

コンテナ船あめりか丸による北太平洋航海性能試験 (第3報)

小川陽弘*・大津皓平**

A Seakeeping Test on a Container Ship "America-maru" on the North Pacific Ocean (Part 3)

by
Akihiro Ogawa and Kohei Ohtsu

Summary

This is the last report in series ones on the seakeeping test in the 25th voyage of a container ship "America-maru" of Mitsui-O.S.K. Lines Ltd. on the North Pacific Ocean. As we mentioned in the former reports¹⁾²⁾ on this voyage, roll, pitch, yaw, lateral and vertical accelerations at F.P., longitudinal acceleration at the navigation bridge and rudder angle were measured and recorded on a magnetic analogue data recorder.

After these data were converted into digital ones by an A-D converter, firstly we examined the analysis what we called "statistical analysis", namely the fitting to the Rayleigh distribution of amplitude frequencies and mean periods in their time variant records. Secondly we analyzed them applying ordinary "power spectra" method. Finally we tried to apply the well known "multiple input analysis" introduced by L.J. Tick³⁾, H. Akaike⁴⁾, Y. Yamanouchi⁷⁾ and others. In this analysis, we mainly took aim at the yaw and the lateral acceleration at F.P. as the output of the system.

These data processing and various calculations were executed almost automatically on a digital computer.

We can summarize the analyzed results as follows.

(1) In order to avoid a heavy roll in a rough sea, it is very effective to reduce speed or to alternate course to some moderate value.

(2) An anti-rolling tank (A.R.T.) is effective, but users must use it with due regard to the ship's encountering period with waves.

(3) The radius of gyration of roll is estimated to be $(0.67\sim 0.70)B/2$. Where B denotes the breadth of this ship.

(4) The frequency distribution of full amplitudes of the vertical acceleration at F.P. may be approximated to the Rayleigh distribution. And also, we can obtain natural period of pitch from its distribution.

(5) The longitudinal acceleration at the navigation bridge in a head sea condition becomes about 0.3 times as much as the vertical one at F.P..

(6) In the so-called statistical analysis, we can estimate the natural period of pitch, but not

* 運動性能部 原稿受付 昭和47年5月1日

** 東京商船大学 (昭和46年4月~47年3月, 船研運動性能部)

of roll.

(7) The record of pitch represents the encountering state better than the other modes of motions.

(8) On navigation using an auto-pilot, frequent full amplitude of rudder angle is nearly about 10 degrees in a rough sea and 2-3 degrees in a moderate sea, but even in the former case, the maximum full amplitude does not exceed 20 degrees.

(9) Generally, the setting value of auto-pilot has indirect influence to the yaw angle.

(10) The relation between the standard deviation of power spectrum and the mean full amplitude \bar{H} may correspond approximately to that of the Rayleigh distribution.

(11) In order to represent the mean period of zero crossing, T_{02s} , which is obtained from the second order moment of spectrum, is suitable, though T_{01s} , from the first order moment, does not make so much difference.

(12) According to the multiple input analysis with regard to the lateral acceleration at F.P. and yaw as the outputs, the assumed linear relations between inputs and outputs are very strong at the neighbour of the peaks of power spectra.

(13) The roll contributes strongly to the lateral acceleration, whether the anti-rolling tank acts on or not.

(14) If we put the effect of the feedback loop between rudder angle and yaw out of consideration, it can be said that the rudder angle contributes most strongly to the yaw.

目 次

1. はじめに.....	28	3.8 解析値間の関係および解析法に関する考察.....	33
2. 解析の概要.....	29	4. 船首横加速度および Yaw に関する多入力スペクトラム解析.....	34
3. 船体運動のスペクトラムおよび統計解析.....	29	4.1 多入力スペクトラム解析法.....	34
3.1 スペクトラム解析結果.....	29	4.2 解析の手順.....	35
3.2 統計解析結果.....	29	4.3 解析の結果.....	35
3.3 スペクトラム解析値と統計解析値の比較.....	30	4.3.1 船首横加速度が出力の場合.....	36
3.4 往航時の海象と運動.....	30	4.3.2 Yaw が出力の場合.....	37
3.5 Pitch, Roll および船首加速度.....	30	4.3.3 まとめ.....	38
3.6 Yaw と舵角.....	31	5. 結 論.....	38
3.6.1 Yaw と舵角の特徴.....	31	6. おわりに.....	38
3.6.2 オートパイロットの調整について.....	31	参考文献.....	38
3.6.3 手動操舵について.....	32		
3.7 船橋における前後加速度等.....	32		

1. はじめに

昭和45年12月および46年1月に行なわれた、PSW航路のコンテナ船あめりか丸(大阪商船三井船舶所属)による実船計測については、すでに第1報¹⁾および第2報²⁾にその経緯の詳細と、計測結果の全般的な解析・考察とを報告した。

その後、昭和46年度には、日本造船研究協会に新らしく第125研究部会(SR-125)が設けられ、その中

に45年度に第108部会で行なわれた、同航路における6隻の同型コンテナ船の、延べ9航海に及ぶ実船計測結果(第1報および造船研究資料³⁾参照)の解析・とりまとめを行なう目的で、第2小委員会が置かれた。そこではPitch, Roll, 加速度等の詳細な統計的解析が行なわれ、この作業は46年度中に完了し報告書⁴⁾が出されている。

もちろん、当船舶技術研究所は同協会と共同研究を継続しており、あめりか丸関係のデータも上記報告の

中に含まれているので、ここでは長期分布的な解析は SR-125 の報告にゆずって、従来計測・解析されることの比較的少なかった Yaw と舵角、それに横加速度の関係に多少重点を置いて、スペクトラム解析および多入力解析等の統計的手法を用いて検討した。

2. 解析の概要

解析の対象としたのは、第1報で報告したあめりか丸の第25次航(45年12月)の記録である。特に詳細に検討したのは比較的荒れた場合で良好な記録が得られているものから、なるべく連続して選んだものである。

往航時のものは、12月2日～5日の T. No. 1～3, 6～13 を中心として、主として舵角と Yaw の関係について、復航時のものは12月15, 16日の T. No. 30～35 の主として船橋の前後加速度と船首上下加速度および Pitch との関係について、いずれもスペクトラム解析および全振幅の頻度分布の Rayleigh 分布へのあてはめと平均周期とによって比較した。便宜上後二者を統計解析と称してスペクトラム解析と区別した。

また、往航時の記録については、Pitch, Roll, 舵角を入力とし、Yaw を出力とする場合と、これら4者を入力として船首横加速度を出力とする場合とについて、それぞれ多入力解析を行ない、これらの相関関係を調べるとともに、多入力解析の方法自体の検討も行った。

船の要目、航路、計測項目、記録の方法等については、すでに第1報¹⁾に詳細に報告してあるので省略するが、計測時の海象および船の状態については、便宜上第1報に所載のものを Fig. 2.1(a), (b) および Fig. 2.2 (a), (b) にそれぞれ再掲した。

解析はアナログのデータレコーダの記録を AD 変換器により紙テープに出力し、これを電子計算機で処理して行なった。Sampling time は 1.0 秒、データ数は T. No. 1 (800), T. No. 2 (743) を除き 896 である。すべての解析はこのデジタル記録の平均値をゼロレベルとして行なっている。

スペクトラム解析および多入力解析ではラグ数はすべて 90 とし、Window は W_2 を用いた。スペクトラムの分散等を求めるための積分周波数範囲は、ある低周波領域で、スペクトラムが谷になる所 ω_L から、パワーの増加がほとんどなくなる周波数 ω_H までを、プログラム上で自動的に選択して決めるようにした。

統計解析の方法は、前記の SR-125 第2小委員会で標準として採用した方法⁴⁾に従った。これは1つは前記の平均値をクロスする最大値および最小値の間の全振幅の数値を解析するもので、バンド幅パラメータ $\epsilon = 0$ の時に、この分布は近似的に Rayleigh 分布になるとされている。他の1つはゼロクロス(厳密には平均値クロス)の平均周期および Peak to peak の平均周期を計算するものである。

多入力解析については後に4章で説明する。

3. 船体運動のスペクトラムおよび統計解析

3.1 スペクトラム解析結果

往航時のデジタル記録から計算して得られた、Pitch, Roll, Yaw, 舵角, F.P. における上下加速度および左右加速度のパワースペクトラム密度関数(スペクトラム)および自己相関関数の例を Fig. 3.1 (a), (b)～Fig. 3.6 (a), (b) に示す。

スペクトラムの標準偏差 σ_s は、前記の積分周波数範囲 $\omega_L \sim \omega_H$ に関して、

$$\sigma_s^2 = 2 \int_{\omega_L}^{\omega_H} S(\omega) d\omega \quad (3.1)$$

によって計算している。この σ_s の値および積分範囲を図中に示した。なお分散 σ_s^2 はパワーに等しく、また $E_0 = 2\sigma_s^2$ である。理論的には $\omega_L = 0$, $\omega_H = \infty$ にとるべきであるが、波による動揺等の解析の意味で積分範囲を限定したものである。

3.2 統計解析結果

前項のスペクトラム解析に対応する往航時のデータの両振幅の頻度分布解析の結果を Fig. 3.7～3.12 に示す。頻度分布は、最大値付近の適当な値までを10等分して、各区間に入る両振幅の数を百分率で表わしたものである。

全振幅 H を Rayleigh 分布の形に表わせば、

$$p(H) = \frac{H}{4\sigma^2} \exp\left(-\frac{H^2}{8\sigma^2}\right) \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで σ^2 は半振幅の分散であり、理論的には前項の σ_s は $\epsilon = 0$ の場合にはこの σ と等しくなるはずのものである。なお全振幅の平均値 \bar{H} , 2乗平均値 H_{rms} は Rayleigh 分布ではそれぞれ、

$$\bar{H} = \sqrt{2\pi} \sigma \quad (3.3)$$

$$H_{rms} = 2\sqrt{2} \sigma \quad (3.4)$$

となる。Fig. 3.7～3.12 にはデータの全振幅から求めた標準偏差 σ を用いて(3.2)式で計算した Rayleigh 分布の曲線を示した。(3.2)式の最大値は $H = 2\sigma$ の所

にあるが、比較のために (3.4) 式の関係から全振幅の H_{rms} を用いて計算した標準偏差 σ_r の 2 倍、

$$2\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{2}} H_{rms} \quad (3.5)$$

の値をも同図中に示した。

有義値 $H_{1/3}$, $1/10$ 最高平均値 $H_{1/10}$ 等は $\epsilon=0$ の Rayleigh 分布では、

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 1.598\bar{H} \\ H_{1/10} &= 2.032\bar{H} \\ H_{rms} &= 1.129\bar{H} \\ \sigma &= 0.399\bar{H} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

の関係がある。Fig. 3.13~Fig. 3.18 は往復航の全データの統計値の間のこれらの関係を示すものである。ただし標準偏差はスペクトラム解析値 σ_s をプロットした。最大値は個々のデータ数によって異なるが、今回のデータ数が 100~300 の程度であることを考慮すれば、ごく大まかに、

$$H_{max} \doteq 2.5\bar{H} \quad (3.7)$$

の程度になるので、この線も参考のために記入した。

3.3 スペクトラム解析値と統計解析値の比較

スペクトラム解析ではゼロクロス平均周期は、

$$T_{02s} = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3.8)$$

で求められるが、狭帯域の場合との類推から、

$$T_{01s} = 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_1}} \quad (3.9)$$

と表わすこともできる。また Peak to Peak の平均周期は、

$$T_{ms} = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (3.10)$$

で表わされる。ここで $m_n (n=0, 1, 2, 4)$ はスペクトラムの $\omega=0$ に関する n 次のモーメントである。

Fig. 3.19~Fig. 3.24 は上記の平均周期と、生データから直接統計解析して得られたゼロクロス平均周期 \bar{T}_0 、および Peak to Peak の平均周期 \bar{T}_m との関係調べたものである。

Fig. 3.25 には前記の標準偏差 σ_s と σ_r の間関係を、Fig. 3.26 にはバンド幅パラメータ ϵ_s と ϵ_r の間関係を示す。

バンド幅パラメータ ϵ_s は、スペクトラム解析では

$$\epsilon_s = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (3.11)$$

で表わされるが、統計解析ではこれとの類推から、

(176)

$$\epsilon_r = \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{T}_m}{\bar{T}_0}\right)^2} \quad (3.12)$$

によって求めた値である。

3.4 往航時の海象と運動

Fig. 3.1~Fig. 3.12 に示したのは、往航時の比較的荒れた状況の時を中心としてほぼ連続的に選んだものである。この時の海象は (詳細は Fig. 2.1, 2.2 および第 1 報¹⁾ 参照), T. No. 6~11 が非常に荒れた状態で、うねり波高 5~6 m, 風浪波高約 3 m, 相対風速 20~30 kt, いずれもほぼ右横からのもので、大体似たような状況であった。特に T. No. 6 では約 8 kt に減速し、変針・手動操舵を行なっている。

T. No. 2~3, 12~13 が中位でややうねりの多い状態、T. No. 1 と 17 以後は比較的穏やかな状態であり、特に 20 番台のものは極めて静穏な海象下のものであって、データとしての重要性はあまりないが、参考のために付け加えたものである。

一般的に、Fig. 3.7~3.12 の全振幅の頻度分布を見ると、上記の海象を比較的良く表わしているように見える。この点舵角だけは唯一の例外である。またこれに伴って Yaw にも特徴が現われている。そこで Yaw と舵角については、Pitch, Roll および加速度とは別に詳細に考察することとした。

なお、海象条件が変化に富んでいるのに対してデータ数が少ないため、海象と運動等の関係を有意な程度にまとめることは不可能であり、同じ理由から、理論計算値との比較も困難なので、これらについては割愛した。

3.5 Pitch, Roll および船首加速度

まず、最も目立つのは Roll のスペクトラムのピークがいずれも $\omega \doteq 0.33 \text{ sec}^{-1}$ ($T_R \doteq 19 \text{ sec}$) の所にあることで、ここに固有周期があったことが明らかである。往航の $G_0 M$ は出航時 78 cm であったから、横揺の慣動半径を K , 固有周期を、

$$T_{R_0} = 2\pi K / \sqrt{g G_0 M} \quad (3.13)$$

のように表わせれば、 $K / \frac{B}{2} \doteq 0.67$ となる。

T. No. 11 と T. No. 12 は減揺水槽 (A.R.T. と略記) の効果を比較したもので、両者は約 1.5 時間の差で計測されたものであるが、海象はほぼ同様と見なせるような状況であったから、 σ_s が 3/4 に減っているということは、それだけ効果があったと見て良いであろう。

A.R.T. 使用中の T. No. 12, 13 ではスペクトラム

のピークがやや低い周波数の方へずれているが、Pitch のスペクトラムから察するに、出会周波数はこのあたりでは $\omega_e \doteq 0.23 \text{ sec}^{-1}$ ($T_e \doteq 27 \text{ sec}$) 程度であるから、A.R.T. によって Roll のピークがつぶれた一方で、出会周波数の関係ではかえって不利になって、効果がある程度減殺されていることが推察される。なお Fig. 3.8 の T. No. 12 では T. No. 11 にくらべて 10° 以上の振幅の成分が相当に減少し、逆に小振幅成分が増えているが、最大振幅はそれほど減っていない。この比較がどれほど意味のあるものかは不明であるが、A.R.T. の性質の一面を表わしているように思われる。

次に興味のあるのが T. No. 6 の場合である。この時は最も荒れた状態で、船速は約 8 kt に減速し、しかも変針している。この結果を Fig. 3.1 (a), 3.2 (a), および Fig. 3.7, 3.8 で見ると、Pitch は往航時の最大を記録しているのに対して Roll は極めて少なくなっている。このことから上記の減速・変針が過大な Roll を防止するのに非常に効果があったことが想像できる。出会周期としてはむしろ Pitch の固有周期（推定 7 秒前後）に近づくと、最大両振幅も 10° 位になるが操船者としては、この程度までならば Pitch に関係なく Roll を極力軽減したいということであろう。

F. P. における加速度は上下方向と左右方向とでスペクトラムの形が全く異なる。すなわち、横加速度のスペクトラムは Roll のそれと非常によく似ているが、上下加速度は Pitch のそれと似ていない。このことから横加速度は Roll による傾斜角がその主因となって生じていることが認められるが、これについては後に多入力解析の項で再考する。

上下加速度は Pitch および Heave によって起こるものであるが、出会周期と無関係にこれらの固有周期付近の比較的高周波の成分が多い。このため全振幅の頻度分布は割合に良くまとまっており、Rayleigh 分布への適合性も他の運動と較べて最も良い。これについてはまた後に 3.8 節でふれる。

3.6 Yaw と舵角

3.6.1 Yaw と舵角の特徴

船は非常に荒れた場合を除き航海中ほとんどオートパイロットによる自動操舵を行なっている。このため非常に長周期の Yawing を生じていることは、良く知られていることである。波浪中ではこの他に波の力を受けて、Pitch, Roll 等のモードと同程度の動揺もする。

これをスペクトラムの形で見ると、Fig. 3.3, 3.4 に示されるように、双峯型になるのが代表的なもので、

状況に応じてどちらかのピークが際立って高くなったり、一方が全く無くなってしまったりもする。ここで、Yaw と舵角とはオートパイロットを通じて feed back 系を構成しているので、これらの記録をそのままスペクトラム解析することには多少問題があるが、他の運動との関係もあるので、一応同一方法で解析した。

長短 2 つの周期の運動が合成されている様子は、コレログラムによってもわかる。Pitch, Roll 等の運動には、このような長周期の成分は見られないことを思えば、Yaw と舵角の特殊性が理解されよう。このことは前述の feed back のことも含めて、Yaw や舵角の解析には、Pitch, Roll 等と全く同じ解析法が、かならずしも適していないであろうことを予想させる。

Fig. 3.9, 3.10 を見るとこのことは裏付けられているようであり、全振幅の頻度分布の Rayleigh 分布への適合性は他の運動と比較して非常に悪い。特に自動操舵を行なっている T. No. 6 では最も著しい。

船体運動の頻度分布の図が海象と比較的良く対応していることは前にも述べたが、Yaw の場合も同様のことが言える。しかし Fig. 3.10 の舵角では、この対応はそれほどはっきりしない。ただ、荒れている時は 10° 前後の舵角（両振幅）の成分が多く、そうでない時は $2^\circ \sim 3^\circ$ の成分が非常に多くなっている。Fig. 3.10 で T. No. 7, 8 だけ両振幅が 10° 以内に納まっているが、これはオートパイロットの設定が他と違うためである。これについては次に述べる。

3.6.2 オートパイロットの調整について

本船の平常航海中のオートパイロットの設定は、舵角調整 3, 天候調整 1.7 であるが、T. No. 7, 8 ではこれが共に 1 であった。たまたま T. No. 6 の時には減速・自動操舵するような状況であったから、そのとき何らかの目的でどちらも 1 に調整され、T. No. 7, 8 の間そのままにされていたと推定される。そのため（主として天候調整が小さくなったことが原因と思われるが）この時の舵角の全振幅の頻度分布が、振幅の小さい方へ片寄っている。

この影響を調べるために、ほとんど同様の海象と見られる T. No. 6~11 の間について、周期、振幅等の変化を調べたものが Fig. 3.27 である。

図によると、T. No. 6 では自動操舵しているのはこれは別として、T. No. 7, 8 の舵角では他とくらべて次のような特徴が見られる。

- (a) \bar{T}_0 は小さいが \bar{T}_m は変らない。
- (b) σ_r と \bar{H} は小さい。

(c) スペクトラム解析による周期は変わらない。

(d) σ_s は小さい。

これらを総合して考えると、T. No. 7, 8 では小振幅で短周期の操舵をしており、T. No. 9 以降ではこれにさらに長周期の操舵が加わった形になっていると考えられる。スペクトラム解析でこの周期の差違が出てこないのは、長周期成分をカットして積分しているためであろう。

オートパイロットの制限舵角は $\pm 10^\circ$ に設定されていたが、全振幅の頻度分布で見るとそこまで操舵されていなかったことがわかる。これは波浪中では波との出会周期による運動の影響が大きく、また波の少ない時はもちろん大舵角をとる必要がなかったために、いづれにしても制限舵角にかかる所まで行かなかったものであろう。

なお、オートパイロットの舵角調整は、単なる角度比例制御ではなく、電気回路的に Yaw rate 制御が入るようになってきている。このことは Yaw と舵角のアナログ記録を見ても推察できる (第1報 Fig. 9 参照)。

一方、Yaw について見ると、T. No. 7, 8 では \bar{H} と σ_r が増え、 \bar{T}_0 も増加している。すなわち、オートパイロットの調整によって舵の動きを制限した結果、かえって Yaw 振幅は増加したように見える。平均周期 \bar{T}_0 が大きくなっているのは \bar{H} が増加したことに密接な関係があるように思われる。

前にも述べたように、Yaw 振幅は大体海象に対応していることから考えて、オートパイロットの設定値は舵角にはもちろん直接影響するが、Yaw には意外に影響が少ないと言える。

3.6.3 手動操舵について

もう一つ興味のあるのが手動操舵の場合の運動である。スペクトラムの形 (Fig. 3.3(a), 3.4(a)) を見ると、Yaw も舵角も超低周波成分が圧倒的に大きく、出会周波数での運動はわからない。このことは \bar{T}_0 に最もよく現われており、Fig. 3.24, 3.27 で見ても舵角の \bar{T}_0 が極わめて大きく、それに伴って Yaw の \bar{T}_0 も相当に大きくなっている。その一方、舵角の σ_r , \bar{H} は普通の大きさで、Yaw の σ_r , \bar{H} はやや大きい。

これをアナログ記録に立ち帰って見ると、手動の場合には比較的長い周期の矩形的な操舵が行なわれており、舵角振幅は Fig. 3.10 からわかるように意識的に押さえられている。舵角の \bar{T}_m が小さいのは、このような矩形的記録を無理に曲線にあてはめて、架空のピークを作っていることによると思われる。

(178)

スペクトラム解析値は、周期・分散ともに小さくなっているが、これについては次のようなことが考えられる。まず舵角については、手動の場合の操舵角は上記のような事情があるので、低周波成分を切捨てて積分した値がどれだけの意味を持っているのか不明である。

次に Yaw については、波による動揺はやや少なくなっており、3.5 節でも述べたような操船法による減速・変針の効果が現われている。このような荒天下の動揺としては長周期成分は問題にならないから、統計解析値の平均振幅が大きいこと等はあまり気にしなくても良いと考えられ、スペクトラム解析値 ($\omega_L > 0$) が減速・変針の効果を表すものと考えられる。

3.7 船橋における前後加速度等

復航時には向い波を受けて Pitch が大きくなり、船橋での前後揺れがひどいということなので、船橋での前後加速度を記録した。Fig. 3.28~3.34 は復航時の荒天下の記録について、往航時と同様のスペクトラム解析および統計解析を行なったものである。

当時の海象は Fig. 2.1 (b), 2.2 (b) に見られるように約 2 日間荒天状況が継続し、この間 T. No. 31~34 では特に激しく、やはり多少の変針・減速を繰り返している。風・波ともに前方から受けることになるので出会周期は短くなり、Roll は少ないが Pitch は激しくなり、これに伴って船首上下加速度が大きくなる。

Fig. 3.29, 3.33 の船首上下加速度と船橋での前後加速度をくらべて見ると、非常によく一致している。この時のうねりの方向および船速等から計算すると、出会周波数は約 0.8 前後であるが、これは Pitch の固有周期にも近いので、最もシビアな条件となることがわかる。ただし、Heave の影響をほとんど受けないはずの前後加速度が、船首上下加速度と一致していることから推して、Pitch が激しかった割には Heave は大きくなかったと言える。なお Surge の影響も考えられるが、加速度の絶対値としては Pitch, Heave にくらべて非常に小さいと考えられる。

両加速度の関係をさらに詳しく見たものが Fig. 3.35 である。全振幅の 2 乗平均から求めた標準偏差 σ_r では、

$$\sigma_r (\text{Longi.}) \doteq 0.3 \sigma_r (\text{Vert.}) \quad (3.14)$$

の関係があることがわかる。スペクトラム解析の標準偏差 σ_s ではややバラツキが大きいですが、これは積分周波数範囲が一定でないことが主な原因で、値の小さい

範囲では特に記録精度の影響などもあって余計にまともらなくなるものと考えられる。 σ_s (Vert.) が 0.1g 程度以上ではやはり上記(3.14)式の関係があるものとして良いであろう。

船橋での前後加速度が船首上下加速度の 1/3 もあるということは一つの問題で、元々 1g の加速度がある所に付加的に生ずる上下加速度と違って、本来 0g の所に生ずる前後加速度はその方向が周期的に変るという意味で非常に居住性を害している。特に第 1 報でも触れたように、向い波のこのような状況の時には 2 節振動による短周期の前後加速度も加わるのでなおさらである。

出会周期が短かいため Roll は非常に少なく、これに伴って横加速度も小さい。Fig. 3.30 のスペクトラムのピークから 3.5 節と同様に慣動半径を求めると、出航時の $G_0M=96$ cm に対して $K/\frac{B}{2} \doteq 0.70$ が得られる。

3.8 解析値間の関係および解析法に関する考察

Fig. 3.13~3.18 の統計解析値を見ると、Yaw と舵角を除いては、自乗平均値 H_{rms} および有義値 $H_{1/3}$ の平均値 \bar{H} に対する関係は比較的良く $\epsilon=0$ の理論的關係と合っている。この理由については後に述べる。 $H_{1/10}$ になるとこの一致はやや悪くなるが、これは全振幅のデータ数が観測時間の制限から有限であるためである。最大値と平均値の関係も Pitch, Roll, 上下加速度では比較的良くまとまっている。その係数もこのような短期分布では最大 3~3.5 の程度と考えると良いようである。

同図中にはまたスペクトラム解析値 σ_s もプロットしてある。これによれば σ_s も Rayleigh 分布の関係にほぼ合っていることがわかる。

Yaw と舵角については 3.6 節で述べたような特殊性から、概してまとまりが悪いことは容易に理解できるであろう。

横加速度のこの関係で、比較的平均値の大きい所に H_{max} 等が理論値よりも遙かに大きくなる場合があるが、これは Fig. 3.12 のヒストグラムで分るように、大振幅の所の頻度がやや多いためである。Roll のヒストグラム (Fig. 3.8) にはこれほど顕著な傾向が見られないことから、これは操舵による影響が時々付加されて、異常値を生ずるためと考えられる。前に 3.5 節でスペクトラムの形は Roll と横加速度とが似ていることを指摘したが、このあたりにも両解析法の特徴が

現われている。

なお、全振幅の頻度の Rayleigh 分布へのあてはめには、本論ではデータの平均値に対する標準偏差 σ を用いたが、Fig. 3.7~3.12, Fig. 3.32~3.34 等の結果を見ると σ よりも σ_r を使った方が適合性が良くなるように思われる。

Fig. 3.19~3.24 は周期の解析値間の関係である。まず \bar{T}_0 に対応するスペクトラム解析値としては、やはり T_{02s} の方が全体的に T_{01s} よりもややまとまりが良く、値も近い。

Roll 以外の \bar{T}_m は往復航ともに 7~8 秒のところ集中しており、Yaw, 横加速度, 舵角までもが Pitch の固有周期に何か関係がありそうなのは興味深い。これに対して Roll では T_{ms} の上の方に集まっている点が固有周期に対応しているようである。原理的には、出会周期が固有周期より短い場合には \bar{T}_m 等が出会周期を、 \bar{T}_0 等が固有周期を代表し、逆の場合には逆になるように思われるが、強制力や運動の大小によって必ずしもこのようにはなっていない。ただ両方の周期が近接している場合にはそういう関係がありそうなことが往航時の Roll 復航時の Pitch の図に認められる。

船首上下加速度の平均周期は 2, 3 の点を除いて非常に集中しており、ゼロクロス, Peak to Peak ともにほぼ同程度の値で、しかも Pitch の Peak to Peak の値よりやや小さいが極めて近い。これらを考え合わせると Pitch の固有周期は往航時 6.5~7 秒, 復航時 7 秒前後ではなかったかと思われる。

以上の考察のもう一つの裏付けが Fig. 3.25, 3.26 の $\sigma_s \sim \sigma_r$, $\epsilon_s \sim \epsilon_r$ に見られる。まず ϵ_r は (3.12) のように計算されており、バンド幅の一つのパラメータとなっている。これに対して σ_r はこの記録のゼロクロスの最大振幅をとっているのであるから、(3.12) で $\bar{T}_m = \bar{T}_0$ と置いたことになり、したがって $\epsilon=0$ すなわち Rayleigh 分布に修正されていることになる。

Fig. 3.25 で、Yaw と舵角以外では $\sigma_s = \sigma_r$ であると言えるが、これから上のような狭帯域に修正した解析でもほとんど等しい (実際には図では σ_r の方がやや小さい) パワーを示すことが分る。と同時に前記のようにスペクトラムの 0 次のモーメントの平方根 (すなわち σ_s) は狭帯域の分布になっていることが知られる。この場合 ϵ_s , ϵ_r が 0 でないことは、これらはもっと細かい極値等も含んだタイムヒストリーについて解析しているためで、 σ_s や σ_r が $\epsilon=0$ の分布になることと矛盾するものではない。これらの理由により、前

述の Fig. 3.13~3.18 の $\sigma_s \sim \bar{H}$ の関係が Rayleigh 分布の値に乗って来ることが理解されるわけである。

Yaw と舵角の σ_s がバラツキが大きく、しかも σ_r より小さい場合が多いのは、双峯型のスペクトラムの主成分である低周波成分を切捨てているための当然の結果である。またバンド幅パラメータで見ても、特に舵角の σ_r は 1.0 に近いものが多く、現象としてはガウス分布に近づいていることが分る。

バンド幅パラメータで特徴のあるのは船首上下加速度で、出会周期に関係なく非常に小さい。(図中一点だけ離れた T. No. 27 は非常に静穏な状態のものである)。これは相当狭帯域になっていることを示すもので、Pitch の固有周期の影響が非常に強く現われていることがこれからもうかがえる。これに対して Pitch や Roll では出会周期の影響が強くなっており、特に Pitch ではその傾向が強いから、外力としての波が不明の時に Pitch の記録をこれの代用にするという、しばしば用いられる便法は一理あるものと言える。

4. 船首横加速度および Yaw に 関する多入力スペクトラム解析

この章では、多入力スペクトラム解析の手法によって今回の実験で測定された運動の項目の中で、Yaw および船首横加速度 (Lateral Acceleration at F.P.) に対する他の種々の運動からの線型寄与度、船体運動の非線型性等について述べる。

4.1 多入力スペクトラム解析法

単一入力のみならず、多くの入力を持った系の応答過程に関する多入力スペクトラム解析の考え方、計算法、応用例等は、すでに Tick⁵⁾、赤池⁶⁾、山内⁷⁾ 等によって詳しく取り扱われているので以下においては、多入力スペクトラム解析の概念、種々の統計量の定義、性質などについて簡単に述べるに止める。1 入力 1 出力の系に対する通常のスぺクトラム解析法は良く知られているが、多入力スペクトラム解析は、これを多入力対 1 出力の場合に拡張した系に対する解析法と考えれば良い。すなわちまず簡単のために、系は線型で出力 $y(t)$ が、定常過程である k 個の入力の一つ一つ $x_i(t)$ にそれぞれ線型応答した成分出力 $y_i(t)$ の和で、

$$y(t) = \sum_{i=1}^k y_i(t) = \sum_{i=1}^k h_i(\tau) x_i(t-\tau) d\tau \quad (4.1)$$

と考えられる場合を取り扱う。表現を簡単にするために、次のようなマトリクス表示を定義する。すなわち k 個の入力を、

$$(180)$$

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_k(t)] \quad (4.2)$$

それぞれの入力 $x_i(t)$ から出力 $y_i(t)$ に対する周波数応答関数を、

$$H(\omega) = [H_1(\omega), H_2(\omega), \dots, H_k(\omega)] \quad (4.3)$$

入力のコrossスペクトラムを、

$$S_{xx}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega), S_{21}(\omega), \dots, S_{k1}(\omega) \\ S_{12}(\omega), S_{22}(\omega), \dots, S_{k2}(\omega) \\ \dots\dots\dots \\ S_{1k}(\omega), S_{2k}(\omega), \dots, S_{kk}(\omega) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

とすると、単一入力の場合に関する関係式から類推すると、出力のオートスペクトラム $S_{yy}(\omega)$ 、出力と各入力とのクロススペクトラム $S_{yx}(\omega)$ は、それぞれ、

$$S_{yy}(\omega) = H(\omega) \cdot S_{xx}(\omega) \cdot H^{*'}(\omega) \quad (4.5)$$

$$S_{yx}(\omega) = S_{xx}(\omega) \cdot H'(\omega) \quad (4.6)$$

と表わすことができることは容易にわかる⁷⁾。ただし、*印は共役行列を、ダッシュは、随伴行列を表わす。(4.5) 式、(4.6) 式からそれぞれ周波数応答関数を求めると、

$$|H(\omega)|^2 = S_{yy}(\omega) / S_{xx}(\omega) \quad (4.7)$$

$$H(\omega) = S_{yx}(\omega) / S_{xx}(\omega) \quad (4.8)$$

である。

しかるに、(4.7) から求めた $H(\omega)$ と、(4.8) から求めた $H(\omega)$ とは必ずしも一致しない。すなわち、(1) 系の性質が一般に線型でない場合、(2) 入力 Gauss 過程でない場合、(3) 系が線型であり、入力も Gauss 過程であっても、出力に関連するすべての入力を取り上げていない場合、(4) 何等かの原因で系の外から雑音が入っている場合、などは一致しない。両者が一致するのは、入力はすべて Gauss 過程で、その出力に影響を与えるすべての信号を考慮に入れており、その系の応答特性は線型で、入出力の測定に雑音の入らない場合である。そのとき、両者から求めた周波数応答関数の比すなわち Coherency 関数 $r^2(\omega)$

$$\text{Coherency}; r^2(\omega) = \left| \frac{S_{yx}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \right|^2 / \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (4.9)$$

は 1 になる。しかしながら、現実には、上のような場合は極めてまれな場合である。そこで多入力スペクトラム解析から有効な情報が与えられる範囲内で上の条件を弱くして、入力は Gauss 過程、応答系が線型であって、出力が測定の段階で入力と無相関な(すなわち一次関係のない)雑音 $n(t)$ で汚されている場合を考える。すなわち、

$$E[x(t+\tau) \cdot n(t)] = 0 \quad (4.10)$$

で、出力 $y(t)$ は、真の出力 $y_0(t)$ に雑音 $n(t)$ が加わ

2) 波数
 2) って,

$$y(t) = y_0(t) + n(t) \quad (4.11)$$

と表わせる場合を考える。

3) このとき,

$$S_{yy}(\omega) = S_{y_0y_0}(\omega) + S_{nn}(\omega) = H^2(\omega)S_{xx}(\omega) + S_{nn}(\omega) \quad (4.12)$$

4)
$$S_{yx}(\omega) = S_{y_0x}(\omega) = H(\omega) \quad (4.13)$$

となって, Coherency は,

$$\gamma^2(\omega) = 1 - \frac{S_{nn}(\omega)}{S_{yy}(\omega)} = 1 - \varepsilon / S_{yy}(\omega) \quad (4.14)$$

で与えられ, Coherency は, 1 より雑音のスペクトラム分だけ小さな値をとる。逆にいえば Coherency は出力の測定に際して出力が雑音によってどれ位汚されるかを示す指標である。多入力の場合も, Coherency は Multiple Coherency $\gamma^2_{yx}(\omega)$ として,

Multiple Coherency;

$$\hat{\gamma}^2_{yx}(\omega) = \frac{1}{S_{yy}(\omega)} H(\omega) S_{yx}^*(\omega) \quad (4.15)$$

と定義すれば, 単一入力の場合と一致する概念を与える。ただし, この場合, 雑音といっても後に述べるように広義に解釈する必要がある。

また, さらに条件を弱めて, 非線型系を考えれば, 上の雑音の中には, 応答過程の中で入力と直交する成分すなわち線型で表現できない成分がすべて入りこむと考えねばならない。逆に, ある程度, 系の非線型性の程度も Multiple Coherency から知ることができる。このようにして, 多入力スペクトラム解析が有効な情報を与える範囲は, 入力はすべて Gauss 過程で, 系は高々弱い非線型性の場合で, 測定時の雑音は入力とは無相関の場合である。このとき Multiple Coherency を知ることによって, 入力と考えた信号が出力にどれ位線型寄与をしているか, 逆にいえば, もっと他に関連のある入力があるかどうか, 応答系に非線型性が存在するかどうかなどの点が明らかになる。また Tick⁶⁾ の用いた条件付スペクトラムの定義を使うと, その他の入力からの影響もあるという条件でのある特定の入力 $x_i(t)$ の, 応答過程 $y(t)$ に対する線型寄与度を表わす Partial Coherency を,

$$\gamma^2_{y_0j.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega) = \frac{|S_{yj.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega)|^2}{S_{jj.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega) \cdot S_{y_0y_0.12\dots k}(\omega)} \quad (4.16)$$

と定義することができる。ただし $S_{jj.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega)$ は Tick⁶⁾ 等の用いた条件付スペクトラムである。この表現を用いると周波数応答関数 $H_j(\omega)$ は,

$$H_j(\omega) \equiv H_{yj.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega) = \frac{S_{yj.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega)}{S_{jj.12\dots\hat{j}\dots k}(\omega)} \quad (4.17)$$

と表わすことができる。赤池⁶⁾ はこのようにして求めた $H_j(\omega)$ の推定値 $\hat{H}_j(\omega)$ の信頼限界を求めている。

山内等⁸⁾ は, 確率過程 $x(t)$ の非線型性を測る直接の測度として, 歪度 (Skewness, s) 尖度 (Peakedness, p) が便利で有効であることを示した。確率過程 $x(t)$ の歪度は, 過程の平均値まわりの 3 次モーメントの平均値 μ_3 をその標準偏差 σ^2 で正準化して,

$$s = \frac{\mu_3}{(\sigma^2)^{3/2}} \quad (4.18)$$

また尖度 p は同じく 4 次モーメントの平均値 μ_4 を正準化して,

$$p = \frac{\mu_4}{(\sigma^2)^2} \quad (4.19)$$

で与えられる。過程がガウス過程である時は歪度は 0, 尖度は 3 であることを理論的に導びくことができる。

したがって, この歪度, 尖度を使えば多入力スペクトラムを適用する場合に望ましい入力の Gauss 性がある程度確かめられる。

4.2 解析の手順

今回測定された運動の項目から出力として Yaw, および船首における横加速度を選び, 4.1 で示した多入力スペクトラム解析を行なった。これらの場合の入出力関係を Fig. 4.1 に示す。この 2 つの運動を出力として取り上げた理由は, 今回測定した項目から考えて, これら 2 つの横運動に対するそれ以外の運動との関連が強いと考えたからである。ただし, Yaw を出力とした場合, 舵角を入力として採用していることには注意を要する。この 2 つの入出力関係はフィードバック系であり, フィードバックループを考えない多入力スペクトラム解析の対象としてはやや不相当であるが, この報告では, フィードバックは考えないものとして取り扱っている。

また 4.1 で述べたように入力と見なした運動はガウス性が高いことが望ましく, そのため歪度 s , 尖度 p を用いて非線型性の度合をしらべた。

多入力スペクトラム解析の計算はすでに当部で赤池⁶⁾ の方法によって開発されているプログラムを用いた。ウィンドウは同じく赤池による W_2 ウィンドウ⁷⁾ を用いた。

解析の対象は主として 25 次航の往航の記録である。

4.3 解析の結果

多入力スペクトラム解析を行なう上での仮定である入力のガウス性を確かめるために計算した歪度, 尖度の計算結果の中から, この仮定を満足していると思わ

Table 4.1 Skewness and Peakedness

T. No.	SKEWNESS					PEAKEDNESS				
	P.	R.	Y.	R.A.	L. Acc.	P.	R.	Y.	R.A.	L. Acc.
3	0.12	0.05	-0.02	0.16	0.02	2.91	2.80	2.71	2.70	2.55
6	-0.02	-0.10	-0.40	-0.07	0.03	2.99	2.64	2.62	2.10	2.91
10	0.01	0.41	0.05	-0.15	1.51	2.90	3.31	2.83	3.02	5.32

Note; P.; Pitch, R.; Roll, Y.; Yaw, R.A.; Rudder Angle, L. Acc.; Lateral Acceleration at F.P.

れる実験番号を選んで、解析を行なった。この選ばれた実験番号の歪度(Skewness), 尖度(Peakedness)は、まとめて Table 4.1 に示す。過去にこの種のデータの集積がないので断定できないが、この他の実験番号の分をも考え合わせると、大洋を航行中の船の運動には、海象、気象によっては、相当の非ガウス性が存在するような結果が得られている。特に統計的にみて、横加速度、Yaw の非ガウス性は高い場合があり、このことが逆に出力としてこの二つの運動を選ぶ理由ともなった。

4.3.1 船首横加速度が出力の場合

横加速度 (Lat. Acc.) を出力に、Yaw, Roll, Pitch 舵角 (Rudder Angle) を入力に選び、多入力スペクトラム解析を行なった結果の中から、代表的な場合として T. No. 3 について検討する。なおこの章における T. No. は第 3 章の T. No. と同じものである。T. No. 10 の Multiple Coherency を Fig. 4.2 に示し、T. No. 3 の Multiple Coherency を Fig. 4.3 (a) に、各入力から出力に対する、周波数応答関数の振幅特性 (Amplitude Gain) を Fig. 4.3 (b), (c) に、その位相特性 (Phase Shift) を Fig. 4.3 (d) に示す。また、それぞれの入力の Partial Coherency を Fig. 4.3 (e)~(h) に示す。これらの図表から次に列記するような結論が得られる。

(1) Table 4.1 の入力の歪度 (Skewness), 尖度 (Peakedness) の値を見ると歪度、尖度ともガウス過程の値から多少ズレている。多くの資料の蓄積がないので、この程度のズレが大きいかわかりか小さいかは議論できないが、この解析にかぎればズレは小さいといえる。

(2) T. No. 3 (Fig. 4.3 (a)) の場合、出力として考えた横加速度のパワースペクトラム (Fig. 3.6 (a) 参照) がピークになる周波数付近で、横加速度の歪度、尖度が (1) で述べた意味で他の結果に較べて Gauss 過程に近い値をとり、しかも Multiple Coherency がそ

の周波数付近で 1 に極めて近い値を示している。また、図示されていないが相対誤差もこの周波数付近で極めて小さく、全体として精度が良い。これらのことから、入力として考えた 4 つの運動からの線型寄与度が極めて強いといえる。

(3) ただし、Table 4.1 をみると T. No. 10 の場合の横加速度の歪度、尖度が T. No. 3 に比べて Gauss 過程の値からやや離れている。そのとき対応する Multiple Coherency もパワースペクトラムがピークになる周波数付近で 1 よりもやや落ちている (Fig. 4.2)。このことは、測定時に加わる雑音は、仮に、他の記録の場合と同程度とすれば、入力からの線型な表現のできない成分、すなわち一括して雑音とみなした応答成分の中には、純粋な雑音と考えられる成分の他に入力間同士の、または、入出力間の非線型な連成による応答、または、それぞれの入力からの非線型な応答による成分も混入している可能性もあり、前述のフィードバック系の存在の影響も無視できないであろう。

(4) 次に Fig. 4.3 (e)~(h) の Partial Coherency を、横加速度の Multiple Coherency の高くする周波数付近でみると、横加速度に対する線型寄与度が最も強い運動は Roll でありしかも安定している (Fig. 4.3 (h))。Pitch は最も低く、不安定である (Fig. 4.3 (g))。Yaw も線型寄与度は高いが Roll に較べると落ちる。また Rudder Angle は、やや長周期の周波数付近で線型寄与度が大きい。これらのことから、横加速度に最も線型的に寄与している運動は Roll であるといえる。

(5) A.R.T. を作動した場合にも、線型寄与度の強さの順は変わらない。

(6) 周波数応答関数の振幅特性を検討すると、低周波側は低く、高周波側は、やや高くなっている。これは出力を加速度とし、入力として Roll 角、Yaw 角などの角度を測定したためである。すなわち加速度の周波数応答関数は、加速度の 2 回積分である偏位の周波

数応答関数に ω^4/g^2 を掛けることによって得られ、したがって低周波側の応答関数は低く出る可能性がある。図においても特に Roll が、その影響度の高い周波数帯で低く安定した値をとっており、また図示されていないがその相対誤差は小さいことから、これらの周波数帯での特に Roll の応答関数の推定値はかなり精度が良いと考えられる。しかし逆に高周波側ではもう少し高く出ても良いのではないかと考えられる。

(6) 周波数応答関数の位相特性では、その寄与度の高い周波数付近で Roll が加速度に対しては位相が 180° 進んでおり妥当である。しかし全般にみて、位相特性の推定精度は悪く、例えば A.R.T. が作動中の場合との比較には耐えられない。相対誤差の大きい所では、位相特性が 360° の倍数で飛ぶ現象などの影響を受けているものと思われる。

(7) これらの結果から横加速度の主因は Roll であり、Yaw がこれに次ぐといえる。

4.3.2 Yaw が出力の場合

Yaw を出力に、Roll, Pitch, 舵角を入力と考えた場合の解析結果から、代表的な例として、T. No. 3, T. No. 6 を選んで検討する。前述のようにフィードバック関係のある舵角と Yaw を入出力として多入力解析を行なうのは必ずしも適当ではないが、ここではこれを考慮に入れないで解析をしている。T. No. 3 は自動操舵中、T. No. 6 は手動操舵中である。T. No. 3, T. No. 6 の Multiple Coherency を Fig. 4.4 (T. No. 3) および Fig. 4.5 (T. No. 6) の (a) に、各入力の Partial Coherency を Fig. 4.4 および Fig. 4.5 の (b)~(d) に、Amplitude Gain を同じく (e)~(g) に、そしてその Phase Shift を (h) に示す。これらの図と Table 4.1 とから次のようなことが分る。

(1) Table 4.1 から、入力として考えた3つの過程のガウス性の程度を知ることは出来るが、この値がガウス性に近い値かどうかは資料不足で断定できない。しかし 4.3.1 においても述べたように、これらの T. No. では、やはり他の結果よりは相対的にガウス性に近い値をとっている。ただし T. No. 6 の舵角の非ガウス性は高い。

(2) この2つの実験の Yaw のパワースペクトラムを見ると自動操舵中の T. No. 3 には3章で述べたごとく $0.2 \sim 0.3$ (1/sec) 付近の高周波側ピークの外に、より低周波側にもピークがあり、いわゆる双峯型パワースペクトラムとなっている (Fig. 3.3 (a) T. No. 3)。また手動操舵中の T. No. 6 には、超低周波域にピー

クがある (Fig. 3.3 (a) T. No. 6)。一方、Multiple Coherency を見ると、自動操舵中の Yaw のパワースペクトラムの2つのピークのある周波数付近では、1 に極めて近く、入力として考えた3つの運動から、Yaw への線型寄与度は十分に大きいことを示している。

しかるに、手動操舵中の T. No. 6 では、Multiple Coherency は、低周波の所でも余り1に近い値をとらず、また不安定でもある。このことは入力として3つの運動以外に寄与すると考えられる運動があるか、非線型応答が激しいのか、あるいは測定中の雑音であるとも考えられる。しかし手動操舵による実験がこの1つだけであるので、詳しい事はわからない。

(3) Partial Coherency をやはり Yaw のパワーの強い周波数付近でみると、先ず T. No. 3 では、舵角のそれが非常に1に近いことが注目される。一方 Pitch, Roll の Partial Coherency は、この周波数域で高々 0.6 と低く、この2つの運動の線型寄与度は大きくない。それにしても Multiple Coherency がこの付近で非常に良いことから、Yaw の双峯型パワースペクトラムに対しての舵角の線型寄与度は、両ピークに対して共に極めて高いことが知れる。(Fig. 4.4 (b)~(d))。しかし、はじめに述べた通り、舵角と Yaw の間には、フィードバックループがあることは十分考慮しなければならない。

(4) 次に T. No. 6 の Partial Coherency を Yaw のパワーの高い超低周波域で見ると明らかに舵角の値が高く、手動操舵中でも、Yaw は低周波域で舵角の線型影響を受けていると考えられる。(Fig. 4.5 (b)~(d))

(5) 周波数応答関数を検討すると、T. No. 3 の場合にやや特徴がある。すなわち舵角は、低周波の所で高く徐々に下がっている。また Roll に較べて Pitch の応答関数が高い。Pitch と Roll の単位角度の運動に対する応答は Pitch が強い。3章において少しふれたように、Yaw のパワースペクトラムが双峯型の場合、高周波側のピークの位置と Pitch のピークの位置とは一致していることが多く、Pitch のパワーの高い所と Yaw のパワーの高い所が一致する結果、Partial Coherency が Roll と同程度とは言え、周波数応答関数は高く出るのであろう。この傾向は、全解析中の多くの例でみられた。Pitch は、ある程度波のスペクトラムの代用をしていることは3章で指摘したが、そのように考えると波から Yaw への周波数応答は高いと

もいよう。

(6) 図示されていないが、A.R.T. を作動した場合における変化にはあまり特筆すべき特色がない。ただ Roll の周波数応答関数は、Pitch と同じ位置で高くなる。Roll の固有周期が A.R.T. によって長周期側にやや寄って Pitch と同じ位置付近に来たためであろう。

4.3.3 ま と め

以上2種の出力の場合について検討したが、両方に共通した考察として次の点を指摘することができる。

(1) 一般に、Yaw、横加速度が出力の場合、共に考えた入力からの線型寄与度は高く、この他の入力として考えられる運動は、あまりないようである。

(2) しかし気象、海象によって Multiple Coherency は、無視できない影響を受けるようであり、その点の解明が必要であろう。特に Yaw の場合、変化が激しいことは注目に値する。

(3) Yaw を出力にした場合、舵角を入力と考えているが、この入出力関係には、明らかに Feed back loop があり、多入力スペクトラム解析の対象としてはその意味で不適当である。したがって将来フィードバックのかかった系として取り扱う必要がある。

(4) 入力のガウス性の検証のために行なった歪度、尖度の検討においてもなお、入力がガウス性の高いものかどうかは絶対的には判定できず、さらに資料の蓄積が必要である。

5. 結 論

以上の解析により次の結論を得た。

(1) 荒天時に適当に減速、変針することは Roll の軽減に極めて有効である。

(2) 減揺水槽は有効であるが、出合周期との関係に注意して使用する必要がある。

(3) Roll の慣動半径は (0.67~0.70) $B/2$ 程度である。

(4) 船首上下加速度は Rayleigh 分布に非常に良く適合し、出合周期に関係なく狭帯域分布をする。またこれによって Pitch の固有周期が知れる。

(5) 向い波中の船橋における前後加速度は、F.P. の上下加速度の約 0.3 倍程度に達する。

(6) 統計解析では Pitch の固有周期は分るが Roll の固有周期はわかりにくい。

(7) Pitch の記録は他の運動にくらべて、波との出会いの様子を最もよく表わす。

(184)

(8) Yaw と舵角は解析の目的によって、超長周期成分の取り扱いに注意する必要がある。

(9) オートパイロットを用いている場合、舵角の全振幅は、荒天時は 10° 前後、静穏時は、 $2^\circ \sim 3^\circ$ の成分が多いが、荒天時でも全振幅 20° になることはない。

(10) オートパイロットの設定値が Yaw に与える影響は、間接的である。

(11) スペクトラムの標準偏差 σ_s と全振幅の平均値 \bar{H} との関係は $\epsilon=0$ の Rayleigh 分布の関係に適合する。

(12) スペクトラム解析のゼロクロス平均周期としては、 T_{02s} が適当であるが、 T_{01s} でも大差ない。

(13) 船首横加速度、Yaw のどちらを出力として考えてもパワースペクトラムのピーク周波数付近では、入力としてとりあげた運動との関連は非常に強い。

(14) 船首横加速度に対し最も線型的関連の強い運動は、Roll であり、Yaw、舵角がこれにつぐ。この関係は A.R.T. の作動中でも変化しない。

(15) 舵角と Yaw との間にあるフィードバックループを仮に考慮しないとすれば、Yaw に対し最も線型的関連性の強い運動は舵角である。Pitch、Roll との線型関係はあまり高くない。ただし単位入力当りの線型応答度は、Yaw のパワースペクトラムがピークになる周波数付近では Pitch が最も高い。

(16) 多入力スペクトラム解析において一括して雑音とみなした過程の中には、非線型応答による過程もかなり含まれている可能性もある。

6. おわりに

本論の計算に用いたのは主として船研共用電子計算機 FACOM 270-20 で、スペクトラム解析および多入力解析のプログラムは、以前から運動性能部で安藤定雄技官（現海洋開発工学部）らが中心となって開発されていたものに多少の改良を加えたもの、統計解析のプログラムは SR-125 の方式⁴⁾に従って運動性能部渡辺巖技官が新しく作成したものである。

なお AD 変換器は運動性能部の AIDAC 100-8 を用いた他、一部の計算に東京商船大学電子計算機室の FACOM 270-20 を使用した。種々御協力いただいた同室の山中順吉助手に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 小川陽弘, 佐藤辰二, 小久保芳男, “コンテナ船あめりか丸による北太平洋航海性能試験”, 船舶技術研究所報告, 第8巻第2号, 1971年3月

- 2) 永松秀一, 早川武夫, 小川陽弘, “コンテナ船あめりか丸による北太平洋航海性能試験(第2報)”, 船舶技術研究所報告, 第8巻第4号, 1971年7月
- 3) “高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究報告書”, 日本造船研究協会, 研究資料第125号, 1971年3月
- 4) “超高速コンテナ船の耐航性に関する研究報告書” 日本造船研究協会, 研究資料第157号, 1972年3月
- 5) Tick, L. J., “Conditional spectra, linear systems and coherency”, Time Series Analysis edited by M. Rosenblatt, (Chapter 13) John Wiley & Sons, Inc., 1963
- 6) Akaike, H., “On the statistical estimation of the frequency response function of a system having multiple input”, Ann. Inst. Stat. Math., vol. 17, 1965
- 7) 山内保文, “多入力スペクトラム解析法の船の応答研究への応用と非線型応答の一取扱いについて,” 日本造船学会論文集第125号, 昭和44年6月
- 8) 山内保文, 大津皓平, “船の応答の非線型性と高次元スペクトラム—バイスペクトラムの応用—”, 日本造船学会論文集第131号, 昭和47年6月

期成

の全

の成

ない。

る影

均値

合す

して

考え

, 入

運動

関係

ルー

線型

との

の線

にな

雑音

もか

計算

多入

藤定

発さ

析の

部渡

8を

室の

いた

船あ

船技

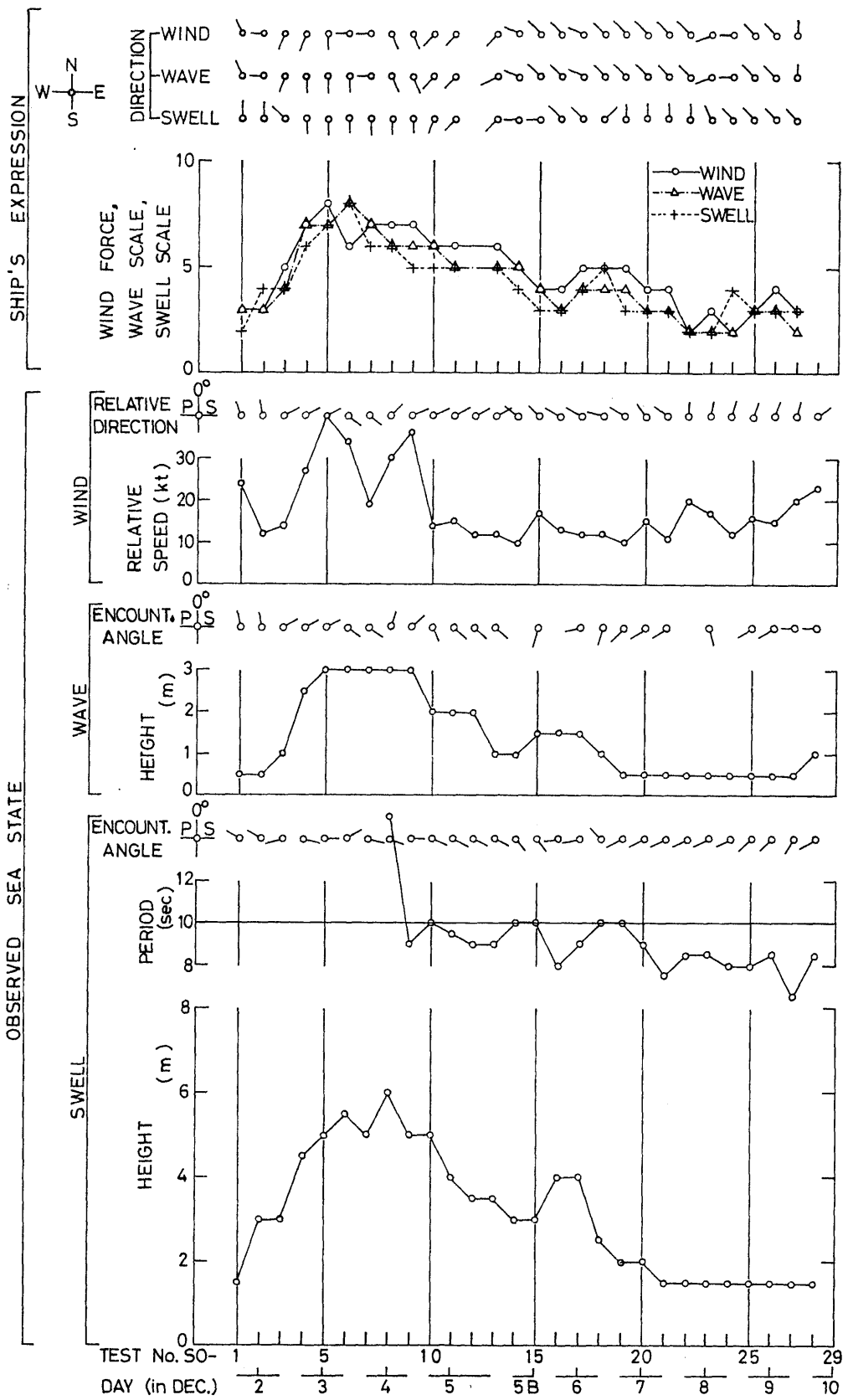


Fig. 2.1 (a) Sea State at Outward Voyage

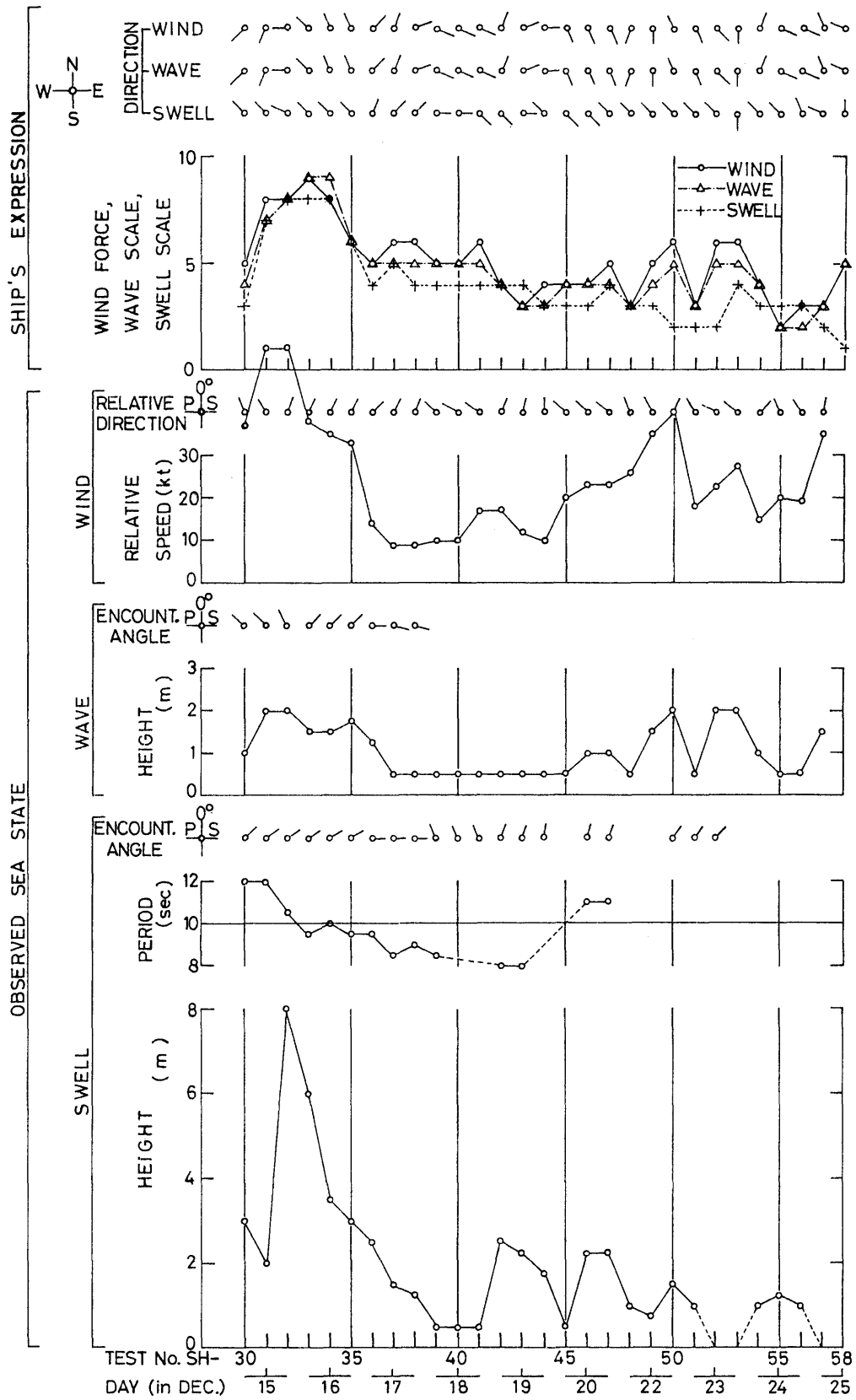


Fig. 2.1 (b) Sea State at Homeward Voyage

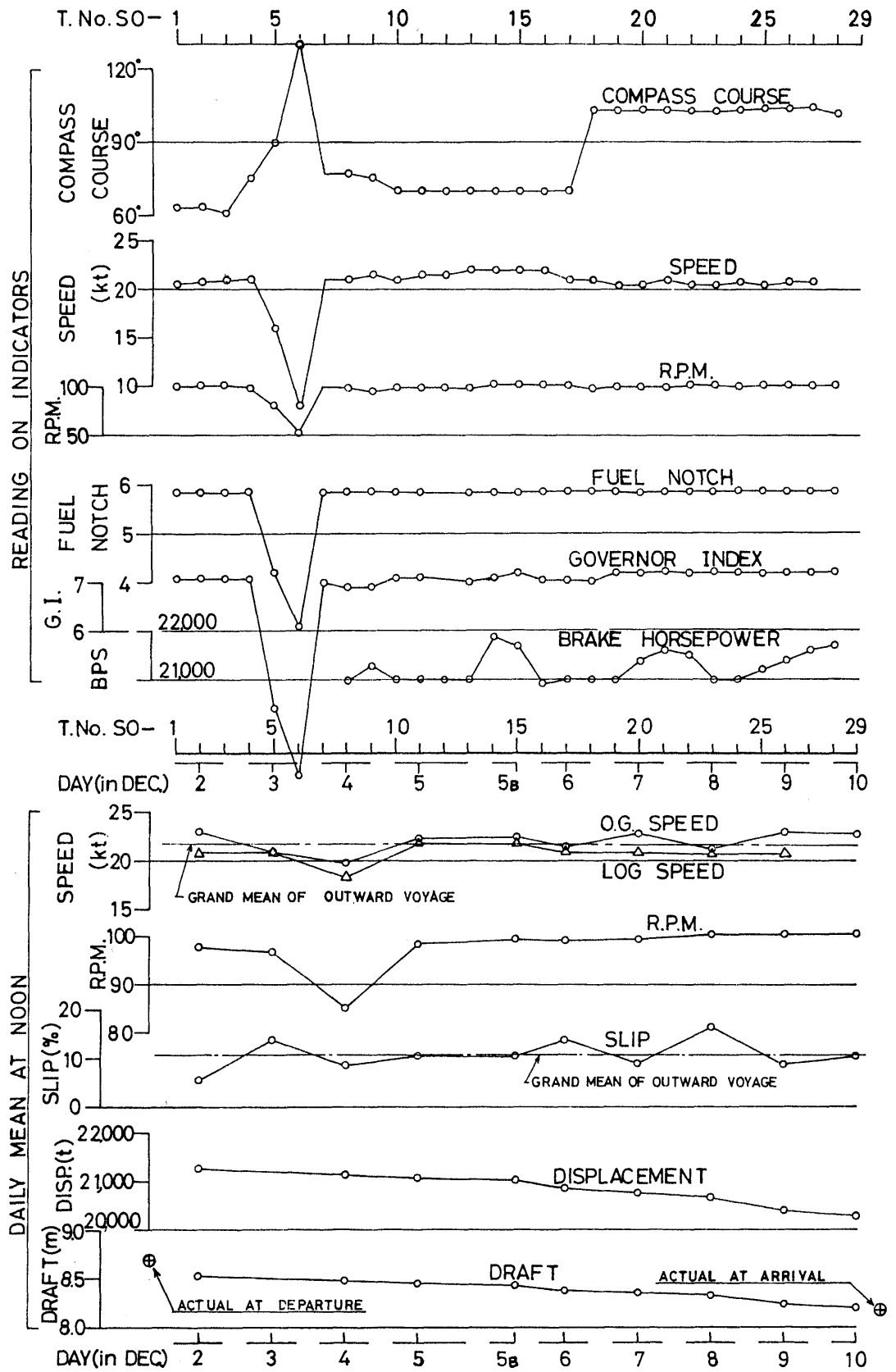


Fig. 2.2 (a) Ship's Condition at Outward Voyage

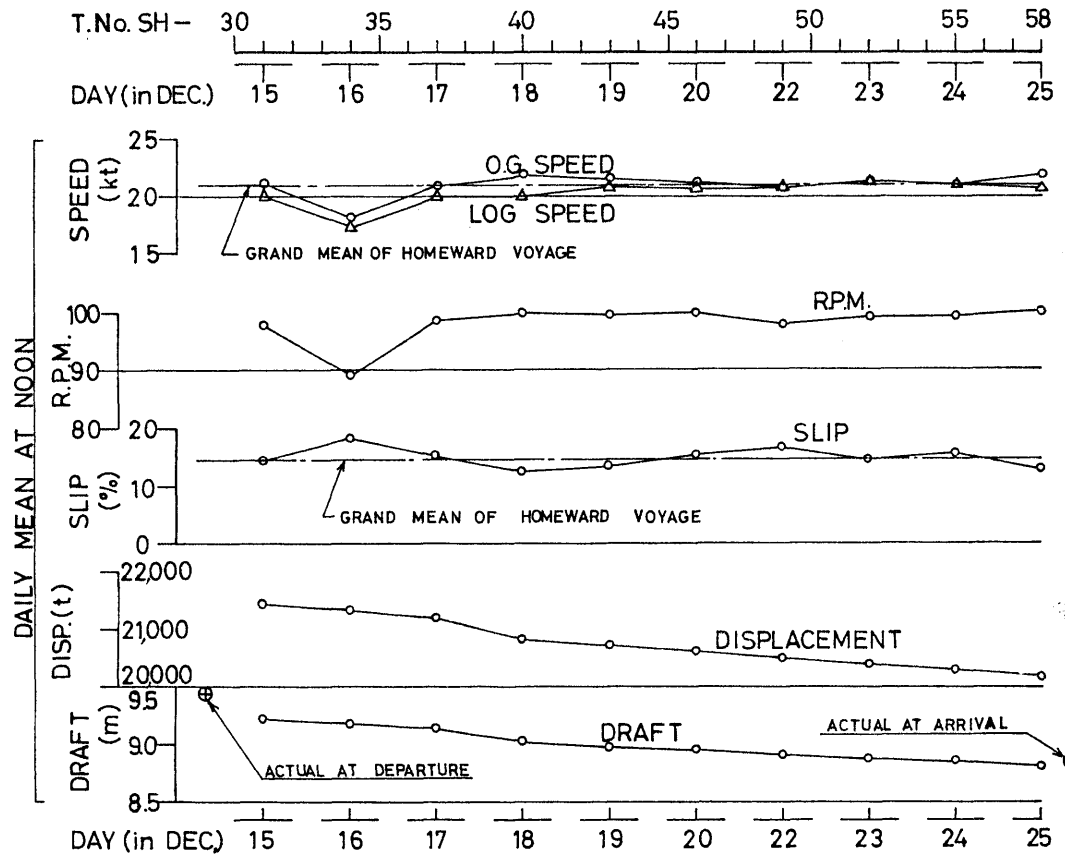
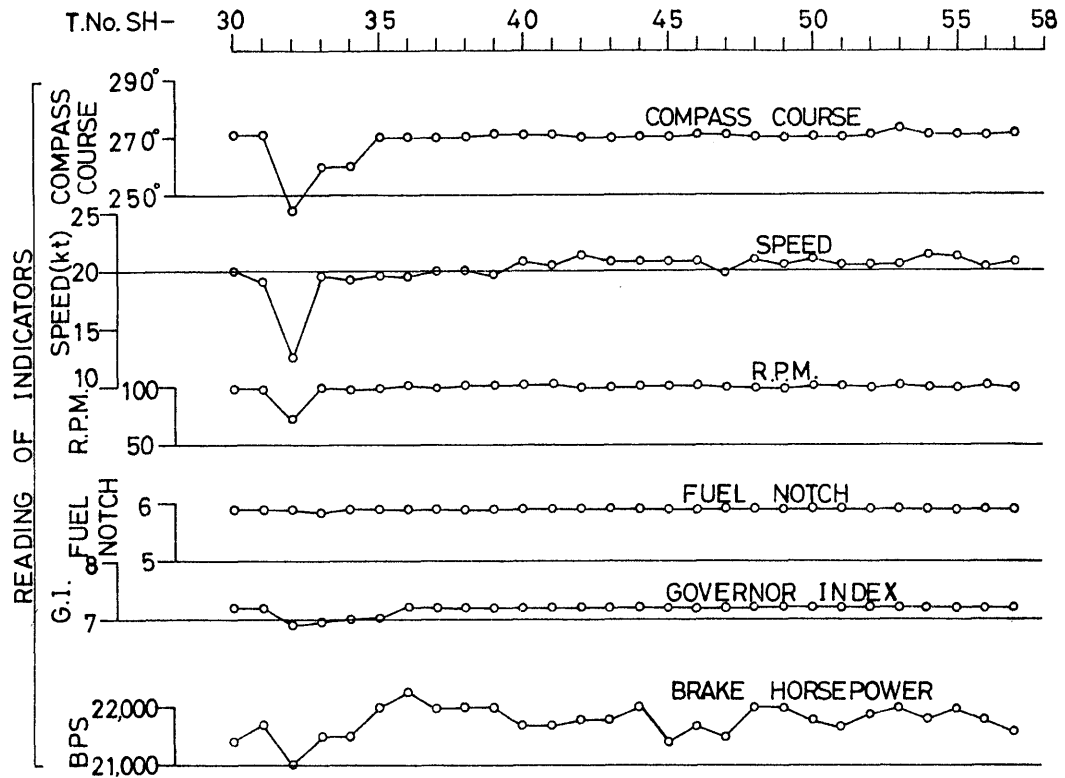


Fig. 2.2 (b) Ship's Condition at Homeward Voyage

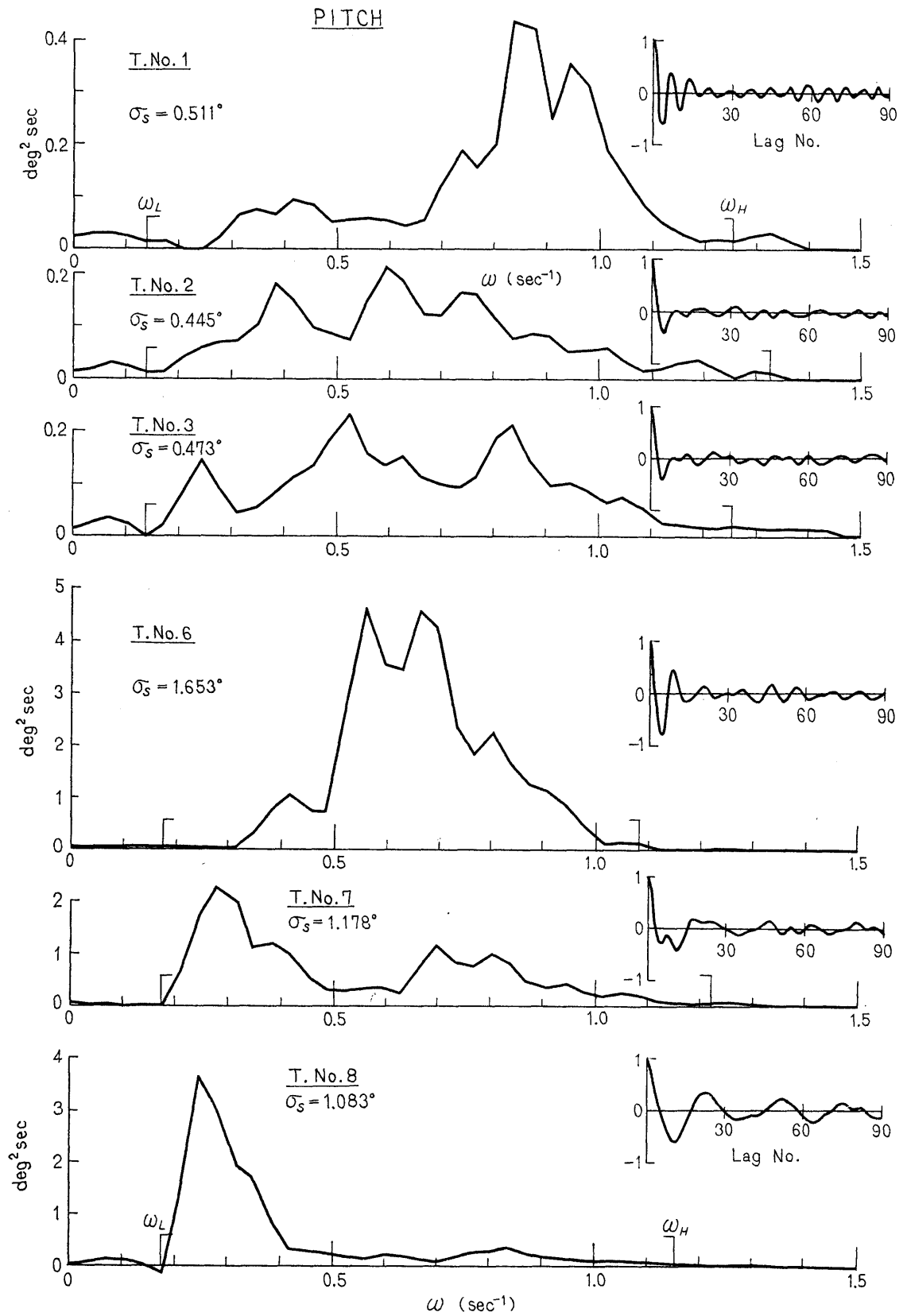


Fig. 3.1 (a) Spectra and Correlograms of Pitch

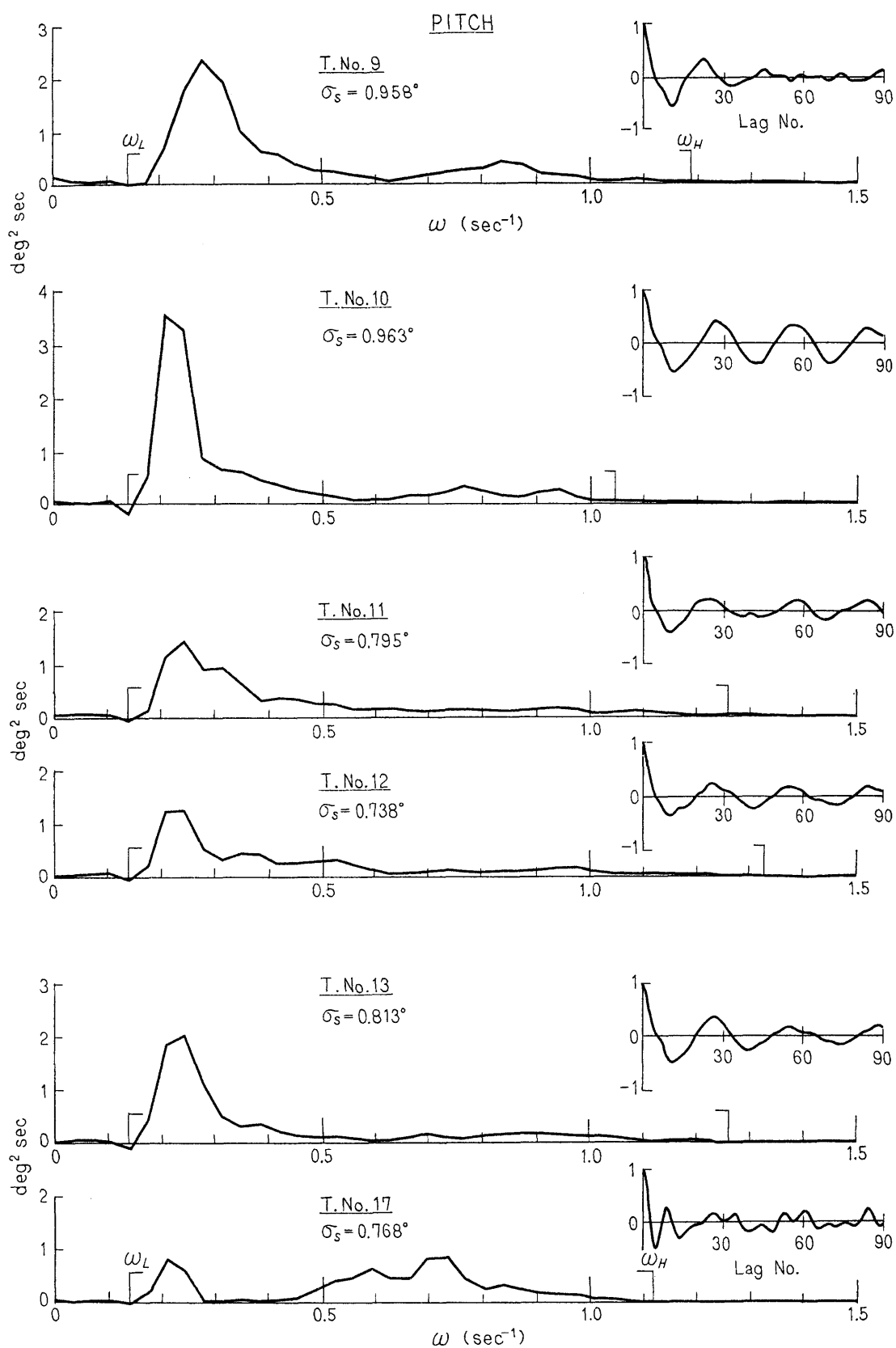


Fig. 3.1 (b) Spectra and Correlograms of Pitch

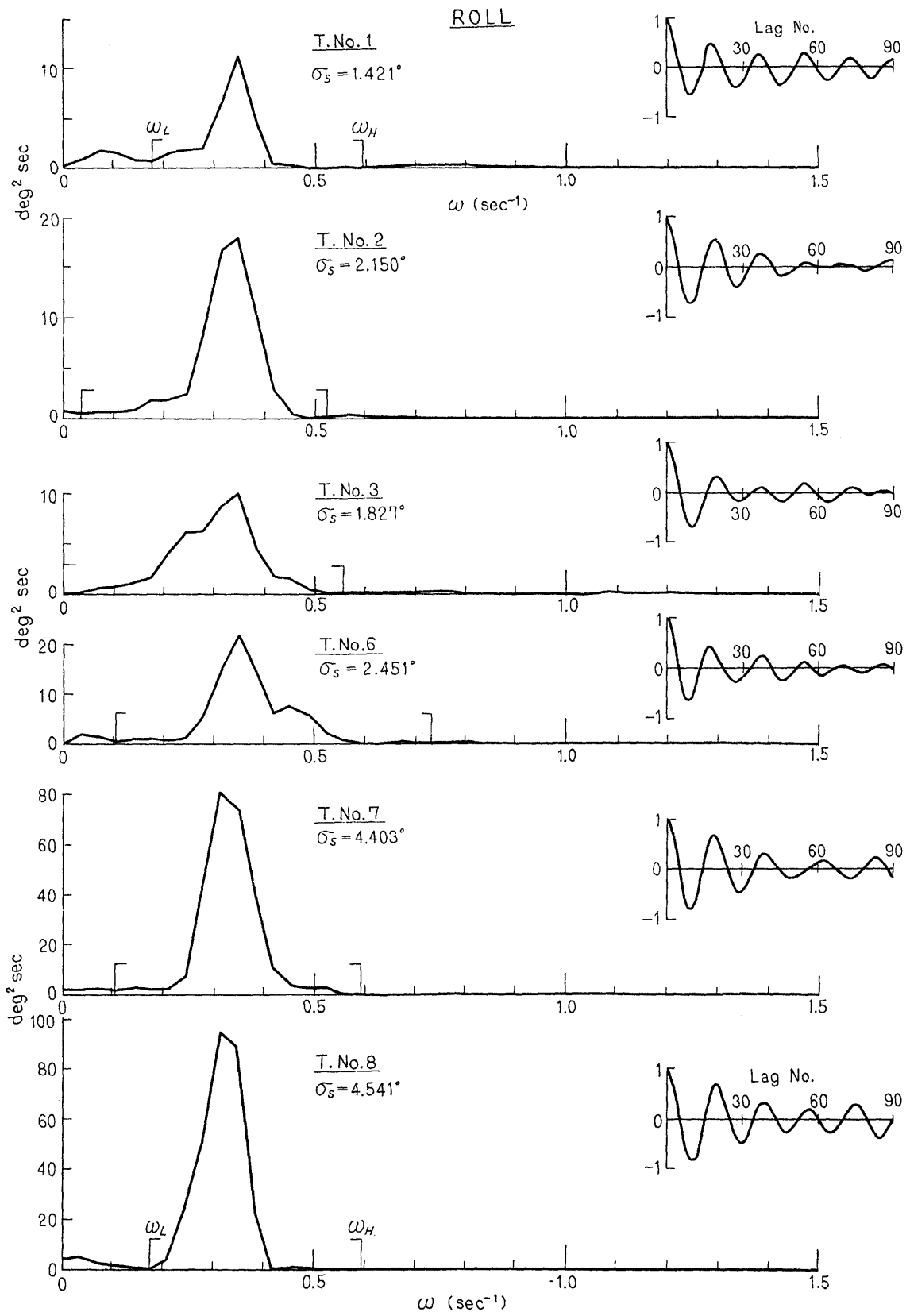


Fig. 3.2 (a) Spectra and Correlograms of Roll

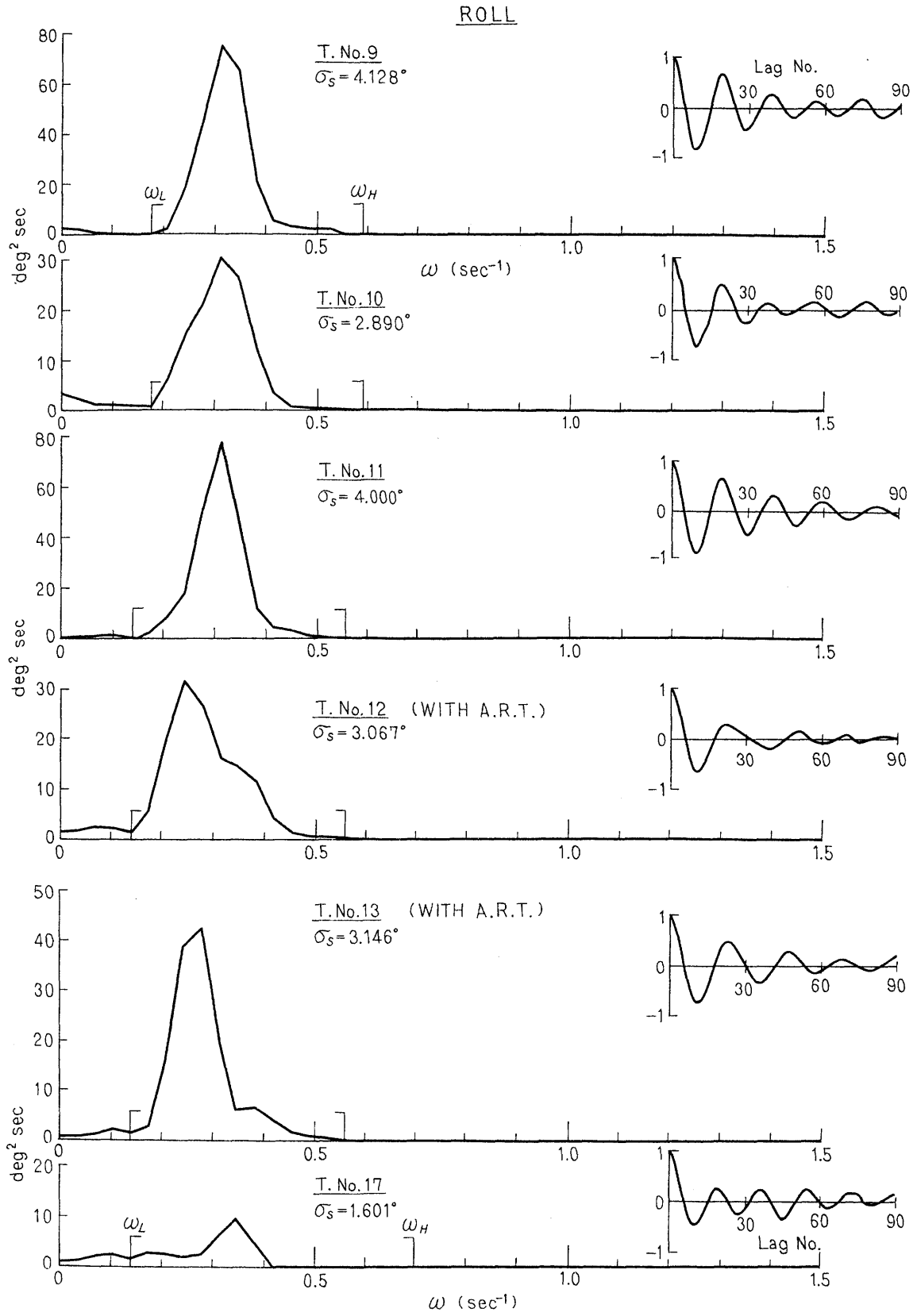


Fig. 3.2 (b) Spectra and Correlograms of Roll

YAW

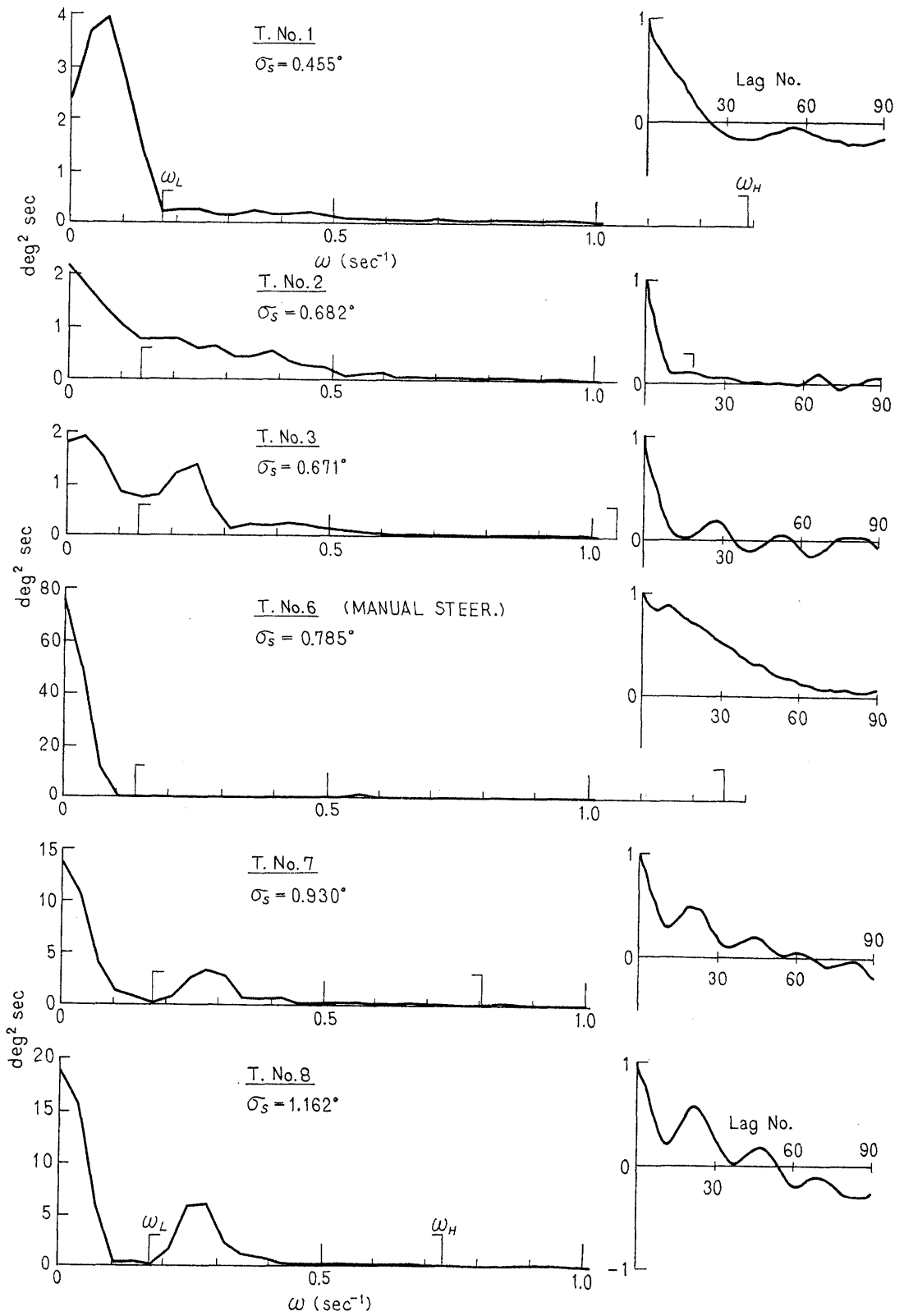


Fig. 3.3 (a) Spectra and Correlograms of Yaw

YAW

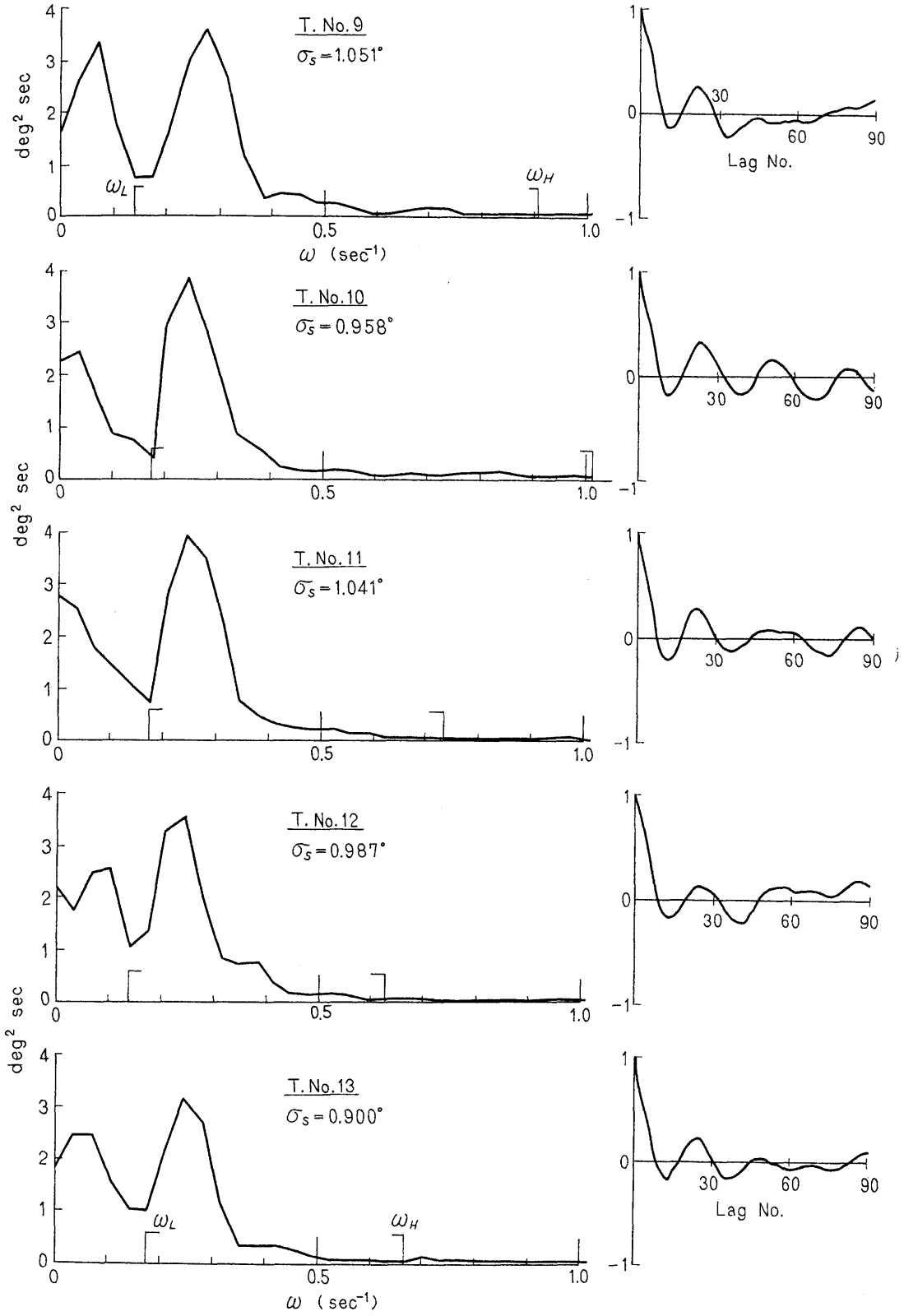


Fig. 3.3 (b) Spectra and Correlograms of Yaw

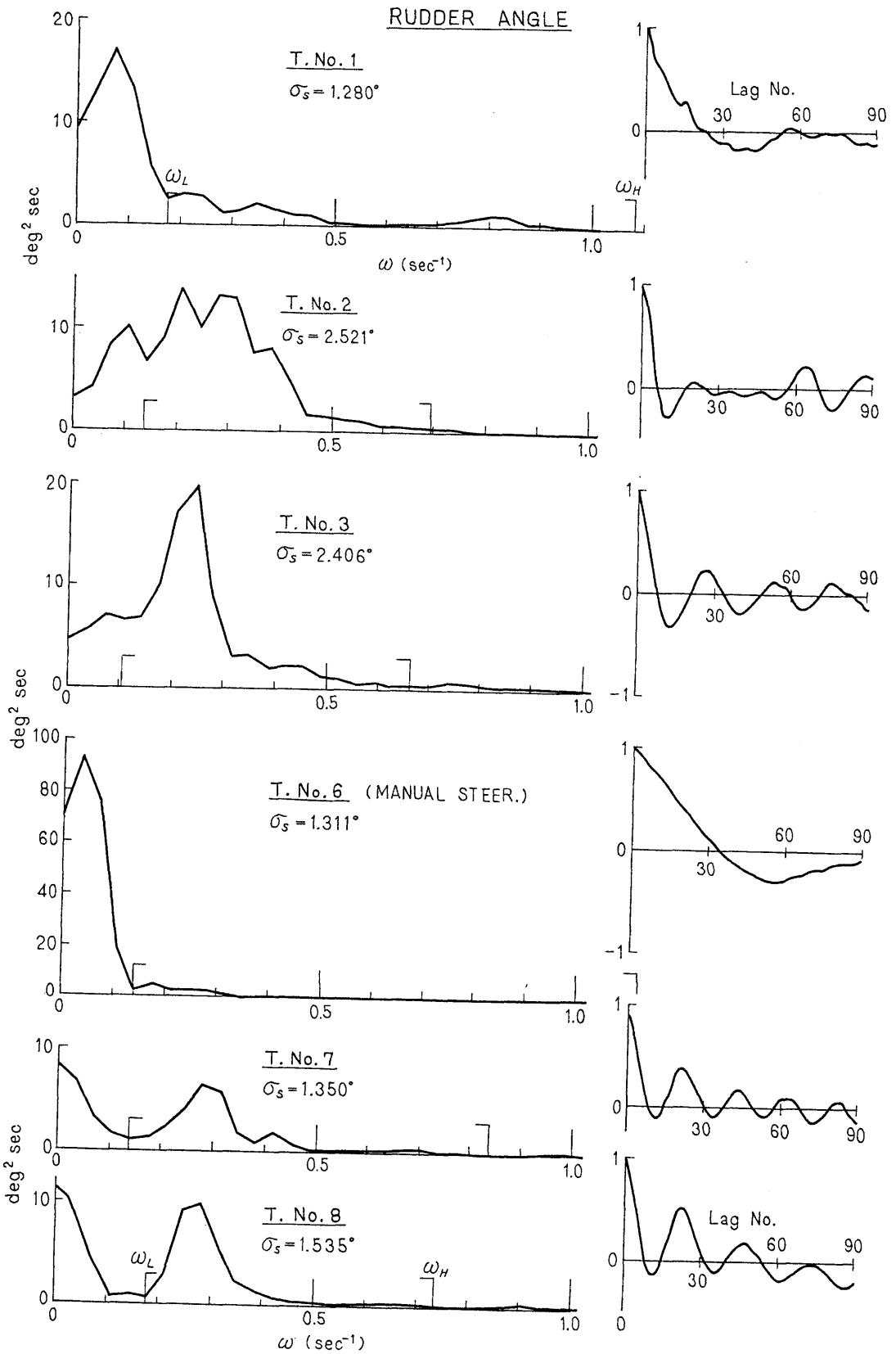


Fig. 3.4 (a) Spectra and Correlograms of Rudder Angle

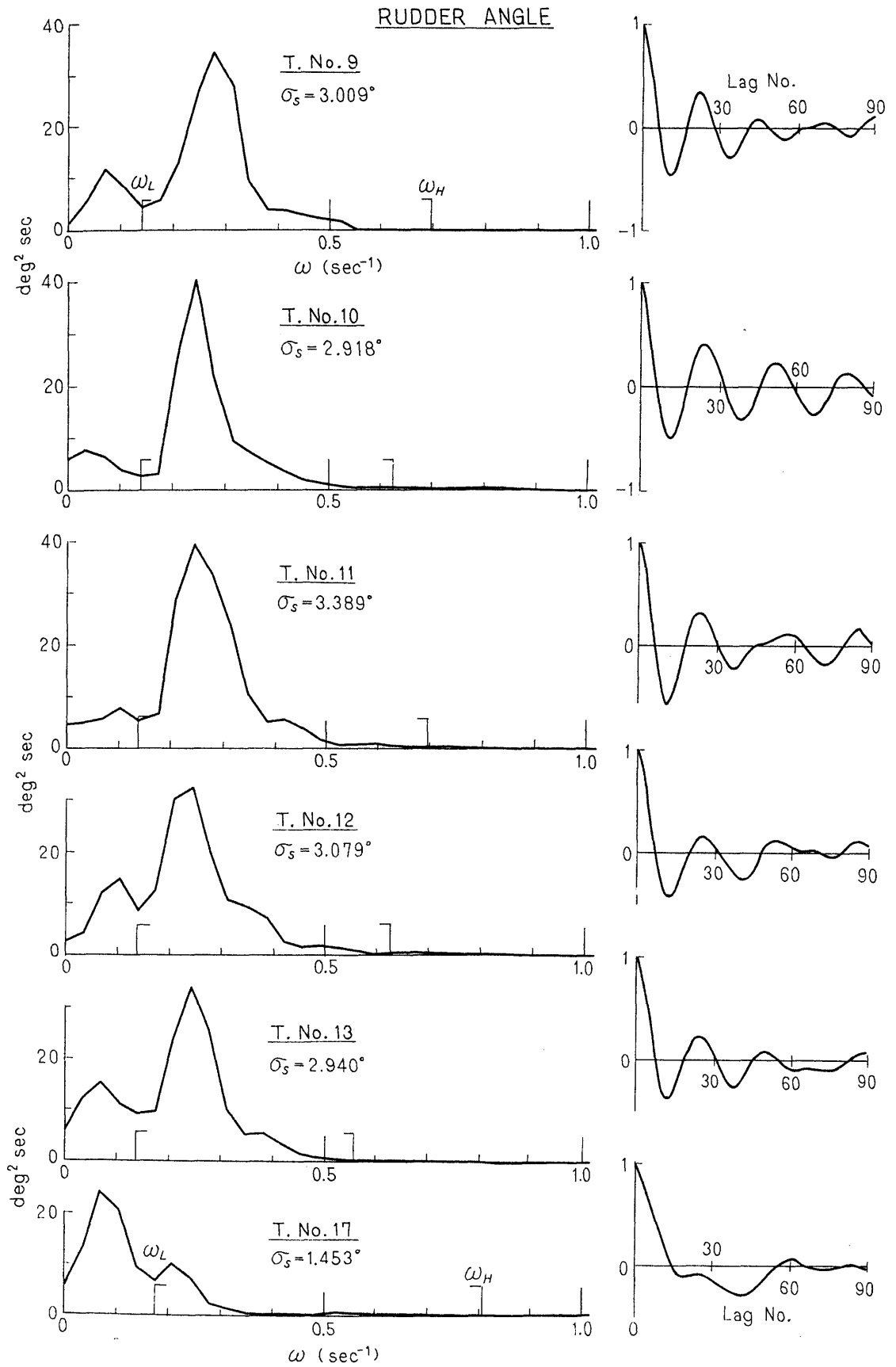


Fig. 3.4 (b) Spectra and Correlograms of Rudder Angle

VERTICAL ACCELERATION

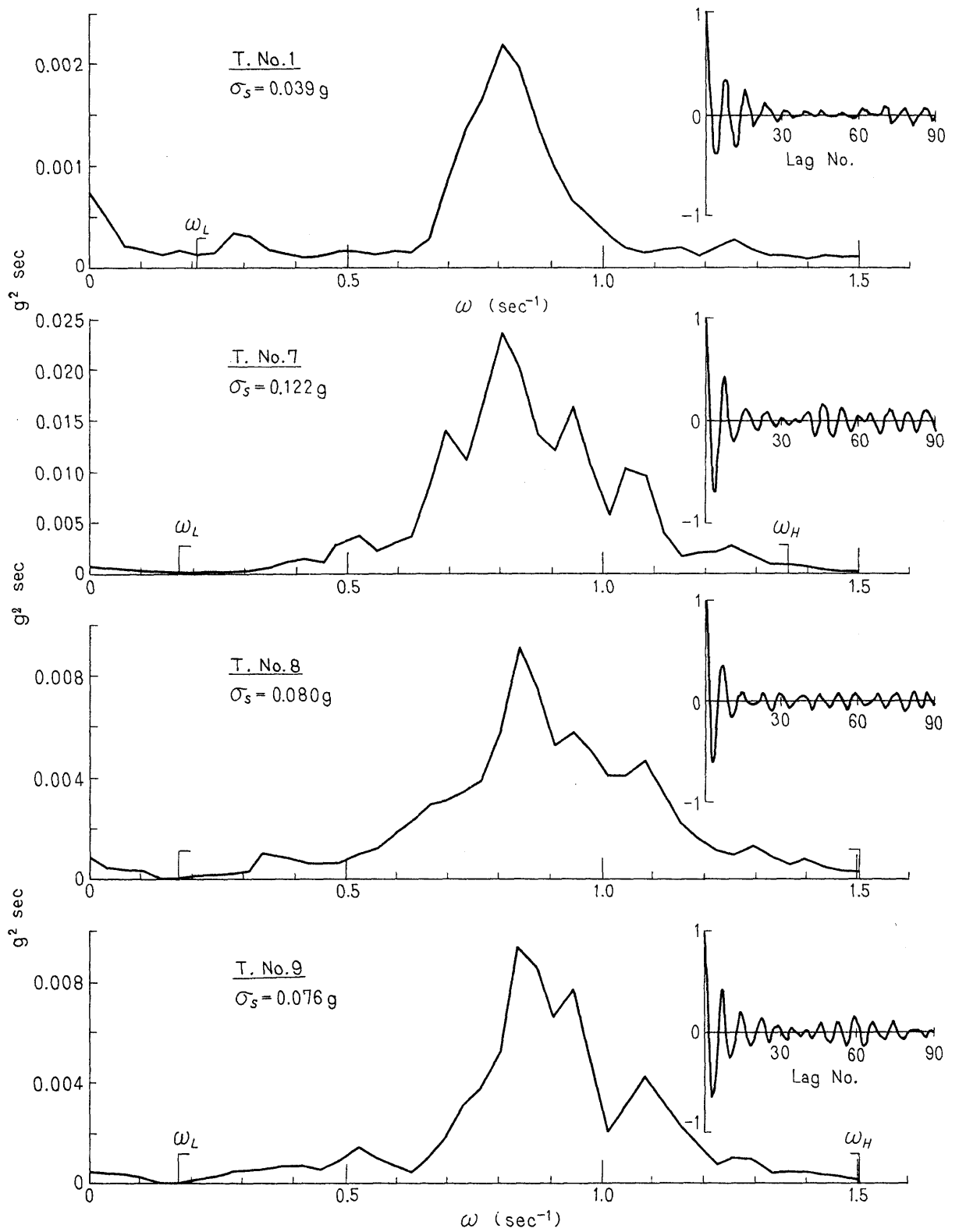


Fig. 3.5 (a) Spectra and Correlograms of Vertical Acceleration at F.P.

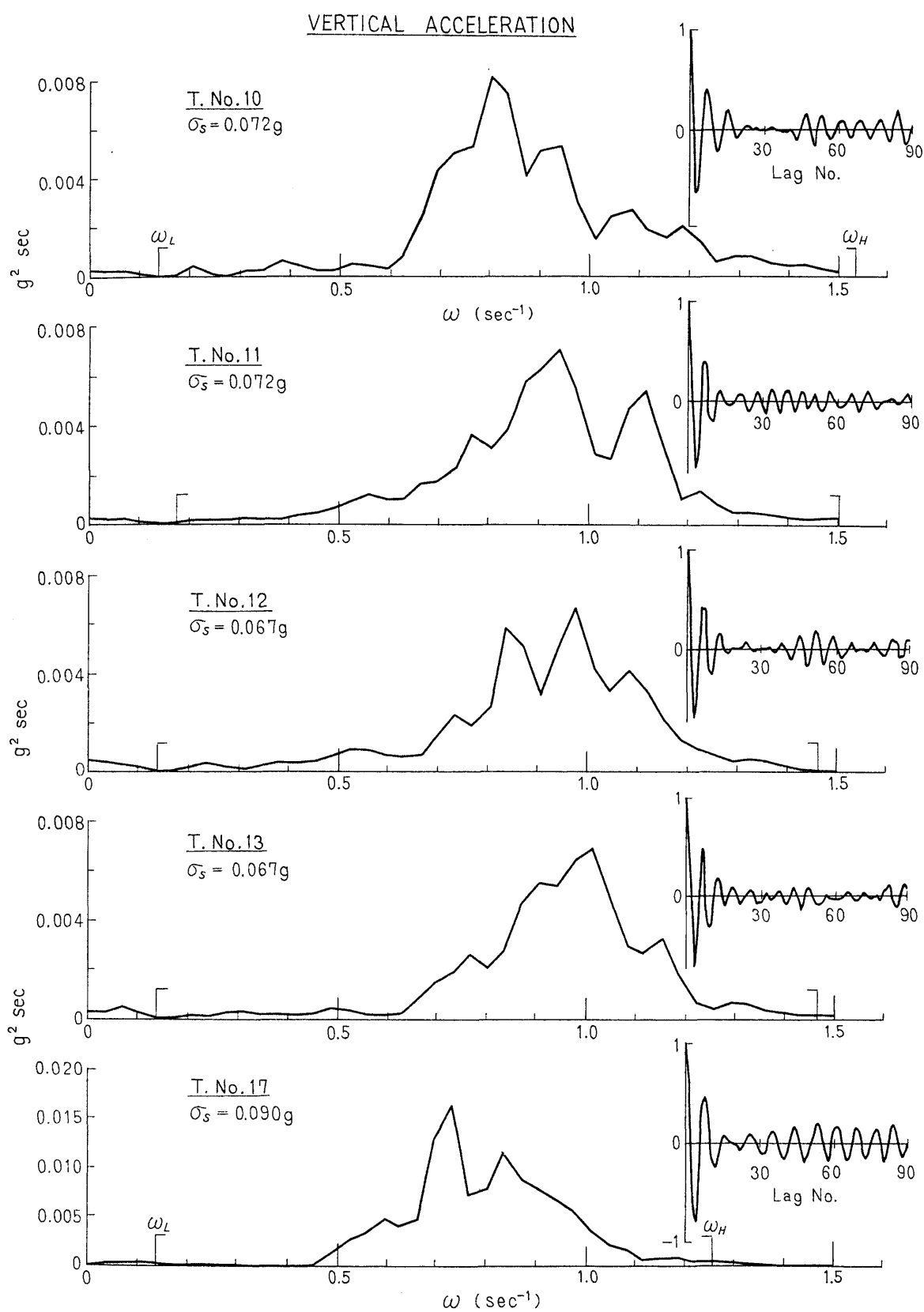


Fig. 3.5 (b) Spectra and Correlograms of Vertical Acceleration at F.P.

LATERAL ACCELERATION

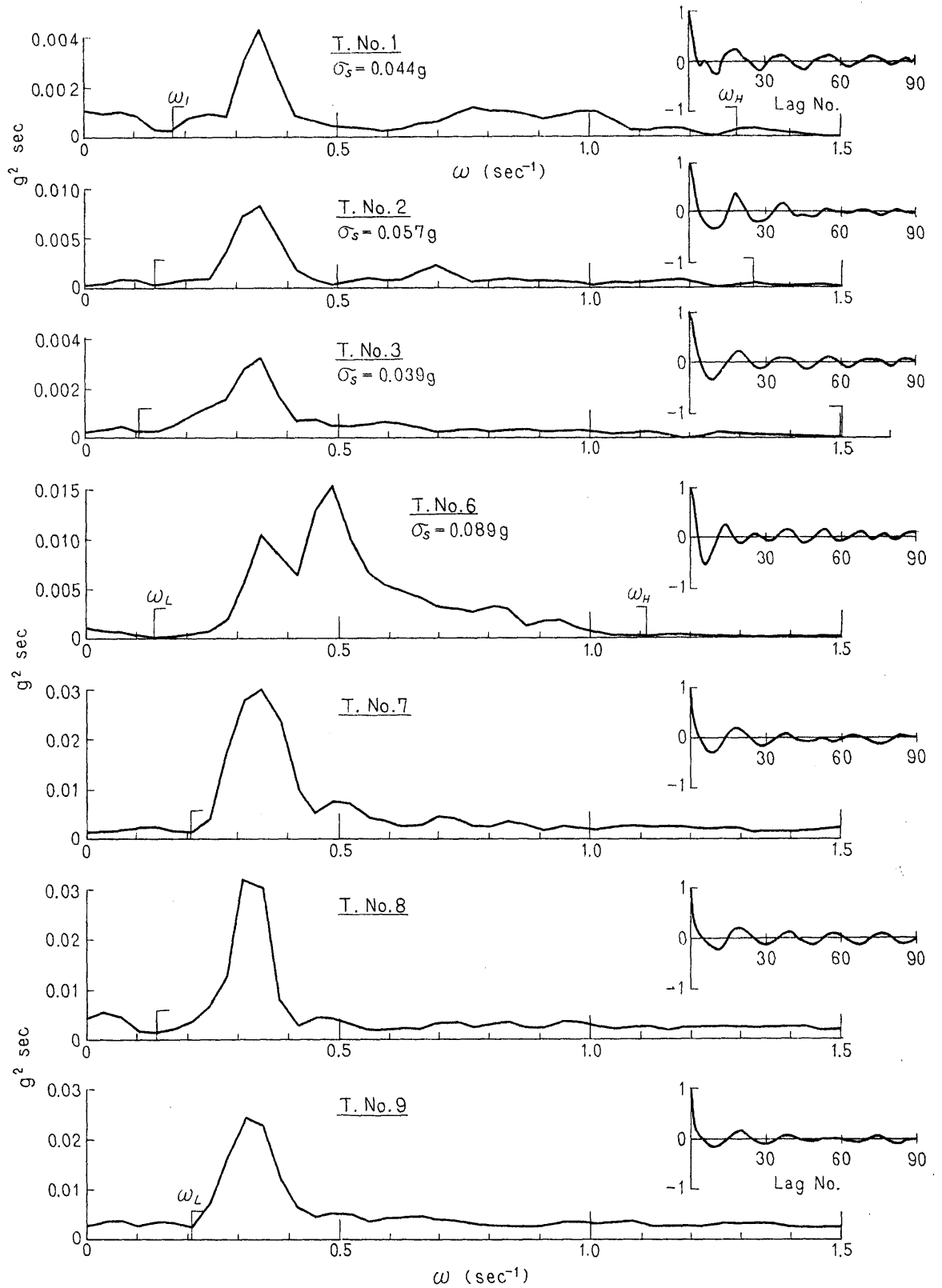


Fig. 3.6 (a) Spectra and Correlograms of Lateral Acceleration at F.P.

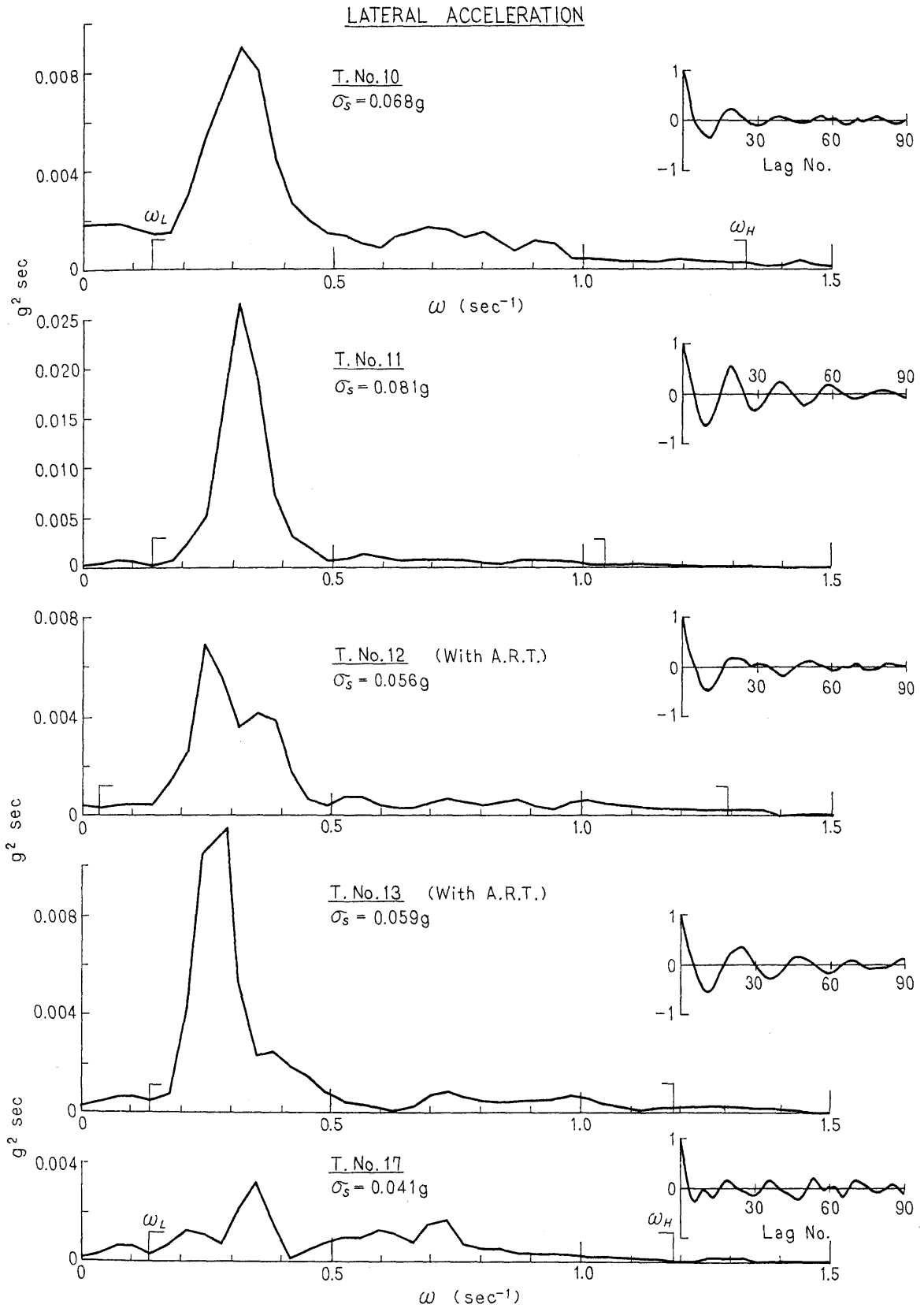


Fig. 3.6 (b) Spectra and Correlograms of Lateral Acceleration at F.P.

PITCH

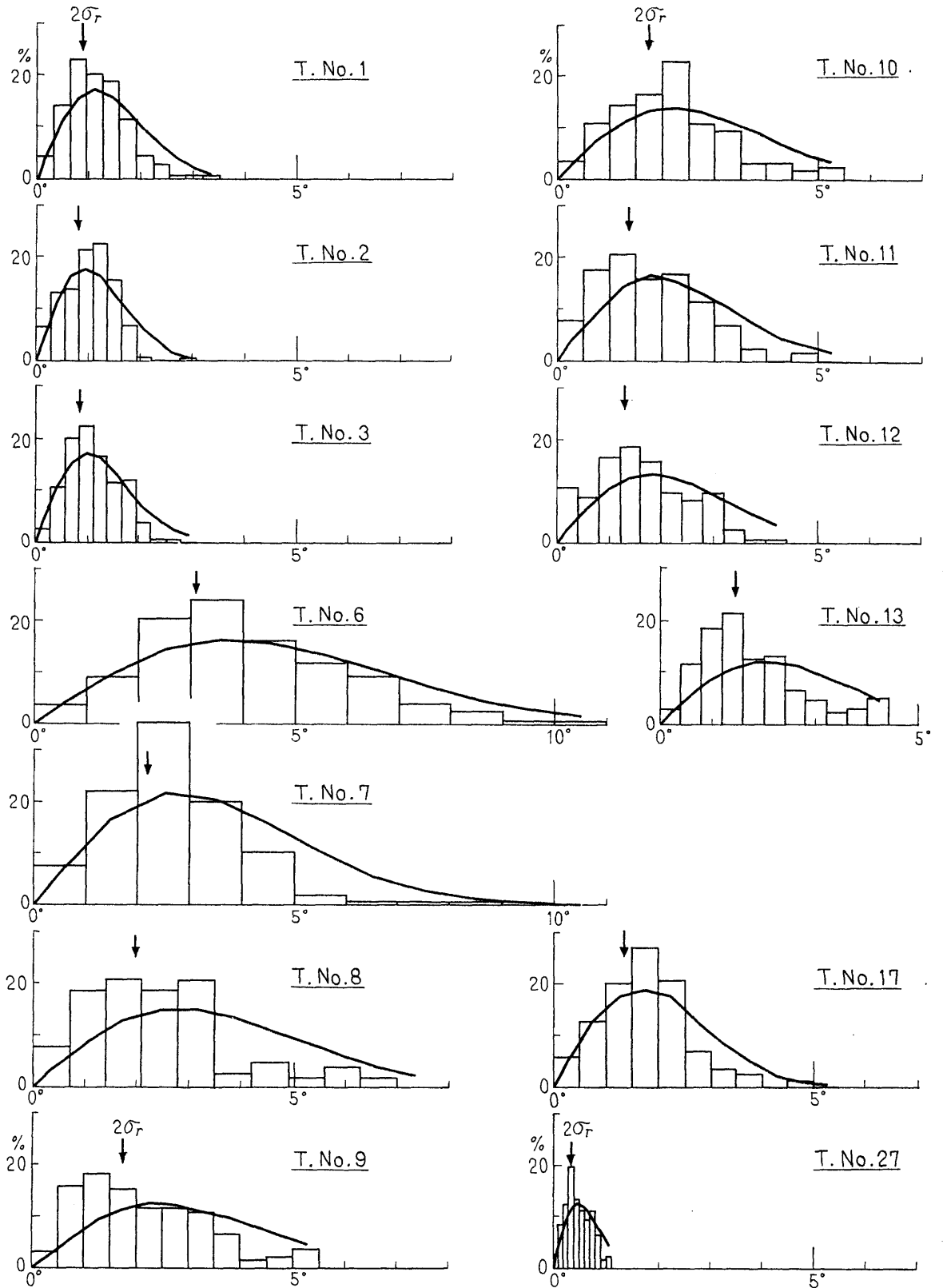


Fig. 3.7 Histograms and Rayleigh Distributions of Pitch Double Amplitudes

ROLL

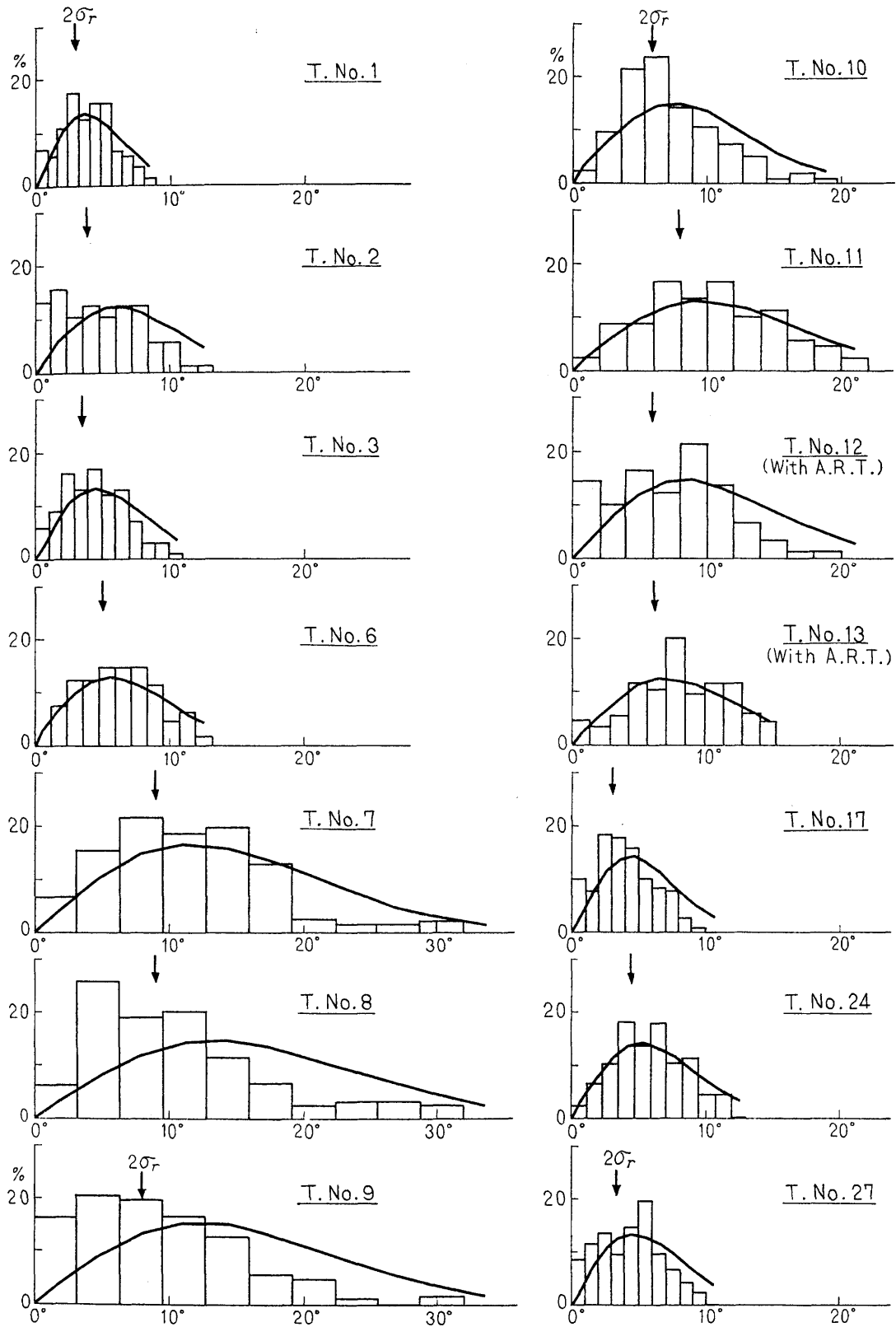


Fig. 3.8 Histograms and Rayleigh Distributions of Roll Double Amplitudes

YAW

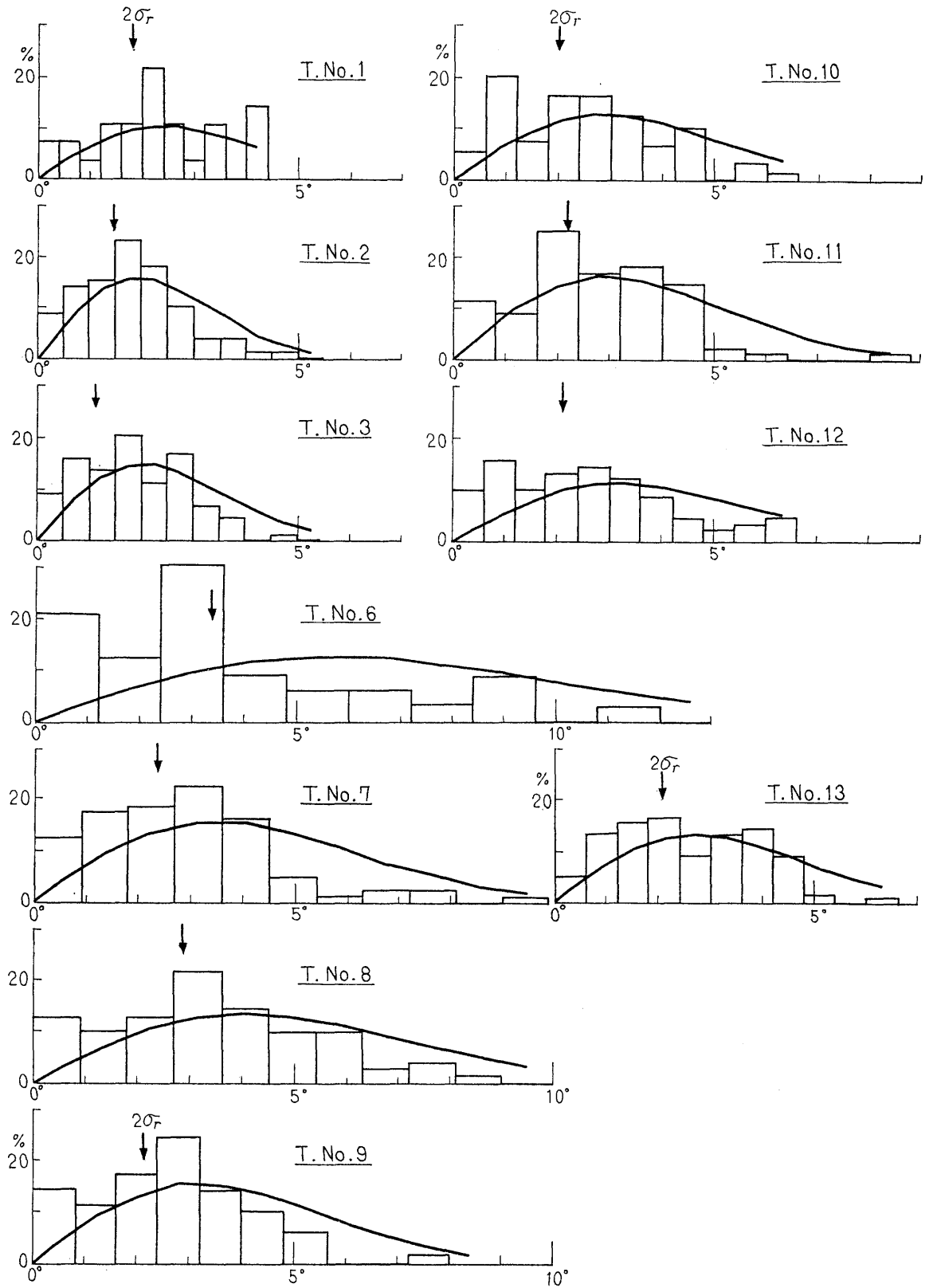


Fig. 3.9 Histograms and Rayleigh Distributions of Yaw Double Amplitudes

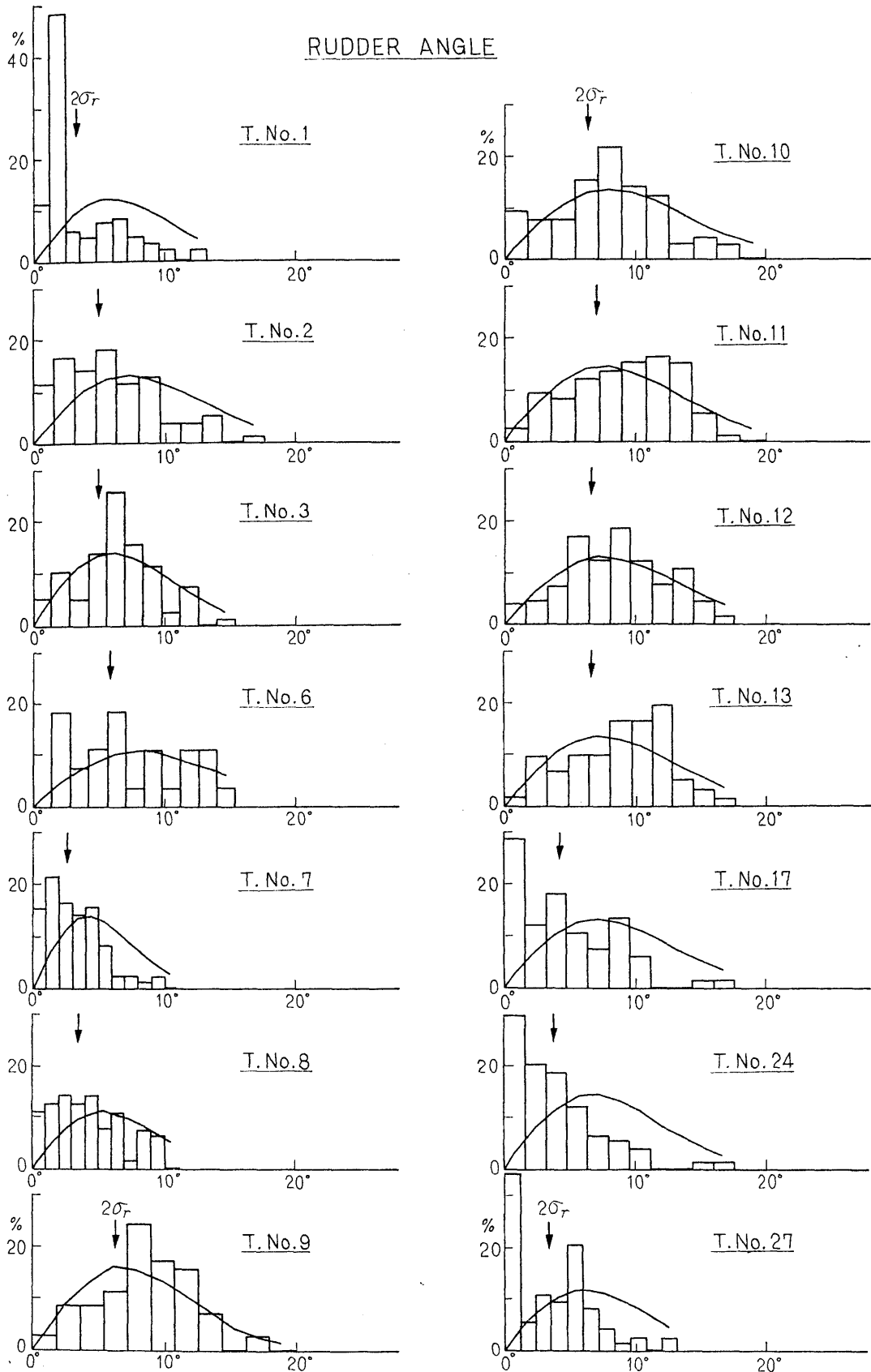


Fig. 3.10 Histograms and Rayleigh Distributions of Rudder Angle Double Amplitudes

VERTICAL ACCELERATION

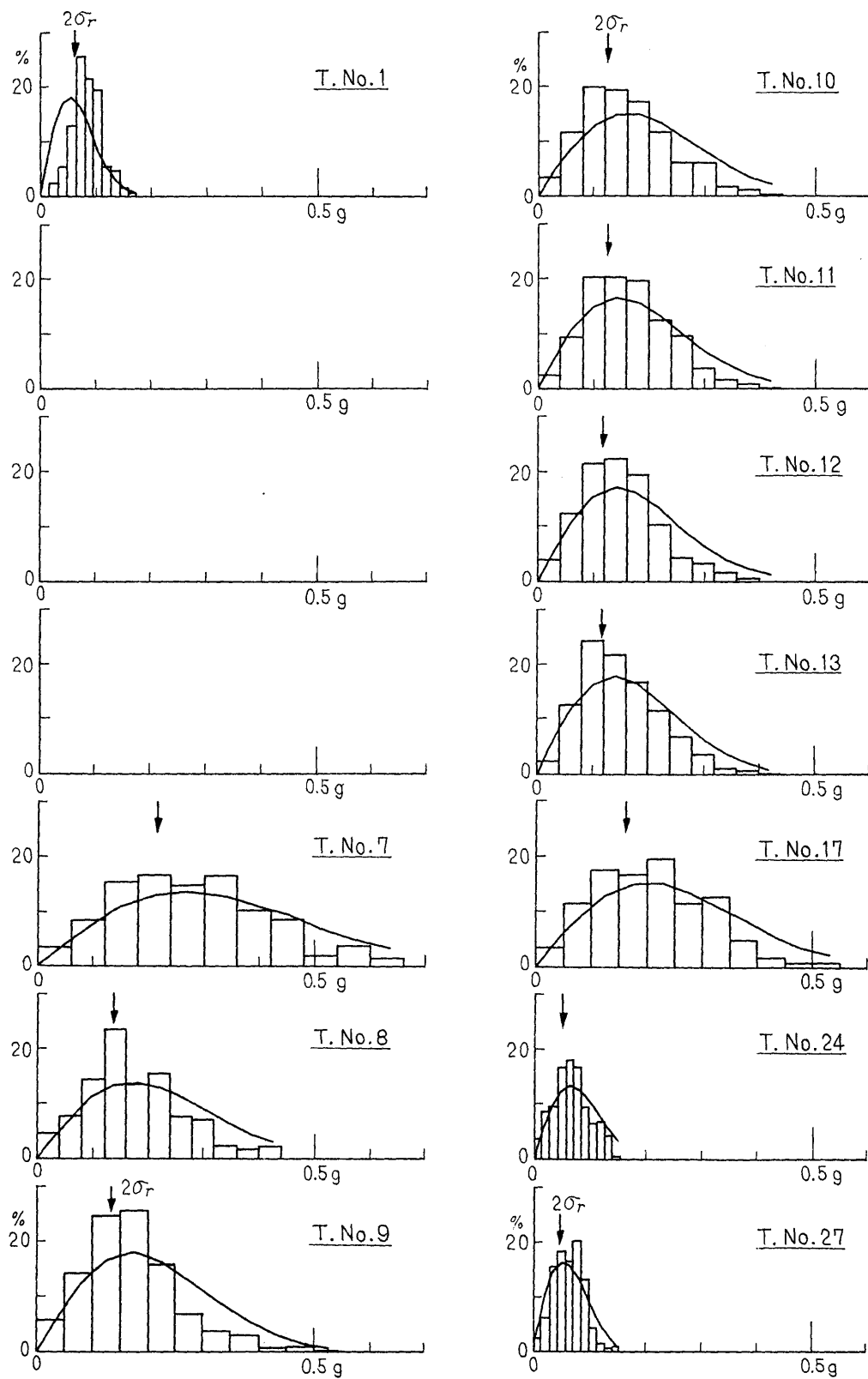


Fig. 3.11 Histograms and Rayleigh Distributions of Vertical Acceleration at F.P.

LATERAL ACCELERATION

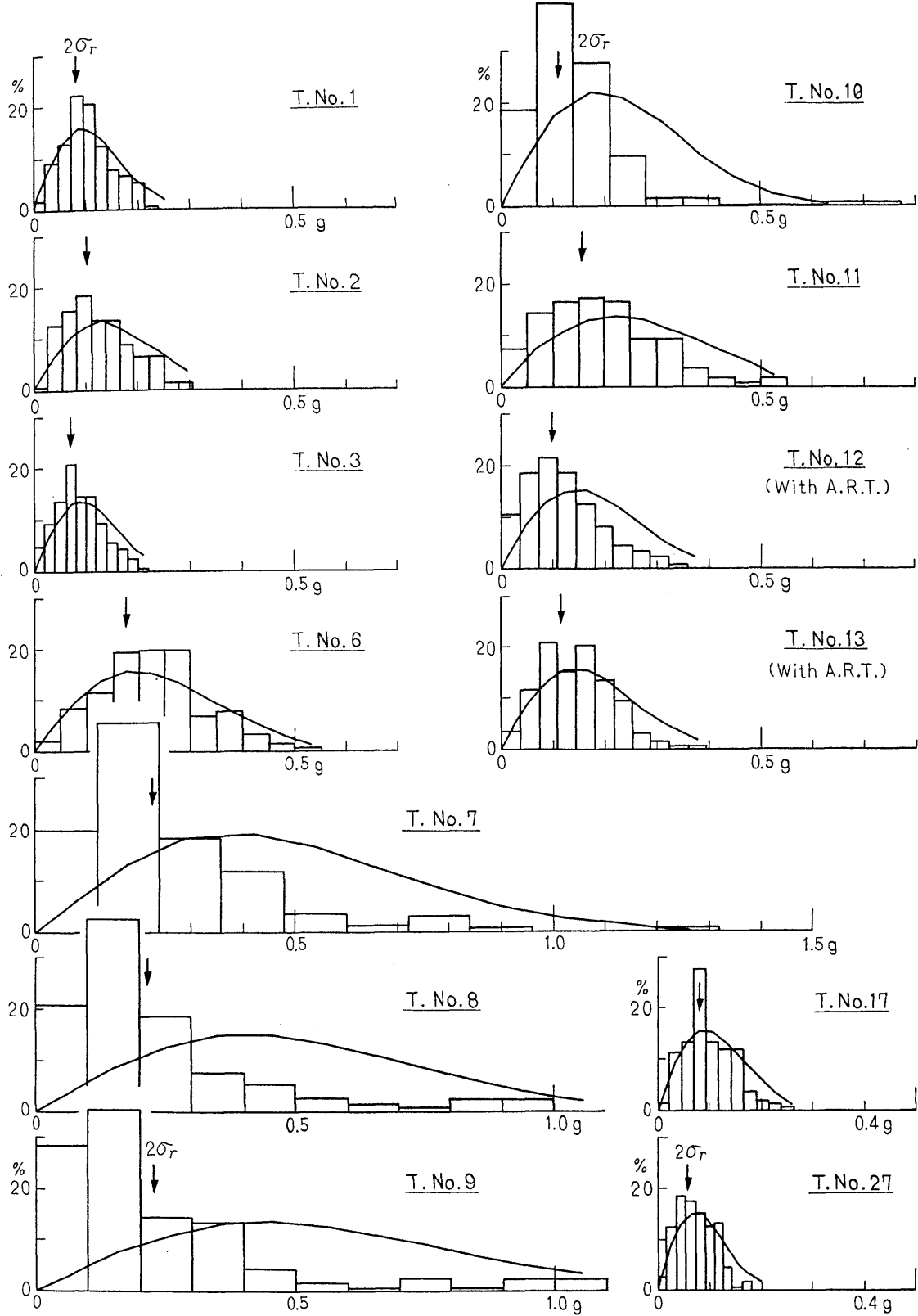


Fig. 3.12 Histograms and Rayleigh Distributions of Lateral Acceleration at F.P.

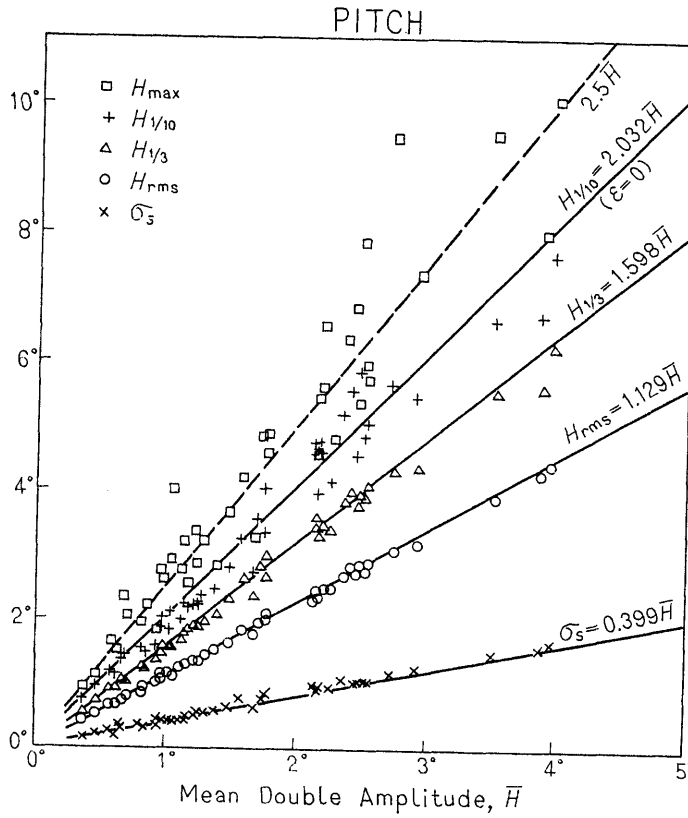


Fig. 3.13 Double Amplitudes of Pitch

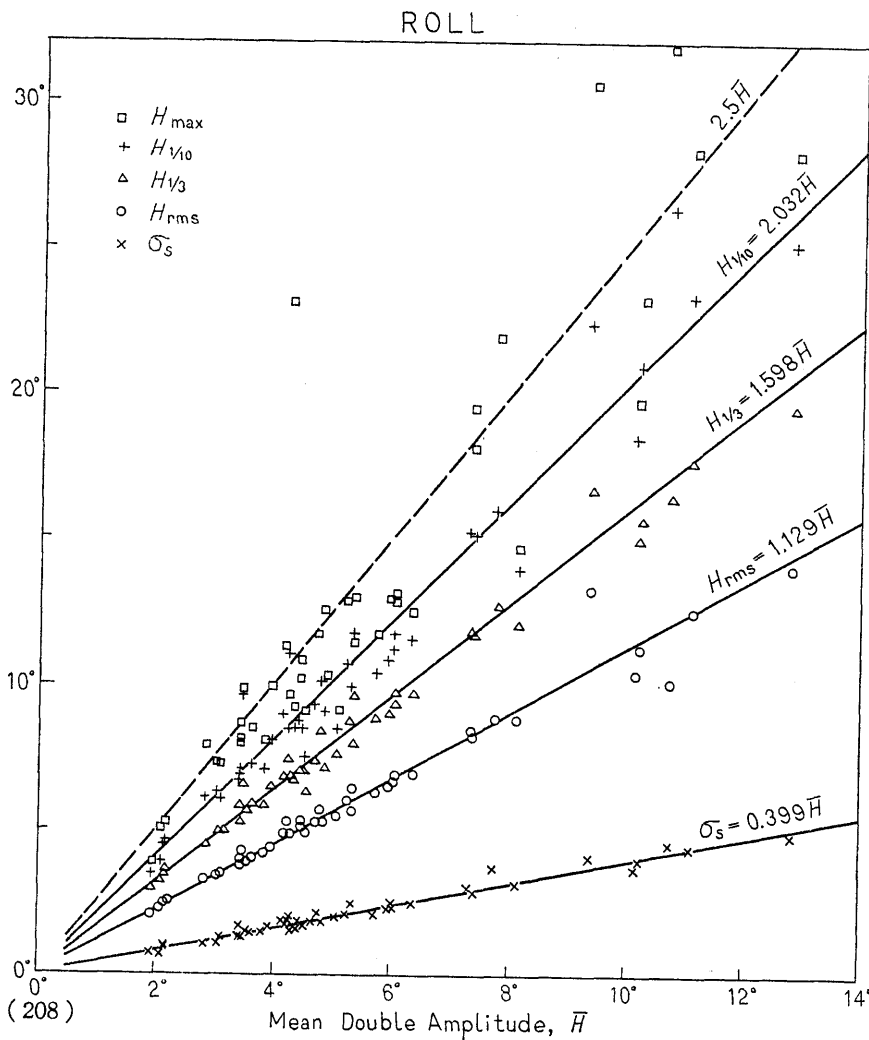


Fig. 3.14 Double Amplitudes of Roll

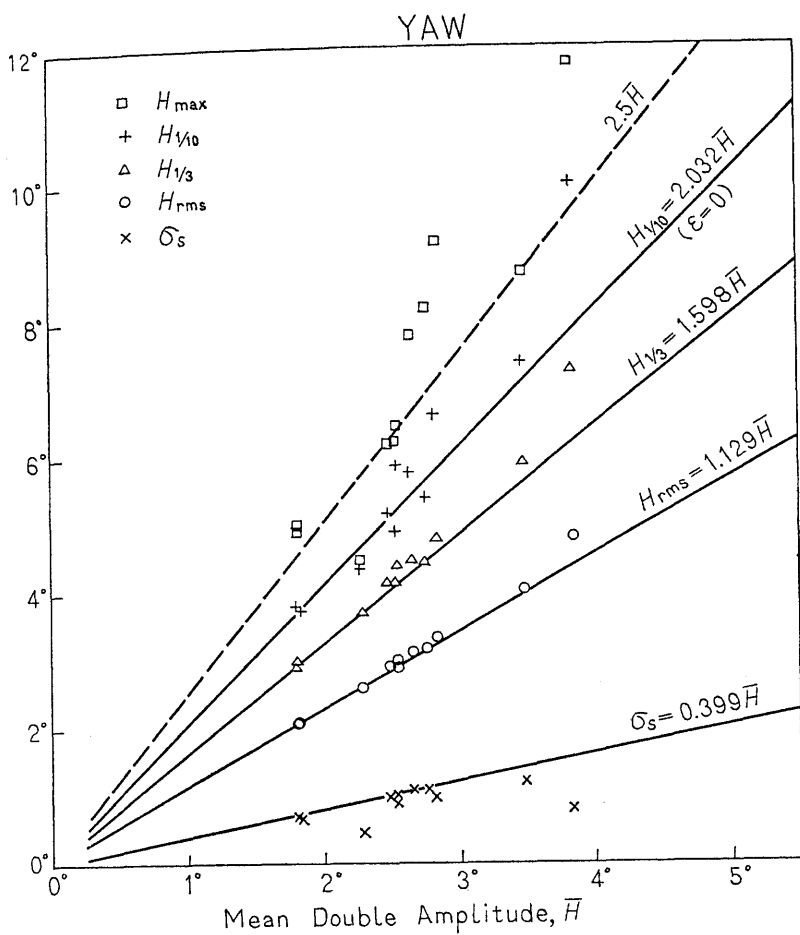


Fig. 3.15 Double Amplitudes of Yaw

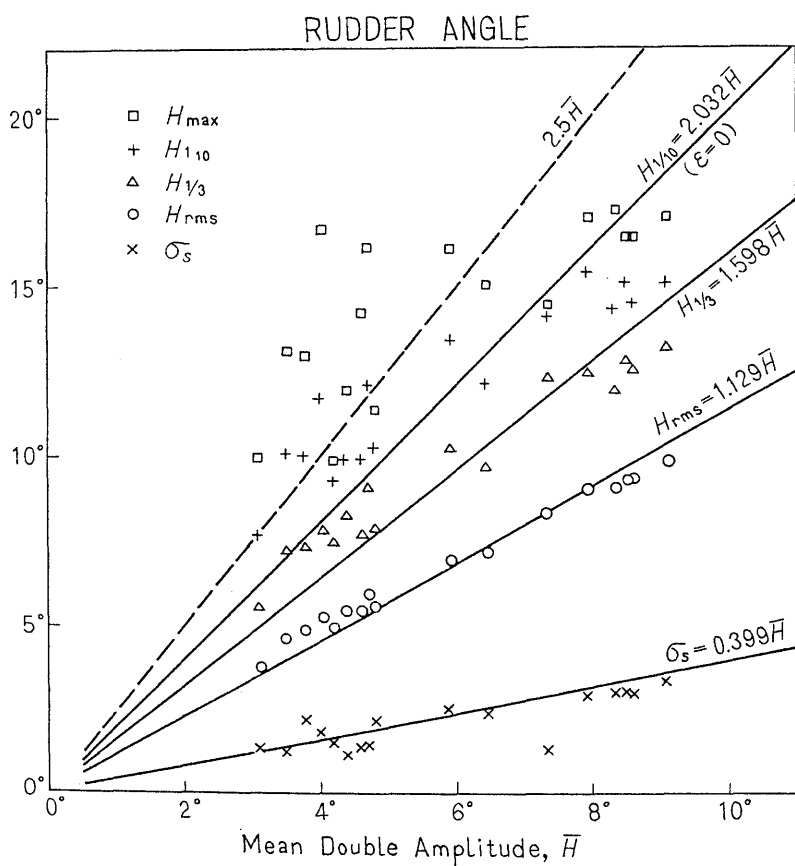


Fig. 3.16 Double Amplitudes of Rudder Angle

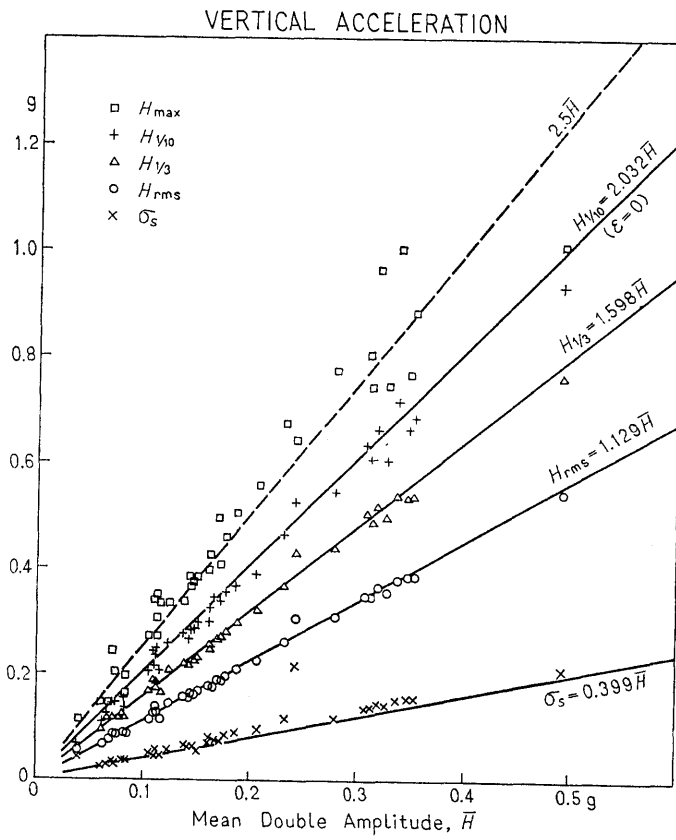


Fig. 3.17 Double Amplitudes of Vertical Acceleration at F.P.

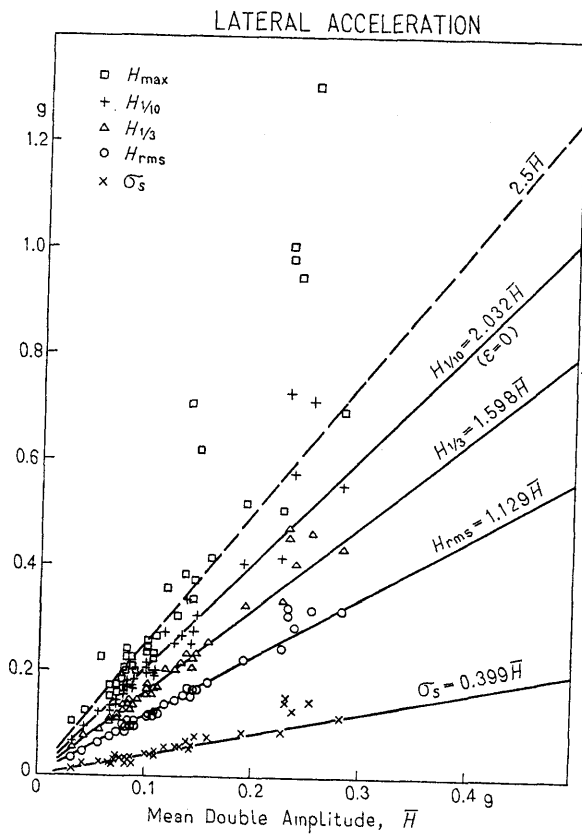


Fig. 3.18 Double Amplitudes of Lateral Acceleration at F.P.

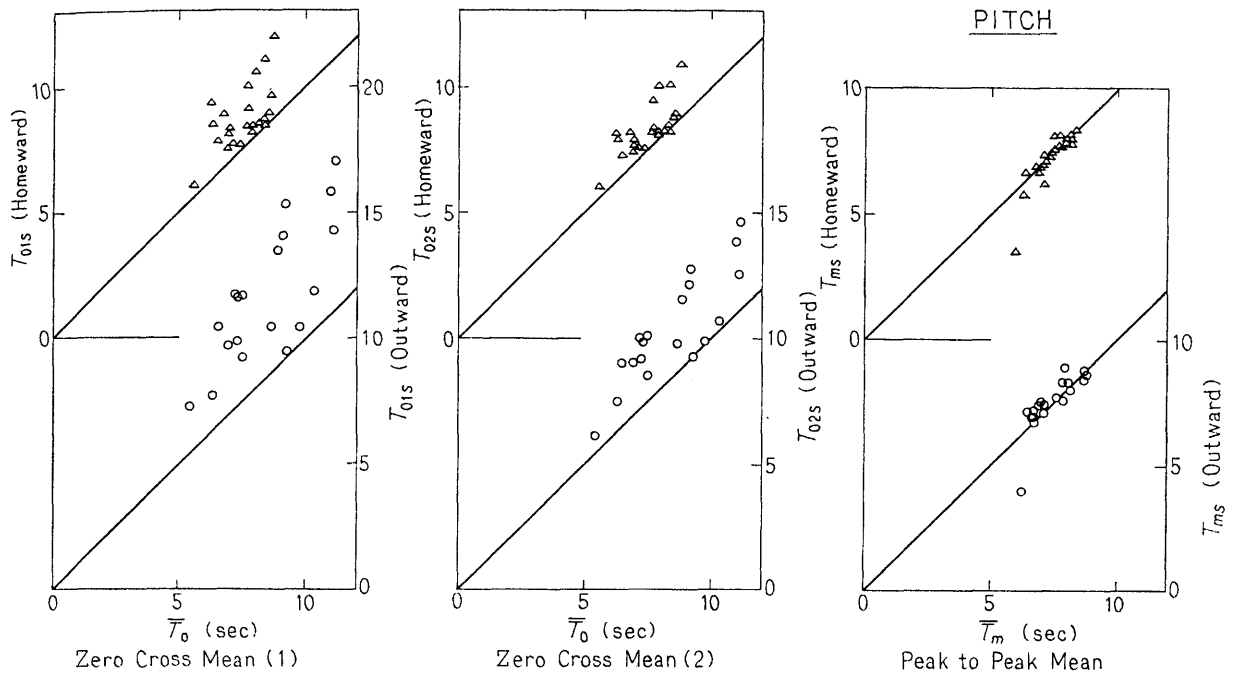


Fig. 3.19 Relation between Mean Periods of Pitch

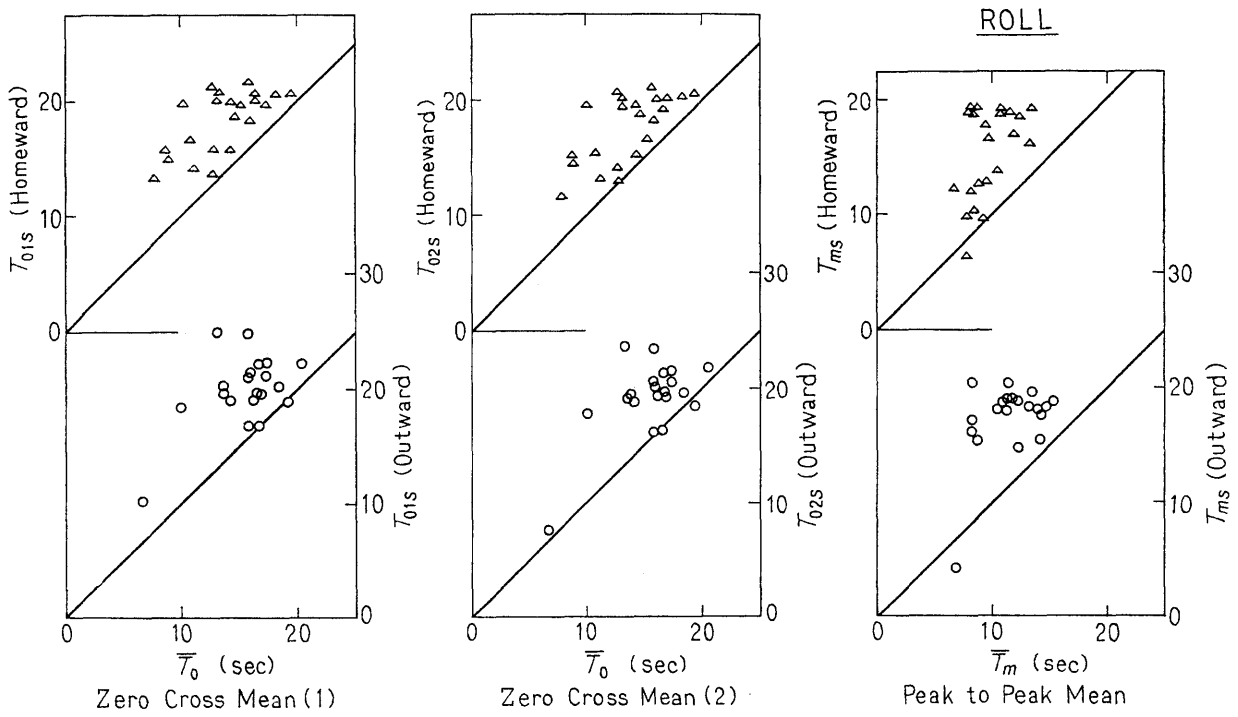


Fig. 3.20 Relation between Mean Periods of Roll

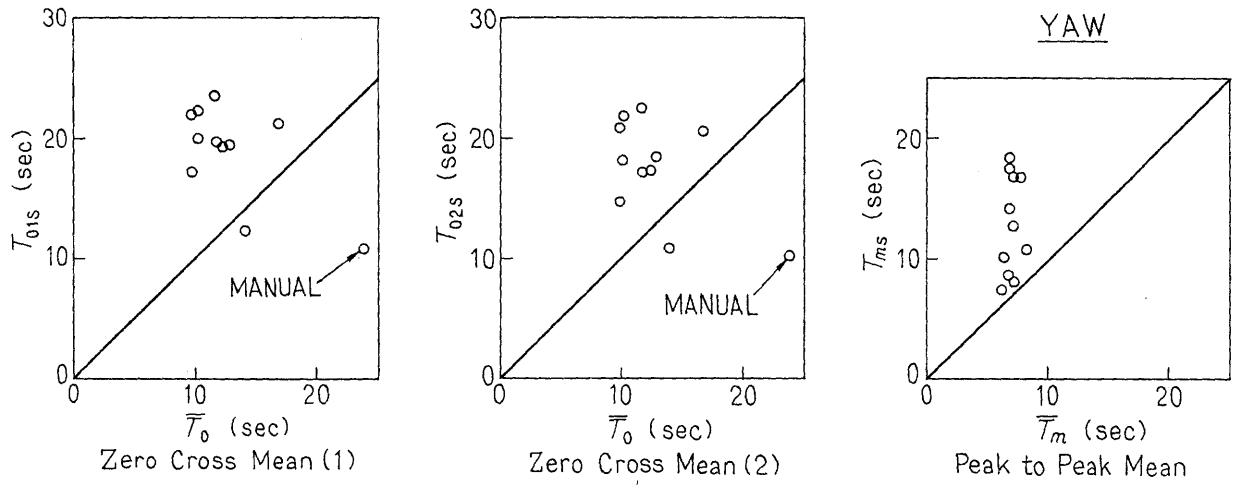


Fig. 3.21 Relation between Mean Periods of Yaw

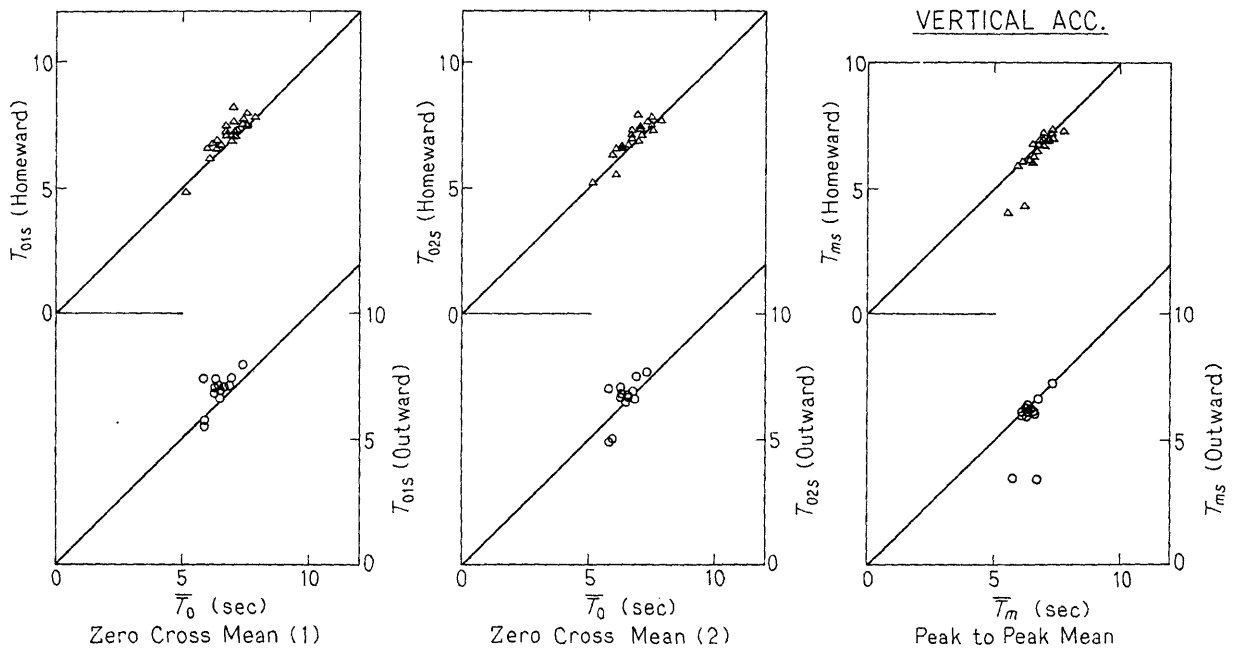


Fig. 3.22 Relation between Mean Periods of Vertical Acceleration at F.P.

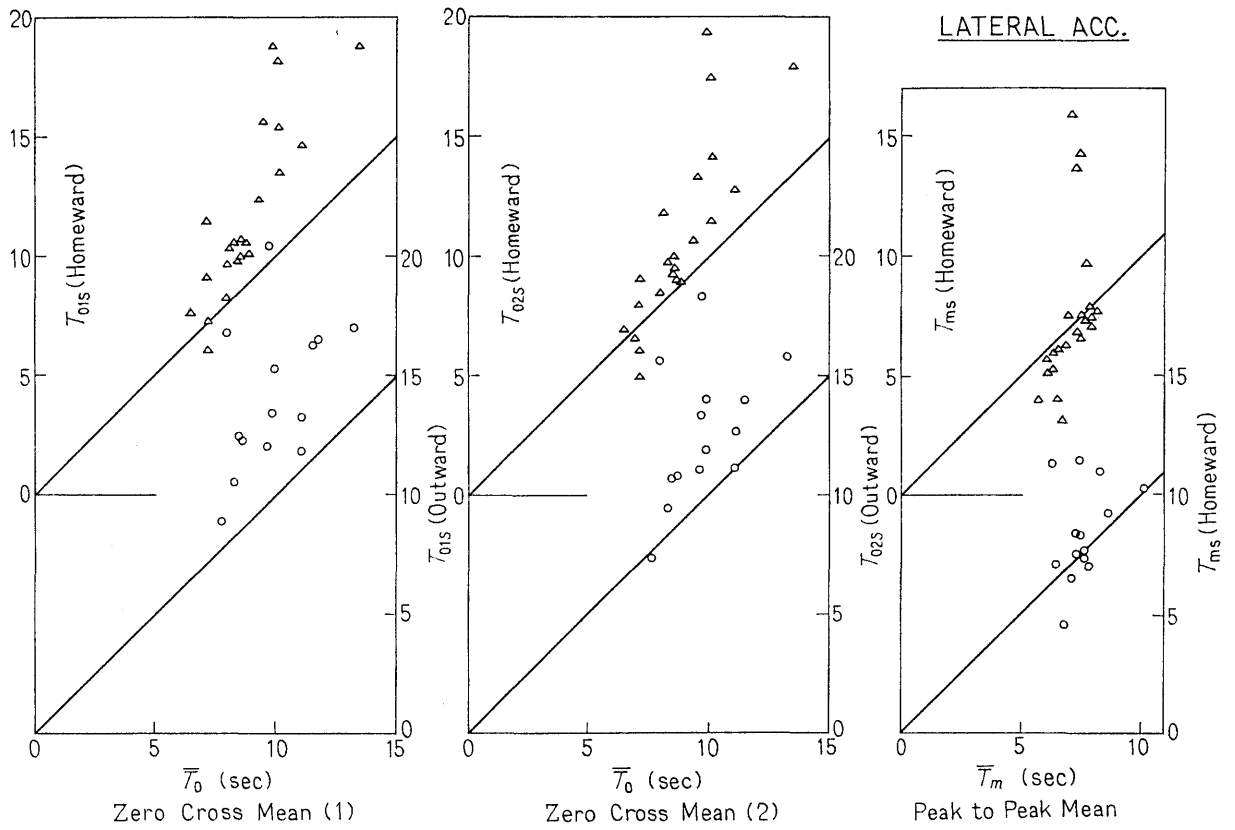


Fig. 3.23 Relation between Mean Periods of Lateral Acceleration at F.P.

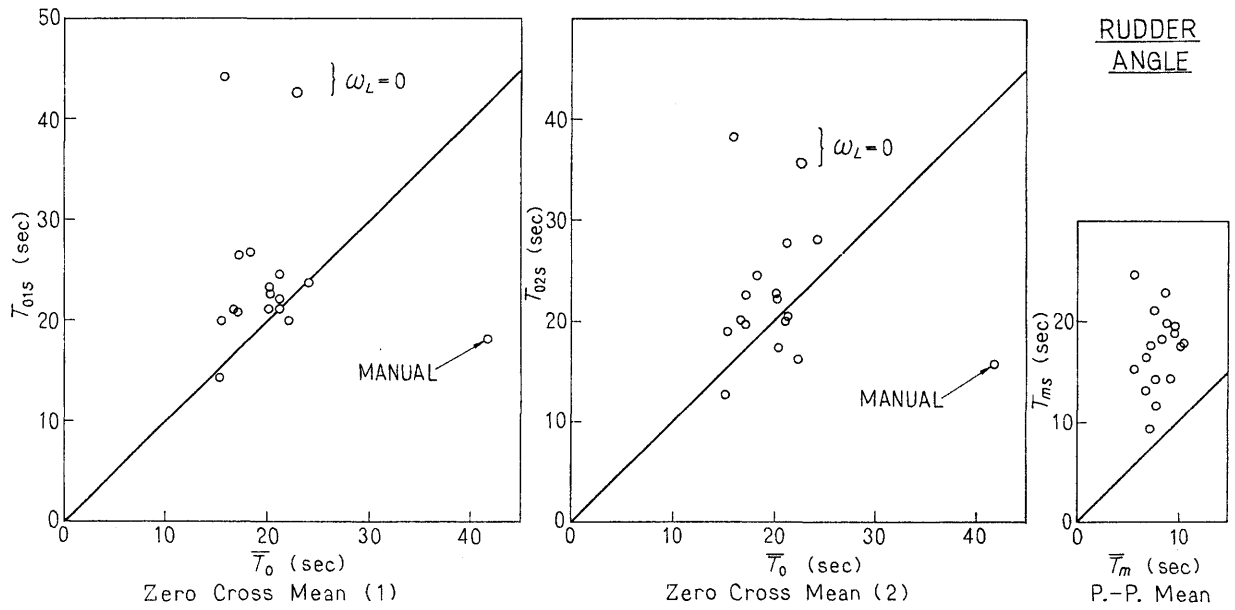


Fig. 3.24 Relation between Mean Periods of Rudder Angle

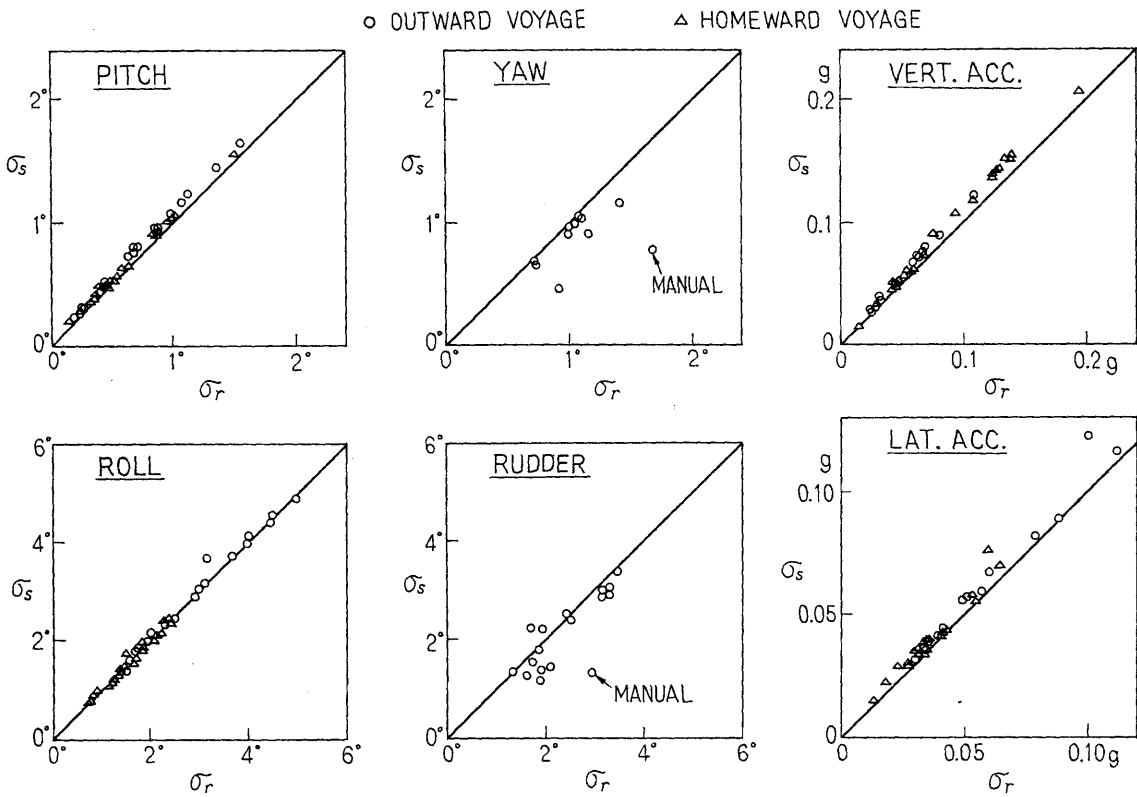


Fig. 3.25 Relation between Standard Deviations

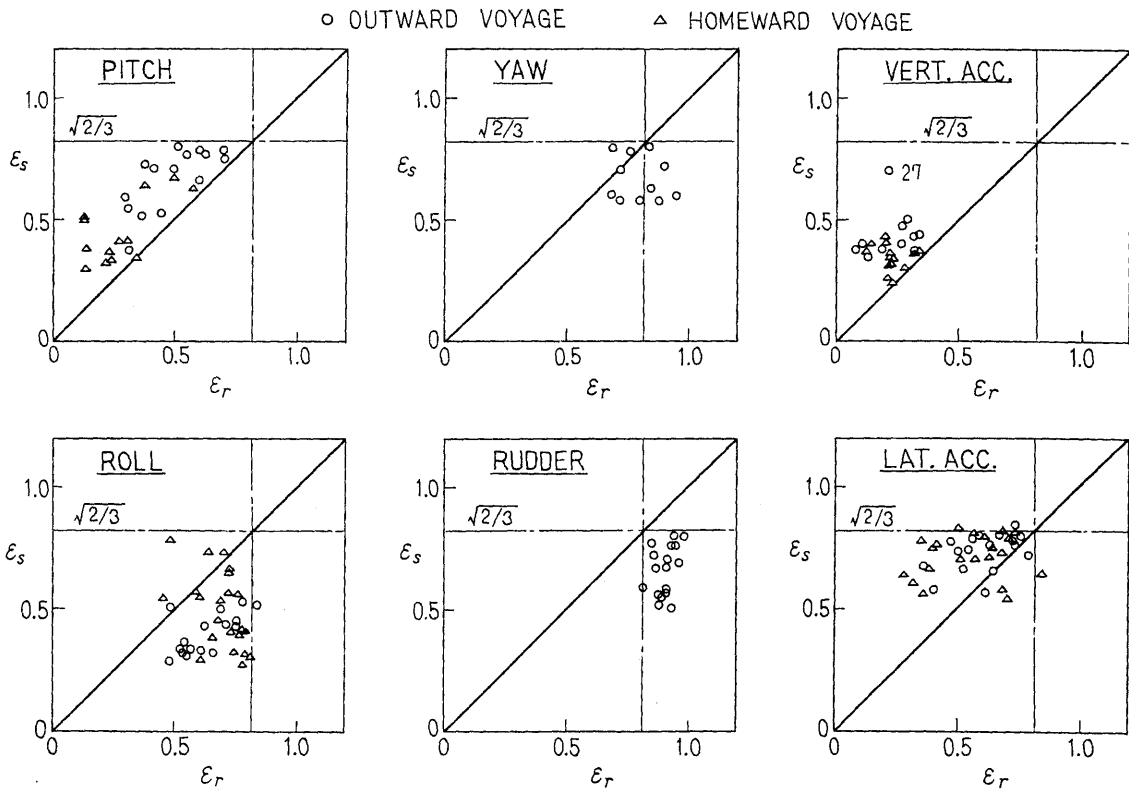


Fig. 3.26 Relation between Band Width Parameters

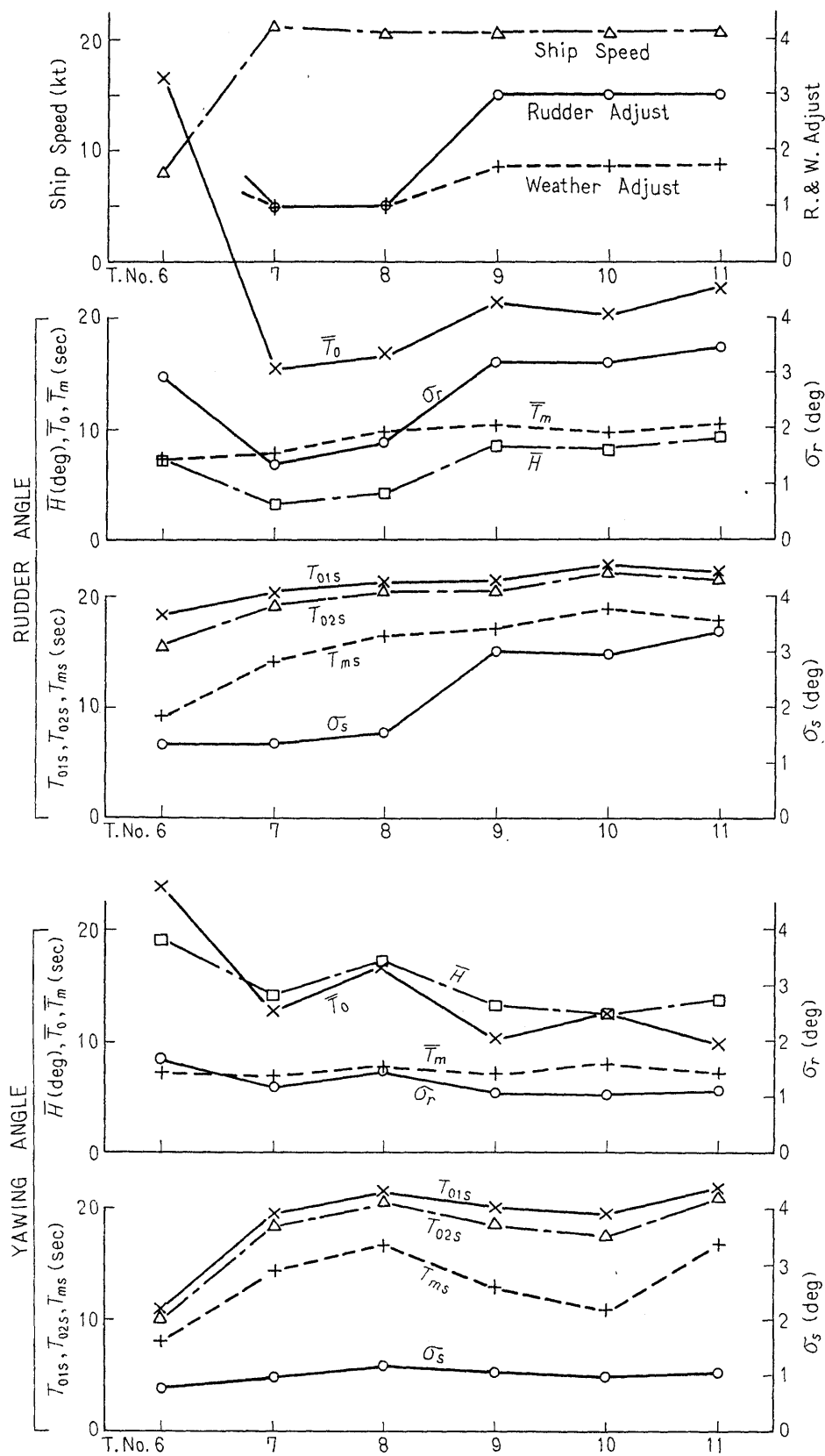


Fig. 3.27 Effect of Auto-Pilot Adjust

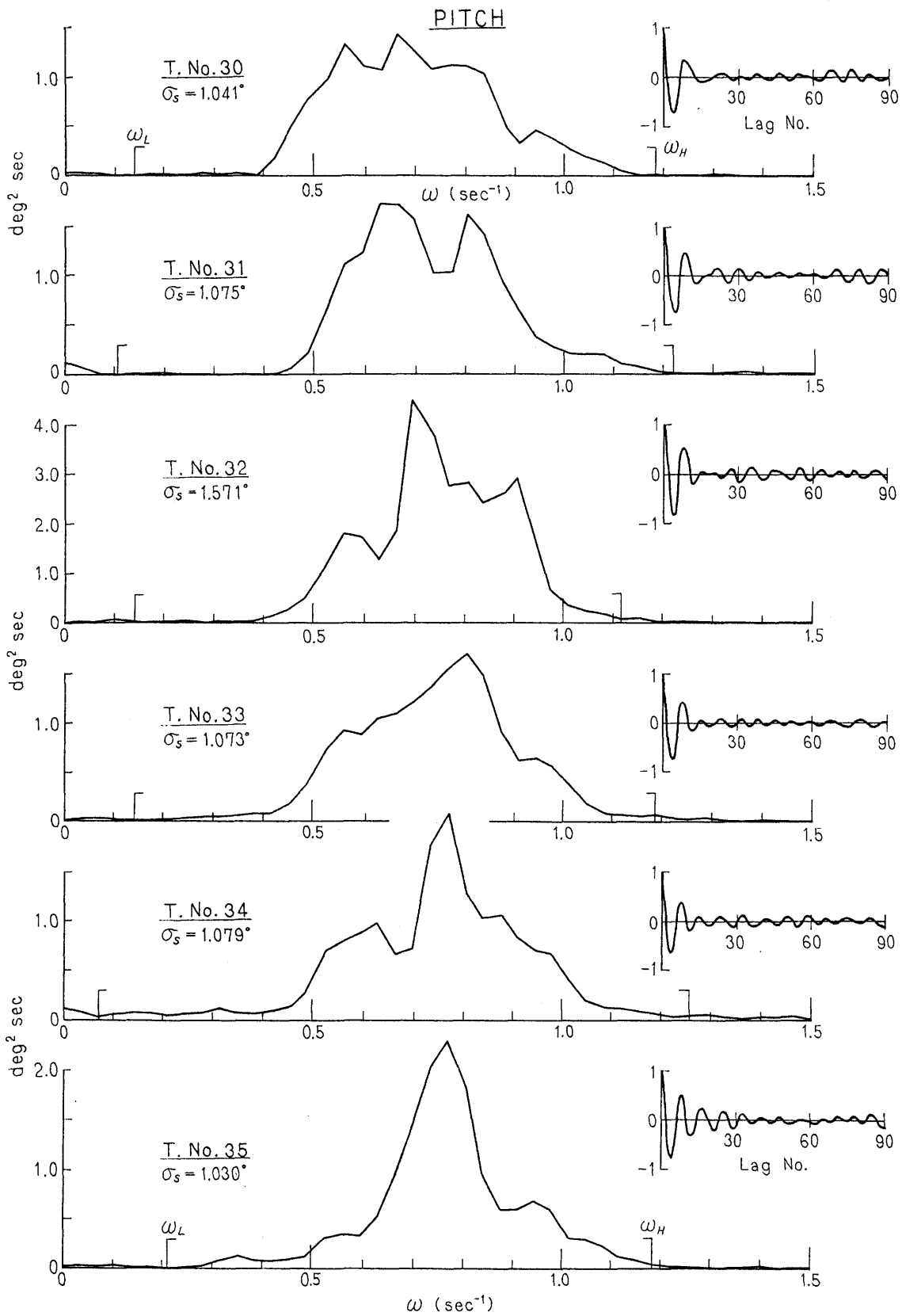


Fig. 3.28 Spectra and Correlograms of Pitch

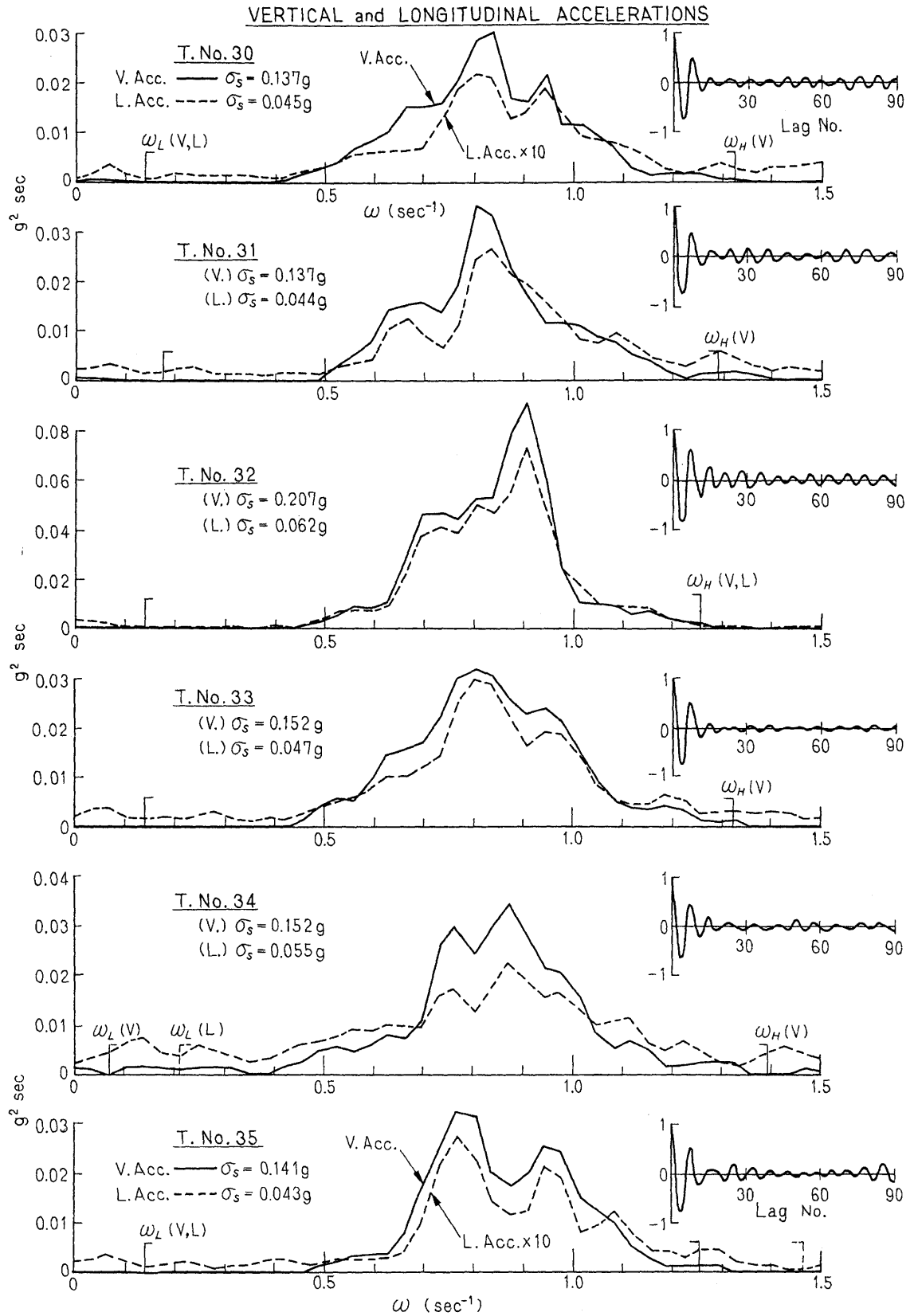


Fig. 3.29 Spectra and Correlograms of Vertical Acceleration at F.P. and Spectra of Longitudinal Acceleration at Navigation Bridge.

ROLL

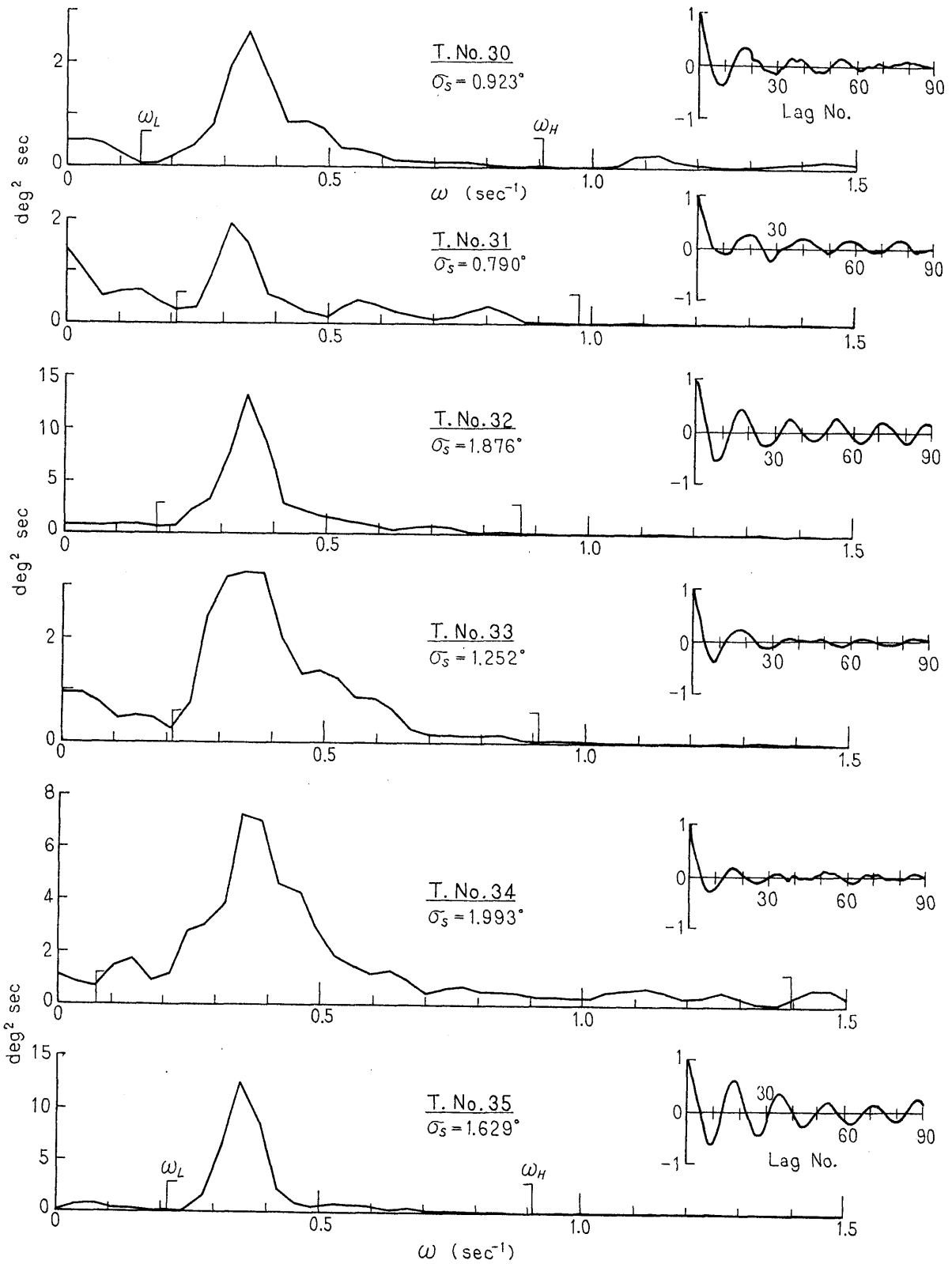


Fig. 3.30 Spectra and Correlograms of Roll

LATERAL ACCELERATION

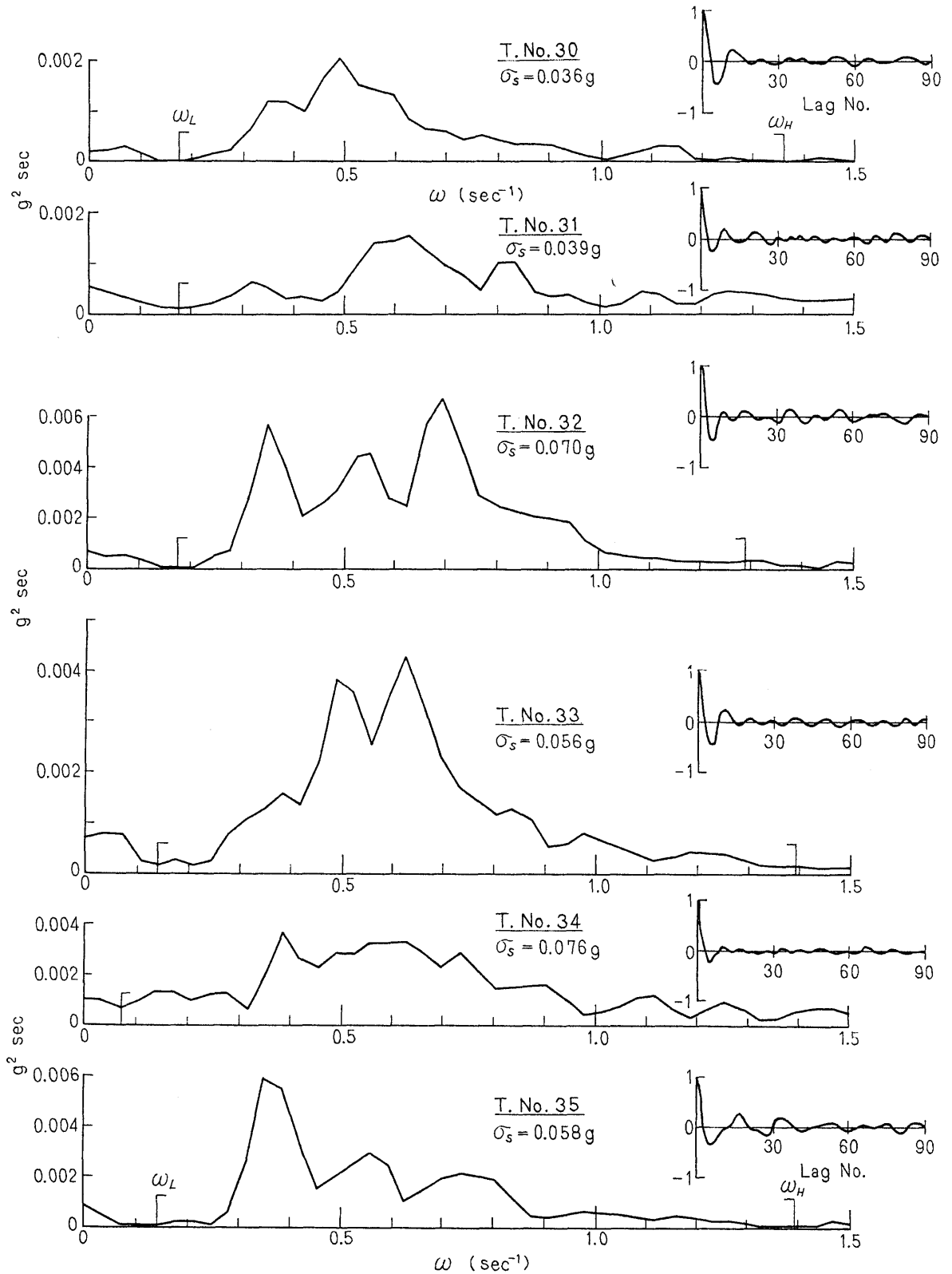


Fig 3.31 Spectra and Correlograms of Lateral Acceleration at F.P.

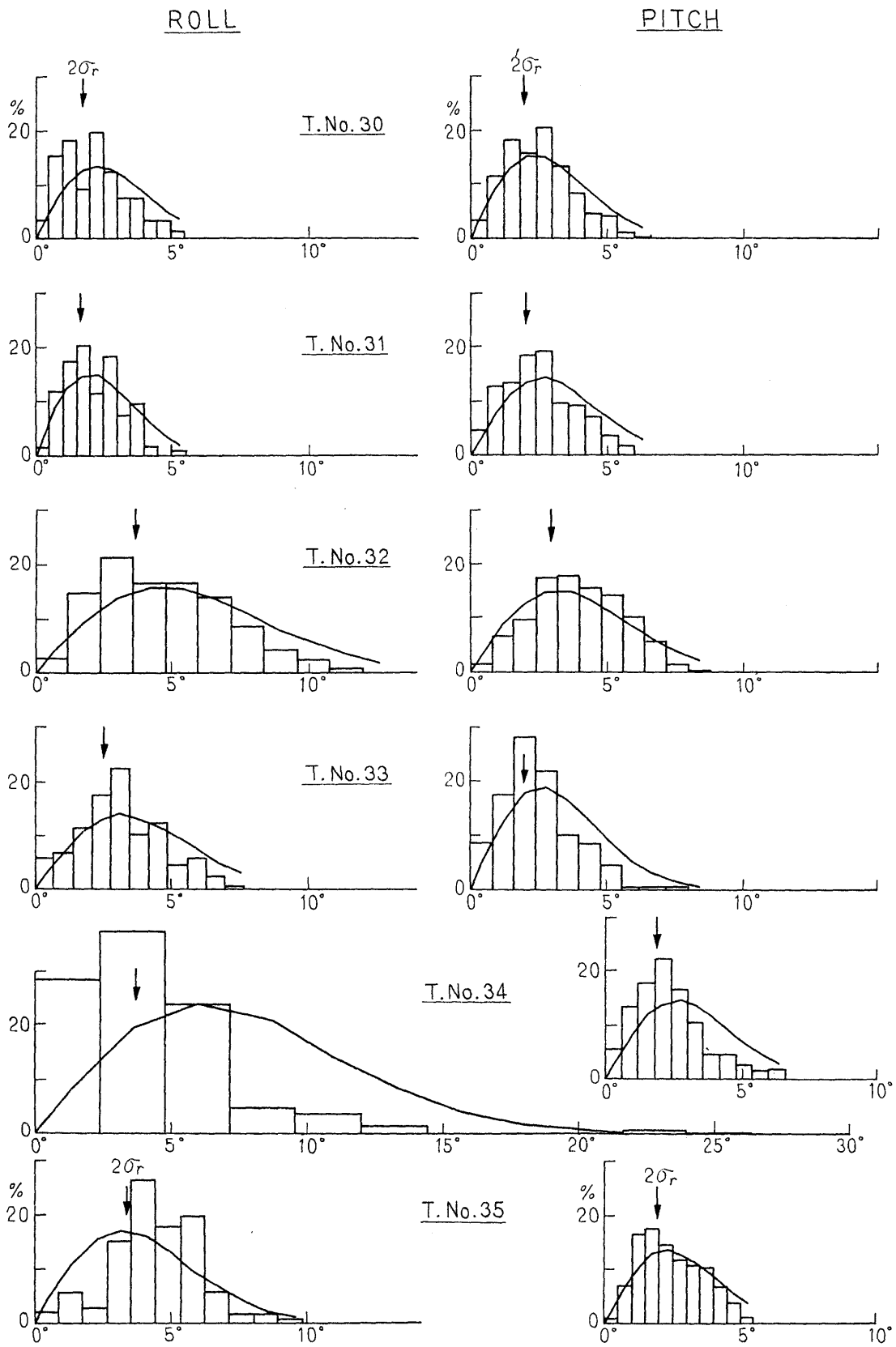


Fig. 3.32 Histograms and Rayleigh Distributions of Roll and Pitch

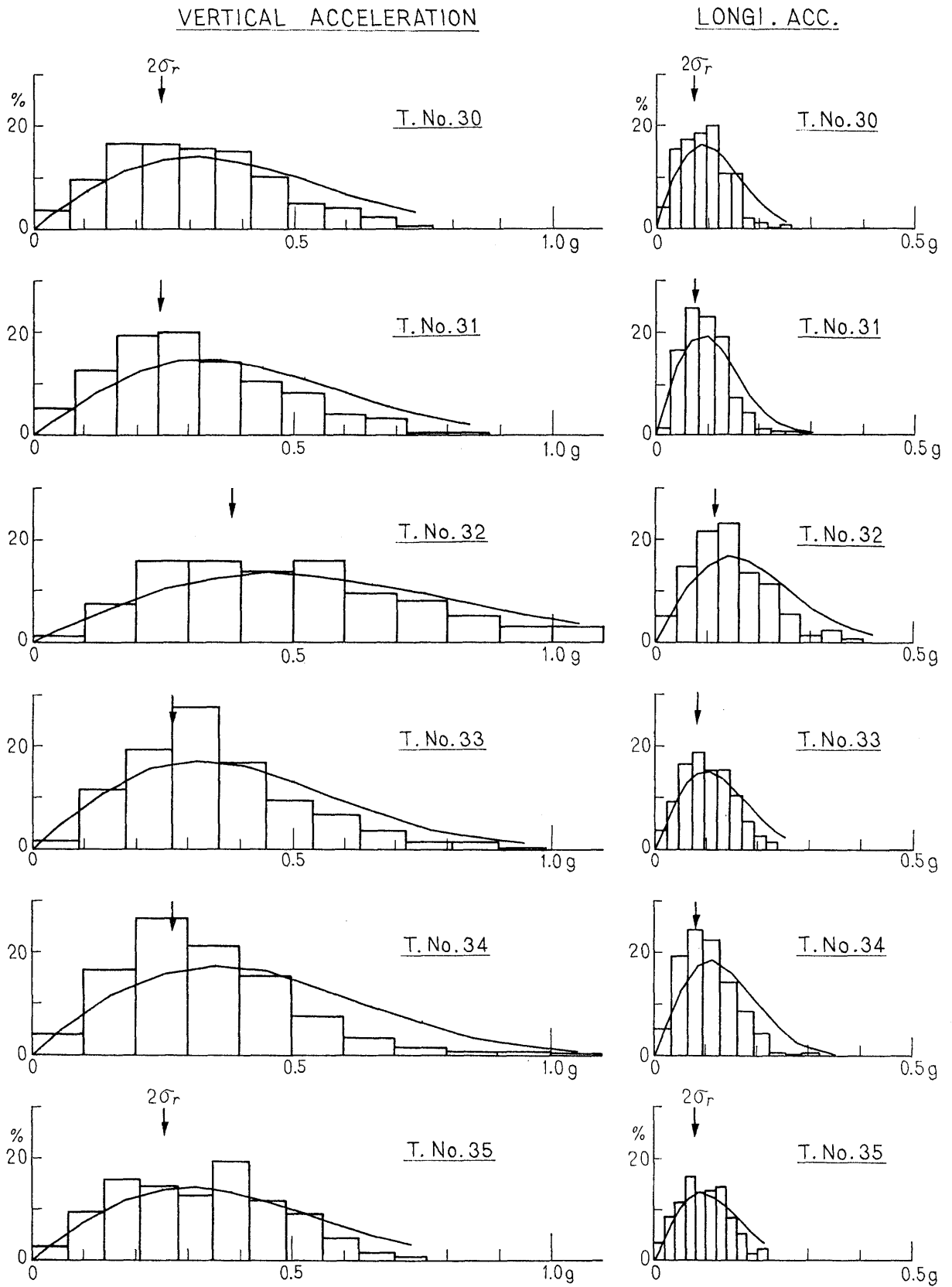


Fig. 3.33 Histograms and Rayleigh Distributions of Vertical Acceleration at F.P. and Longitudinal Acceleration at Navigation Bridge.

LATERAL ACCELERATION

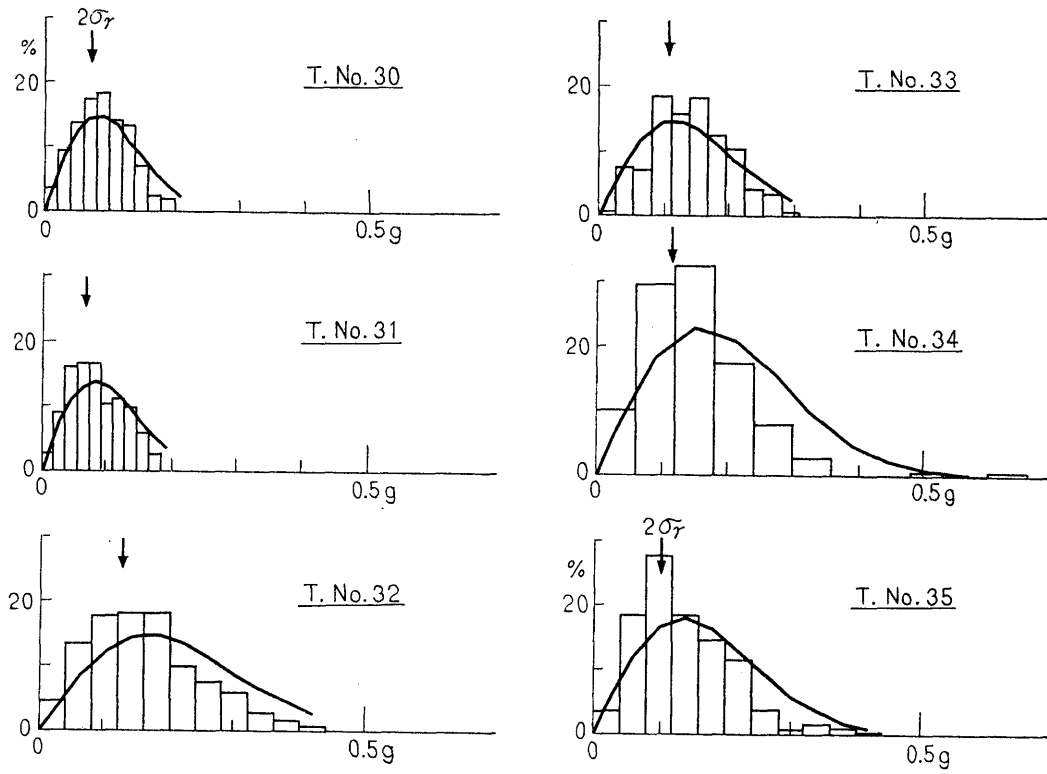


Fig. 3.34 Histograms and Rayleigh Distributions of Lateral Acceleration at F.P.

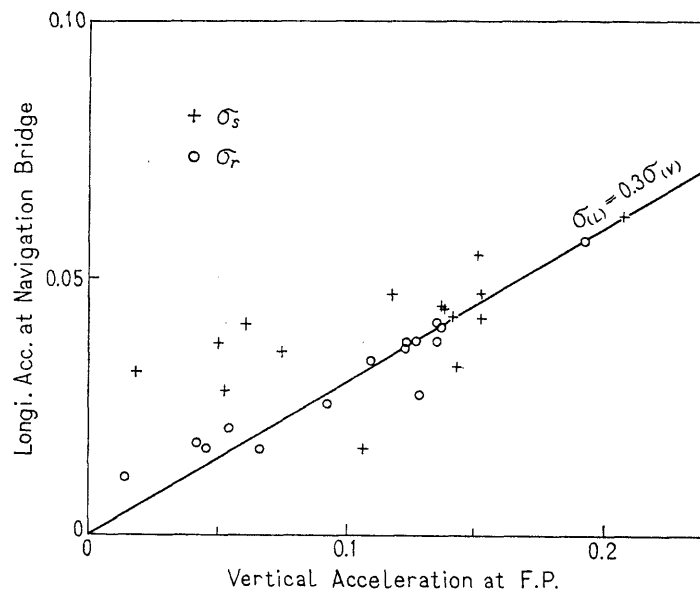


Fig. 3.35 Relation between Vertical and Longitudinal Accelerations

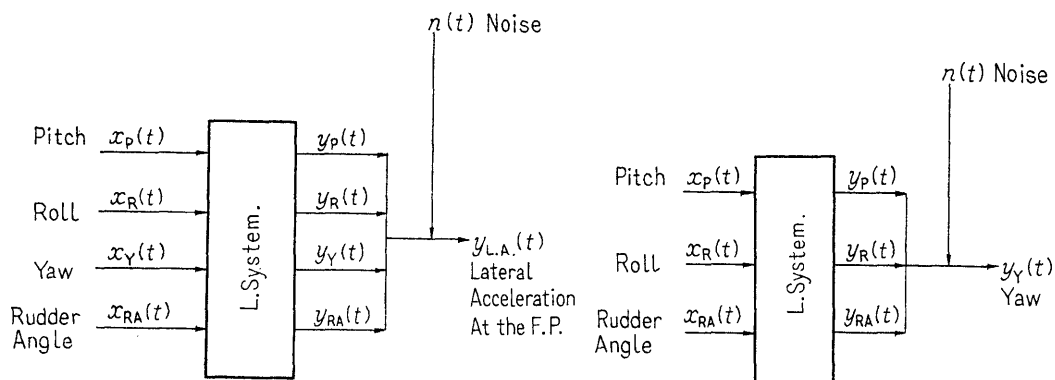


Fig. 4.1 Stochastic Model of Multiple input analysis

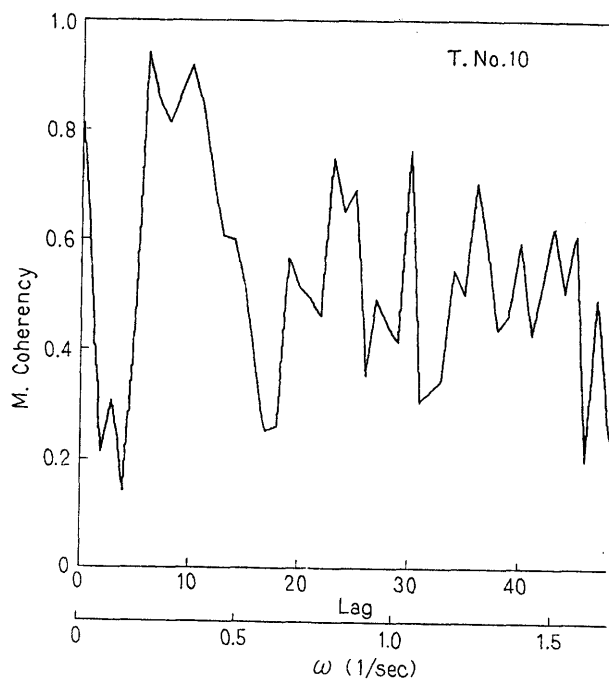


Fig. 4.2 Multiple Coherency of Lateral Acceleration at F.P. (T. No. 10)

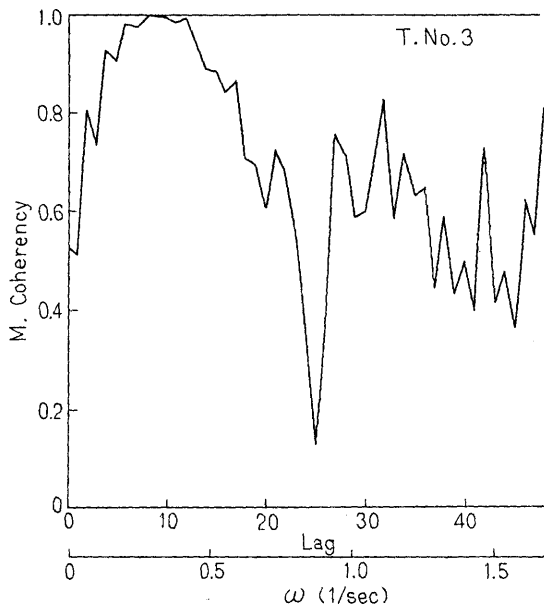


Fig. 4.3(a) Multiple Coherency of Lateral Acceleration at F.P.

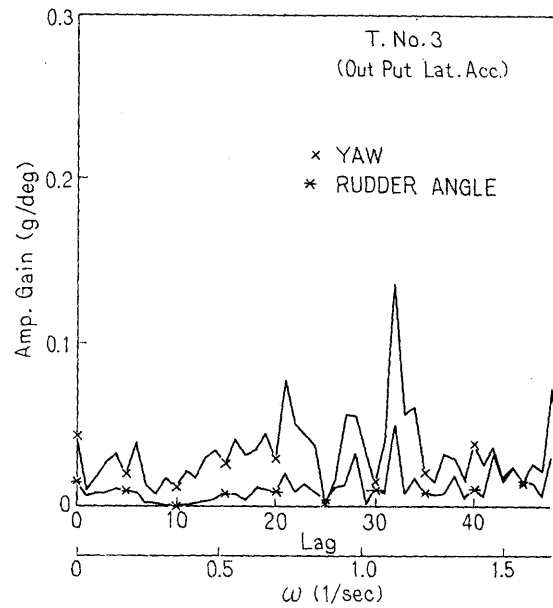


Fig. 4.3(b) Amplitude Gain of Yaw and Rudder Angle

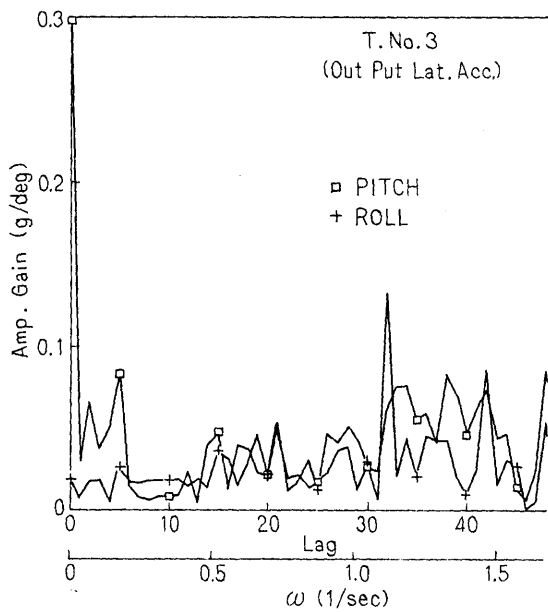


Fig. 4.3(c) Amplitude Gain of Pitch and Roll

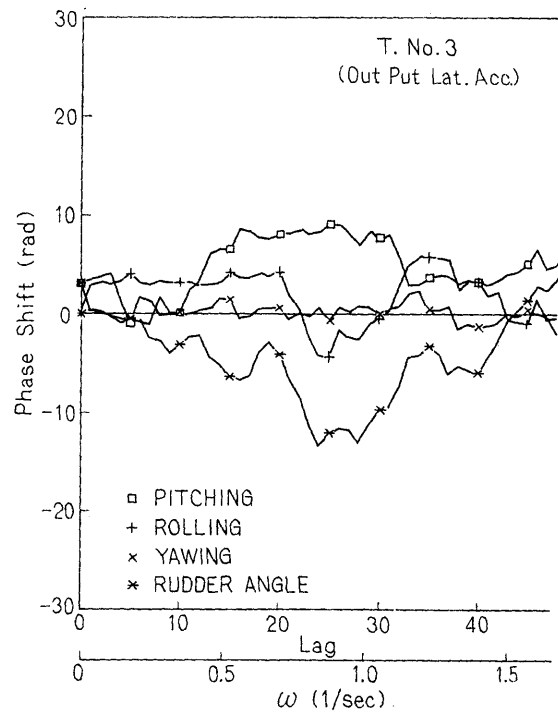


Fig. 4.3(d) Phase Shift

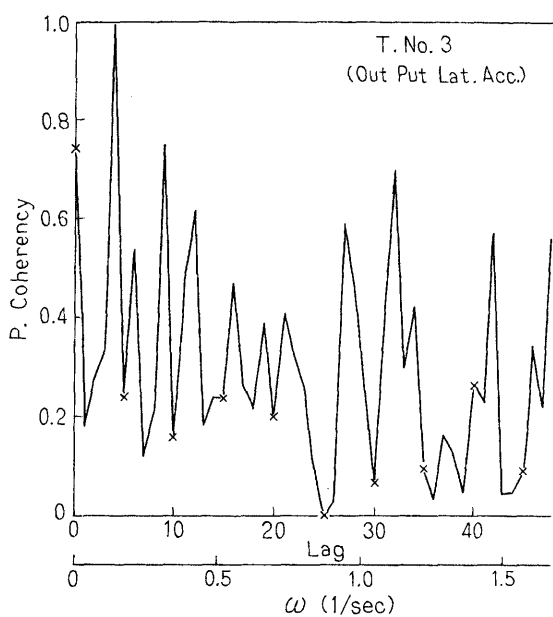


Fig. 4.3(e) Partial Coherency of Yaw

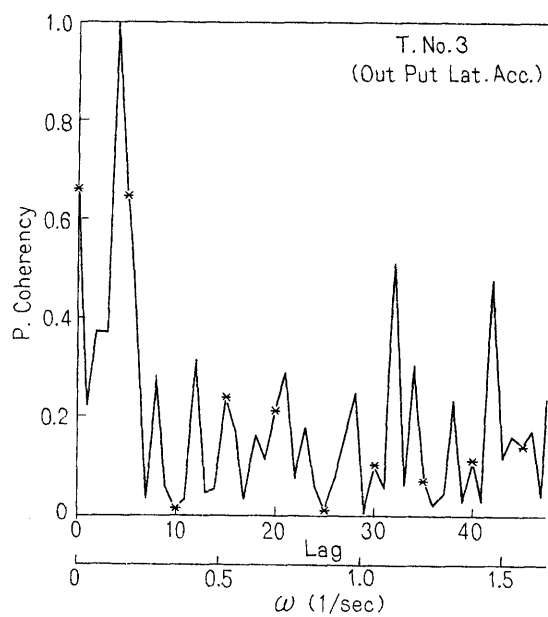


Fig. 4.3(f) Partial Coherency of Rudder Angle

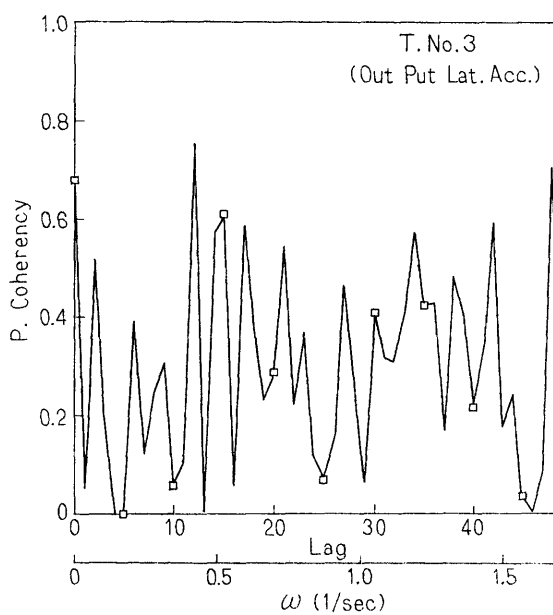


Fig. 4.3(g) Partial Coherency of Pitch

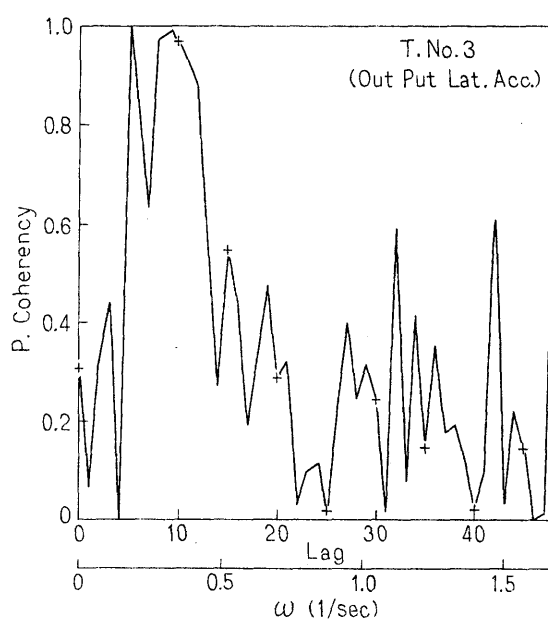


Fig. 4.3(h) Partial Coherency of Roll

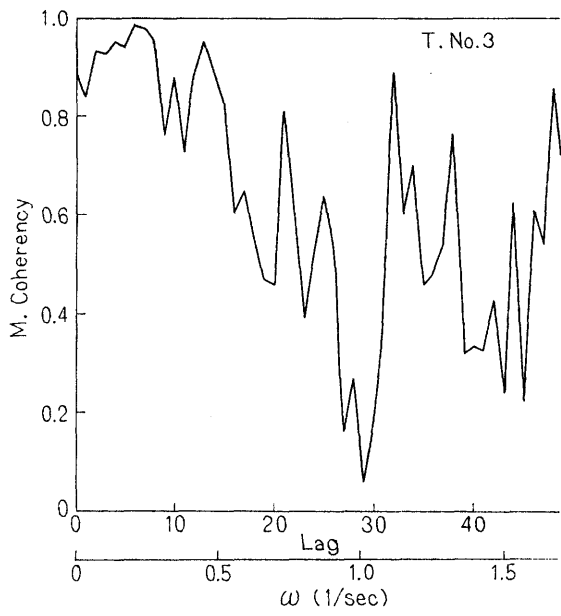


Fig. 4.4(a) Multiple Coherency of Yaw

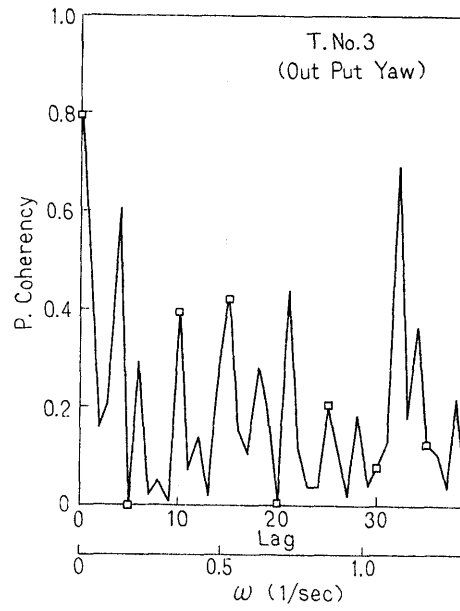


Fig. 4.4(b) Partial Coherency of Pitch

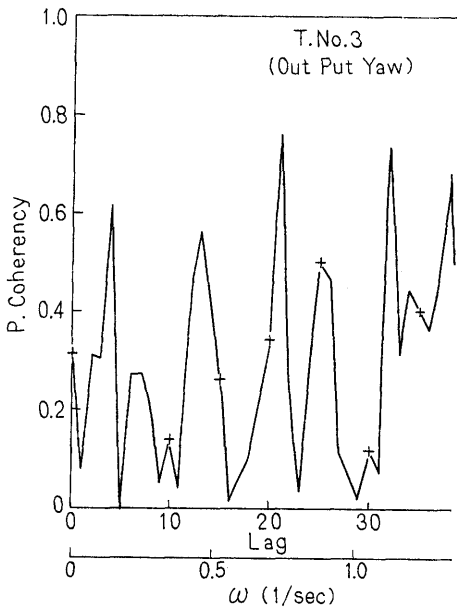


Fig. 4.4(c) Partial Coherency of Roll

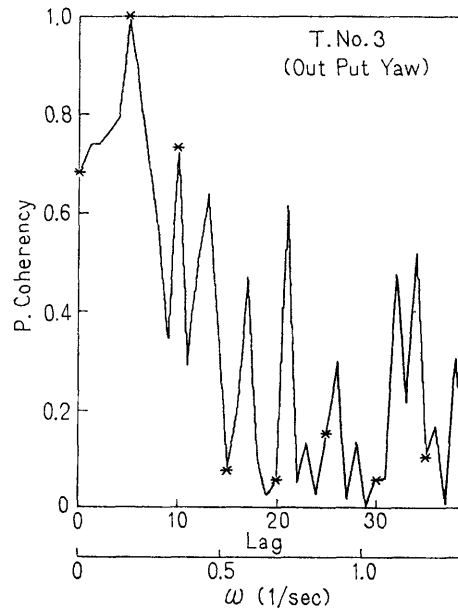


Fig. 4.4(d) Partial Coherency of Rudder Angle

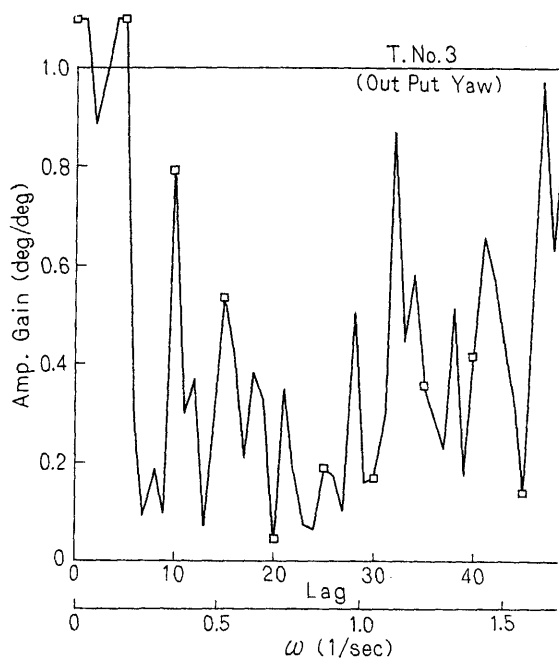


Fig. 4.4(e) Amplitude Gain of Pitch

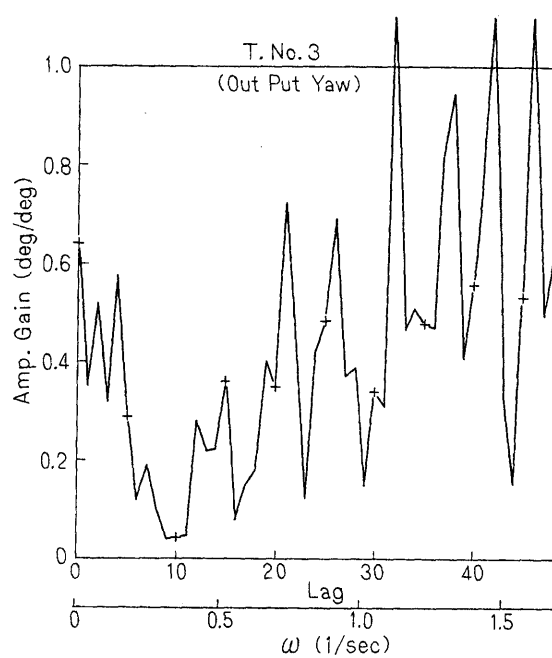


Fig. 4.4(f) Amplitude Gain of Roll

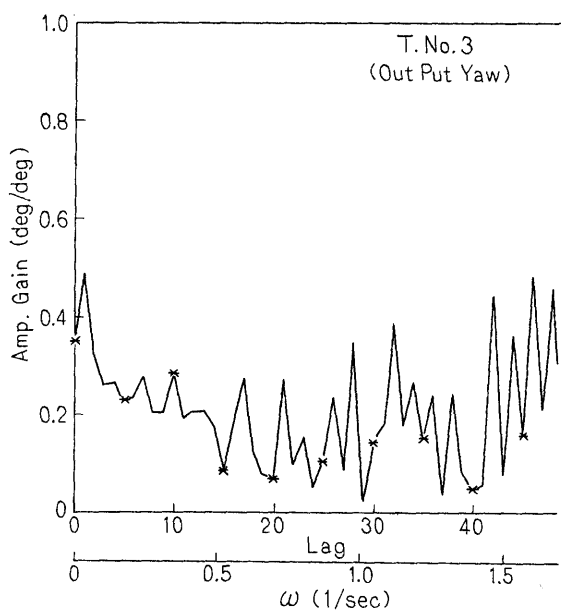


Fig. 4.4(g) Amplitude Gain of Rudder Angle

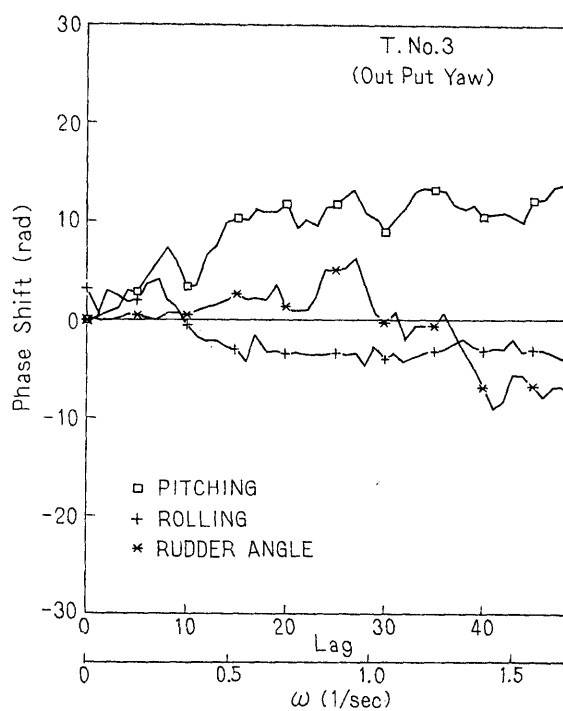


Fig. 4.4(h) Phase Shift

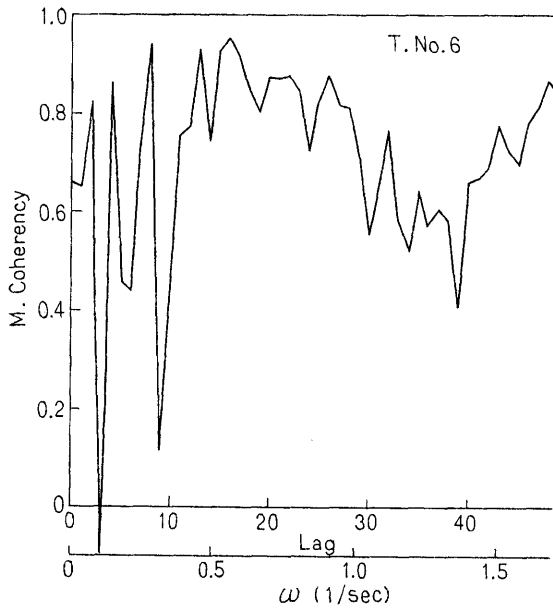


Fig. 4.5(a) Multiple Coherency of Yaw

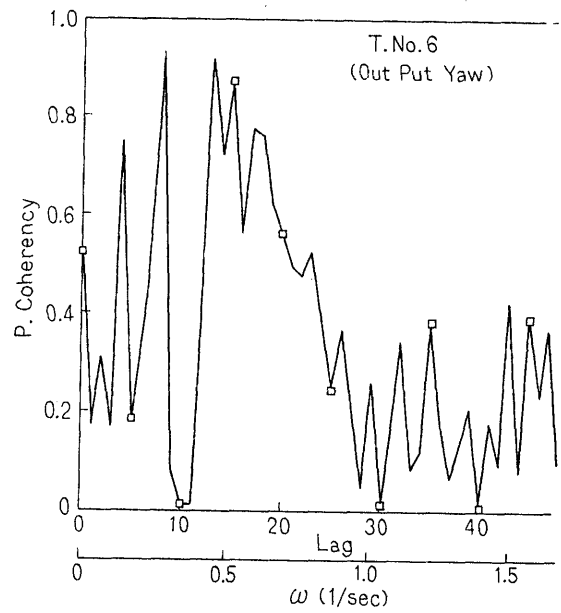


Fig. 4.5(b) Partial Coherency of Pitch

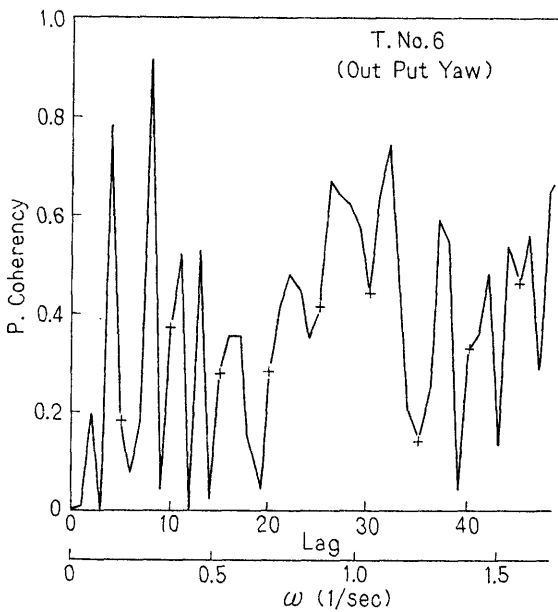


Fig. 4.5(c) Partial Coherency of Roll

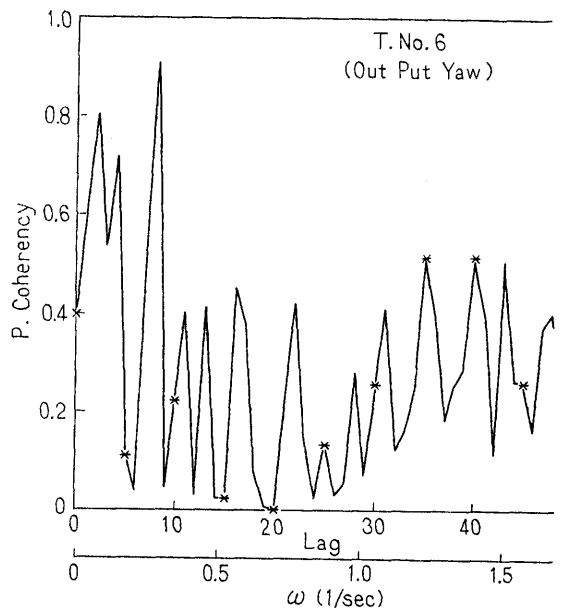


Fig. 4.5(d) Partial Coherency of Rudder Angle

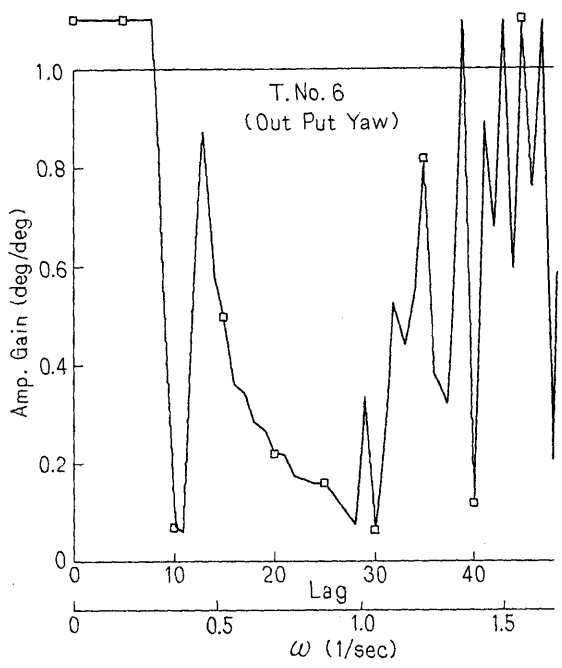


Fig. 4.5(e) Amplitude Gain of Pitch

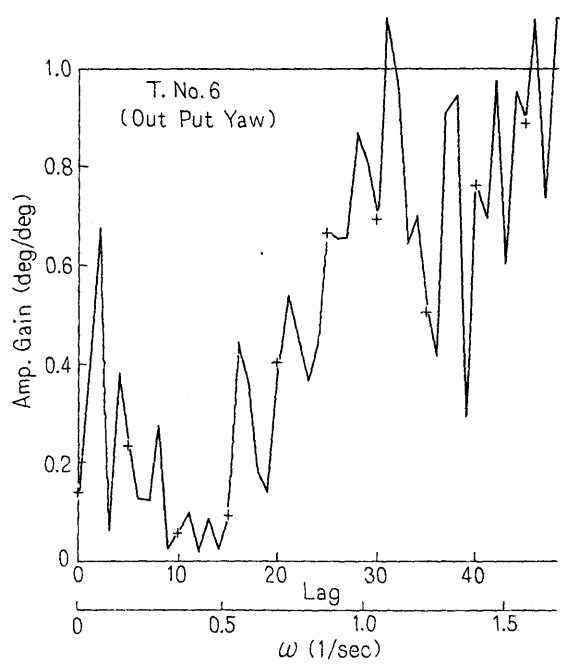


Fig. 4.5(f) Amplitude Gain of Roll

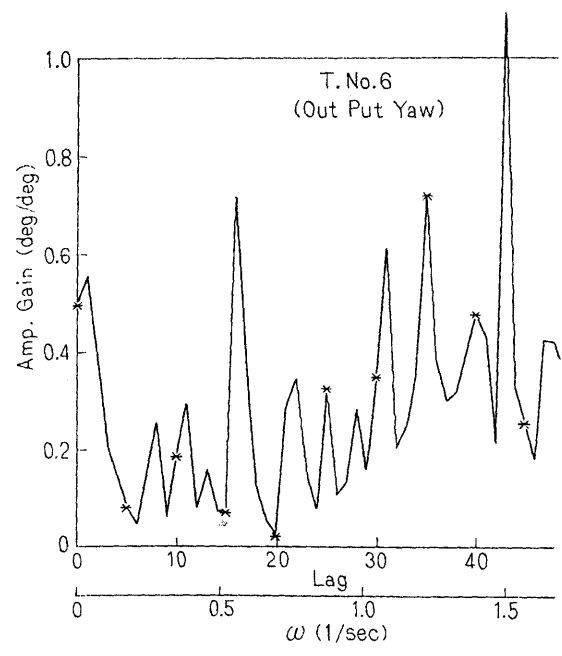


Fig. 4.5(g) Amplitude Gain of Rudder Angle

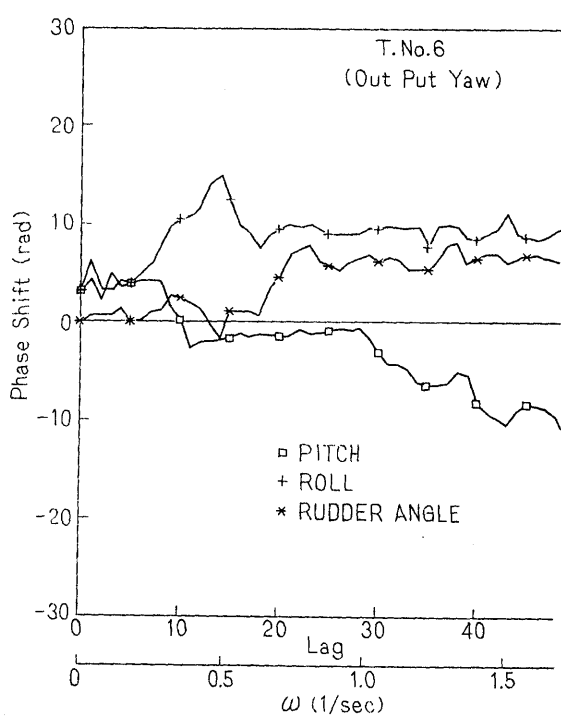


Fig. 4.5(h) Phase shift