

ランダム波を目標量とする手動制御動作の伝達関数の決定の実験 II^{*}

増山英太郎

はじめに

先に本誌に発表した論文^{**}では、人間のみからなる系にランダム波の目標量を与えて、手動制御動作を行なわせ、ランダム波の折点周波数が変化すると、人間の動作特性はどのように変わるかを、伝達関数によって調べた。その際、目標量と操作量のフーリエ変換は、アナログ計算機によって行なった。

結果の解析の結果、人間の閉ループ周波数伝達関数としては、

$$G(j) = ke^{-Lj} \quad (1)$$

が、最もよく得られた実験データに当てはまることがわかった。

以上のような実験方法は、どちらかと言えばオーソドックスな方法に近いが、ランダム波を目標量とした場合の手動制御動作の伝達関数の求め方には、もう1つ別の方法が考えられる。それは、人間の伝達関数が要素の線型結合として仮定される場合にのみ許される方法であるが、重回帰方程式の方法による推定である。

増山 (1966) は、ランダム波の目標量を一被験者に Pursuit Tracking さ

* 終始実験に立会い、相談にのって下さった慶応義塾大学管理工学科林喜男助教授及び東京教育大学心理学科における指導教官金子隆芳助教授に深く感謝を捧げます。また、自己及び相互相関関数のプログラミング及び計算に関してご助力下さった、本学管理科学科西川欽也教授及び計算センター小笠原昭氏に感謝を申し上げます。

** 増山英太郎 (1968)

せた場合の、人間の PID 型開ループ伝達関数を、重回帰方程式の方法によって決定した。

得られた重回帰方程式は

$$y(t) = 0.1083 \int x_2(t-0.6) dt + 0.1057 x_2(t-0.6) + 0.01053 \frac{dx_2(t-0.6)}{dt} \quad (2)$$

であった。但し、 t は時間、 $y(t)$ は操作量、 $x_2(t-0.6)$ は操作量よりも 0.6 秒前の偏差量の値を表わす。重回帰係数は、いずれも 1% 危険率で有意に 0 より大きく、重相関係数は 0.5968 となった。

上式を伝達関数の形に変換すると

$$H(s) = 0.1057 \left(\frac{1}{0.9756s} + 1 + 0.1422s \right) e^{-0.6s} \quad (3)$$

その実験においては、被験者は 1 人にすぎず、果して同様な結果が被験者数を増しても得られるかどうか。また、その実験の課題は Pursuit Tracking であったが、Compensatory Tracking では、どのような結果になるかの点、疑問として残った。

本実験は、そのような疑問に答えようとして行なったものである。ただ、課題が Compensatory Tracking の場合の解析は未完了なので、次の機会にゆずることとする。

本学では、ディジコンが比較的自由に利用できるもので、これからは、入出力のクロス・パワー・スペクトラムを、入力のパワー・スペクトラムで除して伝達関数を求めるといういわゆるオーソドックスな方法で、できる限りデータの解析を行なってゆきたい。

その手始めに、ディジコンによって計算したコレログラムから、12 項調和解析の手計算によって、パワー・スペクトラムを求め、それから開ループの周波数特性を表わすボード線図を描いてみたい。目標量として用いたいわゆるランダム波は、真のランダム波ではなく、周波数に関してほぼ対数的に等間

隔な成分正弦波の合成波であったため、1回の調和解析によって、総ての成分正弦波に対する振幅比と位相とを算出することは不可能である。

従って、1回の調和解析しか行っていない現段階では、真のパワ・スペクトラムに対する非常に荒い近似しか与えていない可能性がある。だから、本来ならば、調和解析の手計算等ではなく、フーリエ係数を求める計算をディジコンによって行なうべきである。

ディジコンによる、より正確な計算の結果は、やはり次の機会にゆずることとして、本稿では12項調和解析によって得られる開ループ周波数特性の荒い近似と、重回帰方程式の方法によって求めた開ループ周波数伝達関数との関係を、一応検討してみたい。

目 的

正弦波合成波を目標量とする Pursuit Tracking の実験結果から、次式を重回帰方程式として求める。

$$y(t) = b_{y1 \cdot 23} \int x_2(t-L) dt + b_{y2 \cdot 13} x_2(t-L) + b_{y3 \cdot 12} \frac{dx_2(t-L)}{dt} \quad (4)$$

但し、L はムダ時間を表わし、 t , $x(t)$, $y(t)$ については前に述べた。

(4)式のラプラス変換を行なって、次式の開ループ伝達関数を求めることを目的とする。

$$H(s) = h \left(\frac{1}{\tau_{IS}} + 1 + \tau_{DS} s \right) e^{-Ls} \quad (5)$$

さらに、操作量と偏差量の相互相関関数 $\varphi_{yx_2}(\tau)$ と偏差量の自己相関関数 $\varphi_{x_2 \cdot x_2}(\tau)$ とから12項調和解析によって、開ループ周波数特性の荒い近似を得、上述の $H(s)$ との関係を考察したい。

方 法

まず、目標量としての正弦波合成波を、図1のアナログ回路によって作成

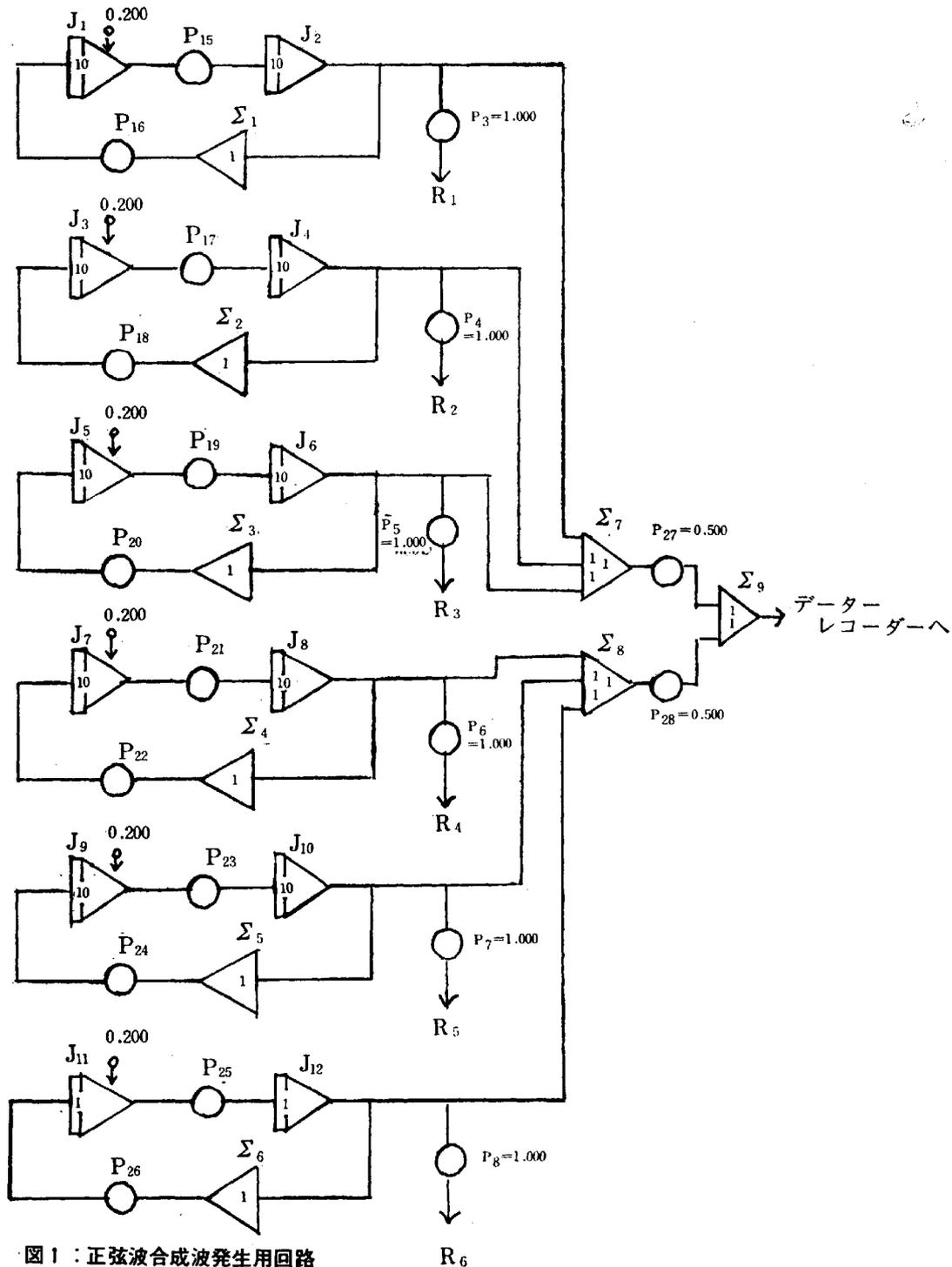


図1：正弦波合成波発生用回路

図1：正弦波合成波発生用回

した。

図において、奇数番の積分器に 20 ボルトの初期値を与えると、6つのループから、各1種類ずつの周波数の正弦波が生じ、加算器Σから合成正弦波が生ずることになる。

正弦波合成波を増山 (1966) と同一にするため、ポテンシオ $P_{15} \sim P_{26}$ は表1のような値とした。

表1: 成分正弦波の周波数とポテンシオの値

f (cps)	1.563	0.818	0.565	0.365	0.236	0.160
ω (rad/sec)	9.82	5.14	3.55	2.29	1.48	1.00
ポテンシオ番号	P_{15}, P_{16}	P_{17}, P_{18}	P_{19}, P_{20}	P_{21}, P_{22}	P_{23}, P_{24}	P_{25}, P_{26}
ポテンシオの値	0.982	0.514	0.355	0.229	0.148	1.000

但し、 f 及び ω は、成分正弦波の周波数を CPS 単位及び rad/sec 単位で表わしたものである。

得られた正弦波合成波は、磁気テープに録音された。使用した実験装置は図2の通りである。

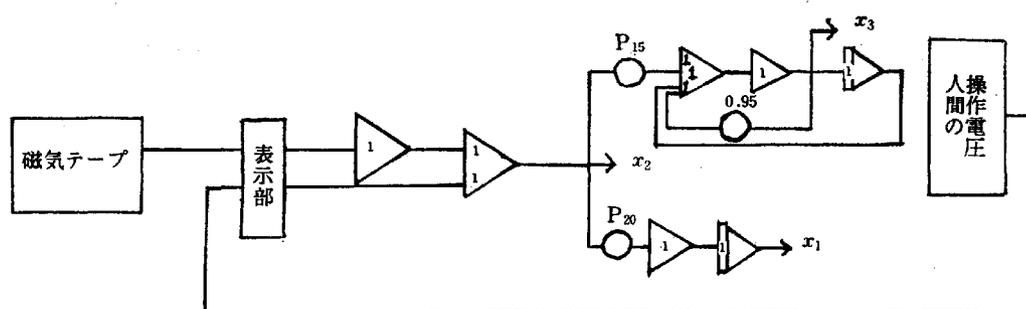


図2: 実験装置

図において、偏差量の微分値は変動が激しいことが予想されるので $P_{15}=0.2$ に、偏差量の積分値はアナコンがオーバー・フローを起さぬように $P_{20}=0.5$ にしぼった。

被験者は、慶応義塾大学管理工学科3年の21才男子3名で、いずれも自動車の運転免許所有者であった。彼等を、以後 K_u, K_o, I_n とよぶ。

被験者は2素子ブラウン管に向って座し、管面に磁気テープから再生されて表われる正弦波合成波の目標光点の縦方向の変位に合わせて、ツマミを回転させる。すると、管面に操作光点の変位 y が生ずる。課題は Pursuit Tracking であつた。^{*}

ツマミとしては、その機械的な特性が結果に大きな影響を及ぼすことのないように、手で具合よくつまめる大きさ（直径 38 mm）で、軽いものを用いた。管面での目標光点の変位は 34 mm で、それに対応するツマミ回転角は 55° であつた。

実験データとしては、目標量から操作量を引いた残りである偏差量 (x_2) と偏差量の積分値 (x) と偏差量の微分値 (\dot{x}) 及び上述の操作量 (y) の 4 現象を紙記録した。

実験期日は 1967 年 11 月 9 日で、各被験者に課題の説明を行なった後、約 30 秒の練習を行なった後で、25 秒以上の実験を行ない、実験期間の最初の 25 秒分のデータを分析した。

結 果

得られた実験データの例として、被験者 I_n のデータの一部分を示したのが図 3 である。

偏差量の微分値の変化が激しいのに対して、偏差量の積分値の変化は比較的なだらかなことがわかる。増山 (1966) と同様に、25 秒分のデータから x_1 , x_2 , x_3 , y を 0.1 秒間隔で mm 単位で 0.1 mm まではかった。標本数は K_u が 250, K_o , I_n が 251 であつた。

得たそれらの値の内、 x_3 は P_{15} が 0.2 とされていたから $1/0.2=5$ ゆえ 5 倍され、 x_1 は P_{20} が 0.5 とされていたから $1/0.5=2$ ゆえ 2 倍された。得られた 4 系列の値から、本学 OKITAC-5090H によって、4 系列相互の総ての

* 直ぐ後に Compensatory Tracking も等量だけ行なわせたが、その結果については、前述の通り、未だ分析を行なっていない。

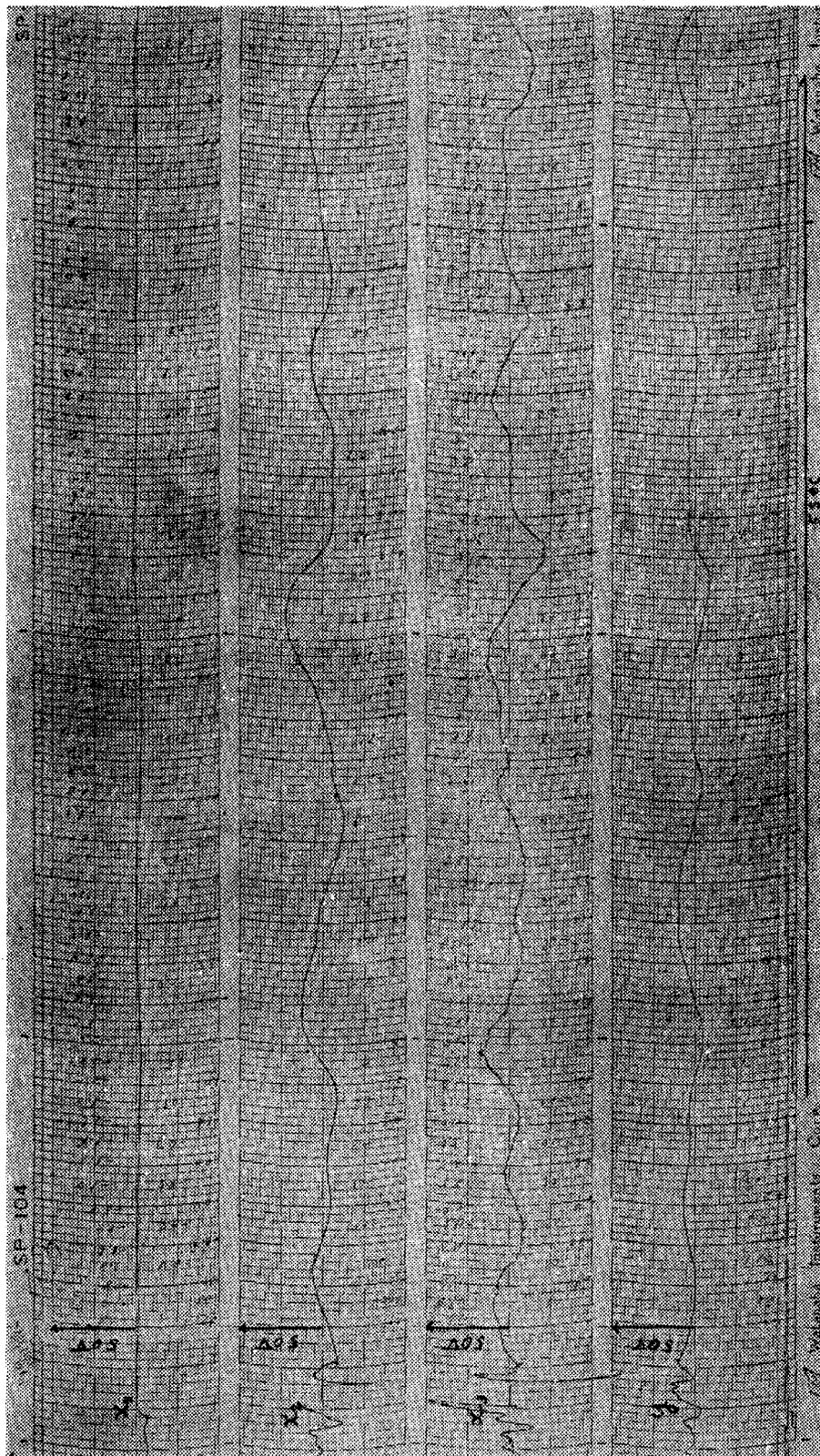


図3: 被験者 I_n の時間領域における実験データ

組合わせの相互相関及び自己相関及び対応する共分散を、lag が0から±5秒に到るまで計算した。プログラムを、本稿末尾の附録表1に示す。但し、プログラムの中で、A, B, C, D とは、各々 y, x_3, x_2, x_1 の25秒分の実験データ^{*}を表わす。本プログラムでは、lag が正の場合しか計算されないが、負の場合については、自己相関は偶関数であるから正の場合とまったく同じであり、計算の必要はない。lag が負の場合についての相互相関は、Statement No. 50~102 の X(I) と Y(I) を入れ換えれば得られる。

計算結果より cross-correlogram $\varphi_{yx_1}(\tau), \varphi_{yx_2}(\tau), \varphi_{yx_3}(\tau)$ を描くと、附録図1の通りである。

図において、lag 0 から極大値までの時間を推定すると、表2の通りである。

表2: 被験者別, lag 0 から極大値までの時間 (単位: 秒)

Subject	Cross-correlogram	$\varphi_{yx_1}(\tau)$	$\varphi_{yx_2}(\tau)$	$\varphi_{yx_3}(\tau)$	Mean
K _u		1.4	0.4	0.5	0.8
K _o		0.1	0.4	0.7	0.4
I _n		0.2	0.3	0.4	0.3

これらが人間の積分, 比例, 微分動作のムダ時間に対する推定値である。

この correlogram から、偏差積和と偏差平方和の行列を作り、その行列から重回帰方程式を求めるにあたり、lag がどの位のところの偏差積和と偏差平方和を用いるかが問題になる。

図4のように、PID 要素を中に含む閉ループの後に、直列に L 秒という1つだけのムダ時間要素が入っていると考えたい。

そのように考えると、Lとしては、表2のムダ時間の算術平均を用いることがよいであろう。なお、このようなモデルでは、偏差量の積分値、偏差

* 上述の4系列の値とよんでいるものこと。

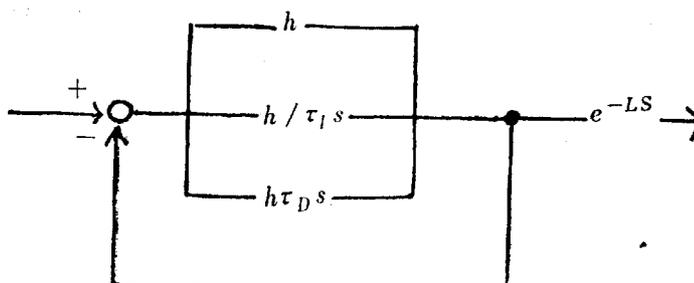


図4: 人間の伝達関数のモデル

量, 偏差量の微分値のL秒だけ以前の時刻のものがもっか, 操作量として処理されていると考えている点に注意すべきである。

重回帰方程式の計算は, 偏差積和と偏差平方和からなる対称行列から出発し, その逆行列を求めるという, Snedecor, G. W., (1956) の方法に従った。計算方法とその結果は附録・表2-A, 表2-B, 表2-Cの通り。

重回帰方程式は, 被験者 K_u に対しては

$$y(t) = -0.0026 \int x(t-0.8)dt - 0.0094x_2(t-0.8) + 0.0063 \frac{dx_2(t-0.8)}{dt} \quad (6)$$

となり, 重回帰係数はいずれも有意ではなく, 重相関係数は0.1294となった。ここでは, 3つの重回帰係数中2つが負になり, 動作の意味が考えにくい上, 重相関が低いので伝達関数には変換しない。

被験者 K_o に対しては

$$y(t) = 0.1842 \int x_2(t-0.4)dt + 0.5136x_2(t-0.4) - 0.0048 \frac{dx_2(t-0.4)}{dt} \quad (7)$$

となり, 積分動作と比例動作に対する重回帰係数が1%危険率で有意に0よりも大きく, 重相関係数は0.7055となった。

ラプラス変換を行ない, 開ループ伝達関数の形に変換すると

$$H(s) = 0.5136 \left(\frac{1}{2.788s} + 1 - 0.0093s \right) e^{-0.4s} \quad (8)$$

上記の K_0 の重回帰方程式において、操作量 $y(t)$ を予言するのに、偏差量の微分量 $dx_2(t-0.4)/dt$ が効果がないであろうことは、0.647 という t の値からもわかるが、念のため、偏重回帰係数 $b'_{y3.12}$ を計算してみると、-0.0319 と小さい値であることがわかった。

そこで新たに、微分動作を除いた上で、偏差量の積分値と偏差量を独立変数とし、操作量を従属変数とする重回帰方程式を求めることにした。計算方法と結果は、附録表 2-D の通り。

$$y(t) = 0.3184 \int x(t-0.3)dt + 0.4431x_2(t-0.3) \quad (9)$$

但し、ムダ時間の長かった微分動作が除かれたのだから、ムダ時間の算術平均 L は約 0.3 秒と、さきほどよりも短くなっている。重回帰係数は 2 つとも 1% 危険率で有意に 0 よりも大きく、重相関係数は 0.6488 となった。

ラプラス変換を行ない、開ループの伝達関数の形に変換すると

$$H(s) = 0.4431 \left(\frac{1}{1.392s} + 1 \right) e^{-0.3s} \quad (10)$$

被験者 I_n に対しては

$$y(t) = 0.2090 \int x(t-0.3)dt + 0.5328x(t-0.3) + 0.2076 \frac{dx_2(t-0.3)}{dt} \quad (11)$$

となり、重回帰係数は比例と微分動作に対するものが 1%、積分動作に対するものが 5% 危険率で有意に 0 よりも大きく、重相関係数は 0.5890 となった。

ラプラス変換を行ない、開ループの伝達関数の形に変換すると

$$H(s) = 0.5328 \left(\frac{1}{2.549s} + 1 + 0.3896s \right) e^{-0.3s} \quad (12)$$

次に、ディジコンによって計算したコレログラムのうち、オーソドックスな方法による開ループ伝達関数計算に直接必要な、偏差量の自己相関 $\varphi_{x_2, x_2}(\tau)$ のコレログラムと、操作量と偏差量の相互相関 $\varphi_{yx_2}(\tau)$ のコレログ

ラムを描くと，附録図2の通りである。

なお，オーソドックスな方法による伝達関数計算にあたって，入出力双方の自己相関から出発せず，片方は入出力の相互相関とするわけは，次の通りである。

人間の開ループ特性の時間領域における表現を $h(\tau)$ とすると，偏差量 $x_1(t)$ と操作量 $y(t)$ の間には，次の Convolution の関係が成立する。

$$y(t) = \int_{-T}^T x_1(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (13)$$

偏差量の自己相関関数 $\varphi_{x_2x_2}(\tau)$ は

$$\varphi_{x_2x_2}(\tau) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_2(t+\tau)x_2(t)dt \quad (14)$$

偏差量と操作量の相互相関関数 $\varphi_{yx_2}(\tau')$ は

$$\varphi_{yx_2}(\tau') = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t+\tau')x_2(t)dt \quad (15)$$

(13)式を(15)式に代入すると

$$\begin{aligned} \varphi_{yx_2}(\tau') &= \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \int_{-T}^T x_2(t+\tau'-\tau)h(\tau)d\tau \cdot x_2(t)dt \\ &= \int_{-T}^T \left\{ \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_2(t+\tau'-\tau)x_2(t)dt \right\} h(\tau)d\tau \\ &= \int_{-T}^T \varphi_{x_2x_2}(\tau'-\tau)h(\tau)d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

結局， $\varphi_{x_2x_2}(\tau')$ と $\varphi_{yx_2}(\tau')$ とが，やはり Convolution の関係で結ばれていることになっている。従って，これらから，調和解析によって伝達関数を求めるのが正しいのである。

本題にもどって， $\varphi_{x_2x_2}(\tau)$ と $\varphi_{yx_2}(\tau)$ のコレログラムにおける -2.2 ， -1.8 ， -1.4 ， -1.0 ， -0.6 ， -0.2 ， 0.2 ， 0.6 ， 1.0 ， 1.4 ， 1.8 ， 2.2 秒の時刻での相関係数の値から，乗松立木 (1964) に従って，12等分法による“非対称波”調和解析を行なった結果，附録表3のようなフーリエ係数が得られた。それから，開ループ周波数伝達関数 $H(j\omega)$ を計算するには，増山

(1968) の (8)~(13) 式に従って計算を行なえばよい。そこここでは記号法が
違う箇所があるので、ここでの記号法に従って、再び計算式を示すと

$$|r_X(\omega)| = \sqrt{a_X^2(\omega) + b_X^2(\omega)} \quad (17)$$

$$|r_Y(\omega)| = \sqrt{a_Y^2(\omega) + b_Y^2(\omega)} \quad (18)$$

但し、 $a_X(\omega)$ 及び $b_X(\omega)$ は $\varphi_{2,2}(\tau)$ より調和解析で求めたフーリエ係
数、 $a_Y(\omega)$ 及び $b_Y(\omega)$ は $\varphi_{y,2}(\tau)$ より同様に求めたフーリエ係数である。

位相は

$$\phi_X(\omega) = \tan^{-1} \frac{b_X(\omega)}{a_X(\omega)} \quad (19)$$

$$\phi_Y(\omega) = \tan^{-1} \frac{b_Y(\omega)}{a_Y(\omega)} \quad (20)$$

開ループ周波数伝達関数の db 表示は、

$$|H(j\omega)|_{db} = 10 \log_{10} \frac{r_Y^2(\omega)}{r_X^2(\omega)} \quad (21)$$

その位相は

$$\angle H(j\omega) = \phi_Y(\omega) - \phi_X(\omega) \quad (22)$$

次に、角周波数 ω の決定である。分析範囲が -2.2 秒から 2.2 秒までの
 4.4 秒であったから、これを周期 T とし、 $2\pi/T$ rad/sec を基本角周波数と
した。従って、 ω は $1.428, 2.856, 4.284, 5.712, 7.140$ rad/sec となっ
た。

得られた結果は、附録図3のボード線図に示されている。

考 察

増山 (1966) の実験結果では、ムダ時間は積分動作で最も短く、次に比例
動作、最も長いのが微分動作であり、Knowles, W. R., Holland, J. G., &
Newlin, E. P. (1957) の実験結果でも、ムダ時間の長さは同じ順序であっ
た。

本実験結果からのムダ時間は表2に示してあるが、 0.1294 という重相関

係数の大きさから考えて、PID 型伝達関数が適合しているとは言い難い被験者 K_u の結果を除けば、ムダ時間の長さは、上記 2 結果と同じ順序である。例外と見なした被験者 K_u の結果においても、異常に長い積分動作のムダ時間を除けば^{*}、上と同様な結果と言える。

結局、「積分動作は遅れるのだから短いムダ時間しか許されない、微分動作は進むのだから長いムダ時間を許してよい。そのように考えると、積分、比例、微分各動作に足並みをそろえて入ってきた入力、出力のところでやはり足並みをそろえて出て行くことができる。」との増山(1966)の推論が正しいかどうかは、本実験結果からは未だ答えられないが、ムダ時間の長さの順序についての上記の特徴は、いつも現れるものと見なしてよさそうである。

また、附録図 1 のクロス・コレログラムを見ると、 $\varphi_{v_{x_1}}(\tau)$ 及び $\varphi_{v_{x_2}}(\tau)$ のグラフは、 τ の増加につれて、ムダ時間決定に用いた極大値を中心に、増加→極大値→減少の過程をたどる。それに対して、 $\varphi_{v_{x_3}}(\tau)$ は、減少→極小値→増加→極大値→減少の過程をたどる。このようなグラフの特徴は、増山(1966)でも見うけられた。

次に、重相関係数の値を見てみよう。被験者 K_u の結果は問題にならないので除くことにして、 K_o と I_n の値は各々 0.7055, 0.5890 で、 K_o の動作を比例と積分動作即ち PI 動作と考えた場合には 0.6488 であった。増山(1966)では 0.5998 で、Knowles et al (1957) では、2 人の被験者につき各々 0.675, 0.566 であった。従って、本実験の結果も、従来の諸結果とよく類似していると言える。

最後に、調和解析によって求めた附録図 3 のボード線図を見ると、被験者

* 被験者 K_u の積分動作における 1.4 秒の lag での極大値は、附録図 1 から見ても、それとハッキリわかる大きな値のものであるが、それほどハッキリはせぬが、もっと前 0.3 秒の lag にも極大値がある。従って、積分動作は 0.3 秒のムダ時間であるとして計算し直してみることは、価値があるであろう。その結果、重相関係数の値が大きくなり、PID 型伝達関数が K_u の動作にも当てはまるかもしれない。

K_0 と I_n の結果は、いずれも PID 型伝達関数が当てはまりそうな点の布置となっている。そのことは、特に位相の線図から言えそうである。何故なら、PID 型伝達関数では、角周波数 ω の増加につれて、位相が -90° から 0° を経て $+90^\circ$ へという単調増加型になるはずだがらである。だが、ゲインの線図における点の布置は、完全にモデル通りの布置になっているわけではない。また、先に求めた PID 型あるいは PI 型伝達関数を附録図 3 に書き込んでも、点の布置の間をうまく理論曲線が通らないようである。

そのことは、求めた PID 型伝達関数^{*}から、 $\omega=1/\tau_I$ 及び $\omega_2=1/\tau_D$ を求め、ゲイン線図において $(20 \log h) \text{ db}$ の水平線と、 -20 db/dec 及び 20 db/dec 線が交わるのが各々 ω_1 及び ω_2 であるかどうかを調べてみればわかる。

それを行なった結果、 K_0 と I_n の両結果とも、 ω_1 と ω_2 が点の布置に比べて小さすぎの感じである。もっと正確な言い方をすれば、調和解析によって得た点の布置の方が、大きすぎの側に片寄っているようである。この点について断言を行なうには、フーリエ係数計算のために、12 項調和解析等よりも、もっと精度の高い計算を行なってみなければならぬであろう。従って、重回帰方程式の方法によって求めた伝達関数と、オーソドックスな方法によって求めた伝達関数の一致の度合を論ずる問題は、今後の検討に待たれると言ってよいであろう。その問題の検討はまた、PID 型伝達関数の妥当性を論ずる糸口ともなるであろう。

要 約

図 2 のアナコン回路を用いて、ランダム波の目標量の Pursuit Tracking の実験を、被験者 K_u , K_i , I_n について行なった。

ランダム波は 0.160 から 1.563 cps に至る 6 正弦波の合成波であった。実

* (5)式を参照のこと。

験データとして得たものは、人間の操作量 y 、偏差量の積分値 x_1 、偏差量 x_2 、差量の微分値 x_3 であった (図 3)。その結果から、 x_1 、 x_2 、 x_3 を独立変数とし、 y を従属変数とする重回帰方程式を求め、それからの換算によって開ループの伝達関数 $H(s)$ を決定した。

被験者 K_0 に関しては、おそらくは積分動作のムダ時間が異常に長いことのために、PID 伝達関数が当てはまらなかったが、他の 2 被験者に関しては次の通りとなった。

K_1 については

$$H(s) = 0.5136 \left(\frac{1}{2.788s} + 1 - 0.0093s \right) e^{-0.48s}$$

で、重相関は 0.7055。

I_n については

$$H(s) = 0.5328 \left(\frac{1}{2.549s} + 1 + 0.3896s \right) e^{-0.38s}$$

で、重相関は 0.5890 であった。

この結果は、12 項調和解析による結果と傾向としては似ているが、一致しているとは言い難い。その不一致の理由は、フーリエ係数計算の目的には、12 項調和解析では近似の程度が荒すぎるためであろう。附録図 2 のコログラムのフーリエ変換をも、ディジコンを用いて数値積分の仕方で行なってみることが、今後に残された問題である。

参 考 文 献

- Knowles, W. R., Holland, J. G., & Newlin, E. P. (1957) A correlational analysis of tracking behavior. *Psychometrika*, 22, 275-287.
- 増山英太郎 (1966) 人間における開回路伝達関数の決定, 心理学研究, 第 37 巻, 第 3 号, 143~148 頁。
- 増山英太郎 (1968) ランダム波を目標量とする手動制御動作の伝達関数の決定の実験, 商学討究, 第 18 巻, 第 4 号。
- 乗松立木 (1964) 数値計算法, 第 2 版, 電気書院。

ステデカー著 畑村又好・奥野忠一・津村善郎訳 (1962) 統計的方法, 改訂版, 岩波書店 (Snedecor, G. W., 1956 Statistical methods. (5th Ed.) Ames. Iowa: Iowa State University Press.)

附録・表1: 自己及び相互相関計算プログラム (その1)

OKIART H SOURCE PROGRAM LIST

```

NO      SOURCE STATEMENT
  1      COMMON X(260), Y(260), CC(51), R(51), NK
  2      DIMENSION A(260), B(260), C(260), D(260)
  3      DIMENSION IA(260), IB(260), IC(260), ID(260)
  4 999 READ(5, 104) NK
  5 104 FORMAT(I5)
  6      IF(NK. EQ. 99999) STOP
  7      READ(5, 103) (IA(I), IB(I), IC(I), ID(I), I=1, NK)
10 103 FORMAT(16I5)
11      DO 1 I=1, NK
12      A(I)=IA(I)
13      B(I)=IB(I)
14      C(I)=IC(I)
15      D(I)=ID(I)
16      1 CONTINUE
17      WRITE(6, 105) NK
20 105 FORMAT(1H1, I5)
21      WRITE(6, 102) (I, A(I), B(I), C(I), D(I), I=1, NK)
22 102 FORMAT(1H , 4(I6, 4F5.0, 3X)/)
23      DO 70 I=1, 260
24      X(I)=A(I)
25      Y(I)=A(I)
26 70 CONTINUE
27      CALL MASUYA
30      DO 80 I=1, 260
31      X(I)=B(I)
32      Y(I)=B(I)
33 80 CONTINUE
34      CALL MASUYA
35      DO 90 I=1, 260
36      X(I)=C(I)
37      Y(I)=C(I)
40 90 CONTINUE
41      CALL MASUYA
42      DO 100 I=1, 260

```

附録・表1: 自己及び相互相関計算プログラム (その2)

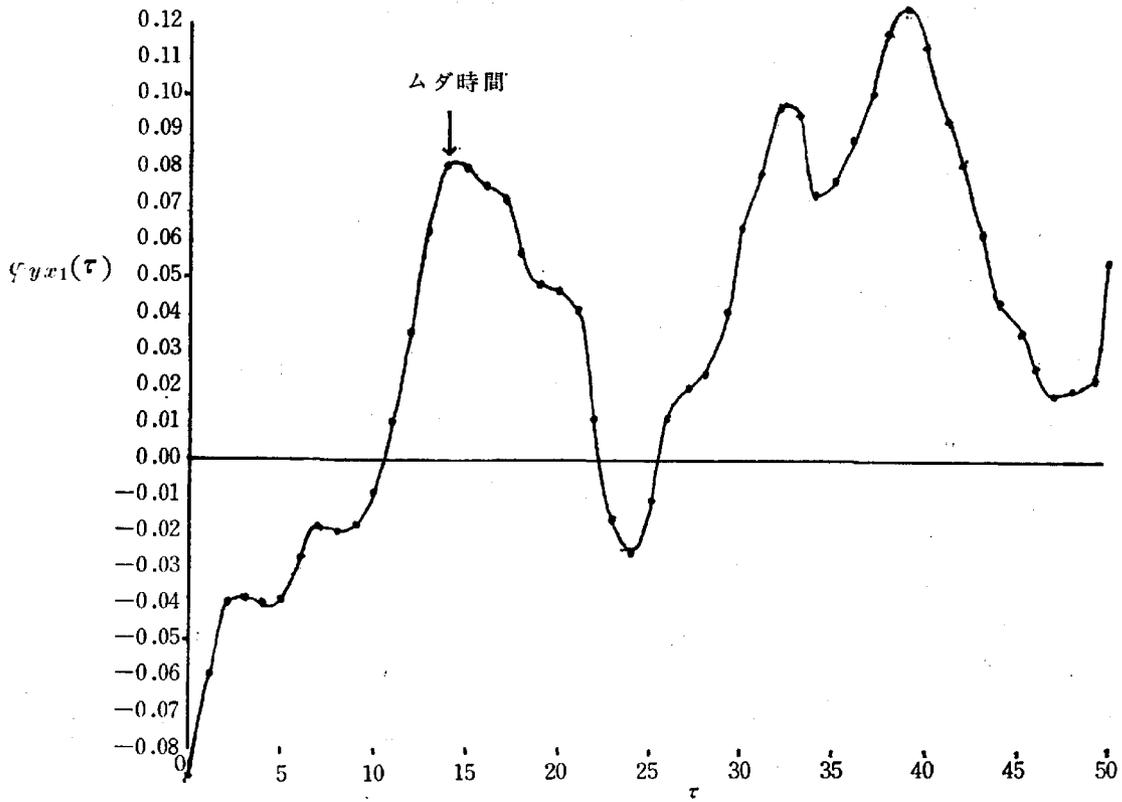
```
43      X(I)=D(I)
44      Y(I)=D(I)
45 100  CONTINUE
46      CALL MASUYA
47      DO 10 I=1, 260
50      X(I)=B(I)
51      Y(I)=A(I)
52 10  CONTINUE
53      CALL MASU
54      DO 20 I=1, 260
55      X(I)=C(I)
56      Y(I)=A(I)
57 20  CONTINUE
60      CALL MASU
61      DO 30 I=1, 260
62      X(I)=D(I)
63      Y(I)=A(I)
64 30  CONTINUE
65      CALL MASU
66      DO 40 I=1, 260
67      X(I)=B(I)
70      Y(I)=C(I)
71 40  CONTINUE
72      CALL MASU
73      DO 50 I=1, 260
74      X(I)=B(I)
75      Y(I)=D(I)
76 50  CONTINUE
77      CALL MASU
100     DO 60 I=1, 260
101     X(I)=C(I)
102     Y(I)=D(I)
103 60  CONTINUE
104     CALL MASU
105     PAUSE 99999
106     GO TO 999
107     STOP
110     END
111     SUBROUTINE MASU
112     COMMON X(260), Y(260), C(51), R(51), NK
113     CALL SERCOR
114     WRITE(6, 100)
115 100  FORMAT(1H1, 4X, 1HJ, 15X, 1HC, 15X, 1HR, 13X, 1HJ////)
116     DO 1 K=1, 51
```

附録・表1：自己及び相互相関計算プログラム（その3）

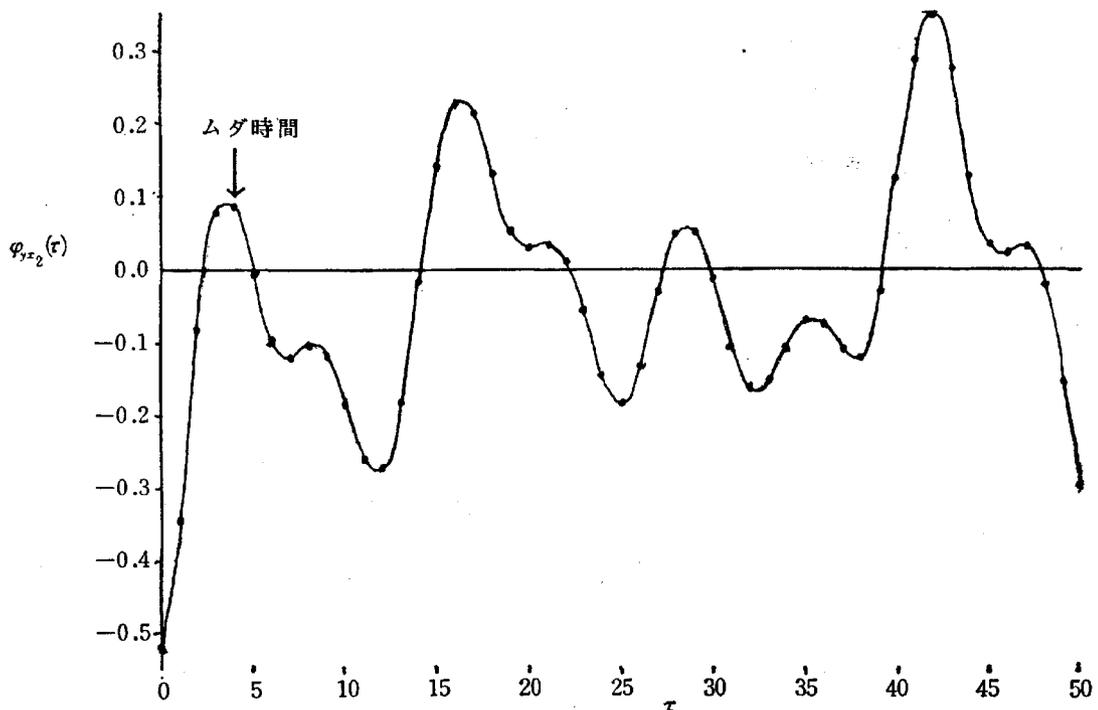
```

117     WRITE(6, 101) K, C(K), R(K), K
120 101 FORMAT(1H , I6, 2E16, 7, 2X, I5)
121     1 CONTINUE
122     RETURN
123     END
124     SUBROUTINE MASUYA
125     COMMON X(260), Y(260), C(51), R(51), NK
126     CALL SERCOR
127     WRITE(6, 100)
130 100 FORMAT(1H1, 4X, 1HJ, 15X, 1HC, 15X, 1HR, 13X, 1HJ)
131     DO 1 K=1, 51
132     WRITE(6, 101) K, C(K), R(K), K
133 101 FORMAT(1H , I6, 2E16, 7, 2X, I5)
134     1 CONTINUE
135     RETURN
136     END
137     SUBROUTINE SERCOR
140     COMMON X(260), Y(260), C(51), R(51), NK
141     N=NK
142     IMF=51
143     DO 1 K=1, IMF
144     L=N-K+1
145     S1=0.0
146     S2=0.0
147     DO 2 I=K, N
150     S1=S1+X(I-K+1)
151     S2=S2+Y(I)
152     2 CONTINUE
153     S1=S1/FLOAT(L)
154     S2=S2/FLOAT(L)
155     V1=0.0
156     V2=0.0
157     S=0.0
160     DO 3 I=K, N
161     V1=V1+(X(I-K+1)-S1)**2
162     V2=V2+(Y(I)-S2)**2
163     S=S+(X(I-K+1)-S1)*(Y(I)-S2)
164     3 CONTINUE
165     C(K)=S/FLOAT(L)
166     R(K)=S/SQRT(V1*V2)
167     1 CONTINUE
170     RETURN
171     END
172     END OF SOURCE*

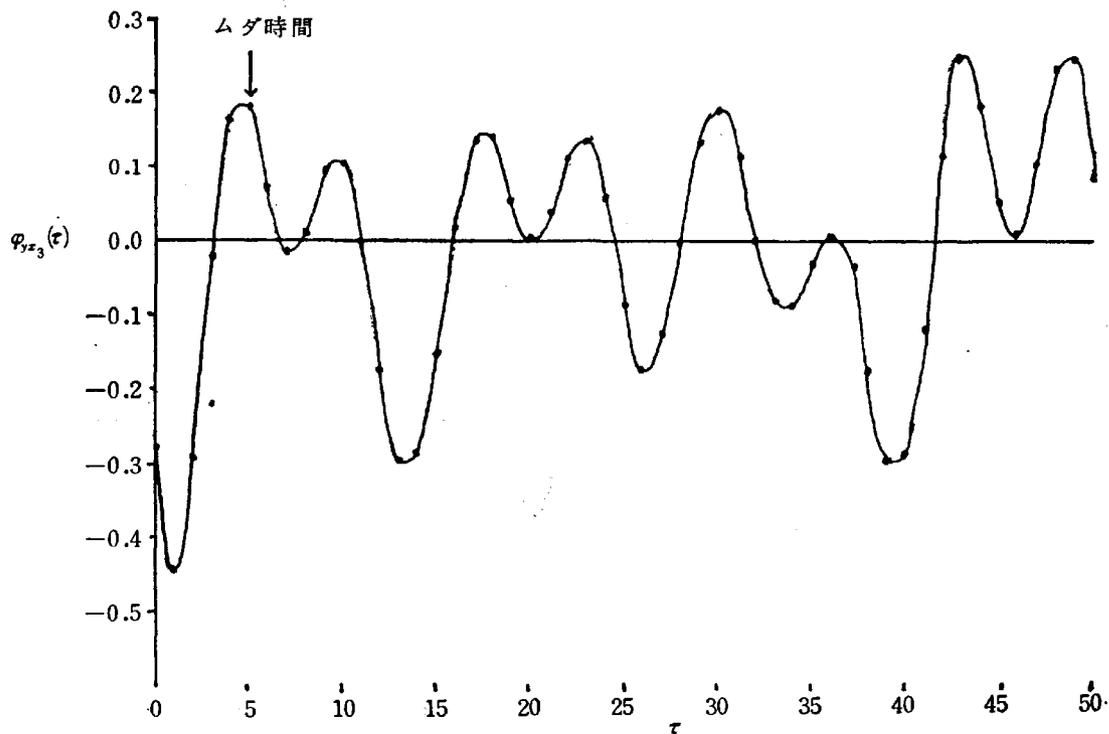
```



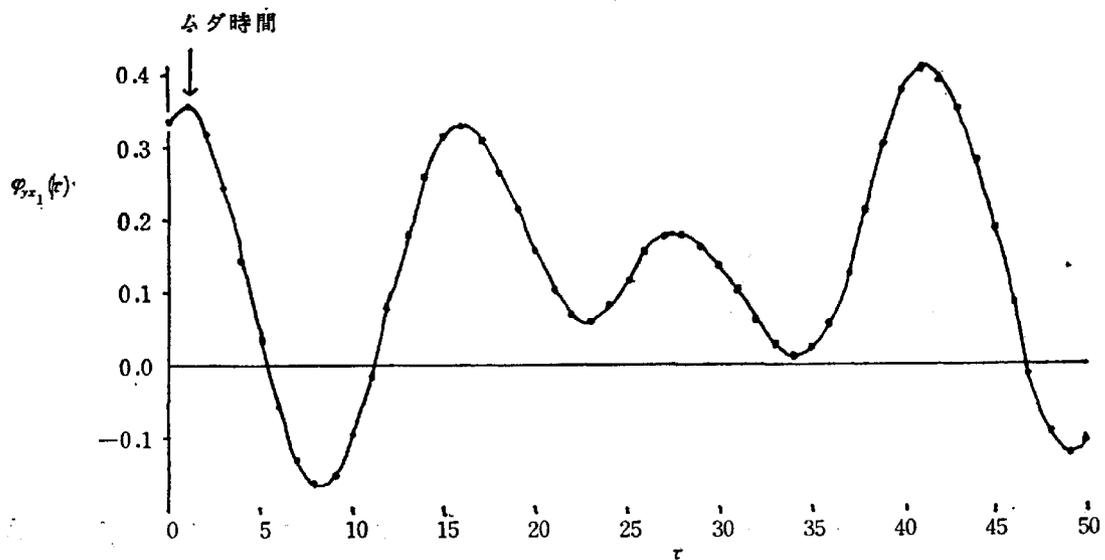
附録・図1-1: 被験者 K_u のクロス・コレログラム



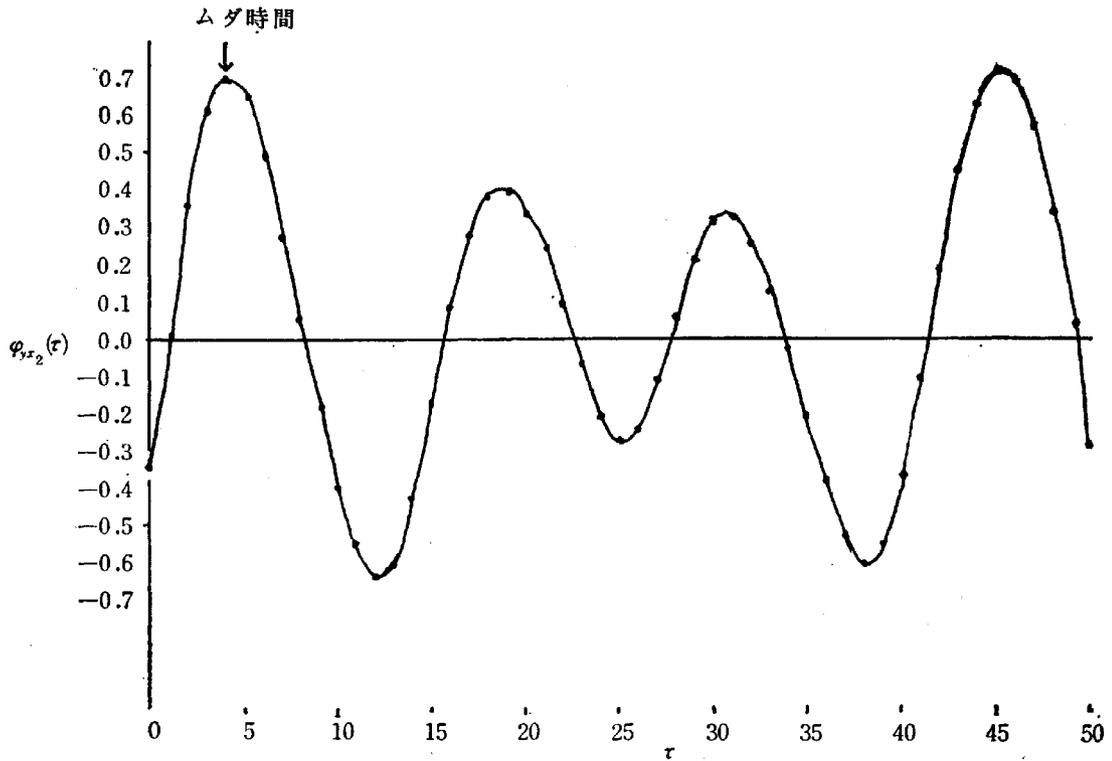
附録・図1-2: 被験者 K_u のクロス・コレログラム



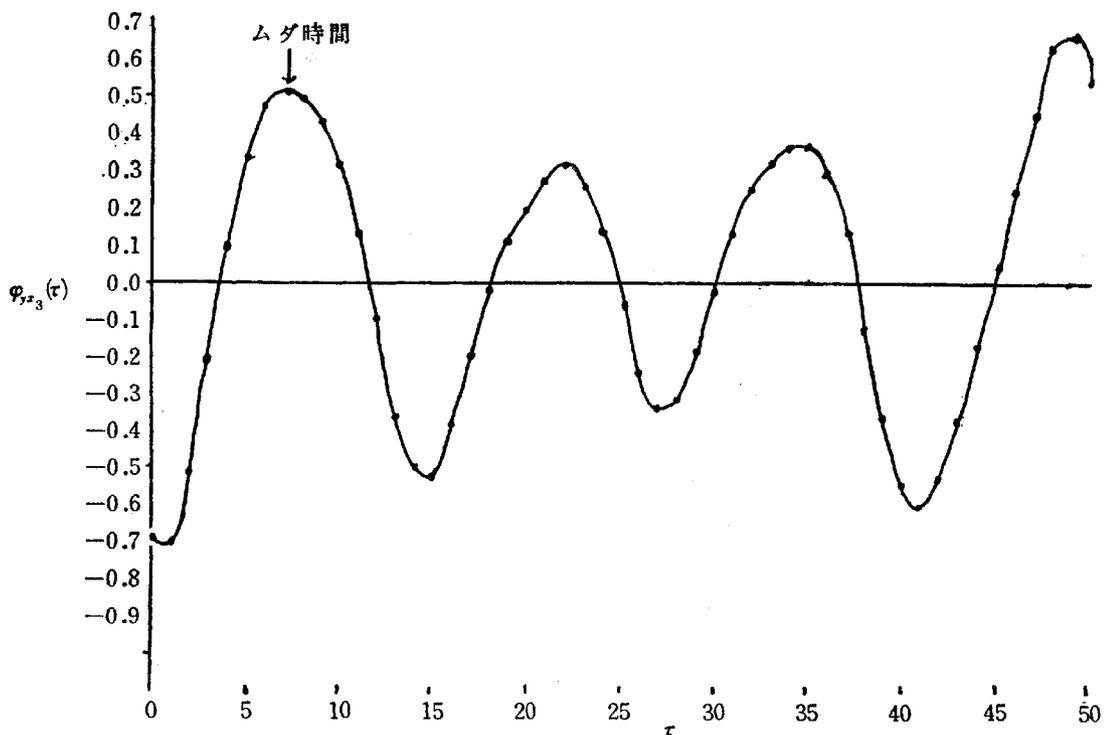
附録・図1-3; 被験者 K_u のクロス・コレログラム



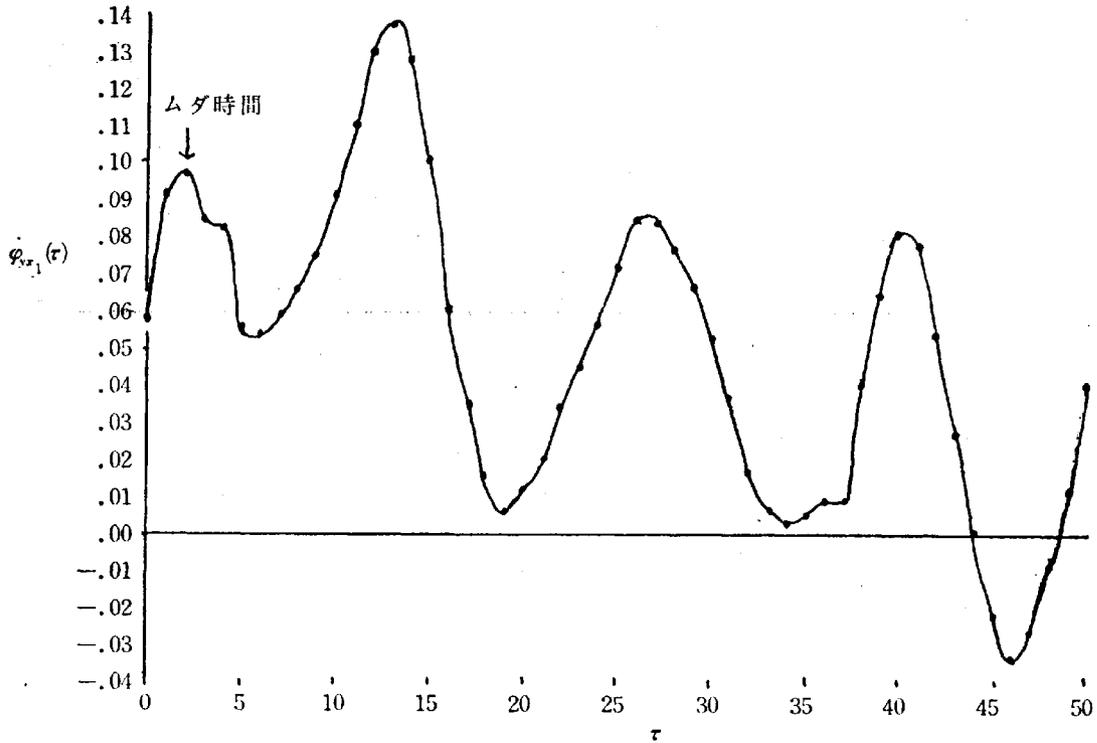
附録・図1-4; 被験者 K_0 のクロス・コレログラム



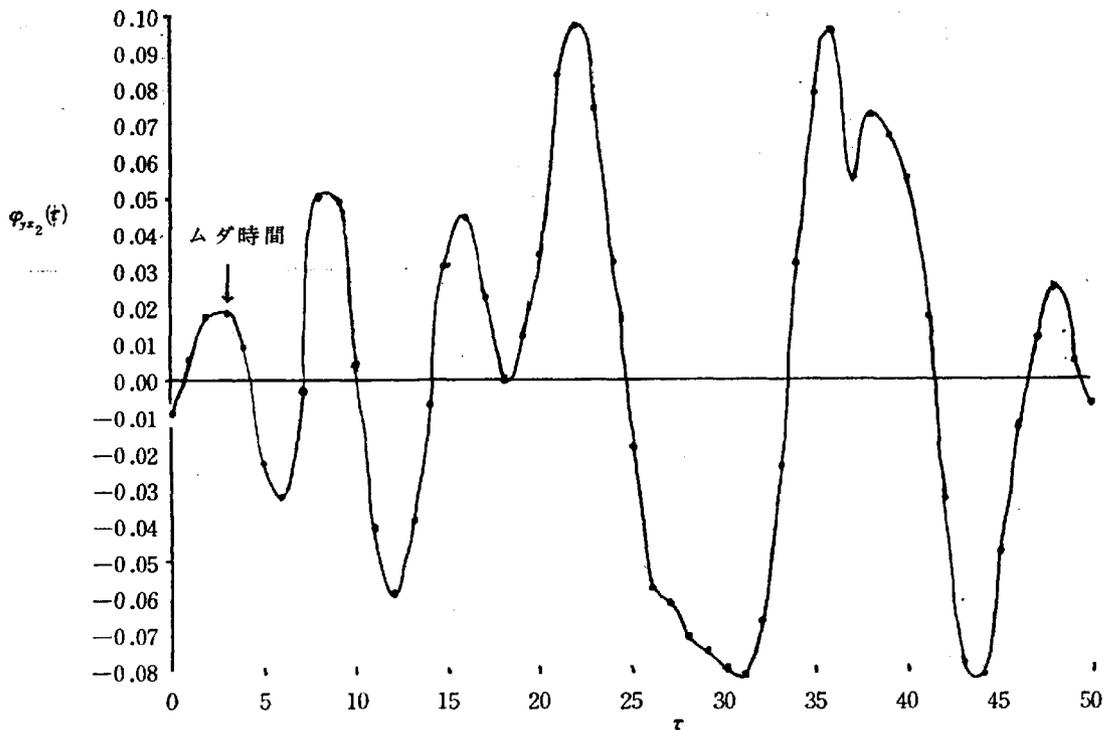
附録・図1-5; 被験者 K。のクロス・コレログラム



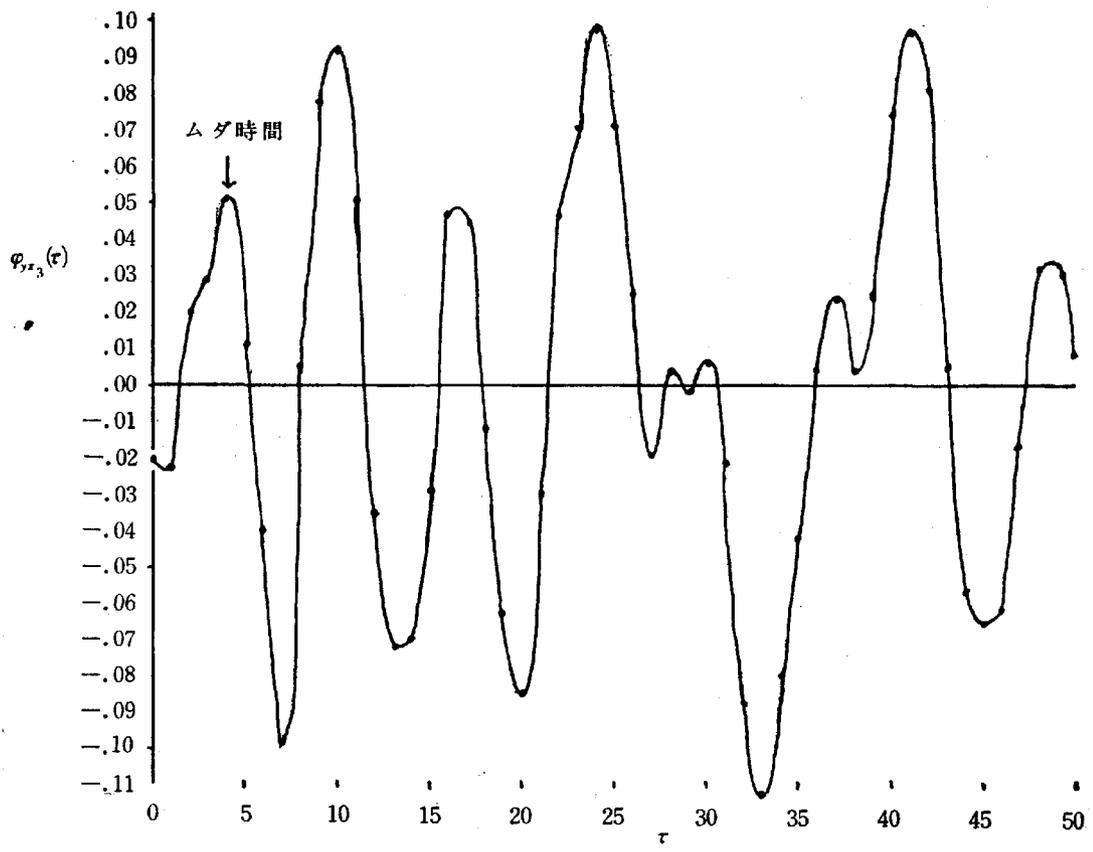
附録・図1-6; 被験者 K。のクロス・コレログラム



附録・図1-7; 被験者 I_n のクロス・コレログラム



附録・図1-8; 被験者 I_n のクロス・コレログラム



附録・図1-9: 被験者 I_n のクロス・コレログラム

附録・表 2-A; 被験者 K_u の偏差積和・偏差平方和の行列, 逆行列, 重回帰係数 (b), 偏重回帰係数 (b'), t の値, 重相関係数

$$\begin{array}{c}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 x_1 & x_2 & x_3 \\
 475925 & 33175 & -224425 \\
 33174 & 276000 & 413375 \\
 -224425 & 412275 & 8479525
 \end{pmatrix}^{-1}
 =
 \begin{pmatrix}
 0.000002162731 & -0.000000372918 & 0.000000075420 \\
 -0.0000000372917 & 0.000003972868 & -0.000000203547 \\
 0.0000000075420 & -0.000000203547 & 0.000000129850
 \end{pmatrix}$$

$$\Sigma y^2 = 199154.9 \quad \Sigma x_1 y = -5969.7 \quad \Sigma x_2 y = -24897.9 \quad \Sigma x_3 y = 13277.3$$

$$b_{y1 \cdot 23} = -0.002624631 \quad b_{y2 \cdot 13} = -0.009392416 \quad b_{y3 \cdot 12} = 0.006341715$$

$$b'_{y1 \cdot 23} = -0.004058 \quad b'_{y2 \cdot 13} = -0.01105 \quad b'_{y3 \cdot 12} = 0.04138$$

$$R = 0.1294 \quad t_{b_1} = -0.062 \quad t_{b_2} = -0.164 \quad t_{b_3} = 0.614$$

附録・表 2-B; 被験者 K_o の偏差積和・偏差平方和の行列, 逆行列, 重回帰係数 (b), 偏重回帰係数 (b'), t の値, 重相関係数

$$\begin{array}{c}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 x_1 & x_2 & x_3 \\
 78010.8 & -3062.2 & -200097.2 \\
 -3062.2 & 226803.6 & 272309.9 \\
 -200097.2 & 272309.9 & 5476041.9
 \end{pmatrix}^{-1}
 =
 \begin{pmatrix}
 0.000014189093 & -0.000000458293 & 0.0000000541266 \\
 -0.000000458294 & 0.000004703864 & -0.000000250658 \\
 0.0000000541266 & -0.000000250657 & 0.000000214856
 \end{pmatrix}$$

$$\Sigma y^2 = 122614.0 \quad \Sigma x_1 y = 13750.7 \quad \Sigma x_2 y = 114615.4 \quad \Sigma x_3 y = 76864.9$$

$$b_{y1 \cdot 23} = 0.184186768 \quad b_{y2 \cdot 13} = 0.513566679 \quad b_{y3 \cdot 12} = -0.004771596$$

$$b'_{y1 \cdot 23} = 0.1469 \quad b'_{y2 \cdot 13} = 0.6985 \quad b'_{y3 \cdot 12} = -0.0319$$

$$R = 0.7055 \quad t_{b_1} = 3.071^{**} \quad t_{b_2} = 14.873^{**} \quad t_{b_3} = -0.647$$

附録・表 2-C: 被験者 I_n の偏差積和・偏差平方和の行列, 逆行列, 重回帰係数 (b), 偏重回帰係数 (b'),

t の値, 重相関係数

$$\begin{array}{c}
 x_1 \\
 x_2 \\
 x_3
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 327329.1 & -7178.6 & -236592.6 \\
 -7178.6 & 235212.1 & 242240.1 \\
 -236592.6 & 242240.1 & 5708141.6
 \end{pmatrix}^{-1}
 =
 \begin{pmatrix}
 0.000003149742 & -0.000000040075 & 0.000000132252 \\
 -0.000000040075 & 0.000004446298 & -0.000000190352 \\
 0.000000132252 & -0.000000190351 & 0.000000188748
 \end{pmatrix}$$

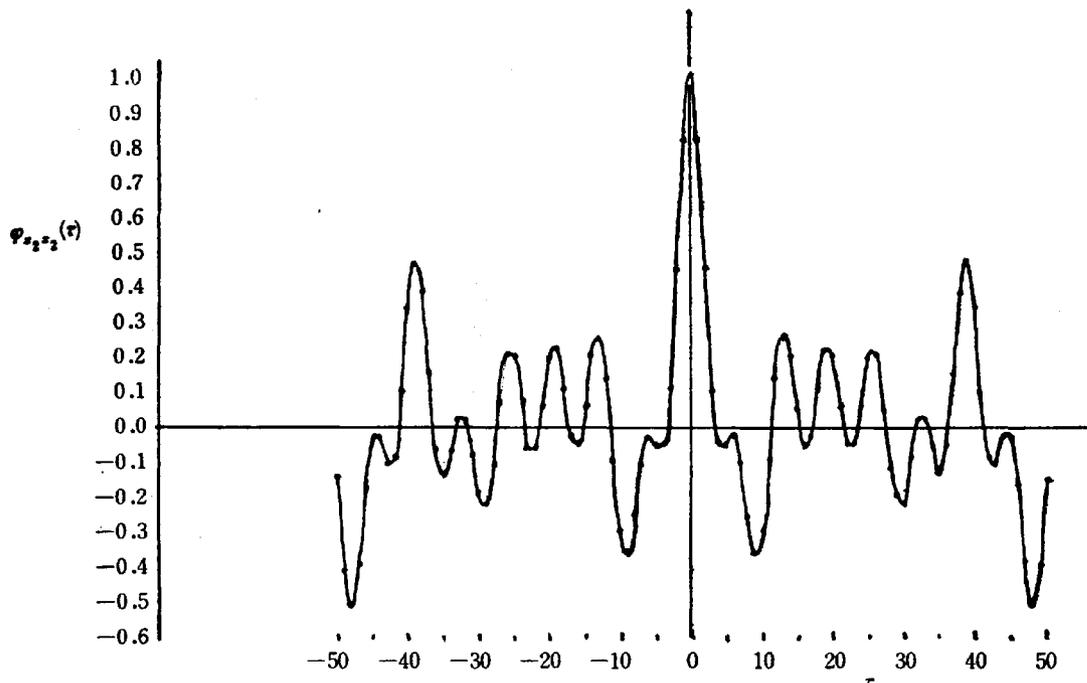
$$\begin{array}{l}
 \Sigma y = 1033769.9 \quad \Sigma x_1 y = 15445.2 \quad \Sigma x_2 y = 174123.8 \quad \Sigma x_3 y = 1264867.0 \\
 b_{y1 \cdot 23} = 0.208951574 \quad b_{y2 \cdot 13} = 0.532818639 \quad b_{y3 \cdot 12} = 0.207638962 \\
 b'_{y1 \cdot 23} = 0.1176 \quad b'_{y2 \cdot 13} = 0.2541 \quad b'_{y3 \cdot 12} = 0.4880 \\
 R = 0.5890 \quad t_{b_1} = 2.279^* \quad t_{b_2} = 4.890^{**} \quad t_{b_3} = 9.253^{**}
 \end{array}$$

附録・表 2-D: 被験者 K₀ の偏差積和・偏差平方和の行列, 逆行列, 重回帰係数 (b), 偏重回帰係数 (b'),

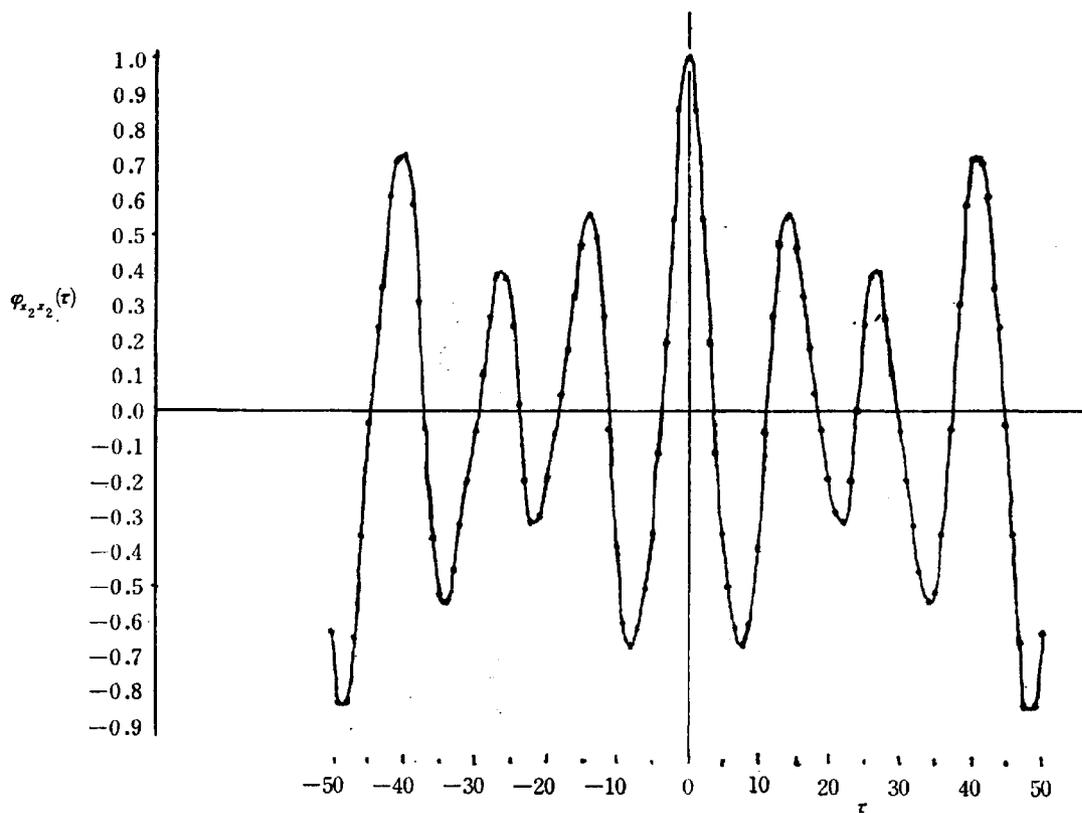
t の値, 重相関係数 (独立変数を 2 つに減らした場合)

$$\begin{array}{c}
 x_1 \\
 x_2
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 78010.8 & -3062.2 \\
 -3062.2 & 226803.6
 \end{pmatrix}^{-1}
 =
 \begin{pmatrix}
 0.000012818738 & 0.000000173164 \\
 0.000000173164 & 0.00004409101
 \end{pmatrix}$$

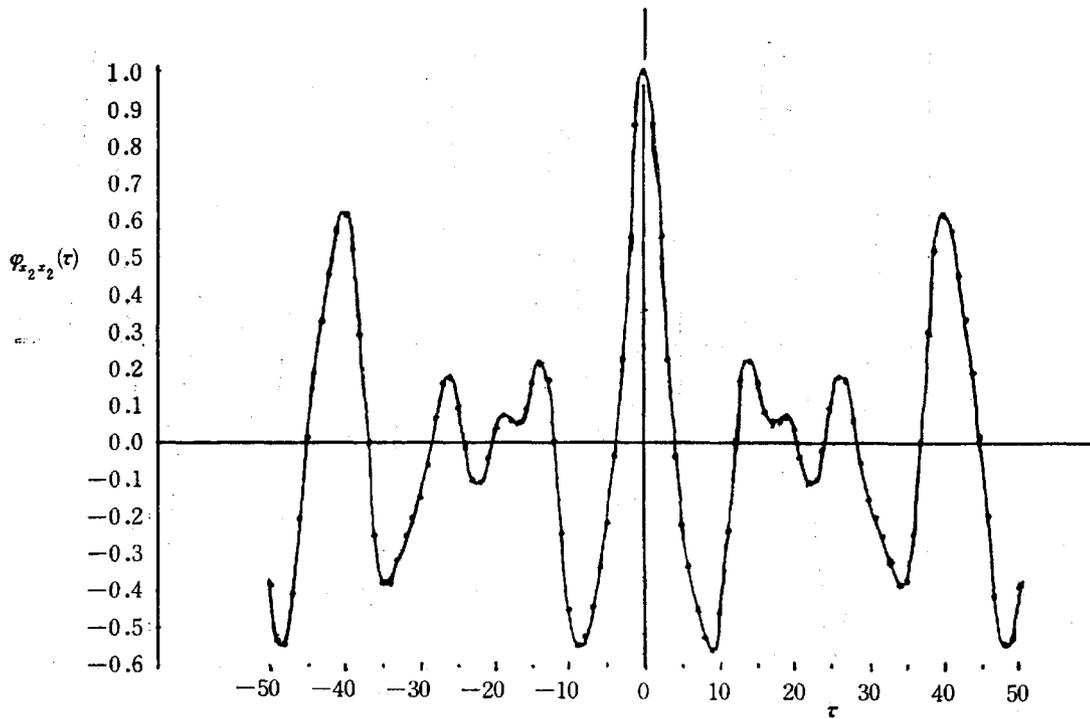
$$\begin{array}{l}
 \Sigma y^2 = 122614.0 \quad \Sigma x_1 y = 23497.0 \quad \Sigma x_2 y = 99579.9 \\
 b_{y1 \cdot 2} = 0.318445541 \quad t_{y2 \cdot 1} = 0.443126672 \\
 b'_{y1 \cdot 2} = 0.2540 \quad b'_{y2 \cdot 1} = 0.6027 \\
 R = 0.6488 \quad t_{b_1} = 5.226^{**} \quad t_{b_2} = 12.398^{**}
 \end{array}$$



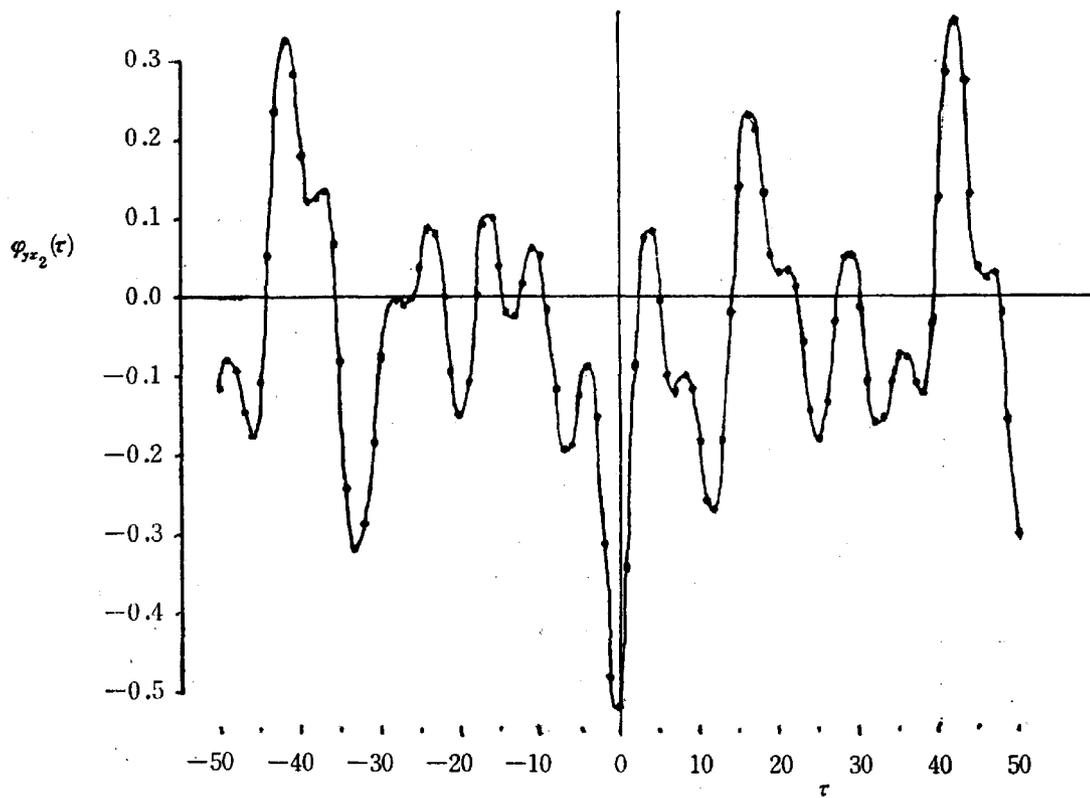
附録・図2-1: 被験者 K_u のオート・コレログラム



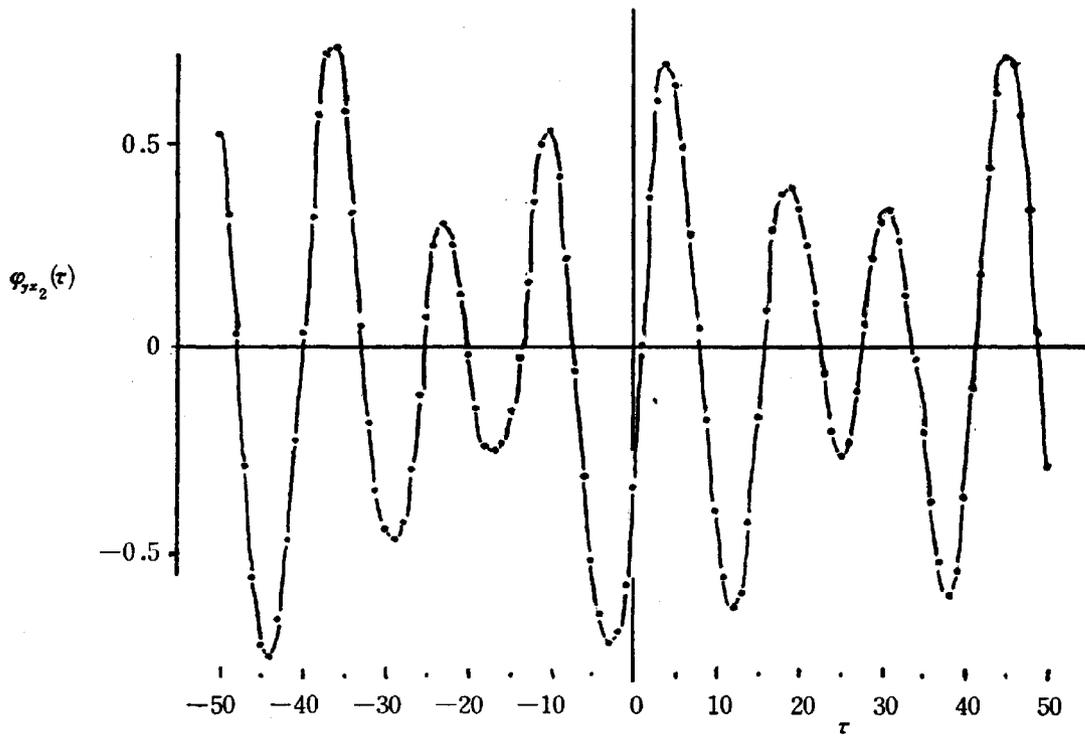
附録・図2-2: 被験者 K_o のオート・コレログラム



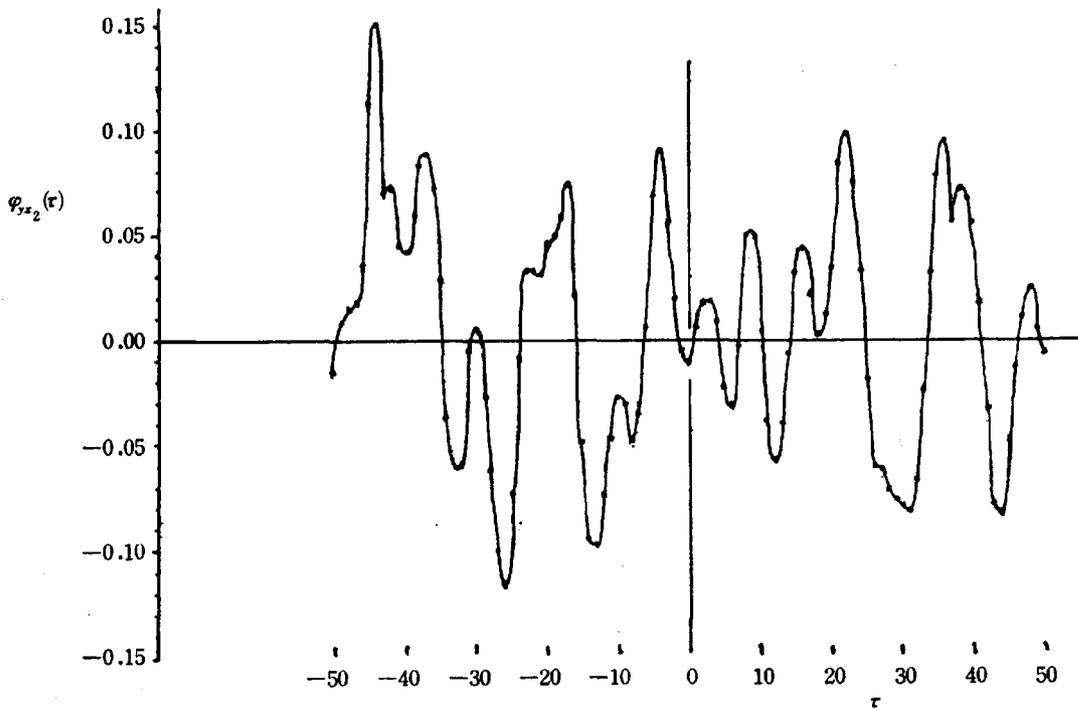
附録・図2-3; 被験者 I_n のオート・コレログラム



附録・図2-4; 被験者 K_u のクロス・コレログラム



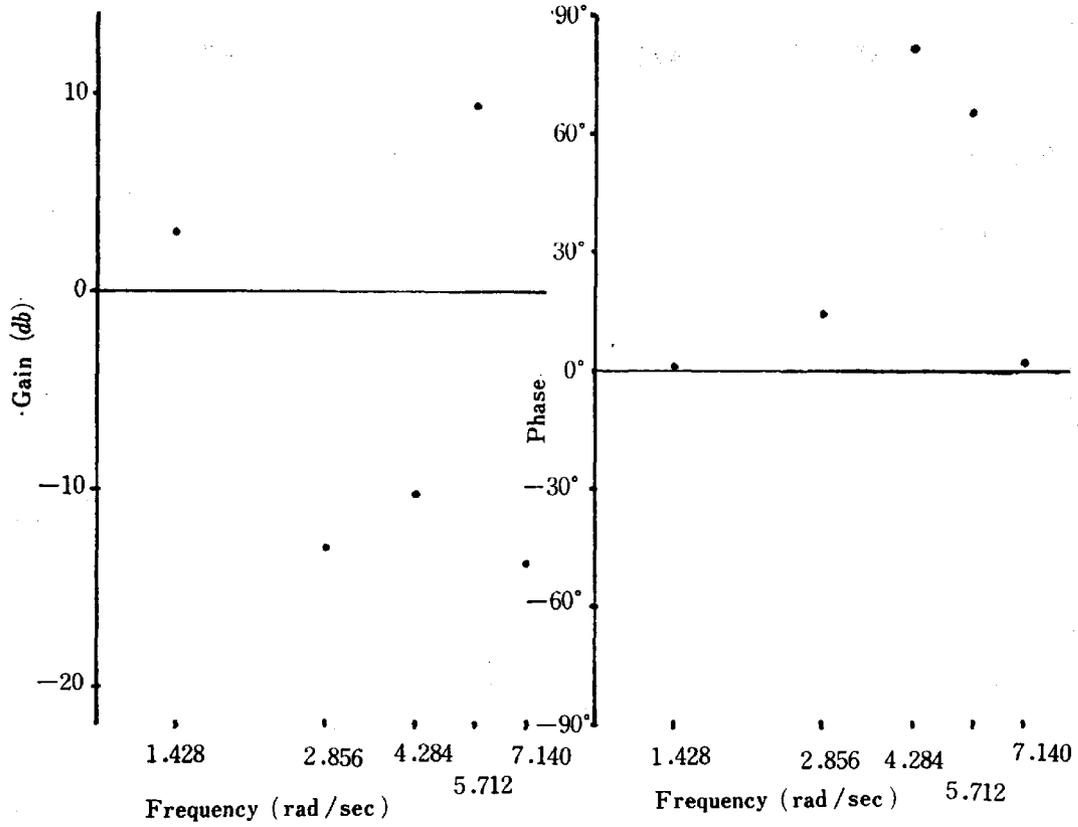
附録・図2-5; 被験者 K。のクロス・コレログラム



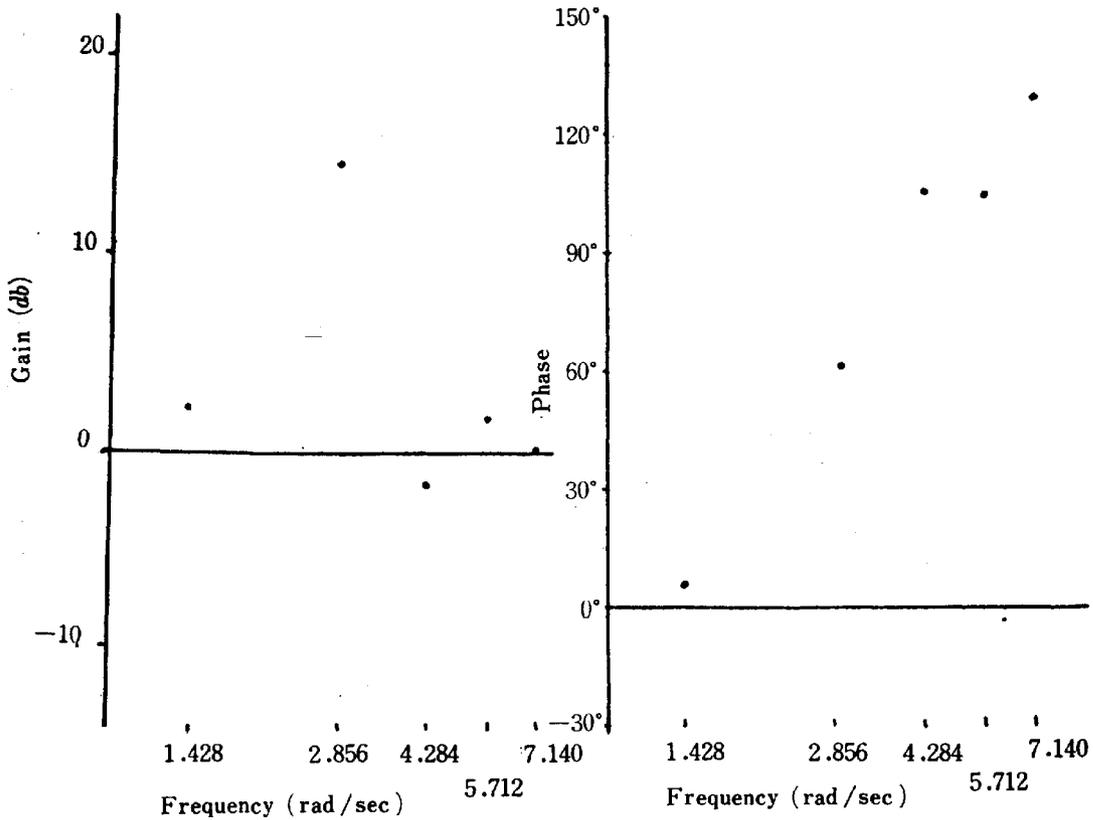
附録・図2-6; 被験者 I_n のクロス・コレログラム

附録・表3：12項調和解析により求めたフーリエ係数

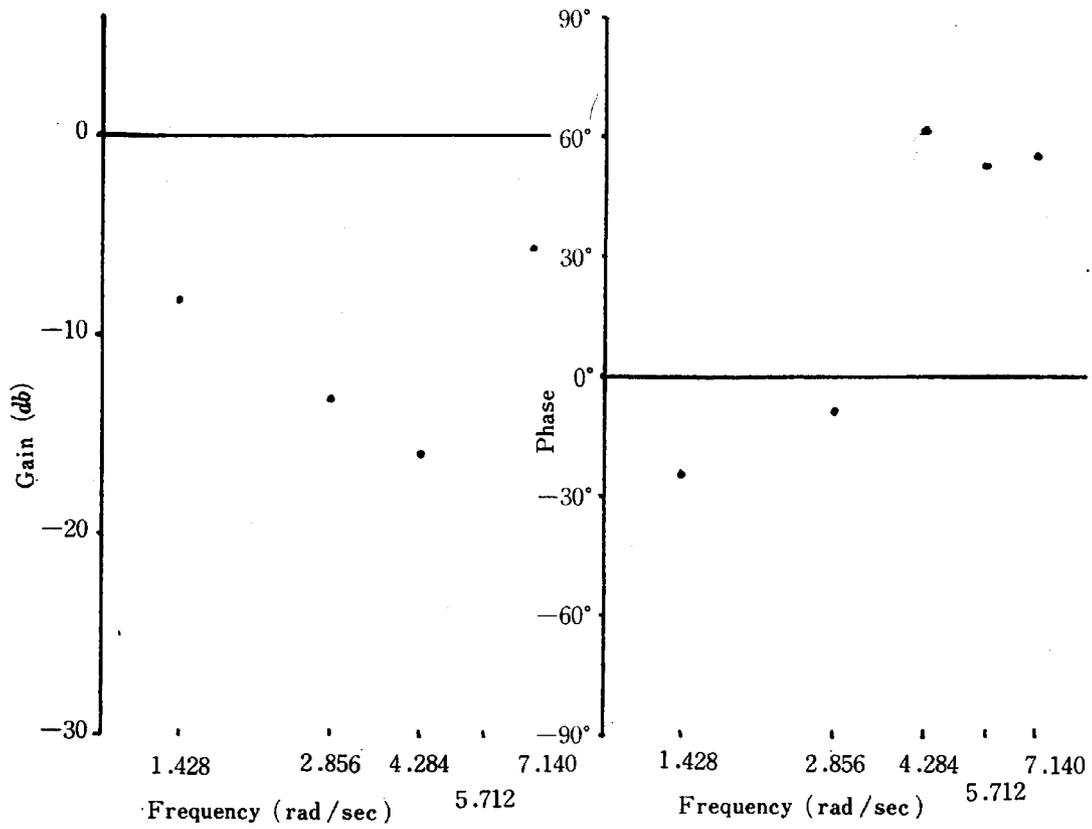
相関の種類		$\varphi_{x_2x_2}(\tau)$			$\varphi_{yx_2}(\tau)$		
被験者名		K_u	K_o	I_n	K_u	K_o	I_n
秒単位での各時刻における相関係数の値	-2.2	-0.064	-0.319	-0.112	0.008	0.255	0.033
	-1.8	0.106	0.046	0.063	0.002	-0.226	0.059
	-1.4	0.206	0.554	0.216	-0.020	-0.035	-0.093
	-1.0	-0.303	-0.392	-0.452	0.054	0.528	-0.027
	-0.6	-0.036	-0.509	-0.340	-0.192	-0.316	0.006
	-0.2	0.444	0.548	0.557	-0.314	-0.706	0.020
	0.2	0.444	0.548	0.557	-0.086	0.361	0.018
	0.6	-0.036	-0.509	-0.340	-0.100	0.492	-0.033
	1.0	-0.303	-0.392	-0.452	-0.186	-0.403	0.004
	1.4	0.206	0.554	0.216	-0.021	-0.434	-0.007
	1.8	0.106	0.046	0.063	0.133	0.378	0.000
2.2	-0.064	-0.319	-0.112	0.012	0.099	0.098	
フーリエ係数	a_0	0.0588	-0.0120	-0.0113	-0.0592	-0.0005	0.0065
	a_1	-0.0832	-0.0643	-0.0605	0.1185	0.0832	0.0183
	a_2	0.1193	0.0168	0.1703	-0.0297	0.0900	0.0332
	a_3	-0.1930	-0.3947	-0.2900	-0.0662	-0.1947	0.0197
	a_4	0.0120	0.1098	0.0637	0.0480	0.1780	-0.0022
	a_5	0.0225	0.0257	0.0162	-0.0052	0.0585	-0.0307
	a_6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0020	0.0405	-0.0118
	b_1	0.0223	0.0173	0.0162	-0.0292	-0.0135	-0.0153
	b_2	-0.0688	-0.0095	-0.0982	0.0083	0.0537	-0.0270
	b_3	0.1930	0.3947	0.2900	-0.0498	-0.4140	0.0057
	b_4	-0.0205	-0.1898	-0.1102	0.0507	0.1980	0.0003
b_5	-0.0837	-0.0957	-0.0602	0.0168	0.0805	0.0110	



附録・図3-A; 被験者 K_u の開ループ周波数特性



附録・図3-B; 被験者 K_0 の開ループ周波数特性



附録・図3-C: 被験者 I_n の開ループ周波数特性