている(Namba，Kuwano，Kinoshita and Kurakata，1992)．彼らは，実験1と同様の広帯域雑音中における周波数変調音(Frequency-Modulated tone：FM音．第1章，式(2)．)の検知閾を，極限法と調整法の2つの方法で測定した．ただし，調整法の場合，被験者は検出すべきFM音を，手元のスイッチによって自由にON/OFFできるものとした．その結果，調整法における検知閾は，極限法の場合よりも約10dB低くなることが示された(Table 2.2)．これは，極限法においてはFM音が連続的に呈示されるのに対して，調整法では自由に音を断続させることができたためと考えられる．この音の時間的変化が手がかりとなって，FM音がより検出しやすくなったのであろう．

しかし，そのような被験者の方略に違いがあるとしても，それがなぜ変調周波数1～4Hzで最も有効に働くのか，なぜ8Hz以上では純音(すなわち，連続音)と閾値が変わらなくなるのかを説明することができない．さらに根本的な問題は，そのような時間的変化を手がかりとした判断を，そもそもなぜ聴覚系が得意とするのかという点である．これらの問題については，次の実験2の結果と併せて再度検討することとする．

2.3.3 変調度と検知閾

Fig.2.5a～dを見ると，変調周波数1～4Hzの範囲での検知閾の低下の程度は，変調度100%の方が変調度50%の場合よりも大きい．これは，変調度の高い方が検知され易いことを示している．一方，変調周波数が8Hz以上になると，変調

Table 2.2 Mean values of the threshold for detecting frequency-modulated tone in broad-band noise by the method of limits and of adjustment. From Namba, Kuwano, Kinoshita and Kurakata (1992).

CF (Hz)	Threshold by the method of limits (dB SPL)	Threshold by the method of adjustment (dB SPL)
3000	7.1	−7.0
1000	25.7	9.7
500	28.4	17.9
250	31.3	22.1
125	44.3	29.4

度による違いはほとんど見られなくなる．

この変調度の増加による閾値の低下は，レベル変動そのものが検出の手がかりとなっていることを裏付けている．変調度が50％と100％のＡＭ音では，エネルギー平均値が同じであっても，変調度の高い方が振幅の最大値と最小値の差が大きい(Ｆｉｇ．２．１を参照)．したがって，変調度100％の条件の方が，ＡＭ音による神経の興奮パターンの時間的変化量が大きくなる．これが手がかりとなって，検出が容易となった(すなわち，検知閾が低くなった)のであろう．

3.実験2　－AM音を重畳させた広帯域雑音の大きさ－

3.1 目的

前節の実験1の結果から，変調周波数が1～4HzのAM音では，広帯域雑音中での検知閾が相対的に低くなることが明らかとなった．検知閾が低くなるということは，同じレベルでもそのAM音はより大きく聞こえる可能性を暗示している．

そこで，この点を明らかにするために，実験1と同じAM音を用いて，AM音を重畳させた広帯域雑音の大きさを検討する．

3.2 方法

刺激

実験1の結果から顕著な傾向を示したものとして，AM音には搬送周波数125，250，500，1000Hzの4種類，変調周波数4，16Hzの2種類，変調度50，100%の2種類の計16種類とそれぞれの搬送周波数の純音4種類を選んだ．

次に，これらのAM音に，実験1と同じ40dBAの広帯域雑音を加えた．実験1でのそれぞれのAM音の検知閾をS/N＝0dBとし，0，5，10，15，20の5種類のS/Nの条件を設定した．ただし，ここでSはAM音のエネルギー量，Nは広帯域雑音のエネルギー量であり，ともに各AM音の搬送周波数を中心とする1/3オクターブバンド内におけるエネルギー平均値をとった．

また，AM音を含まない広帯域雑音のみの条件も，40，45，50，55dBAの4種類用意した．したがって，刺激条件は｛4(CF)×2(MF)×2(DM)＋4(純音)｝×5(S/N)＋4(雑音のみ)＝104種類である．実験に用いた刺激条件をTable 2.3に示す．

装置

実験装置の概略をFig.2.6に示す．あらかじめDATに録音

Table 2.3 Amplitude-modulated tones used in Experiment 2.

No.	CF (Hz)	MF (Hz)	DM (%)	S/N (dB)	No.	CF (Hz)	MF (Hz)	DM (%)	S/N (dB)
1	125	0	0	0	51	500	0	0	0
2	125	0	0	5	52	500	0	0	5
3	125	0	0	10	53	500	0	0	10
4	125	0	0	15	54	500	0	0	15
5	125	0	0	20	55	500	0	0	20
6	125	4	50	0	56	500	4	50	0
7	125	4	50	5	57	500	4	50	5
8	125	4	50	10	58	500	4	50	10
9	125	4	50	15	59	500	4	50	15
10	125	4	50	20	60	500	4	50	20
11	125	4	100	0	61	500	4	100	0
12	125	4	100	5	62	500	4	100	5
13	125	4	100	10	63	500	4	100	10
14	125	4	100	15	64	500	4	100	15
15	125	4	100	20	65	500	4	100	20
16	125	16	50	0	66	500	16	50	0
17	125	16	50	5	67	500	16	50	5
18	125	16	50	10	68	500	16	50	10
19	125	16	50	15	69	500	16	50	15
20	125	16	50	20	70	500	16	50	20
21	125	16	100	0	71	500	16	100	0
22	125	16	100	5	72	500	16	100	5
23	125	16	100	10	73	500	16	100	10
24	125	16	100	15	74	500	16	100	15
25	125	16	100	20	75	500	16	100	20
26	250	0	0	0	76	1000	0	0	0
27	250	0	0	5	77	1000	0	0	5
28	250	0	0	10	78	1000	0	0	10
29	250	0	0	15	79	1000	0	0	15
30	250	0	0	20	80	1000	0	0	20
31	250	4	50	0	81	1000	4	50	0
32	250	4	50	5	82	1000	4	50	5
33	250	4	50	10	83	1000	4	50	10
34	250	4	50	15	84	1000	4	50	15
35	250	4	50	20	85	1000	4	50	20
36	250	4	100	0	86	1000	4	100	0
37	250	4	100	5	87	1000	4	100	5
38	250	4	100	10	88	1000	4	100	10
39	250	4	100	15	89	1000	4	100	15
40	250	4	100	20	90	1000	4	100	20
41	250	16	50	0	91	1000	16	50	0
42	250	16	50	5	92	1000	16	50	5
43	250	16	50	10	93	1000	16	50	10
44	250	16	50	15	94	1000	16	50	15
45	250	16	50	20	95	1000	16	50	20
46	250	16	100	0	96	1000	16	100	0
47	250	16	100	5	97	1000	16	100	5
48	250	16	100	10	98	1000	16	100	10
49	250	16	100	15	99	1000	16	100	15
50	250	16	100	20	100	1000	16	100	20
101	Noise		55dBA		103	Noise		45dBA	
102	Noise		50dBA		104	Noise		40dBA	

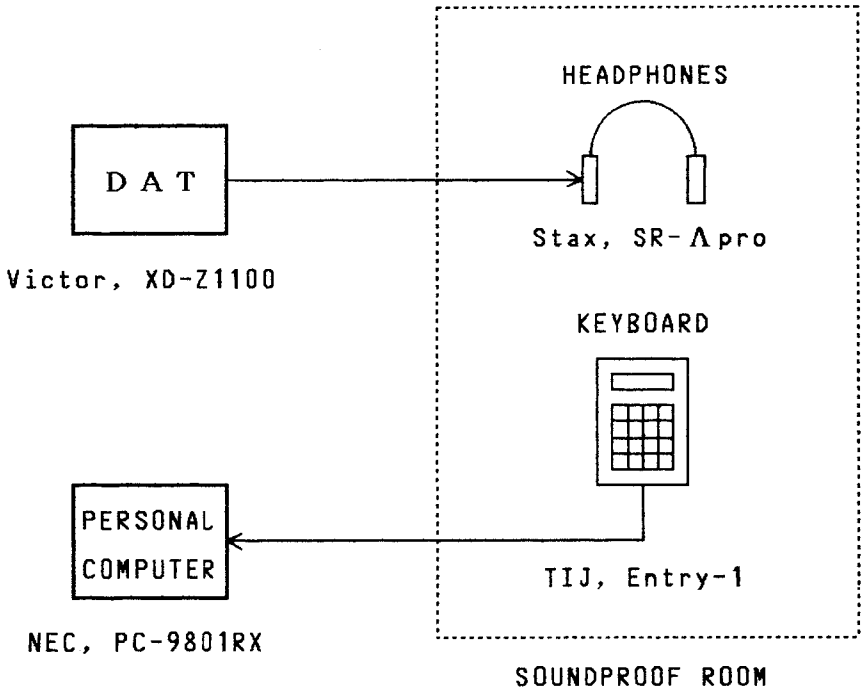


Fig.2.6 Block diagram of the apparatus used in Experiment 2.

しておいた刺激を，DATデッキ(Victor，XD-Z1100)から再生し，ヘッドホン(Stax，SRD-Xpro + SR-Λpro)を通じて，防音室(大阪大学教養部心理学実験室)内の被験者の両耳に呈示した．

被験者の反応は，パーソナルコンピュータ(NEC，PC-9801RX)に接続された拡張キーボード(日本テクニカル工業，Entry-1)よりコンピュータに取り込んだ．

手続き

マグニチュード推定法により，音の大きさの判断を求めた．まず，上記104種類の音を3秒間ずつ呈示した．刺激の呈示順序はランダムにした．そして，被験者は音を聞き終わった後，その音の大きさに対応すると思われる正の数を割り当て，手元のキーボードで入力した．判断のための時間は10秒とした．

各被験者は，6試行の練習の後，全刺激条件につき2回ずつ判断を行なった．

教示

以下の教示を用紙に印刷し，被験者に呈示した：

「これからさまざまな音を3秒間ずつお聞かせします．そこで，音を聞き終った後，その音全体の大きさに対応すると思われる正の数を判断して答えて下さい．負の数や0を用いてはいけません．正の数であれば，整数でも小数でもどのような数を用いても構いません．音は一度しか呈示されません．また，10秒経つと次の音が出ますので，遅れないように判断して下さい．」

被験者

聴力の正常な21～45歳の男性8名，女性12名の計20名．

3.3 結果と考察

3.3.1 被験者の判断の信頼性

マグニチュード推定法では，音の大きさを直接(他の音との比較ではなく)数値で判断するため，またその数値の扱いが各被験者に委ねられているため，被験者の判断の信頼性をまず確認する必要がある．

そこで，各被験者ごとに2回のマグニチュード推定値の相関係数を求めた．相関係数の一覧をTable 2.4に示す．これによると，刺激のレベルの変化幅があまり大きくないため，必ずしも全被験者を通して高い相関は認められなかった．しかし，全被験者の推定値の幾何平均から求めた2回の判断の相関係数は.930と高く，統計的には有意な相関があると言える(t=25.55，df=102，p<.01)．したがって，被験者の判断は一貫性のある信頼できるものであり，以下，20名の被験者の各2回の推定値の幾何平均をもとに検討を進めていく．

3.3.2 音の大きさの比較

音の大きさのレベルについて

音の大きさのレベル(もしくは，ラウドネスレベル)とは，ある音について，正常な聴力を持つ人が，その音と同じ大きさに聞こえると判断した1000Hzの純音の音圧レベル(JIS Z 8106-1988，No. 1055)である．単位記号にはphonを用いる．

このように，音の大きさのレベルは1000Hzの純音に基づいて定義される．そのため，目的とする複合音の大きさを求めるには，1000Hzの純音といちいち心理学的な比較実験を行なわなければならない．そこで，純音の強さと大きさの関係，周波数と大きさの関係，臨界帯域やマスキングについての知見などを基礎として，任意の複合音の物理的な分析データから音の大きさのレベルを予測する方法の開発が試みられてきた(泉，1984)．

ここで取り上げるZwickerの方法は，Stevensの方法と共

Tabel 2.4 Correlation coefficients between two magnitude estimations of the subjects in Experiment 2.

Subj.	*r*
1	.618
2	.632
3	.659
4	.612
5	.357
6	.512
7	.372
8	.835
9	.813
10	.649
11	.229
12	.507
13	.268
14	.811
15	.474
16	.792
17	.425
18	.551
19	.387
20	.433
All Subj.	.930

にISO Standard 532-1975(E)に採用されているものである．この方法では，まず目的とする複合音を1/3オクターブ幅に分割し，それぞれの音圧レベルを測定する．そして，その値をFig.2.7に示すようなグラフにプロットし，全体の面積から音の大きさのレベルを求めるのである．この方法は非常に手間のかかるものであるが，現在ではパソコン用の計算プログラムも作成されている(Zwicker, Fastl, Widmann, Kurakata, Kuwano and Namba, 1991)．以下，このZwickerの方法による音の大きさのレベルをLL_zと略記する．

音の大きさのレベルの算出

被験者のマグニチュード推定値をもとに，各刺激に対応する音の大きさのレベルを算出した．

この換算には，4つのレベルの広帯域雑音に対するマグニチュード推定の関数を用いることにする．まず，1/3オクターブバンドごとの音圧レベルを測定し，各広帯域雑音のLL_zを算出した．LL_zとマグニチュード推定値の関係と，最小自乗法による回帰直線をFig.2.8に示す．相関係数は.978と非常に高く，べき関数の当てはまりのよいことが分かる．そこで，これを基準関数として各刺激に対するマグニチュード推定値から音の大きさのレベルに換算し，主観的等価点(Point of Subjective Equality：PSE)とした．

LL_zとPSEの比較

広帯域雑音と同様に，実験で用いた全刺激についてPSEとLL_zを算出した．この時，1/3オクターブバンドのレベルとして，エネルギー平均値を用いた．(音の大きさを推定するZwickerのこの方法は，本来，定常的な(時間的変動を伴わない)音に対して適用されるものである(ISO532-1975(E), 1975)．非定常音のLL_zの算出にエネルギー平均値を用いることの妥当性はKuwanoらによって検討されており，主観量と良い対応の見られることが示されている（Kuwano,

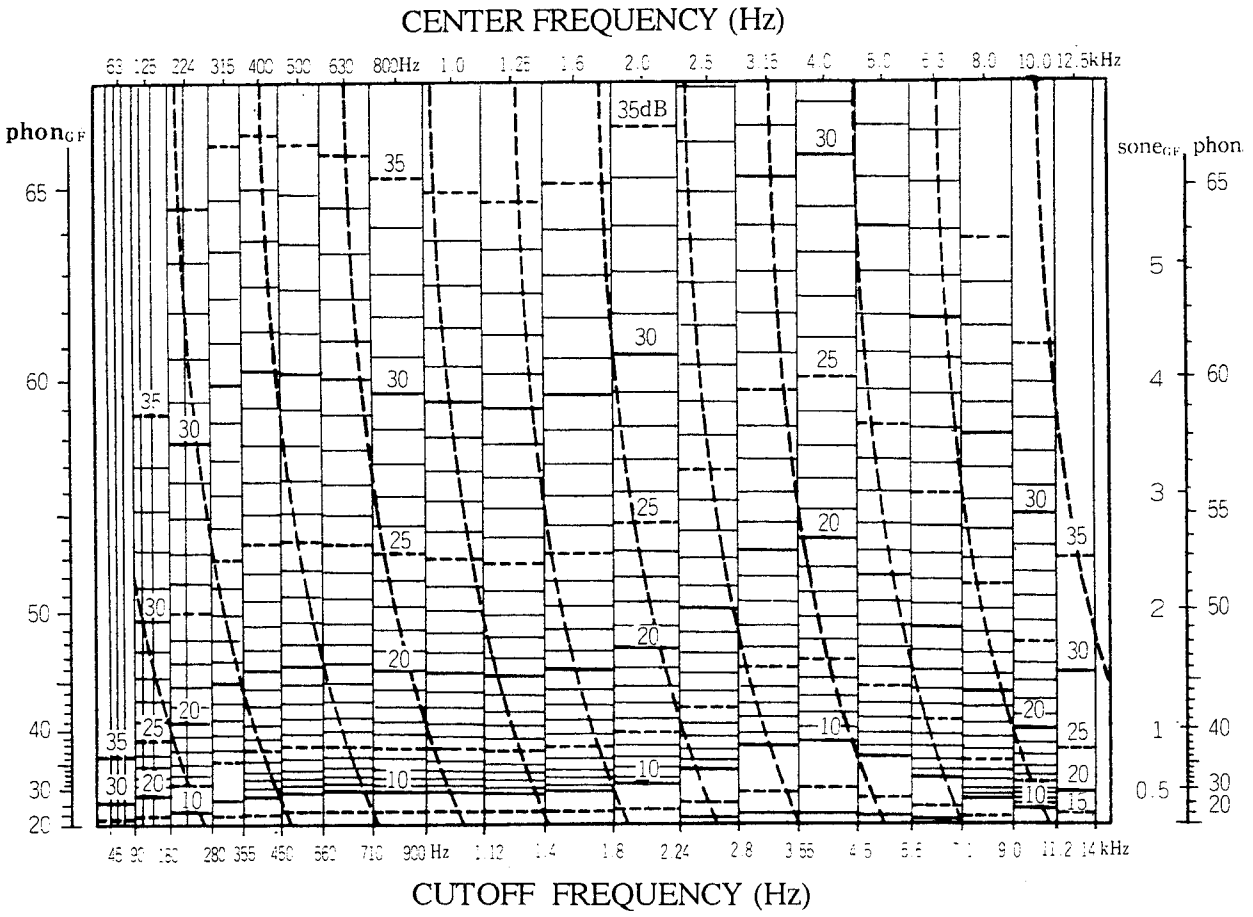


Fig.2.7 An example of the graph for calculating loudness level according to ISO 532B.

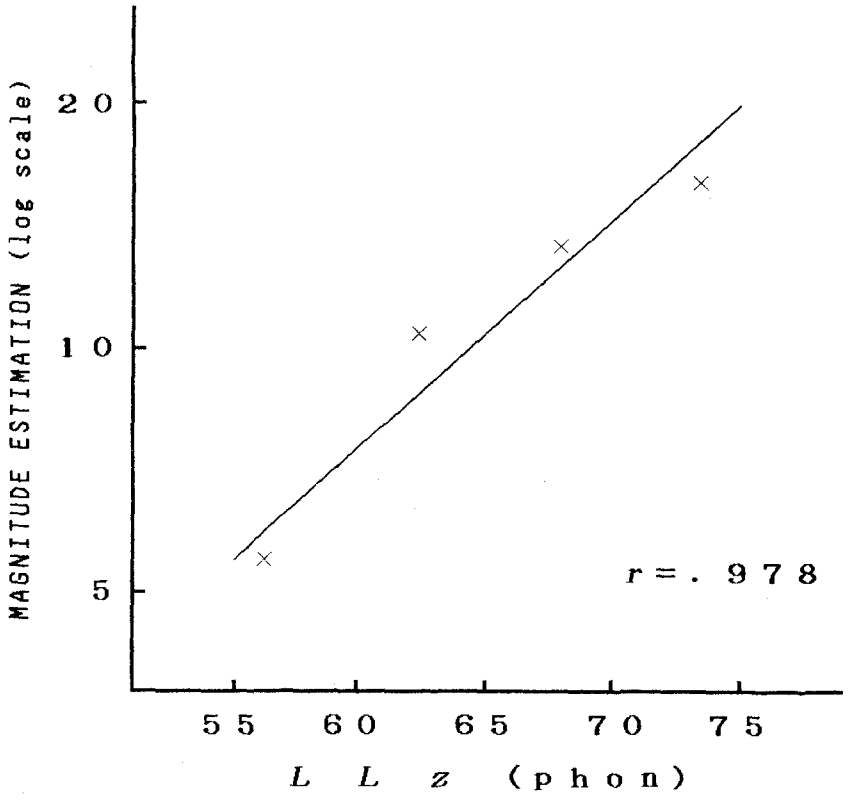


Fig.2.8 Relation between *LLz* and PSE of the four broad-band noises.

Namba and Miura, 1989).

全刺激のPSEとLLzの関係をFig.2.9に示す．これを見ると，両者の間には相関係数.945と非常に高い相関のあることが分かる．ただし，AM音を含んだ刺激では，すべてPSEはLLzより値が小さくなっている．このように，広帯域雑音のAM音が重畳すると，広帯域雑音のみの場合と比べて，その大きさは全体的に過小評価されるようである．

これと同様の傾向は，低域通過雑音に純音を重畳させた場合や(Hellman, 1984)，今回の実験と同様の広帯域雑音にFM音を重畳させた場合(Namba, Kuwano, Kinoshita and Kurakata, 1991, 1992)にも見られている．それによると，S/N(広帯域雑音に対する，純音もしくはFM音のエネルギー比)が高くなるにしたがって，音の大きさが相対的に小さく評価されることが示されている．

今回の実験で見られた過小評価も，このような刺激条件における一般的な傾向と考えられる．そこで，以下の考察では，この全体的な過小評価自体は特に問題にしないこととする．

変調周波数と音の大きさ

LLzは1/3オクターブバンド内でのエネルギー量から音の大きさを推定する方法である．したがって，バンド内のエネルギー量が同じであれば，レベル変動の有無にかかわらず推定値はすべて同じとなる．そこで，レベル変動が音の大きさに及ぼす影響を明らかにするために，変調周波数と過小評価量(PSE－LLz)の関係をFig.2.10a～eに示す．

まず，S/N＝0，5dBでは，どの変調周波数でも過小評価量に一貫した違いは見られない(符号つき順位和検定，$p>.10$)．この条件では，AM音のレベルは低いためその影響は小さく，これは予想される結果である．

しかし，S/Nが大きくなると，変調周波数4Hzでの過小評価量は減少(すなわち，“過大”評価)される傾向が見られるようになる．特に，AM音のレベルの最も高いS/N＝20dBの

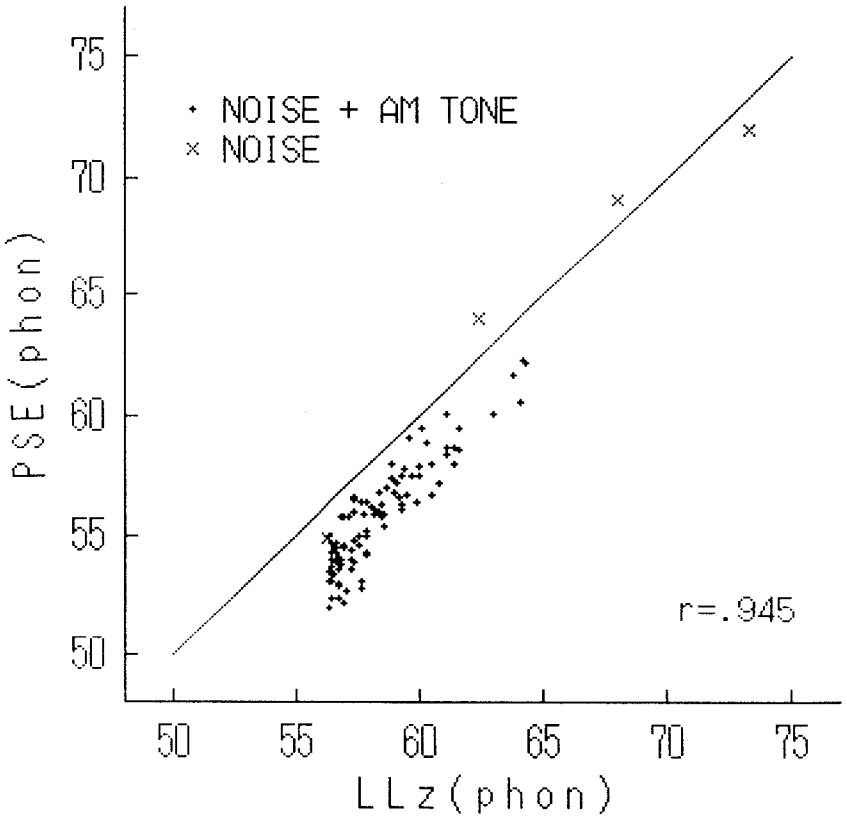


Fig.2.9 Relation between *LLz* and PSE of the four broad-band noises and amplitude-modulated tones mixed with broad-band noise.

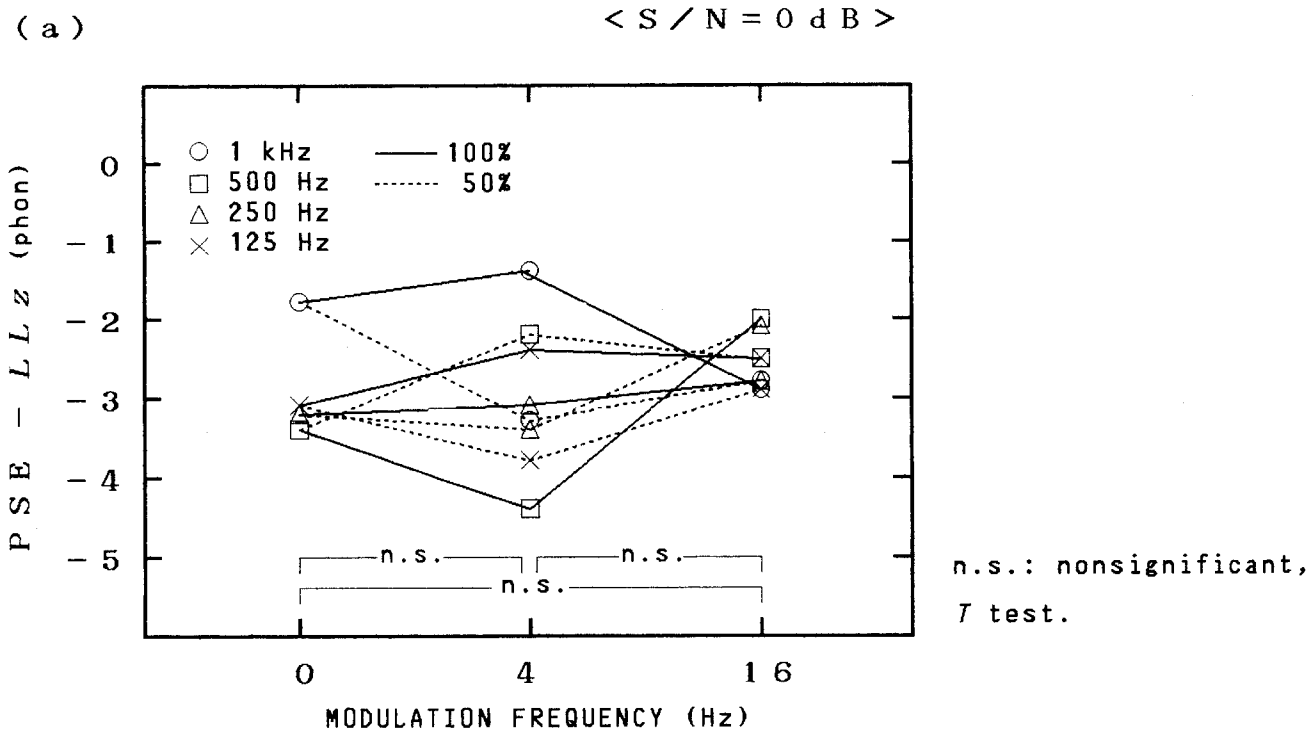
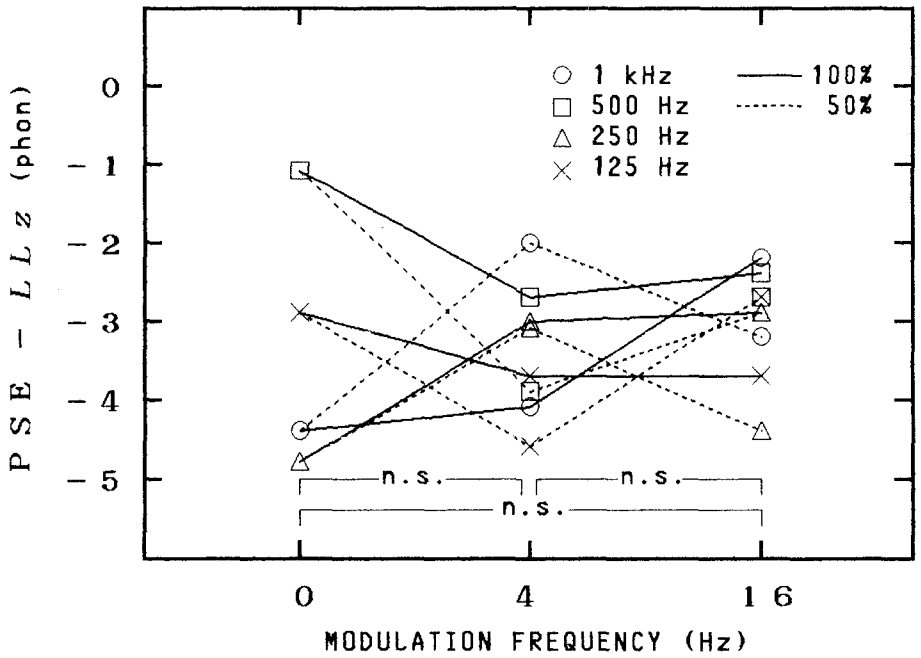


Fig.2.10 Underestimation of the loudness of amplitude-modulated tones mixed with broad-band noise as a function of modulation frequency.S/N: (a) 0 dB, (b) 5 dB, (c) 10 dB, (d) 15 dB, (e) 20 dB.

(continued)

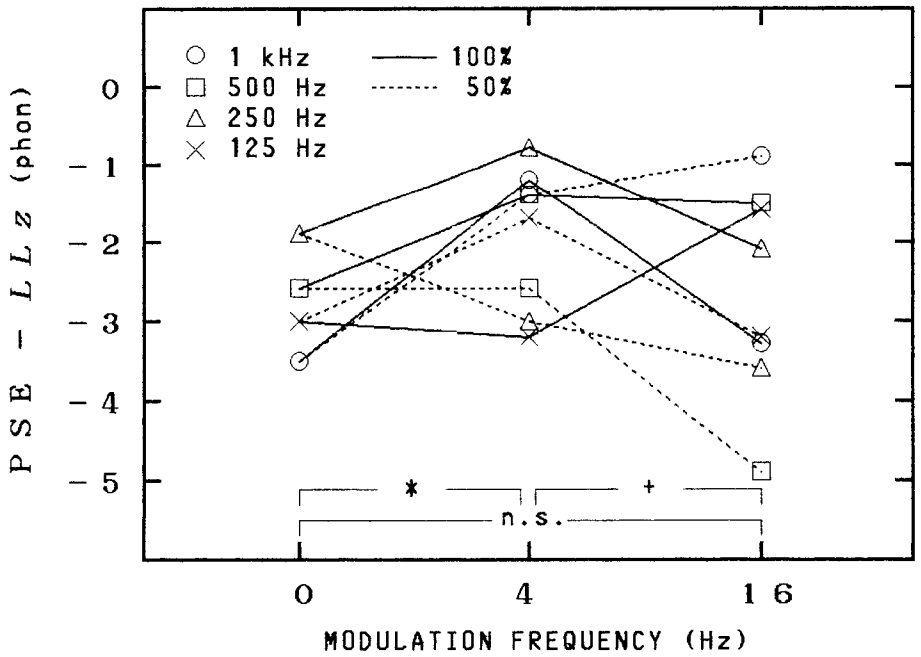
(b) <S/N = 5 dB>



n.s.: nonsignificant, *T* test.

(continued)

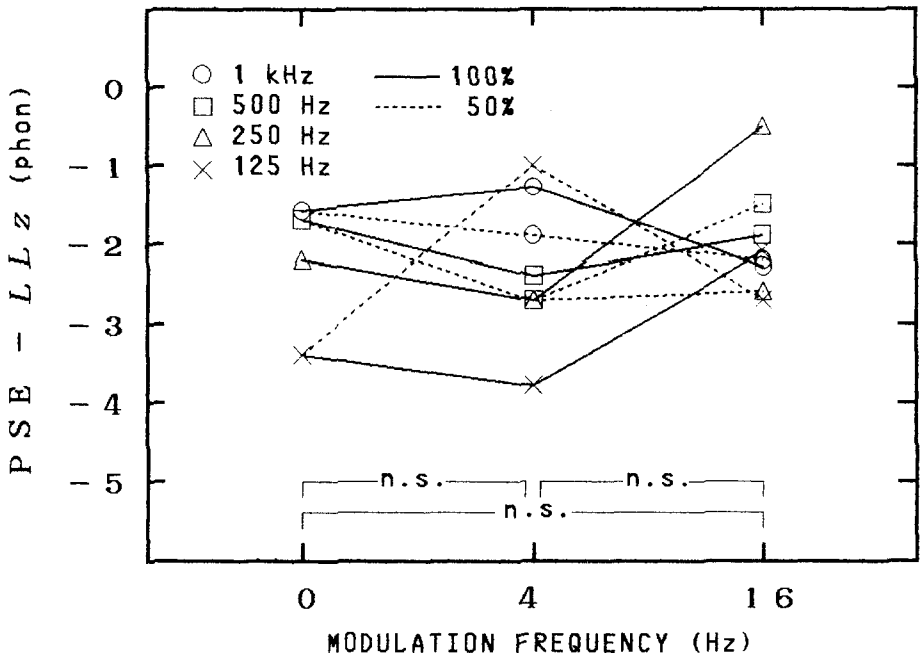
(c) <S/N=10dB>



+ $p<.10$, * $p<.05$,
n.s.: nonsignificant,
T test.

(continued)

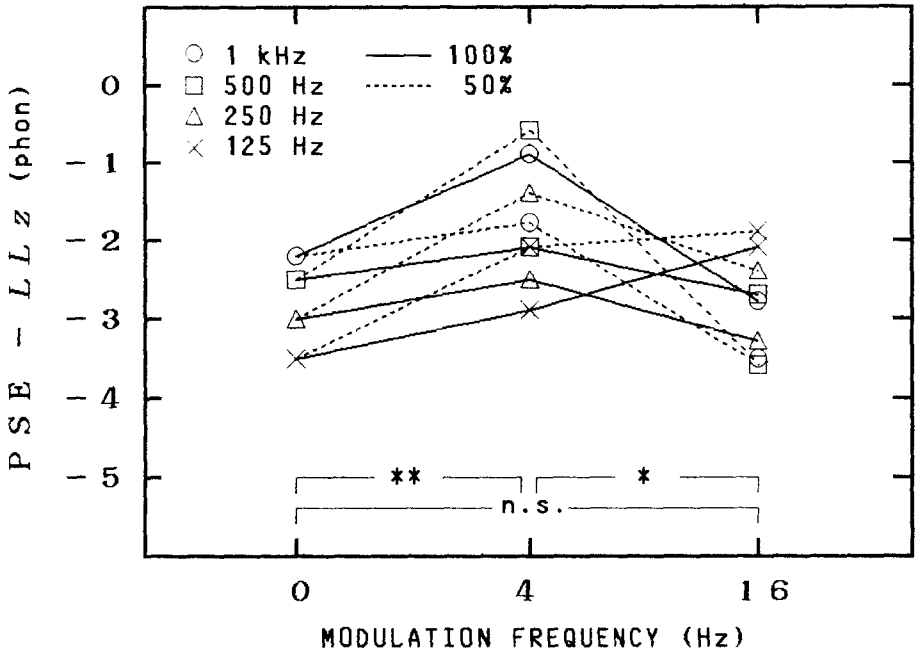
(d) <S/N=15dB>



n.s.: nonsignificant, *T* test.

(continued)

(e) <S/N=20dB>



* $p<.05$, ** $p<.01$,
n.s.: nonsignificant,
T test.

条件では，変調周波数の違いによる差は統計的にも有意である（符号つき順位和検定，0Hz 対 4Hz：$T=0$，$n=8$，$p<.01$，4Hz 対 16Hz：$T=5$，$n=8$，$p<.05$）．

一方，変調周波数16Hzでは，中心周波数125Hzの場合を除いて，過小評価量は変調周波数0Hzの条件と同程度に戻っている（S/N＝20dB：符号つき順位和検定，0Hz 対 16Hz：$T=18$，$n=8$，$p>.10$）．この変調周波数では，どのS/Nの条件でも変調周波数0Hzの場合と有意な差は見られず，変調の影響は認められない．

したがって，変調周波数4Hzの場合には，純音や変調周波数16Hzの場合に比べて，大きさが相対的に大きく評価される傾向があるようである．

レベル変動音に対するZwickerの方法の適用可能性

先にも述べたように，音の大きさを推定するZwickerのこの方法は，本来，定常的な(時間的変動を伴わない)音に対して適用されるものである．そこで，上記の結果のように，レベル変動を含む音に対しては，その大きさをうまく推定できない場合がある．すなわち，変調周波数が16Hzの場合は純音の場合と大きさはほとんど変わらないので，おそらく変調周波数が16Hzかそれ以上高い場合は変調の影響は無視でき，定常音として扱うことができるであろう．しかし，変調周波数が4Hz付近の場合，大きさがより大きく評価される傾向がある．

もっとも，今回の結果では，変調周波数による音の大きさの変化は，最大でも3phon程度である．ISO(国際標準化機構)の規格には，Zwickerの方法と並んでStevensの方法が採用されている．この両者の計算値の間でも，一般の騒音で1～2phon，最大で5phonの差が生じることがある(ISO532-1975(E)，1975；泉，1984)．したがって，3phon程度の推定値の差は，実用に際してはほとんど問題とならないかも知れない．

ただし，ここで用いた刺激は，L_{Aeq}(等価騒音レベル)が最大でも約50dBAと比較的小さく，しかも広帯域雑音の中にAM音が1つ混じっただけの，変動としてはあまり大きなものではない．音の「変動感」は，音圧レベルの上昇に伴って急激に増加するので(Zwicker and Fastl, 1990)，今回の実験刺激よりも大きな変動を伴う音の場合には，過大評価量がさらに増加する可能性がある．したがって，実用に際しては，4Hz付近の変動を含む音の大きさの評価には特に注意する必要があると言えよう．

4．全体的考察

4.1 変動音の知覚に及ぼす変調周波数の影響

以上の実験結果から，変調周波数1～4HzのAM音では，純音や変調周波数8Hz以上の場合と比べ，広帯域雑音中での検知閾が低くなることが明らかとなった．また，変調周波数4HzのAM音を含む広帯域雑音は，その大きさがより大きく評価される傾向が見られた．このように，レベル変動を含む音，特に変調周波数4Hz付近の音に対して，聴覚系は定常音の場合とは異なる反応を示すようである．

そもそも，聴覚系は入力情報の“変化”の分析を得意とする(Moore，1989)．このことは，多くの現象から推察される．例えば，第1章で述べたように，複合音のある周波数成分の振幅や周波数を変化させると，それまで聴き分けられなかったその成分が浮き上がって聞こえるようになる．音楽で，独奏者(または，独唱者)が特に強くビブラートをかける一つの理由は，この効果にある．ビブラートをかけることによって，伴奏から自分の演奏(もしくは，声)を浮き立たせることができるのである(Bregman，1990)．

また，Raschは，音の立ち上がり時刻の違いによってマスキングが大きく減少することを報告している(Rasch，1978)．すなわち，ターゲットが，マスカと同時に立ち上げた場合には検出できない低いレベルでも，ターゲットの立ち上がり時刻をわずかに(30ms)早めることで検出できるようになるのである．

このような音の時間的変化の知覚は，聴覚情景分析において重要な手がかりとなる．すなわち，定常的な音の中で変動を伴う成分があれば，または他とは異なる変動の仕方を示す成分があれば，それらは別の音源から発したものであると解釈することができる．また，時間的にずれて別の音が聞こえ始めた場合は，何か新しい出来事が身の回りで発生したことを知る手がかりとなるのである(Bregman，1990)．

事象の変化の知覚は，生存にとってきわめて重大な課題である．したがって，我々の聴覚系において，変化の知覚のための機能が進化・発達してきていると仮定しても決して不自然ではないであろう．

ただし，時間的変化にもさまざまなパターンがあり得る．問題は，実験1，2の結果に見られるように，さまざまな変調周波数の中で，特に1～4Hzの範囲で異なる反応が見られたのは何故であろうかという点である．以下に，この点について考察する．

変調音の知覚の研究例

AM音において，変調周波数1～4Hz付近で特異的な反応が得られた研究例が他にもいくつか見られる．その例を以下に挙げる．

a) 時間的変調度伝達関数

変調周波数と変調の検知閾との関数は，「時間的変調度伝達関数(Temporal Modulation Transfer Function：TMTF)」と呼ばれる．この関数は，振幅の時間的変化に対する聴覚系の感度を反映したものと考えられる．

TMTFの例をFig.2.11に示す(Viemeister，1979)．この図では，縦軸が変調の“浅さ”を示しており，上方にいくほど検知閾が小さい，すなわち変調に対して敏感であることを示す．3本の曲線は，Zwicker(1952)，Riesz(1928)，Viemeister(1973)の結果である．すべて1kHzの正弦波を搬送波とし，Zwickerのデータは正弦波変調の検知閾，RieszとViemeisterのデータは，周波数のわずかに異なる別の正弦波でうなりを生じさせ，うなりの検知閾を求めたものである．

この図によると，独立に行なわれた3つのどの測定でも，変調周波数が1～4Hzの範囲で検知閾が小さく，4Hzで最小となっている．これは，その周波数の変調に対する聴覚系

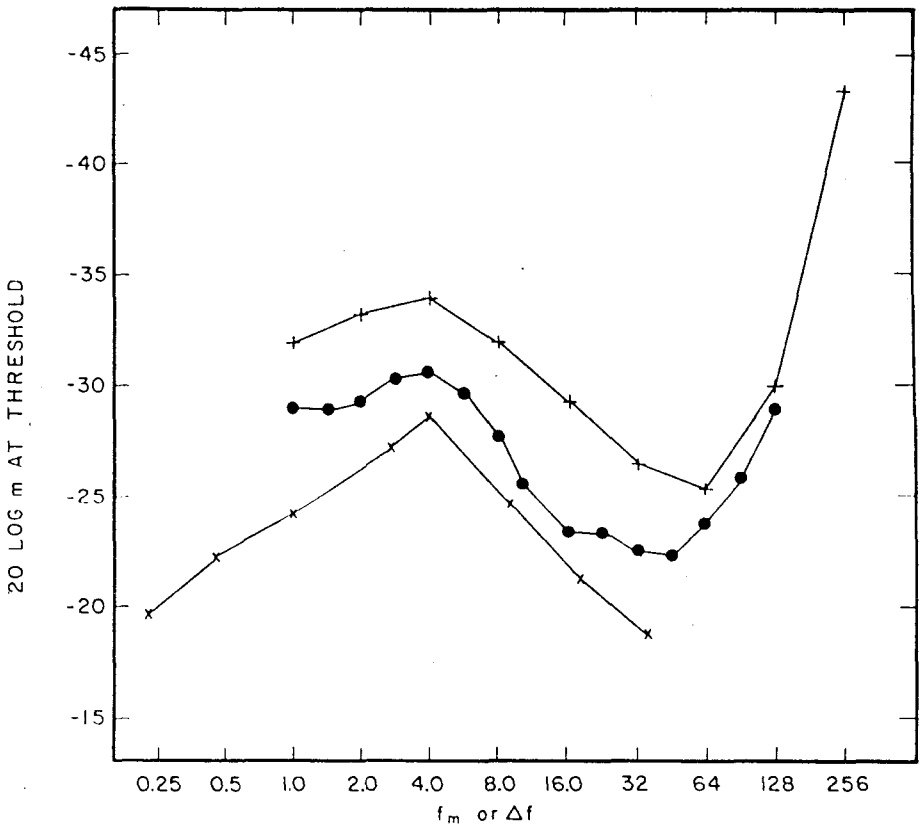


Fig.2.11 Temporal modulation transfer functions obtained with 1 kHz continuous carriers. Data from Zwicker (1952, denoted by +), Riesz (1928, ×) and Viemeister (1973, ●). From Viemeister (1979).

の感度が特に高いことを示すものである．(60Hz以上で再び関数が上昇しているのは，被験者が側帯波を検出できるようになるためである(Viemeister, 1979)．したがって，変調そのものに対する感度を直接反映したものとは言えない．)

b) 変動感

変調音はさまざま知覚的印象を引き起こすが，その一つとして「変動感(fluctuation strength)」が挙げられる．これは，変調周波数がおよそ20Hz以下の変調音において生じる感覚で(Terhardt, 1968)，“音が変化している印象”とでもいうべきものである．

変調周波数と変動感との関係をFig.2.12に示す(Zwicker and Fastl, 1990)．ここでは，3種類の音について変動感の大きさが示されている．それによると，変調の種類(AMかFMか)や搬送波の種類(正弦波か広帯域雑音か)にかかわらず，いずれも変調周波数4Hz付近で変動感は最大となっており，1Hz以下や8Hz以上では変動感が小さくなっている．

c) ノイジネス

ノイジネス(noisiness)とは，音そのものに付随した不快感，音色の悪さなどを指す用語である．これに対応する日本語はまだ確定しておらず，「やかましさ」，「騒々しさ」，「喧噪感」などの用語が用いられている(音響用語辞典，1988)．

広帯域雑音に変調音を重畳させた刺激に対するノイジネスの判断の結果をFig.2.13a，bに示す．この図では，下方にいくほどノイジネスは大きいことを示す．これによると，搬送周波数500Hzと2000Hzのいずれの場合も，AM音における変調周波数5Hzで最もノイジネスは大きくなっている．

ただし，ノイジネスが聴覚系の感度を直接反映したものとは言えないかも知れない．しかし，等ノイジネス曲線(Fig.

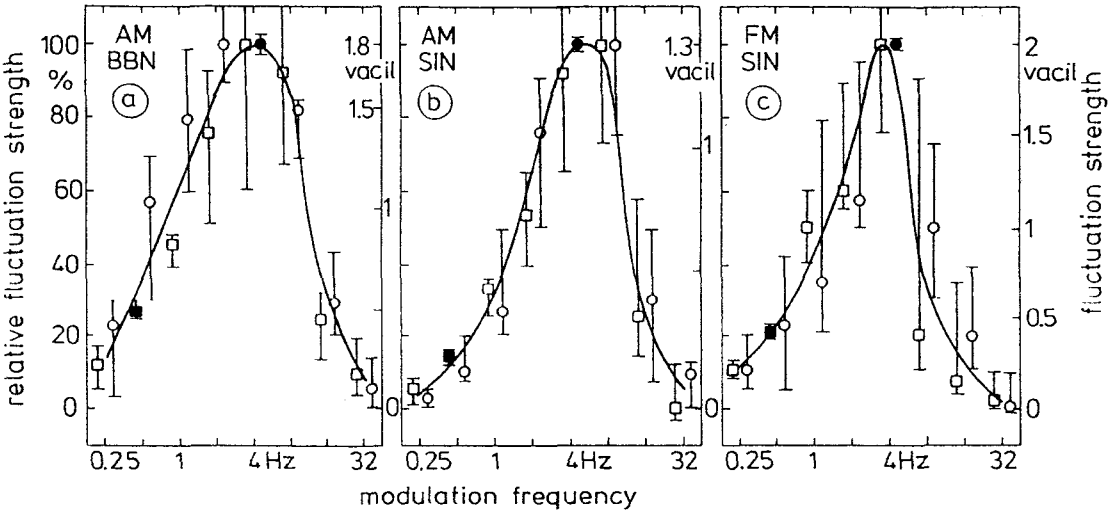


Fig.2.12 Fluctuation strength of three modulated sounds as a function of modulation frequency From Zwicker and Fastl (1990).

(a)

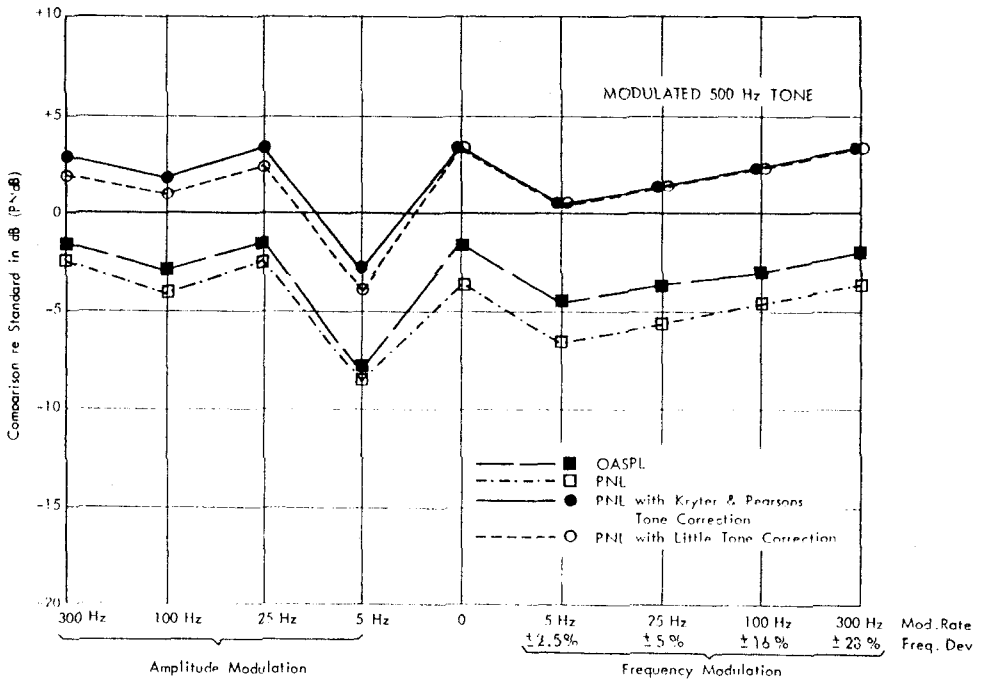
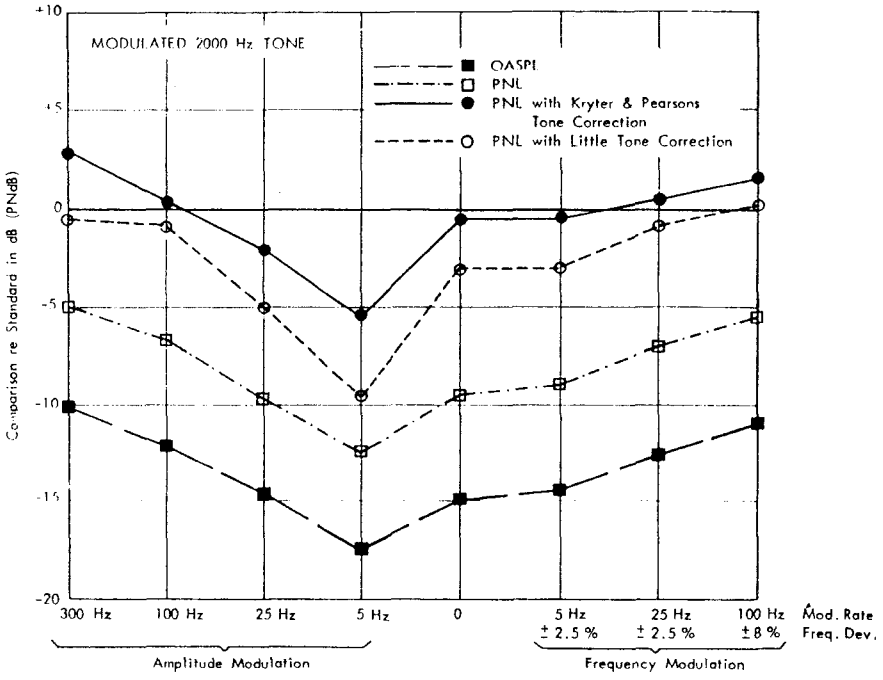


Fig.2.13 Judged noisiness of modulated tone with broad-band noise as a function of modulation frequency. Carrier frequency: (a) 500 Hz, (b) 2000 Hz. From Pearsons, Bishop and Horonjeff (1969).

(continued)

(b)


MODULATED 2000 Hz TONE
OASPL
PNL
PNL with Kryter & Pearsons Tone Correction
PNL with Little Tone Correction
Comparison re Standard in dB (PNdB)
+10
+5
0
-5
-10
-15
-20
300 Hz
100 Hz
25 Hz
5 Hz
0
5 Hz ± 2.5 %
25 Hz ± 2.5 %
100 Hz ± 8 %
Mod. Rate Freq. Dev.
Amplitude Modulation
Frequency Modulation

2.14a)の形状を見ると，等ラウドネス曲線や聴覚系の絶対的な感度を示す絶対閾曲線(Fig.2.14b)と非常によく似ていることが分かる．したがって，敏感に感じる音に対してノイジネスが高いと判断される傾向があることは想像できよう．

このように，全く別の指標を用いた独立の研究でありながら，いずれも変調周波数1～4Hz付近で聴覚系が特に敏感であることを示唆する傾向が現れている．

ここで注意しなければならないのは，これらの測定結果には，聴覚系の感度以外の要因が関与している可能性がある点である．例えば，Fig.2.11の結果は，聴取者が全くの受動的な存在(null device)であると仮定すれば“純粋な”TMTFを示していると言えよう．しかし，特に変調周波数4Hz以下で検知閾が増加する点に関して，Viemeister(1979)は，被験者側の非感覚的な判断の要因(nonsensory, decision-making factors)の存在を認めている．

また同様に，変動感が変調周波数4Hz以下で減少する点に関して，Fastl(1982)は記憶と順応が原因であると述べている．すなわち，被験者は少し前の音の大きさを思い出したり，非常にゆっくりとした大きさの変化は知覚できないのである．このことは，Zwicker(1952)の振幅変調の検知閾の測定にも同様に見られるという(Fastl, 1982)．

確かに，心理実験である以上，このような被験者側の判断の問題が含まれている可能性はあろう．しかし，そのような問題を考慮した上でもなお，聴覚系が4Hz付近の変動に特に敏感であると仮定できる根拠がいくつかある．

まず一つめは，変調周波数4Hz以下における検知閾の増加や変動感の減少が，必ずしもFastlの指摘する短期記憶の限界とは言い切れない点である．そのような実験課題では，振幅包絡の山と谷のレベル差(Fig.2.1を参照)を比較判断する必要がある．ただし，山と谷は継時的に繰り返されるので，先に聴いた山(もしくは，谷)のレベルは一時的に記憶してお

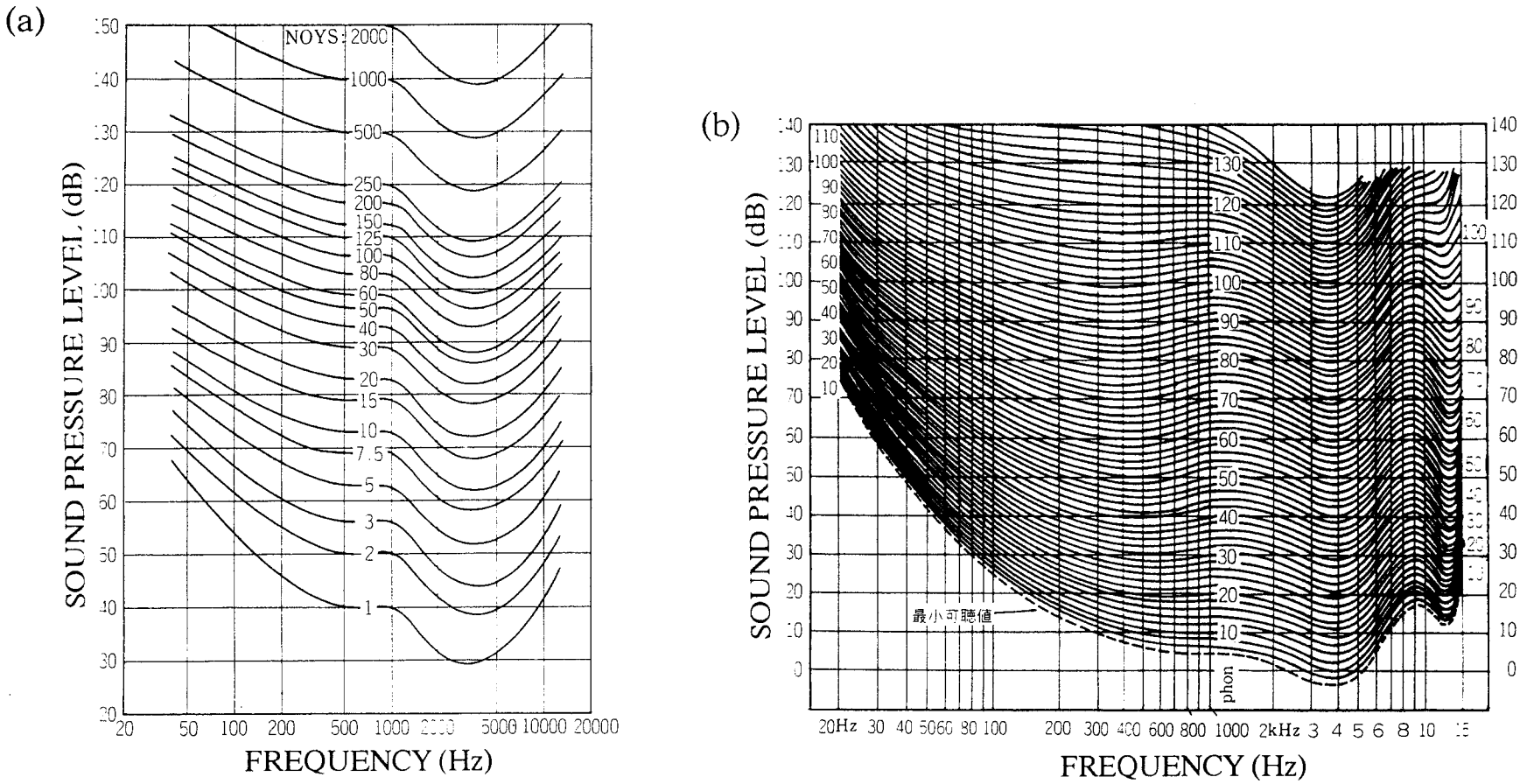


Fig.2.14 (a) Contours of perceived noisiness (ISO/R 507-1970). (b) Normal equal-loudness contours for pure tones and normal minimum audible field (ISO/R 226-1961).

かなければならない.

継時的な入力情報の処理の際,「心理的現在 (psycho-logical present)」(Fraisse, 1957)と呼ばれる一種の時間窓を想定することができる. この時間範囲内に起きた事象は, 記憶貯蔵庫に転送する前に, 同時的なある一まとまりのものとして処理できる.

その例は, 音の持続時間, および短音で区切られた時間間隔の弁別実験に見ることができる. 判断する時間間隔が主観的現在の時間窓に収まる場合には, 開始と終了の時刻を同じ時間窓の中で処理することができるため弁別閾は小さくなる. しかし, それ以上の長さになると主観的現在の時間窓からはみ出すため, 後の音を聴いてから前の音を“思い出す”という作業が必要となる(寺西, 1984). したがって, 弁別閾は大きくなる.

実際, 持続時間の弁別閾を測定した研究結果を総合して見ると, 持続時間0.4～2秒の範囲で弁別が鋭くなっている(Fig.2.15; 寺西, 1984). したがって, これらのデータから, 主観的現在の長さは最大約2秒と見積ることができる.

そこで, 例えば変調周波数が1Hzと変動のかなり遅いAM音を例にとっても, 2秒の間には山と谷は2回ずつ出現する. これは, 決してレベルの比較ができない条件ではないであろう. また, 主観的現在を過ぎてしまった過去の音に対しても, その情報は短期記憶に貯蔵されているので, さかのぼって判断することはできる. このように, 変調周波数4Hz以下での検知閾の増加や変動感の減少を, すべて短期記憶の限界に帰すことはできないであろう.

聴覚系が4Hz付近の変動に特に敏感であると考えられる2つめの理由は, 実験1の結果がマスキング実験において得られたものである点である. 上述の変調の知覚に関する研究例は, すべて“閾上”で, すなわち変動音が単独で呈示されるか, もしくは背景雑音よりも高いレベルで呈示される刺激条件で得られた結果である. したがって, 被験者は変動そのも

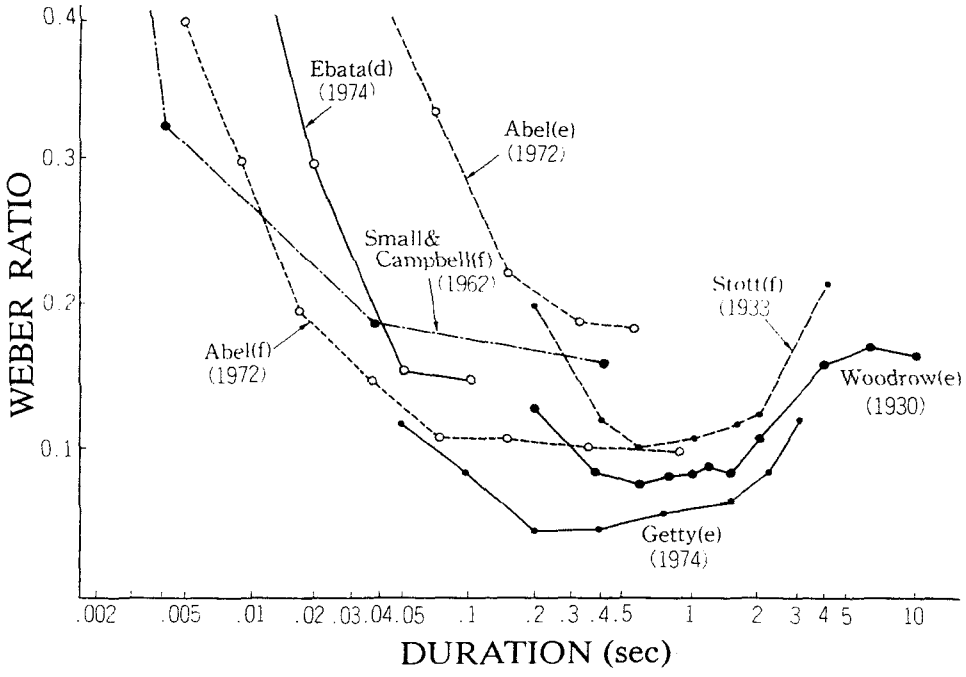


Fig.2.15 Weber ratio for discriminating durations as a function of the duration of sound stimulus.

のの知覚に基づいて判断を行なうことができる．

一方，マスキング実験の場合には，被験者は変動音そのものを聴いて判断するのではなく，広帯域雑音中の何らかの変化を検出することが求められる．したがって，変動音の振幅包絡の山と谷のレベル差を知覚して判断するという方略をとることは困難であろう．この点からも，変調周波数1～4Hzの範囲での知覚の変化は，短期記憶の限界によるものだけではなく，何らかの別のメカニズムが存在する可能性がうかがえる．

1～4Hz付近のレベル変動と音声知覚の関係

1～4Hz付近のレベル変動は，音声知覚と重要な関連性をもつと考えられる．Fig.2.16は，音声のさまざまな周波数帯域に含まれるレベル変動の周波数を測定したものである(Steeneken and Houtgast, 1983)．これを見ると，どの周波数帯域でも2～5Hz付近の変動が大きくなっていることが分かる．これは，ほぼ音節(syllable)や単語(word)の出現頻度に相当する(図中，横軸参照)．また，Fig.1.2aの波形の振幅包絡からも，1秒間におよそ5個の大きな山谷が出現していることが分かる．

この振幅包絡には，音声の知覚において必要な情報が多く含まれていることが，KatzとBerryによって示されている(Katz and Berry, 1971)．彼らは，さまざまな音声の包絡線を抽出し，白色雑音をその包絡線で変調して聴取者に呈示した．その結果，この模擬“音声”の了解度はきわめて高かったという．

このように，周波数情報の取り去られた“音声”でも，振幅変動に含まれる情報に基づいて，かなりの了解が可能なようである．したがって，1～4Hz付近の振幅包絡の変化を捉えることは，音声知覚の重要な手がかりの一つとなっているのであろう．

また，周期的な音の繰り返しを聴いた時，その周期内であ

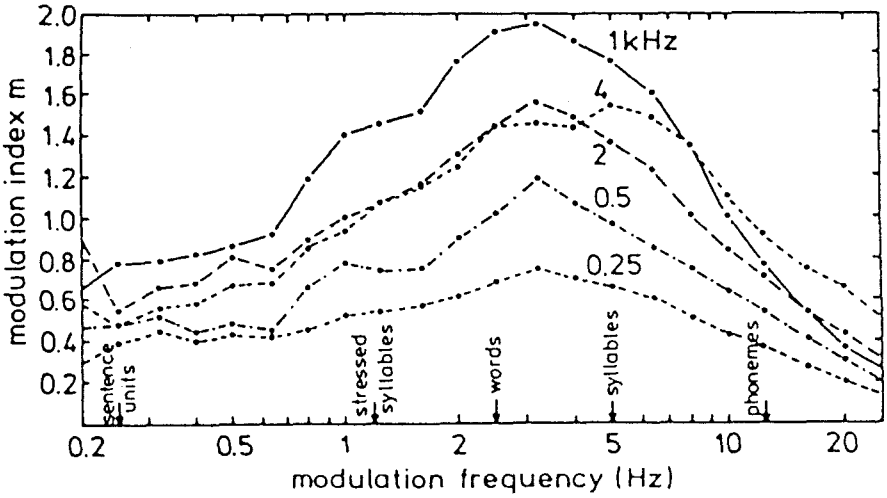


Fig.2.16 Average envelope spectra in terms of the modulation index for one-minute connected discourse from ten male speakers. The parameter is the center frequency of the 1/3 octave band. From Steeneken and Houtgast (1983).

るまとまりが感じられる場合，その感覚は「リズム感」と呼ばれる(寺西，1984)．Fraisseによると，容易にリズム感を生じる音の間隔の範囲は，0.15～0.9秒であるという(Fraisse，1963)．(これより短いと，音が互いに融合してしまう．逆に，長くなりすぎると音と音とのつながりが感じられなくなるであろう．)このリズムを感じる範囲は，周波数(音の出現頻度)に直すと1.1～6.7Hzに相当し，4Hzを中心とした範囲に広がっている．この点からも，聴覚系が1～4Hzの音の変化に最も追従しやすいことが示唆される．

音声による複雑なコミュニケーションは，人類の進化にとって大きな役割を果たしてきたものの一つである．そこで，その音声に多く含まれるレベル変動と聴覚系が特に敏感なレベル変動の周波数がともに1～4Hz付近で一致していることは，必ずしも偶然ではないであろう．

音声のレベル変動の知覚は，第1章で触れたカクテルパーティー問題とも関連している．背景騒音の中から特定の話者の声のみを聞き取るには，声の高さ，大きさ，方向などの音響的手がかりが用いられる(Bregman，1990)．さらに，音声に多く含まれるレベル変動の周波数に対して敏感であれば，背景騒音からの抽出がより一層容易となるはずである．

“変調検出器”の存在の可能性

以上の知見を総合して考えると，聴覚系にはレベルの変化を検出する，一種の“変調検出器”が存在すると仮定してもよいのではなかろうか．

聴覚系が音の変化に敏感であることは，生理学的にもいくつかの証拠から明らかにされている．例えば，定常的な短音に対する聴覚ニューロンの反応を見ると，音の立ち上がり部分での発火量が非常に多いことがわかる(Fig.2.17)．これは，音のレベルが変化した時，その瞬間にニューロンが敏感に反応することを意味する．

これには，対応する心理学的現象も多く見られる．例えば，

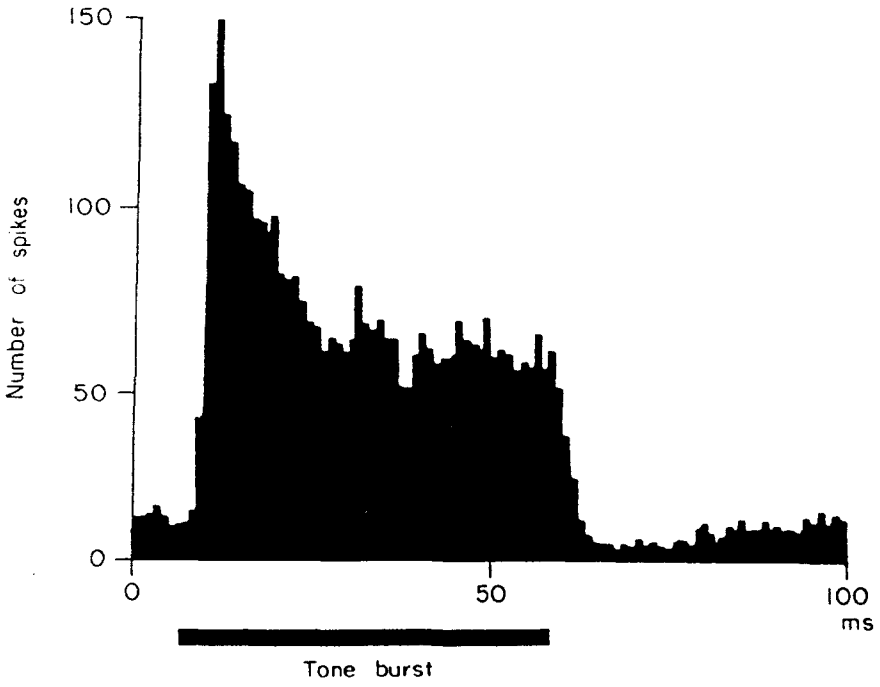


Fig.2.17 Post-stimulus time histogram of single fibers in the auditory nerve of cats. From Kiang, Watanabe, Thomas and Clark (1965).

Nambaらは，立ち上がり部分のエネルギーが大きい音は，その大きさが過大評価されることを示している(Namba, Kuwano and Kato, 1976)．また，同時マスキングの測定でも，音の立ち上がり部分でのマスキング量が特に大きいことが知られている(例えば，宮坂，1983)．

また，変調そのものに反応するニューロンも発見されている．例えば，SchreinerとUrbasは，ネコの大脳皮質に，ある特定の変調周波数のＡＭ音に特異的に反応するニューロンを発見した(Schreiner and Urbas, 1986)．さらに，Fastlらは，リスザルの大脳皮質の聴覚野に，ＡＭ音に特異的に反応するニューロンが存在することを示している(Fastl, Hesse, Schorer, Urbas and Müller-Preuss, 1986)．しかも，変調周波数とそれらのニューロンの発火量の関係は，心理物理学的測定による変動感と同様のパターンを示している(Fig.2.18)．

もちろん，これらのデータが，すぐさま変調検出器に対応するわけではないであろう．しかし，視覚系では，刺激の比較的単純な特徴に反応するニューロンや処理機構が明らかにされている．例えば，Lettvinらによるカエルの網膜におけるエッジや運動などの特徴検出器の発見や(Lettvin, Maturana, Pitts and McCulloch, 1959)，HubelとWieselによるネコの大脳皮質におけるスリットやスリットの特定の傾きに対して特異的に反応するニューロンの発見(Hubel and Wiesel, 1962)などがその先駆的な研究例である．

現在では推測の域を出ないが，聴覚系でもいずれ，レベル変動を検出する，しかもそれが１～４Hz付近の周波数にチューニングされた変調検出器の存在が明らかになるかも知れない．それによって，ヒトの聴覚系にとって特に重要な音声の処理機構や，他の動物とは異なるその機能の特殊性が明らかになる可能性もあろう．これは，今後の聴覚研究の課題である．

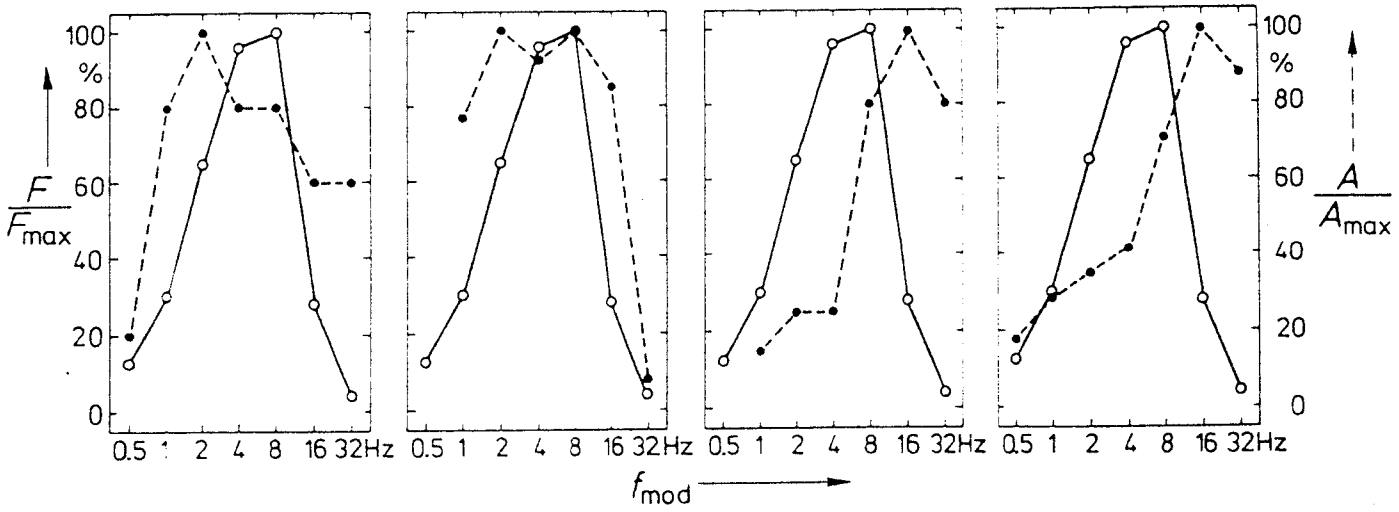


Fig.2.18 Dependence of fluctuation strength F and its neural correlate A on modulation frequency of amplitude-modulated tones. Solid lines: psychophysical data. Dashed lines: physiological data for cells with best frequencies of 600, 4120, 1100 and 10700 Hz (from left to right). From Fastl, Hesse, Schorer, Urbas and Müller-Preuss (1986).

第３章
不規則的な変動音の知覚
－変動パターンの影響－

１．本章の目的

第２章では，正弦波変調させたＡＭ音を刺激として用いた．この振幅変調は，いわば“規則的”なレベル変動である．実際，これまでの変動音に関する研究では，このような規則的な変動を扱った例が非常に多い．これには，刺激の作成・制御における技術的な制約があったであろうし，また聴覚系という系の“システム解析”(Viemeister, 1979)の目的には，正弦波変調音などの数学的に単純な刺激の方が適しているという事情もあろう．

しかし，音楽や音声を始め，我々が日常接する音のほとんどは，“不規則的”なレベル変動を伴っている．この様子は，先に示したFig.1.2，1.5などにも表れている．そのような不規則的な変動の知覚を検討することは，聴覚系の機能を明らかにする上で大変興味深いことである．また，それによって現実の環境音の知覚事態により接近できるであろう．

ところで，これまでの非定常音の研究でも不規則的な変動を扱ったものがいくつか見られる．例えば，変動騒音の評価法の一つとしてL_{Aeq} (equivalent continuous A-weighted sound pressure level：等価騒音レベル)が用いられている．これは，変動騒音と等しい継続時間で，等しい総エネルギーをもつ定常音のレベルを表すものである．この測定値は，人工音のみならず，自動車交通騒音や音楽，音声など，さまざまな非定常音の大きさと良い対応を示すことが明らかにされている(Kuwano, Namba and Nakajima, 1980)．

ただし，L_{Aeq}は，音全体のエネルギーの“平均値”を算出するものであることに注意しなければならない．すなわち，この方法は算出が容易で適用範囲が広いかわりに，音の変動がもつ情報は全て丸められてしまっているのである．

また，その他の変動の研究として，音の微妙なゆらぎを扱った例が挙げられる．例えば，ピアノ演奏における時間間隔のゆらぎがその演奏の特徴を反映していることや(佐々木・石川・山田，1989)，母音に含まれる周波数や振幅のゆらぎがその“自然さ”に寄与していること(橋場・八幡・伊福部，1989)などが明らかにされている．しかし，これらの研究は，統計的なゆらぎの特徴を記述したり，全体的な印象との関連性を検討したものであり，ゆらぎそのものを聴覚系がどのように捉えているかという，その処理機能の解明を目的としたものではない．

第1章で述べたように，現実音に見られる変動は，単に物理的に見て存在しているというだけにとどまらない．特に，音楽や音声では，時間的変動そのものが情報となって伝達されているのである．そこで，そのような変動の「パターン」が聴覚系においてどのように捉えられ，処理されているのかを明らかにすることは，聴覚の研究上，重要な課題の一つであろう．

そこで本章では，規則的ならびに不規則的なレベル変動をもつ音刺激系列を用いて，変動パターンが音の知覚に及ぼす影響について検討を行う．それによって，聴覚系における変動パターンの処理機能を明らかにする．

2.実験3　－ レベル変動の検知閾 －

2.1 目的

変動の検知閾を測定することにより，閾値付近でのレベル変動の知覚に及ぼす，変動パターンの影響を明らかにする．

2.2 方法

刺激

持続時間125ms(立ち上がり・立ち下がり時間25ms)の1kHzの純音を，125ms間隔で24個並べたものを1刺激とした．その時間構造をFig.3.1に示す．これは，変調周波数4Hz，変調度100%の矩形波変調音にほぼ相当する．

音圧レベルは70dBであるが，その中に4音に1つの割合でレベルの異なる音を規則的，もしくは不規則的(ランダム)な間隔で混ぜた．規則的変動(regular)条件では，レベルの異なる音が1，5,9,・・・,21番目に出現する条件と4,8,12,・・・,24番目に出現する条件の2種類を作成した．一方，不規則的変動(irregular)条件でも異なる2つの系列を作成した．

さらに，それぞれの変動条件につき，レベルが高い音が混じった系列(レベル増加系列：up sequence)とレベルの低い音が混じった系列(レベル減少系列：down sequence)の2種類を設定した．

したがって，刺激条件は，2(規則的・不規則的)×2(レベル増加・減少)×2(パターン)＝8種類である．刺激系列の例をFig.3.2a，bに示す(両図ともに，不規則的変動条件は2つの系列のうちの一例である)．

装置

実験装置の概略をFig.3.3に示す．リアルタイム刺激反応計測装置(PSCSII；難波・桑野，1984)で作成しあらかじめDATに録音しておいた刺激を，DATデッキ(Denon，DTR-80P)から再生した．刺激のレベルは，パーソナルコンピュー

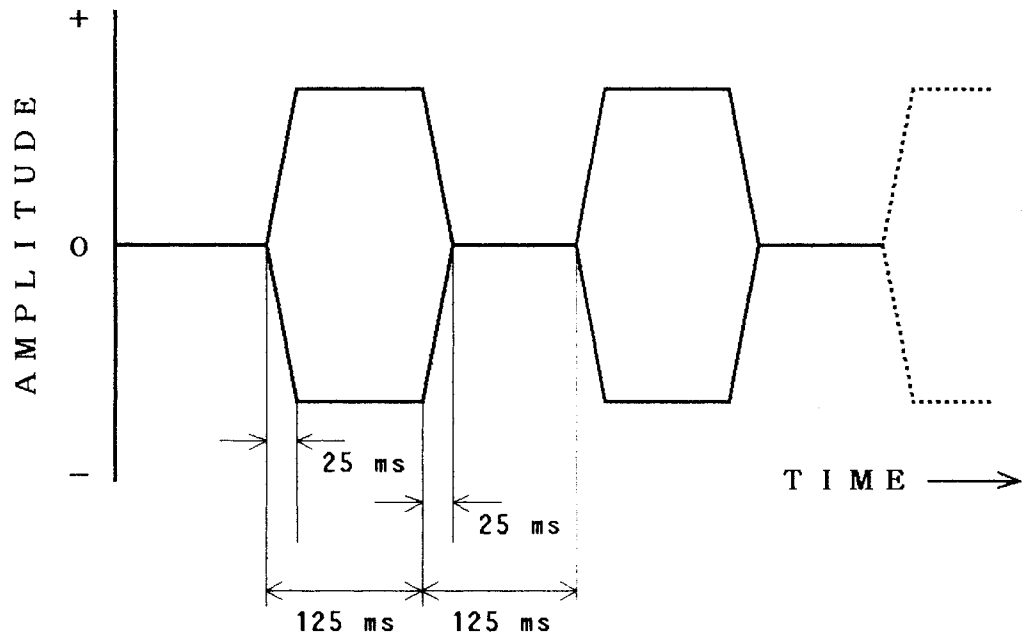


Fig.3.1 Temporal structure of the stimulus used in Experiment 3, 4 and 5.

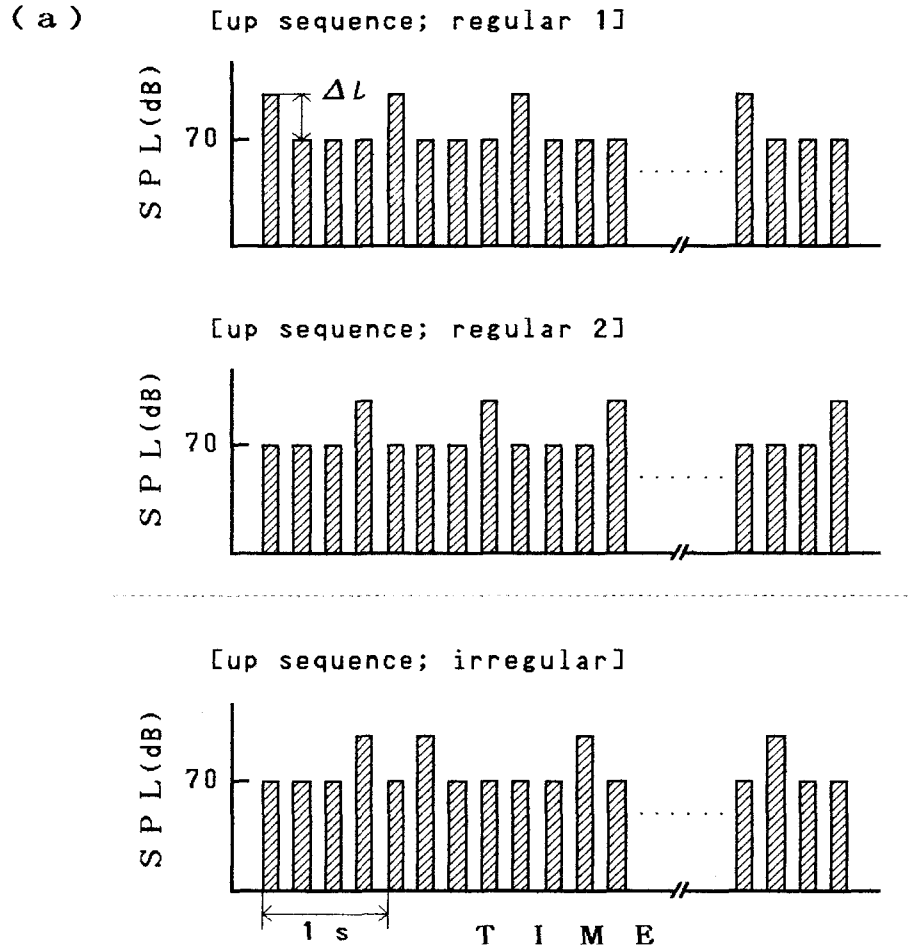
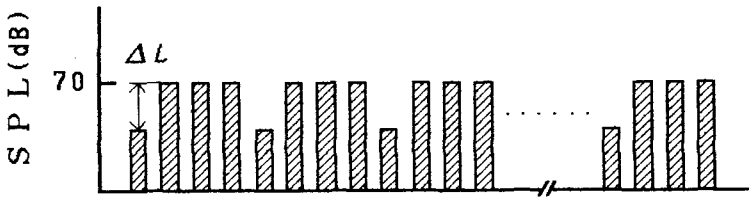


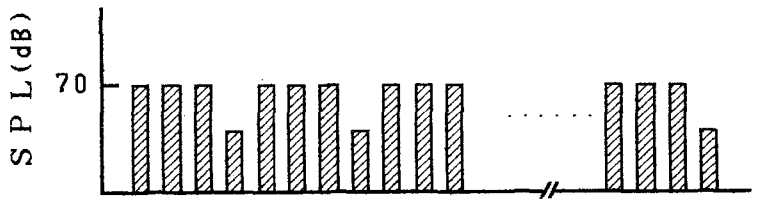
Fig.3.2 Temporal patterns of the stimuli used in Experiment 3. (a) Up sequence, (b) Down sequence.

(continued)

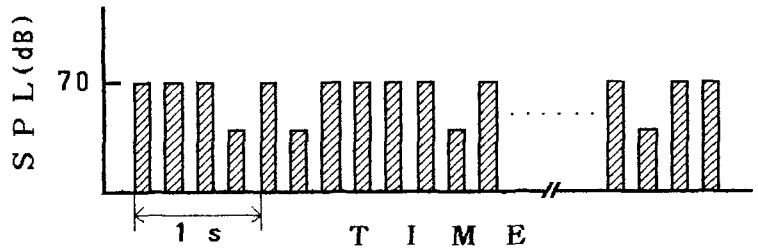
(b) [down sequence; regular 1]



[down sequence; regular 2]



[down sequence; irregular]



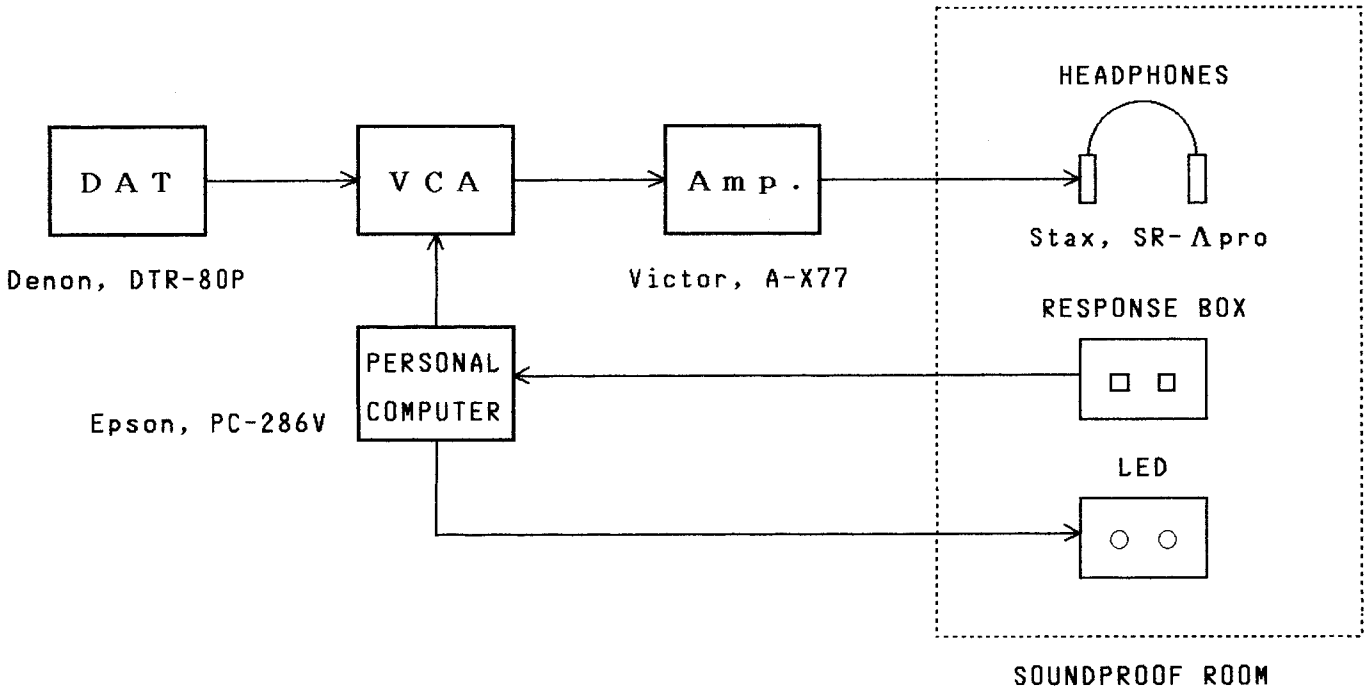


Fig.3.3 Block diagram of the apparatus used in Experiment 3.

タ(Epson, PC-286V)とD/Aコンバータ(Neolog電子, PCN-3098)に制御されたVCA(自作)によってコントロールした. その後, アンプ(Victor, A-X77)で増幅した後, ヘッドホン(Stax, SRD-Xpro + SR-Λpro)を通じて, 簡易防音室(日本板硝子製)内の被験者の両耳に呈示した.

手続き

上下法の変形であるPEST法(Taylor and Creelman, 1967)により, レベル変動の検知閾を測定した.

まず, Fig.3.2a, bに示すようなレベルの異なる音が含まれた系列, または全ての音のレベルが同じ(レベルの異なる音が含まれていない)系列のどちらかを被験者に呈示した. 被験者は, 刺激を聞き終えた後, 系列内にレベルの異なる音が含まれていたかどうかを手元のボタンを押して反応した. どちらの系列が呈示されるかは, 試行ごとにランダムに変えた. 判断の正否は, 被験者の前方の緑(正答), または赤(誤答)のLEDを点灯して被験者に知らせた. また, 判断のための時間は10秒とした.

このような手順により, 明らかにレベル差(図中のΔL)の検知できる系列から始め, PEST法の手続きにしたがって, 被験者の判断の変動が±0.25dB以内に収まるまで試行を繰り返した. この時, 75%の正答率をもって, 検知閾の推定点とした. そして, 最終的な検知閾には, 終了直前10試行における レベル差ΔLの算術平均値をとった.

各被験者は, 練習試行の後, 4種類の刺激条件につき2回ずつ測定を行なった.

被験者

聴力の正常な26～29歳の男性3名(筆者を含む).

2.3 結果と考察

変動の不規則性の効果

被験者による検知閾の差は見られなかったため，全被験者の測定結果を刺激条件ごとに平均した．結果をFig.3.4に示す．

これを見ると，レベル増加・レベル減少のどちらの条件でも，規則的変動条件と不規則的変動条件の検知閾に有意な差は認められない(符号つき順位和検定．レベル増加条件：$T=23$，$n=12$，$p>.10$，レベル減少条件：$T=28$，$n=10$，$p>.10$)．

これと同様の結果は，Sekによって報告されている(Sek，1993)．彼は，狭帯域雑音で変調したAM音を用いて変調の検知閾を測定した．その結果，変調周波数4Hzから256Hzにおいて，検知閾は正弦波変調の場合と変わらないことが示されている．

第2章では，変調検出器の存在を仮定した．上記の実験3ではそれを受けて，変調の検出の最も鋭い4Hzの変調周波数をもつ系列を用いている．しかし，これらの実験結果から明らかなように，変動の不規則性による効果は見られない．おそらく，閾値レベルでは，変動の規則性・不規則性による処理に大きな違いは存在しないのであろう．

もし違いがあるとすれば，より大きな変動の知覚においてであると考えられる．すなわち，さまざまに変動する音に対して，その変動の「パターン」をどう捉えるかという，より高次の処理過程が関与している可能性がある．次の節では，この点について検討を行う．

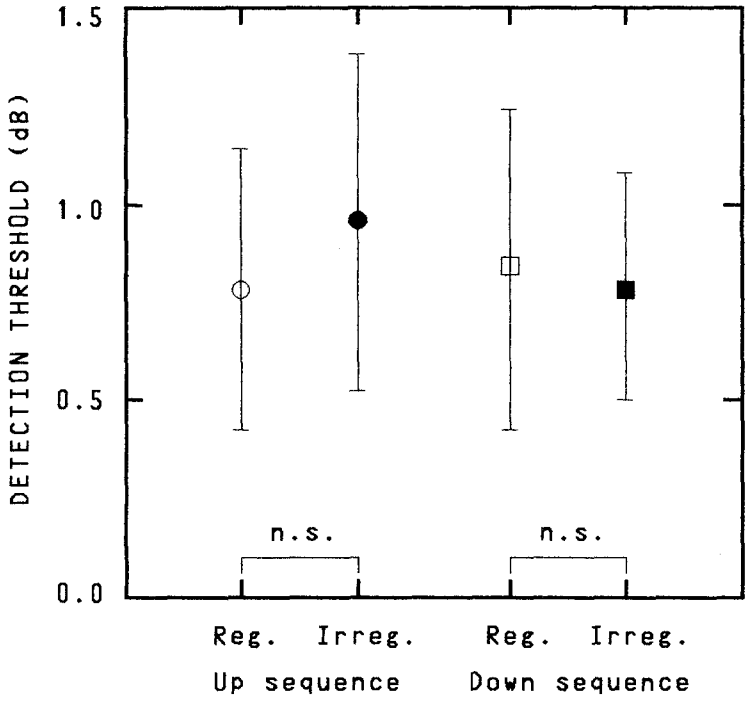


Fig.3.4 Mean values and standard deviations of the threshold for detecting level-fluctuation.

3．実験４　－ 変動の不規則性が変動感に及ぼす影響（特異的な強い音が混じった場合）－

3.1 目的

変動音はさまざまな知覚的印象を引き起こすが，その一つとして「変動感」が挙げられる．これは，変調周波数がおよそ20Hz以下の変調音において生じる感覚で(Terhardt, 1968)，“音が変化している印象”とでもいうべきものである．(変調周波数と変動感との関係については，第２章で述べた．)

これまで，変動感の研究は比較的少なく(Fastl, 1982)，しかも正弦波変調音などを用いて規則的な変動を調べた例がほとんどである．しかし，先に述べたように，現実音への適用を考えるならば，変動の不規則性の効果は重要な問題である．

そこで，不規則的変動を伴う音に対する聴覚の処理機能を明らかにするために，変動感を指標として以下の実験を行なった．この実験４では，等レベルの音の系列中に特異的な強い音が混じった場合について検討する．

3.2 方法

刺激

持続時間125ms(立ち上がり・立ち下がり時間25ms)の1kHzの純音を，125ms間隔で24個並べたものを１刺激とした．その時間構造は，実験３と同じである(Fig.3.1)．これは，変調周波数４Hz，変調度100％の矩形波変調音にほぼ相当する．

音圧レベルは70dBであるが，その中に４音に１つの割合でレベルの高い音を規則的な間隔，もしくは不規則的(ランダム)な間隔で混ぜた．レベルの高い音の増加量(レベル差 ΔL)は，３，６，９，12dBの４種類とした．

規則的変動(regular)条件では，レベルの高い音の出現す

る位置が異なる4種類の刺激を作成した．また，不規則的変動(irregular)条件でも，規則的変動条件に刺激数を揃えるためと，複数の系列を用いて全体としてのランダム性を確保するために(24音の短い系列1つでは出現位置に何らかの偏りが生じる可能性がある)，異なる4種類の刺激を作成した．したがって，刺激の総数は，2(規則的・不規則的)×4(レベル差)×4(パターン)＝32種類となる．刺激パターンの例をFig.3.5に示す(不規則的変動条件は4つの系列のうちの一例を示す)．

装置

実験装置の概略をFig.3.6に示す．PSCSIIで作成し，あらかじめDATに録音しておいた刺激を，DATデッキ(Denon, DTR-80P)から再生した．その後，アンプ(Victor, A-X77)で増幅した後，ヘッドホン(Stax, SRD-Xpro + SR-Λpro)を通じて，簡易防音室(日本板硝子製)内の被験者の両耳に呈示した．

手続き

マグニチュード推定法により，系列全体の変動感の判断を求めた．まず，上記32種類の刺激を10秒の間隔をおいて呈示した．呈示順序はランダムとした．そして，被験者は刺激を聞き終えた後，その系列全体の変動感の大きさに対応すると思われる正の数を手元のカードに記入した．判断のための時間は10秒とした．

各被験者は，16試行の練習の後，全刺激条件につき2回ずつ判断を行なった．

なお，どの被験者も変動感の判断は初めてであったので，変動感の解釈が被験者によって異なる可能性がある．そこで，その意味を理解してもらうために，教示を読んだ後，例として次の3種類の刺激を順に10秒間ずつ聞かせた：

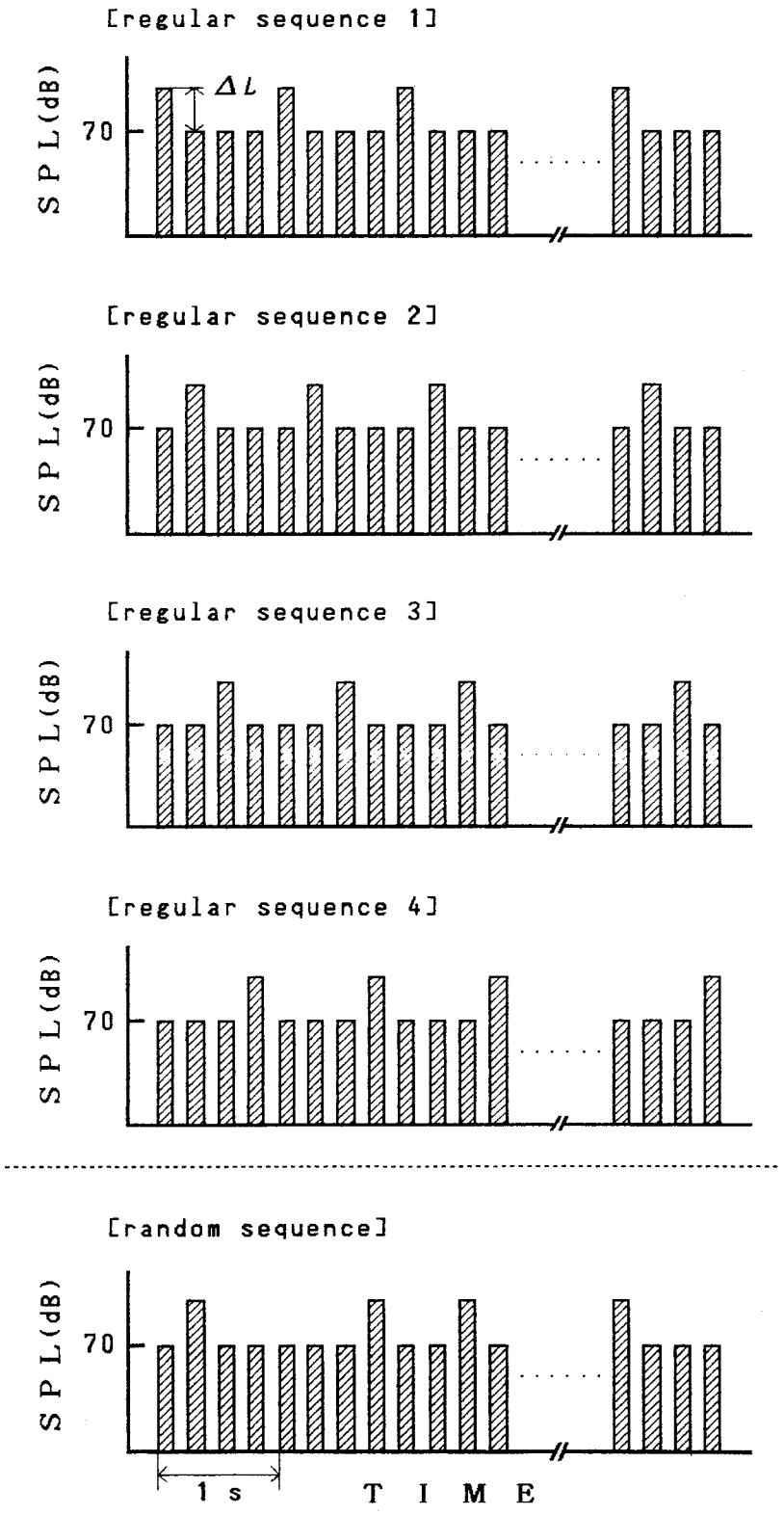


Fig.3.5 Temporal patterns of the stimuli used in Experiment 4.

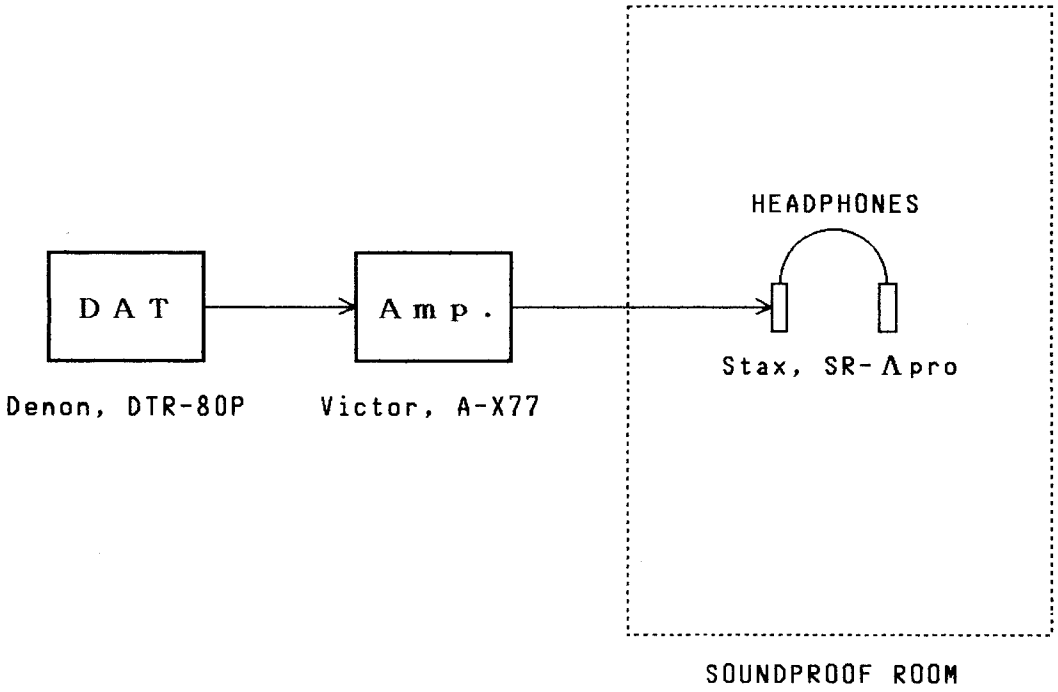


Fig.3.6 Block diagram of the apparatus used in Experiment 4 and 5.

(1)レベル変動の無い(全ての音の音圧レベルが70dBの)刺激系列；
(2)レベル差 ΔL = 3dBの不規則的変動条件の刺激系列；
(3)レベル差 ΔL = 12dBの不規則的変動条件の刺激系列.

そして，この3種類の刺激系列から受ける音の強さの変化の印象の違いが，この実験で扱う変動感の意味であると説明した.

教示

以下の教示を用紙に印刷し，被験者に呈示した：
「この実験では，強さの異なる音が混じり合った系列を6秒間ずつお聞かせします．そこで，音を聞き終わった後，その系列全体の“変動感”，すなわち“音の強さの変化の程度”に対応すると思われる正の数を判断し，カードに記入して下さい．ただし，負の数や0は用いないでください．正の数であれば，整数でも小数でもどのような数を用いても構いません．また，一つ一つの音の強さに注目するのではなく，系列全体の印象から判断するよう心がけて下さい.

音は一度しか呈示されません．また，10秒経つと次の音が出ますので，遅れないように判断して下さい．」

被験者

聴力の正常な20～33歳の男性4名，女性4名の計8名．この内の7名は，次の実験5にも参加している．ただし，どちらの実験に先に参加するかは，被験者ごとに変えた.

3.3 結果と考察

3.3.1 被験者の判断の信頼性

被験者の判断の信頼性を確認するために，まず各被験者ごとに2回のマグニチュード推定値の相関係数を求めた．相関係数の一覧をTable 3.1に示す．これによると，レベル差の

Tabel 3.1 Correlation coefficients between two magnitude estimations of the subjects in Experiment 4.

Subj.	*r*
1	.674
2	.757
3	.550
4	.901
5	.559
6	.704
7	.134
8	.183
All Subj.	.899

大きい系列の判断が難しいためか，必ずしも全被験者を通して高い相関は認められない．しかし，全被験者の推定値の幾何平均から求めた2回の判断の相関係数は.899と高く，統計的には有意な相関があると言える($t=11.24$, $df=30$, $p<.01$)．そこで，以下，8名の被験者の各2回の推定値の幾何平均をもとに検討を進めていく．

3.3.2 変動の不規則性の効果

全被験者のマグニチュード推定値の幾何平均と標準偏差(Standard Deviation：SD)をFig.3.7に示す．ここでは，規則的変動条件の$\Delta L=3$dBでの値を1として基準化してある．

これを見ると，SDはやや大きいものの，どのレベル差の条件でも不規則的変動条件の方が規則的変動条件に比べて，変動感は約8%大きくなっていることが分かる．被験者のマグニチュード推定値を対数変換した上で行なった分散分析でも，両条件の値は統計的に有意な差となっている($F(1, 63)=4.32$, $p<.05$)．したがって，等レベルの音の系列中に強い音が混じった場合，その出現間隔が不規則的な方が規則的な場合に比べて，レベル差は等しいにもかかわらず変動感は大きくなるようである．

3.3.3 規則的変動条件における変動パターンの影響

規則的変動条件では，レベルの高い音の出現位置の違いによって，4つの変動パターンを用いた．そこで，変動パターンと変動感の関係を検討するために，規則的変動条件における全被験者のマグニチュード推定値の幾何平均をFig.3.8に示す．ここでは，$\Delta L=3$dBの系列1での値を1として基準化してある．

これによると，系列によって変動感が異なっており，全体として系列1と4の変動感が高く，系列2と3が低い傾向が見られる．最もレベル差の大きい$\Delta L=12$dBの条件において，

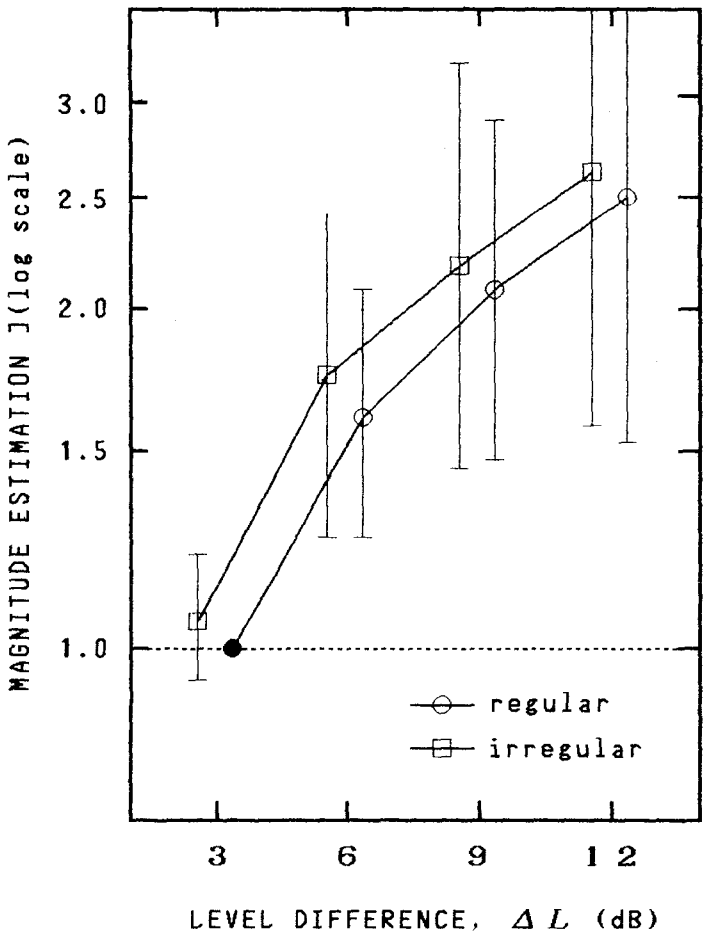


Fig.3.7 Fluctuation strength of the regular and irregular sequences of Experiment 4.

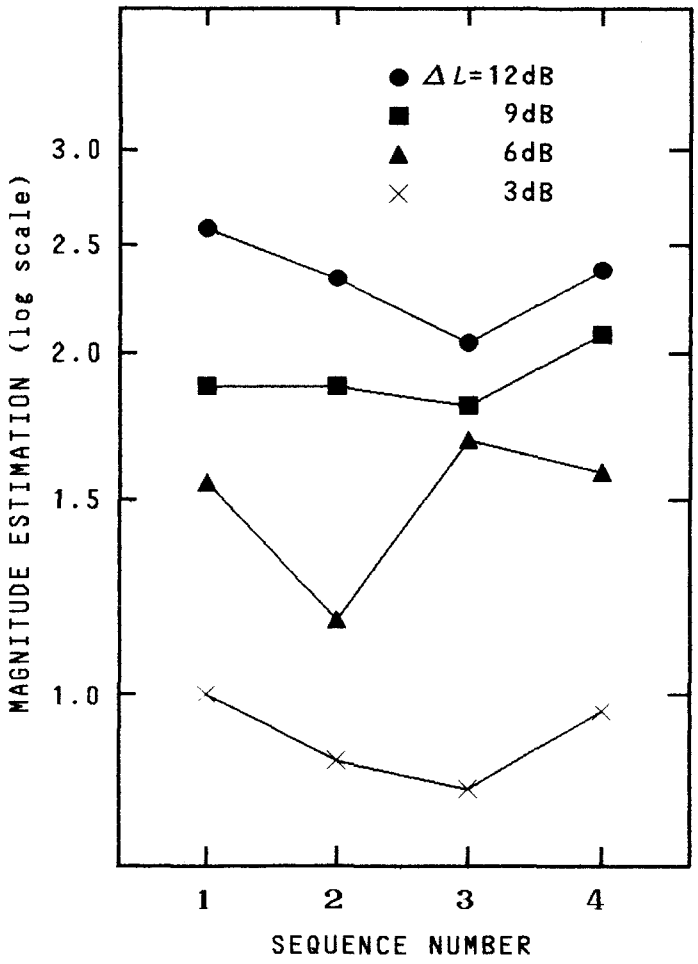


Fig.3.8 Fluctuation strength of the regular sequences of Experiment 4.

被験者のマグニチュード推定値を対数変換した上で行なった分散分析でも，この変動パターンによる影響は有意であった（$F(3, 45)=3.10$, $p<.05$）．したがって，変動が規則的な場合でも，その変動パターンによって変動感には違いが生じるようである．

4．実験５　－ 変動の不規則性が変動感に及ぼす影響（全体的なレベル変動を伴う場合）－

4.1 目的

現実の環境音では，実験４で扱った特異的な強い音が混じる場合だけではなく，音全体がレベル変動する場合も少なくない．そこで，実験５では，そのような全体的なレベル変動を伴う音の変動感を検討する．

4.2 方法

刺激

実験に用いた音は実験４と基本的に同じである．持続時間125ms(立ち上がり・立ち下がり時間25ms)の1kHzの純音を，125ms間隔で24個並べたものを１刺激とした(Fig.3.1)．

ただし，レベル変動のパターンを次のように設定した．まず，１系列は等しいレベル差ΔLをもつ４音の組み合わせから成り，その出現順序は規則的な場合(規則的変動条件)と不規則的な場合(不規則的変動条件)の２条件とした．

レベル差ΔLは，それぞれの条件につき2，4，6，8dBの４種類とした．そして，条件間で系列全体の大きさをなるべく揃えるために，４種類の音がエネルギー平均値で70dB SPLとなるようにレベルを設定した．各刺激における４音のレベルをTable 3.2に示す．

さらに，変化のパターンにも様々なものがあり得るので，規則的変動(regular)条件では，変動パターンの異なる４種類の刺激を作成した．また，不規則的変動(irregular)条件でも，規則的変動条件に刺激数を揃えるためと複数の系列を用いて全体としてのランダム性を確保するために，異なる４種類の刺激を作成した．したがって，刺激の総数は，２(規則的・不規則的変動)×４(レベル差)×４(パターン)＝32種類となる．刺激パターンの例をFig.3.9に示す(不規則的変動条件は４つの系列のうちの一例を示す)．

Table 3.2 Sound pressure levels of four tones used in Experiment 5.

level difference ΔL (dB)	sound pressure levels of four tones (dB SPL)
2	66.4, 68.4, 70.4, 72.4
4	61.9, 65.9, 69.9, 73.9
6	56.8, 62.8, 68.8, 74.8
8	51.3, 59.3, 67.3, 75.3

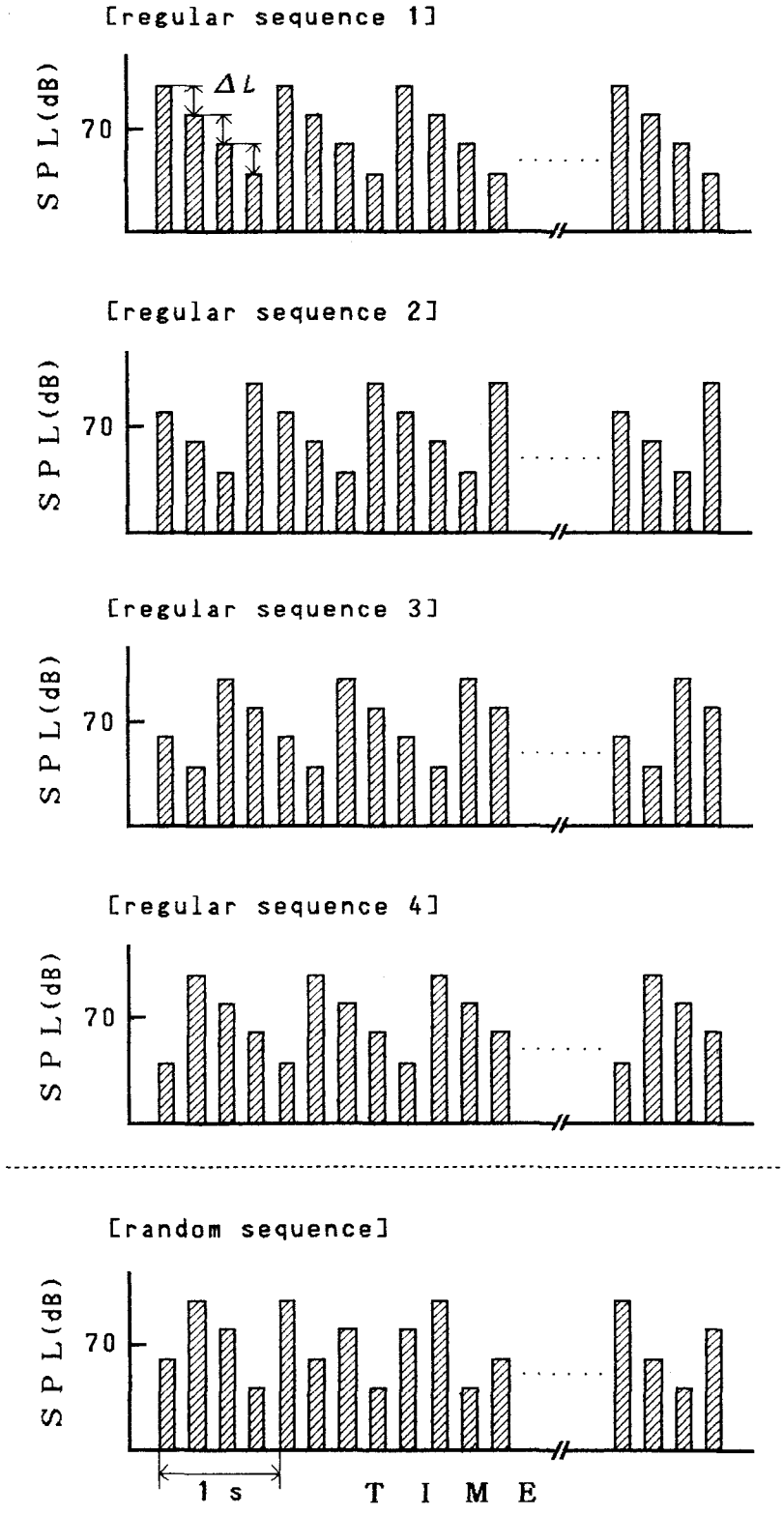


Fig.3.9 Temporal patterns of the stimuli used in Experiment 5.

装置

実験装置は，実験4と同じである(Fig.3.6)．すなわち，PSCSIIで作成し，あらかじめDATに録音しておいた刺激を，DATデッキ(Denon，DTR-80P)から再生した．その後，アンプ(Victor，A-X77)で増幅した後，ヘッドホン(Stax，SRD-Xpro + SR-Λpro)を通じて，簡易防音室(日本板硝子製)内の被験者の両耳に呈示した．

手続き

マグニチュード推定法により，実験4と同様の手続きで判断を求めた．

まず，上記32種類の刺激を10秒の間隔をおいて呈示した．呈示順序はランダムとした．そして，被験者は刺激を聞き終えた後，その系列全体の変動感の大きさに対応すると思われる正の数を手元のカードに記入した．判断のための時間は10秒とした．

各被験者は，16試行の練習の後，全刺激条件につき2回ずつ判断を行なった．

なお，被験者に変動感の意味を理解してもらうために，教示を読んだ後，例として次の3種類の刺激を順に10秒間ずつ聞かせた：

(1)レベル変動の無い(全ての音の音圧レベルが70dBの)刺激系列；
(2)レベル差 $\Delta L = 2$ dBの不規則的変動条件の刺激系列；
(3)レベル差 $\Delta L = 8$ dBの不規則的変動条件の刺激系列．

そして，この3種類の刺激系列から受ける音の強さの変化の印象の違いが，この実験で扱う変動感の意味であると説明した．

教示

実験4と同じく，以下の教示を用紙に印刷し，被験者に呈示した：

「この実験では，強さの異なる音が混じり合った系列を6秒間ずつお聞かせします．そこで，音を聞き終わった後，その系列全体の“変動感”，すなわち“音の強さの変化の程度”に対応すると思われる正の数を判断し，カードに記入して下さい．ただし，負の数や0は用いないで下さい．正の数であれば，整数でも小数でもどのような数を用いても構いません．また，一つ一つの音の強さに注目するのではなく，系列全体の印象から判断するよう心がけて下さい．

音は一度しか呈示されません．また，10秒経つと次の音が出ますので，遅れないように判断して下さい．」

被験者

聴力の正常な20～30歳の男性4名，女性3名の計7名．被験者はすべて上記の実験4にも参加している．ただし，どちらの実験に先に参加するかは，被験者ごとに変えた．

4.3 結果と考察

4.3.1 被験者の判断の信頼性

被験者の判断の信頼性を確認するために，まず各被験者ごとに2回のマグニチュード推定値の相関係数を求めた．相関係数の一覧をTable 3.3に示す．これによると，レベル差の大きい系列の判断が難しいためか，必ずしも全被験者を通して高い相関は認められない．しかし，全被験者の推定値の幾何平均から求めた2回の判断の相関係数は.943と高く，統計的には有意な相関があると言える（$t = 15.52$，$df = 30$，$p < .01$）．そこで，以下，7名の被験者の各2回の推定値の幾何平均をもとに検討を進めていく．

Tabel 3.3 Correlation coefficients between two magnitude estimations of the subjects in Experiment 5.

Subj.	*r*
1	.555
2	.770
3	.834
4	.791
5	.734
6	.502
7	.338
All Subj.	.943

4.3.2 変動の不規則性の効果

全被験者のマグニチュード推定値の幾何平均と標準偏差(SD)をFig.3.10に示す．ここでは，規則的変動条件のΔL＝2dBでの値を1として基準化してある．

これを見ると，SDはやや大きいものの，不規則的変動条件の方が規則的変動条件に比べて，変動感は最大で約12%大きくなっていることが分かる．被験者のマグニチュード推定値を対数変換した上で行なった分散分析でも，両条件の値は統計的に有意な差となっている($F(1, 55)=6.83$, $p<.05$)．したがって，全体的なレベル変動を伴う系列の場合にも，その変動パターンが不規則的な方が規則的な場合に比べて，全体の変動幅は等しいにもかかわらず変動感は大きくなるようである．

また，ΔLが大きくなるにしたがって規則的変動・不規則的変動の両条件の差が小さくなっている．レベル差が大きくなると，レベルの高い音と低い音が別の音の流れ(stream)と知覚される傾向が強くなり，系列全体が一つながりに感じられにくくなる(Bregman, 1990)．そのため，個々の音のレベルの違いが知覚上優位になり，変動パターンそのものの効果が相対的に弱まったのかも知れない．

4.3.3 規則的変動条件における変動パターンの影響

規則的変動条件では，4つの変動パターンを用いた．そこで，変動パターンと変動感の関係を検討するために，規則的変動条件における全被験者のマグニチュード推定値の幾何平均をFig.3.11に示す．ここでは，ΔL＝2dBの系列1での値を1として基準化してある．

これによると，系列によって変動感が異なっており，ΔLが大きくなるにしたがって，系列1と4の変動感が高く，系列2と3が低くなる傾向が見られる．最もレベル差の大きいΔL＝8dBの条件における被験者のマグニチュード推定値を対数変換した上で行なった分散分析でも，この変動パターン

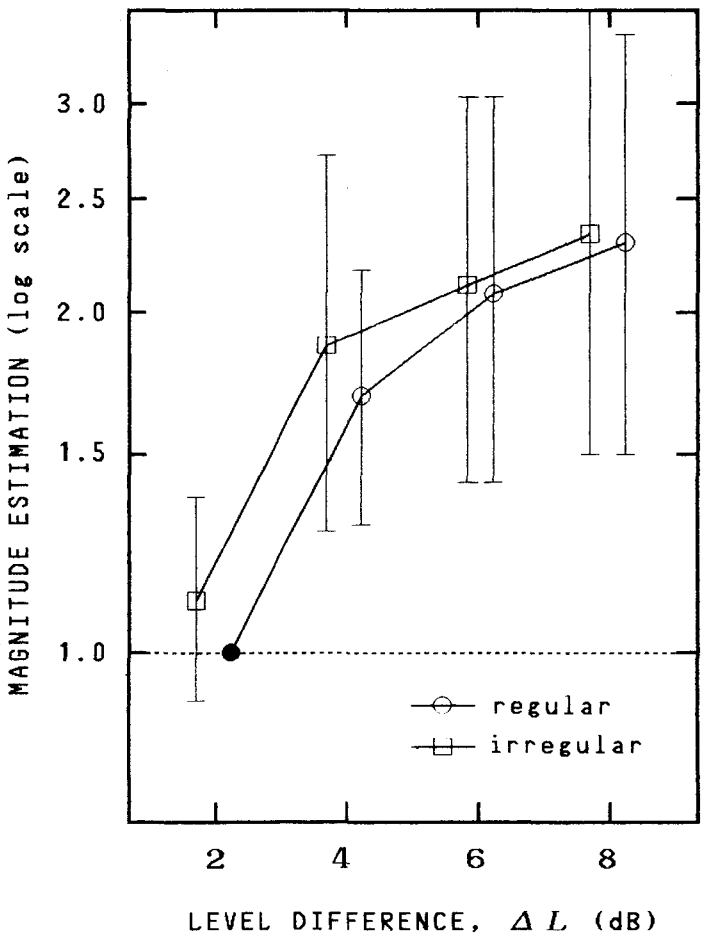


Fig.3.10 Fluctuation strength of the regular and irregular sequences of Experiment 5.

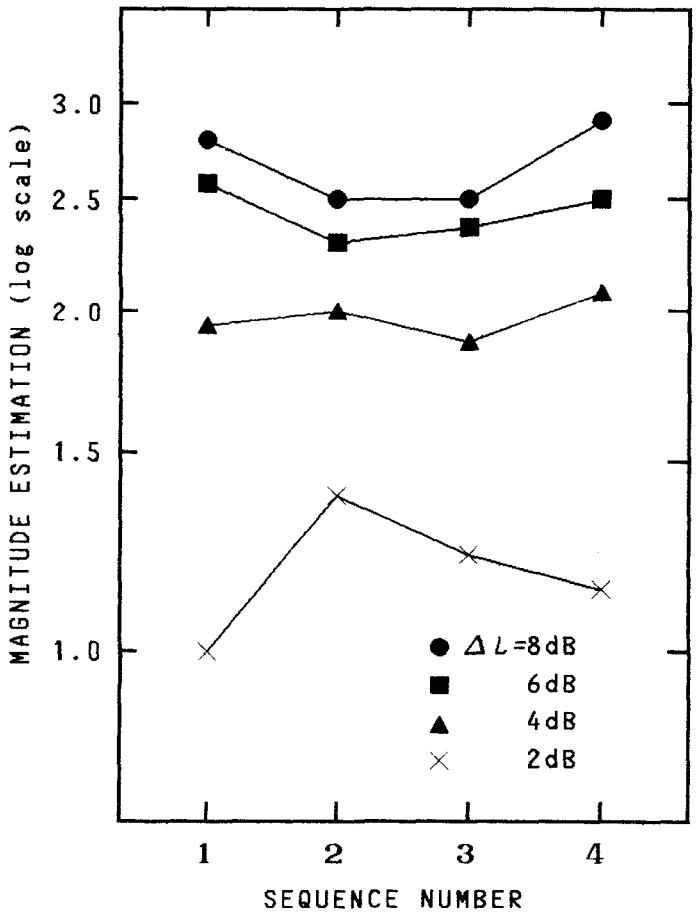


Fig.3.11 Fluctuation strength of the regular sequences of Experiment 5.

による影響の可能性が認められる($F(3, 39)=2.55$, $p<.10$). したがって，全体的なレベル変動を伴う規則的変動の系列でも，その変動パターンによって変動感には違いが生じるようである.

5．全体的考察

5.1 音刺激系列における変動パターンの知覚

実験4，5により，レベルの変化幅は等しいにもかかわらず，変動パターンが不規則的な場合は，規則的な場合に比べて変動感が大きくなることが示された．この傾向は，特異的に強い音が混じった系列でも，全体的なレベル変動を伴う系列でも同様に見られた．

ここで，どちらの実験の場合でも，レベル差ΔLが等しければ，規則的変動と不規則的変動の両条件の刺激のエネルギー総量は変わらない点に注意しなければならない．すなわち，両条件で用いている音の個数とレベルの種類は全く同じで，ただその“出現順序”が異なっているだけなのである．したがって，もし聴覚系が刺激情報を単に入力された順に逐次処理しているだけならば，そしてその結果を単純加算して全体の処理結果を出力しているだけならば，このような変動感の違いは生じないはずである．したがって，そこには何らかの能動的な処理過程が含まれているに違いない．

このような知覚的な処理過程に関して，ゲシュタルト心理学者たちは，「群化(perceptual grouping)」の現象を指摘し，そこで見いだされた諸法則を「ゲシュタルト法則(Gestaltgesetze)」と呼んだ(大山，1970)．すなわち，感覚器官から入力された要素はそれぞれ独立に処理されるのではなく，相互にあるまとまりをもって知覚される傾向があるのである．それを規定する要因として，ゲシュタルト心理学者たちは，例えば以下のものを挙げている(大山(1970)より引用)：

(1)近接の要因(近い距離にあるものがまとまって見える)，
(2)類同の要因(類似のものがまとまって見える)，
(3)閉合の要因(閉じた領域をつくるものはまとまりやすい)，
(4)よい連続の要因(よい連続あるいはなめらかな経過を示す

ものがまとまりやすい),
(5)よい形の要因(よい形，すなわち単純で，規則的で，対称的な形が結果するようにまとまる),
(6)共通運命の要因(運動や変化の運命をともにするものがまとまって見える),
(7)客観的態度の要因(客観的な刺激の提示系列の中で自然に生まれた観察者の態度によって，まとまりが規定される).

ゲシュタルト法則はもともと視覚の研究において発展させられたものであるが，これらの群化の規定要因は聴覚における知覚にも同様に適用可能である(Handel，1989；Bregman，1990).

そこで，これらの群化の規定要因と照らし合わせて考えると，実験4，5の規則的変動条件の音系列には次のような群化が生じ，知覚されるであろう．すなわち，時間的な近接の要因とよい形の要因から，Fig.3.12a，bにそれぞれ示すように，4音で一つの群にまとまる．そして，それが一まとまりとして繰り返されるような知覚を生じることになる．(4音以外でのまとまりは，単純な“よい形”とはならないであろう．また，8音，12音での群化も可能であろうが，それが一まとまりとして繰り返される点では同じことになる．)

そして，規則的変動と不規則的変動の変動感の違いは，以下のように説明できよう．すなわち，上記にような群化が生じると，知覚上の単位はもはや一つ一つの音ではなく，4音でまとまった一群がその単位となる．系列全体を通して構成された群はすべて同じものの繰り返しであるから，そこに大きな変動感は生じない．そこで，系列の変動感は，群内の4音のレベル差に主に依存することになる．

一方，不規則的変動の場合には，このような一定の群化が生じにくく，個々の音のレベルが単独で知覚される．そこで，この時の変動感には，絶えずレベル変動しているという，系列全体の印象が加わることになる．したがって，一つ一つの

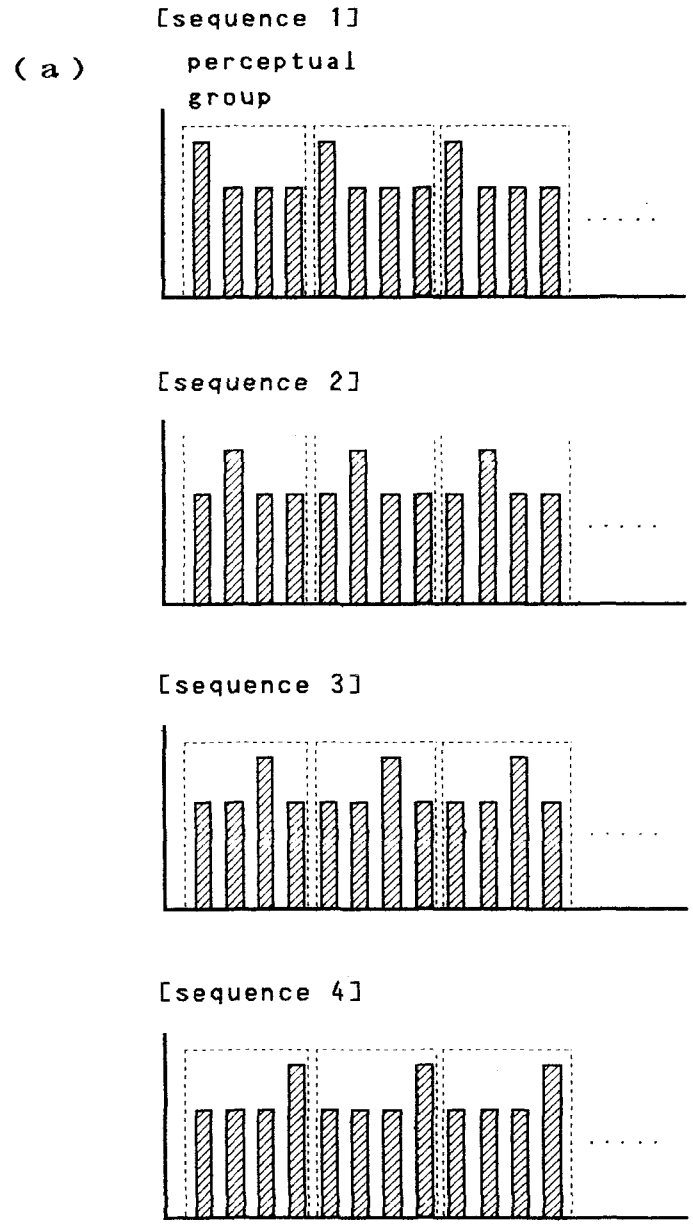


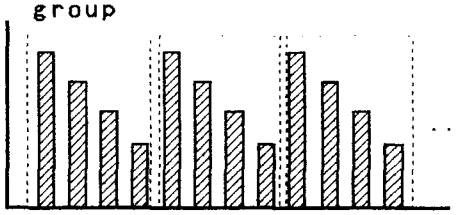
Fig.3.12 Perceptual groupings of the tones in the regular sequences. (a) Experiment 4, (b) Experiment 5.

(continued)

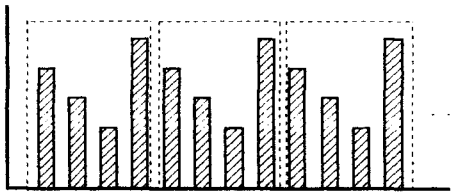
(b)

[sequence 1]

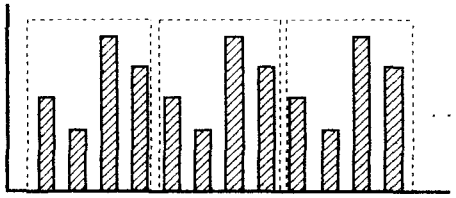
perceptual group



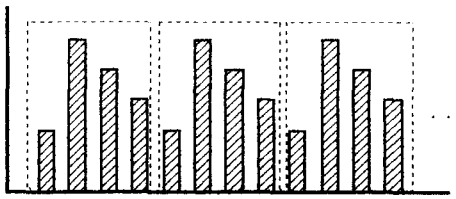
[sequence 2]



[sequence 3]



[sequence 4]



音のレベル差から生じる変動の印象に，さらにこの系列全体の変動の印象が加わるので，不規則的変動の方が変動感がより大きくなるのであろう．

また，先に述べたように，系列全体として見ると両変動条件は物理的には全く同じ刺激である．したがって，このようなパターン知覚の観点に立つと，不規則的変動の方が変動感が大きくなるのではなく，むしろ群化という知覚上の能動的な過程によって，規則的変動の変動感が“小さくなる”と考えるべきかも知れない．

5.2 規則的変動における変動パターンの知覚

これまで，規則的変動の4つのパターン(Fig.3.5，3.9)は，すべて同じ条件として一まとめにして考察してきた．ところで，実験4，5の規則的変動条件の4つの系列は，それぞれFig.3.13a，bに示す，同一の系列から切り出されたものと見なすことができる．ただ，その切り出す初めの位置が異なっているに過ぎない．したがって，これら4つの系列は“長期的”には全く同じ刺激であるが，いわばその“初期位相”が異なっていると見ることができる．

そこで，もし聴覚系が刺激情報を単に入力された順に逐次処理しているだけならば，これら4つの系列はすべて同じ変動感を生じるはずである．しかし，実験結果(Fig.3.8，3.11)に示されるように，これらの系列に対する変動感には有意な差が生じている．しかも，実験後の内観報告でも，これら4つの系列が長期的には全く同じ系列であることに気づいた被験者は1人もいなかった．このことは，聴覚系が，単なる逐次処理ではなく，何らか能動的な処理を行なっていることを示すものと言える．

この処理は，前節で考察した知覚における群化の働きと同様に考えることができよう．すなわち，規則的変動条件の4つの系列は，時間的な近接の要因とよい形の要因から，Fig.3.12a，bに示す，異なる群の繰り返しと知覚されるで

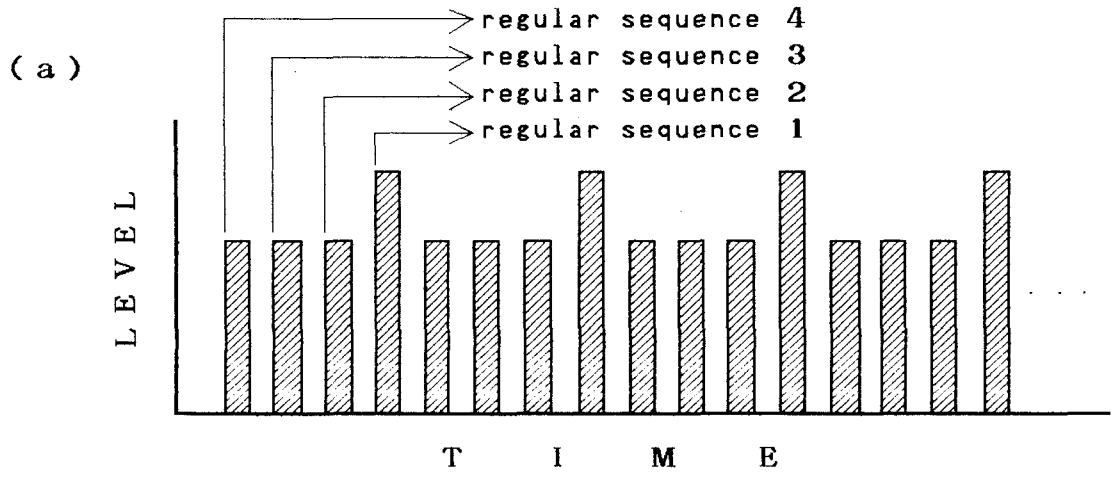
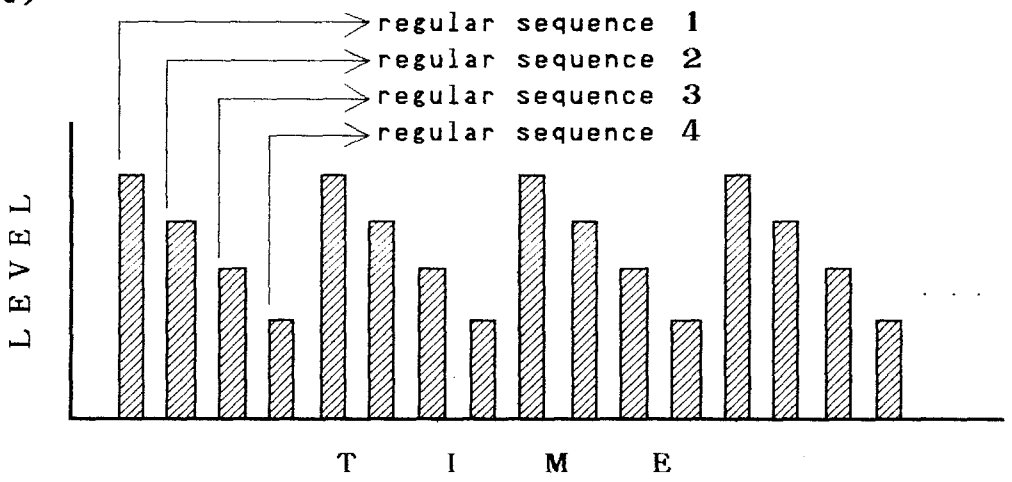


Fig.3.13 Starting points of the four regular sequences.
(a) Experiment 4, (b) Experiment 5.

(continued)

(b)


regular sequence 1
regular sequence 2
regular sequence 3
regular sequence 4
LEVEL
TIME

あろう．したがって，長期的には同じ系列でも，知覚上は全く異なる系列となる．この群の一つ一つに変動感の違いがあるため，全体としての変動感に相違が生じるのであろう．

このことは，リズム知覚(時間軸上での音のパターン化)の研究から裏付けることができる．まず実験4の結果では，系列1と系列4で変動感が相対的に大きい．これは，Fig.3.12aに示す知覚上のパターンで見ると，4音の第1音もしくは第4音が強い系列である．

ところで，FraisseとOléronは，これと同様の音刺激を用いて次のような実験を行なっている(Fraisse and Oléron，1954．梅本，1966より引用)．彼らは，弱強弱弱(“×○××”と表記する)の4音が15回繰り返される系列を被験者に呈示した．各音の間隔は，475msである．そして，刺激呈示後，被験者に打鍵によって同じ系列を再生するよう求めた．その結果，正しく再生されたのは全体の18％に過ぎず，残りの82％は異なるパターンに再構成されて再生された．しかも，再構成されたうちの55％は第1音が強い系列(○×××)で，45％は第4音が強い系列(×××○)であったという．

また，我々は，メトロノームや時計の秒針のような同じ強さの音の系列を聴いても，そこに強弱のアクセントのついたリズムを知覚することがある．これは，「主観的リズム(subjective rhythm)」と呼ばれる(Fraisse，1982)．この時，4音を一まとまりとした群化が生じ，しかもその中の第1音が“強い”と知覚される傾向がある(Handel，1989)．

これらの例から，4音からなるパターンの繰り返しを聴いた場合，第1音もしくは第4音に強い音がくる群化の生じやすいこと，また物理的には同じ強さの音でも，第1音は(おそらく，第4音も)強く知覚される傾向のあることが分かる．

そこで，実験4の系列(Fig.3.12a)でも，これと同じ知覚が生じている可能性がある．すなわち，系列1と系列4では，そもそも物理的にそれぞれ第1音もしくは第4音が強いことに加えて，主観的にもその音が強く知覚される傾向がある．

その結果，その効果が相俟って，同じレベル差にもかかわらず，他のパターンと比べて変動感が大きくなると考えられる．

なお，実験５の系列(Fig.3.12b)でも，同様の知覚上の働きが作用して変動感に違いが生じているものと考えられるが，詳細は明らかでない．数種類の強さの異なる音がまじりあった系列における一つ一つ音の強さの知覚については筆者の知る限りでは研究例がない．また，今回用いた系列も，もとになっているのはFig.3.13bに示すパターンの１例だけであり，一般的な結論を導き出すのは困難であろう．このような複雑な系列における個々の音の強さの知覚は，今後の研究課題である．

5.3 環境音評価などへの応用

以上の考察から明らかなように，たとえ長期的に見て物理的なエネルギー量が等しい音でも，その変動パターンによって変動感には違いが生じてくる．

先にも述べたように，我々の身の回りに存在する音の大半は，時間的変動を伴っている．そこで，これらの環境音の印象にも，変動の不規則性の要因が影響している可能性がある．例えば，不規則的変動を伴う音は，規則的変動を伴う音よりも“落ち着かない”“耳ざわりな”などの悪い印象を引き起こすであろう．また，不規則的変動を含む音は，物理量から予測されるよりも“うるさい”“耳につく”などと評価される可能性がある．

さらに，規則的に変動する音であっても，そのパターンによって印象は異なってくる．変動パターンによっては，“耳ざわりな”などの悪い評価がなされる可能性があろう．

このような変動パターンの効果は，環境音の評価のみならず，特に合成音声の自然さや音楽演奏の評価などとも深い関連性があると考えられる．次章では，その一例として変動感と音楽演奏の評価の関係を検討し，以上の実験結果の妥当性を検討する．

第４章
音楽場面における変動の知覚

１．本章の目的

これまで，正弦波による変調音や周波数一定の音の繰り返しからなる系列など，比較的単純で限定された刺激条件での変動の知覚を検討してきた．したがって，これらの結果を一般化するには，現実の環境音や音楽・音声といった，より広い刺激範囲への適用の可能性を探る必要がある．そこでこの章では，その適用の一例として，ピアノ演奏を題材として取り上げることにする．

さて，ピアノ演奏においては，演奏者には10本の指を意図した通り自由に操れることが要求される．特に，どの指でも同じ強さで弾けることは，初級者にとって基本的な技能の１つとしてまず最初に必要とされるものである．例えば，Hanonのピアノ教本(ピアノの名手になる60練習曲)のような専用の練習曲が広く用いられていることからも，それぞれの指が均等に動かせることの重要性がうかがえよう．

ところで，熟練したピアニストたちの演奏を評して，“粒が揃った”，あるいは“粒立ちがよい”といった表現がよく用いられる．その表現は，ピアノ演奏のさまざまな側面を指していると考えられるが，その中でも，音の強さを揃えて弾くべき箇所で，全ての音が同じ強さで演奏されているかどうかといった点は大きな要因の１つであろう．

しかし一方で，全ての音を同じ強さで弾くことは，指のコントロールの限界もあり，非常に困難なことである．そこで，一つ一つの音の強さをいかにコントロールするかは，ピアニストにとっての大きな課題である．

ところで，第３章の実験結果では，変動のパターンが規則

的な場合，変動感はより小さくなることが示された．したがって，ピアノ演奏の場合にも，変動パターンを揃えることによって全体の音のばらつきの印象が抑えられることが予想される．

ピアニストは，自分の演奏を常に耳でモニタしながら演奏をしている．そこで，音の強さの変動パターンを揃えることによって，聴感上，より揃っているように聴かせるテクニックを，ピアニストたちは長い訓練の間に身につけているに違いない．

また，第3章の実験結果から，不規則的な変動をもつ音は，“落ち着かない”“耳ざわりな”などの不快な印象をもたらす可能性が考えられる．したがって，そのような変動パターンをもつ演奏は，変動が規則的なものに比べて，演奏の評価が悪くなるであろう．

そこで本章では，

(1)演奏者が全ての音の強さを揃えて演奏しようと意図して弾いた場合，一つ一つの音の強さはどの程度揃って弾かれているか，

(2)そこで見られる変動のパターンが，音の「強さの揃い方」の印象や，さらには演奏の「上手さ」，音楽演奏としての「好ましさ」などの音楽的判断にどのような効果をもたらしているか，

の2点について検討を行い，第3章での実験結果の妥当性を検討する．

2．実験６

－熟練したアマチュアピアノ演奏家の演奏分析－

2.1 目的

演奏者が全ての音の強さを揃えて演奏しようと意図して弾いた場合，一つ一つの音の強さはどの程度揃って弾かれているかを調べるために，実際のピアノ演奏の物理的な分析を行なった．

2.2 方法

使用曲

曲は，Fig.4.1に示す，Chopinの夜想曲第２番変ホ長調作品９の２の一部を用いた．楽譜は，全音楽譜出版社版を使用した．なお，実際の演奏の記録では，図中かっこ内の部分のみを使用した．

このフレーズを選んだのは，次の理由による：

(1)右手だけの演奏であるため，音響的に分析がしやすい；
(2)プロのピアニストによる演奏が多く，後述のように，アマチュア演奏家の演奏との比較ができる．

装置

MIDI(Musical Instrument Digital Interface)を装備したデジタルピアノ(Roland，HP2700)を用いた．Measuring amplifier(Brüel & Kjær，type 2610)を用いた音響測定の結果，このピアノでは，演奏された音の強さを約0.3dB幅の精度で記録できることが確認されている．

演奏音の強さと持続時間の情報は，MIDIを介して，パーソナルコンピュータ(NEC，PC-9801M2)上のシーケンサー(Come on music，RCX-PC98)によって記録した．

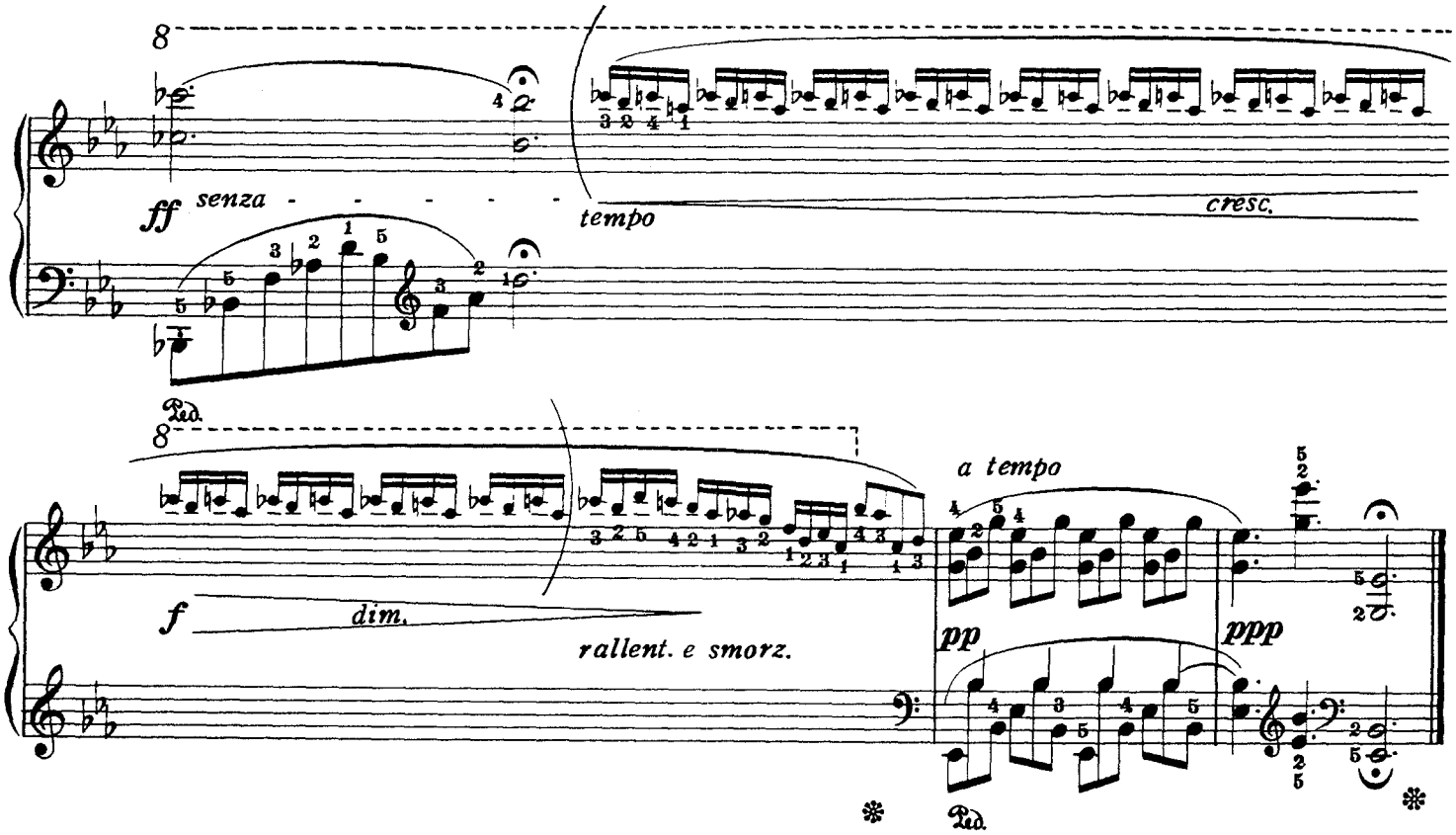


Fig.4.1 The last few bars of Chopin's Nocturne (op.9, no.2). The passage subject to this study is marked with parentheses.

手続き

演奏者に，Fig.4.1のかっこ内の部分を演奏してもらい，その演奏情報を記録した．その際に，一つ一つの音をできるだけ同じ強さに揃えて演奏するようにと教示した．ただし，全体的な強さは*mf*(メゾフォルテ)程度とした．

テンポは♩=150とし，演奏前にメトロノームを聞かせて指示した．演奏者はデジタルピアノに装備されたスピーカを通して自分の演奏をモニタすることができ，納得がいくまで繰り返し演奏を行なった．

演奏者

熟練したアマチュアピアノ演奏家，30代の女性1名，20代の男性1名である．両者ともに専門的な訓練を受け，20年以上の演奏経験を持っている．

2.3 結果と考察

2.3.1 演奏音の強さの分析

2人の演奏家の演奏の例をFig.4.2に示す．演奏された音の強さは，measuring amplifier(Brüel & Kjær, type 2610)を用いてピーク音圧レベル(時定数125ms)を測定したものである．また，対応する音符を図の上部に示す．

これを見ると，一つ一つの音をできるだけ同じ強さで演奏するようにとの教示にもかかわらず，両演奏者ともに，各音の強さにはかなりのばらつきが見られることが分かる．その幅は，最大で約10dBにも達している．音の強さの弁別閾は様々な刺激条件を考慮しても0.5～2dBの範囲であり(Moore, 1989)，その大きさから判断すると，今回の演奏結果に見られるような大きなばらつきは容易に検知されるはずである．

しかし，次の2つの特徴が見られる：

(1)16分音符4つで1つの“演奏単位”を形成している(図中

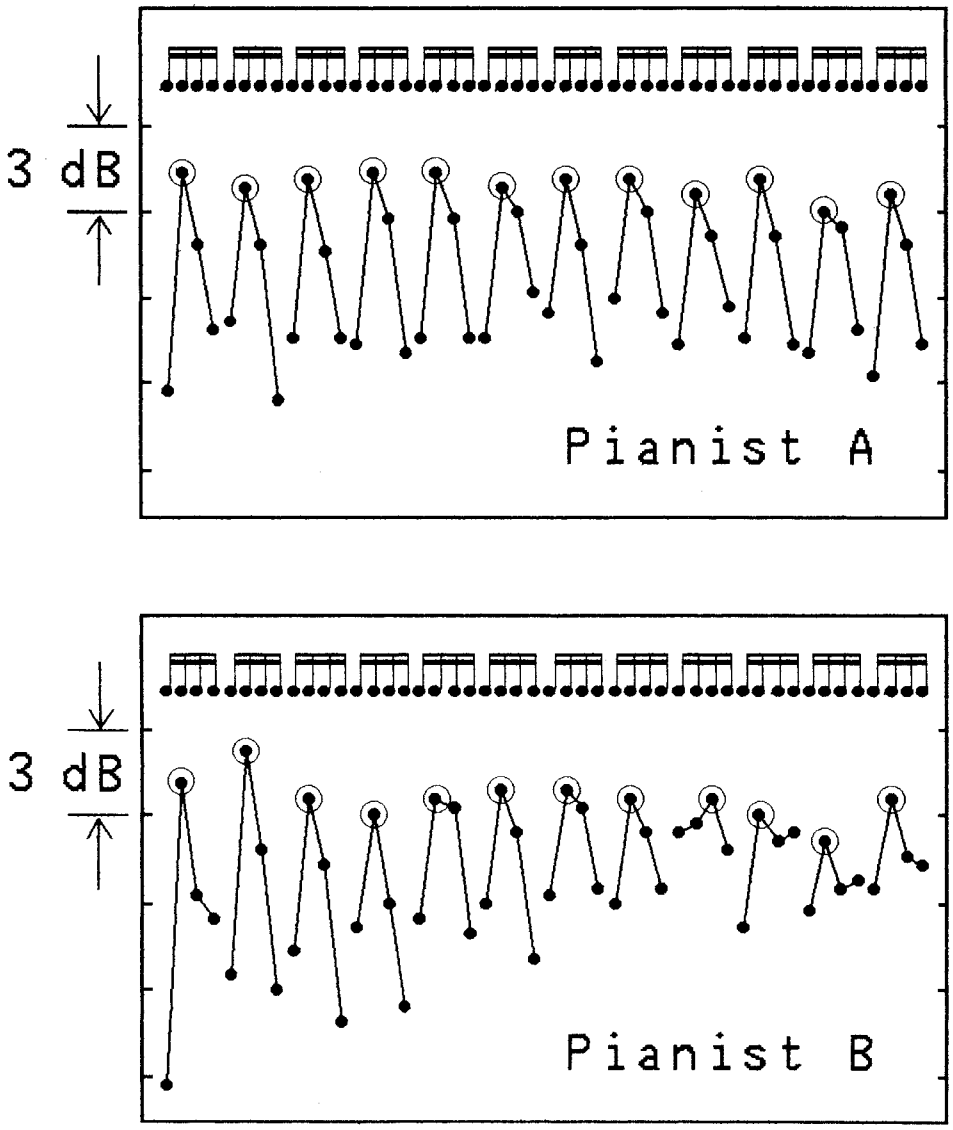


Fig.4.2 Performances of two skilled amateur pianists (Nocturne, op.9, no.2).

の実線)．そして，その山型の一定のパターンが規則的に繰り返されている．

(2)各演奏単位内でピークに当たる音(図中の白丸)の強さは非常によく揃っている．このピークの音のばらつきは全体を通して3dB以内にほぼ収まっており，強さの弁別閾に非常に近い．

2.3.2 他の曲での分析例

このような演奏音の強さのばらつきは，他の曲の場合にも同様に見られている(倉片・桑野・難波，1992b)．その例をFig.4.4に示す．

これは，Chopinのワルツ第6番変ニ長調作品64の1「小犬」の一部(Fig.4.3，かっこ内)を，同じアマチュア演奏家に同様の手続きで演奏してもらったものである．ただし，ここでは演奏者が弾きやすいように，テンポは特に指定しなかった．(演奏の結果，両演奏者のテンポは約♩=230～250であった)．なお，この曲では一回ごとの演奏のばらつきが大きかったため，5回の演奏のレベルを平均してある．

これを見ると，この曲でも，やはり両演奏者ともに各音の強さはかなりばらついていることが分かる．しかし，Fig.4.2の夜想曲の演奏と同じ特徴が見られている．すなわち，

(1)8分音符4つで1つの“演奏単位”を形成している(図中の実線．2小節目が不規則であるが，基本的にG－As－C－Bを1つの演奏単位と考える)．そして，そのN字型の一定のパターンが規則的に繰り返されている．

(2)各演奏単位内ののでのピークに当たる音(図中の白丸)の強さは非常によく揃っている．このピークの音のばらつきは，全体を通して3dB以内にほぼ収まっており，強さの弁別閾に非常に近い．

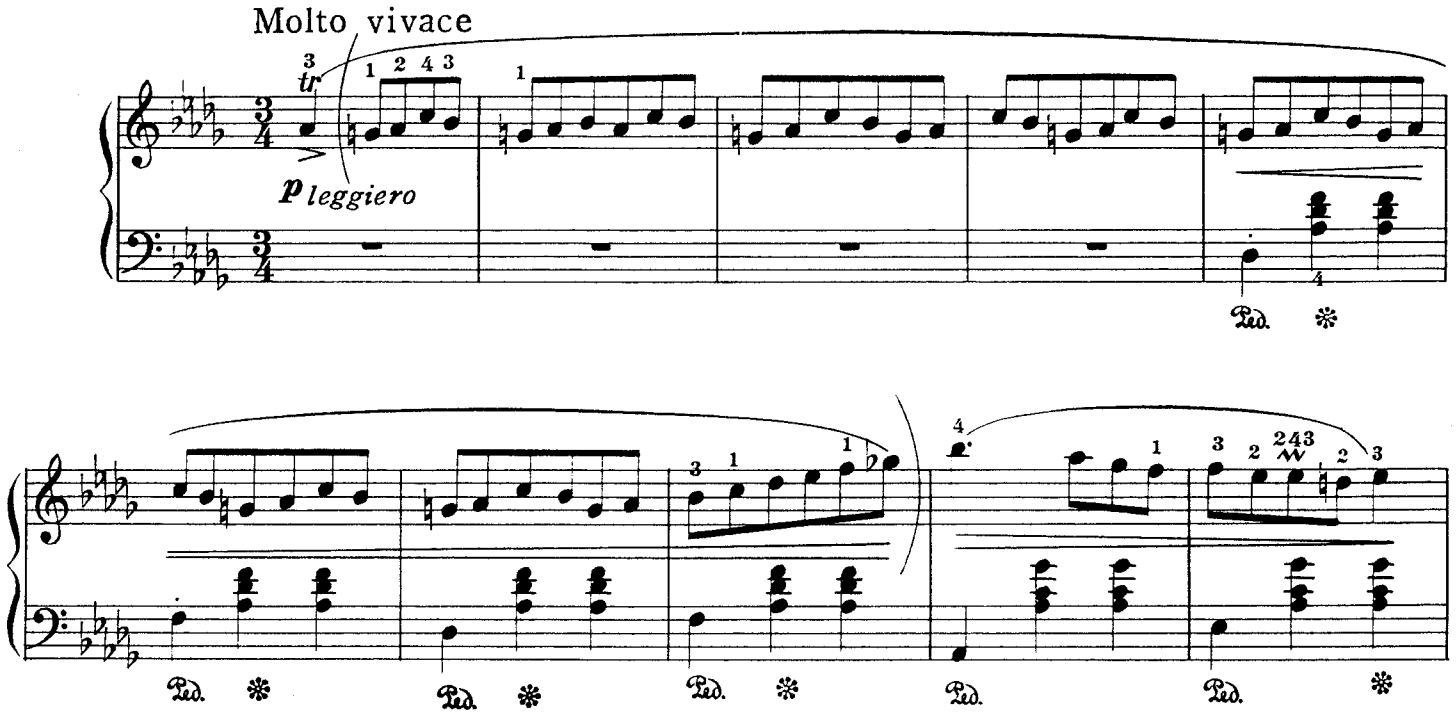


Fig.4.3 The beginning of Chopin's Waltz (op.64, no.1). The passage subject to this study is marked with parentheses.

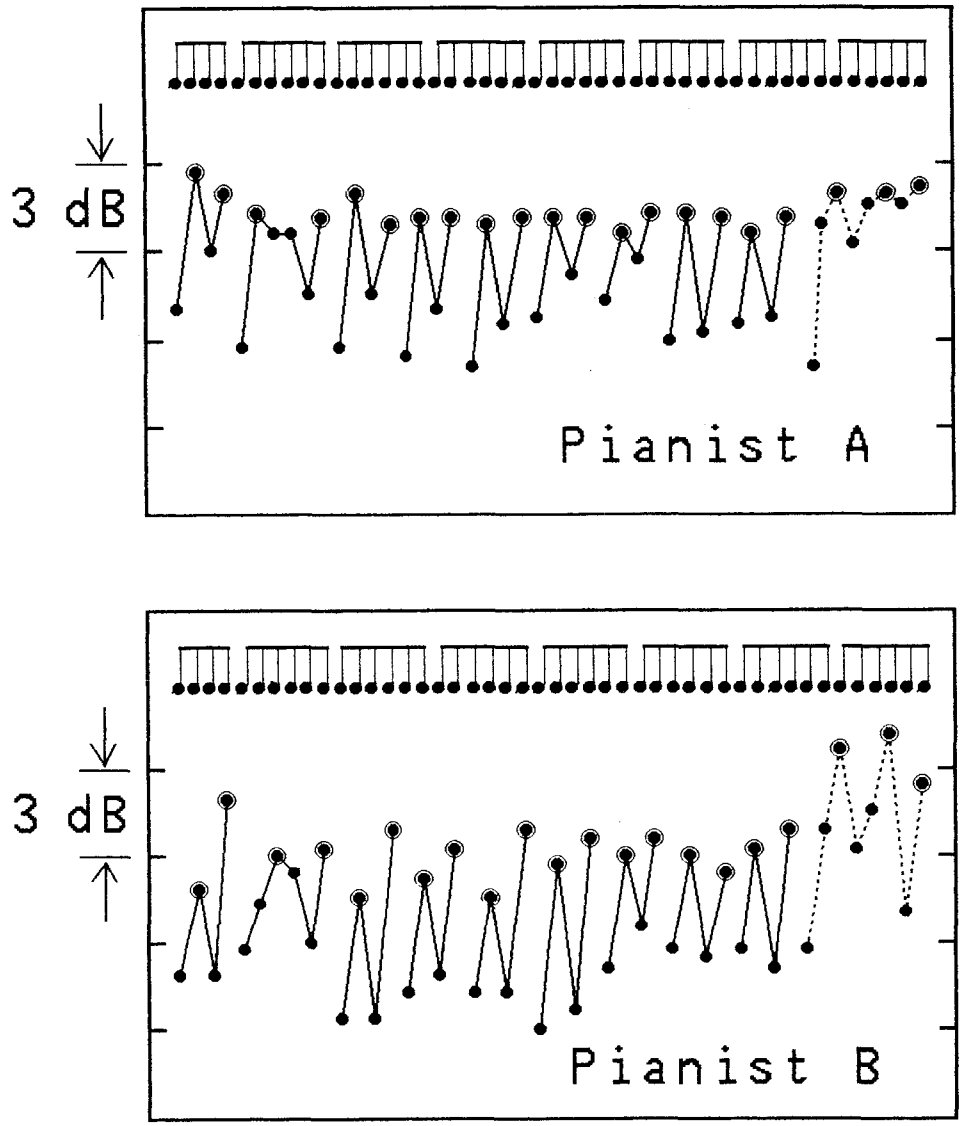


Fig.4.4 Performances of two skilled amateur pianists (Waltz, op.64, no.1).

このように，フレーズの違いにかかわらず，全ての音をできるだけ同じ強さで演奏するように意図して弾いた場合でも，一つ一つの音の強さは必ずしも揃ってはいない．ただし，それらの演奏は，同様の特徴をもった変動パターンを示すようである．

2.3.3 プロのピアニストの演奏分析

以上は，アマチュア演奏家の演奏を分析した例であった．そこで，これらの演奏の特徴が他の演奏家でも同様に見られるかを確認するために，プロのピアニストの演奏を分析した．用いた音源をTable 4.1に示す．

Fig.4.5は，レベルレコーダ(Rion，LR-51)で記録した，3人のピアニストの演奏の一例である．時定数は，音のピークの位置とレベルを見やすくするために10msとした．曲は，夜想曲第2番(Fig.4.1，図中のかっこ内)である．対応する音符を図の上部に示す．

これを見ると，どのピアニストでも，一つ一つの音の強さは必ずしも揃っていないことが分かる．隣合う音のレベルには，最大で6dB程度の差が生じている．この変動幅は，Fig.4.2のアマチュア演奏家の場合より小さいものの，音の強さの弁別閾から考えると充分検知できる大きさである．プロの演奏でもこの程度のばらつきが生じる点は興味深い．

もちろん，この例はあくまで“音楽”としての演奏の一部であり，必ずしも強さを揃えようと意図していたとは限らない．しかし，演奏単位ごとのピークを追っていくと，非常になだらかな強弱変化がつけられていることが分かる(例として，Harasiewiczの図中に＊印で示す.他のピアニストでも同様)．この点での音の強さのコントロールの正確さに比べると，一つ一つの音のばらつきは大変大きいと言えよう．

同時にこの例は，音の強さの揃い方の印象が，一つ一つの音よりも，むしろピークとなる音の揃い方に強く支配されることを間接的に裏付けるものと見ることもできる．

Table 4.1 Sound sources used in the analysis of the performance of professional pianists.

Pianist	Source
P.Entremont	Sony SOCL-1071
S.François	Angel EAA-108
A.Harasiewicz	Philips X-5605

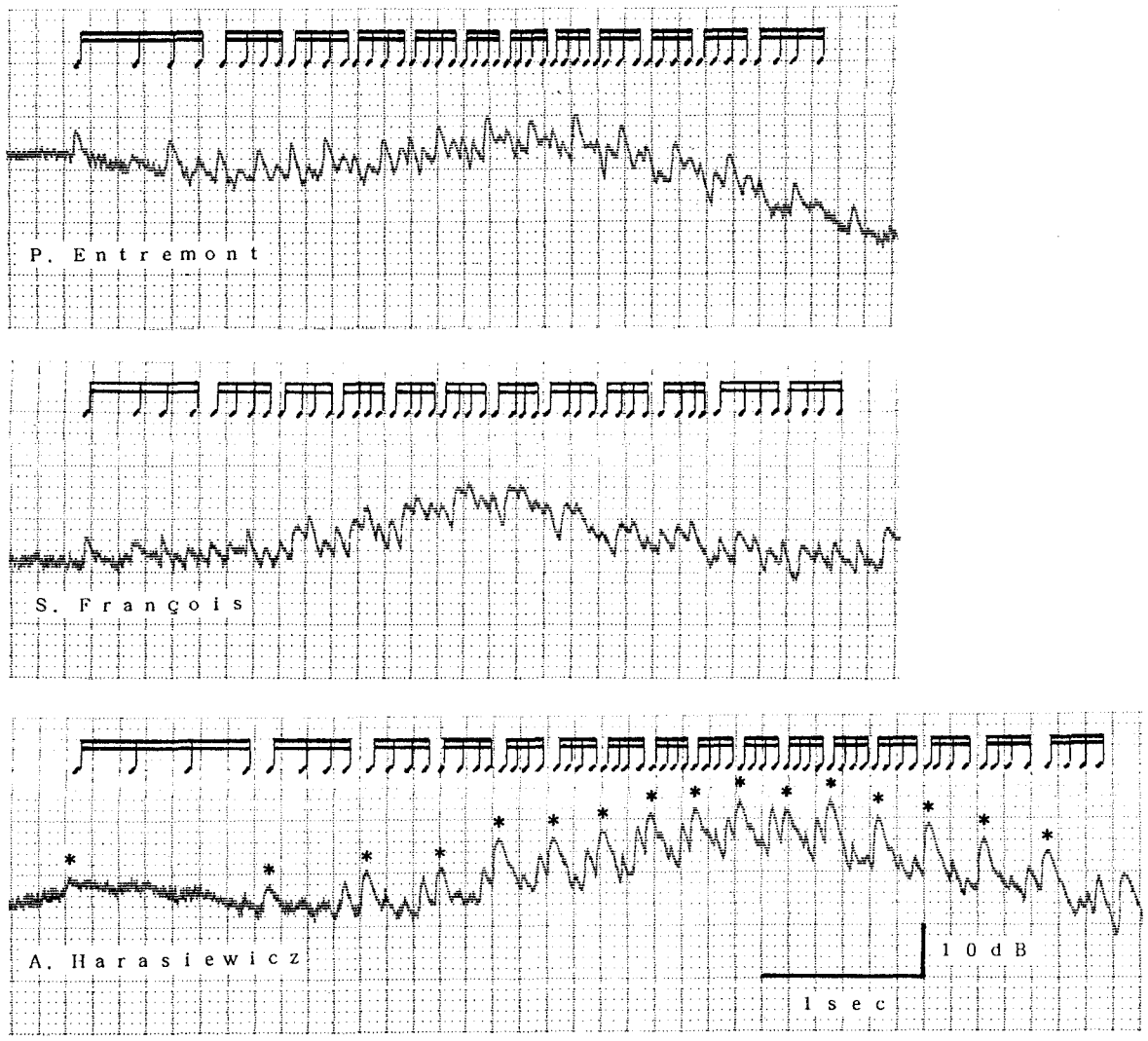


Fig.4.5 Performances of three professional pianists (Nocturne, op.9, no.2).

また，演奏単位ごとの強さの変化のパターンも，ピアニストによってその形に違いはあるものの，常に一定の形が繰り返されている．これも，アマチュア演奏家による演奏の分析結果と一致するものである．

3．実験７　－「音の強さが揃った」印象の判断　－

3．1　目的

このように，演奏者が意図して強さを揃えて弾いた場合でも，一つ一つの音の強さは必ずしも揃ってはいない．

ところで，第３章の実験結果に示されるように，物理的なエネルギー量は同じでも，変動のパターンによって変動感には違いが生じる．したがって，ピアノ演奏の場合でも，物理的に見て強さにばらつきがあっても，それが直接，変動の印象と結び付くとは限らない．

そこで，Fig.4.2の演奏に見られた２つの特徴が「音の強さの揃い方」の印象にどのような効果をもたらしているかを明らかにするために，聴取実験による検討を行った．

3．2　方法

刺激

曲は，Chopinの夜想曲第２番(Fig.4.1)を用いた．本章２節で記録した２人のアマチュア演奏者の実際の演奏(Fig.4.2)をもとに，シーケンサ(Come on music，RCX-PC98)でそれぞれ次の４種類の刺激を作成した：

(1)各演奏単位内の音の強さを，全てそのピークの音に揃える("equal-level"条件；Fig.4.6a)．全ての音の強さを揃えて弾いた場合，理想的にはこのような演奏になるはずである．

(2)各演奏単位内のピークの音の強さを，ランダムに３dB増加する("random-peak"条件；Fig.4.6b)．これによって，一定であったピークの音の強さが乱されることになる．

(3)各演奏単位内で，音の強さを互いにランダムに入れ換える(ただし，ピークの音のレベルは変えない．"random-pattern"条件；Fig.4.6c)．これによって，音の強さの変動の一定のパターンが乱されることになる．

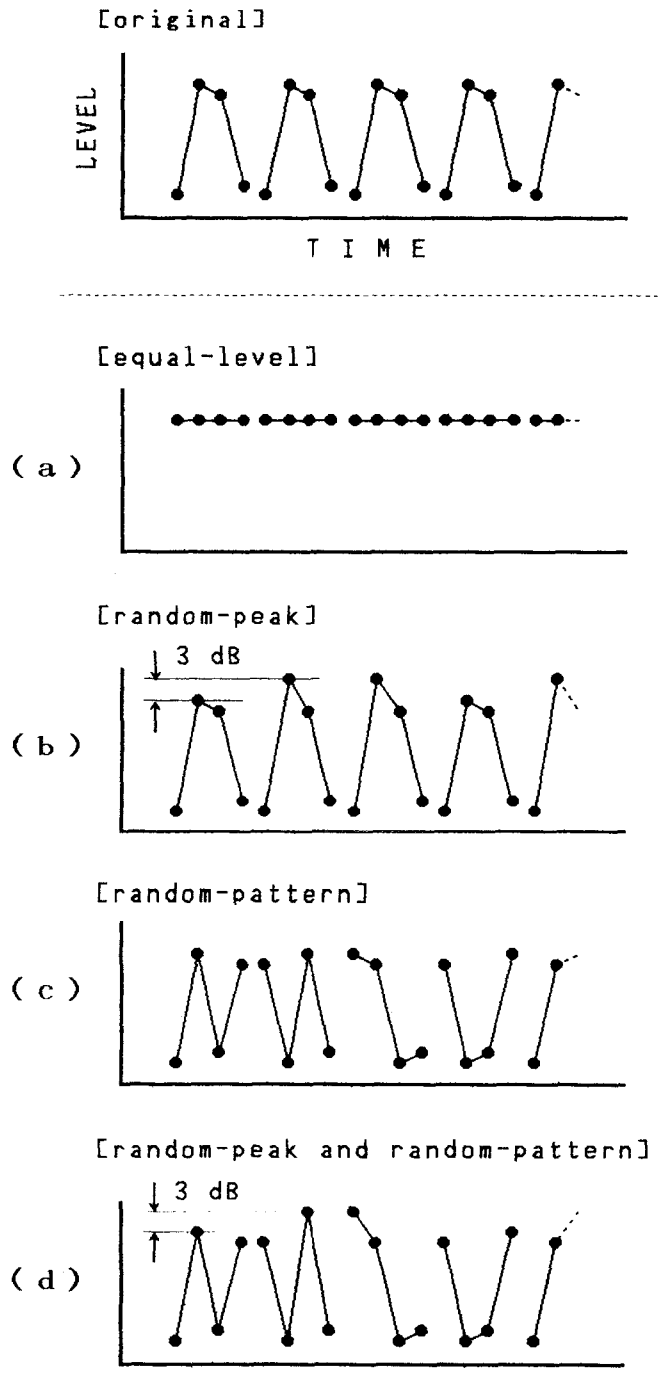


Fig.4.6 The stimuli used in Experiment 7 and 8. (a) The levels of all the tones were made equal to the peak level. (b) The peak levels were randomly increased. (c) The levels of tones were randomly exchanged. (d) The peak levels were randomly increased and the levels of tones were randomly exchanged.

(4)各演奏単位内で音の強さを互いにランダムに入れ換え，かつそのピークの音の強さをランダムに3dB増加する("random-peak and random-pattern"条件；Fig. 4.6d)．これによって，一定であったピークの音の強さも変動のパターンも共に乱されることになる．

次に，上記4種類の刺激，並びに元の演奏を3秒間隔で2つずつ組みにした．また，2つの呈示順序を入れ換えた組も作成した．したがって，刺激対は${}_5C_2 \times 2 = 20$組である．

これらの刺激は，本章2節のアマチュア演奏家の演奏の記録に用いたデジタルピアノ(Roland，HP2700)より発音させ，DAT(Victor，XD-Z1100)に録音した．

装置

刺激は，DATデッキ(Victor，XD-Z1100)より，講堂内(大阪大学教養部イ講堂)の被験者前方のステレオスピーカ(Victor)より再生した．なお，この講堂では，被験者の座席の違いによる聴取レベルの差は0.5dB以内であることが，実験前の音響測定で確認されている．

手続き

一対比較法により，強さの揃い方の印象の心理尺度を構成した．

実験は，2つのセッションに分けて行なった．1つめのセッションでは演奏者Aの演奏から作成した刺激対，2つめのセッションでは演奏者Bの演奏から作成した刺激対を用い，それぞれ別の被験者が参加した．

刺激は，上記の20組をランダムな順序で呈示した．呈示レベル(L_{Aeq})は，実演奏時に演奏者の頭の位置で測定した値とほぼ等しくなるようにした(演奏者A：76dBA，演奏者B：67dBA)．

被験者は，1対の刺激を聴いた後，どちらの演奏の方が一

つ一つの音の強さがより揃っていたかを回答用紙に記入した．判断のための時間は10秒とした．各被験者は，10試行の練習の後，20組の全刺激対につき1回ずつ判断を行なった．

教示

Fig.4.1のかっこ内の楽譜とともに，以下の教示を回答用紙に印刷し，被験者に呈示した：

「これから，楽譜に示す曲の演奏を2つずつ組にしてお聞かせします．そこで，2つの演奏を聴き終えたあと，どちらの演奏の方が一つ一つの音の強さがよく揃っていたかを判断し，用紙に○印を記入してください．音は一度しか呈示しませんので，よく聴いて下さい．もし聴き漏らしてしまったり，あるいは判断がつかない場合でも，必ずどちらかに○印をつけて下さい．10秒経つと次の組が呈示されます．遅れないように判断して下さい．」

被験者

大阪大学教養部学生253名(演奏者Aにつき85名，演奏者Bにつき168名)．この実験は，心理学の実験実習の一部として行なわれた．

3.3 結果と考察

Thurstoneのケース V により得られた心理尺度をFig.4.7に示す．右方に位置する刺激ほど，より強さが揃ったと判断されたことを意味する．

これを見ると，"random"と名付けられた3つの刺激(すなわち，random-peak，random-pattern，random-peak and random-pattern条件)はどれも左方に位置していることに気づく．これは，演奏単位ごとの山型のパターンやピークの音の強さが乱されるにしたがって，強さの揃い方の印象が大きく悪化することを示している(演奏者A[original 対 random-peak]：$\chi^2(1)=64.85$，$p<.01$；演奏者B[

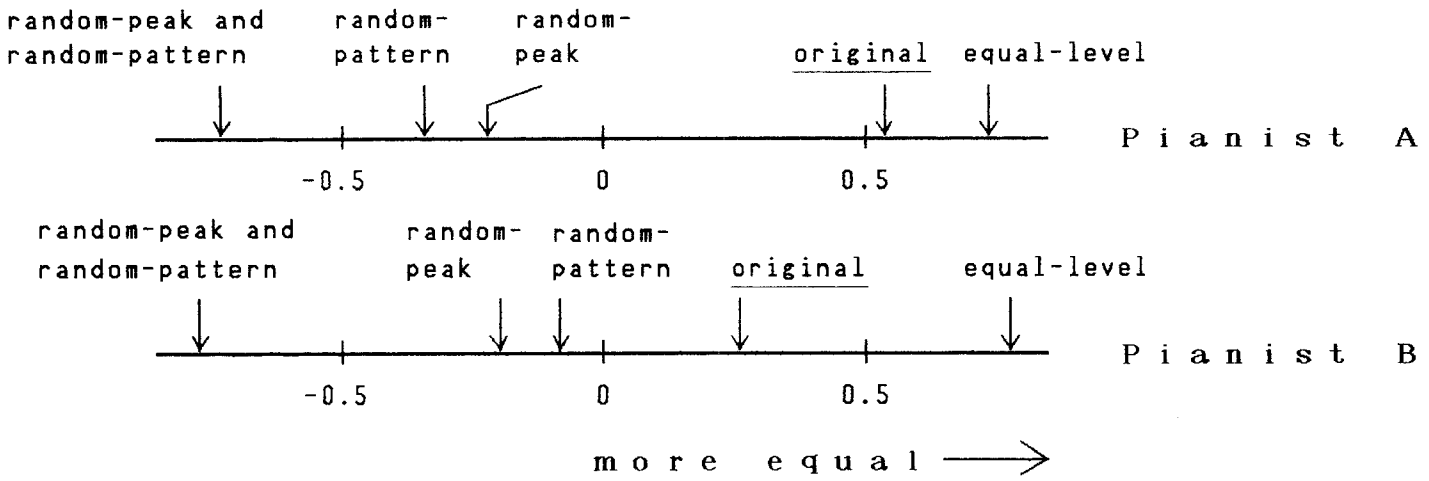


Fig.4.7 Psychological scales of the impression of the equality of intensity.

original 対 random-pattern]：$\chi^2(1)=31.60$, $p<.01$).

これらに対して，オリジナルの演奏は全ての音を揃えた場合には及ばないものの(演奏者A：$\chi^2(1)=7.21$, $p<.01$；演奏者B：$\chi^2(1)=106.30$, $p<.01$)，強さが揃った印象を比較的よく維持している．特に，演奏者Aでは両条件の距離は非常に接近しており，全ての音を揃えた演奏に近い評価がオリジナルの演奏に対してなされていることが分かる．

これと同様の結果は，防音室内でヘッドホンを用い，刺激呈示条件をさらに統制して行った個別実験でも得られている(Kurakata, Kuwano and Namba, 1992a)．

したがって，一つ一つの音の強さにばらつきがあっても，強さの変化の一定のパターンが規則正しく繰り返されていたり，各パターン内のピークの音の強さが一定であれば，全体を通して聞いた時，強さはより揃って感じられるようである．

4.実験8　－音楽的判断との関係－

4.1 目的

以上の結果は，あくまで音の強さの判断に関するものである．したがって，刺激としてピアノ曲を用いている他は，被験者の課題として，強さの弁別に関する従来の心理物理学的実験と大きな違いはない．

ところで，第3章の実験結果から考えると，不規則的な変動をもつ音は，“落ち着かない”“耳ざわりな”などの不快な印象をもたらす可能性がある．したがって，そのような変動パターンをもつ演奏は，単に強さの揃い方の印象が異なるだけではなく，音楽演奏としての評価も悪くなることが予想される．

そこで，同じ刺激を用いた同様の実験により，演奏の「上手さ」と音楽演奏としての「好ましさ」の判断を求め，強さの変動と音楽的判断の関係を検討した．

4.2 方法

刺激

実験7と全く同じ刺激を使用した．すなわち，本章2節で記録した2人のアマチュア演奏者の実際の演奏(Fig.4.2)をもとに，シーケンサー(Come on music，RCX-PC98)でそれぞれ次の4種類の刺激を作成した：

(1)各演奏単位内の音の強さを，全てそのピークの音に揃える("equal-level"条件；Fig.4.6a)．
(2)各演奏単位内のピークの音の強さを，ランダムに3dB増加する("random-peak"条件；Fig.4.6b)．
(3)各演奏単位内で，音の強さを互いにランダムに入れ換える(ただし，ピークの音のレベルは変えない．"random-pattern"条件；Fig.4.6c)．
(4)各演奏単位内で音の強さを互いにランダムに入れ換え，かつそのピークの音の強さをランダムに3dB増加する

("random-peak and random-pattern"条件；Fig. 4.6d).

次に，上記4種類の刺激，並びに元の演奏を3秒間隔で2つずつ組みにした．また，2つの呈示順序を入れ換えた組も作成した．したがって，刺激対は$_5C_2 \times 2 = 20$組である．

これらの刺激は，2節のアマチュア演奏家の演奏の記録に用いたデジタルピアノ(Roland, HP2700)より発音させ，DAT(Victor, XD-Z1100)に録音した．

装置

刺激は，DATデッキ(Victor,XD-Z1100)より，講堂内(大阪大学教養部イ講堂)の被験者前方のステレオスピーカ(Victor)より再生した．

手続き

実験は，「上手さ」と「好ましさ」の判断基準の違いにより，2つのセッションに分けて行なった．各セッションには，それぞれ別の被験者が参加した．

a) 演奏の「上手さ」の判断

一対比較法により，演奏の「上手さ」の心理尺度を構成した．

実験は，さらに2つのセッションに分けて行なった．1つめのセッションでは演奏者Aの演奏から作成した刺激対，2つめのセッションでは演奏者Bの演奏から作成した刺激対を用い，それぞれ別の被験者が参加した．

刺激は，上記の20組をランダムな順序で呈示した．呈示レベル(L_{Aeq})は，実演奏時に演奏者の頭の位置で測定した値とほぼ等しくなるようにした(演奏者A：76dBA，演奏者B：67dBA)．

被験者は，1対の刺激を聴いた後，どちらの演奏の方がよ

り上手であったかを回答用紙に記入した．判断のための時間は10秒とした．各被験者は，10試行の練習の後，20組の全刺激対につき1回ずつ判断を行なった．

b）音楽演奏としての「好ましさ」の判断

一対比較法により，音楽演奏としての「好ましさ」の判断を求めた．手続きは，上記の演奏の「上手さ」と全く同じで，判断基準だけを変えて行なった．

なお，「好ましさ」では，上手・下手，楽しい・つまらない，好き・嫌いなど，様々な観点から判断が可能であろう．また，判断基準も被験者ごとに異なっている可能性がある．しかし，この点は結果の分析の際に考慮することとし，被験者の自由な判断が引き出せるよう，好ましさの意味についての細かい教示は敢えて行なわなかった．

教示

Fig.4.1のかっこ内の楽譜とともに，条件別に以下の教示を回答用紙に印刷し，被験者に呈示した．

a）「上手さ」の判断

「これから，楽譜に示す曲の演奏を2つずつ組にしてお聞かせします．そこで，2つの演奏を聴き終えたあと，どちらの演奏の方がより上手かを判断し，用紙に○印を記入してください．音は一度しか呈示しませんので，よく聴いて下さい．もし聴き漏らしてしまったり，あるいは判断がつかない場合でも，必ずどちらかに○印をつけて下さい．10秒経つと次の組が呈示されます．遅れないように判断して下さい．」

b）「好ましさ」の判断

「これから，楽譜に示す曲の演奏を2つずつ組にしてお聞かせします．そこで，2つの演奏を聴き終えたあと，どちらが音楽演奏としてより好ましいかを判断し，用紙に○印を記入

してください．音は一度しか呈示しませんので，よく聴いて下さい．もし聴き漏らしてしまったり，あるいは判断がつかない場合でも，必ずどちらかに○印をつけて下さい．10秒経つと次の組が呈示されます.遅れないように判断して下さい.」

被験者

a) 「上手さ」の判断

大阪大学教養部学生325名(演奏者Aにつき167名，演奏者Bにつき158名)．この実験は，心理学の実験実習の一部として行なわれた．

b) 「好ましさ」の判断

大阪大学教養部学生107名(演奏者Aにつき45名，演奏者Bにつき62名)．この実験は，心理学の実験実習の一部として行なわれた．

4.3 結果と考察

4.3.1 「上手さ」の判断

Thurstoneのケースvにより得られた心理尺度をFig.4.8に示す．この図では，右方に位置する刺激ほど，より上手であると判断されたことを意味する．

これを見ると，"random"と名付けられた3つの刺激(すなわち，random-peak，random-pattern，random-peak and random-pattern条件)はどれも左方に位置していることに気づく．これは，演奏単位ごとの山型のパターンやピークの音の強さが乱されるにしたがって，上手ではないと判断されることを示している．これらに対して，オリジナルの演奏は全ての音を揃えた場合には及ばないものの，比較的上手であると判断されている．

これらの尺度上での刺激の並びは，「音の強さが揃った」印象の尺度(Fig.4.7)と全く同じ傾向を示すものである．被験者は，音の強さに操作を加えてあることは知らされていな

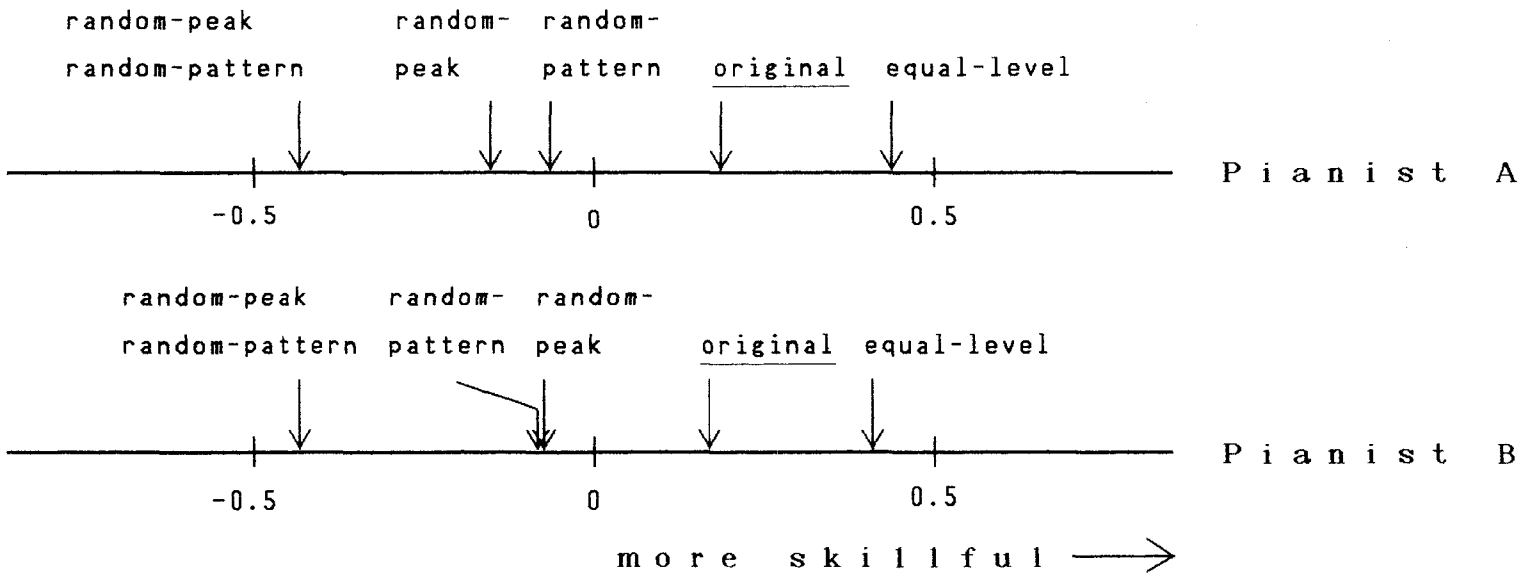


Fig.4.8 Psychological scales of the impression of skillfulness.

い．それにもかかわらず２つの尺度が全く同じ傾向を示していることから，音楽演奏が上手か下手かの判断にも，強さの揃い方の印象が大きく関わっていると考えられる．

4.3.2 「好ましさ」の判断

この条件では，先にも述べたように，被験者によって判断基準が異なっている可能性がある．そこで，20組の刺激に対する回答結果の一致数を被験者間の類似度と見なし，それをもとに被験者の判断のクラスター分析(群平均法)を行なった．２つのセッションの被験者のデンドログラムをFig.4.9a，bに示す．これによると，どちらのセッションの被験者も大きく２つの群に分かれていることが分かる．

そこで，ThurstoneのケースⅤにより，それぞれの被験者群別に好ましさの判断の心理尺度を求めた．これを，Fig.10a，bに示す．この図では，右方に位置する刺激ほど，より好ましいと判断されたことを意味する．

これを見ると，SCALE1では，どちらの演奏者でもオリジナルの演奏が比較的好ましいと判断されている．一方，"random"と名付けられた3つの刺激条件は評価が悪い．このSCALE1は，「強さが揃った」印象や「上手さ」の尺度と全く同じ傾向を示している．このように，演奏の「好ましさ」といった音楽的判断も，強さの揃い方に対する心理物理学的判断と密接に結び付いている点は興味深い．

一方，SCALE2では，どちらの演奏者でも強さをランダムにした3条件が逆に好ましいと判断されており，オリジナルや全ての音の強さを揃えた演奏(equal-level条件)はむしろ評価が悪くなっている．

そこで，この２つの尺度の食い違いを調べるため，実験後に行なったアンケート調査から，被験者の音楽経験の豊富さと尺度との関係を検討した．アンケートでは，正規の学校教育以外での音楽経験(クラブ活動や独学など)の有無を尋ねた．そして，その問いに対し，音楽経験ありと答えた被験者を「音

(a)

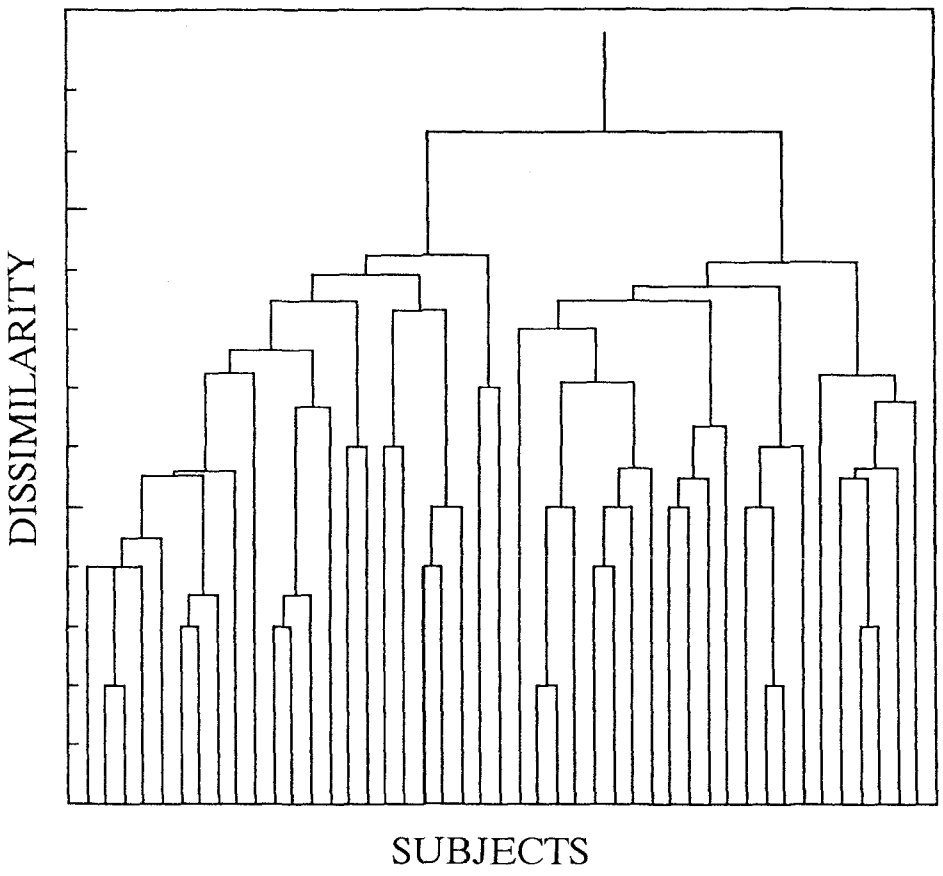
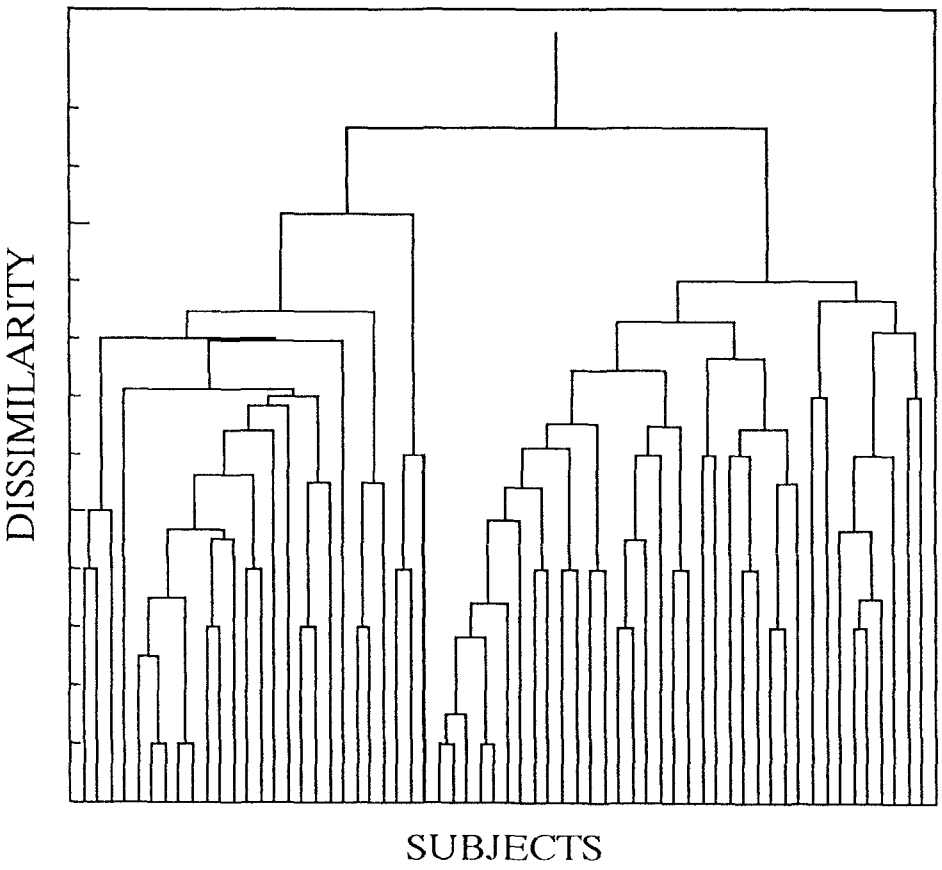


Fig.4.9 Dendrograms based on the dissimilarity of the response of the subjects in Experiment 8. (a) Pianist A, (b) Pianist B.

(continued)

(b)



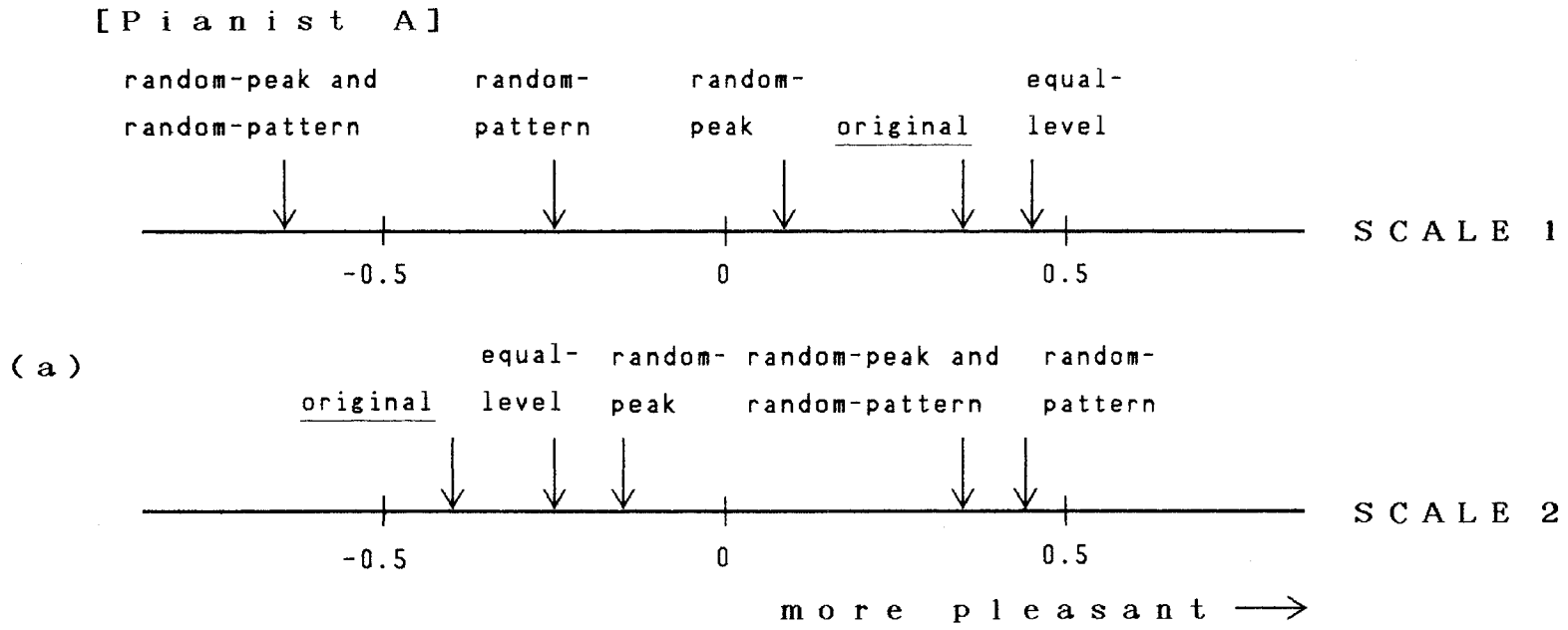
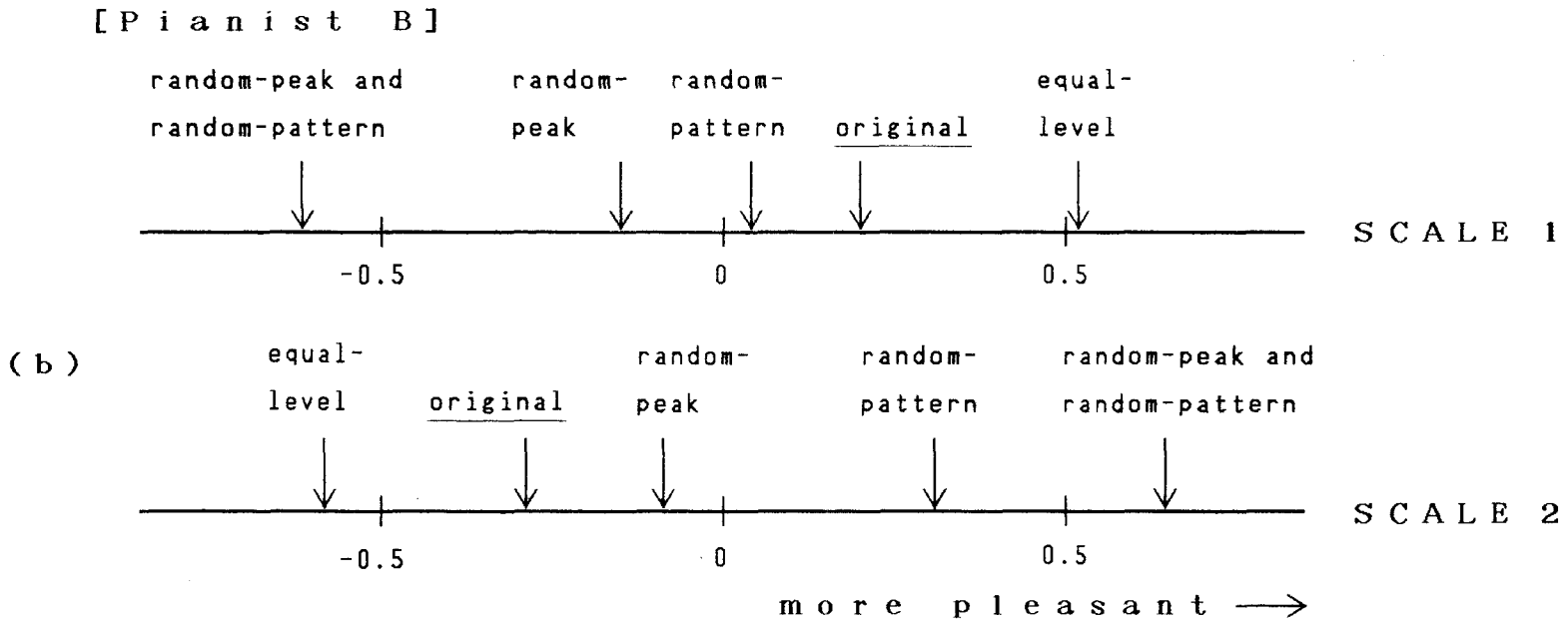


Fig.4.10 Psychological scales of the impression of pleasantness.
(a) Pianist A, (b) Pianist B.


[Pianist B]
random-peak and random-pattern
random-peak
random-pattern
original
equal-level
SCALE 1
-0.5
0
0.5
(b)
equal-level
original
random-peak
random-pattern
random-peak and random-pattern
SCALE 2
-0.5
0
0.5
more pleasant ⟶

楽群：musicians」，音楽経験なしと答えた被験者を「非音楽群：non-musicians」として分類した．

各被験者群における，SCALE1，SCALE2の回答をした群に含まれる者の割合をFig.4.11に示す．これによると，演奏者A・Bのどちらにおいても，音楽群では非音楽群に比べて，SCALE1，すなわち「強さが揃った」印象や「上手さ」の判断と同じ尺度を示した者の割合が多い．特に演奏者Aでは，その比は統計的にも有意な差である（$\chi^2(1)=5.23$，$p<.05$）．

このことから，音楽経験の多い者は，強さの揃い方に注目した分析的な聴き方をしたと考えられる．一方，それ以外の被験者は，おそらくランダムに強さの変化している方が“面白い”などの観点で判断したのであろう．

SCALE1の判断を示した被験者が全体の約半数を占めることから，音楽演奏の好ましさの判断にも強さの揃い方の印象が大きく関わっていることは確かである．ただし，それ以外の観点からの判断（SCALE2）も可能である点が，単なる知覚的側面からは捉えられない，音楽的判断の多様性であろう．

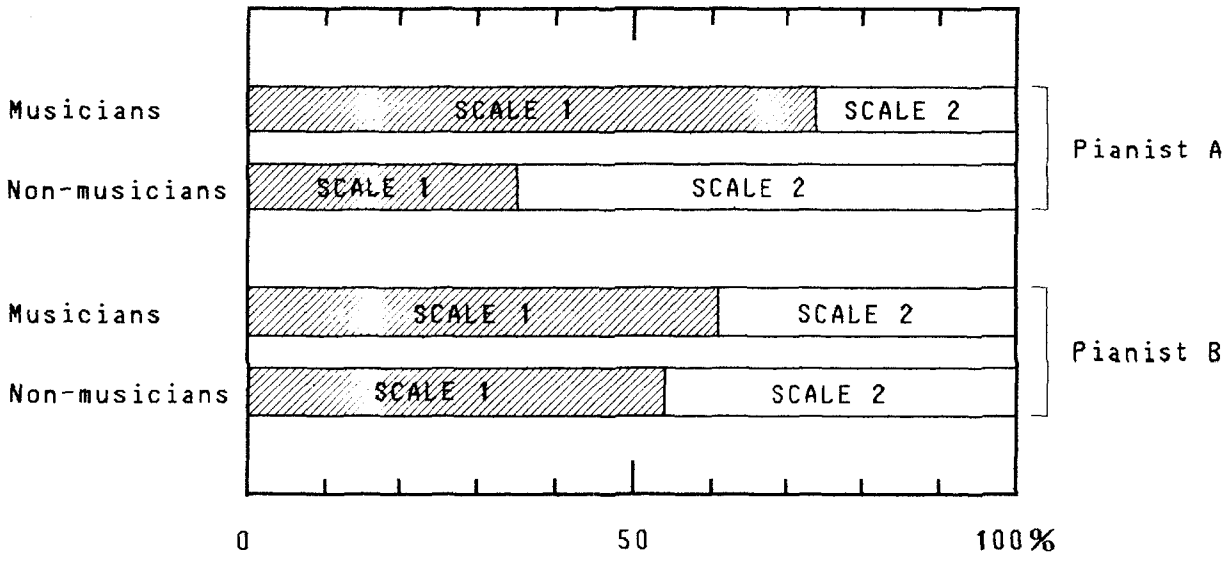


Fig.4.11 Proportion of the subjects of scale 1 and scale 2 in the groups of musicians and non-musicians.

5．全体的考察

5.1 変動感と演奏評価

ピアノ演奏音は，物理的に捉えるならば，時々刻々とレベルの変化する一種の変動音と考えられる．したがって，ピアノ演奏における音の強さの揃い方の印象は，第3章で検討した変動感と密接に関わっていると考えられる．実際，夜想曲(Fig.4.1)の場合，演奏音の頻度は約10個／秒，小犬のワルツ(Fig.4.3)の場合は約8個／秒であり，その振幅包絡の変化の周波数は変動感を生じる範囲内(約20Hz以下；Fig.2.12を参照)にある．

ところで，第3章で行なった実験4，5では，変動パターンの不規則な方が，規則的な系列に比べて変動感は大きくなることが示された．強さの揃った印象が悪化するとは，裏を返せば変動感が増すことに相当する．このピアノ演奏の実験においても，強さの変動パターンをランダムにすることによって，強さが揃った印象が悪化することが示されている．

ここで，ピアノ演奏の実験の場合にも，変動パターンをランダムにする際，音の強さそのものには変更が加えられていないことに注意しなければならない．すなわち，強さをランダムにするとは互いに音の強さを入れ換えるということであり，系列全体の物理的なエネルギー量にはオリジナルの演奏と全く変わりがない．これは，第3章の実験と同じ刺激の設定である．したがって，これらのことから，第3章の実験結果，すなわち物理的なエネルギー量が同じでも変動パターンによって変動感には違いが生じることが，ピアノ演奏の評価という現実の音楽場面でも支持されたと言えよう．

5.2 変動パターンの知覚と演奏評価

ピアノ演奏も一種の変動音と考えられることから，強さの揃い方の印象の尺度も，第3章のパターン知覚の観点から同様に説明することができるであろう．

すなわち，Ｈ－Ｂ－Ｃ－Ａの４音が知覚上，一つの群を成す．(他の群化も可能であろうが，周波数変化がこの４音ごとに同じパターンが繰り返されているので，これが最も強い群化の形態であろう．)そして，一度この群化が成立すると，この群が知覚上の単位となる．オリジナルの演奏では，この群が一定のまま繰り返されているため大きな変動感が生じず，演奏全体としては強さが揃った印象が維持されるのであろう．

また，このような群化がなされると，その中のピークの音が群の印象として顕著になってくる．そこで，一定であったピークの音が乱されると(random-peak条件)，演奏全体の強さの揃い方の印象が悪化する．一つ一つの音のばらつきが10dB近くありながら，ピークの音をわずかに3dB増加させただけで印象が大きく悪化したのはこれが原因であろう(Fig.4.7を参照)．

一方，強さの変動パターンが乱されると(random-pattern条件)，知覚上，このような一定の群を形成することができない．そのため，一つ一つの音の強さのばらつきの印象に，全体を通してレベルが常に変動しているとの印象がさらに加わり，全体的な強さの揃い方の印象が大きく悪化したと考えられる．

全ての音を同じ強さで弾くことは，指のコントロールの限界もあり，非常に困難であろう．しかし，そのような困難にもかかわらず，熟練した演奏家は我々の聴覚情報処理のこのような特性をうまく利用することによって，演奏の評価を高めているようである．

5.3 周波数変動と変動感

ところで，以上に挙げた強さの変動に加えて，ピアノ演奏の場合には，さらに“メロディー”という周波数の変動が伴っている．例えば，夜想曲(Fig.4.1)はＨ－Ｂ－Ｃ－Ａの４音で一つの周波数変化のまとまりを形成している．このような周波数の変化も，演奏音の変動感を規定する要因の一つと

なっている可能性がある．

また，Fig.4.2に見られる演奏では，強さの変動パターンも，4音ずつで一つのパターンを形成している．そこで，強さの変動パターンをランダムにしたことは，単に変動の規則性が失われただけではなく，同時にそれが周波数の変動パターンと一致しなくなったことも意味する．このような強さと周波数の変動パターンの相互作用も，演奏全体の音の揃い方の印象を決定する要因となろう．

今回は音の強さの変動に的を絞って検討してきたが，今後，変動感に及ぼす周波数の変動パターンの影響，ならびに強さと周波数の変動の相互作用についてさらに検討を進める必要があろう．それによって，より幅広い音楽場面における変動感の様相が明らかになるはずである．

第５章
まとめと今後の展望

１．まとめ

本論文では，特に振幅変調音（レベル変動音）の知覚に的を絞り，その情報処理機能について，以下の３つの観点から検討を行なった．

a．規則的なレベル変動音の知覚
－変調周波数の影響－

レベル変動音には，さまざまな周波数の変動成分が含まれている．そこで，聴覚情報処理における変調周波数の影響を明らかにするために，広帯域雑音中の振幅変調音（ＡＭ音）の知覚を検討した．その結果，以下の点が明らかとなった．

（１）広帯域雑音中におけるＡＭ音の検知閾は，変調周波数が１～４Ｈｚの時，相対的に低くなる傾向が見られた．一方，変調周波数が８～16ＨｚのＡＭ音では，同じ中心周波数をもつ純音と，検知閾にはほとんど差が認められなかった．

この結果は，従来のマスキングのモデルでは説明できない現象である．このことから，聴覚系は，変動音に対して，定常音とは異なる反応を示すと考えられる．

（２）ＡＭ音に広帯域雑音を重畳させた音の大きさは，変調周波数４Ｈｚの時により大きく評価される傾向が見られた．変調周波数16ＨｚのＡＭ音を含む音では，純音の場合と大きさの判断にほとんど違いが見られなかった．

定常音については，物理量からその大きさ予測する方法がいくつか開発され，現在使用されている．上記の結果のように，４Hz付近の変動成分を含む音は，物理量からの推定値よりも主観的には大きく評価される傾向があるため，この方法を変動音に適用する場合には注意が必要であろう．

以上の結果は，いずれも聴覚系が１～４Hz付近の振幅変調に特に敏感であることを示唆している．

通常の会話における音声のレベル変動は，２～５Hz付近の成分が最も大きい．したがって，そのような周波数範囲の変動に敏感であることは，背景雑音中において，目的とする音声のみを抽出する上で有利に働くと考えられる．

また，他の心理物理学的研究や生理学的データでも，聴覚系が１～４Hz付近の振幅変調に特に敏感であることを示す例が多く見られる．そこで，聴覚系には，１～４Hz付近の変調周波数にチューニングされた一種の“変調検出器”が存在する可能性が考えられる．今後，この点をさらに追求することによって，我々の聴覚系にとって特に重要な音声の処理機構や，他の動物とは異なる，その機能の特殊性が明らかになるかも知れない．

b．不規則的なレベル変動音の知覚

－変動パターンの影響－

上記のa節で用いたＡＭ音は，正弦波で変調した，いわば「規則的な」レベル変動をもつ音であった．ところが，我々が日常接する音には，規則的ではなく，むしろ「不規則的な」レベル変動を伴うものが多い．特に，音楽や音声においては，変動パターンそのものが情報となって伝達されており，聴覚系にとってそのパターンを知覚することは重要な機能の一つと考えられる．

そこで，聴覚情報処理における変動パターンの影響を明らかにするために，不規則的な（ランダムな）レベル変動をも

つ音刺激系列の知覚を検討した．その結果，以下の点が明らかとなった．

(1) 規則的変動を伴う系列と不規則的変動を伴う系列において，変動の検知閾には違いが見られなかった．

この結果から，閾値付近では，おそらく変動の処理における不規則性の効果はあまり大きくないと考えられる．

(2) 規則的なレベル変動を伴う系列は，不規則的なレベル変動をもつ系列に比べて，変動感（音の強さが変化している印象の程度）は小さくなった．この傾向は，等レベルの音の系列中に特異的な強い音が混じった場合でも，系列が全体的なレベル変動を伴う場合でも同様に見られた．

(3) 規則的なレベル変動をもつ系列であっても，その変動パターンによって変動感の大きさに違いが見られた．

この(2)と(3)の傾向は，感覚入力を処理する聴覚系の機能が反映されたものと考えられる．すなわち，聴覚系は，入力された刺激を個々に処理するのではなく，それらのいくつかをまとめて，ある「パターン」として処理をしているのである．

このようなパターン知覚の機能は，特に音声の知覚において重要な役割を担っていると考えられる．例えば，早口で話される会話では，音素の生起速度は，聴覚系における音の順序の識別能力を越えている．そこで，個々の音素をばらばらに知覚するのではなく，いくつかのまとまりごとにその「パターン」を捉えることが，音声の知覚の上で重要となってくるのである．

また，このようなパターン知覚の機能が存在するため，物理的なエネルギー量が等しい音であっても，その変動パターンによって，知覚的には全く異なった印象を与える場合があ

る．例えば，不規則的変動を伴う音は，規則的変動を伴う音よりも“落ち着かない”“耳ざわりな”などの悪い評価がなされる可能性がある．この点は，環境騒音や音楽・音声の評価の上で問題となるであろう．

c．音楽場面における変動の知覚

上記の結果が，聴覚系における情報処理の一般的な特性を反映したものであるならば，それらは音楽場面においても同様に適用可能なはずである．

そこで，これまでに得られた結果の妥当性を検証するために，ピアノ演奏を例にとって，現実の音楽場面におけるレベル変動の知覚を検討した．その結果，以下の点が明らかとなった．

(1) ピアノ演奏家が，全ての音を同じ強さになるように意図して弾いた場合でも，一つ一つの音の強さは必ずしも揃ってはいなかった．

しかし，その演奏には，次の2つの特徴が見られた：(i) 強さの変動が，演奏全体を通してある一定のパターンで繰り返されている；(ii)ピークとなる音の強さが，一つ一つの音のばらつきに比べると，非常によく揃っている．

これらの特徴は，プロのピアニストの演奏においても同様に見られた．

(2) 上記の演奏をもとに行なった聴取実験の結果，変動パターンの規則性や，一定であったピークの音のレベルが乱されると，音の強さの揃い方の印象は悪くなることが明らかとなった．

同様の傾向は，演奏の上手さや好ましさの印象など，音楽的判断においても見られた．

これらの点は，上記のb節の実験結果を支持するものである．

すなわち，聴覚系には音をパターン化して処理する機能があるため，強さの変動パターンが規則的であることによって，変動感はより小さくなる．その結果，たとえ一つ一つの音の強さにばらつきがあっても，全体としては強さの揃った印象が高められるのであろう．また，不規則的な変動パターンをもつ音はより変動感が強いため，上手さや好ましさの評価を悪化させたものと考えられる．

全ての音を同じ強さで弾くことは，指のコントロールの限界もあり，非常に困難なことであろう．しかし，そのような困難にもかかわらず，熟練したピアノ演奏家は，我々聴覚系の情報処理の特性をうまく利用することによって，演奏の評価を高めているようである．

2．今後の展望

本論文では，特にレベル変動に的を絞って検討を進めてきた．しかし，現実の環境音や音楽・音声の変動を考えた場合，他にも考慮すべき変動の要因がいくつかある．

まず１つめは，周波数変動の要因である．特に，音声では，ＣＶ(子音－母音)音節の知覚にとって最も重要な情報は，子音から母音へのフォルマント遷移部分に含まれている(Furui, 1986)．また，音楽おけるメロディーとは，周波数の大きな変化に他ならない．このような例からも，周波数変動に含まれる情報の処理は，聴覚系における重要な機能の一つであることが分かるであろう．

また，第４章で指摘したように，レベル変動と周波数変動の要因を全く独立に考えるわけにはいかない．現実の環境音や音楽・音声では，この２つの変動が同時に存在している．そこで，周波数変動単独の効果だけではなく，レベル変動と周波数変動の２つの要因の相互作用についても，今後検討を進めていく必要があろう．

２つめは，時間知覚の問題である．本論文では，レベル変動が不規則的な音系列の知覚を扱った．この系列では，レベル変動は不規則であるが，一つ一つの音の時間間隔は“規則的”である．そこで，時間間隔の変動については，特に考慮に入れずに検討を進めてきた．

ところが，音の強さや周波数の違いが，系列の時間知覚に影響を及ぼす場合のあることが知られている．例えば，強い音は弱い音に比べて，その持続時間が過大評価される傾向がある(例えば，倉片(1991))．また，強い音や周波数の低い音から成る音系列では，系列のテンポがより遅く知覚される(倉片，1992)．このような時間知覚における一種の“錯覚”が，時間軸上での現象を扱う聴覚研究では必然的に含まれてくる．

そこで，物理的には規則的な時間間隔が主観的には揺らい

で聞こえ，それが変動感などの印象に影響を及ぼしている可能性がある．これらの錯覚は，心理物理学的実験のような限られた状況下だけで観察される特殊なものではなく，実際の音楽聴取場面でも影響している例が示されている(倉片，1989)．今回の実験で用いた刺激の範囲では大きな影響はないであろうが，今後の研究において，さらに幅広い刺激条件を扱う際には注意が必要であろう．

また，音の強さや周波数が一定でも，音の出現間隔の不規則性によって，変動感などの知覚的印象が異なってくる可能性がある．本論文で扱った規則的変動と不規則的(ランダム)変動とは，いわば変動の両極端に位置するものである．しかし，現実の音には，例えば音楽のリズムなどに見られるように，完全に規則的ではないが，ある種の不規則性が入り込み，複雑な変動パターンを作り出している場合がある．

このような時間知覚の側面からは，まだあまり多くの研究がなされていない．今後，現実の環境音や音楽・音声など，より幅広い音に対する聴覚の情報処理機能を明らかにする上で，この点はたいへん興味深い問題となるであろう．

謝辞

大学院入学以来，終始，親切にご指導下さいました大阪大学教養部難波精一郎教授，桑野園子助教授，大阪大学人間科学部中島義明教授に感謝の意を表します．

西山慶子，西村篤　両氏には，実験にご協力頂き，ピアノ演奏の専門的な問題について貴重な助言を頂きました．また，長時間の実験にご協力下さいました被験者の方々に感謝します．

なお，本研究を行うに当たり，平成3～5年度文部省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)の補助を受けた．

引用文献

ブラウエルト,J., 森本政之, 後藤敏幸 (1986). 空間音響, 鹿島出版会.

Bregman,A.S. (1990). *Auditory Scene Analysis - The Perceptual Organization of Sound* - , MIT Press.

Cherry,E.C. (1953). "Some experiments on the recognition of speech with one and with two ears," *Journal of the Acoustical Society of America*, **25**, 975-979.

Chopin,F., 夜想曲第2番変ホ長調作品9の2. [全音ピアノピース, No.135, 全音楽譜出版社.]

Chopin,F., ワルツ第6番変ニ長調作品64の1「小犬」. [全音ピアノピース, No.35, 全音楽譜出版社.]

Deutsch,D. (1982a). "Preface," in *The Psychology of Music*, D.Deutsch Ed. Academic Press. [寺西立年, 大串健吾, 宮崎謙一(監訳) (1987) .音楽の心理学(上), 西村書店.]

Deutsch,D. (1982b). "Grouping mechannisms in music," in *The Psychology of Music*, D.Deutsch Ed., Academic Press. [寺西立年, 大串健吾, 宮崎謙一(監訳) (1987). 音楽の心理学(上), 西村書店.]

Doughty,J.M. and Garner,W.R. (1947). "Pitch characteristics of short tones, I. Two kinds of pitch threshold," *Journal of Experimental Psychology*, **37**, 351-364.

Egan,J.P. and Hake,H.W. (1950). "On the masking pattern of a simple auditory stimulus," *Journal of the Acoustical Society of America*, **22**, 622-630.

Fastl,H. (1982). "Fluctuation strength and temporal masking patterns of amplitude-modulated broadband noise," *Hearing Research*, **8**, 59-69.

Fastl,H., Hesse,A., Schorer,E., Urbas,J. and Müller-Preuss,P. (1986). "Searching for neural correlates of the hearing

sensation fluctuation strength in the auditory cortex of squirrel monkeys," *Hearing Research*, **23**, 199-203.

Fletcher,H. (1940). "Auditory patterns," *Review of Modern Physics*, **12**, 47-65.

Fraisse,P. (1957). Psychologie du temps, Press Univ. de France. [原吉雄(訳) (1960). 時間の心理学, 創元社.]

Fraisse,P. (1963). "Perception et estimation du temps," in *Traite de Psychologie Experimentale (Vol.6)*, P.Fraisse and J.Piaget, Eds., Press Univ. de France. [波多野完治(監訳) (1971). 現代心理学 第6巻 知覚と認知, 白水社.]

Fraisse,P. and Oléron,G. (1954). "La structuration intensive des rhythmes," *L'année psychologue*, **54**, 35-52.

Furui,S. (1986). "On the role of spectral transition in speech perception," *Journal of the Acoustical Society of America*, **80**, 1016-1025.

Garner,W.R. (1974). "The Processing of Information and Structure," in *The Experimental Psychology Series*, A.W.Melton, Ed., John Wiley & Sons.

Green,D.M. (1988). *Profile Analysis - Auditory Intensity Discrimination* - , Oxford University Press.

Handel,S. (1989). *Listening - An Introduction to the Perception of Auditory Events* -, MIT Press.

Hanon,C.L. (出版年不詳). *Le Pianiste Virtuose*, Schott.

橋場参生, 八幡英子, 伊福部達 (1989). "母音における自然性の聴覚認知機構について," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-89-1.

Hellman,R.P. (1984). "Growth rate of loudness, annoyance, and noisiness as a function of tone location within the noise spectrum," *Journal of the Acoustical Society of America*, **75**, 209-218.

Helmholtz,H.L.F.von (1863). *Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, 1st edn., Friedrich Vieweg und Sohn. [English translation by A.J.Ellis (1954). *On the Sensations of Tone*,

Dover.]

Hubel,H.D. and Wiesel,T.N. (1962). "Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex," *Journal of Physiology,* **160**, 106-154.

ISO 532-1975(E) (1975). *Acoustics - Method for calculating loudness level.*

ISO/R 226-1961(E) (1961). *Normal equal-loudness contours and normal threshold of hearing under free field listening conditions.*

ISO/R 507-1970(E) (1970). *Procedure for describing aircraft noise around an airport.*

泉清人 (1984). "大きさ," 聴覚ハンドブック, 難波精一郎(編), ナカニシヤ出版.

JIS Z 8106-1988 (1988). 音響用語(一般).

柏野牧夫 (1992). "音の流れを聞きとる - 聴覚による環境の解析 -," 科学, **62**, 374-379.

菊池芳正, 難波精一郎, 桑野園子, 倉片憲治 (1993). "AM成分を含む広帯域雑音の心理学的評価," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-93-67.

倉片憲治 (1989). "楽譜に示された音価に対する聴取上のPSEの測定," 日本音響学会平成元年度秋季研究発表会講演論文集, 535-536.

倉片憲治 (1991). "音の強さとその主観的持続時間の関係," 日本音響学会平成2年度春季研究発表会講演論文集, 365-366.

倉片憲治 (1992) "音刺激系列の時間間隔の知覚 - 強さと周波数の影響 -," 日本音響学会平成3年度春季研究発表会講演論文集, 375-376.

倉片憲治 (1993, 印刷中). "強さの変動の不規則性が変動感に及ぼす影響," 日本音響学会平成5年度秋季研究発表会講演論文集.

Kurakata K., Kuwano S. and Namba S. (1992a). "Factors determining the impression of 'smoothness' in piano performance," *Proceedings of ISMA*, 199-202.

倉片憲治, 桑野園子, 難波精一郎 (1992b). "ピアノ演奏における'粒の

揃った'との印象を決定する要因," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-92-50.

倉片憲治, 桑野園子, 難波精一郎 (1993a, 印刷中). "ピアノ演奏における音の強さの変動と演奏評価の関係," 日本音響学会平成5年度秋季研究発表会講演論文集.

Kurakata K., Kuwano S. and Namba S. (1993b, in press). "Factors determining the impression of the equality of intensity in piano performance," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E).*

Kuwano S., Namba S. and Miura H. (1989). "Advantages and disadvantages of A-weighted sound pressure level in relation to subjective impression of environmental noises," *Noise Control Engineering Journal*, **33**, 107-115.

Kuwano.S., Namba S. and Nakajima Y. (1980). "On the noisiness of steady state and intermittent noise," *Journal of Sound and Vibration*, **72**, 87-96.

Lettvin,J.Y., Maturana,H.R., McCulloch,W.S. and Pitts,W.H. (1959). "What the frog's eye tells the frog's brain," *Proceedings of IRE*, **47**, 1940-1951.

Liberman,A.M., Cooper,F.S., Shankweiler,D.P. and Studdert-Kennedy,M. (1967). "Perception of the speech code," *Psychological Review*, **74**, 431-461.

McAdams,S. (1982). "Spectral fusion and the creation of auditory images," In *Music, Mind and Brain*, M.Clynes,Ed., Plenum.

MIDI規格協議会 (1988). コンピュータ&ＭＩＤＩ, II, テクニカルブック, 音楽之友社.

Moore,B.C.J. (1989). "The perception of loudness," in *An Introduction to the Psychology of Hearing* (3rd ed.), Academic Press. [大串健吾(監訳), 倉片憲治 他(訳) (印刷中). 聴覚心理学概論, 誠信書房.]

Moore,B.C.J. (1992). "Across-channel processes in auditory masking," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*,

13, 25-37.

Moussorgsky,M., 展覧会の絵. [Zen-on piano library, ZPL-051, 全音楽譜出版社.]

難波精一郎 (1984). "非定常音の知覚," 聴覚ハンドブック, 難波精一郎(編), ナカニシヤ出版.

難波精一郎, 桑野園子 (1984). "継時マスキングにおけるマスカーの時間構造の影響 － 附.リアルタイム刺激反応計測装置による同時マスキングの測定," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-84-1.

Namba S., Kuwano S. and Kato T. (1976). "The loudness of sound with intensity increment," *Japanese Psychological Research*, **18**, 63-72.

Namba S., Kuwano S., Kinoshita K. and Kurakata K. (1992). "Loudness and timbre of broad-band noise mixed with frequency-modulated sounds," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* ,**13**, 49-58.

Namba S., Kuwano S., Kurakata K. and Kinoshita K. (1991). "Application of Zwicker's method (ISO 532B) to loudness and timbre evaluation," *Proceedings of Inter-Noise 91*, 49-52.

難波精一郎, 中村敏枝, 安田園子 (1971). "レベル変動音の大きさについて," 心理学研究, **42**, 93-103.

Neisser,U. (1976). *Cognition and Reality - Principles and Implications of Cognitive Psychology*, Freeman. [古崎敬・村瀬旻(訳) (1978). 認知の構図 - 人間は現実をどのようにとらえるか -, サイエンス社.]

日本建築学会(編) (1981). 騒音の評価法 - 各種評価法の系譜と手法-, 彰国社.

日本音響学会(編) (1988). 音響用語辞典, コロナ社.

日本音響材料協会(編) (1966). 騒音対策ハンドブック, 技報社.

大山正 (1970). "視知覚の基本体制," 講座心理学, 4.知覚, 大山正(編), 東京大学出版会.

Patterson,R.D. and Moore,B.C.J. (1986). "Auditory filters and excitation patterns as representations of frequency

resolution," in *Frequency Selectivity in Hearing*, B.C.J.Moore Ed., Academic Press.

Pearsons,K.S., Bishop,D.E. and Horonjeff,R.D. (1969). "Judged noisiness of modulated and multiple tones in broad-band noise," *Journal of the Acoustical Society of America*, **45**, 742-750.

Riesz,R.R. (1928). "Differential intensity sensitivity of the ear for pure tones," *Physical Review*, **31**, 867-875.

斎藤収三, 中田和夫 (1981). 音声情報処理の基礎, オーム社.

境久雄, 中山剛 (1978). 聴覚と音響心理, コロナ社.

佐々木實, 石川智子, 山田真司 (1989)."等時価からなる楽譜のピアノ演奏における時間的ゆらぎ - 芸術的対メトロノーム的演奏の一分析 -," 日本音響学会誌, **45**, 743-747.

佐藤隆夫 (1992). "ものの動きを見る - 運動の知覚 -," 科学, **62**, 363-373.

Schreiner,C.E. and Urbas,J.V. (1986). "Representation of amplitude modulation in the auditory cortex of the cat. I. The anterior auditory field (AAF)," *Hearing Research*, **21**, 227-241.

Sek.A. (1993). "Perception of irregular amplitude changes of sinusoidal signals," *Acustica*, **77**, 262-269.

Sharf,B. (1978) "Loudness," in *Handbook of Perception (Vol.IV), Hearing*, E.C.Carterette and M.P.Friedman, Eds., Academic Press.

Sharf,B. (1981). "Loudness adaptation," In *Hearing Research and Theory*, J.V.Tobias and E.D.Schubert, Eds., Academic press.

Steeneken,H.J.M. and Houtgast,T. (1983). "The temporal envelope spectrum of speech and its significance in room acoustics," *Proceedings of 11th ICA*.

寺西立年 (1984). "聴覚の時間的側面," 聴覚ハンドブック, 難波精一郎(編), ナカニシヤ出版.

寺西立年 (1986). "聴覚," 現代音響学(改訂2版), 牧田康雄(編著), オ

ーム社.

Taylor,M.M. and Creelman,C.D. (1967). "PEST: efficient estimates of probability functions," *Journal of the Acoustical Society of America*, **41**, 782-787.

梅本堯夫 (1966). 音楽心理学, 誠信書房.

Viemeister,N.F. (1973). "Temporal modulation transfer functions for audition," *Journal of the Acoustical Society of America*, **53**, 312.

Viemeister,N.F. (1979). "Temporal modulation transfer functions based upon modulation thresholds," *Journal of the Acoustical Society of America*, **66**, 1364-1380.

Warren,R.M. (1970). "Perceptual restoration of missing speech sounds," *Science*, **167**, 392-393.

Wegel,R.L. and Lane,C.E. (1924). "The auditory masking of one pure tone by another and its possible relation to the dynamics of the inner ear," *Physical Review*, **23**, 266-285.

吉田登美男, 亀田和夫 (1980). "聴覚の心理," 新版聴覚と音声, 電子情報通信学会(編), コロナ社.

Zwicker,E. (1952). "Die Grenzen der Hörbarkeit der Amplituden-modulation und Frequenzmodulation eines Tones," *Acustica*, **2**, 125-133.

Zwicker,E. and Fastl,H. (1990). "Fluctuation strength," in *Psychoacoustics - Facts and Models* -, Springer-Verlag.

Zwicker,E., Fastl,H., Widmann,U., Kurakata K., Kuwano S. and Namba S. (1991). "Program for calculating loudness according to DIN 45631 (ISO 532B)," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)* **12**, 39-42.

SUMMARY

In our daily life we are surrounded by many kinds of sound such as road traffic noise, music, speech, etc. Most of them are not steady, but their levels fluctuate over time. In addition, such environmental sounds seldom exist in isolation. In most cases they are mixed with each other. Therefore, it is quite important to investigate how the auditory system extracts necessary information from the mixed sound sources.

In this study the auditory information processing on level-fluctuating sounds was investigated from the following three points of view.

1. The Perception of Regularly Amplitude-modulated (AM) Tone
- Effects of Modulation Frequency -

Non-steady sounds consist of components with a variety of frequency of fluctuation. In order to clarify the effects of modulation frequency on the auditory information processing, the perception of AM tone in broad-band noise was investigated. The results showed that:

(1) The threshold for detecting AM tone in broad-band noise was lower when its modulation frequency was 1-4 Hz than that for detecting pure tone with the same frequency as the AM tone. The threshold of AM tone with modulation frequency of 8-16 Hz was approximately equal to that of pure tone;
(2) AM tone with modulation frequency of 4 Hz mixed with broad-band noise was judged to be louder than pure tone with the same noise. There was no significant difference in judged loudness between AM tone with modulation frequency of 16 Hz and pure tone both with broad-band noise.

These results suggest that the auditory system are especially sensitive

to the amplitude-modulation around 1-4 Hz. The frequency of level-fluctuation in normal speech has its maximum around 2-5 Hz. To be sensitive to such modulation may help to extract speech sounds from background noise.

Other psychological and physiological studies also show the sensitivity of the auditory system to modulation frequency of 1-4 Hz. There may be a kind of "modulation detector" tuned to 1-4 Hz somewhere in the auditory system.

2. The Perception of Irregularly Level-fluctuating Tone Burst Sequence - Effects of Temporal Pattern -

The levels of most sounds we encounter in our daily life fluctuate irregularly rather than regularly. In addition, for speech and music much of their information appears to be carried in the temporal pattern of fluctuation. Therefore, it may be important for the auditory system to recognize the pattern of sounds.

In order to clarify the effects of the temporal pattern of fluctuation on the auditory information processing, the perception of irregularly level-fluctuating tone burst sequence was investigated. The following results were suggested:

(1) The thresholds for detecting level-fluctuation showed no significant difference whether the level fluctuated regularly or irregularly. The effects of irregularity on processing level-fluctuating sounds may be small at the threshold level;

(2) The sensation of fluctuation strength of regularly level-fluctuating sequences was smaller than that of irregularly level-fluctuating ones. This tendency was found both for the sequence which consisted of equal-level tones mixed with louder ones and for that whose level fluctuated all through the sequence;

(3) The temporal pattern of level-fluctuation affected the magnitude of fluctuation strength of regularly fluctuating sequences as well as that of irregularly fluctuating ones.

The results in (2) and (3) may reflect the perceptual function of the auditory system to process elements of sensory input. The auditory system may not process each of them individually, but get them together to process as a pattern. Thus sounds with equal total energy can elicit different impressions of fluctuation. This may be an important clue when we consider the evaluation of environmental noise, musical performance and speech.

3. The Perception of Level-Fluctuation in Musical Performance

If the findings in section 2 reflect the general characteristics of our auditory information processing, they would also be applicable to musical sounds. In order to confirm the validity of the findings, the perception of level-fluctuation in piano performance was investigated. The following results were shown:

(1) Although pianists tried to play every tone as equally as possible, not all the tones were played in equal intensity. However, two features were found in the performances: (i) The pattern of fluctuation was regularly repeated throughout the performance; (ii) The peak level of the pattern was remarkably kept constant compared with the level-fluctuation of tones in the pattern;
(2) If the regularity of the pattern of fluctuation or the constancy of the peak level of the pattern was destroyed, the impression of the equality of intensity was degraded. The same tendency was found for the impression of skillfulness and pleasantness.

These results support the findings in section 2; Since the auditory system tends to organize sounds and processes them as a pattern, the regularity of the pattern of fluctuation produces the impression of the equality of intensity. Furthermore, since irregularly level-fluctuating sounds elicit greater fluctuation strength, negative impressions on skillfulness and pleasantness were increased.

There are physical limits of controlling fingers. In spite of the fact,

skilled pianists can maintain the quality of their performances by making good use of the characteristics of our auditory information processing.