

船体運動測定装置を活用した全天候型海上輸送 システム構築へ向けての基礎的研究

BASIC RESEARCH ON THE CONSTRUCTION OF WEATHER-PROOF MARITIME
TRANSPORTATION SYSTEM USING THE MEASUREMENT EQUIPMENT OF SHIP MOTIONS

笹 健児¹・久保雅義²

Kenji SASA and Masayoshi KUBO

¹学生会員 神戸商船大学大学院 博士後期課程 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

²正会員 工博 神戸商船大学教授 船貨輸送研究施設 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

In harbours facing to the open sea, long breakwaters tend to be built to decrease wave heights. Also, it is cleared that the influence of moored ship motions has to be considered. On the other hand, ship motions at harbour entrances due to waves are one of the most serious problems in ship handling. However, ship motions near harbour entrances are not discussed and observed so much. Therefore, it is necessary to research on ship motions offshore and near harbour entrance. In this study, we observe ship motions during the navigation, entering to and departing from harbours. Ship motions are measured by the new type of measurement equipment consisted of GPS, optical fiber gyro and gyro compass. Observed data at the departure from the harbour shows that the rapid growth of ship motions can be recognized as the important factor, which causes the difficulty of ship handling near the harbour entrance. So, it is verified that harbours should be constructed and operated based on the numerical influence of ship motions due to waves near harbour entrances and offshore.

Key Words: *Ship Motions, Measurement Equipment, Weather-Proof Harbour, Maritime Transportation, Harbour Entrance*

1. 研究の目的

外洋に面した港湾においては、防波堤の延長を中心とした計画・施工がなされる傾向にある。しかし、港湾計画時には港内波高の低減のみでなく、係留船舶の動揺を考慮する必要が明言されるようになった。最近では、長周期波に起因した係留船舶の動揺問題に関しても多くの調査研究が実施され、その対策についてもいくつかの提言がなされている(白石ら, 1995)。一方、港湾の利用者である船舶から見ると、港内だけでなく外洋海域を航行してから入港または出港する局面における安全性も無視できない要素となっている。過去に冬季日本海における漁船の入出港問題に関して検討した事例があり(久保ら, 1997)、港口付近で波浪による船体動揺によって操船が非常に困難になる状況が明らかになった。通常の船舶についても入出港局面における船体動揺に起因した操

船困難は港湾形状等にも大きく依存するため、港内外における一連の船体動揺が港湾の計画・運用に考慮される必要がある。ただし、同一の船舶が外洋海域を航海してから入港、係留、出港までの船体動揺を連続的に計測した事例は著者らの知るところでは存在しない。本研究では、まず船舶が外洋を航行してから入港および出港する局面、外洋沿岸域を航行する局面の船体動揺について実測データを取得する必要があると考えた。このため、船体動揺の計測システムについても、入出港時の局面等においては従来に係留中の船体動揺で用いられていたビデオカメラによるシステム(斎藤ら, 1996)では計測が困難であるため、GPSを用いた新しい計測システムを導入した。さらに昨年10月に太平洋および日本海といった外洋における内航コンテナ船の航海中および入出港時の船体動揺を現地観測し、船体動揺の特性分析を行った。これより、波浪中の船体動揺から見た

海上輸送の定時性および安全性に関する検討を行うとともに、港湾計画・運用が入出港時における船体動揺に及ぼす影響についても考察した。

2. 港湾の設計・運用および海上輸送時から見た船体動揺に関する諸問題の整理

従来、港湾を計画する際においては、港内での波高低減を目的とした「港内静穏度」による評価検討がなされてきた。このため、外洋に面した海域の港湾においては長い防波堤の建設が主体となった計画が数多く見られる。これによって港内の波高が減少し、静穏な海域が保たれたかに見えた。しかし、周期 1～3 分程度の長周期波に起因した副振動および係留船舶の長周期船体動揺が問題となり、現在その対策が検討されている。一方、港湾に入港および出港する際における操船局面においての困難度については、操船シミュレーターを用いた風や潮流による影響を考慮した研究が主に行われてきた。しかし、外洋性港湾においては入出港時の船舶に最も影響が強く作用するのは波浪であると考えられるが、この点についての検討は漁船を対象に調査が行われている程度である。これによれば防波堤が長く設置された影響で操船そのものはむしろ困難になるという調査結果も得られている。さらに外洋沿岸域を航行中において、海象条件の急な悪化に伴う避難港・避泊錨地への避泊問題を含めた「全天候型海上輸送システム」の構築に向けての課題抽出について実施する必要がある。図-1 に海上輸送全体から見た検討すべき船体動揺の問題点についての流れを示す。

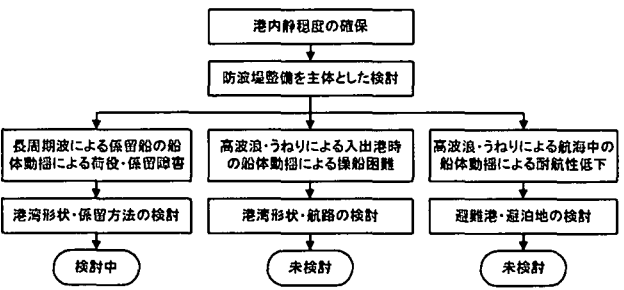


図-1 海上輸送における船体動揺の問題点

3. 船体運動測定装置の概要

本研究では係留中だけでなく、入出港時および沿岸航海時においても連続的な船体動揺の計測が必要となる。従来に行われていた船体動揺の計測について見ると、係留中と大洋航海中の局面で行われてきている。前者は周期が SWAY, SURGE, YAW といった数分の長周期船体動揺の観測を主眼としているため、

ビデオカメラを用いた計測が行われている。後者は船舶の耐航性の観点から PITCH や ROLL といった短周期船体動揺の観測を目的としており、両者の観測結果は完全に別の観点から議論され、相互の関係を検討した事例は見られない。このため、観測システムについても航海中から入出港、さらに係留時という一連の局面を連続的に観測できるシステムの開発が必要となった。本研究では、このような状況に対応できる新型の船体運動計測装置を新たに導入した。図-2 に各局面で問題となる船体動揺のモードについて、図-3 および図-4 に今回導入した船体運動測定装置の概要図を示す。

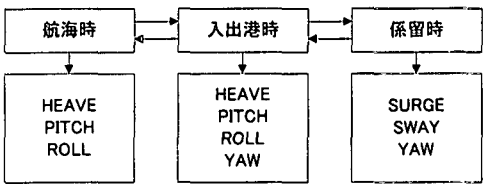


図-2 各局面で問題となる船体動揺の種類

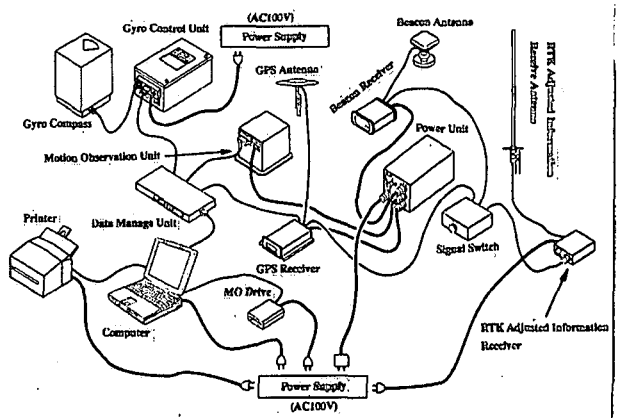


図-3 船体運動測定装置の概要図（船上局）

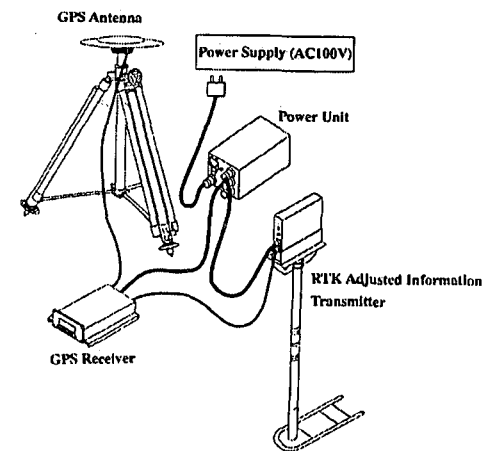


図-4 船体運動測定装置の概要図（陸上局）

船体運動測定装置は GPS、光ジャイロおよびジャイロコンパスの 3 計測系から構成されており、GPS では船体位置、速度、SURGE、SWAY および HEAVE のような水平・鉛直方向への船体動揺量、動揺速度、動揺加速度が計測される。光ジャイロでは PITCH および ROLL といった軸周りの回転運動の動揺量、動揺速度および加速度を計測する。ジャイロコンパスでは船首方位と YAW の動揺量を計測し、各計測システムによって計測されたデータがデータ管理ユニットを介してパソコンに転送される。転送されたデータはパソコン上の解析ソフトによって各計測項目が時々刻々に演算・記録され、最終的には MO ディスクに保存されるようになっている。GPS による計測方式は最も精度の高い RTK (Real Time Kinematic) 方式、沿岸におけるビーコン局の情報をもとにする DGPS 方式およびノーマル方式の 3 方式から選択できるようになっている。RTK 方式は陸上に別途設置された局との相対観測における変動成分を演算することによって位置を決定するシステムである。このため、図-4 に示すような陸上局の設置が必要となり、電波の到達範囲の関係で本装置は陸上局から半径 2km 以内での使用に限定されるが、測定誤差はセンチ以内という高精度な計測が可能である。DGPS 方式およびノーマル方式は陸上局を必要としない計測システムであり、DGPS は沿岸航海までの範囲で 1m 以内の誤差で計測することが可能である。このような計測システムにより、GPS の測定方式を組み合わせることによって沿岸航海中から入出港さらには係留中の船体動揺を連続的に精度よく計測することができる。

4. 船体動揺に関する現地観測

前章で述べた計測装置の有効性を検証し、計測データがほとんど存在しない入出港局面、さらには外洋航海時における実船データの取得を目的に現地観測を実施した。

(1) 現地観測の概要

2000 年 10 月に 499 トン級内航コンテナ船を用いた廃家電のリサイクル物流に関する検証実験が実施された(久保ら, 2001)。航海は神戸を出港してから太平洋および日本海を航行するルートで合計 8 港に入港するスケジュールであった。各港で廃家電を 1 本ずつコンテナ積みし、最終的に北九州港のリサイクルセンターへ輸送された。表-1 に実験対象船「新神戸」の主要目を示す。

実験時にはこれらのコンテナのみ積載されたため、ほとんど空船状態と見なせる。図-5 に GPS にて計測した航海中の船体位置の軌跡を示す。ただし、長崎～鳥取沖までの区間については、機器のトラブル

によりデータが欠測している。

表-1 実験対象船の主要目

全長	81.6m
垂線間長	74.5m
船幅	12.8m
喫水(実験時)	2.80m
メタセンター高さ(実験時)	2.96m



図-5 実船実験における航跡図

実験前半の太平洋ルート(神戸～高知～鹿児島)においては、海象条件は極めて穏やかなために大きな船体動揺も発生しなかった。一方、日本海ルートを航行中の 10 月 15 日過ぎから前線の通過や低気圧の発達により波高が 3～4m 程度に発達した。図-6 に実験中で最も海象条件が厳しかった 10 月 18 日の天気図を示す。これより、本研究では日本海ルートで計測されたデータについてとりまとめる。

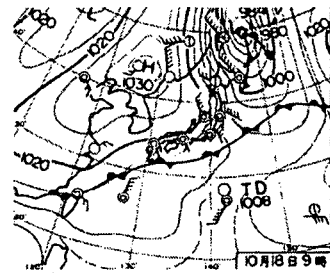


図-6 10 月 18 日の天気図

(2) 入出港時における船体動揺の計測結果

船舶が港に入出港する局面で外洋性港湾のように長い防波堤が建設された場合、港口部で大きく舵を切らなければならない。そのために速度も低下させる必要がある。防波堤付近では反射波の影響もあり、荒天時には波浪による影響で船体動揺が増大し、操船が困難となることがある。港湾を計画する場合、このような入出港時における船体動揺を考慮すべきであるが、入出港時における観測データもほとんど

存在しない。本研究ではこれらをまず計測し、動揺特性を分析した。動揺計測については、10月15日および10月16日に金沢港に入出港する局面を対象にした。GPSについては、最も高精度なRTKモードによる計測とし、金沢港内に陸上局を設置した。図-7に金沢港の概要と入出港時における港口付近での操船状況を示す。

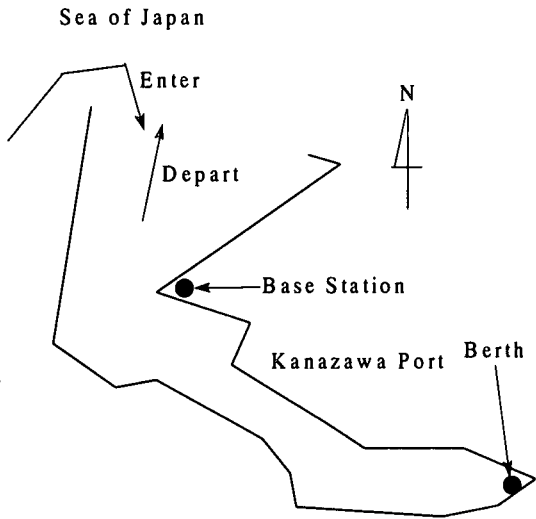


図-7 金沢港における入出港時のコース

これより、入港時には大きく舵を切りながら港内へ入るが、出港時には防波堤に平行な状態でそのままの針路で港外へ出る操船状況であった。図-8および図-9に入港および出港時における船体動揺量および船速の観測時系列を示す。

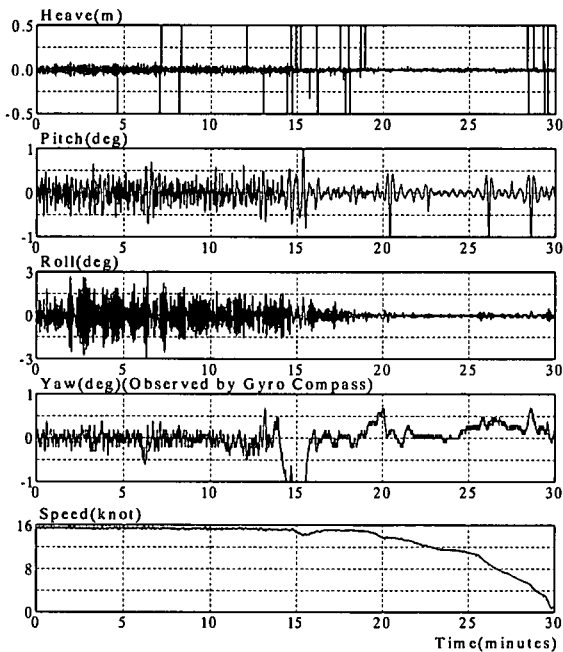


図-8 入港時における船体動揺量の時系列

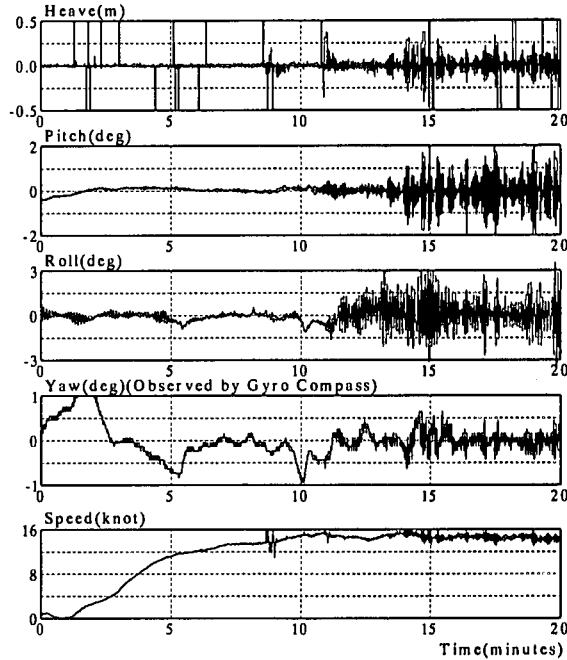


図-9 出港時における船体動揺量の時系列

入港時は港外での波浪が低くなった状態であったため、港口付近でRollが $\pm 3^\circ$ 、Pitchが $\pm 0.5^\circ$ 程度であり、あまり大きな動揺は計測出来なかった。一方、出港時には前日に前線が通過した影響で港外はかなり波が高くなっており、Heaveが $\pm 0.3\text{m}$ 、Rollが $\pm 3.5^\circ$ およびPitchが $\pm 2^\circ$ とやや大きめの動揺が計測された。防波堤を超えて港外に出た直後にどのモードの動揺も急激に大きくなっていることが特徴的であり、地震の時系列のように一過性かつ非定常性の強い波形となっている。このため、入出港時における船体動揺は係留中のようにスペクトルによる評価は適用が困難であり、今後適切な評価指標を構築する必要がある。

(3) 航海時における船体動揺の計測結果

航海中については、GPSはDGPSモードにて連続計測を行った。図-10に新潟港から舞鶴港へ航海中の10月18日未明における福井沖での船体動揺量の波形を示す。

Pitchで $\pm 3^\circ$ 、Rollで $\pm 11^\circ$ 近くのかかなり大きな船体動揺が計測されている。さらに図-11および図-12に新潟港から舞鶴港へ至るまでのPitchおよびRollの有義片振幅の変化傾向を示す。

これより、航海の前半はかなり小さな動揺量であるが、後半になると動揺量が急激に大きくなっていることが分かる。これは航海中における海象条件の急変に一致しており、沿岸航海中においても天候の急な悪化によって航海中の船に対する安全性が低下するおそれがあることを示唆している。特に内航船のように小型船型では急激に発達する低気圧や急な

うねりの伝搬による安全性を考慮する必要があり、その意味でも貴重なデータが計測できたと考えられる。

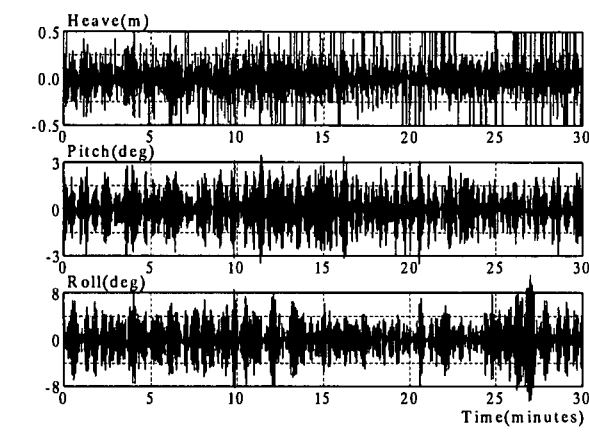


図-10 航海中の船体動揺量の時系列（福井沖）

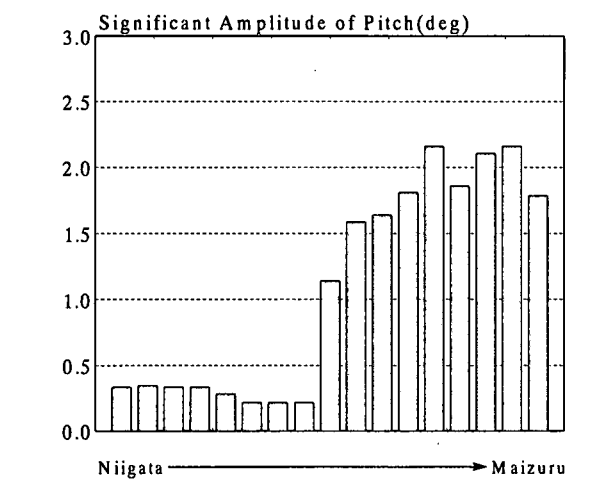


図-11 Pitchの有義片振幅の変化（新潟～舞鶴）

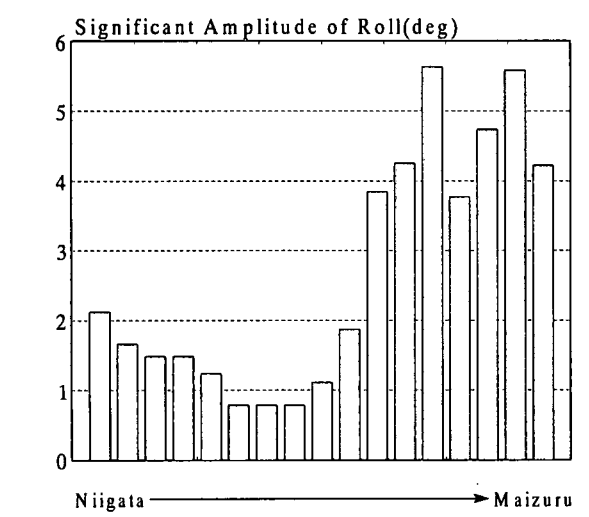


図-12 Rollの有義片振幅の変化（新潟～舞鶴）

5. 外洋性海域における海上輸送の迅速性についての検討

本研究では外洋を航行し、さらに入出港する際における安全性の観点から船体動揺を評価してきた。一方、海上輸送においても輸送の経済性が追求されるため、輸送の迅速性の観点からの指標を取り込んで評価を行った。図-13にPitchの有義片振幅ごとにおける船の平均速度との関係を示す。

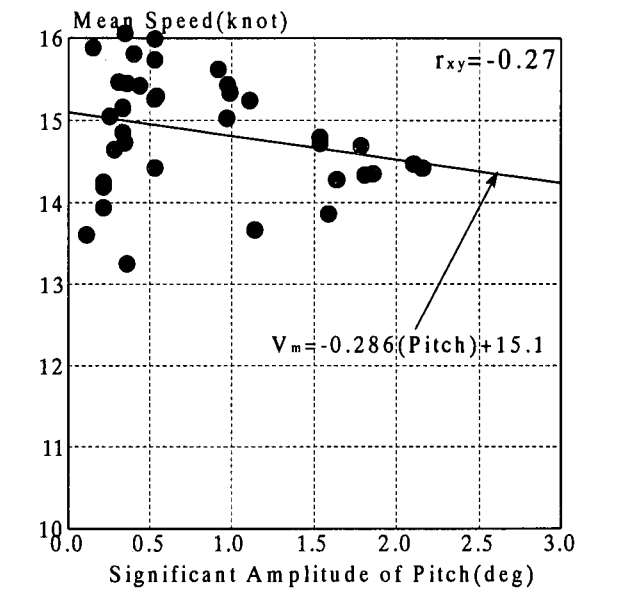


図-13 Pitchの有義振幅と平均船速の関係

Pitchの場合、縦方向の動揺であることから船の推進性に影響が及びやすいと考えられる。図より一部のケースで動揺量が少ない状況でも船速が14ノット以下のケースがあるが、全体的には動揺量の増加とともに船速が少し低下している様子が認められる。相関係数の値はあまり高くないが（-0.27）、勾配の小さい直線によって傾向がある程度近似できることが分かる。このように船体動揺量が海上輸送の迅速性について与える影響についても定量的に評価することが可能となった。

6. 船体動揺から見た全天候型海上輸送システム構築について

従来の研究では港内波高の低減、長周期波の低減、港内係留船の船体動揺を抑制する対策が論じられてきた。これによって港内海域における問題点がかなり明確にされ、対策の実用化が待たれるところである。一方、本研究で対象とした入出港および沿岸航海中の局面においても、同様に厳しい自然条件による問題点が存在し、これらも検討する必要性が本研

究によって明確になったと考えられる。港湾を計画・運用するにあたり、従来検討されてきた部分と新たに検討しなければならない部分との関係を図-14に示す。

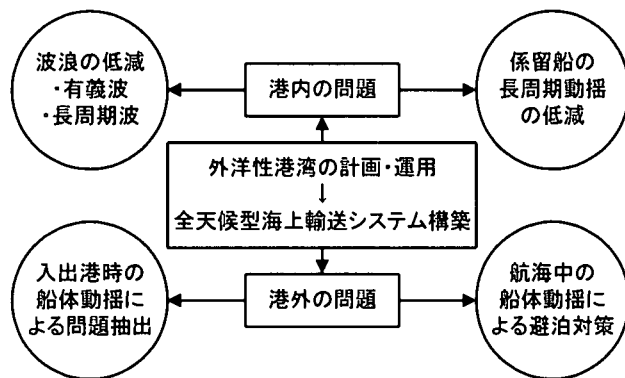


図-14 港湾の計画・運用にあたり考慮すべき事項

このようなフローで検討することができれば、港内静穏度の確保、長周期波による係留中の動揺問題だけでなく、出入港および荒天避泊の観点からも考慮した「全天候型海上輸送システム」の構築に近づけることが期待される。

7. 結論

本研究では、新たに開発した船体運動測定装置を用いて内航コンテナ船の出入港時および航海時における船体動揺を計測した。さらに輸送中の安全性および定時性からみた検討を行い、全天候型海上輸送システムを構築する上で必要な流れについて検討した。結論としては以下の事項が明らかとなった。

(1) 今回新たに導入した船体運動計測装置により、日本沿岸の外洋を航海中から入港、係留さらには出港に至る一連の局面における船体動揺が連続的に精度よく観測できることが検証された。これより、港湾の設計・運用に関する新たな問題点抽出が可能となる。

(2) 船舶が外洋性港湾を出入港する局面における船体動揺に関するデータは現在ほとんど存在せず、本研究において500トンクラスの船舶による動揺についてRTK測位方式でセンチ以内の誤差で有効なデータを観測できた。金沢港で計測された出港時の船体動揺波形より、港外での波形に非定常性が顕著な様子が明確に現れている。

(3) 内航船のように船型が比較的小型の場合、このような出入港時における波浪影響による船体動揺が操船に及ぼす困難さを無視できないことが明らかである。よって、今後波浪による出入港時の船体動揺と港湾形状等との相関について検討を行う必要がある。

る。

(4) 航海中における船体動揺量の時間的変化は気象条件の急変によって船の耐航性が著しく低下する状況があり得ることを示唆している。このような状況で沿岸航海の場合、避難港または錨泊できる海域といった観点からの港湾整備および活用について、今後検討される余地がある。

(5) 船体動揺量と平均速度との関係から、荒天時における動揺量増加に伴い、船速が少しであるが低下している様子が観測された。船の安全性だけでなく、経済性に影響が出る状況についても定量的な評価が可能となった。

(6) 現在の港湾計画に本研究で検討した事項を組み合わせることで、全天候型海上輸送システム構築に関する貴重なデータの蓄積が望まれる。

(7) 本実験においては、船体動揺量や船体速度のみの計測であり、波や風条件については同時計測することが出来なかった。今後の課題として、このような実験時における波浪の計測を充実させる必要がある。

謝辞：本研究での実船実験はエコマテリアル海上輸送研究会の実証実験の一環として実施された。実験の準備・実施にあたり、研究会各位および井本商運株式会社の方々、実験船「新神戸」の乗組員方には大変お世話になった。また実験時においては、今岡敬司君、木村友浩君（当時神戸商船大学学生）の助力を得た。ここに深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 久保雅義、水井真治、井上和博、橘 英敏、芳田利春：波浪下における入港漁船の安全性評価に関する研究、海岸工学論文集、第44巻、pp.851-855、1997。
- 久保雅義、斉藤摩里、上田一郎：使用済み家電の輸送システムに関する基礎的研究、日本航海学会論文集、第104号、pp.207-215、2001。
- 斎藤勝彦、久保雅義、笹沢茂夫：3Dトラッカーによる船体動揺の現地計測、海洋開発論文集、Vol.12、pp.161-166、1996。
- 白石 悟、久保雅義、上田 茂、榊原繁樹：係留システムに着目した長周期波に対する動揺抑制対策、海岸工学論文集、第42巻、pp.941-945、1995。