

II 衝撃、振動と動揺の評価基準に関する研究

(第1年度)

I 高速艇における衝撃、振動、 動揺と腰痛発症等の人間耐性 の検討

目次	
A. 目的	62
B. 方法	62
C. 結果と考察	68
D. むすび	77

A. 目的

高速艇の乗組員に衝撃振動によって腰痛が多発するといわれている。また、ISOでは高速艇、トラクターらの乗員がうける衝撃振動が、健康上の理由から問題があるとされ、国際基準としてのその評価法が検討されている。その中心になっている考え方は、乗物による強い繰返し衝撃が脊柱の傷害にかかわって腰痛が多く発症するということである。

しかしながら、腰痛多発が単純に繰返し衝撃の脊柱に及ぼす力によっておこるというような、現場調査に重点をおいた実証的検討は、今のところきわめて少ない。また、激しい繰返し衝撃が腰痛症と関係がないという証拠もない。

そこで、第一は、高速艇の波浪にともなう衝撃振動と人体応答との関連で、どのような方法で衝撃波形の解析を行えばよいかである。また腰痛症は、衝撃のみならず動揺、または1Hzから80Hzの範囲の普通いわれている振動などによっておこるところの、姿勢保持に必要な

反射的筋緊張が、筋疲労の蓄積をまねいて生ずることも考慮しなければならない。

第二は、高速艇乗組員の腰痛発症の実態の把握である。

本報告は第一の目的に関係しているが、高速艇の激しい繰返し衝撃と振動の加速度波から、乗心地指数、振動感覺量、脊柱の傷害にかかわる力学的反応指数を求め、その人間耐性からの多角的評価法の手がかりを得ることができたので、第一報としてここに述べる。

B. 方法

1. 解析方法のブロック・ダイアグラム

1つのデータ・レコーダに収録された高速艇上の加速度波から、乗心地指数、振動感覺量、脊柱の傷害にかかわる力学的反応指数が簡単に得られる方法は、最も望まれるところである。そこで本解析は、衝撃、振動に対する人間応答の周波数特性からなっているウエイティング・ネットワークを使用することに着目して実施された。また、評価は上下方向の加速度を対象としてなされた。

図1はレコーダに収録された実際の加速度波が、ウエイティング・ネットワークをおいてリアルタイム・アナライザの入力側に入れられて解析され、その結果それぞれの目的をもった評価指数または振動感覺量が求められる手順を示

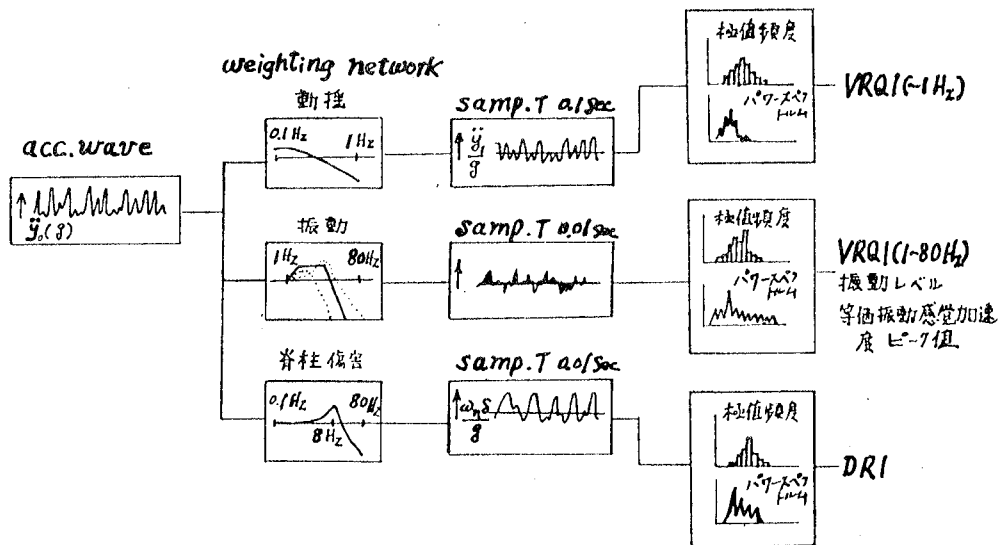


図1. 解析方法のブロック・ダイアグラム

している。そのネットワークは、0.1 Hz から 1 Hz の振動で人に反応する、いわゆる動揺評価のものであり、2つは1 Hz から 80 Hz での振動と衝撃の評価のものであり、3つは腰痛発症に関係が深いといわれる脊柱の傷害にかかわる評価のものである。

リアルタイム・アナライザによる解析は、デジタル計算機を中央処理装置とし、高速度の A/D 変換器を内蔵してアナログ入力信号をデジタル符号化し、コンピュータで処理してなされる。ここでは半振幅極値分布とパワー・スペクトルを瞬時に求めることができる。その解析結果の例として、DRI (力学的反応指数、Dynamic Respones Index) の場合に得られた例を図2.に示しておく。

2. 評価指数または振動感覚量とウエイティング・ネットワークの説明

a Vibration Ride Quality Index —VRQI (~1Hz)、VRQI (1~80Hz)— VRQI はアメリカ海軍で使用されているところの乗心地指数といわれるものである。

VRQI (~1 Hz) は、動揺によって生ずる日常作業の困難度、または動揺病(船酔い)のおこしやすさなどの観点からの動揺の評価指数である。VRQI (1~80 Hz) は脊柱、内臓、身体の耐久限度からみた1 Hz から 80 Hz の範囲の振動の評価指数とされている。

そしてVRQIの限界線はつぎのようになっている。

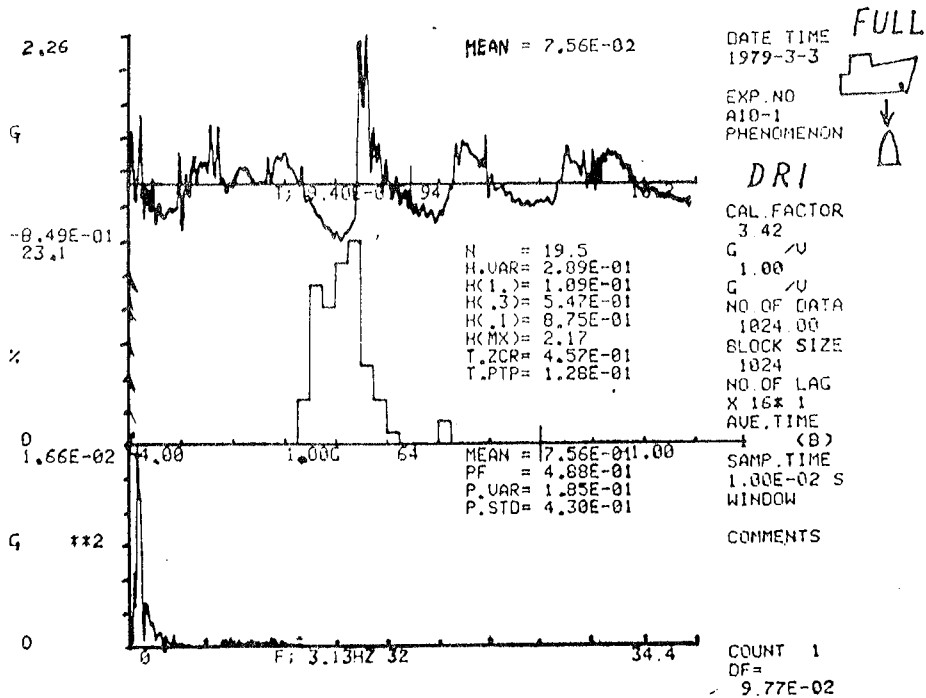


図2. リアルタイム・アナライザによる解析結果の例

Limit	Description	VRQI must be less than
(A)	Severe, less than one hour	0.5
(B)	Tolerable, less than one hour	0.2
(C)	Long Term, severe	0.2
(D)	Long term, tolerable	0.1

アメリカ海軍では、限界(B)、(D)以下であることが望ましいとしているが、よりきびしい限界(A)、(C)は全体の運航からみて発生頻度の少ない場合とか、経済的側面からみてどうしても無理を生ずるときには特例として認めることを条件としているようである。簡単にいえば“我慢のできる限界”が1時間以

下のばく露で0.2、長時間ばく露で0.1ということである。

VRQIは基本となった人間応答の動的モデルによって求められるが、ここではその内容は省略し、その動的モデルから計算により得られたウエイティング・ファクタからウエイティング・ネットワークを作製することができる。

図3はVRQI(～1Hz)のそのネットワークの周波数特性を示している。

この図にみられるように、0.1～0.3Hzすなわち10秒から3.3秒の周期の動揺は人間の耐性に大きく影響し、0.3Hzより1Hzにかけて、すなわち3.3秒から1秒へと動揺周期が短くなるにしたがって動揺に対する人間の応答

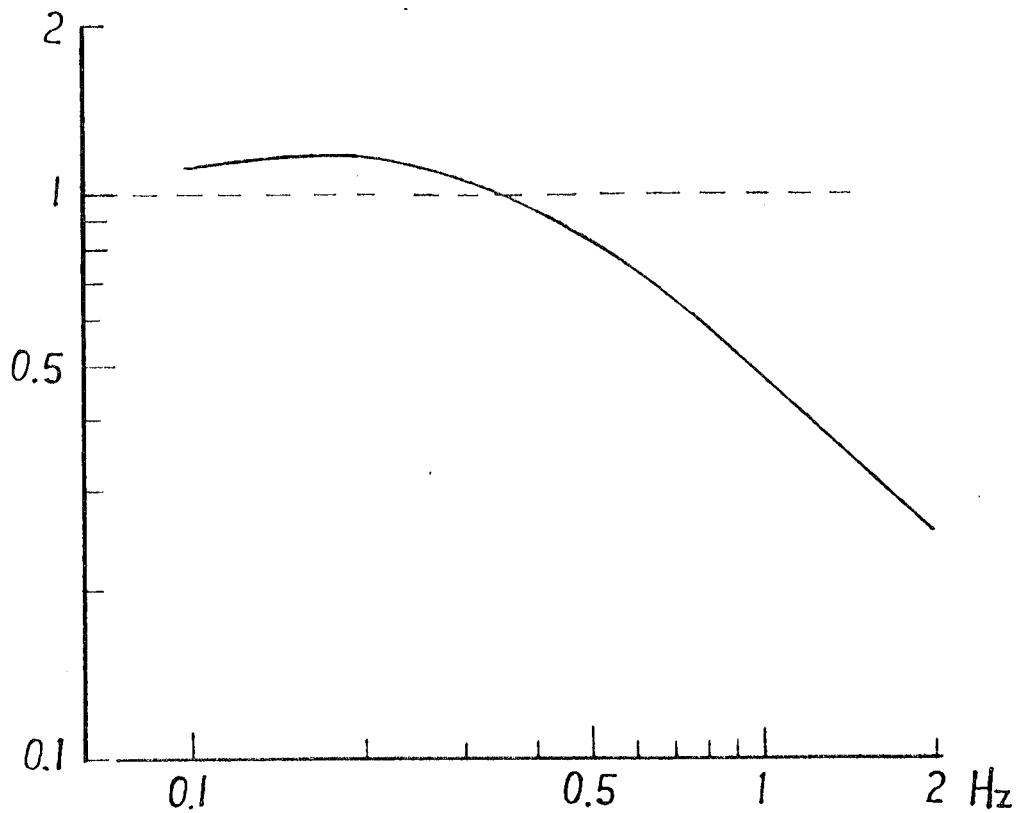


図3. VRQI (~1 Hz) に対応するウェイトイング・ネットワーク

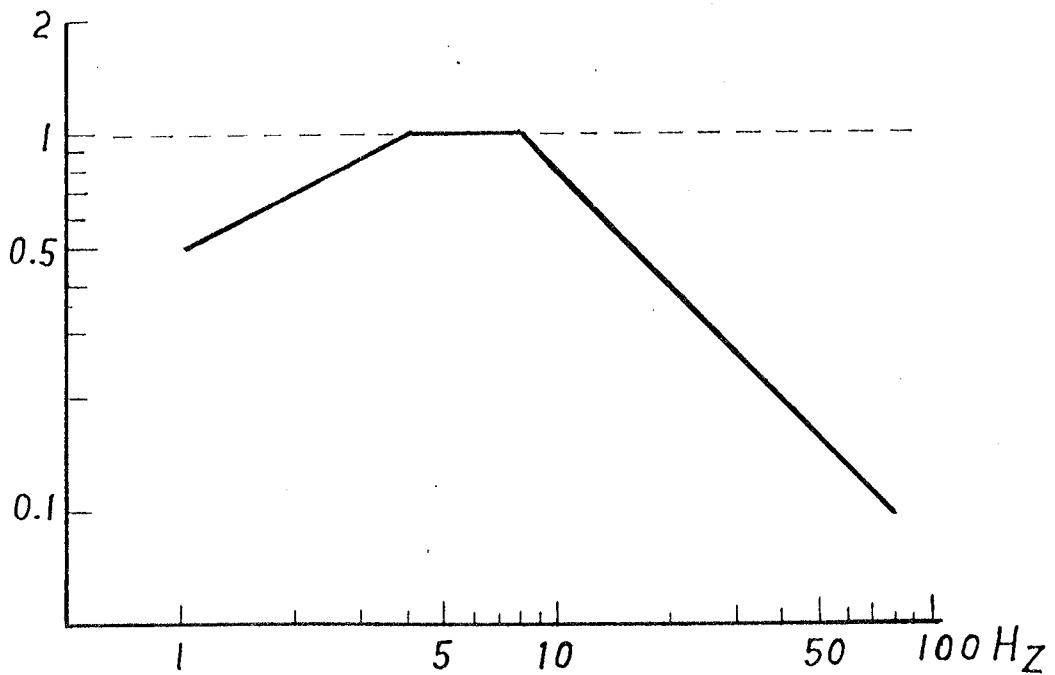


図4. ISOの上下方向正弦振動の等感度ウェイトイング・ネットワーク

が弱まっていくことを示している。

つぎに V R Q I (1 ~ 8 0 H z) は図 4. に示す I S O の上下方向正弦振動の等感度ウエイティング・ファクタからなるネットワークを使用する。このことの詳細は省略するが、つぎに述べる振動レベルの d B 値を φ 単位で求め、その 2 倍が V R Q I (1 ~ 8 0 H z) となることだけを述べておく。

b 振動レベル (V L)、等価振動感覚加速度のピーク値

振動レベル (V L) は振動感覚の大きさに比例する振動物理量であるといわれ、騒音でいうと音に対する感覚の大きさをあらわすホン (A) に相当する。単位は d B 値に換算される。

ここでは図 4. の特性をもつ等感度ウエイティング・ネットワークを通した加速度の r m s 値は、リアルタイム・アナライザによって φ 単位で求められ、これを d B 値に換算して求めた。

著者らの大型商船における船体振動感覚の研究において、「きつい—おだやか」、「強い—弱い」、「激しい—かすかな」などの形容詞で表現できる強さの反応を心理学的手法により求め、つぎのような提案がある。

“どちらともいえない” “やや” “かなり” “非常に”
(立位) 77dB 83dB 89dB 95dB

また、大型商船の居住区では 8 0 d B 以下の場合が多く、8 0 d B 以下では乗組員からの苦情が少なかったと報告されている。

等価振動感覚加速度のピーク値とは、I S O の等感度ウエイティング・ネットワークをとおして得られる加速度のピーク値を、このように新しく呼ぶことにした。ただし、ピーク値は与えられた区間内の最大値をいう。振動感覚は振動数によって大きく異なる周波数特性をもって

おり、加速度で 4 H z から 8 H z において最も感覚的な反応が大きい。そこで、4 ~ 8 H z における振動感覚に、この振動数以下の振動加速度を等価させて表現すると、振動の感覚の大きさを判断するのに便利である。なかでも、高速艇の衝撃的な振動感覚の評価には欠かせることができない。

c Dynamic Response Index (D R I)

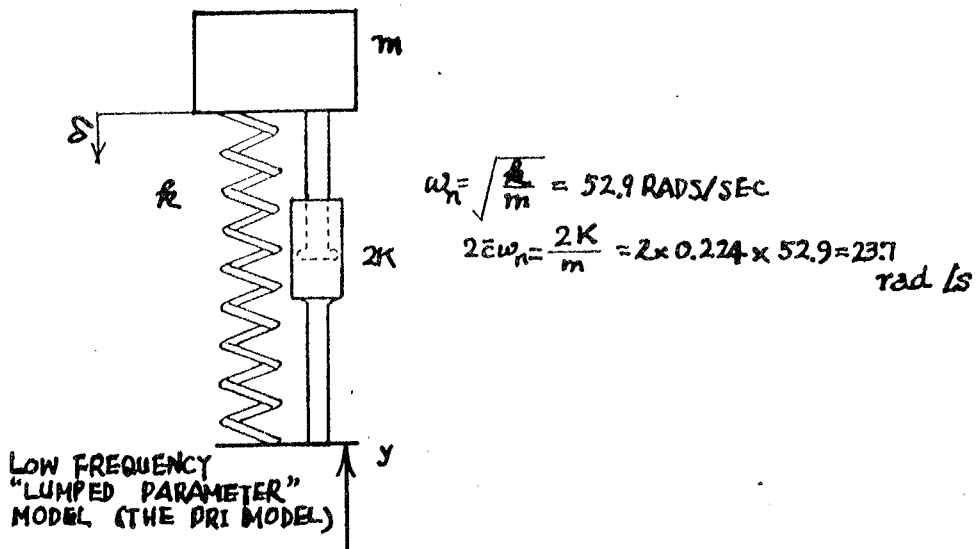
この指数は、P . R . Payne らの提案によるもので、衝撃による脊柱の傷害とかかわりがある。脊柱の傷害発生率がこの D R I の大きさによって評価できることは、エアパイロットが座席のまま脱出できる装置の設計基準を検討するために実施したところの、動的モデル実験の結果によって得られたものである。

D R I は図 5. に示す“脊柱モデル”において質量 m の変位を δ とすると、 $W^2_n \cdot \delta_{max} / \varphi$ で示される。

D R I に対応するウエイティング・ファクタは計算により求められ、図 6. に示すネットワークが得られる。

この図から、この脊柱モデルは 8 H z に固有振動数をもっており、脊柱の破壊は 8 H z の振動数でおこりやすいことを示している。

G . R . Allen による D R I の暫定基準 (I S O に提出検討中) によると、回復に 1 0 0 日を要するような脊柱の傷害発生率が 5 % となる D R I は、1 日における繰返し衝撃数 1 0、1 0 0、1 0 0 0、1 0 0 0 0 に対して、それぞれ 8、6.5、5.5、5 となっている。



$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{d\delta}{dt} + \omega_n^2\delta = \frac{d^2y}{dt^2}$$

$$DRI = \frac{\omega_n^2 \delta_{max}}{g}$$

(δ = SPRING COMPRESSIVE DEFLECTION
 ζ = CRITICAL DAMPING RATIO)

図5. Dynamic Respons Index の動的モデル

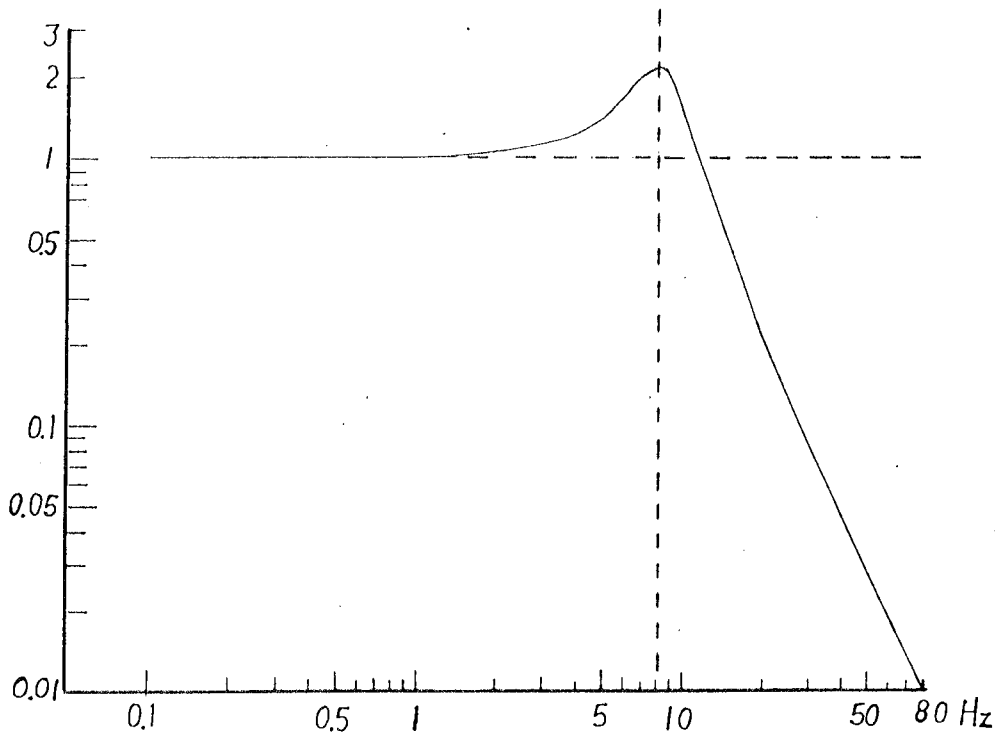


図6. DRI に対応するウエイティング・ネットワーク

C. 結果と考察

1. 本解析方法の検討

リアルタイム・デジタル・アナライザによる解析例の説明に先だつて、オンログラフによる高速艇の典型的な加速度（上下方向）の時間的変動の例を図7に示す。

この例は、全速、向波、測定箇所居住区前部（船首側）における、最もきびしい試験条件で得られたものである。対象艇は65トン、全長21m、試験速力24ノットであり、海上模様は風速6m、波高1.5m、波長15～30mであった。この図の加速度はノコギリ波または三角波の形状をなし、典型的な衝撃性振動である。船体は波頂で跳躍し、波の谷付近で着水し、船首側に強い着水衝撃を受ける状態を繰り返す。す

なわち、この図は、この区間のピーク値が3gにも及ぶというきびしい衝撃励振を船首側に受けていることを示している。

そこで、この最もきびしい衝撃性振動を含んだ区間を対象とし、まえの図1に示すブロック・ダイヤグラムにそつたそれぞれの解析結果の例をあげて、説明の理解を深めたい。そしてこの区間のピーク値の位置は、それぞれの分析波に*印で示して比較しやすくした。

まず、図8はVRQ I（～1Hz）のウエイティング・ネットワークをとおした加速度波の解析結果である。解析時間100秒におけるピーク値は1.1g、rms値は0.35gとなっている。この場合のピーク値は図7のピーク値に比べると、高周波成分の振動がネットワークで除かれるので、約1/3に減衰している。VRQ I（～1Hz）は、瞬時振幅の二乗平均値の平

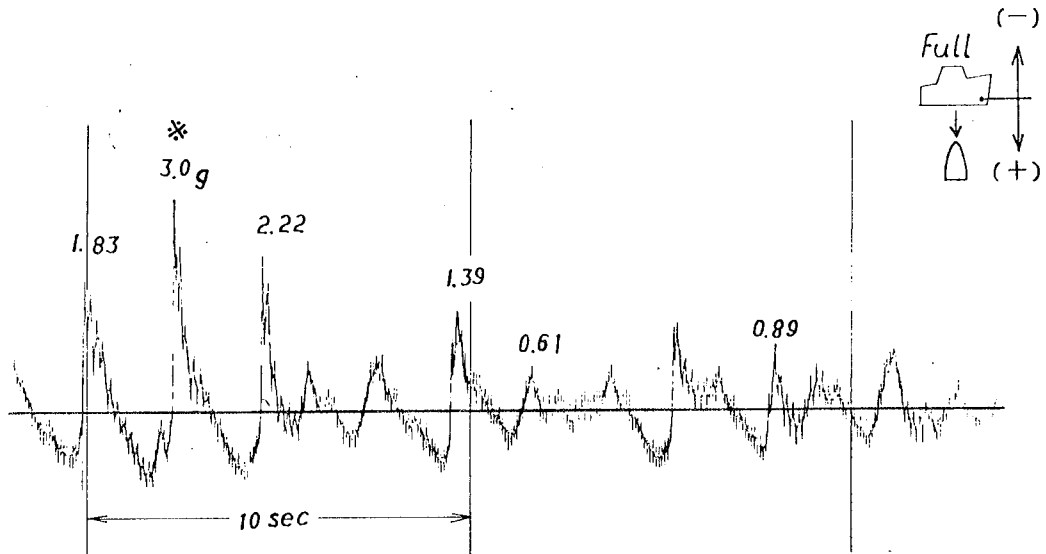


図7. 高速艇の典型的な加速度の時間的変動の例

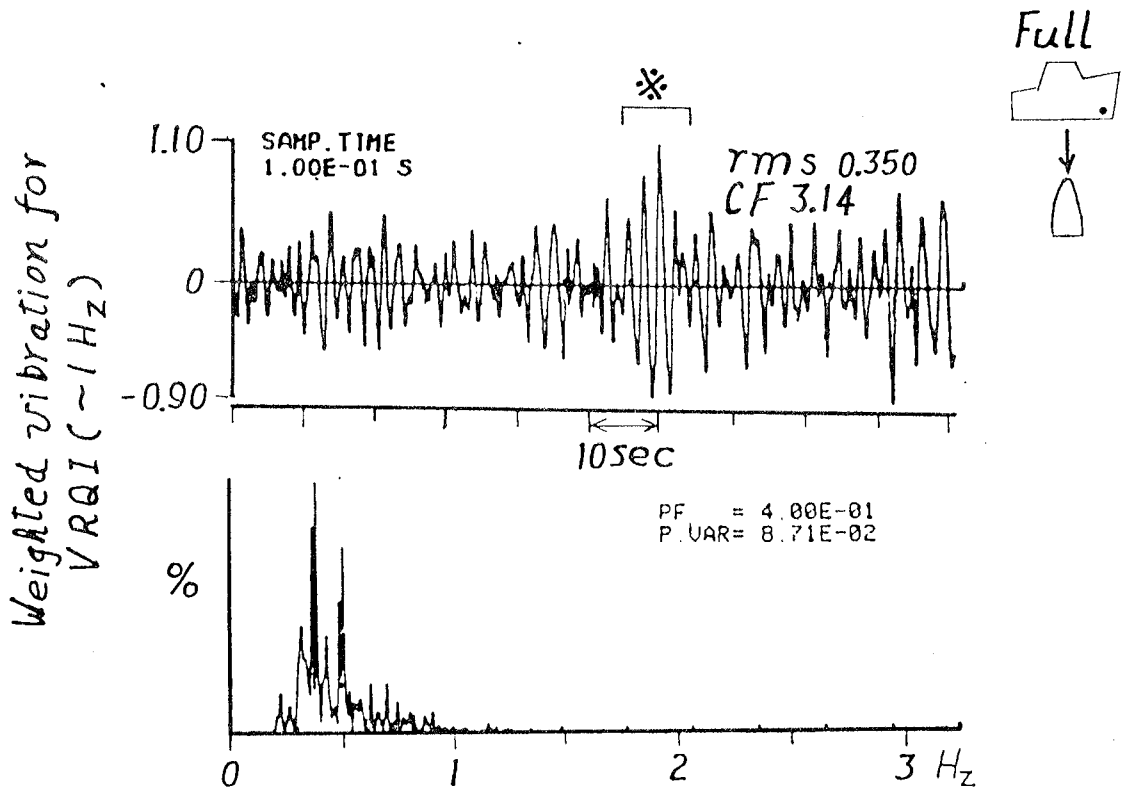


図8. VRQI (1~1 Hz) のウエイティング・ネットワーク
をとおした加速度波の解析例 — 動揺評価 —

方根である rms 値と一致するので評価基準からみると“きびしい”の 0.35 となっていることに注目される。また下の図はパワー・スペクトラムを示す。周波数成分は 0.4~0.5 Hz を中心とし、当然のことながら低周波域にあることを示している。

図9は等感度ウエイティング・ネットワークをとおした加速度波の解析例を示す。図7の*印の位置を中心とした掃引時間10秒におけるピーク値は1.69gであり、これは衝撃感覚のかなり強い振動であることを示している。

VLはrms値0.307gをdB値に換算し

て得られ、それは110dBとなるがいちじるしく大きい。また、VRQI (1~80 Hz) は、このrms値の2倍となる関係から0.614となり、これはきびしい限界をこえる。しかしながら、評価に当っては解析時間10秒間のrms値では短時間過ぎるので、100秒間の解析時間におけるrms値を求め、それで乗心地を評価することが望ましいと考えた。このことは、rms値は人間に与える刺激の積分値が、人間の応答によく対応することから使われているのが、衝撃的な振動の評価には適さない。しかしrms値は瞬時的でないある区間における

Weighted vibration for
vibration sensitivity (1~80 Hz)

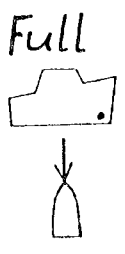
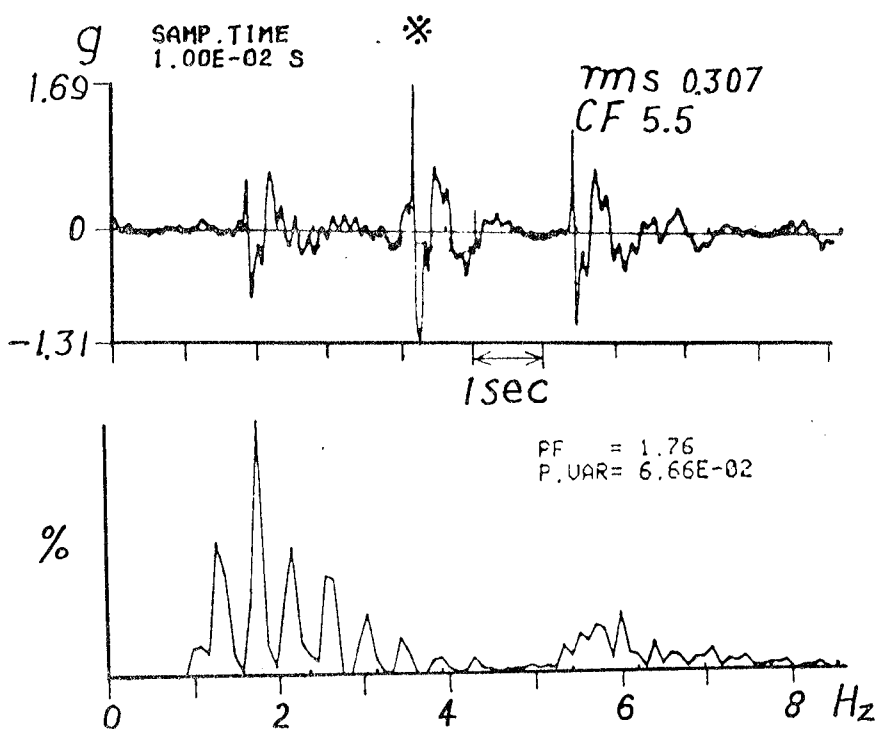


図9. 等感度ウエイティング・ネットワークをとおした加速度波の解析例 -VRQ I (1~80 Hz)-
-振動、衝撃感覚評価-

Weighted vibration for DRI

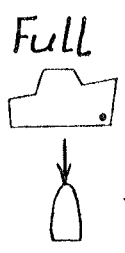
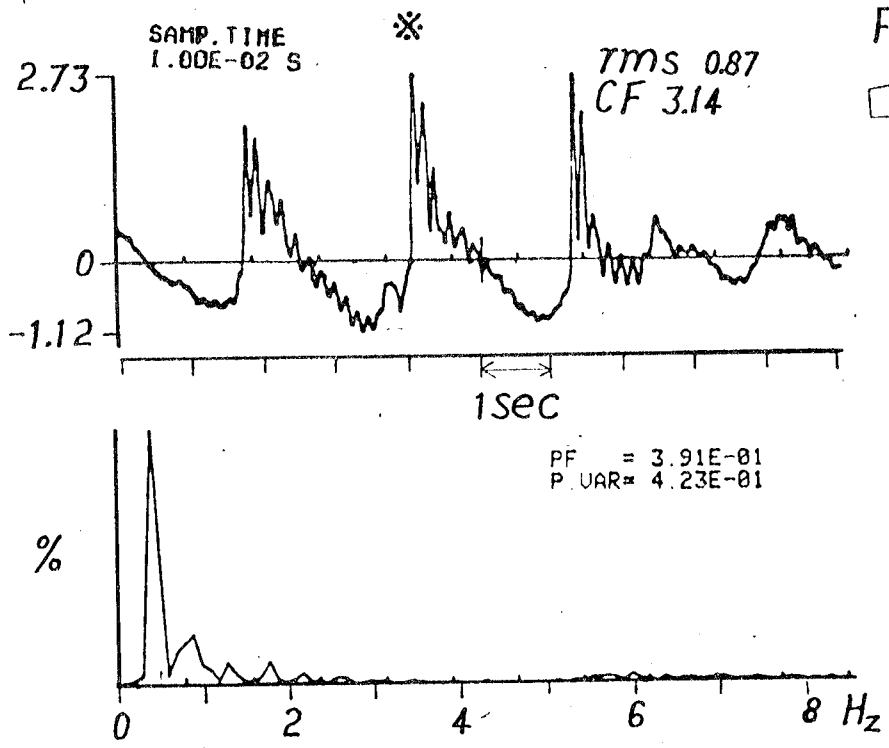


図10. DRIのウエイティング・ネットワークをとおした加速度波の解析例 -脊柱傷害-
-70-

トータルな振動評価には適していると考えたことによる。

そこで、このトータルなrms値を10秒間の掃引時間で連続的に10回解析することによって求めた結果、そのrms値は0.16gとなり、VLは102dB、VRQI(1~80Hz)は“きびしい”の0.32となっている。

またこの例のパワー・スペクトルは、ピーク周波数1.76Hzを中心とした振動で、6Hzを中心にする振動も含まれていることを示している。

図10はDRIのウエイティング・ネットワークをおした加速度波の解析例を示す。※印の位置を中心とした掃引時間10秒におけるDRIのピーク値は2.73である。この波はピーク周波数が3.91Hzである。ここに示すDRI 2.73は、解析時間100秒における最もきびしい条件にある区間のピーク値である。

以上述べた最もきびしい条件で得られた成績を総括すると、解析時間100秒における評価で、VRQI(~1Hz)、VRQI(1~80Hz)、VL、等価振動感覚加速度のピーク値、DRIのピーク値は、0.35、0.32、102dB、1.69g、2.17となり、これはそれぞれ人間応答の角度からみて非常にきびしい状態を明白に示しているものといえる。

参考として、半速、向波、機関室に隣接する居住区後部(船体中央)における解析結果をあげておくと、VRQI(~1Hz)、VRQI(1~80Hz)、VL、等価振動感覚加速度のピーク値、DRIのピーク値は0.114、0.048、88dB、0.129g、0.235であった。この評価結果は、動揺成分である1Hz以下の振動では、長時間ばく露における“我慢

できる”限界をこえるが、その他の評価では衝撃性振動の発生が少なくなることによって問題が少なくなること示している。

2. 評価結果

対象艇の主要目と加速度測定箇所は表1と図11に示される。試験速度は全速23.5kt半速15ktである。試験海域と海上模様は図に示す。

試験海域はA、B、Cの3海域とした。風力6mであり、また波高は1m、1.5m、2mで特にきびしい海上模様とはいえなかった。しかしながら、波の長さが15~35mで試験艇の全長が21mであることから、衝撃性の振動を測定するには最適の条件であるように思われた。飛島の島陰である海域Aは、最初の測定であることから耐航性からみて安全であることを考慮して選ばれた。この海域では、波の方向が艇に対して向波、斜向波、横波、斜追波、追波となる5条件で、また全速、半速においてそれぞれ測定された。飛島より酒田港に帰途、A海域よりきびしい条件で向波の場合の測定を実施するため、B海域、C海域が選ばれた。特にC海域ではさらにきびしい条件が得られた。

以上のような条件でデータ・レコーダに収録された加速度波を評価した結果はつぎのようになる。ただし、操舵手用椅子上の加速度の評価は除いている。その理由は椅子のサスペンションのコイルバネによる座席面の低下が大きく変動し、そのため足による立ちあがりによって生ずる加速度変動が含まれることが後でわかった。したがってその防振効果を検討することが出来なかったことによる。

VRQI(~1Hz) 図13

1時間以下のばく露では我慢できる限界を0.2とし、長時間ばく露でも我慢できる限界を0.1

表1 試験艇の主要目

項目	要 目
主要寸法	全長 × 巾 × 深 2 1.0 0 × 5.1 0 × 2.6 0 m
総トン数	6 5 トン
速 力	常用 2 5 ノット, 最大 2 6.5 ノット
船 体 質	アルミ骨木皮
主 機 関	Db 型 ディゼ ル 1,1 0 0 ps 2 基

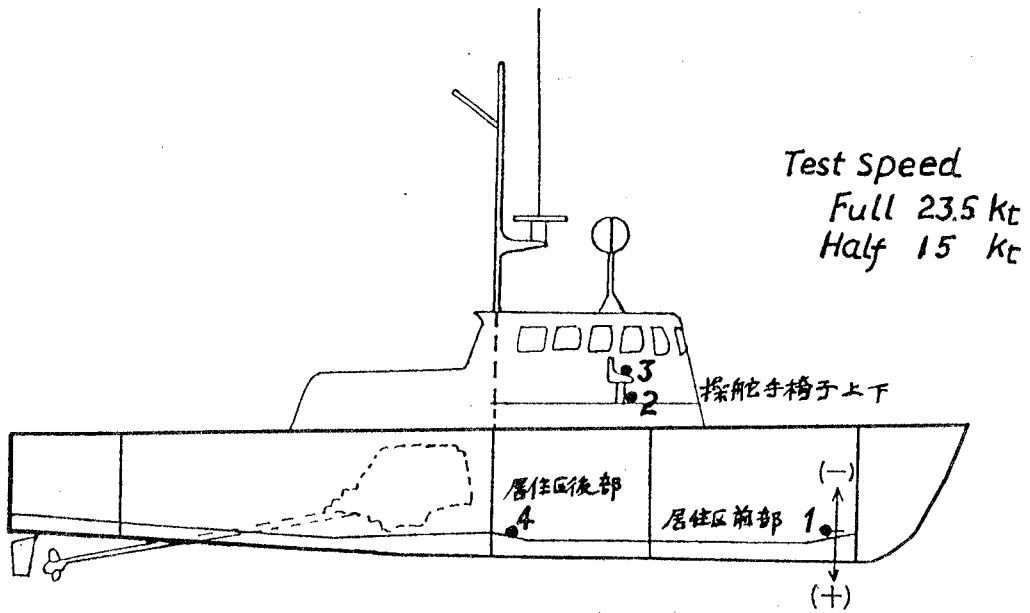


図11 高速艇と加速度測定ケ所

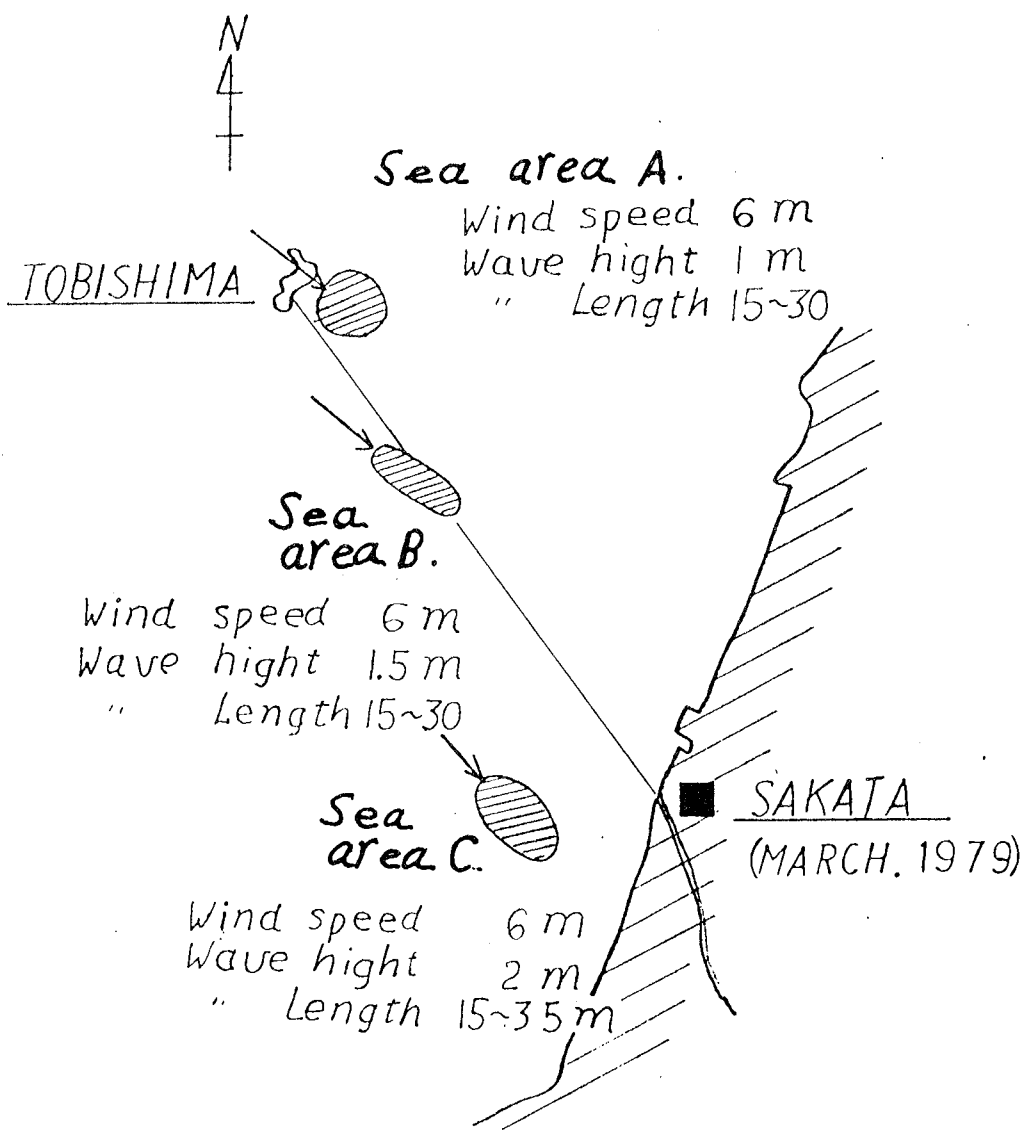


図12. 試験海域と海上模様

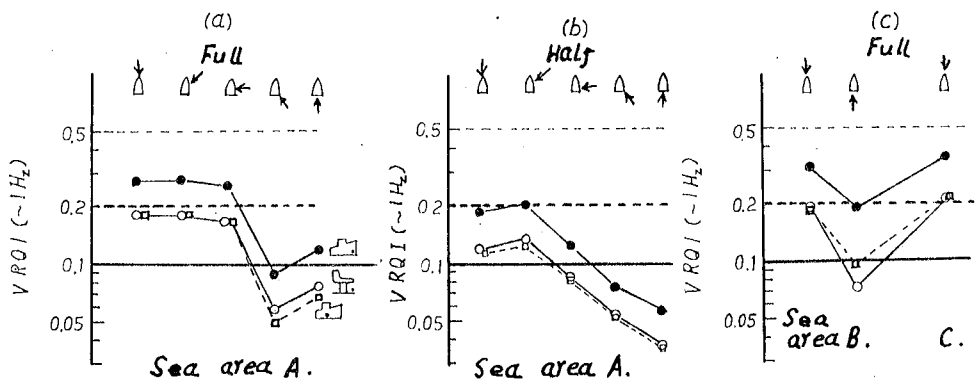


図 1.3. 試験船のVRQI ($\sim 1 \text{ Hz}$) 一動揺一

として評価する。

試験海域 A では全速と半速での成績が示される。全速の場合は向波、斜向波、横波において居住区前部が 0.2 をこえ、操舵室と居住区後部が 0.18 となり、また半速の場合は向波と斜向波において 0.19 と 0.14 となった。全速では斜追波と追波で、半速では横波、斜追波、追波で急激にこの指数が減少し、問題は少なくなる。

試験海域 B、C は、海域 A よりきびしい試験条件を得るために選ばれた海域である。特に海域 C では操舵室、居住区後部においても 0.2 をわずかにこえた。

VRQI (1~80 Hz)、図 1.4.

試験海域 A では、全速の場合は向波、斜向波、横波において居住区前部が 0.2 をこえ、操舵室と居住区後部が 0.12 となる。半速の場合はいずれも 0.1 以下となった。半速、斜追波では居住区後部の指数がいくぶん大きくなっているが、これは機関室の振動が船尾の上下動によるプロ

ペラ負荷の変動にもなって増大することによる。

試験海域 B、C の全速における成績はきびしい条件にあることを示している。特に海域 C の居住区前部は指数が 0.33 となった。居住区後部においても 0.2 に近い。

VRQI ($\sim 1 \text{ Hz}$) と VRQI (1~80 Hz) の比較では、前者が後者より大きい。なかでも VRQI (1~80 Hz) が半速になるといじりく小さくなるという特徴がみられる。

振動レベル、等価振動感覚加速度のピーク値

図 1.5.

海域 A では、全速の場合の向波、斜向波、横波において居住区前部が 101 dB、操舵室と居住区後部で 95 dB、海域 B、C の向波で 103 dB と 98 dB になっている。筆者らの評価尺度では 94 dB が“非常に”、89 dB が“かなり”の強い振動とされている。したが

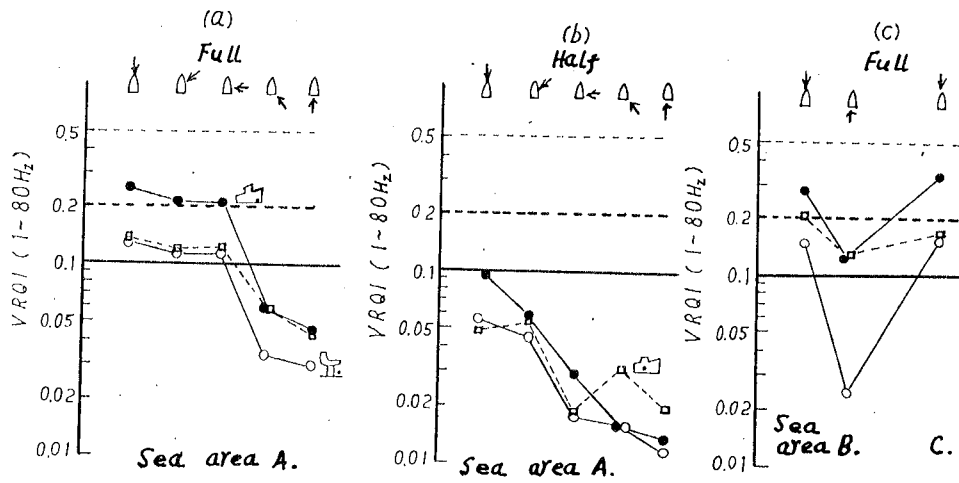


図 1 4. 試験船のVRQ I (1 ~ 8 0 H z) 一 振 動 評 価 一

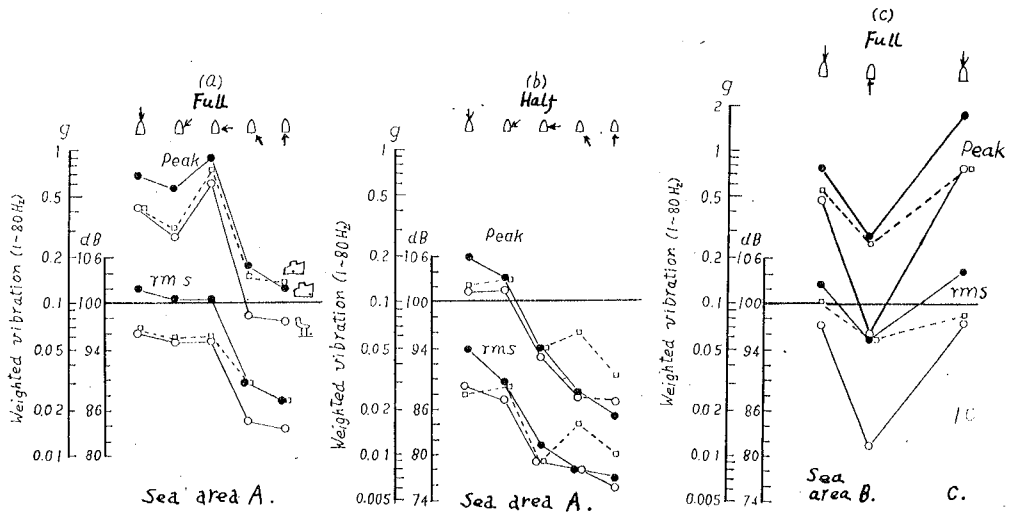


図 1 5. 試験船の振動レベル、等価振動感覚加速度のピーク値

って、半速の場合の向波、斜向波で操舵室と居住区後部においても、かなり強い振動となる。この評価尺度は、振動レベル80dB以下の船内に居住する大型商船の乗組員から得られたものであり、条件の激しい高速艇の乗組員では適用しにくいということが考えられる。しかし、高速艇の振動を大型商船と比較してみる場合に便利である。

等価振動感覚加速度のピーク値は、衝撃的な振動感覚の評価には欠かせることができない。この図には100秒間の解析時間で得られたピーク値が示されている。海域Aでは、全速、横波のとき、居住区前部で0.9g、居住区後部で0.75、操舵室で0.6gとなる。海域Cでは、向波で居住区前部で1.7g、操舵室、居住区後部で0.8gとなっている。これらはいずれも艇体の跳躍にもなうところの艀上げから急激な落下による着水衝激により得られたものであり、かなり感覚的に強い衝撃性振動といえる。全速の斜追波、追波または半速の場合は、このよう

な大きな衝撃性振動が生じないことを示している。

DR I 図16. 図17.

DR Iの評価基準はまだはっきりしていないが、G.R.Allenの暫定的限度によると、DR Iが1以下では問題がないようである。ここでは一応1以上のDR Iを生ずる試験条件に注目した。

図16に示す海域Aでは、全速において居住区前部が向波、斜向波、横波でDR Iが1以上となり、横波で2をこえる。居住区後部、操舵室では横波で1をこえる。海域B、Cでは、やはり船首にある居住区前部が向波、追波ともに1をこえ、最大DR Iは2.7となる。また操舵室は向波で、居住区後部はC海域でのみ1をこえる。海域Aでの半速においては0.5から0.11の範囲のDR Iで問題とならない。これらのDR Iのピーク値は、筆者らの予想より極めて小さかった。

図17は、掃引時間10秒間におけるDR I

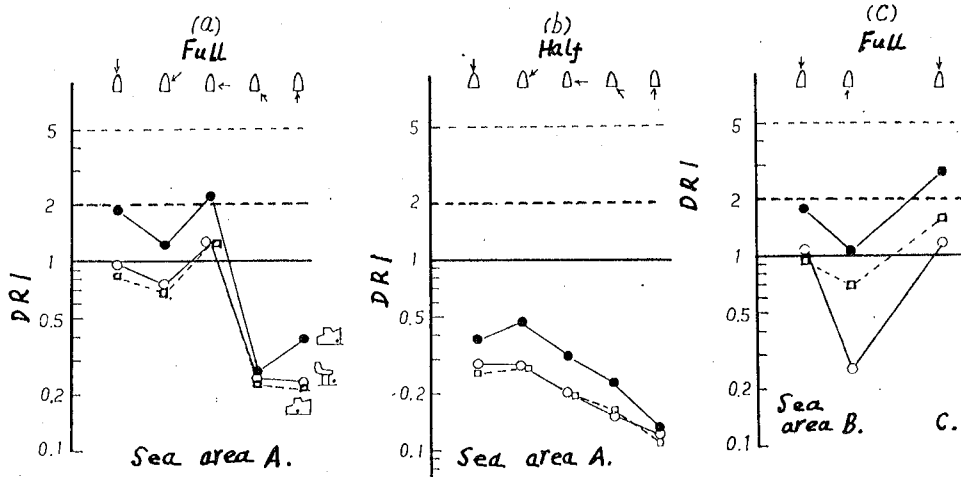


図16. 試験船のDR Iのピーク値 一脊柱傷害一

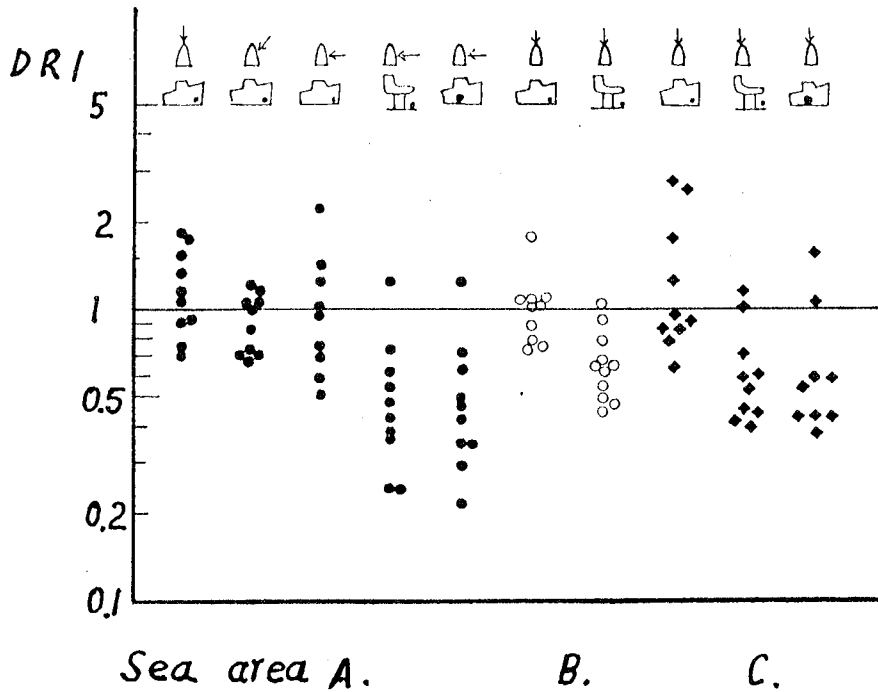


図17. 10秒間におけるDRIのピーク値の10回連続測定値

のピーク値の10回連続測定値を示す。DRIのピーク値は解析時間の延長によって大きくなる可能性がある。今回の解析時間は100秒間としたが、この解析時間は適当であると思われる。この図は、リアルタイム・アナライザのデータ・サイズが1024という限度があるため、このような方法でDRIのピーク値の分布を表現したものである。

推測の域を脱することができないが、本調査においては繰返し衝撃と振動によって直接に脊柱に傷害を生ずるような強い荷重が生ずるとは考えられない。しかし、腰痛発症との関係で、DRIがどのようなメカニズムでかわりあっているかということは、今後の研究において最も興味のあるところである。

D. むすび

高速艇乗組員における腰痛多発の問題は、腰痛発症の実態と高速艇で乗組員がうける激しい衝撃振動の実態の把握が必要である。前者は調査表による方法で現在調査検討中である。後者は本報告に述べられているとおりである。いずれも緒についた段階である。

今回、幸にも典型的な高速艇(65トン、速力25ノット)の波浪衝撃を、レータ・レコーダに収録する機会が得られた。そして、その実際に収録された加速度測定波から、乗心地指数、振動感覚物理量、脊柱の傷害にかかわる評価指数など、種々の人間工学的観点から評価する方法を考案し、この方法が有効な手段であること

がわかった。この方法は図3のようなブロック・ダイアグラムにより示されており、また人間応答の特性をもつウエイティング・ネットワークをとおして、リアルタイム・アナライザによって瞬時にして種々の評価指数などが得られる便利さをもっている。

もちろん、この方法を検討するにあたっては、I S Oの資料に負うところが多い。1976年に、G. R. Allen らによって繰り返し衝撃の許容基準がI S Oに提案されている。この基準は腰痛発症と関係が深い脊柱の傷害を対象として検討されたものである。このようなことから、諸外国でもこの問題に関心が高まっており、またわれわれにとっては貴重な文献を入手することが容易であった。しかしながら、まだ実際に役立つ基準とはいえないようである。したがっ

て、われわれの現場調査を中心にした研究成果は、稀少価値のあるものとして注目されるものと考えている。

今回の衝撃振動評価で脊柱破損と関係のある Dynamic Respones Index (DRI) といわれるところのI S O提案の評価指数が得られた。この評価指数の判定基準は、まだ確立されたわけではないが、予想に反して小さい値であった。したがって、腰痛発症の原因は、直接脊柱傷害につながる衝撃波によるとは考えられないようである。むしろ衝撃、振動、動揺による姿勢の不安定による筋疲労の蓄積が主な原因ではないかと考えられる。しかし、まだ推測の域にあり、今後の検討がまだまだ必要である。

(53年度；衝撃、振動、動揺の評価基準に関する研究の一部、神田 寛担当)