

刺激音の立ち上がりの変化が 聴覚誘発脳磁界 N1m に及ぼす影響の検討

萬谷 惇^{*,**}・中川 誠司^{*}・小谷賢太郎^{***}・堀井 健^{***}

Effects of Rise-time of Sound Stimulus on Auditory Evoked Magnetic Fields

Makoto MANTANI,^{*,**} Seiji NAKAGAWA,^{*} Kentaro KOTANI,^{***} Ken HORII^{***}

Abstract Although several studies have reported that the rise-time of sound stimulus affects on auditory evoked magnetic fields, effects of each parameter which vary in connection with rise-time—whole energy, rising-speed (dL/dt), spectrum—have not been clarified. In this study, N1m amplitudes and latencies were examined using noise-bursts with varying rise-time and constant energy or rising-speed. The results showed that N1m increased in amplitude and decreased in latency as rise-time increased (i.e., energy increased) under the rising-speed-constant condition. In contrast, N1m amplitudes and latencies did not vary significantly as rise-time increased (i.e., rising-speed decreased) under the energy-constant condition. These results indicate that sound energy has greater effects on N1m amplitude and latency than rising-speed.

Keywords: Auditory cortex, N1m, rise-time, sound energy, rising-speed.

1. はじめに

音の立ち上がり（音圧が0から増加していきプラトーに達するまでの部分）は聴覚の知覚・認知特性に大きな影響を与える。例えば、破擦音と摩擦音の弁別には立ち上がりの形状が大きな影響を及ぼすことや[1]、立ち上がり時間の変化によって、/c/と/s/や/b/と/w/の知覚上の違いが引き起こされることが報告されている[2, 3]。また、立ち上がりは音声だけでなく、音色の知覚にも大きな影響を与えることが知られている[2]。

一方、聴覚誘発脳波/脳磁界反応・N1/N1m（刺激の発生から約100ms後に聴覚野から生じる反応）を用いて、音声知覚過程の脳メカニズムを調べようとする研究が以前から成されてきた[4, 5]。近年になって脳外科手術に備

えた言語優位半球の決定などへの応用も試みられている[6, 7]。

N1/N1mには、刺激音の物理特性がよく反映される。音声刺激による誘発反応を適切に評価するためには、音声刺激を形作る各物理パラメータの影響を定量的に把握しておく必要があるが、これまでも刺激音の各パラメータとN1/N1mの関係に関する様々な検討がなされてきた。例えば、刺激音の音圧が増加するに従い、N1/N1m振幅が増加、潜時が減少すること[4, 8, 9]や、持続時間が増加するに従いN1/N1m振幅が増加、潜時が減少すること[10, 11]などが報告されている。

刺激音の立ち上がり時間とN1の関係は脳波計測により調べた報告もいくつか存在する[11-13]。これらの研究によると、立ち上がり時間が増加するに従ってN1振幅が減少し、潜時が増加することが報告されている。例えば、Kodera et al.は、立ち上がり時間を5msから20msに延長することで、P1-N1およびN1-P2振幅が2割程度減少することを示しており、この現象のメカニズムとして、立ち上がり時間の増加に伴う蝸牛神経線維活動の同期性の低下を挙げている[12]。しかしながら、これらの研究では刺激音の最大音圧や持続時間を一定に保ったまま、立ち上がり時間のみを変化させている。すなわち、立ち上がり時間が短いときはエネルギーの大きな刺激音、立ち上がり時間が長いときはエネルギーの小さな刺激音を呈示していたことになる。また、刺激音のエネルギー以外にも、立ち上がり

生体医工学シンポジウム2006発表（2006年9月，新潟）
2006年7月28日受付，2007年2月14日改訂，2007年3月13日再改訂

Received July 28, 2006; revised February 14, 2007, March 13, 2007.

* 独立行政法人産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門
Institute for Human Science and Biomedical Engineering,
National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology (AIST)

** 関西大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kansai University

*** 関西大学工学部
Faculty of Engineering, Kansai University

における音圧の時間勾配（以後、立ち上がり速度）や刺激音の周波数スペクトルも変化していたことになる。すなわち、どのパラメータがどの程度N1mに作用していたのかが明らかでない。過去の研究で示された立ち上がり時間の変化に伴うN1m変化が神経発火の同期性の変化のみによるものであるならば、立ち上がり速度が急であるほど急峻な振幅が大きく、潜時が小さい—N1mが得られるはずである。

音声知覚に関する脳機能を適切に評価するためには、刺激音の立ち上がりが誘発反応に及ぼす影響を調べることが重要であると思われる。そこで本研究では、立ち上がりの変化に伴って変化する刺激音の各パラメータのN1mへの影響を観察することを目的として脳磁界計測を行った。刺激音のエネルギーおよび立ち上がり速度、それぞれを一定にした条件下で立ち上がり時間を変化させたときのN1m変化を観察し、個々のパラメータの影響について検討した。

2. 方 法

以下の条件で、聴覚誘発脳磁界計測を行った。

2・1 刺激音

立ち上がり時間の変化に伴う周波数スペクトルの変化による影響を避けるため、刺激音にはノイズバーストを用いた。

計測は2つのセッションに分けて行われた。それぞれのセッションでは、以下の2種類の刺激音セットが用いられた。それぞれのセッションにおける刺激音の時間包絡線形状を図1, 2に示す。

(1) エネルギー一定条件:刺激全体の等価騒音レベルが一定になるようにして、立ち上がり時間を変化させた。すなわち、立ち上がり時間の増加に伴って立ち上がり速度が減少し、刺激音の最大音圧が増加した。な

お、時刻 t_1 から t_2 までの時間 $T[s]$ における等価騒音レベル $L_{Aeq, T}[dB]$ は以下のように定義される

$$L_{Aeq, T} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right\}$$

ただし、

$p_A(t)$: 対象とする騒音の瞬時 A 特性音圧 [Pa]

p_0 : 基準音圧 (20 μ Pa)

(2) 立ち上がり速度一定条件:音圧の時間勾配が一定になるようにして、立ち上がり時間を変化させた。すなわち、立ち上がり時間の増加に伴ってエネルギーおよび刺激音の最大音圧が増加した。

各セッションにおいて刺激音の立ち上がり時間は2.5, 5.0, 10, 20 msと変化させ、立ち下がり時間は5.0 msで固定した。オンセット後32 msまでのエネルギーはN1m振幅および潜時に寄与するとされていることから[10], 刺激音の全エネルギーが積分されるように持続時間を30 msとした。また、刺激間隔は1.9-2.1 s間でランダムに変化させた。それぞれのセッションにおける刺激音圧は、立ち上がり時間20 msのノイズバーストに対する聴覚閾値を基準とした感覚レベルによって、20 dB SL, 40 dB SL, または60 dB SLになるように、被験者ごとに調整された。

刺激呈示には刺激呈示には圧電スピーカ (ER-2, Ety-motic Research Co.)を用いた。圧電スピーカには約40 cmのエアチューブ、さらにエアチューブの先端にはイヤープースが接続されており、イヤープースを外耳道に挿入して使用する。さらに、イヤープース末端における周波数特性が50-16,000 Hzで平坦になるように、計算機上で周波数補正処理を施した (図3)。

2・2 被験者

事前に同意を得た聴覚健全成人を被験者とした。刺激音圧が20 dB SLにおいて7名 (男性7名, 22-24歳), 40 dB

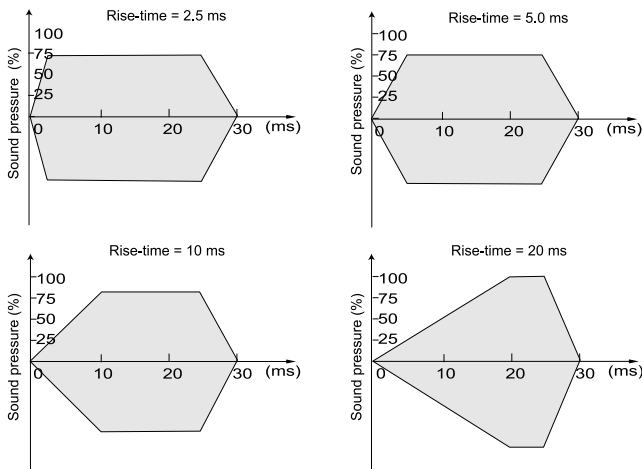


図1 刺激音の時間包絡線形状 (エネルギー一定条件)
Fig. 1 Shapes of time envelope of the sound stimuli (Energy-constant condition).

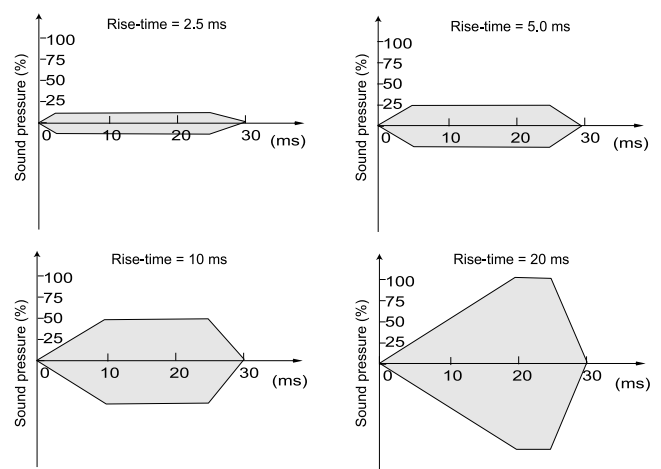


図2 刺激音の時間包絡線形状 (立ち上がり速度一定条件)
Fig. 2 Shapes of time envelope of the sound stimuli (Rising-speed-constant condition).

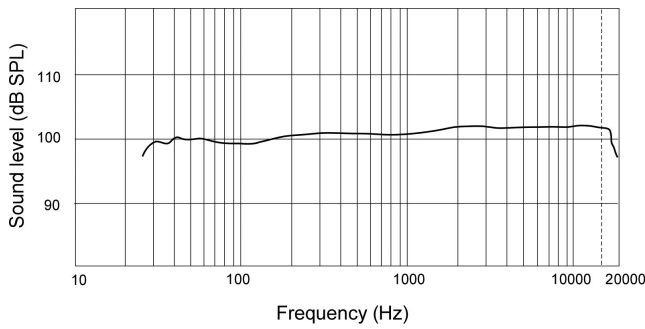


図 3 刺激装置の周波数特性

Fig. 3 Frequency characteristics of the insert-earphone used in the experiment.

SLにおいて10名(男性9名, 21-36歳), 60 dB SLにおいて10名(男性9名, 21-36歳)のデータを得た。被験者には, 体動によるアーティファクトを発生させないために不必要な動作を控えるように, また, 計測中は被験者自身が選んだ無声の映画を見て刺激音に注意を払わないよう指示した。

2・3 脳磁界計測

磁気シールドルーム内の122 ch全頭型脳磁界計測システム(Neuromag-122™)を用いて計測を行った。刺激により誘発された脳磁界を, 0.03-100 Hzのバンドパスフィルタを通した後にサンプリング周波数400 HzでA/D変換し, すべての刺激に対して100回以上の加算平均を行った。計測時間は, 刺激呈示前200 msから呈示後500 msまでとした。加算平均後のデータは, 0.3-30 Hzのバンドパスフィルタを通し, 刺激前200 ms間のデータを用いてオフセットを除去した。

2・4 解析

本研究で使用した122 ch全頭型脳磁界計測システム(Neuromag-122™)は, 1つの計測位置に2つのピックアップコイルが配置され, 直交する2つの方向(緯線方向, 経線方向)の空間微分を同時に計測する[14]。計測箇所における磁界の空間微分の大きさを見るために, この2つの磁界空間微分成分をもつベクトルの大きさ(ノルム), すなわち,

$$B' = \sqrt{(\partial B_z / \partial x)^2 + (\partial B_z / \partial y)^2} \quad (式 1)$$

で定義される B' を磁界の振幅値と定義した。左右側頭部のチャンネルにおいて以下の条件を満たす反応成分のうち, B' の値が最大となるものを N1m とした。(1) 潜時が 70 ~ 150 ms で B' がピークを示す, (2) 下向きの等価電流双極子が推定される。右側頭部で, この N1m の振幅値が最大となるチャンネルを選び, そのチャンネルでの振幅および潜時を刺激間で比較した。各条件の N1m 振幅および潜時に対して, 立ち上がり時間および刺激音圧を主効果とする二元配置分散分析を行った。また, 多重比較検定(Bonferroni法)によって, 立ち上がり時間の増加に伴う N1m 振幅および

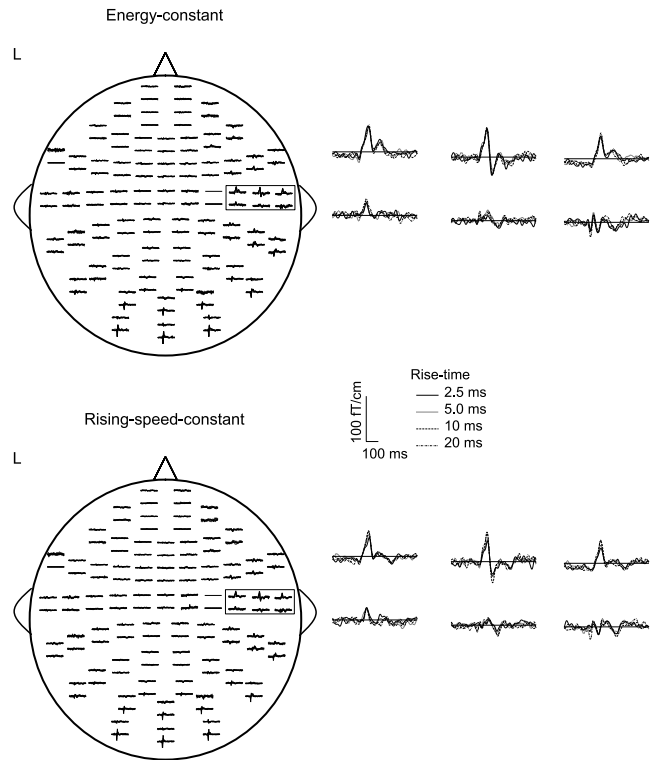


図 4 誘発脳磁界波形 左: エネルギー一定条件, 右: 立ち上がり速度一定条件。後頭部のチャンネルに見られる変動は刺激呈示に伴うアーティファクトである。

Fig. 4 Auditory evoked fields measured in the Energy-constant condition (left) and the Rising-speed-constant condition (right). Artifacts provoked with stimulus are shown in the occipital region.

潜時の変化を調べた。

3. 結 果

計測された波形の一例を図4に示す。全ての被験者において, 右側頭部に潜時約70 ms ~ 130 msでN1mが観察された。右側頭部に観察されたN1mの例を図5に示す。

エネルギー一定条件における立ち上がり時間とN1m振幅, 潜時の関係を図6, 7に, 立ち上がり速度一定条件における立ち上がり時間とN1m振幅, 潜時の関係を図8, 9に示す。また, 2つのセッションにおける, N1m振幅および潜時の平均値と標準偏差を表1および2に示す。

分散分析の結果, 立ち上がり速度一定条件でN1m振幅に対する立ち上がり時間の効果 ($p < 0.01$) および刺激音圧の効果 ($p < 0.01$) が, N1m潜時に対する刺激音圧の効果 ($p < 0.0001$) が見られた。また, エネルギー一定条件でN1m振幅に対する刺激音圧の効果 ($p < 0.01$) およびN1m潜時に対する刺激音圧の効果 ($p < 0.01$) が見られた。

多重比較検定を行った結果, 立ち上がり速度一定条件において, 立ち上がり時間(2.5 ms-10 ms: $p < 0.008$, 2.5 ms-20 ms: $p < 0.0001$, 5.0 ms-20 ms: $p < 0.008$) および刺激音圧(20 dB SL-40 dB SL: $p < 0.0001$, 20 dB SL-60 dB SL: $p < 0.0001$)の違いによるN1m振幅の有意差が見られ

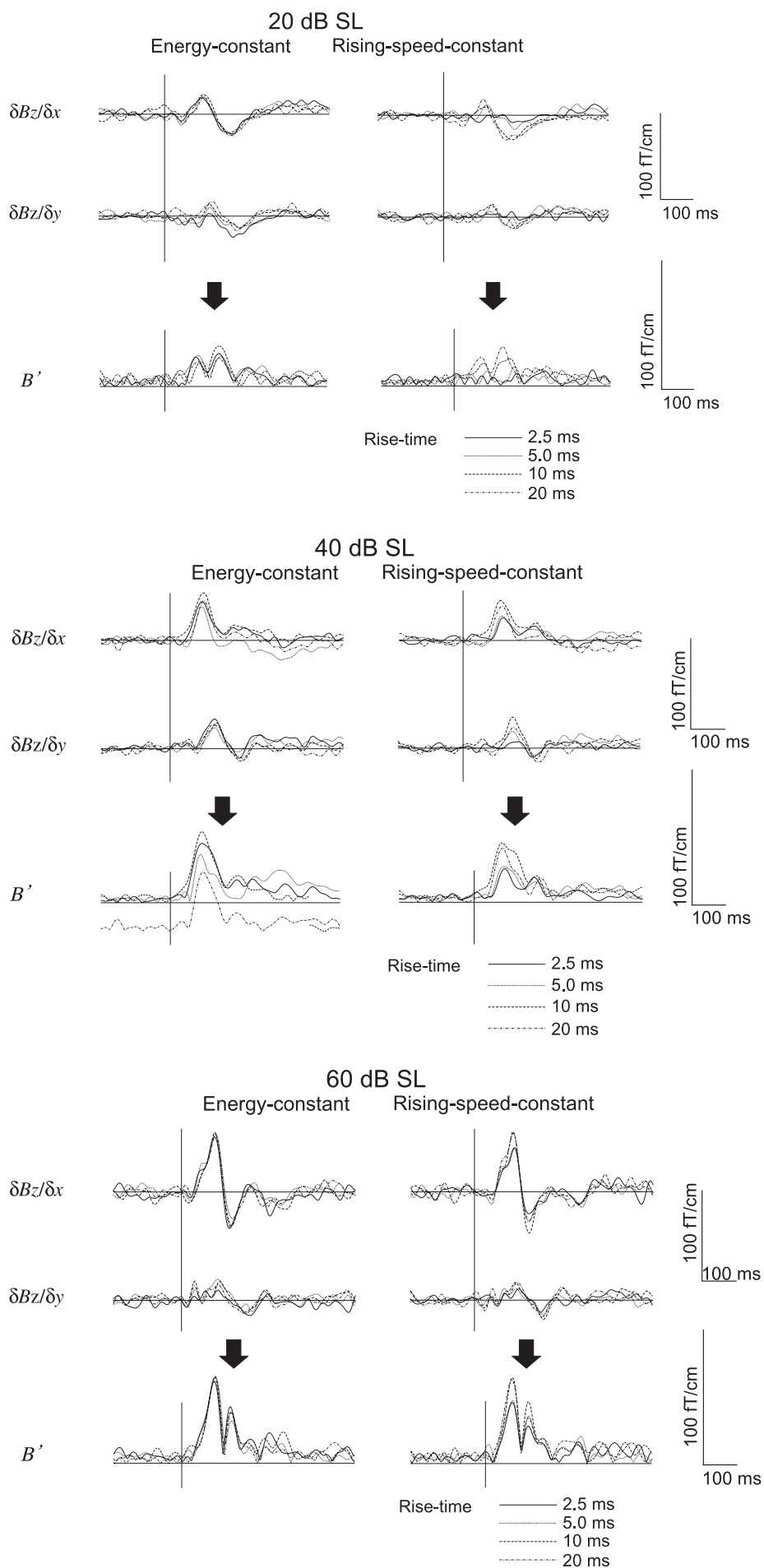


図5 右側頭部において計測された誘発脳磁界波形 ($\partial B_z/\partial x$, $\partial B_z/\partial y$, および B')。左：エネルギー一定条件, 右：立ち上がり速度一定条件。

Fig. 5 N1m responses measured in the right temporal region. Left : Energy-constant condition, Right: Rising-speed-constant condition.

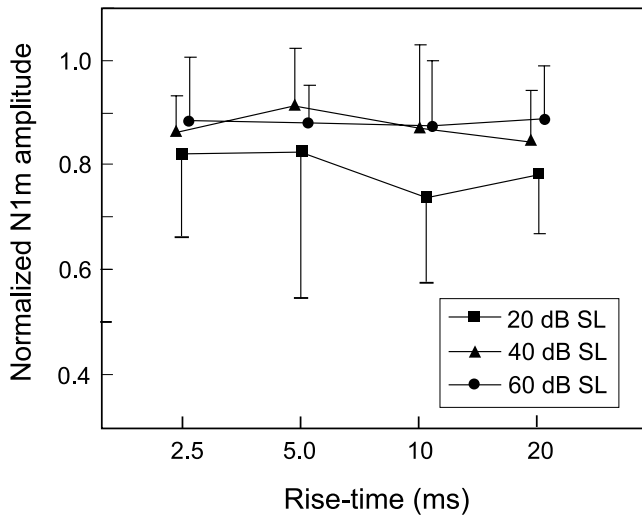


図6 エネルギー一定条件における立ち上がり時間とN1m振幅の関係
Fig. 6 N1m amplitude as a function of rise-time in the Energy-constant condition.

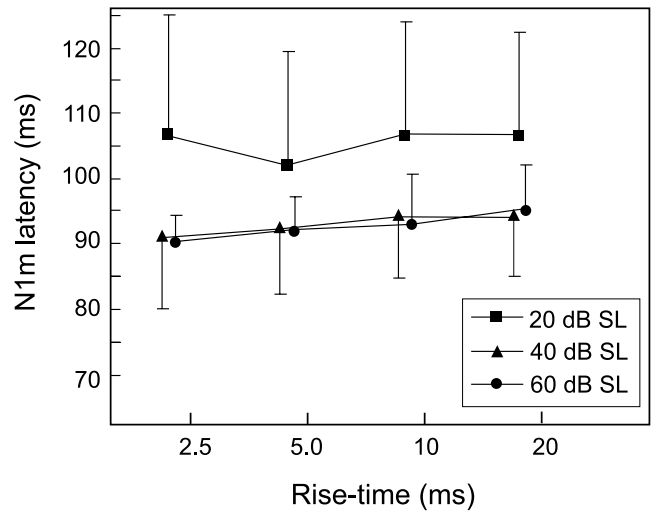


図7 エネルギー一定条件における立ち上がり時間とN1m潜時の関係
Fig. 7 N1m latency as a function of rise-time in the Energy-constant condition.

た。また、立ち上がり時間 (2.5 ms-20 ms: $p < 0.05$) および刺激音圧 (20 dB SL-40 dB SL: $p < 0.01$, 20 dB SL-60 dB SL: $p < 0.01$) の違いによる N1m 潜時の有意差が見られた。一方、エネルギー一定条件においては、刺激音圧の違いによる N1m 振幅の有意差 (20 dB SL-40 dB SL: $p < 0.01$, 20 dB SL-60 dB SL: $p < 0.01$)、および刺激音圧の違いによる N1m 潜時の有意差 (20 dB SL-40 dB SL: $p < 0.01$, 20 dB SL-60 dB SL: $p < 0.01$) が見られた。

4. 考 察

4.1 立ち上がり速度一定条件

刺激音圧に関わらず、立ち上がり時間の増加に伴って N1m 振幅が増加する傾向が見られた。また、刺激音圧 20, 40 dB SL の場合は N1m 潜時が減少する傾向が観察されたが、60 dB ではそのような傾向は認められなかった。過去の研究において、刺激音の持つエネルギーの増加に伴って N1m 振幅は増加、潜時は減少するものの、エネルギーがある値に達するとその増加および減少は飽和することが報告されている [4, 10]。立ち上がり速度一定条件においては、立ち上がり時間が増加するほど刺激音のエネルギー量が大きくなる。刺激音圧 60 dB の場合にはエネルギーが大きいため潜時減少が飽和したと考えれば、この結果は N1m のエネルギー積分機構を反映したものであると捉えることができると思われる。

4.2 エネルギー一定条件

どの刺激音圧においても、立ち上がり時間による N1m 振幅への有意な効果は観察されなかった。この事実は、過去の研究において観測された立ち上がり時間の増加に伴う振幅の増加 [11-13] は、必ずしも神経発火の同期性の変化によるものではないことを示している。

一方、刺激音圧 20 dB SL, 40 dB SL においては、立ち上がり時間の増加に伴って N1m 潜時が増加する傾向が観察された。しかしながら、分散分析では立ち上がり時間の効果は認められておらず、今回の結果からは、立ち上がり速度の変化が N1m に影響を及ぼすとはいい難い。

4.3 エネルギー、立ち上がり速度以外のパラメータの影響

本実験においては、エネルギー、立ち上がり速度の以外にも、最大音圧、プラトーの長さなどの様々なパラメータが変化している。最大音圧が N1/N1m の振幅、潜時に大きな影響を与えることが知られているが [4, 9]、先行研究では最大音圧を一定にした条件においても、立ち上がり時間の変化に伴う N1 振幅と潜時の変化を認めている [11-13]。立ち上がり速度一定条件の結果を考慮すると、先行研究で見られた N1 の振幅、潜時の変化には、最大音圧や立ち上がり速度というよりは、刺激のエネルギーが影響していたと考えるべきであろう。

もちろん、エネルギーや最大音圧以外のパラメータが N1m 振幅および潜時に影響を与えている可能性は否定できない。また、これらのパラメータの影響が独立ではなく、相互に影響を及ぼし合っている可能性も考慮する必要もあるかもしれない。その一方で、先行研究における N1m の変化が、立ち上がり時間に起因する神経発火の同期性の変化のみによるものでないことが示されたと言える。

5. 結 論

刺激音のエネルギー量もしくは立ち上がり速度を一定にした状態で立ち上がり時間を変化させ、N1m の変化を観察した。その結果、立ち上がり速度を一定に保ったままエ

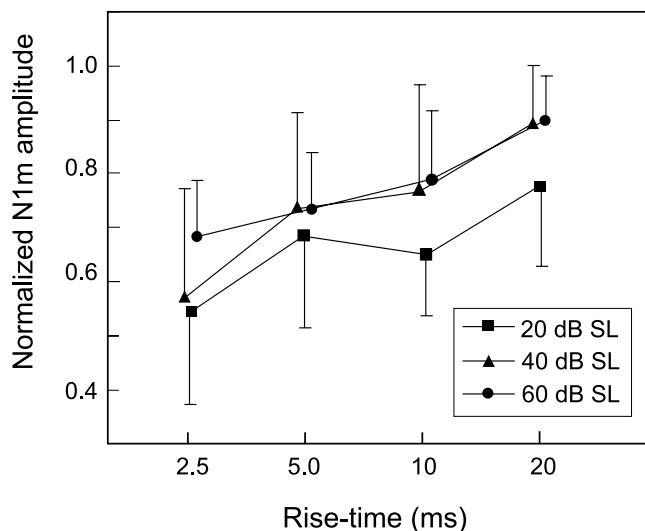


図8 立ち上がり速度一定条件における立ち上がり時間とN1m振幅の関係

Fig. 8 N1m amplitude as a function of rise-time in the Rising-speed-constant condition.

表1 N1m 振幅の平均値。(a)：エネルギー一定条件，(b)：立ち上がり速度一定条件。

Table 1 Mean values of N1m amplitude. (a): Energy-constant condition, (b): Rising-speed-constant condition.

Rise-time (ms)	20 dB SL		40 dB SL		60 dB SL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2.5	17.4	6.0	34.7	8.9	36.0	13.0
5.0	17.4	7.8	36.7	9.3	36.1	12.7
10	15.5	4.9	34.7	10.3	37.1	14.3
20	15.7	3.9	34.0	9.6	36.8	14.2

(fT/cm)

Rise-time (ms)	20 dB SL		40 dB SL		60 dB SL	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
2.5	11.53	2.9	22.3	7.6	27.9	11.2
5.0	13.0	4.1	27.5	9.6	30.5	10.8
10	15.7	5.2	32.1	11.8	33.6	13.8
20	17.8	5.4	36.8	8.0	37.5	12.2

(fT/cm)

エネルギーを変化させた場合は、立ち上がり時間の増加 (=エネルギー増加) に伴う N1m 振幅の増加、潜時の減少が観察された。一方、エネルギー量を一定に保ったまま立ち上がり速度を変化させた場合は、立ち上がり時間の増加 (=立ち上がり速度の減少) に伴う N1m 振幅および潜時の有意な変化は観察されなかった。これらの結果は、N1m 振幅および潜時に対しては、刺激音のエネルギーの方が立ち上がり速度に比べてより大きな影響を及ぼすことを示している。

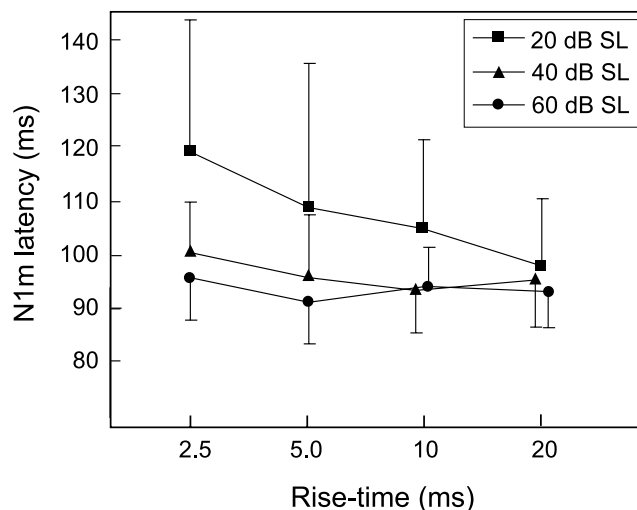


図9 立ち上がり速度一定条件における立ち上がり時間とN1m潜時の関係

Fig. 9 N1m latency as a function of rise-time in the Rising-speed-constant condition.

表2 N1m 潜時の平均値。(a)：エネルギー一定条件，(b)：立ち上がり速度一定条件。

Table 2 Mean values of N1m latency. (a): Energy-constant condition, (b): Rising-speed-constant condition.

Rise-time (ms)	20 dB SL		40 dB SL		60 dB SL	
	Mean (ms)	SD	Mean (ms)	SD	Mean (ms)	SD
2.5	106.6	18.4	91.2	11.4	90.0	4.6
5.0	101.8	17.5	92.5	10.3	91.6	5.8
10	106.4	17.6	94.6	9.2	92.8	8.2
20	106.3	16.1	94.4	9.6	94.8	7.3

(ms)

Rise-time (ms)	20 dB SL		40 dB SL		60 dB SL	
	Mean (ms)	SD	Mean (ms)	SD	Mean (ms)	SD
2.5	118.7	24.7	100.6	9.2	95.29	8.3
5.0	108.5	26.8	95.8	11.4	90.90	8.0
10	104.8	16.2	93.2	8.2	93.73	7.5
20	97.7	12.5	95.2	9.2	92.80	6.8

(ms)

文 献

1. Howell P, Rosen S: Production and perception of rise time in the voiceless affricate/fricative distinction. *Journal of the Acoustical Society of America*. **73**: 976-984, 1983.
2. Cutting J, Rosner B: Categories and boundaries in speech and music. *Perception and Psychophysics*. **16**(3): 564-570, 1974.
3. Mack M, Blumstein SE: Further evidence of acoustic invariance in speech production: the stop-glide contrast. *Journal of the Acoustical Society of America*. **73**: 1739-

1750, 1983.

4. Näätänen R, Picton T: The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*. **24**(4): 375-425, 1987.
5. Kuriki S, Murase M: Neuromagnetic study of the auditory responses in right and left hemispheres of the human brain evoked by pure tones and speech sounds. *Exp Brain Res*. **77**: 127-134, 1989.
6. Gootjes L, Raiji T, Salmelin R, Hari R. Left-hemisphere dominance for processing of vowels: a whole-scalp neuro-magnetic study. *Neuroreport*. **10**: 2987-2991, 1999.
7. Breier JI, Simos PG, Zouridakis G, Papanicolaou AC: Lateralization of cerebral activation in auditory verbal and non-verbal memory tasks using magnetoencephalography. *Brain Topogr*. **12**: 89-97, 1999.
8. Linka T, Müller BW, Bender S, Sartory G: The intensity dependence of the auditory evoked N1 component as a predictor of response to Citalopram treatment in patients with major depression. *Neuroscience Letters*. **367**: 375-378, 2004.
9. Sugg MJ, Polich J: P300 from auditory stimuli: intensity and frequency effects. *Biological Psychology*. **41**: 255-269, 1995.
10. Nakagawa S, Ueno S, Imada T: Changes in parameters of auditory evoked magnetic fields with click train patterns. *Journal of Applied Physics*. **85**(8): 5708-5710, 1999.
11. Onishi S, Davis H: Effects of duration and rise time of tone bursts on evoked V potentials. *Journal of the Acoustical Society of America*. **44**(2): 582-590, 1968.
12. Kodera K, Hink RF, Yamada O, Suzuki J: Effects of rise time on simultaneously recorded auditory evoked potentials from early, middle and late ranges. *Audiology*. **18**(5): 395-402, 1979.
13. Elfner LF, Gustafson DJ, Williams KN: Signal onset and task variables in auditory evoked potentials. *Biological psychology*. **4**(3): 197-206, 1976.
14. Ahönen AI, Hämäläinen MS, Kajora MJ, Knuutila JET, Laine PP, Lounasmaa OV, Parkkonen LT, Simola JT, Tesche CD: 122-channel SQUID instrument for investigating the magnetic signals from the human brain. *Physica Scripta*. **49**: 198-205, 1993.

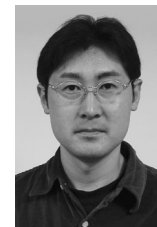
萬谷 惇 (マタニ マコト)

2004 年関西大学工学部管理工学科卒業, 2006 年同大学院工学研究科修士課程管理工学専攻修了。同年, 東洋エンジニアリング(株)入社, 現在に至る。修士課程在学中は(独)産業技術総合研究所において, 非侵襲計測によるヒト聴覚機能の中樞情報処理に関する研究に従事。



中川 誠司 (ナカガワ セイジ)

1999 年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。現在, (独)産業技術総合研究所主任研究員。博士(工学)。非侵襲計測による生体機能推定と福祉・医用工学への応用に関する研究に従事。ドコモ・モバイル・サイエンス賞(2003), 市村学術賞(2006), Nature Medicine-Anges MG Biomedical Award(2006)等受賞。



日本生体医工学会, 日本音響学会, IEEE などの会員。

小谷 賢太郎 (コタニ ケンタロウ)

1996 年ペンシルバニア州立大学(産業工学)博士課程修了(Ph.D.)。同年関西大学工学部助手を経て, 現在同大学システム理工学部機械工学科准教授, 現在に至る。専門はヒューマンインタフェース, 生体信号処理。



計測自動制御学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本人間工学会, 日本臨床神経生理学会等の会員。

堀井 健 (ホリエ ケン)

1969 年関西大学大学院工学研究科修士課程機械工学専攻修了, 同年同大学工学部助手を経て, 1995 年同大学工学部管理工学科教授, 2007 年組織改変により同大学システム理工学部機械工学科教授, 現在に至る。専門は主に, 追従性眼球運動制御機構のモデル, 知覚・認知過程のモデル, LAN 利用による機器の制御の研究に従事。工学博士。



日本人間工学会, 日本機械学会等の会員。