

航走波による係留小型船の動揺実測

Field Measurements of Motions of Small Ship in Ship Waves

斎藤勝彦*・塩谷茂明**・藤富信之***

Katsuhiko SAITO, Shigeaki SHIOTANI and Nobuyuki FUJITOMI

When we evaluate the safety of activity on a floating pier or a small ship, it is important to know the characteristics of motions in ship waves. Because when ship waves come to a floating body, the motions become large unexpectedly. The main purpose of this study is to investigate the characteristics of ship motions in waves generated by a high-speed boat passing near the mooring small floating body. Ship motions in ship waves are measured by the field tests, the short period maximum motions are also investigated by the approximate calculations.

Keywords : ship motions, ship waves, field measurements

1. はじめに

マリナーの現地調査において、プレジャーボート特にパワーボートの港内における航行により生じる波、すなわち航走波に対する利用者の苦情が少なくないことが報告されている⁽¹⁾。これは小型の浮体である浮桟橋やヨットが航走波によって比較的大きな動揺が突然起こるためである。また非常に静穏な海域のマリナーでは航走波が係留施設の設計条件になるかもしれない。一方航走波による動揺問題は、養殖筏や係留中の小型船舶の損傷、小型釣船の大動揺による転覆や、釣り客の海中落下等の人身事故誘発の危険性等の観点からも重要である。

航走波が作用したときの動揺は、浮体上での作業に影響し、その最大動揺量が問題となる搬送波の周期に対応した短周期成分（ヒープ、ピッチ、ロール）と、係留系の設計上重要である、外力の急変による長周期成分（スウェー、サージ、ヒープ）がある。青木ら⁽²⁾は過渡的な波による線形系の共振応答と規則波による定常状態での共振応答との比較を行った。Grigoropoulosら⁽³⁾は係留中の船に一過性群波が船首から作用した場合のピッチとヒープの過渡的な動揺が、群波に対応した規則波が作用したときの定常動揺特性とほとんど変わらないことを述べている。定兼ら⁽⁴⁾は実験により航走波の特徴及び航走波中の小型船の動揺特性および航走波強制モーメントに関する検討を行うとともに、航走波中の動揺に関する近似予測を試みている。斎藤ら⁽⁵⁾は航走波のような一過性の群波が作用するときの長周期成分を含めた動揺の時系列特性及び短周期成分の最大動揺量について、2次の波力までを考慮した動揺の時系列解析により検討を加えている。

また現場では、安全対策を考える上で簡便な方法で航走波による小型船の動揺量を予測する必要性が高まっている。これは近年大きな波を造りながら高速航行する小型船舶が多くなり、航走船のマナー上の問題のみでは対応できず、港内等の高速船の速力制限値を定める必要があるためである。そこで本研究では、航走波による係留小型船の動揺実測を行うことにより、これまで実験および数値的検討より得られた航走波およびそれによる係留船の動揺特性に関する知見の現地適用性に関する検討を行うことを目的とする。

2. 現地計測の方法

実測は、広島県豊田郡大崎町の大西漁港で風波の影響がない状況で行った。表1は供試船の諸元を示す。航走船は20トン型の高速艇であり、速力は15.5ノット、動揺させる係留船（全長6.45mの小型伝馬船）からの最接近距離dは、約20m, 40m, 60mの3種類である。係留船は、防波堤等からの反射波の影響がないように、防波堤外側に係留（船首：アンカーロープ係留、船尾：係留索を防波堤に係留）し、その動揺（ピッチ、ロール）をジャイロを用いた動揺計測装置により計測した。航走波は、航走船と動揺船の最接近距離がほぼ等しい位置において、空中発射型の超音波波高により水位の時系列を、陸上および係留船より目視により主波向きを計測した。図1に現地計測の配置、写真1に航走船、写真2に係留船を示す。

* 正会員 神戸商船大学（〒658 神戸市東灘区深江南町5丁目1-1）

** 長崎大学水産学部

*** 広島商船高等専門学校

表 1 供試船の諸元

Item	sailing ship	mooring ship
L(m)	14.00	6.45
Lpp(m)	12.50	5.00
dm(m)	1.10	0.25
Δ (ton)	19.99	1.412

L:length over all , Lpp:length between perpendiculars , B:extreme breadth , dm:mean draught , Δ :displacement



写真 1. 高速航行する航走船

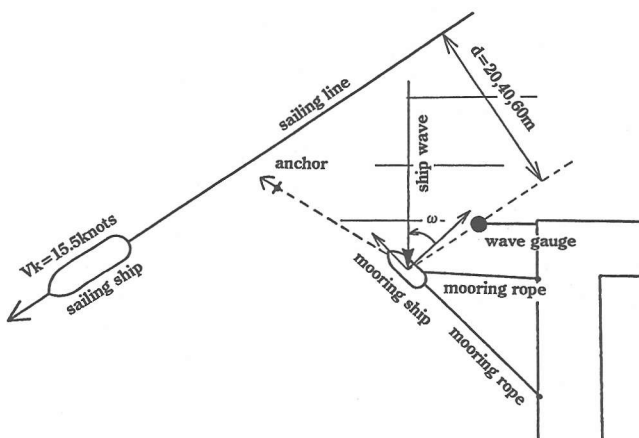


図 1 動揺実測配置



写真 2 係留小型船

3. 現地計測の結果

3-1. 係留船の固有周期

図 2 は係留船のロールの固有周期と粘性減衰力を求めるために行った、自由振動実験の結果である。実験は、船体動揺計測装置による計測結果をモニタリングするために係留船に乗船している 2 名が強制的にローリングを起こす方法でおこなった。図 2 は計測した動揺時系列のうち、観測者が動揺を起こす動作をやめた時点以降の動揺時系列を示している。この結果より、係留船のロールの固有周期は、2.22 秒であることがわかった。

3-2. 航走波の時系列

航走波の伝播過程での変形を含めた検討については、船舶工学の分野において、造波抵抗問題の必要性から、船体近傍での造波問題に関しては、滑走艇などの特殊な例も含めて比較的詳細な検討がなされている⁽⁶⁾。一方、船体から発生した航走波の伝播にとまなう波変形問題に

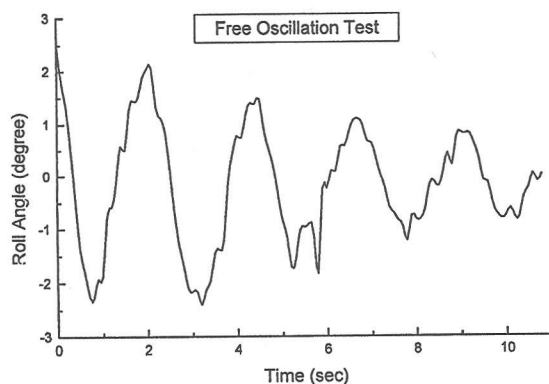


図 2 係留船のロールの自由振動時系列

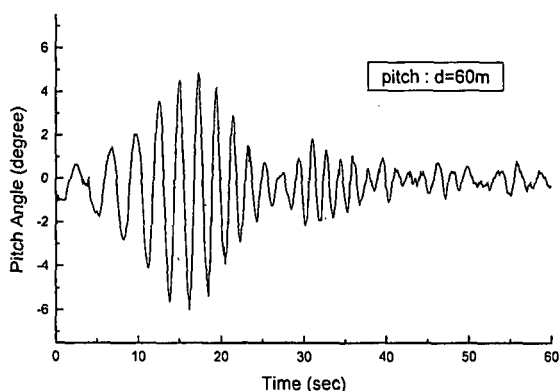
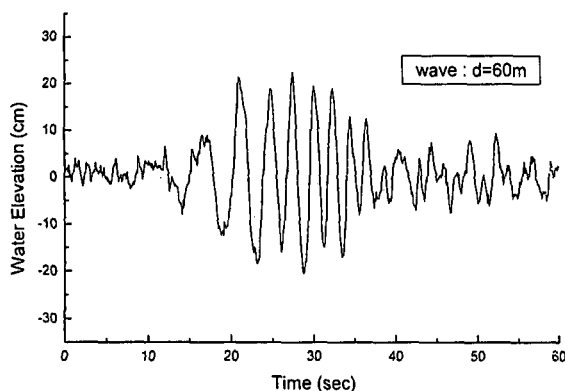
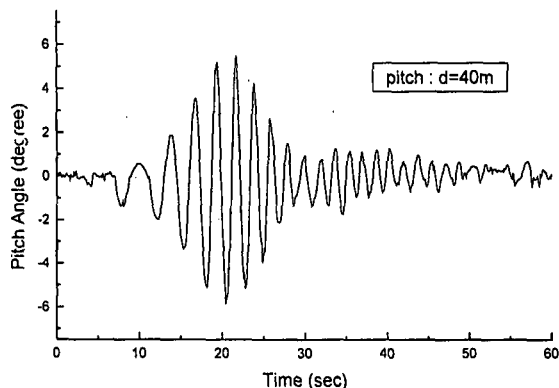
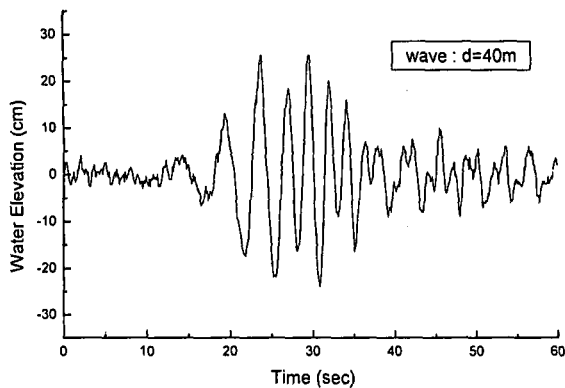
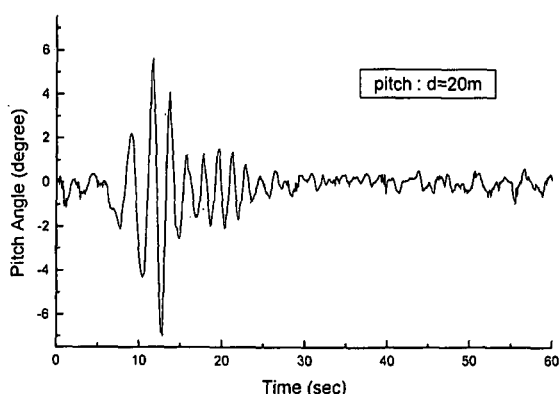
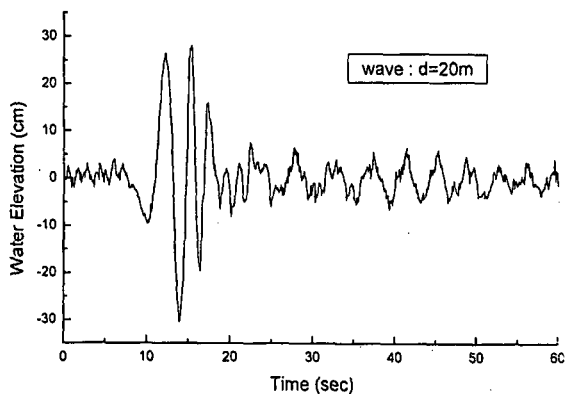


図3 実測による航走波の時系列

図4 実測によるピッチの時系列

関しては、最大波高の減衰特性は比較的検討されているものの⁽⁷⁾、航走波の3次元波形等の変形特性に関する検討はほとんど行われておらず、航走波の伝搬変形特性を近似的に取り扱う方法がようやく行われているにすぎない⁽⁸⁾。また、これまでの研究対象が巨大船を含む比較的大型の船舶であるために、漁船、高速艇ならびに滑走艇のような小型船舶による航走波の研究が十分行われていないのが現状である⁽⁹⁾。

図3は、それぞれ高速艇が波高計からの最接近距離 d が20m、40m、60mで航走したときの水位の時系列を示す。これより群波を構成する搬送波の周期は一定ではなく、周期の長い波から短い波へと順々に到達し、伝搬とともに最大波高は小さくなりながらも搬送波の数が増え周波数分裂していく様子がわかる。

3-3. 動揺の時系列

図4、5はそれぞれ $d=20$ m、40m、60mの時のピッチとロールの時系列である。これより、高速艇が非常に接近して航行する場合には、非常に大きな動揺が突然起こることがわかる。従ってその危険性を十分に認識していない場合は、浮き桟橋の場合で歩行者の転倒、小型釣り船の場合で海中転落の危険性が十分考えられる。また、動揺時系列より係留船はほぼ航走波形に対応した周期で動揺しており、航走波が作用し始めてから動揺が最大となるときは、ほぼ波高が最大になるときと同じであることがわかる。

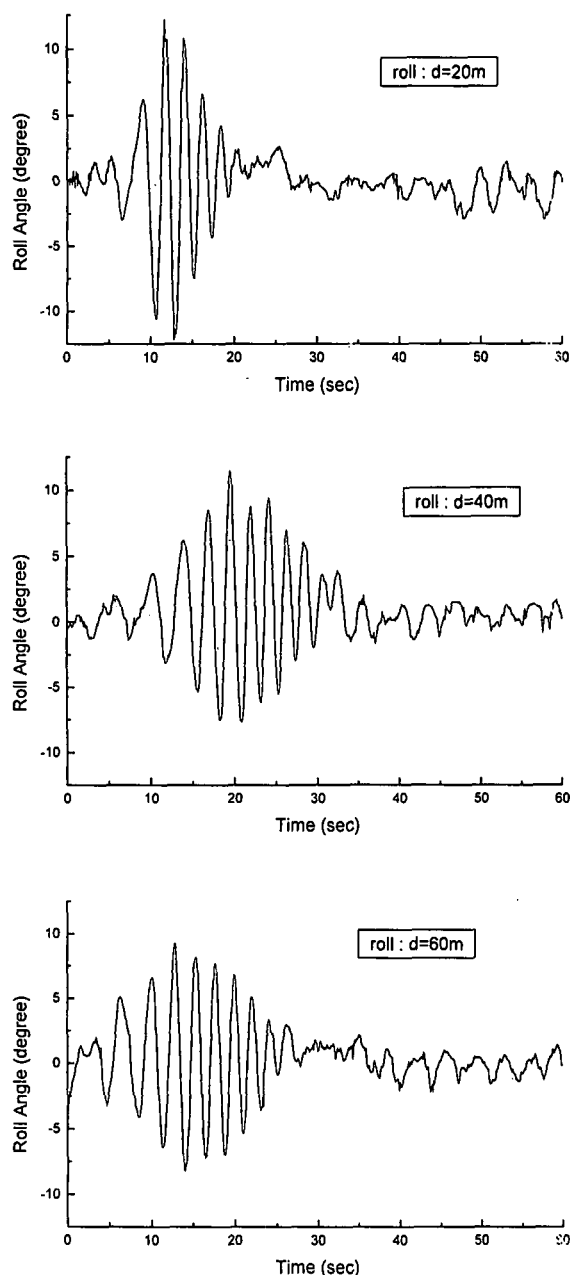


図5 実測によるロールの時系列

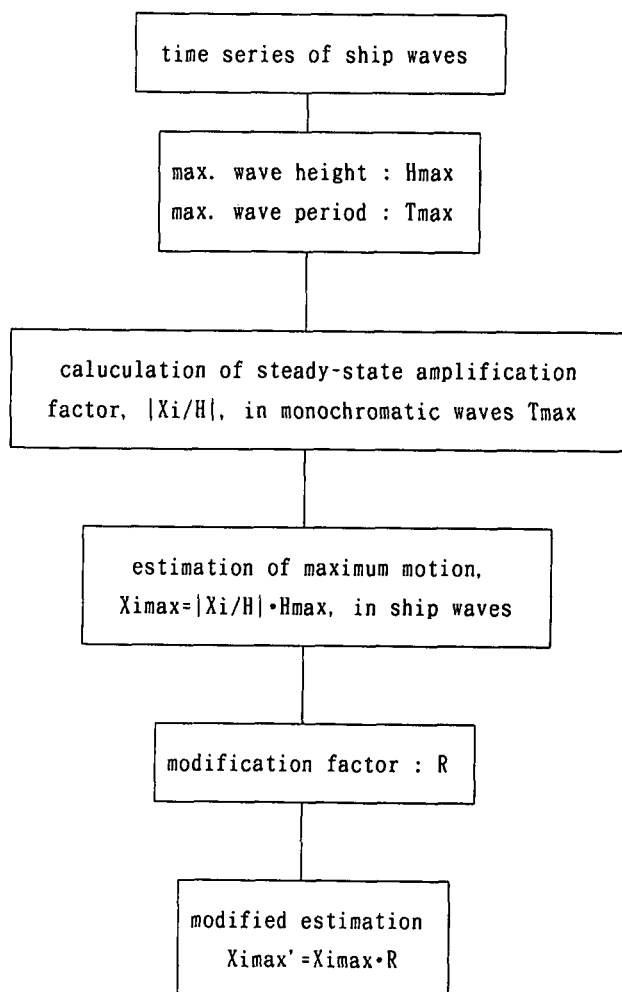


図6 航走波による短周期最大動揺量の簡便予測法

4. 動揺量の簡便予測

航走波は、一過性でなおかつ3次元的な波形構造を有しているために、それによって引き起こされる船体動揺を厳密に解くことは非常に難しい。また係留船が小型で、航走波を2次元的な一過性群波として扱えるとしても、今回の現地計測でも明らかなように、群を構成する一波一波の搬送波の周期は異なる。仮に航走波を2次元規則波の2成分波と見なすことができたとしても、その中での動揺を正確に計算するには、少なくとも2次までの波力を考慮した非線形動揺問題を解く⁽⁶⁾ことになる。また、現在のところ航走波の伝搬過程を含めて波形を正確に予測することはできないので、航走波中の動揺予測を厳密な手法で行ってもすぐに現場に適用することはできない。航走波の簡便な予測では、対象船舶と航行速度および離隔距離から最大波高及び最大波の周期が求められる。従って、ここでは予測された最大波の諸元から短周期動揺成分の最大動揺量を簡便に予測する手順を提案するとともに、実測された航走波と動揺量により予測の精度を確認していく。

図6に、航走波による短周期成分の最大動揺量を予測するに至るフローを示す。まずはじめに、係留浮体へ作用する航走波の最大波高 H_{max} と最大波の周期 T_{max} を予測する。予測の手法は今のところ簡便な方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾によるしかないが、予測された時系列から最大波を算出する場合と、波の時系列は予測できず直接最大波を予測する場合の2種類ある。次に最大波の周期 T_{max} の下での動揺の入射波振幅に対する振幅増幅率を計算する。3次元浮

体の規則波中の線形動揺計算はすでに実用的になっており、今回はジョンのグリーン関数を用いたロールの粘性減衰力を考慮した3次元境界積分法⁽¹¹⁾を用いる。次に計算された動揺振幅増幅率に予測された最大波高を乗じることにより動揺の最大値を予測する。これは、これまでの研究により群波による過渡的な動揺が、群波に対応した規則波が作用したときの定常動揺特性と密接に関係していることが指摘されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾ためである。ただし、減衰力の小さいロールにおいては動揺の共振状態に達するまでにはある程度のなじみ時間が必要であるため、ロールの固有周期付近の動揺について、群波中の最大動揺量は規則波中の応答値よりも小さいことがわかっている⁽²⁾⁽⁵⁾。従ってこのような場合には、あらかじめ数値的な検討を行って何らかの修正係数を求めておく必要がある。

ここでは、予測された航走波の最大波の周期を2成分波の搬送波の周期として、規則波中の入射波定常無次元動揺振幅増幅率と2成分波の最大波高による無次元最大動揺量の比 $R^{(5)}$ を、予測された最大動揺量に乘ずることにより修正された最大動揺量を求める。ただし、群波（2成分波）を構成する波の数 m は、予測された航走波の時系列波形より決める必要がある。ここに、 $m = \sigma / |\sigma_1 - \sigma_2|$ 、 $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$ 、 σ_1, σ_2 :成分波の角周波数、 σ :群波（2成分波）の搬送波の角周波数である。

表2は、3つの実測ケースでの波向き（係留船右舷正横方向を0°とする）、航走波の最大波高 H_{max} と最大波の周期 T_{max} および各動揺成分の最大値 Ω_{xmax} （ピッチ）、 Ω_{ymax} （ロール）を、簡便な方法より得られる最大動揺の予測値とともに示している。ここに、最大値とは時系列に現れる両振幅の最大値、その周期とは最大波高時の時系列から求められるゼロアップまたはゼロダウンクロス法により定義される波形の周期としている。また今回は、航走波そのものの予測は行わず、動揺予測に用いる航走波としては実測されたものを用いている。つまり規則波中の定常無次元振幅増幅率を計算するときの、係留船に作用する波向きは、 $d = 20\text{ m}$ 、 40 m 、 60 m でそれぞれ 25° 、 55° 、 44° 、波周期はそれぞれ 2.66 sec 、 2.63 sec 、 2.74 sec とする。またここでは位置の保持のみを目的とした比較的緩やかな係留力は、対象の短周期動揺特性には大きな影響はないものとして、計算では無係留状態とした。

表2より、修正を行わない予測で、ピッチについては比較的良好な結果であるが、ロールについては実測の2倍程度の大きな予測結果となっている。一方、今回の実測における係留船のロールの固有周期は約2.2秒で、航走波の周期と近い。また搬送波の周期も群波内で時々刻々変化していき、動揺が定常状態に達していないことは明らかである。従ってこのような場合には、あらかじめ数値的な検討を行って求めておいた修正係数 R を用いることにより、ロールについても比較的良好な予測ができることを確認した。ただし R を求めるときに必要な m は、航走波の時系列より $d = 20\text{ m}$ 、 40 m 、 60 m でそれぞれ4、7、9としている。

表 2 実測された航走波の最大波と最大動揺量の実測値および簡便予測値

ship waves				pitch		roll				
d	ω	Hmax	Tmax	exp.	cal.	exp.	cal.	m	R	cal.'
20m	25°	58.52cm	2.66sec	12.68'	9.11'	24.35'	55.30'	4	0.51	28.20'
40m	55°	49.44cm	2.63sec	11.36'	13.79'	19.14'	28.93'	7	0.79	22.85'
60m	44°	42.89cm	2.74sec	10.87'	11.02'	17.48'	23.56'	9	0.84	19.79'

$$R = \frac{\text{maximum motion in transient waves}}{\text{steady-state motion in monochromatic waves}}$$

$$m: \text{number of carrier waves in an envelope}$$

5. おわりに

本研究では、航走波による係留小型船の動揺実測を行うとともに、これまでの航走波およびそれによる係留船の動揺特性に関する知見が現地に適用できるかどうかを確認した。その結果、既知の浮体の短周期動揺応答振幅増幅率と、別に予測される航走波の最大波高及び周期から航走波中の最大動揺量が現地においても予測可能であることがわかった。今後、航走波そのものの予測と今回の動揺予測とを組み合わせ、現地データと比較することにより、航走波による小型船の動揺特性を簡便に予測する方法についての考察を加えていく予定である。

最後に、現地計測実施にあたりご協力いただいた広島商船高等専門学校練習船の船長はじめ乗組員の方々に対し、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1)森田修二：マリーナ施設の水理学的最適配置計画に関する研究、大阪大学学位論文、223p, 1995. 5.
- (2)青木伸一ほか：航走波による係留浮体の共振応答に関する一考察、土木学会海洋開発論文集, vol. 10, pp. 295-300, 1994. 6.
- (3)Grigoropoulos G. J. et al.: Transient Waves for Ship and Floating Structure Testing, Applied Ocean Research, 16, pp. 75-85, 1994.
- (4)定兼廣行ほか：航走波を受ける小型船の動揺に関する実験的研究、日本航海学会論文集、第91号、pp. 79-88, 1994. 9.
- (5)斎藤勝彦ほか：一過性群波作用下の浮体動揺、日本航海学会論文集、第94号、pp. 309-314, 1996. 3.
- (6)塩谷茂明：滑走平板が造る波の研究について－Ⅷ、－有限幅滑走平板が造る波の数値計算－、日本航海学会論文集、第95号、pp. 223-231, 1996. 9.
- (7)倉田克彦ほか：浅海水路中の航走波の特性および繋留船舶に及ぼす影響、土木学会第30回海岸工学講演会論文集、pp. 598-602, 1983. 11.
- (8)森田修二ほか：港内における航走波の簡易計算解析手法、土木学会海洋開発論文集、vol. 11, pp. 13-18, 1995. 6.
- (9)塩谷茂明ほか：三種類の小型実船による航走波の特性、水産工学、vol. 33, No. 2, 1996. 11.
- (10)久保雅義ほか：岸壁前面に任意の角度で係留された浮体式係船岸の動揺特性の計算、日本航海学会論文集、第84号、pp. 75-84, 1991. 3.