

作業負担指標としての心拍数の 自己相関関数とパワースペクトル

藤 井 禧 雄・河 林 隆 志*

Auto-correlation and Power spectrum of Heart rate
as an Index of Work load

Yoshio FUJII and Takashi KAWABAYASHI

要 旨

臥位、坐位および自転車エルゴメータによる3つの異なった負荷下における被験者の心拍数を連続的に測定し、それ等をランダム変動をする時系列データとみなして自己相関関数およびパワースペクトルを計算し、各場合の心拍数の時間的変動特性を検討した。その結果：臥位では深呼吸のリズムにはほぼ対応する周期で心拍数は変動したが、坐位では周期性が不明瞭になりいくつかの周期成分が混在した変動を示した。一方、負荷下の心拍数は、軽い負荷ではエルゴメータのペダル回転速度に関連したリズムで心拍数が変動する場合が認められたが、負荷が大きくなるとこの対応関係は失われランダム性が増加した。これ等心拍数変動の傾向は、被験者の測定時における心的状態により異なる場合も認められた。

I は じ め に

各種作業に従事していたり、あるいは作業のあい間に休憩していたりする作業者の心拍数を一定時間連続して測定し、それ等を時間軸に沿ってプロットしてみると、一見ランダムな変動に見える中にも、それぞれの作業および休憩の状況に応じた何かあるリズムに従って変動しているのではないかと推察される場合がしばしばある。

ところで、作業に従事している作業者の心拍数変動におけるこれ等のリズムについては、トラクタ集材作業中の場合を例にして既に他で詳しく論じたので^{1),2)}、ここでは心拍数を作業負担の指標として用いる場合、その基準値となることの多い安静時および単純軽作業時の心拍数に焦点を当て、ランダム変動中に埋れているリズムを検出するのに有効な自己相関関数とパワースペクトルを計算し、これ等心拍数の時間的変動リズムを解析した。

この手法に基づいた考察は、安静時および軽作業時の心拍数に関する先の研究^{3),4)}とはまた異なった角度から心拍数変動の特徴を記述し得るものであると考える。

II 実験の方法および解析の方法

臥位（ドリームベッド上にて）、坐位（肘無し椅子にて）および自転車エルゴメータこぎの各

*静岡大学・農学部（当時）

Fac. of Agr., Shizuoka Univ. (then)

場合について、2人の被験者K、T（共に20才台前半の男子）の心電図を FM テレメータ方式の心電計にて約5分間にわたって連続測定した。いずれの場合も頻脈傾向にあり心拍数レベルの高い昼食直後と心拍数レベルの低い正午近くで昼食前ないしは夕方の2つの時間帯ごとに測定を行なった。これ等の実験は、秋日の2日間（平均温度24℃、湿度64～73%）に、静寂を保った大学の実験室にて実施した。

使用した自転車エルゴメータはノルウェー製ボデイガード エルゴベット 950 で、ペタルの回転をフライホイールに伝え、またフライホイールをベルトで締めつけ制動する力を加減することによりペタル回転速度をコントロールするようになっているものである。そこで、このベルト締めつけ力を加減し、自転車エルゴメータこぎにおける3つの負荷水準を設定した。

負荷1はペタル回転速度約 16 km/h、そのテンポ平均51回/分、負荷2はそれぞれ約 19 km/h、平均59回/分、負荷3は同じく約 30 km/h、平均93回/分であった。負荷1、負荷2は5分間連続してこいでもさして苦にならない程度の負荷であり、また負荷3は5分間継続すると少々苦しくなってくるが決してオーバーオールには到らない程度の負荷であった。時速が約 40 km/h になるとペタル回転のテンポと心拍数との間にはほとんど相関がみられなくなってしまう場合が多いので⁴⁾ その点を考慮し上記3つの負荷を選んだ。

つぎに、得られた心電図記録全体をまず2秒ごとに区切り、各区切り目を中心とした3(R-R)間隔の長さを読み、それ等から2秒ごとの毎分心拍数を算出した。個々の心電図記録長は約5分間であるから一記録当たり約150個のサンプリングデータを得たことになる。これ等をランダムに変動する時系列データとみなし自己相関関数とパワースペクトルを求めた。使用した電算機は静岡大学理学部の HITAC 8250 であった。

III 結果と考察

各被験者ごとに10個、総計20個のデータについてそれぞれ相関関数とスペクトルを計算したが、この中から臥位、坐位、負荷における心拍数変動の特徴を良く示していると思われる場合をとり上げて、以下考察する。

1. 臥位における心拍数の変動

臥位における被験者Tの自己相関関数 $R_{xx}(\tau)$ を τ に対してプロットしたもの（これをオートコログラムと呼び、以下コログラムと称す）およびパワースペクトル密度関数 $P_{xx}(f)$ （以下スペクトルと称す）は Fig. 1 に示したとおりであるが、これによると心拍数は明瞭な周期を持って変動していることが分かる。そして同スペクトルをみると 1/6.9 Hz のパワーが卓越しており、コログラムに認められた周期は 6.9 秒であることが分かる。これは被験者Tの深呼吸の周期にほぼ対応しており、深呼吸と共に心拍数が小刻みに変動するようである。一方、被験者Kのコログラムとスペクトルは Fig. 2 のとおりであるが、同じくコログラムは周期性を有し、そのスペクトルをみるとKの深呼吸にほぼ対応する 1/6.3 Hz にパワーが認められ、やはり深呼吸の周期と共に心拍数が変動していることが分かる。ただ、Tと較べ深呼吸周期に対応する周波数でのパワーは比較的小さいし、また 1/∞ Hz すなわち非周期成分（直流成分）や 1/60 Hz という長周期におけるパワーが大きく、Kの臥位における心拍数変動は深呼吸に起因するものばかりではなく、非周期的な成分もかなり混在したものであることを示している。

TとKとでは少々その様相を異にはしたが、しかし両者の心拍数共深呼吸に起因する周期的変動が支配的であると言えよう。なお、この現象は呼吸性動揺（不整脈）と呼ばれより詳細な生理

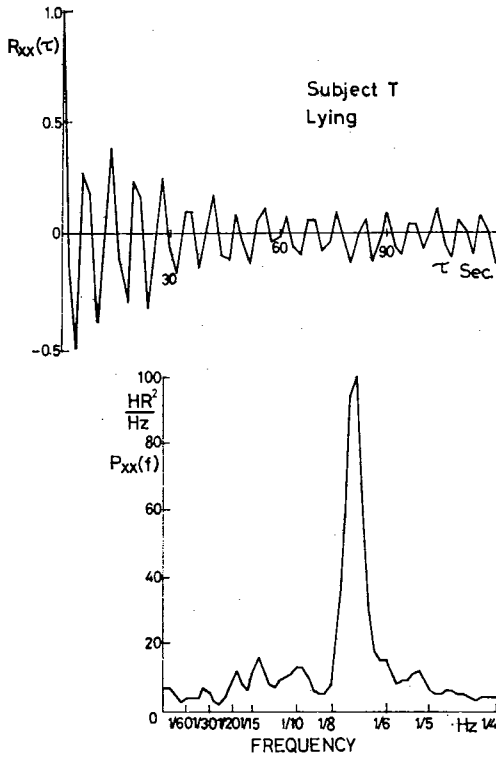


Fig. 1 Auto-correlogram and power spectrum of heart rate subject T, Lying

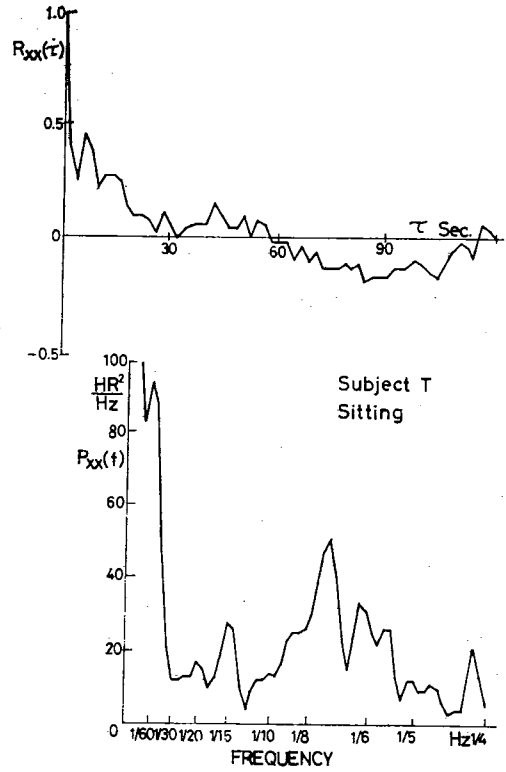


Fig. 3 do. Subject T, sitting

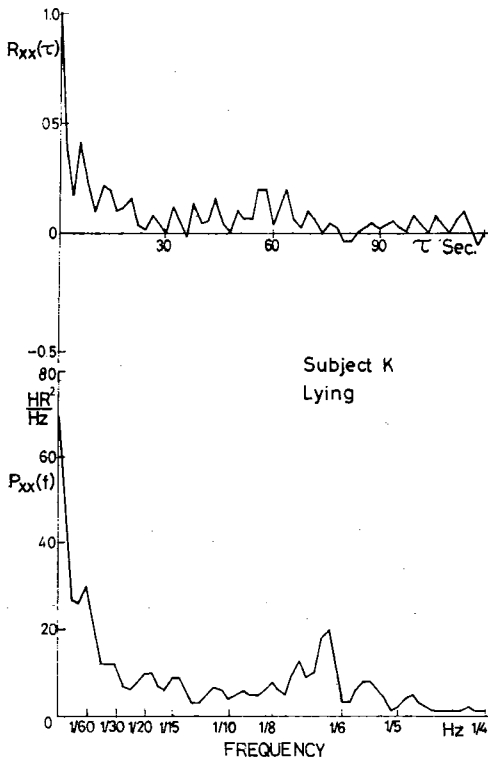


Fig. 2 do. Subject K, Lying

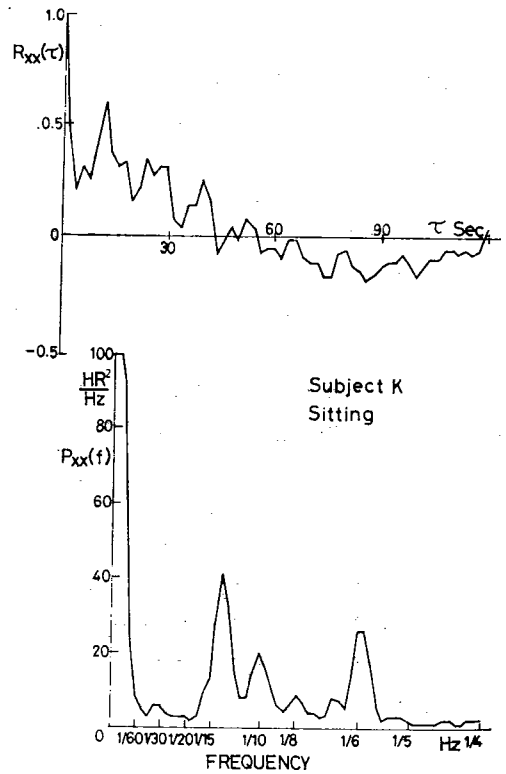


Fig. 4 do. Subject K, sitting

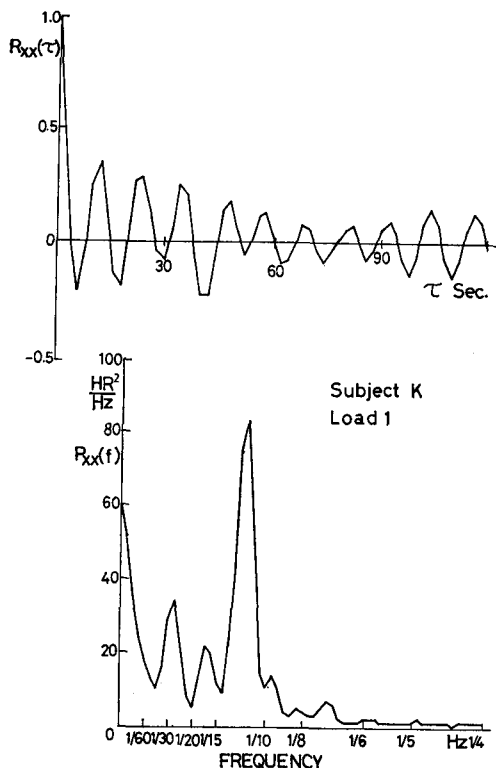


Fig. 5 do. Subject K, Load 1

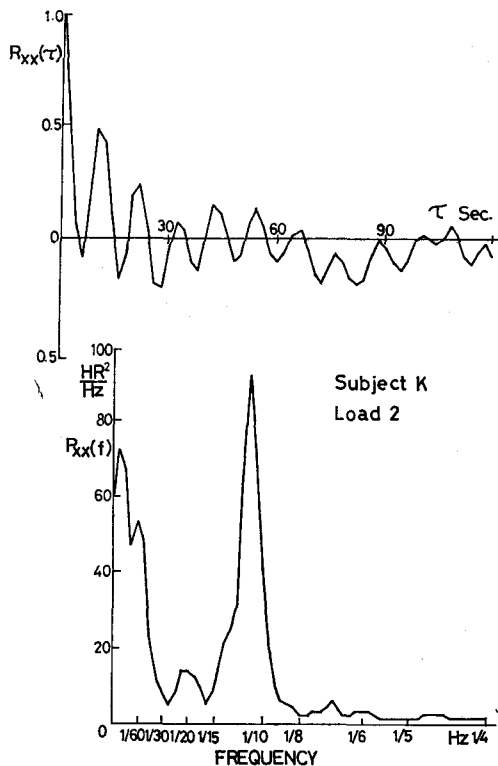


Fig. 6 do. Subject K, Load 2

学的研究^{5),6)}によっても裏付けられているものである。

2. 坐位における心拍数の変動

坐位における被験者Tのコレログラムとスペクトルを Fig. 3 に示す。コレログラムにみられるように臥位の場合と比べ周期性が不明瞭になり、スペクトルをみると $1/7.1$ Hz に大きいパワーが認められるが、さらに $1/14.1$, $1/6.2$, $1/5.6$, $1/4.1$ Hz にも比較的大きいパワーが併存している。そしてまた非周期成分ないし長周期成分のパワーも著しいことが分かる。被験者KについてもTと同様な傾向が認められ、Fig. 4 に示すようにその心拍数変動は $1/13.3$, $1/6.0$ および $1/10.0$ Hz の周波数が混在しているし、また非周期成分のパワーも 137.4 HR²/Hz と大きいことが分かる。

このように、臥位に比べ坐位では全体的に非周期ないしは長周期成分が顕著になり、またその中で認められる周期成分も、ある一つの周波数が卓越するのではなく分極化、つまりいくつかの比較的大きい周波数が混在するようになる。坐位では臥位におけるより、安静中の身体の安定性が悪く一定の姿勢を保ち難く、その分だけ心拍数リズムも乱れ易くなるものと考えられる。

3. 負荷時における心拍数の変動

被験者Kの負荷1, 負荷2, 負荷3におけるコレログラムとスペクトルをそれぞれ Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示す。さて、負荷1における心拍数は Fig. 5 にみられるように11.4秒の周期を持って変動していることが分かる。負荷1は速度約 16 km/h, ペダル回転のテンポ平均51回/分、すなわち1.18秒に1回の割合でエルゴメータをこぐ場合であるから、コレログラムにみられるこの

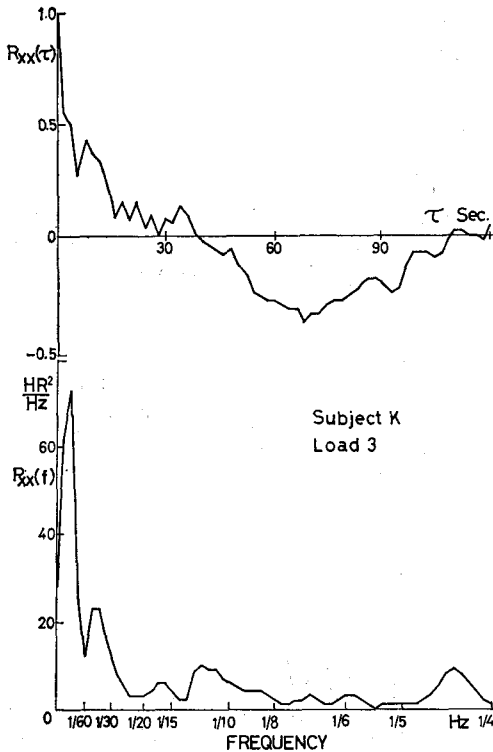


Fig. 7 do. Subject K, Load 3

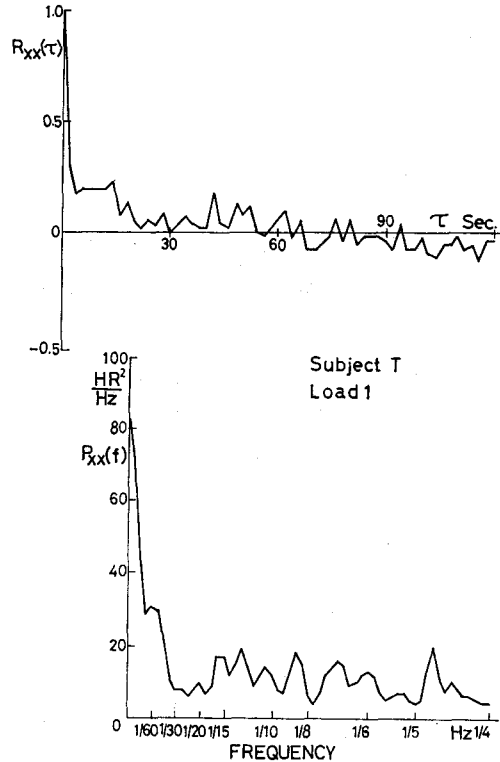


Fig. 8 do. Subject T, Load 1

11.4秒の周期はペタル回転速度のほぼ10倍に相当する周期である。つまりこの場合、ペタル回転のテンポに関連した周期でもって心拍数は変動しているように思われる。

註：パワースペクトルは、周波数 $f = I / (2\Delta T \cdot LAGH)$ ごとに計算される。ここに、サンプリング間隔 $\Delta T = 2$ 秒、最大ラグ数 $LAGH = 60$ 、 $I = 0, 1, 2, \dots, 60$ なので、 $f = 1/4.0$ Hz が最も高い周波数であり、4.0秒より短い周期成分は直接計算出来ない。また、心電図の R-R 間隔から毎分当りの心拍数を算出している関係上、 ΔT はせいぜい1～2秒が限度である。

負荷2における心拍数も Fig. 6 にみられるように10.9秒の周期を持って変動していることが分かるが、これは負荷2のペタル回転のテンポ平均59回/分、すなわち1.02秒の約10倍に相当する周期であり、同様にペタル回転のテンポに関連した周期で心拍数は変動していると思われる。ところが、負荷3になると Fig. 7 にみられるように非常に長い周期成分を除けば顕著な周期性は存在せず、ペタル回転の周期——この場合は0.65秒であったが——に関連した周期成分はも早や認められなかった。

一方、被験者Tの各負荷におけるコレログラム等を Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 に示すが、Tの場合負荷1、負荷2において、それ等のスペクトルは各周波数におけるパワーがほぼ均一なホワイトノイズの様相を示し、様々な周期成分が混在しているようでペタル回転のテンポに関連した周期での心拍数変動が特に卓越するという傾向は認められなかった。また負荷3では、Fig. 10 にみられるようにコレログラムはほぼ単調な右下りになり長周期成分ないしは非周期成分が著しいことが分かる。

この、ペタル回転の速度が早くなり負荷が大きくなってくると両被験者共に心拍数変動における周期性が失われて来るという傾向はⅡ章でも触れたように他の事例においても認められるもの

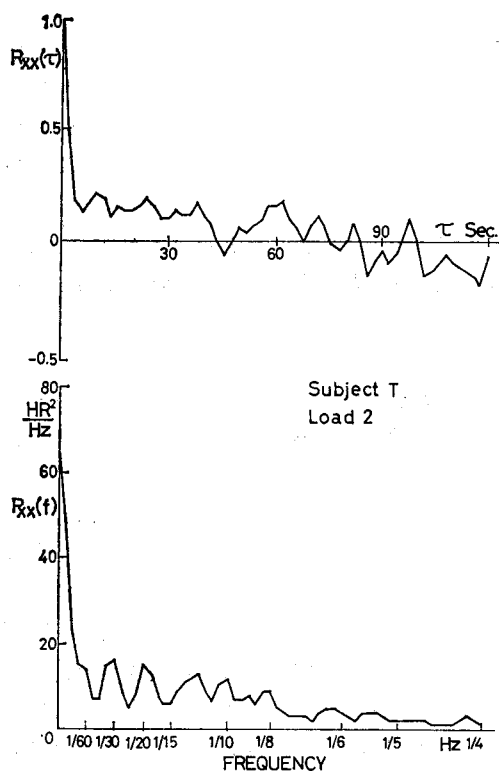


Fig. 9 do. Subject T, Load 2

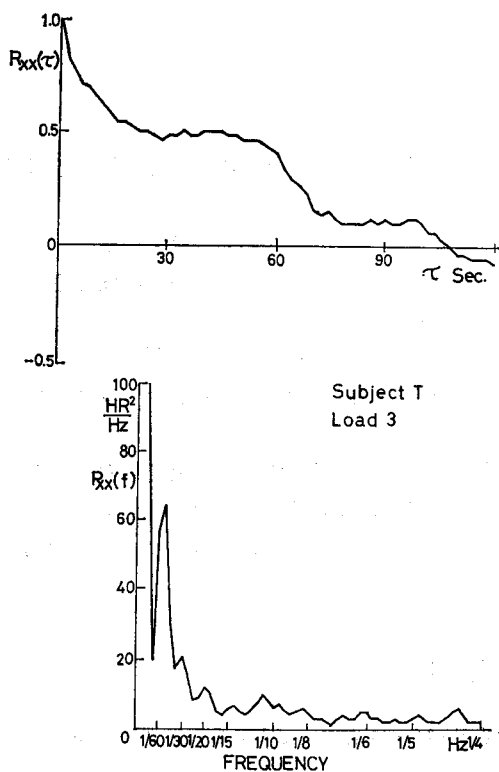
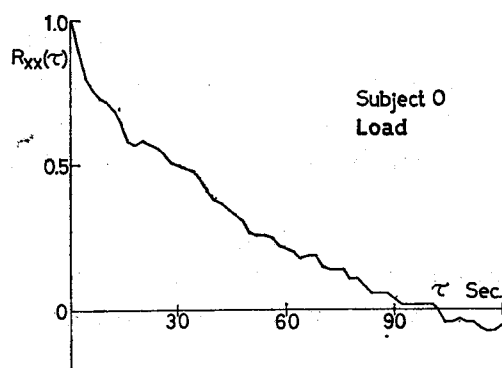
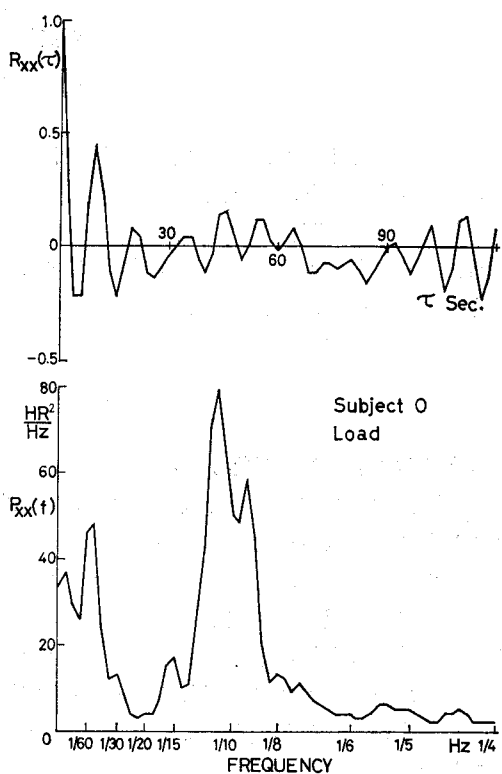


Fig. 10. do. Subject T, Load 3

Fig. 11 Auto-correlogram of heart rate
Subject O, Load (heavier)Fig. 12 Auto-correlogram and power spectrum
of heart rate subject O, Load (lighter)

である。例えば、別の被験者Oが時速約 40 km ではエルゴメータをこいだ場合では Fig. 11 にみられるように、さらに単調な右下りのコレログラムを示した。

また、負荷 1, 負荷 2 の場合, K と T とでは応答の仕方が異なったが、周期的変動を示した K の場合が一般性を持たない特殊なものではな

いことを例証するために、ここに先の被験者Oが時速約 20 km、ペダル回転のテンポ平均62回/分 (1.03秒の周期) でエルゴメータをこいだ場合の結果を Fig. 12 に掲げる。スペクトルをみると $1/10.9 \text{ Hz}$ に鋭く高いパワーが認められ、コレログラムはペダル回転周期のほぼ10倍に当たる周期を持ち、Oにおいても心拍数はペダル回転のテンポに関連した変動を示していることが分かる。

このように、個人差は存在するが被験者によっては軽い負荷の場合、ペダル回転のテンポに関連するような心拍数変動を示すが、負荷がある程度以上大きくなるといずれの被験者にあってもこのような変動リズムは失われてくることが認められた。

以上、臥位、坐位、負荷時の場合に分けて考察して来たが、いずれも各場合の特徴をより良く表わしていると思われる場合を示したわけであり、同じ実験条件であっても上掲のような傾向を示さない場合もまた見受けられたことをここに明記しておかなくてはならない。つまり心拍数変動に影響を与える因子は数多いので、例えば被験者の心的状態が何等かの原因で異なれば外的実験条件が同じであってもその結果には不測の要因による影響が生じ、必ずしも同じ傾向を示さないことになるわけである。

このことに関連して、つぎに、本実験では当初、被験者の心拍数レベルの高い時刻と低い時刻の2つの時間帯ごとに各測定をくり返し、心拍数レベルの高低の影響を明らかにしようとしたのであったが、測定結果は心拍数レベルの高低の影響というよりもむしろ各時刻ごとの被験者の心的状態——どのような精神状態で測定を受けたか——の相違による影響の方が大きかったと考える方が適切だと判断されたので、この点には言及できなかった。

IV ま と め

以上の考察をここで総括する。

1. 臥位での心拍数は深呼吸のリズムにほぼ対応する周期で変動した。これは呼吸性動揺（不整脈）と称して知られているものである。
2. 坐位にあっては、臥位におけるように一つの卓越した周期でもって変動せず、その変動にいくつかの周期成分が混在するようになる。つまり、坐位は臥位よりも身体の姿勢を安定させ難く、その分だけ心拍数を変動させる因子の数が増すものと思われる。
3. 負荷下の心拍数は、軽負荷の場合被験者によってはペダル回転のテンポに対応した変動リズムを示すが、負荷が大きくなると全ての被験者においてこの対応関係は失われ、ランダム性が増加した。
4. ここでは、臥位、坐位、負荷下の各場合の特徴をより良く示していると考えられる事例について考察したが、心拍数変動に影響を与える因子は数多く、被験者の精神状態、実験に対する意欲等の相異で心拍数変動の傾向が異なってくる場合も認められることに注意しなくてはならない。

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) 藤井禧雄・古谷士郎：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，

- 京大演報, **51**, 215~221, (1979)
- 3) 藤井禧雄・古谷士郎: 作業負担指標としての心拍数に関する基礎的考察, 静大農研報, **26**, 13~21, (1976)
 - 4) 藤井禧雄・長田浩一: 安静時心拍数と負荷時心拍数との相関関係について, 静大演報, **4**, 19~23, (1978)
 - 5) 村上 恵・高田重矩: 小型電子計算機により測定した R-R 間隔ならびにその変動の精神生理学的意義に関する研究, 体質医学研報, **22** (2), 69~76, (1972)
 - 6) 高橋宣光, 春見建一・小山晋太郎: 相関分析法の応用, 日本臨床, **20**, 2334~2345, (1962)

Résumé

ECGs for two subjects were measured with an FM telemetry system during lying, sitting and riding a bicycle ergometer at three different loads. The heart rates which calculated from the ECGs at every two seconds interpreted as the random and digital data, and the auto-correlation functions and the power spectra of them were computed in order to study the dynamic characteristics of the heart rate changes.

The results may be summarized as follows.

- 1) The periods of the heart rate changes for lying nearly corresponded to the ones of the deep breathing of each subject. On the other hand, the periods for sitting consisted of several periodic elements and were apt to be in disorder, because that to keep the posture of sitting was more difficult than of lying.
- 2) The heart rate for cycling changed with the periods related to the tempo of the pedaling of the bicycle ergometer when the work load was lighter (load 1,2), but the periodicity was lost and became to be dominated by randomness when the work load was heavier (load 3).
- 3) It is also true that the tendencies of the heart rate changes mentioned above were affected by an individual difference and the mental conditions of subjects during the measurement of ECG.