

靴音の解析*

田中 基八郎^{*1}, 巽 敏寛^{*2}, 千田 剛^{*2}, 藤野 隆^{*2}
渡邊 鉄也^{*1}, 佐藤 太一^{*3}, 戸田 富士夫^{*4}

Analysis of Shoes Sound

Kihachiro TANAKA^{*5}, Toshihiro TATSUMI, Tsuyoshi SENDA, Takashi FUJINO,
Tetsuya WATANABE, Taichi SATO and Fujio TODA^{*5} Saitama University, Dept. of Mechanical Engineering,
255 Shimo-Okubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

In this paper, shoes sounds at walking are investigated. Their sounds may show individual walking characteristics. So we can recognize someone coming and one's physical or psychological condition by the time history pattern of their sound pressures. Their sounds are different by walking style, and there are two strong sound pressure waves at one step. The first one is a wave at heel touching down the ground and the second one is a wave at the front part of shoes getting down the ground. We study on the source of the shoes sound. The vibration generates by a collision of the shoes sole and floor, and transfers to the shoes skin. The sound radiates from the shoes skin parts. And, it is investigated that the shoes sound includes air compressing sound. Using their patterns and frequency characteristics of the sound pressures, we can understand who comes up and what is one's condition.

Key Words: Shoes Sound, Walking, Collision of Footstep, Health

1. 緒言

人の靴音には、それぞれの個人の特徴が現れる。そこで、靴音からその人がだれであるのかもわかる。そしてまた、その人の元気さも疲労度も靴音から判断することができる。もちろん、それは、歩くあるいは走る様子に変化し、姿勢も変わってしまうからである。またそこには、心的な感情の起伏の現れもあるかもしれない。人々は、家庭や同僚など組織の人、あるいは交流しなければならない人の状況を靴音からそっと察知しているものと思われる。

靴音からの感覚情報やサウンドスケープとしての情景は、文学をはじめとした種々なる分野で表現され、語られている。しかし、靴音を信号として検討した研究はあまり見たことがない。そこでここでは、靴音の音圧波形の典型的なパターンを測定し、そのパターンと歩き方の特徴について調べ、また人物判定の方法に

ついて考えてみた。さらに、靴音の発生源についての検討を行った。

2. 靴音と歩き方

靴音の音圧の時間波形は、図1のように一步の着地のときの二つの大きな衝突波から成り立っている。第1波がかかとの着地音であり、第2波が靴底前半部の着地音である。通常の一步の着地では、第1波のかかとの着地がやや衝撃的であり、第2波の靴底前半部の着地で体重のほとんどが床に伝わるため、第2波めの音圧は第1波めにやや近づいた大きさのものとなっている。

とくに、健康な歩き方としては、背筋を伸ばし、脚を真っ直ぐに踏み出して歩幅を大きくした歩き方なので、着地はかかとからで、かかとから順に転がすようにつま先まで接して、最後に足指でけるようにする⁽⁴⁾。そこで、靴音としては上述の音圧パターンが出やすくなる(図2)。第1波と第2波の境は必ずしもはっきりしない。

また、疲労した体の歩き方の場合、足が全体的に着地するようになり、第1波と第2波の音圧の大きさに差が少なくなったり、ドタッと靴底全体で着地して一つの衝突波形となったりする(図3)。

* 原稿受付 2000年8月14日。

^{*1} 正員、埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市下大久保255)。^{*2} 埼玉大学学生。^{*3} 正員、東京電機大学理工学部(☎350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)。^{*4} 正員、宇都宮大学教育学部(☎321-8505 宇都宮市峰町350)。
E-mail: tanaka@mech.saitama-u.ac.jp

女性のハイヒールの歩き方の場合⁽⁷⁾においても、はっきりとした二つの音圧波形が計測される(図4)。

このように、健康状況や疲労度は靴音に現れる。さらに、感情の変化が靴音に現れるのは日々の生活の状況で感じ知るところである。

3. 靴音の発生

靴音の時間波形の一例の周波数特性を調べると図5のようになっている。健康な歩き方の靴音と疲労した歩き方の靴音では、周波数特性が異なる。それは、着

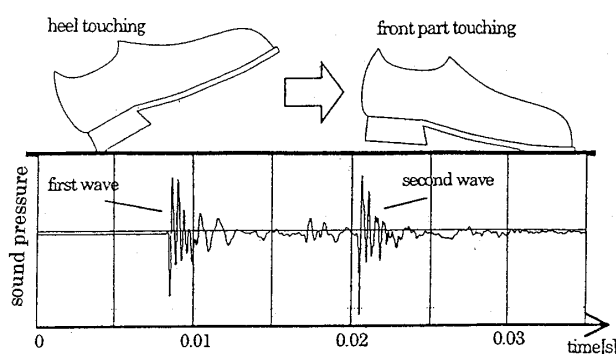


Fig. 1 Occurrence of walking sound

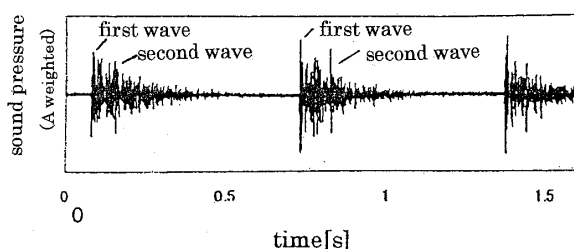


Fig. 2 Walking sound (good physical condition)

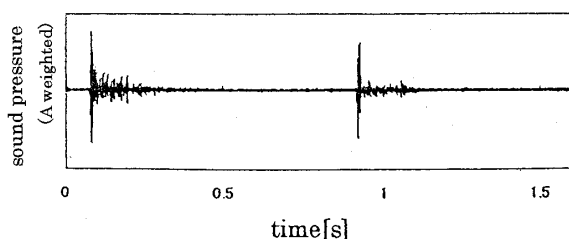


Fig. 3 Walking sound (tired condition)

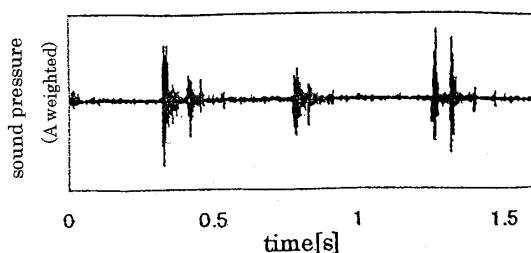


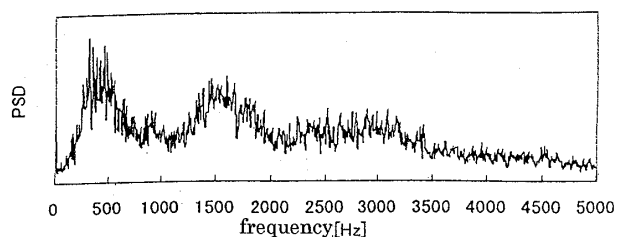
Fig. 4 Walking sound by high heels

地衝突の状況が異なるため、靴底衝突パルスの発生が異なり、励起振動音の違い(とくに、2 000 Hz 以上)となって現れると考えられる。

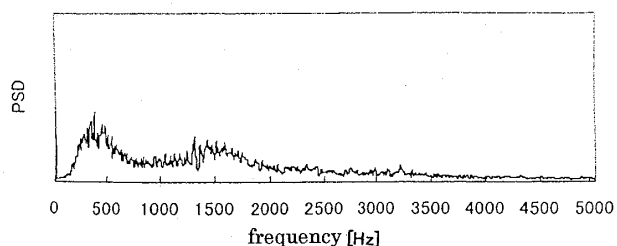
それらの音がどこから発生しているのか調べる。まず、靴の振動が音になっているのか、床の振動が音になっているのかが問題であり、次に振動部分および放射音について調べる。

(1) 発音源は靴か床か

渡り板を敷いた上を歩いたときに発生する音は、板の振動を調べてみるとその板の固有振動が発生して音となっていることが多いことがわかっている。そこで、コンクリートの廊下を歩いたときの床面の振動と靴の振動、そして靴音を調べてみた。図6に、革靴で歩いたときの靴の近くの床振動の上下方向の加速度の周波数特性を示す。図より、靴音(図5)と比べて床振動の周波数スペクトルは全く一致していないことがわかる。一方、靴底をたたいたときの強い振動数成分では500, 800 Hz など(図7)があり、靴音の成分と似ている。そこで、靴音の源はコンクリート床の場合、床ではなく(鳴りやすい床では、床の固有振動が源となることがある)、靴が振動していると考えられる。次



(a) Good physical condition



(b) Tired condition

Fig. 5 Frequency characteristics of walking sound

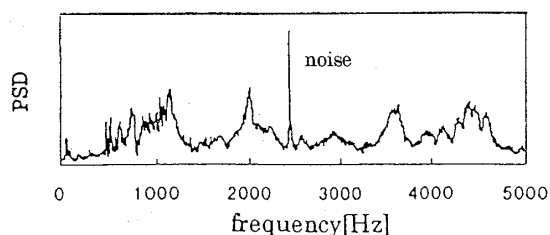


Fig. 6 Acceleration at floor tapping

に振動音源部分調査実験を行った。

(2) 打撃加振, スピーカ加振による調査

靴を持って靴底を打撃したときの靴の各部の振動特性を図8に示す。図8(b)は、そのときの音である。音は靴底のいずれをたたいた場合でも 500 Hz の強い成分をもち、靴の振動の成分とは異なっていることが多かった。そこで、図9のように靴をたてて置いてスピーカによって加振を行い、もっと測定点を増やし、靴の各部分の振動振幅が大きいところを調べた。スピーカによる加振は近くに手ごろな加振機がなかったためであり、接触振動加振を行う加振機が的確である。

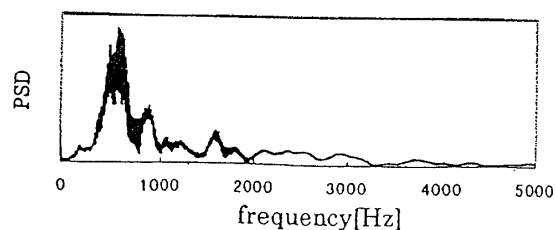


Fig. 7 Acceleration at sole tapping

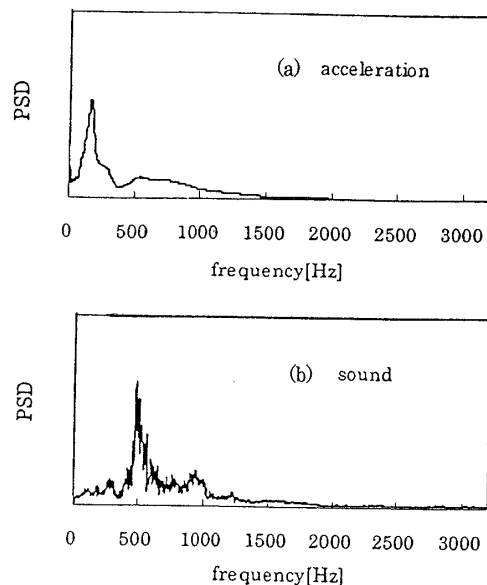


Fig. 8 Frequency characteristics at hammering on sole

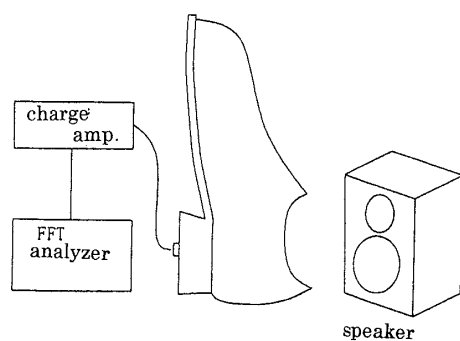


Fig. 9 Exciting experiment

スピーカの加振周波数成分は靴音で強かった 500 Hz である。このとき、振動振幅が大きいのは図10に示した加速度ピックアップの位置のうち、No. 5~10, No. 20~31 であり、前半部の靴底の No. 5~10 を除いて、足の甲の部分の変形しやすいところであることがわかった。これは、靴を足にはめていないときであり、必ずしも実際の振動調査とはなっていないが、歩行時に靴底と床とが衝突して、そのパルス波が足の甲の部分の靴の振動となって音が放射していることは考えられる。

(3) 空気圧縮音は存在するか

靴音は靴底が着地したときに発生するが、その際、靴の振動以外に、靴底付近の空気が圧縮されて音が発生していることが考えられる。ここでは、空気の圧縮に影響があると考えられる靴底の溝の有無を変えてその特性を調べてみた。実際の測定では、靴の代わりに空気圧縮音が出やすいと考えられるスリッパを用いて、(a)溝なし、(b)横溝のみあり、(c)縦横溝ありの三とりの溝(幅 10 mm, 深さ 5 mm)の切り方(図11)を底に施し、スリッパを手で持って同じ大きさの加速度が生じるようにして床をたたいたときの加速度

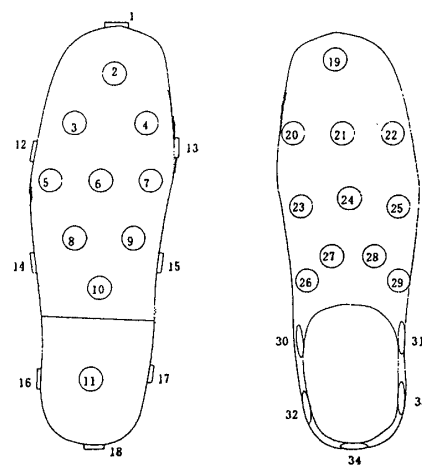


Fig. 10 Measuring points of acceleration

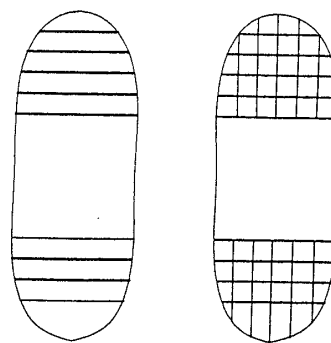


Fig. 11 slippers with grooves

と音の周波数特性を調べてみた(図12)。

図12の結果から、ほぼ同じ衝突加速度(図(a))にもかかわらず、とくに、注目している縦横溝ありの場合が最も1500 Hz以上の音の成分(図(b))が少なくなっていることがわかり、靴の前半部が着地したときの衝突音の成分(図5)と溝なしの場合の傾向が似ていることがわかった。そこで、靴の前半部が着地する第2波めの音には、拍手のときの音のように空気が逃げ場を失って圧縮されて音になる着地空気圧縮音も衝突音とともに発生していることが推定される。

4. 人物の判定

異なる人物から得られた靴音の波形から、人物の判定を行うには、いかなるパラメータが関与しているのかを調べる。まず、靴音のパターンを図13のようなモデルパターンでとらえる。そして、それぞれの人物の特徴を判定する項目として、①第1波の大きさ、②第2波の大きさ、③第2波/第1波、④第1波と第2波の間隔、⑤第1波と次の第1波の間隔、および周波数特性を調べてみることにした。例として5人の人物(20歳過ぎの男性、同じ靴をはいたとき)のデータを記録し(表1)、分析してみた。

(a) 人物Aは、第2波/第1波の値が0.4であり、周波数特性では300 Hzを頂点としたピークが一つある。よって、かかとを強く、前半部を弱く踏む歩き方であり、音はかかとの音のみが大きく聞こえる。

(b) 人物Bは、第2波/第1波の値が0.9であり、周波数は300 Hzと800 Hzが同じくらいに発生している。この人物は時間波形から、かかとと前半部を同

じくらいの強さで踏んでいて、音は両方の衝突から聞こえる。

(c) 人物Cは、第2波/第1波の値が1.0であり、周波数特性では300 Hz、700 Hz、1200 Hzにピークがある。よって、かかとと前半部を同じくらいの強さで踏んでいて、音は両方の衝突から聞こえる。

(d) 人物Dは、第2波/第1波の値が0.4であり、周波数特性は300 Hzと800 Hzにピークがある。よって、かかとを強く、前半部を弱く踏む歩き方であり、音はかかとの衝突音が大きく聞こえる。

(e) 人物Eは、第2波/第1波の値が0.5であり、第1波と第2波の間隔は0.05 sである。周波数特性では300 Hz、600 Hz、800 Hzにピークがある。よって、かかとと前半部を同時に着地させ、かかとのほうを強く踏む歩き方である。かかとの衝突音が強く聞こえる。

ここでわかることは、③第1波と第2波の音圧の比は、人物によって大きく異なることである。また、同じ靴でも人物により発生する音の周波数に違いがあることである。

そこで、次に波形修正ソフト(Sound Forge 4.5, Sonic Foundry社)を用いて、音圧波形の形や周波数特性を変更した靴音(比較的健康な歩き方を元にして)を創り、何人かの人に聞いてもらい違う人物の靴音に聞こえるかどうかを判定してもらった。20代~50代までの10~11人の判定者に、靴音波形の一部または

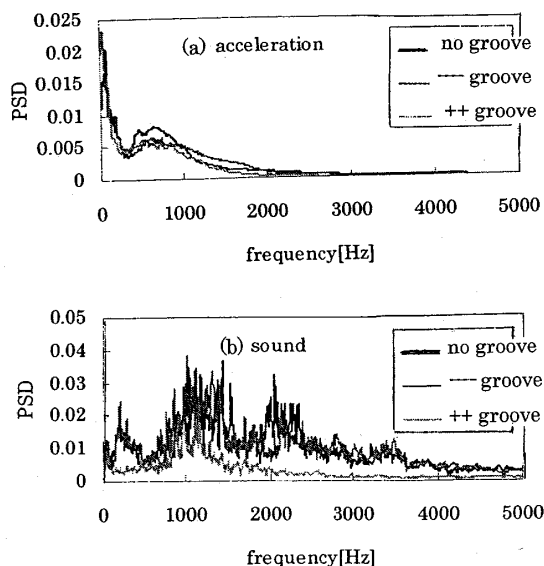


Fig. 12 Frequency characteristics slippers

Table 1 Individual walking sound data

person	A	B	C	D	E
③sound pressure ratio ②second/①first wave	0.4	0.9	1.0	0.4	0.5
④interval of first and second wave [s]	0.10	0.10	0.16	0.14	0.05
⑤interval of a step [s]	0.85	0.60	0.65	0.55	0.60
frequency components [Hz]	300	300 800	300 700 1200	300 800	300 600 800

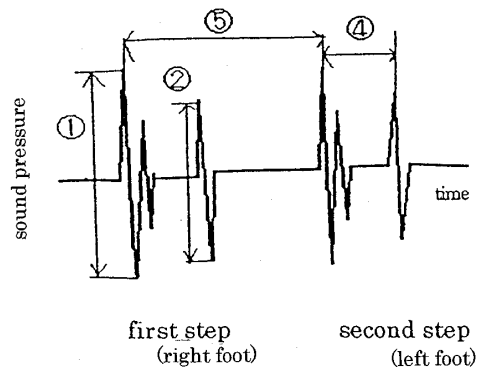


Fig. 13 Wave pattern of walking sound

全部の周波数特性を変化させた場合に人物が別人に変わったように聞こえるかどうかを判定してもらった。

表2にその変化点の結果を示す。この結果から、この人物の場合は、人はとくに第1波の周波数の変化を敏感に聞き分けていることがわかる。

図14に第1波の周波数を変化させた音圧波形の例を示す(この場合は、④第1波と第2波の間隔もずれてしまっているが、後述のようにその間隔のずれの影響は小さい)。また、さらに人物判定の他のパラメータ変化について調べてみた。5人の判定者に第1波と第2波の音圧の大小を変化させたもの、第1波と第2波の間隔を変化させたものなどを聞いてもらって、人物が別人に変化したかどうか判定してもらった。その結果、音圧の変化および時間間隔の変化については、どちらも小さな変化で違いがわかるが、音圧の変化では歩き方の強さが、時間間隔では歩く速度が変化しているように感じ、違う人物の靴音に変わっているとは聞き取れないということであった。そこで、この判別に関しては、さらに詳細に調査分析を行わねばならない。

Table 2 A result of listening test [person]

Transformation rate	1.01	1.03	1.06	1.13	1.2	1.27	1.35	1.43	1.52	1.61
Transformation type										
The first wave frequency up		10								
The first wave frequency down		1	3	3	1	2	1			
The second wave frequency up				3	4	3				1
The second wave frequency down				1	5	3	1			
Frequency up		2	4	5						
Frequency down		1	4	6						

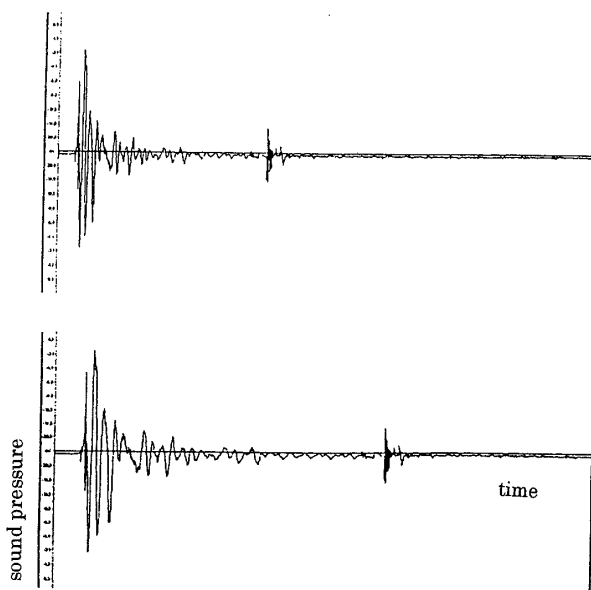


Fig. 14 A example of transformation of frequency (first wave)

5. 靴音とその表現

健康度や元気さ、感情の起伏によって、靴音は違ってくる。一般に、歩くときの靴音の擬音語表現では、いろいろと次のようなものが挙げられる。

(元気, 速い) たったっ, つかつか, とっとっ

(普通) てくてく, ちょちょこ, とことこ, よちよち

(疲労, ゆっくり) のそのそ, ぶらぶら, そろそろ

しかし、これらの表現は、擬音語というよりは擬態語的であり、動作の様を表すことになっているように思われる。もちろん、ほかに、より擬態語的なものとしては次のようなものもある。

すたこら, すたすた, せかせか, ひょこひょこ, のしのし, のっしのし

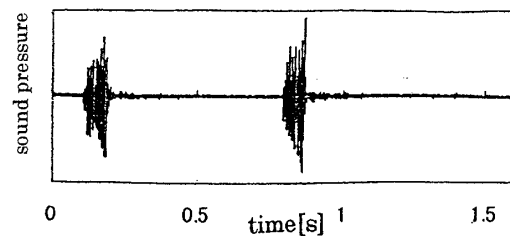


Fig. 15 Onomatopoeia "tatsu tatsu"

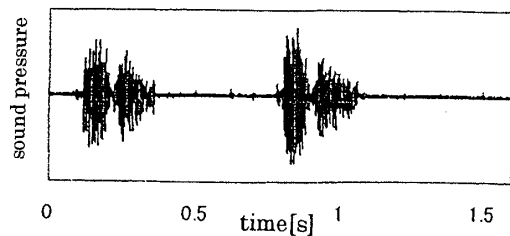


Fig. 16 Onomatopoeia "soro soro"

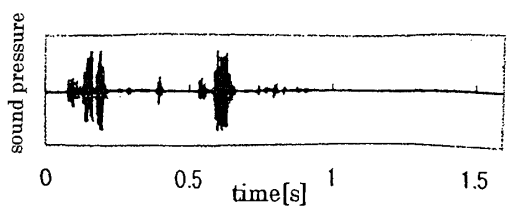


Fig. 17 Onomatopoeia "kotsu kotsu"

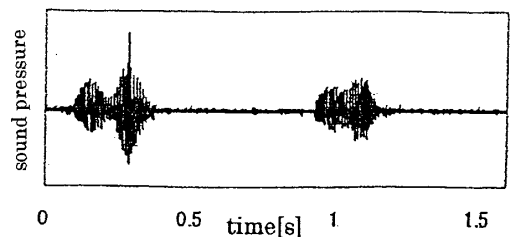


Fig. 18 Onomatopoeia "zutsu zutsu"

ここまでの表現でわかることは

(元気) 音が短く切れる(図 15)

(疲労) 音が長引く(図 16)

のようである。(普通)の場合は適度な長さで終わっていることであろうか。

次に、約 40 人の学生に聞いたアンケートによると、靴音は次のように表される。

(元気) かつかつ、たったっ、こつこつ(図 17)

(普通) こつこつ、かつかつ、とんとん

(疲労) ずっずっ(図 18)

ここでわかることは、母音アイウエオの第 1—第 2 ホルマントの分布⁽⁵⁾⁽⁶⁾に従い、高いホルマントの順に、母音「ア」の音が(元気)で「オ」の音が(普通)で「ウ」の音が(疲労)を表していることである。

4 章までの現象としての靴音の調査検討と考え合わせると、「かつかつ」とか「こつこつ」というように一歩に「か」と「つ」の二つの音節をあてて、二つの衝突音圧波形を表していること、元気なときは前半部の着地で靴音に高い周波数成分が多いので高いホルマントの音声をあてていることが言える。

6. 結 言

靴音に関して、それらの音圧波形がどのような現象から発生し、どのように人は聞いているのかについて

調査検討を行った。

一歩の靴音は 2 波の衝突音波形から成り立つこと、その 2 波の大きさにより健康度、元気が分析できること、人物の判定のパラメータとしては第 1 波めの音圧の周波数への注目度が大きいこと、靴音の発音は靴の甲の部分の振動の影響が大きいことなどがわかった。

今後、人物判定の詳細をつめるとともに、セキュリティシステムとしての靴音の分析、目の悪い人のための靴音床音の案内表示法に本研究の利用を考えていきたい。

文 献

- (1) 前林和彦, 超精密環境施設の微振動対策, クリーンテクノロジー, (1992-11), 47-54.
- (2) 塩谷清人・岡田敬一・前林和彦・広瀬道孝, 高精密環境施設の微振動対策に関する検討(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1987-10), 957-958.
- (3) 田名部忠・根来健夫, 教室の音環境改善のための床衝撃音の測定と歩行音の解析, 八戸工業高等専門学校紀要, (1995), 19-23.
- (4) 藤原健固, 歩きの科学, (1988), ブルーバックス, 講談社.
- (5) 電子通信学会編, 聴覚と音声, (1966), コロナ社.
- (6) 田中基八郎・松原謙一郎・佐藤太一, 異音の表現における擬音語の検討, 機論, 61-592, C(1995), 4730-4735.
- (7) 玉井和雄監修解説, 効果音大全集 (人の足音のいろいろ) CD, (1994), KING RECORDS.