近くの胎児、遠くの胎児

(何故胎児に「遠近」があるのか?)

竹内 康人(旭川医科大学 客員教授)

[本城先生]

竹内先生は東北大学で博士号を取得され、横河ヒューレットパッカードなどで医療器具の開発に携わられ、400 件ほどの特許を申請されておられます。その後、鹿児島大学の教授を経て、現在は旭川医科大学の客員教授を務めておられます。来年度からは竹内先生を香川大学の客員教授としてお迎えし、原先生が進めている遠隔医療の研究開発に加わっていただきたいと思っています。それでは、竹内先生お願いいたします。

[竹内先生]

平成26年11月20日 香川大学瀬戸内岡研究センター学術議論会

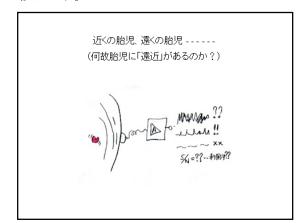
近くの胎児、遠くの胎児

(胎児信号学入門 part1,2,3抜粋総集編)

竹内康人 v.takeuchi@ieee.org

さて、この写真はどこの風景と思いますか。 実は鹿児島大学の風景です。大学のまん中に 田んぼがあるのです。鹿児島県は農業や漁業 などの一次産業の比率が高く、焼酎が全国的 に有名です。このように鹿児島大学は農学部 が一番偉いのですが、学長選挙を行うと教職 員の多い医学部が勝ってしまいます。

では、前置きはこれぐらいにして、本題に 移ります。



「近くの胎児、遠くの胎児」のタイトルで、胎児心拍モニターの開発についてお話しをさせていただきます。この胎児心拍モニターは先ほど原先生から紹介していただいたものです。その原先生と私は40年来のお付き合いです。

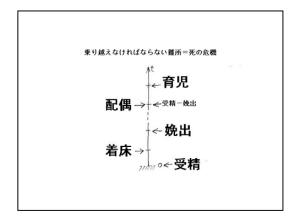
ところで、今日どのような方がお見えになるのか良く分からなかったものですから、 準備してきた内容が少し工学部寄りになっています。この点はご容赦いただきたいと思います。



お腹の中の胎児の心拍を測るうえで、測定場所から胎児の距離、すなわち「遠くにいるか」が問題ではなくて、胎児心拍信号の減衰量が問題なのです。心拍音を測定する場合、心拍音の減衰が大きければ、電子回路は心拍音をキャッチすることが難しくなります。また、周囲から発生するノイズが大きいと、これまたキャッチが難しくなります。ですから、電子回路で心拍を計測するた

めには、心拍音、すなわち信号の大きさをS (signal)、そしてノイズの大きさをN (noise) とし、その比率S/N (エスエヌ比)が重要なのです。信号が弱くなると電子回路は信号を増

幅して行きます。しかし、その信号がノイズの中に埋もれるようになると、ノイズも信号と一緒に増幅するため、信号が判別できないのです。このように、電子回路にとって一番遠い所は物理的な距離ではなく、周囲のノイズが影響して信号を正しく判別できなくなる所なのです。



ところで、心拍測定において本当にほしいものは、計測した値ではなくて、「胎児や母体が健康かどうか」なのです。胎児にとって死の危機に瀕する難所がいくつかあります。まず、受精しても着床しなければ、そこで終わりです。うまく着床し無事に分娩期を迎えても出産できなければ、それで終わりです。さらに、せっかく生まれても乳幼児期にきちんとした育児が行われなければ、厳しいことになります。生まれてすぐに親が死んでしまうと、野生動物は育児ができなくなって子供も死んでしまいます。







写真を見てください。馬の子供は足から出てきます。そして、すぐに立つのです。立った状態で授乳します。馬は生まれた途端から親について行動できなければ、待ち構えている肉食獣に食べられてしまうのです。

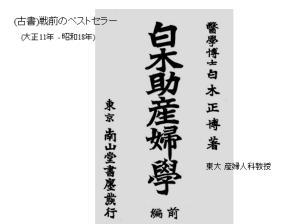
しかし、幸いにも人間はそうでありません。 でも、昔は農繁期のように親が子供に付き添って、十分な面倒を看ることができないこと がありました。このため、秋田県などでは写 真のように赤ちゃんをかごに詰めて農作業 に出かける「いづめこ」という風習がありま

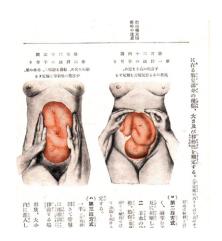
した。赤ちゃんが小便や大便をしてもそのままです。お尻がただれて泣いていても放っておかざるを得ません。赤ちゃんも大変ですが、農作業に出た親もさぞかし心配だったことでしょう。

ヒトの分娩は出産予定日を過ぎ、 出産可能な寸法の限界を超えると、 大変なことになります。胎児が大 きくなり過ぎて出せなくなってし まいます。そうなれば、お腹を切 って出すことになります。私の長 男がそうでした。









お産については東京大学の白木正博博士が執筆した「白木助産婦学」が戦前にベストセラーになりました。触診法というのがあって、お腹を触ることによって頭や足の位置を知

ることができます。逆子の場合は難産や生まれた子供に障害が残る恐れがあり、この逆子を外から回転させて直すこともできます。

また、聴診法という方法もあります。写真のように細長いラッパのようなものを耳に当てて、お腹の上から胎児の心音を聞きます。この聴診器具はトラウベといって、この器具で「トン、トン、トン」という心音を聞くことができます。この方法は簡単ですが、十分な診断ができるというわけではありません。しかし、これが胎児心拍モニターの始まりなのです。



余談になりますが、トラウベの原理と同じもので面白いものを紹介します。右の写真を見て下さい。戦時中に敵のプロペラ機を発見するのに用いたものです。大きなラッパのような形をしており、これで空中の音を集めて耳で聞きます。太平洋戦争当時、遠くのかすかな敵爆撃機 B29 の音を聞き取り、来襲に備えました。飛行機自身よりもエンジンやプロペラの出す音の方が先に届くという性質を利用して、敵機が来る前、すなわち見えるようになる前に音でキャッチして、避難や迎撃の準備をしました。操作者は両耳の位相差を判



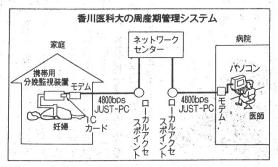


別出来るように音感を訓練されており、ハンドルを回してラッパの向きを調整することに よって両耳間の音の位相差がゼロになる方角、すなわち敵機の方位角を知ることもできま す

母さんが動くと、大きな電気信号、ノイズが発生します。ですから、お母さんは測定中、じっとしていなければなりません。でも陣痛の最中に「じっとしなさい」なんて言えませんよね。

そこで、超音波を用いた心拍計測、ドップラー方式を原先生と研究して完成させました。右図は今から 20 年以上前、NTT が電電公社のころの古い記事ですが、ドップラー方式で測定した胎児の心拍信号を通信回線で中央医療機関に伝送する試みを行った時のものです。信号の伝送はパソコン通信です。今ではインターネットを使うことになりますが、当時

妊婦検診、パソコン通信で



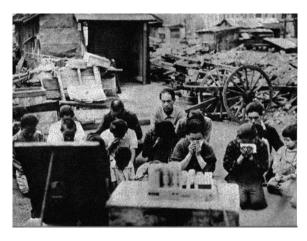
システムを外部に拡張するか 利用するのが特徴。当初は同に対対
その後にしかにとの
・ 送信に商業パンニン選信網を

はインターネットなんてありませんから電話回線を使いました。

そして、お母さんのおなかの上に取り付けているものが胎児心拍センサーです。このセンサーは心拍を電気信号に変える装置であることから、トランスジューサとも呼ばれており、現在、胎児心拍計測の主流になっているドップラー方式のものです。このドップラー方式については後で説明いたします。さらに胎児心拍だけでなく陣痛(子宮収縮)もドッ

プラー方式で測ることができます。この子 宮収縮計測用のトランスジューサも取り 付けて伝送しました。

右の写真は終戦の玉音放送を聞いている様子です。手前にあるラジオですが、並四ラジオというもので、たった4本の真空管でできています。ドップラー方式は心臓など測定したいものに向けて超音波を発射し、その反射波を受信して、その動きをドップラーの原理で測定するものです。その反射波の受信回路は当時の並四ラジオと基本的に同じものです。今では真空管が小さなトランジスタに置き換わり、電源も

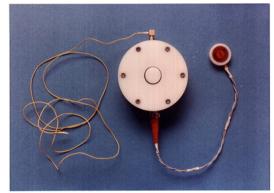


ちっぽけな電池で動かすことができます。もちろん超音波の発振も簡単なトランジスタ回路で行えます。ですから、先ほどの写真のようにトランスジューサを小さく作ることができ、ベルトでお母さんのおなかに固定して測定するようになりました。

このドップラーの原理ですが、学校の物理の時間に習ったと思います。近づく音は高い音に、遠ざかる音は低い音にシフトするというものです。すなわち、心臓の動きに応じて、発射した超音波の反射波の周波数が上がったり下がったりします。ですから、発射波と反射波の周波数の変化、すなわち差分を取り出すことで心臓の動きを捕えることができるのです。後で述べますが、さらに、この方式で取り出した信号をコンピュータ処理することで、はっきりとした心拍信号を得ることができるようになったのです。

下の写真がトランスジューサです。トランジスタや電池が見えますね。このように小さな装置ですが、超音波を発信して、その反射波を受信し周波数変化を検出することで心拍を電気信号に変えることができます。





話が前後しますが、誘導心電の話に戻ります。健康診断で心電図を撮ってもらったことがあると思いますが、今の心電図は胸と手と足に電極を挟むことで簡単に撮ることができます。しかし、昔の心電測定は右の写真のようにたいへんです。塩水が入ったバケツに足と手を漬けて、心臓が発す

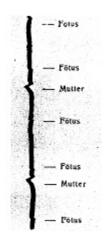
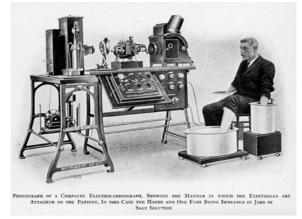


Fig. 3. Initial fetal electrocardiogram recorded by Cremer in 1903. The fetal R waves are indicated by description in the baseline. (Reproduced with permission from Larks, S. D.: Ass., J. OBSTET. GYNECOL. 77:1109, 1959, published by The C. V. Mosby Co.)

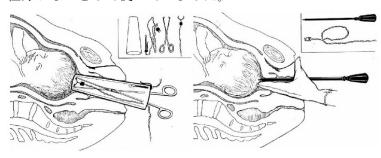


る微弱な電気を捕えて、このような大きな装置で測定しました。微弱な電気を測るガルバノメータという装置です。そのしくみは糸で吊った軽くて小さな鏡の向きを電気で変化させ、鏡に当てた光の反射光が遠くに映す輝点の動きで電気を測ります。ほんの少し鏡が向きを変えても、その輝点は大きく移動しますから、微弱な電気を測ることができるわけです。今では微弱な電気も電子回路で簡単に測ることができますが、昔はこのような工夫をして測りました。

右図は 1903 年にクレーマーが世界で初めて捕えた胎児の心電図です。専門家でなければ分からない

と思いますが、Fetus と書いているところが、胎児の心電波形です。これは胎児心拍を研究している人達にとってとても重要なものです。

先程お話ししたお母さんからのノイズを避けるために胎児の頭に電極を取り付ける方法です。下図右はその電極を胎児の頭にねじ込む方法です。下図左は胎児の頭に噛みつく方法です。血が出るので日本やドイツでは嫌っていましたが、アメリカでは少々血が出ても仕方がないとして使っていました。

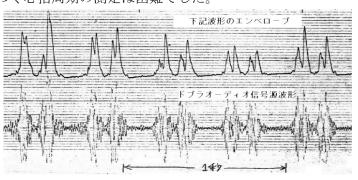


これらの事から、お母さんの おなかの上から簡単に測定で きるドップラー方式の良さが 分かると思います。

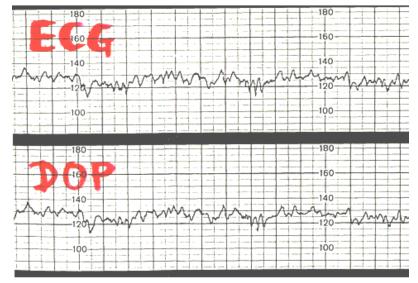
次にドップラー方式で撮った胎児心拍信号の計算信号処理をお話しします。心拍数は心拍周期の逆数、すなわち波形の山と山の間隔(時間差)

の逆数で求めることができます。そこで、ドップラーの信号をスピーカーで聞くと「ドコ、ドコ、ドコ、ドコ」と周期的な音が聞こえます。しかしこの波形を描いてみると下図のように各周期の波形が全部ちょっとづつ違うのです。もちろん周期の長さも違っています。このように各周期の波形がちょっとづつ違う事から心電信号の取扱いのように波形自身の特徴点に注目した時刻認識に基づく心拍周期の測定は困難でした。

このような各拍の波形の不 確定性を乗り越えて全体像同 志の比較で周期性を発見同定 するために、短時間自己相関を 利用します。すなわち隣の拍 は相関性が高いので相関関数 の上で周期性をあらわす極大 が安定して認識出来る一方長い 時間に渡っては認識値の変動



を許容する信号処理を行います。この処理によって心拍数変動にも良く追従しつつ各拍の



波形の含む不確定性を克服し、結果として波形の 服し、結果として波形の 漸変にも心拍数の変動に も良く耐えてきれいな心 拍数図を得ることができ るようになりました。

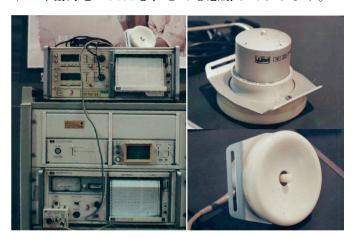
右図の上側が胎児の頭に電極を付けて採った胎児心電信号(ECG)に対る伝統方式の胎児心力の胎児心力に対した。 図、下側がドップラー間に出数別のがで得たがある事が分かります。 としており、かります。 になる事が分かります。 ドップラー自己相関方式の胎児心拍数計については各国で特許を取りましたが、今ではその特許も有効期限が切れています。そして、このドップラー自己相関方式が斯界の世界レベルのデファクトスタンダード(事実上の標準)になって普及しており、多くの胎児の命を救い、障害児の発生を防いでいます。



ここで面白い話をいたします。私は学会に出す原稿をワープロで作成していました。その時、慌てていたものですから、「そうかん」の漢字が「相姦」という女女女の文字に変換化けてしていました。これに気が付かなかったものですから、ひどく叱られ、とても恥をかきました

ドップラー方式の研究開発は当時、日本とドイツ、アメリカで競争のような状態になっていました。原先生は日本の第一人者です。ドイツは写真のお二人です。私はヒューレットパッカード社で開発を担当していた関係から、当時、東京大学にいらっし

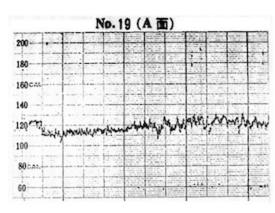
ゃった原先生とは旧知の仲です。産科医であり電子工学に詳しい原先生から多くのアドバイスや協力をいただき、とても感謝しております。

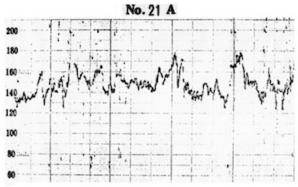


次頁左の写真が当時の心音および陣痛の組み合わせトランスジューサで、自重約 1.1kg あります。そして、次頁右の写真がシステム機器全体の外観です。

次にお見せするこれは私が開発したドップラー方式の胎児心拍計測用のトランスジューサと子宮収縮計測用のトランスジューサを 組み合わせたテレメーター発信機で、これによりローカルには無線式に採取した信号をさらに有線式(加

入電話回線)に再伝送するテレメトリーシステムで自宅病院間を伝送して見た所です。技術的には臨床実用レベルに近い完成度でしたが、1970年代末期、電々公社の技術思想とは誠になじみが悪く、また加入線電話網内の制度上の諸々の縛りは非常に厳しく、薬事法などより先にその面で頓挫しておりました。





左の心拍数図(No.19)は母親が就寝中ですが胎児心拍数はベースラインが 110BPM まで下がっています。しかしながらその状況で美麗な心拍細変動が見られ、この事から胎児はのうのうとしつつも明らかに目覚めています。右の心拍数図(No.21)は激しく上がったり下がったりしています。胎児が寝ているのではなく起きていて、外界からの刺激がある状況です。母親はいそいそと台所仕事をしており、胎児にとってはさぞかし居心地が悪かったことでしょう。この胎児の信号は下記に再度出て来ます。

下図左の心拍数図と写真(1979年9月)は私が開発したドップラー方式の胎児心拍計測用のトランスジューサと子宮収縮計測用のトランスジューサを組み合わせたテレメーター発信機、ならびに私の長男です。過熟児だったものですから、この胎児心拍モニターのお世話になりました。

右の心拍数図と写真(2010年10月)は私の孫のものです。長男誕生から30年も経っているのに観測システムとしては本質的に進歩している様子が見られませんね。それだけ既に完成度の高い仕組みだったのではないかと思います。(註:左の心拍数図は当時の記録その物ではなく、当時の録音を最近再生して右と同じ装置で描き直した物です。)



とはいっても、今はスマホの時代です。そしてクラウドの時代です。時代に対応した胎児心拍モニターに作り直そうと思います。そこで、まずしなくてはならないのが、ネットワーク対応です。お母さんのお腹の上で、トランスジューサがキャッチした信号をスマホに送り、スマホを用いてインターネットに繋ごうと考えました。

そのトランスジューサとスマホ間の信号伝送はブルートゥースが利用できるはずです。 ブルートゥースは無線の一種で、ほとんどのスマホにブルートゥースの機能が付いていま す。このブルートゥースを用いればいろいろな信号を無線でスマホと授受できます。





そのスマホが携帯電話回線を経由してインターネットに繋がっているので、インターネットの先にあるコンピュータを活用して、高度・複雑な信号処理や処理結果のデータ保管などができます。さらに、その保管データを他の医師や助産師がパソコンやスマホで見て

治療、出産などに協力をするなど様々な利用方法が考えられます。このためには、まずトランスジューサにブルートゥースの機能を付加する必要があります。その試作機が写真のもので、69gで作ることができました。



ただしのただし!

まだまだ色んな厄介な問題が潜んでいる どんでん返し的な変革も可能性として控えている (追ってまた説明します) しかし、ブルートゥースにはいろいろな問題が潜んでいます。まず、電池の問題です。トランスジューサが超音波を発射するためには、いくら微弱な超音波といっても、そのパワーを補うためには電池が大きくなってしまいます。

また、トランスジューサの電子回路は電力を喰わないよう、非常に低い電圧で動作するようにしており、ノイズに弱い構造になっています。その電子回路の中にノイズを発生するブルートゥース回路を組み込むものですから電子回路の動作を妨害します。特に、反射

してきた超音波がひじょうに微弱なため、受信回路にブルートゥースからのノイズが混入すると、S/Nを下げてしまい受信を難しくします。このブルートゥースのノイズ混入を防ぐためには、徹底的に遮蔽(シールド)を施すなどの対策が必要となます。

最近では IOT(Internet of Things)という言葉が良く聞かれるようになりました。冷蔵庫から電気釜、洗濯機、テレビ、エアコンに至るまで何から何までインターネットに接続して、監視・制御しようというものです。家庭で言えばスマートホーム、家庭の電気器具を監視・制御することで電気代を下げるとともに、より快適な照明や室温の制御などを行います。旅行先から室内の様子を見たり、自宅に近づく前にルームクーラが起動したり、お風呂を沸かし始めることなどもできそうです。自動車ではスマートカー。病院では様々な診断機器や治療機器をインターネットに接続したスマートホスピタルなども考えらます。





これらの頭脳に当たるのが、インターネットの先にあるコンピュータです。そのコンピュータはインターネットによってどこにあってもかまいません。手元に置き自分で保守・管理する必要がありません。ですから、次第に遠くの専門家にゆだねるコンピュータが使われるようになってきました。すなわち、コンピュータが遠くの雲の中に逃げて行こうとしています。クラウドコンピューティングです。

[本城先生]

ありがとうございます。とても興味深い話をしていただきました。それでは、皆様から ご質問をお受けしたいと思います。

[竹内先生]

スマホなどのソフト開発に多少でも取り組んでいた方はおられますか。

[本城先生]

この講演会には来ていないようですね。

「竹内先生〕

最後に私からお願いがあります。私の友人の原先生をぜひ世界に押し出していただきたいと思います。原先生は医療機器の開発に加え、遠隔医療など新しい医療に向け献身的に活動されております。安倍総理が日本の医療機器の海外展開をめざしている折でもあり、このチャンスを生かせば、原先生を軸に世界の人々の健康に貢献することで、尊敬される日本になれるはずです。しかし、うかうかしていると、アメリカやドイツの後塵を拝す恐れがあります。何卒、よろしくお願いいたします。

「本城先生]

時間があまり残っておりません。竹内先生、ありがとうございます。

今日、我々はご講演いただいた先生方の情報や知識を受け取って、さらにワンステップ 上の研究成果を出すように、そしてそれを地域貢献に結び付けることができるように頑張 って行きたいと思います。ぜひとも瀬戸内圏研究センターの支援をよろしくお願いいたし ます。本日はどうもありがとうございました。