

論文

コロトコフ音から 健康情報を抽出する方法についての一考察

——信号処理および、AI化に向けた取り組み——

A study on detecting diseases by Korotkoff sound analysis:
by using signal processing toward the application of artificial intelligence

高木 均*・杉本 恒美¹・片山 富美代²・佐野 元昭³

*^{1,3} 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

² 桐蔭横浜大学スポーツ健康政策学部

(2022年3月7日 受理)

I. はじめに

コロトコフ音（以下K音と略す）とは動脈が圧迫された時に発する“音”である。図1に示すように、血圧測定時に、聴診器で聞いている音¹⁾であるが、ロシアの外科医であるコロトコフが1905年に提唱した血圧測定法に利用される。まず、カフ（圧迫布）を腕に巻き付け動脈を強く圧迫し、その後、除圧していくとK音が発生し、やがて消失する。この音の発生時と消失時を聴診器で検知し、発

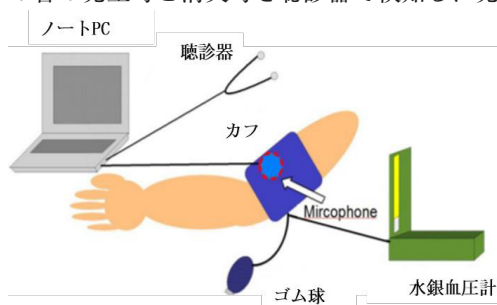


図1 血圧とK音の測定

生時の水銀柱の高さを最高血圧、消失時の高さを最低血圧とする。

我々は、K音は血管が発する健康メッセージであると考え、その“解釈”を目標に過去10年にわたり近隣の健康福祉施設で600人回以上の音を収録してきた。

本報では、K音に信号処理、統計処理を施し、健康情報の抽出を試みる中で得た知見と今後の方向性を紹介する。

II. 過去の研究例と本研究の位置づけ

本論に入る前に、過去の研究例の俯瞰と、本研究の位置づけを述べる。

K音はコロトコフを始祖とするが、戦後は米国が研究の中心となった。肥満と高血圧者の比率が高く、現在も心疾患が死因の第1位であるというこの国の背景があるようである。ここでの研究^{2,3)}では、音の発生要因を解明し血圧の正確な把握につなげることが主目的

* TAKAGI Hitoshi: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama. 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² KATAYAMA Fumiyo: Professor, Faculty of Culture and Sport Policy, Toin University of Yokohama.

³ SANO Motoaki: Professor, Faculty of Biomedical Engineering, Toin University of Yokohama.

とされた。70年代からはLSIによるデジタル技術の援用でデータ分析は更に加速し、かつ、深化してきた。但し、それでも決定的な発生要因が定まらない状況にある。生体を扱うことの難しさといえそうである。一方、当学はK音からの健康情報（特に疾患）の検出を狙いとしてきている。ここで、K音から疾患を検出する試みは古く60年代から国の内外で研究例がある^{4,5)}。更に、一部には商品化された例⁶⁾もある。これらの特徴はK音のレベル（強度）変化に注目した技術で、その出力は、“心疾患”の傾向の有無とか、血管年齢のような老化指標などの情報となっている。

本研究ではK音のレベルに加え、音質（=メッセージ）を解釈することで、健康に関するより深い情報を抽出したい。最終的には、血圧値と一緒に健康情報も出力できるよう、新たな機能を血圧計に組み込めるようにしたい。

Ⅲ. K音の波形と特徴の類型化

波形は多様で、調べる限り“一般形”を論じた文献はなく、それぞれ著者が計測した数例の波形を紹介しているようである。ここでもまずは同じ流儀で波形の紹介を始めるが、我々の蓄積してきた多くのデータから特徴を類型化し、情報抽出のための切り口とする。

1. K音の波形

図2に例として2周期分を示す。0.49秒や1.21秒付近のピークは心電図のR波のピーク（=心室筋の励起）に対応するK音の主峰である。心周期は0.72秒で、特徴として、①主峰直前（0.45, 1.20秒）の切れ込み、②主峰直後（0.51, 1.24秒）の小さなピーク、③深い谷（0.66, 1.40秒）、④オーバーシュートのようなピーク（0.70, 1.42秒）などがある。年齢差や個人差で、山谷の大きさ、位置（位相）のチラバリは大きく、①や④はな

いことがあり、②についてはない場合と2つ以上ある場合がある。

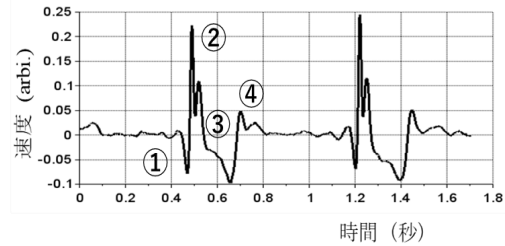


図2 K音の生波形の例（2周期）

2. 可聴成分と非可聴成分

疾患情報の抽出に先立ち、音を可聴成分と非可聴成分に分けた。人間の耳では20Hz以上しか聞こえないから聴診器で聞く“音”は厳密には可聴成分のみである。図2の波形を、可聴成分（20Hz～）と非可聴成分（～20Hz）に分解したのが図3である。これから、先に特徴として挙げた①は可聴、非可聴の両方、②は可聴、③、④は非可聴成分が主とわかる。ここで両成分にそれぞれ大切な健康情報が含まれているとみている。

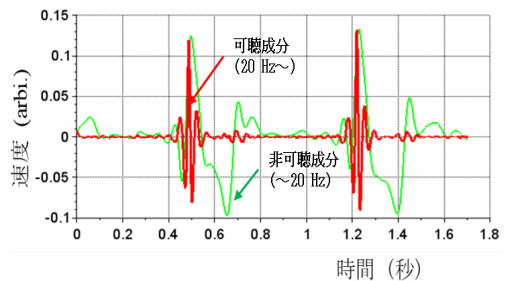


図3 K音の可聴と非可聴成分への分解

3. K音波形の類型化

K音は、年齢差、個人差などでチラバリが大きく一般形は言えそうにない。しかし、どのような“型”があるかをみていくことは疾患やその兆候を漏れなく洗い出すための重要な過程である。ここでは、高齢被験者10名の最長10年、合計92波形を観察し、その特徴をKJ法⁷⁾を使ってまとめた。目での観察のため、低周波である非可聴成分の特徴が多いが、結果を図4に示す。

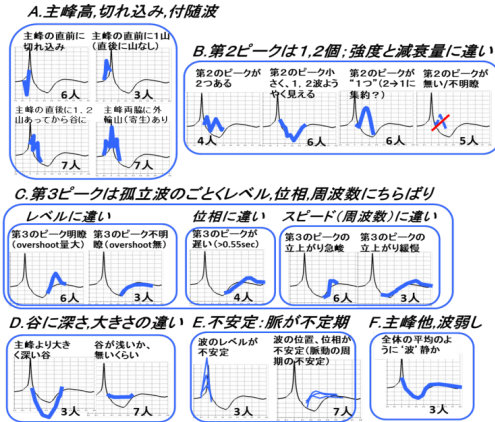


図4 K音波形の類型化

特徴点は多いが、大局的には数個のグループにまとめられるとみた。もっとも、被験者の中には心疾患などの経験者もいるが、計測は通常的生活内で行ったから、特徴の多くは環境（食事、運動、精神状態、経年…）の要素に起因し、疾患によるものはそう多くはないとみている。

しかし、これらの中には何種類かの疾患の兆候は必ずあり、それが時として現れたり消えたりしていると考えられる。よって、今後、類型毎に起源を調べることや、あるいは、疾患に共通する“型”を同定することにより、“型と健康指標（疾患）の1対1対応表”を作っていければと考えている。

IV. 波形分析

1. 経年変化

経年変化の研究例^{4,5)}は結構あるが、ここでは前述の類型に沿って筆者らの行った例を紹介する。経年変化は疾患ではないが、心筋梗塞などのいわゆる虚血性心疾患は年齢とともに進行するから、疾患の抽出過程でいずれ経年変化と疾患の分離が必要となる。したがって、経年変化とはどのようなものかを調べることは疾患抽出の準備として大切なステップである。

図5は、高齢の被験者10名（72～90歳）

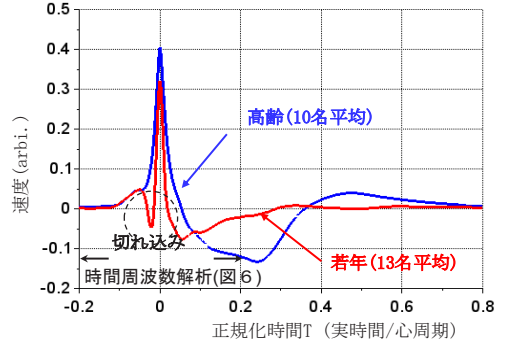


図5 K音の経年変化

と若年の被験者13名（21～37歳）それぞれの“平均”波形である。横軸は実時間を個々の心周期（0.5～1.5秒）で正規化し、縦軸は単純に算術平均した。また、主峰となる時間を $T = 0$ としてそろえた。

特徴を見ていくと、時間順に、若年の波形は、主峰の直前に切れ込んだあと、鋭い主峰、浅い谷を形成し、すばやくゼロラインに戻る。一方、高齢の波形は、主峰前に明瞭な切れ込みはなく、緩慢で高い主峰、深い谷を形成し、ゆっくりとオーバーシュートしてからゼロラインに戻る。

ここで、図2の②部に見られたような主峰直後の小さなピークは若年、高齢とも平均処理で消滅した。このピークは、心臓の「弁」の開閉と位相的に近く、関連はわからないものの、平均化の功罪として留意しておきたい。また、図5の波形を時間周波数解析したのが図6である。

若年の特徴は主峰域（ $T \approx 0$ ）に10～20

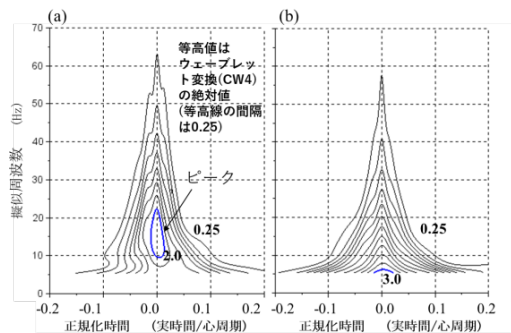


図6 K音の時間周波数解析（等高線表示）
(a) 若年者（21～37歳）(b) 高齢者（72～90歳）

Hz の高い周波数のピークを持つことである。これは図5で若年の波形が鋭いことや、主峰直前で切れ込むことに関連する。

一方、高齢では対応するピークは5 Hz 以下に下がる。これは心臓の弁の動きや、血管の弾力性、減衰能などの差に起因するものと推測している。

ここまで、K音波形の縦軸を振動速度で表示してきたが、図7では図5のデータを1回積分し、変位で表示した。これから、高齢になると変位が若年の2倍以上の振幅となり、ゆっくりとした(5Hz以下の低周波の)波になっていることがわかる。

また、速度表示での主峰前の“切れ込み”(図5の $T = -0.02$) は、動脈の断面変形の、もたつき、または、逆行の動きとして観測される。

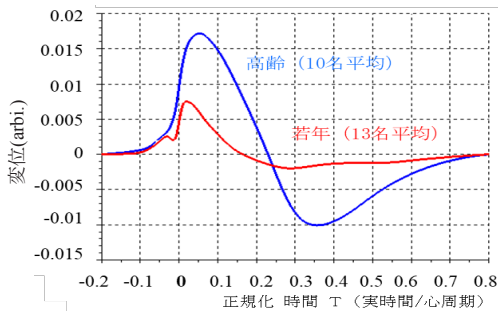


図7 K音の経年変化の変位表示

2. 虚血性心疾患とAI化

次に、心臓の代表的な疾患である虚血性心疾患(以下、“心疾患”)を例に、その経験者と、未経験者のK音を比較し、予兆とみられる波形の特徴を調べたので紹介する。また、その予兆を迅速にとらえるべくAIの援用も検討したので紹介する。

2.1 心疾患経験者の波形と定量化

心疾患では、回復後もK音には何らかの痕跡や兆候が現れるのではと推測した。

まず、過去10年の被験者の中に心疾患の経験者(以下、“経験者”)が7名いた。そこで、分析は、この7名と、平均年齢が近い未経験者の7名、そして未経験の若年11名の

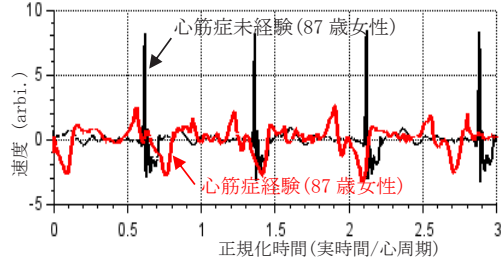


図8 心筋症経験者と未経験者の波形比較

データを比較することとした。

図8に心疾患経験者と同年齢の未経験者の波形を、横軸に心周期で正規化した時間によって示す。

経験者のデータは、心疾患の明確な自覚を訴えた時に計測されたものではないが、両波形には明らかな差がみえる。

次に、違いの定量化として次の3値を使った。まず、2章に可聴、非可聴成分のいずれにも大切な健康情報を含まれると記したが、非可聴成分の代表として、図9に示すように速度波形のピーク高(V)と、半値全幅(ピーク高の50%)値をとる時間幅(T)の2値をとった。また、可聴成分の代表として、スペクトルの50Hzにおけるレベル(dB)の1値をとった。

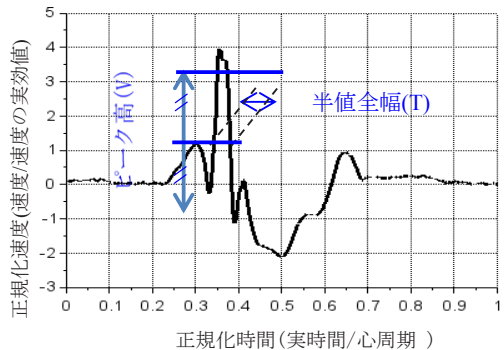


図9 K音波形の定量化読み取り
ピーク高(V)と半値全幅(T)

図10は読み取った半値全幅とピーク高をそれぞれ縦横軸にとった全被験者(25人、98人回)の分布である。

左上部に経験者の一群がみえるのが特徴といえる。さらに図11にはZ軸に代表50Hz

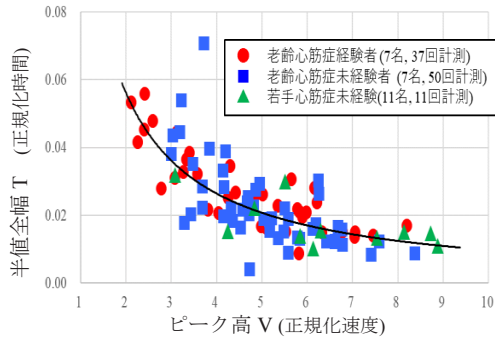


図10 ピーク高と半値全幅の分布

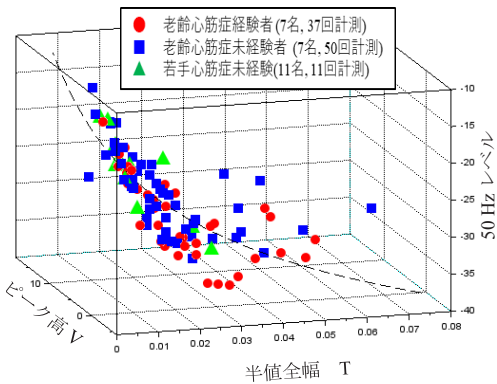


図11 ピーク高、半値全幅、および50Hzレベルの3D

のレベルをとった3Dを示す。ここでは50Hzレベルの低い領域にも経験者の一群があり、前述のピーク高が低く、半値全幅が広い一群と領域はかなり重なり合う。これら経験者データの一部は、低周波寄りの、小さい、いわば“か細い”K音と言える。

また、図10と図11から、経験者のデータでもその大半は、未経験者や若年のデータに混じって分布している。これは、経験者でも大抵の場合、兆候はでていないのではとみる。すなわち、経験者も服薬などで、症状は充分抑えられ、兆候として現れるのは稀なケースかと考える。

実際、上述の偏ったデータを計測した際に被験者はその症状を訴えていたわけではない(症状があったかどうか聞いていないので、実際はどうだったか)。

おそらく、ごく軽いながらもK音は予兆を発していたのではとみているが、データはす

べて後処理につき、この推測は後知恵である。将来、このような波形の出現機会を機敏にとらえ、その場で“自覚症状”などの問診や、踏み込んだ計測による検証をしたい。

2.2 AI化のための画像作成

K音の計測の場で疾患有無の判断を出せるようにしたい。その課題をデータのチラバリの面から少し振り返る。図12は一人の経験者の3年間のK音波形(不定期に計10回の計測)で、各3秒ずつの切り継ぎを表示した(横長となるため、見やすさのため、便宜的に上下に2分割した)。

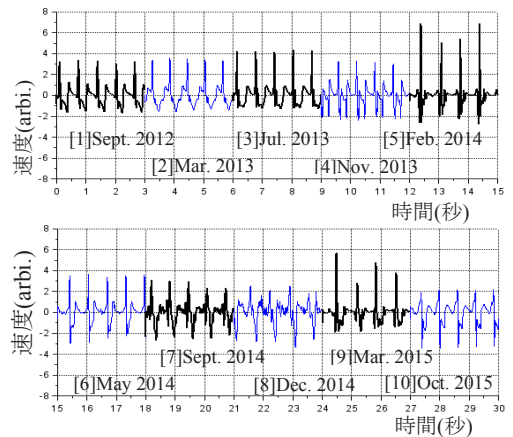
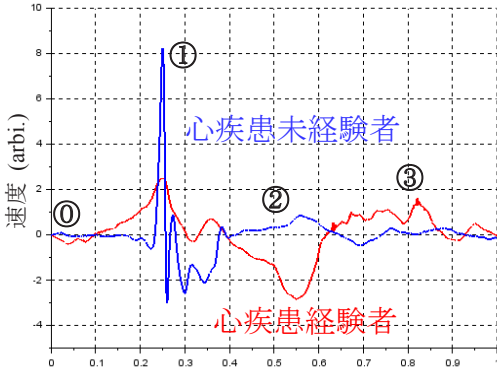


図12 心筋症経験者年間のK音(10回計測)

これから、同じ被験者でも測定毎の波形のチラバリは極めて大きいことがわかる。計測時の体調や食事前後、運動の有無、精神状態などを反映しているとみられる。とりわけ、8番目の波形は、前章で心疾患の“予兆”とみた“か細い”波形である。しかし、上述のようにすべて後処理である。今後、8番目のような波形の出現を測定と同時にとらえ、その場で問診や、踏み込んだ計測に持ち込みたいのである。

AI化に向け検討してきている事例を紹介する。図13には図8で示した経験者と同年齢の未経験者の1拍分の波形を表示した。差は一目瞭然である。数値化には、前節の“主峰のピーク高”、“半値全幅”及び“代表50Hz値”の3値を読み取ればよい。そして、



心拍の位相 (R 波のピークを 0.25 とした 1 周)
 図 13 直交座標表示

これら 3 値を使用した AI 化も充分見込める。しかし、例は割愛するが、主峰形状が 2 山に割れているとか、また、複雑な裾野をもつ場合、どちらを主峰とするか、またその幅の計測にあたって、手作業に頼ることがあり、AI 化にあたっての課題として残る。

そこで、精度は先の 3 値を使う場合と同等、しかし、簡便で計測者にはわかりやすい情報を提供しつつ、AI による判定を行う手法を検討したので紹介する。

これは極座標への変換を利用するもので、例を図 14 に示す。

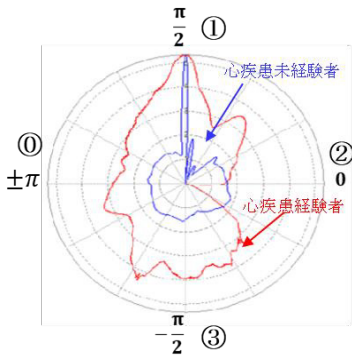


図 14 極座標表示 (最大値で正規化)

まず、図 13 の横軸を偏角 (①、②、③) として、①に戻るまで $\pi \rightarrow \pi/2 \rightarrow 0 \rightarrow -\pi/2 \rightarrow -\pi$ と時計回りに) に変える。次に、縦軸の最小値を 0、最大値を 1 と正規化し、中心からの距離に変換する。

この操作では情報量そのものは変わらない、

しかし、“波形” から、“画像” に変わること、何かの形を連想させたりすることがあるのではないだろうか。最大のメリットは、この変換により、AI の画像認識技術の利用が可能となることである。これにより、現在一部手作業を要している面倒な時間領域での処理を画像処理で置き換えることができる。

図 15 には、左列に図 14 の図の極座標表示を塗りつぶし、心疾患経験者、未経験者のそれらを上下に“画像”として貼り付けた。加えて、右列には 25Hz 以上の成分の極座標表示の塗りつぶしによる画像を載せた。双方の意味合いは、波形を定量化した 3 値と類似であるが、オーバーオールの画像はほぼ非可聴成分を代表し、25Hz 以上の画像は可聴成分を代表する。

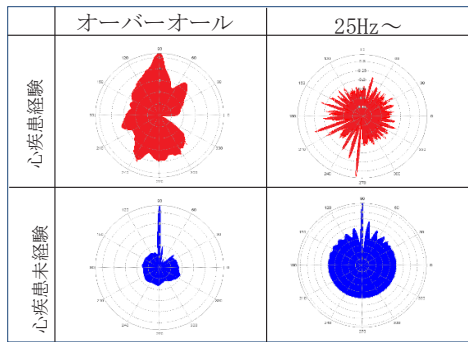


図 15 AI 活用への 2 組のイメージ

この図から、オーバーオール、及び 25Hz 以上とも、経験者と未経験者では明確な違いがわかる。AI での類似度判定はオーバーオール及び 25Hz 以上の 2 軸を使って実施することとする。

また、先に図 12 で、同じ被験者の波形でもチラバリは大きく、中でも 8 番目の波形は、心疾患の“予兆”とみていると記したが、画像でみるともう少しわかりやすくなる。図 16 は図 12 の 10 個の波形を“画像”にし、順に並べたものである。

いずれも個性的な画像であるが、例えば、7 番目には、既に 8 番目の“蝶”のようなイメージ現れていること、そして、9 番目ではそのイメージが消失していることが容易に認

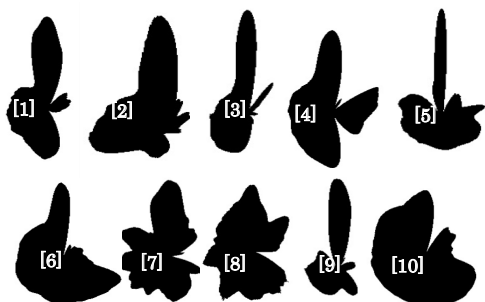


図16 図12の10波形の変換画像

識できるであろう。

そして、臨床の場合でも、測定と同時に画面上にこのような画像を表示にしたい。こうすることで、測定者には画像判定の機会を提供できるし、また同時に、画面上にはAIによる疾患画像(=教科書データ)との類似度判定の結果を示したい。

なお、ここまで、一人の心疾患経験者を中心にその画像を示した。しかし、このような“予兆”とみる“蝶”のような画像は他の心疾患経験者でも時々出現していることを付記しておきたい。

以上、AIの画像認識利用の準備ができつつある。ただし、現時点、上述のように、これまでのデータは心疾患経験者が、予兆を訴えるときに計測したのではなく、更に、経験者数も7名と限られた数であるという課題が残る。この先、サンプル数を増やしながら、AIの機械学習プロジェクトへと進展させていきたい。

V. まとめと今後の課題

過去10年にわたり蓄積してきたK音データから健康(疾患)情報の抽出を試みた。

まず600以上の波形データからK音を類型化し、疾患を示す可能性のある特徴を漏れなく洗い出し、健康(疾患)情報を抽出する切り口とすべくまとめた。

次に、疾患ではないが、経年変化を調べた。若年の鋭く高周波基調(15~20Hz)の波は

高齢になると、低周波(~5Hz)で振幅の大きな波になっていくことがわかった。

疾患抽出の例としては、心筋症の経験者、未経験者のK音の波形の比較から、心筋症の予兆は、ピーク高、半値全幅、代表50Hzの値、の3値から抽出できそうなのことがわかった。

最後に、将来、疾患の“予兆”の迅速な把握に向けAIの援用について紹介した。

ここでは上述の波形から得られる3値をAIに入力する手法は一旦取り置き、より簡便な手法として、直角座標から極座標に変換することで波形から画像を作り、AIの画像処理に利用できることを述べた。

以上、疾患抽出の例として心疾患でその予兆をとらえたものと考えているが、さらに検証による裏付けを進めたい。また、心疾患以外の疾患についても同様にその予兆を抽出していきたい。

謝辞

本研究は科学研究費基盤研究(C)(18K121444)の助成を受けたものである。また、K音の計測に10年以上協力いただいたアクアメイト稲城の御利用者様、スタッフの皆様に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) T. Sugimoto and F. Katayama. “Study on the health index value using the waveform of the Korotkoff sounds”, The 20th International Congress on Acoustics Proc. of the 20th ICA, p185, 3 pages (2010.08)
- 2) G. M. Drzewiecki, J. Melbin and A. Noordergraaf, “The Korotkoff Sound” Annals of Biomedical Engineering, Vol.17, pp.325-359 (1989)
- 3) Charles F. Babbs “The origin of Korotkoff sounds and the accuracy of auscultatory

- blood pressure measurements” Journal of the American Society of Hypertension, JASH, 9(12): 935-50. e3 (2015)
- 4) 後藤鹿島, 反町貢, 中島和江: Korotkoff 音の波型から分類した血管老化現象, 北関東医学 1966 年 16 卷 5 号 pp.358-369
 - 5) K. Koyama, T. Sugimoto and F. Katayama “Study on the Healthy index value by the Korotkov’s sound analysis”, Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2010, (ISBM), Abstract Book. IM4, pp.109-110, (2010.11)
 - 6) 脈波・コロトコフ音記録計 PS-501, North Parama Inc. http://www.north-parama.com/products/nouha_koroto/pdf/nico_for_pharm.pdf
 - 7) 発想法—創造性開発のために (中公新書 136) 川喜田二郎