

伐採跡地走行中のトラクタの振動とオペレータ心拍数に関するスペクトル解析

藤 井 禎 雄・古 谷 士 郎

Spectrum Analysis of Tractor Vibrations and Heart rate of its Operator in the Moving Across the Cut Over Area of Forest

Yoshio FUJII and Shiroo FURUTANI

要 旨

伐採跡地を空荷で走行中のトラクタの振動とそのオペレータの心拍数を FM テレメータ方式で同時、連続測定した。得られた各データをランダム変動をする時系列データとしてとらえ、スペクトル解析法にて解析した。

前報の集材作業中の場合（文献 1）参照）とは異なり、一連の手順に従った明瞭な作業サイクルを持たず、トラクタの動きが林地表面の状況などに左右され易い本事例ではトラクタ振動および心拍数の変動は共に、全体としてみればランダム性が強く支配した。しかしその中に存っても、二三の周波数域では両者に周期性が認められ、そこではやはり心拍数はトラクタ振動の変動にはほぼ対応して変動していると推察された。

I は じ め に

先に集材作業中のトラクタの振動とオペレータ心拍数との相関関係について詳しく論じたが¹⁾、そこでのトラクタによる全幹集材作業は、その作業が 2, 3 種類の要素作業からなる比較的明瞭な作業サイクルを持ったものであって、トラクタ振動とオペレータ心拍数の相関関係にこの作業サイクルが大きい影響を与えていた。つまり両者の相関の周期はほぼこの作業サイクルに一致していたわけである。しからば、トラクタによる作業が明瞭な作業サイクルを持たず、もっとランダム性の強い場合、トラクタ振動とオペレータ心拍数の相関関係はどのようなものであるか？それを論じようとするのが本報である。したがって本報では、トラクタが伐採跡地を山土場から集材地点まで空荷で走行する場合をとりあげた。先の論文¹⁾では事例 1, 事例 2 の 2 つの場合についてスペクトル解析の手法を用いて解析したが、本例をそれにつづき同じ手法を用いて解析した事例 3 と考えていただきたい。つまり、前事例と異なる作業状況の場合について、今回さらに論ずることにより、スペクトル解析によるトラクタ振動とオペレータ心拍数の相関関係についての考察を、より一般性のあるものにしたいと考える次第である。

それから、これは前報においても言及したところであるが、ここでは振動と心拍数との応答関係を考察している。しかし、もとより心拍数変動に影響を与える因子は振動のみではなく、騒音、身体の動き、精神的緊張等数多くのものが存在するであろう。したがって本来これ等因子のすべてを取り上げて心拍数との応答を考察しなくては真に心拍数変動の特性を明らかにしたこと

にはならないわけであるが、これ等因子を一度に解析することは実験計器、規模等の問題で実際にはなかなか困難なことである。そこで影響因子中で主要だと思われる振動をまず取り上げ、振動との応答にてどの程度心拍数変動の特性を明らかにしうるかという観点に立って考察を進めた次第である。

II 測定条件と測定方法および解析の方法

トラクタが走行した現場は富士山麓に位する静岡営林署富士宮製品事業所のヒノキ人工林伐採跡地で、そこは比較的ゆるやかな傾斜地であった。トラクタはクローラ型 5t クラスのもので常にサルキーをけん引しており、またそのオペレータはこの作業専従の中年のベテランであった。

土場を出発したトラクタがこのような伐採跡地を、場合によっては排土板で障害物を排除しつつ集材地点まで空荷で走行する際の、トラクタ車体と運転座席直下の振動（振動加速度 G ）およびオペレータ心拍数（心電図）を FM テレメータ方式による遠隔操作で同時、連続測定した。振動の測定は加速度変換器を、心拍数測定には心電計を用い、また、作業の様子を全てビデオカメラに収録したが、詳細は文献 1) を見られたい。

つぎに、このようにして得たトラクタ車体および座席の振動とオペレータ心拍数をランダムに変動する時系列データとしてとらえ、かかるランダムデータの解析に有効なスペクトル解析の手法を用い解析、検討した。つまり得られたアナログデータを 2 秒間隔ごとにサンプリングしデジタル化した後、静岡大学理学区の電算機 HITAC 8250 に掛け自己および相互相関関数、それ等のパワーおよびクロススペクトラムそしてそれぞれの間の周波数応答関数を計算した。なお、計算プログラムは赤池等²⁾の手になる TIMSAC パッケージを、我々に使用し易いように入出力関係を中心に手を加え使用したが、それ等の点およびスペクトル解析の詳細については同じく文献 1) の中で既に述べたので、それを参照していただきたい。

III 結果と考察

本事例は前報¹⁾の事例 2 と同じオペレータ、同時期、同じ作業現場におけるものである。すなわち、B オペレータによる、夏 8 月、上井手事業所における場合である。また、トラクタの振動は左右方向を測定している。

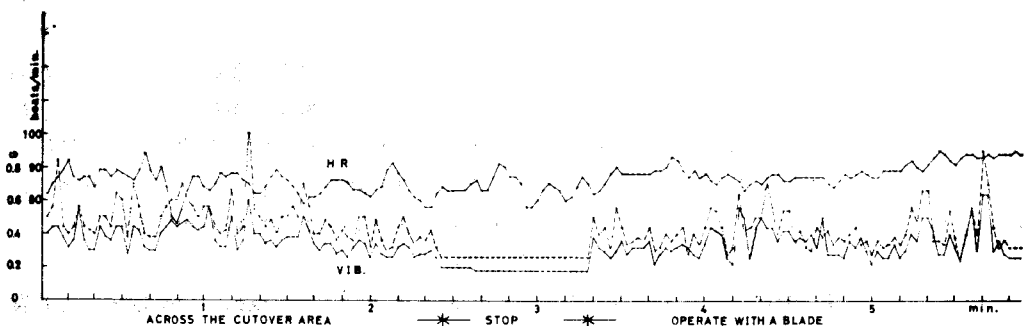


Fig. 1 Time series changes of tractor vibrations (VIB.), and heart rate of its operator (HR) in the moving across the cut over area of forest. Broken line is vib. of a seat and solid line is vib. of a frame.

Fig. 1 にトラクタ振動 (VIB. G 表示) およびオペレータ心拍数 (HR, 回/分) の時間的変動の様子を示す。振動は実線がトラクタ車体の、破線がトラクタ座席直下のものを示している。横軸は分単位の時間軸であり、振動、心拍数共 2 秒ごとにサンプリングした値がプロットしてある。同図を時間軸に沿ってたどると、トラクタは最初の約 2 分 30 秒間枝条材などが散在している伐採跡不整地上を空荷で集材地点に向けて走行している。林地凸凹、障害物乗り越えなどに応じて、振動、心拍数が変動している。振動のとび抜けて鋭く高い山はトラクタが大きくゆれる場合に対応している。その後トラクタは約 50 秒間走行を止め、伐木作業に歩調を合わせるために仕事待ちをする。この間振動はアイドリング状態での低い一定の値を示しているが、オペレータの心拍数はトラクタが停止しているにもかかわらず変動を止めていない。これはオペレータが仕事待ちの間も座席に座ったままで、上半身を動かしたり、うしろを振り向いたりまた手を動かしたりしているためであるが、このように心拍数はトラクタ操縦という神経的作業的のみならず、かかる身体的動きによっても当然のことながら、変動するものであり、心拍数の変動に影響を与える因子の種類と数の多いことの一端を示すものであると言えよう。続いてトラクタは走行を再開し、排土板を上げ下げして、また前進後進を繰り返しつつ伐採跡地に散在している伐倒木や枝条材を押し分け、トラクタの運行路を開きつつ前進する作業に移る。これが約 2 分 40 秒間続くという作業内容になっている。

このようにランダムに変動する振動および心拍数の自己相関関数を計算しプロットしたのが Fig. 2 である。Fig. 2 は横軸にラグタイム (遅れ時間) τ を、縦軸に規準化した自己相関関数 $R_{xx}(\tau)$ が目盛っているが、これから分かることはそれぞれの曲線 (オートコログラム) が τ の増加と共に右下りとなる中に、いくつかの山と谷とが存在し、ランダム変動 (非周期) 成分が支配的な中にも、ある周期的成分が含まれているということである。不整地走行の場合は、前報の集材作業中の場合に見られたような作業サイクルに対応する顕著な周期性は認められず、全体的にはランダム成分がかなり支配的であることが分かる。

このランダム変動の中に含まれる周期成分をより詳しく調べるために自己相関関数をフーリエ変換した、つまり時間領域での表示を周波数領域での表示に置き換えたのが Fig. 3 のパワースペクトル密度関数 $P_{xx}(f)$ である。これは各周波数成分がどのような強度 (パワー) で分布しているかを示すものであり、横軸に周波数を、縦軸にパワースペクトル密度 $P_{xx}(f)$ が目盛っている。Fig. 3 でまず目につくのは両振動、心拍数共周波数が 0 Hz 付近に、つまり非周期成分域

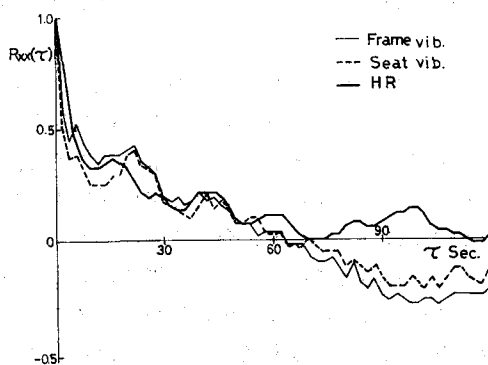


Fig. 2 Auto-correlograms of tractor vibrations and operator heart rate (HR)

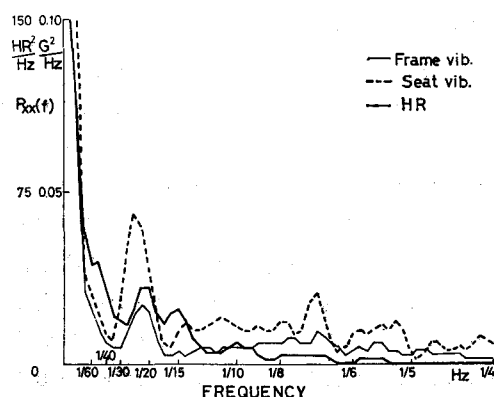


Fig. 3 Power spectrum density functions of tractor vibrations and operator heart rate

におけるパワーが著しいことである。これは先の自己相関関数でみたように、全体的にみてランダム変動する成分が大なることに因するのであるが、同時にまた、振動、心拍数共に $1/20 \sim 1/24$ Hz 付近に鋭いパワーが存在しているのが分かるし、さらに振動では $1/7$ Hz 付近に、心拍数では $1/15$ Hz 付近にもパワーのあることが分かる。この結果を説明するために、ここで改めて同時に収録したビデオテープに基く分析の結果を対照させながら Fig. 1 によってトラクタの動きを追ってみると、前半の伐採跡地走行中、地面の凸凹や障害物乗り越し時にトラクタが大きくゆれ、振動が衝撃的に大きくなっている場合が何ヶ所も見受けられるが、この衝撃的振動と振動の間の周期が（これは全く偶発的で必然性のあるものではないが、事実として）ほぼ22秒前後であり、先に鋭いパワーのあった周波数 $1/22 \sim 1/24$ Hz にほぼ対応しているようであるし、心拍数もこの周波数とほぼ同じ周波数で変動する成分を持っている。そして Fig. 1 の後半の前後進をくり返し、排土板で伐倒木等を押しのけつつ運行路を開く際、一組の前後進を作業単位と考えるとこの周期はほぼ16秒前後であることが、やはりビデオテープの解析から分かるが、Fig. 1 の振動の変動にもそのような周期が認められるし、心拍数もほぼそれに対応した成分を持っており、先の $1/15$ Hz のパワーはこれに当たると考えられる。最後に、トラクタの振動にみられた $1/7$ Hz のパワーは、走行中キャタピラを通してトラクタが常時地面から受ける直接的振動に起因するものと思われるが、かかる高周波数に対応するパワーは心拍数には見られず、高周波数域では心拍数は振動にตอบสนองしていないことが分かる。

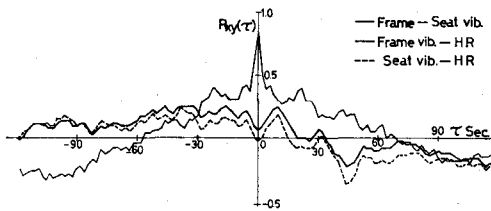


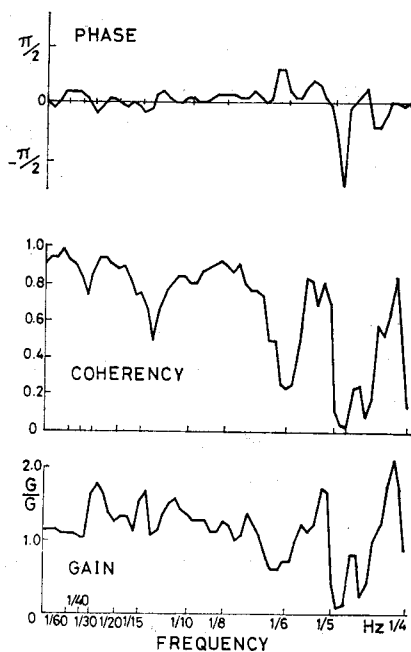
Fig. 4 Cross-correlograms of tractor vibrations and operator heart rate

間の曲線は $\tau=0$ で最大値を持ち応答のずれはなく、全体としてランダム性が支配的である中に、 τ が小さい所ではやはり先にパワーのあった周波数に対応する周期での相関の存在を示している。Fig. 4 はトラクタに生ずる衝撃的振動や前後進時の振動の上昇に応じて、応答はずれながら心拍数も上昇することを示唆している。

これ等相関関係をより詳しく見るために周波数応答関数を計算したが、それ等を Fig. 5 に示す。本関数は、ある入力とそれに対する出力の間にどの程度線形的対応があるかを位相関係を保ちつつ周波数ごとに示すものである。つまりゲイン（利得）は入力と出力との振巾の比を示し、コヒーレンシは線形関係の程度を示すもので、0 と 1 との間を変動し、完全な線形的応答の場合に 1 の値をとる。フェーズ（位相）は入力と出力との応答のずれの度合を示すものである。

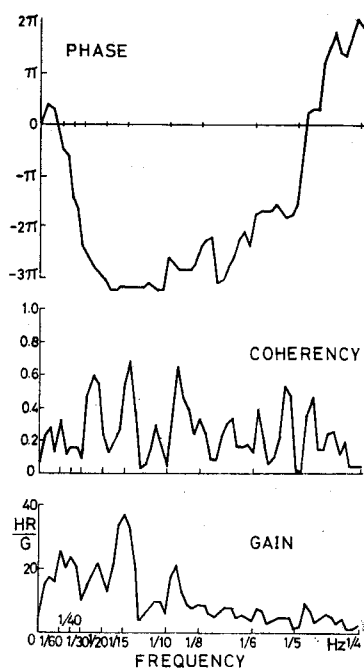
さて、Fig. 5 a) は車体振動を入力、座席振動を出力とした場合であるが、一部周波数域を除いてゲインが 1 を越えまたコヒーレンシも高く、全体的にみてかなり良い線形的関係にあることが分かる。そして、フェーズもほとんどの周波数域で 0 に近く、両振動間の応答には位相のずれが少ないことも分かる。Fig. 5 b) は車体振動を入力、心拍数を出力、Fig. 5 c) は座席振動を入力、心拍数を出力として振動—心拍数間の応答を計算したものであるが、全体的にコヒーレンシは低く、また位相のずれも大きく余り良い線形関係にはない。どちらかと言えば、低周波数域

つぎに、両振動間また振動と心拍数間の相互相関関数を計算し図示したのが Fig. 4 である。横軸にラグタイム τ 、縦軸に規準化した相互相関関数 $R_{xy}(\tau)$ がとってあるが、心拍数—振動間の 2 本の曲線（クロスコレログラム）は τ が小さい所では上述した周波数 ($1/22 \sim 1/24$ Hz, $1/15$ Hz) での相関を持つことを示すと同時に両者の応答には明らかにずれがあることを示している。振動—振動



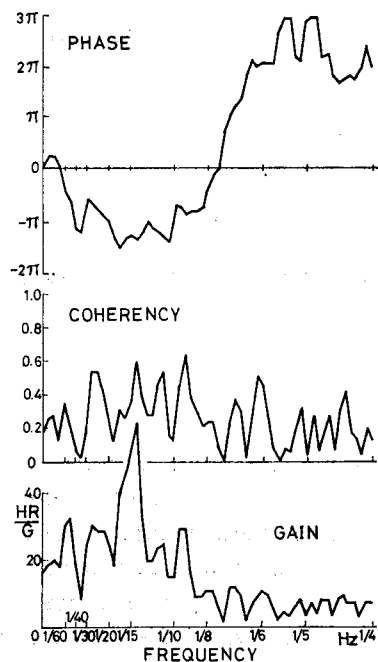
a) : Frame vib. → Seat vib.

Fig. 5 Frequency response functions of tractor vibrations and operator heart rate



c) : Seat vib. → HR

Fig. 5 Frequency response functions of tractor vibrations and operator heart rate.



b) : Frame vib. → HR

Fig. 5 Frequency response functions of tractor vibrations and operator heart rate.

での方がゲインが高く、中でも 1/15 Hz 付近ではゲイン、コヒーレンシ共に大きくなっている。これはトラクタの前・後進サイクルに対応する成分であり、ここでは線形的応答関係がいく分認められるようであるが、これ等一部の周波数域を除いて機械的振動と生理的反応である心拍数間の応答は単純な線形的関係では示し得ないようである。また位相は低周波数域では心拍数の方が進み勝ち、高周波数域では遅れ勝ちになる傾向を示している。

IV ま と め

同じ内容の作業を続けて繰返すことが比較的少なく、作業が林地表面の状況などによって左右され易いトラクタ伐採跡地走行の場合、トラクタの振動、オペレータ心拍数の変動は共に全体としてはランダム性が強く支配したが、その中にもあっても 2, 3 の周波数域では両者に周期性が認められ、そこではやは

り心拍数はトラクタ振動の変動にはほぼ対応して変動していると推察された。この応答をより詳しくみると、機械的振動間では位相のずれもほとんどなくほぼ全周波数域で良い応答を示した。一方、機械的振動とオペレータの生理的反応間では余り良い応答を示さなかったが、どちらかといえば低周波数域における応答の方が良く、トラクタ振動では認められる1/8~1/4 Hzの高周波数域での応答は悪く、心拍数はもっとゆっくりとした周期で振動に対し応答するようである。

V お わ り に

Fig. 1に見られたように本事例は約50秒間の仕事待ちをはさんで、その前後に2つの異なった作業内容を含んでいる場合であった。したがって、本事例についての相関関数、スペクトル密度関数等の計算結果はこれ等異なった作業内容の個々の特徴をミックスして反映したものと考えられるので、それ等の考察に当たっても個々の作業内容の特性を画然と分離し難く、全体として推論に不明瞭さが残らざるを得なかった。本来、本事例のような場合、得られたデータを作業内容ごとに分離し、その各々について計算し考察を加えた方がそれぞれの作業内容の特徴をより明示し易い。しかし今回の現場実験においては、作業規模、地形、方法等の制約から、空荷走行の場合本事例に見られるように必ずいくつかの異なった作業内容を含み、長時間にわたり同一作業に終始する事例は得られなかった。かといって、このような時系列データを作業内容にしたがっていくつかに分けてしまうと、こんどは電算機に掛ける場合、サンプリングデータ数の不足を来し計算結果に含まれる誤差が多くなり、その結果の信頼度が薄れてしまうことになる。

そのようなわけで、敢えてこのようにミックスした形で解析したわけである。より明瞭に個々の作業内容の特性を明らかにするには別の機会を待たねばならない。したがって本報告は、手はじめとしてかかる制約下で行なった一つのスペクトル解析例と見なしていただければ幸いである。

引 用 文 献

- 1) 藤井禧雄・古谷士郎：集材作業中のトラクタ振動とオペレータ心拍数に関するスペクトル解析，日林誌，61 (4)，111~118，(1979)
- 2) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，30-50，123-187，サイエンス社（東京），(1972)

Résumé

In the moving across the cut over area of a forest, the vibrational accelerations of a tractor frame and seat and the heart rate of its operator were measured continuously with an FM telemetry system. And the dynamic response characteristics of them were searched with the spectrum analysis, in which the data obtained were interpreted as the random and digital ones (N.B. as for the spectrum analysis for the case of the tractor skidding operation, see literature 1)). As the results of analyzing the auto-and cross-correlation functions and the power spectra, the followings became clear: In this case, the travellings of a tractor had not such a certain operating cycle according to the series procedure as the case of the tractor skidding operation and were apt to considerably depend on the conditions of the surface of forest, so that both the vibrations and the

heart rate changed randomly as a whole. However, in spite of the domination of such randomness, were also recognized in the changes of them some periodicity which nearly corresponded to the periods of a set of forward and backward travellings of a tractor etc., so the correlations of the heart rate with vibrations were perceived. And further, through the analyzing the frequency response functions, it was proved that there was a clear linear response between vibration of a tractor frame and its seat, but there was little linear response between vibrations and heart rate.