

入出港時における沖合観測波形を用いた船体動揺の 数値計算および着離岸作業の困難度評価

笹 健児* ・久保雅義** ・永井紀彦***
米山治男**** ・白石 悟***** ・水 井 真 治*****

外洋性港湾に船舶が入出港するときの安全性について、前報では大型フェリーが着離岸するとき Roll によって作業困難となる状況を定量化した。本研究では、港外から港内に至る入出港の全局面で発生する船体動揺を連続的に再現できる数値解析手法の構築を行った結果、沖合観測波形、港湾・船型データ、操船データをもとに着離岸局面を含めた入出港時の船体動揺を実用上十分な精度で再現できることを検証した。さらに着離岸時の作業困難度を定量的に評価できる「着離岸困難度関数」を新たに定義しその有効性を検討した。さらに海域、港湾、船型が異なるケースにおいても船体動揺の現地観測を実施し、入出港の困難さを支配する諸要因について考察した。

1. 研究の目的

太平洋など外洋に面した港湾に船舶が入出港する局面において、係留中に発生する Surge や Sway などの長周期動揺とは別に、係留前後の入出港・着離岸時に Roll や Pitch などの短周期動揺が卓越する影響で作業困難となることがある(久保ら, 1997)。著者らは太平洋に面した港湾を対象に荒天時に大型フェリーが入出港する状況に関する現地調査・観測を行った結果、波高 0.5 m, 周期 12 s 程度のうねり成分が港内に侵入することにより岸壁への着離岸作業が非常に困難となることを定量的に明らかにした(笹ら, 2003)。しかし、現状では依然として船舶運航者の経験と勘に依存した運航状況が続いており、定量的なデータ分析や数値解析に基づく安全対策の検討や評価指標の開発に基づく運用限界の検討は未だ実現していない。このため、うねりや高波浪による影響を予測しきれずに非常に危険な海象条件下での入出港操船を余儀なくされたケースも少なくない。本研究では、まず波浪中に港外から港内岸壁に至る水域を航行しながら入出港する船舶について、発生する船体動揺を連続的に再現できる数値計算手法を構築した。さらに船舶が着離岸する時に作業困難となる状況に対し、安全性を定量的に評価できる指標の導出に関して検討を行い、着離岸困難度関数を新たに提案した。また、海域、船型および港湾形状が異なる状況においても船体動揺の現地観測を実施し、これらの違いが入出港の困難さに及ぼす影響についても考察した。

2. 対象とした現地観測条件

本研究では前報で示した大型フェリーの船体動揺に関

- * 正会員 博(商船) 広島商船高等専門学校講師 商船学科
- ** 正会員 工 博 神戸大学教授 海事科学部
- *** 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究室長
- **** 正会員 工 修 (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 海洋構造研究室長
- ***** 正会員 博(工) (財)沿岸開発技術研究センター 第二調査部長
- ***** 博(商船) 広島商船高等専門学校教授 商船学科

する観測結果をもとに検討を行った。対象船舶は 12,000 DWT 型フェリー(全長:186 m, 幅:25.5 m, 喫水 6.0 m, 排水量:14,121 t, メタセンター高さ:3.24 m)であり、太平洋に面した S 港に 2 日に 1 回の割合で入出港する。図-1 に S 港の形状および入港時の航跡図を示す。

特徴的な操船パターンとしては、入港時に港口手前で大角度の右舵による変針を行った後、港内で回頭し後進しながら岸壁に着岸する方法を取っている。出港時にはスラスターで離岸した後に岸壁近くの水域で左舵を取り、港口手前で左舵を大きく取って出港する操船方法である。現地観測は主に 2002 年 7 月の台風時にうねりが伝播する状況下で実施された。観測時には港外で有義波高が 2~3 m, 有義周期が 10~15 s 程度に発達しており、Pitch および Roll の動揺量が港口および港内で大きくなっている状況が観測された。

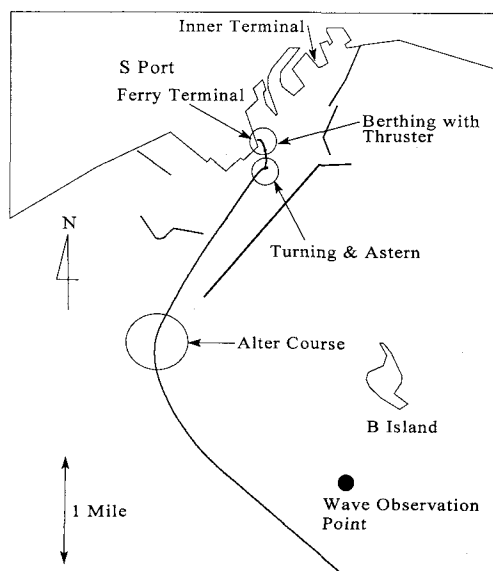


図-1 S 港の形状およびフェリー入港時の航跡図

3. 入出港時における船体動揺の数値解析手法

前報では船舶が着離岸する局面での船体動揺を再現できたが、精度的に若干実測値を過大評価すること、港外から港内に入出港する新局面についての連続的な船体動揺の再現が検討課題であった。本研究では上記について計算可能かつ精度向上が実現できる数値モデルの開発を試みた。船舶が入出港する局面では、港外から港内へと水深が変化する水域を船舶が方位・速度を変化させながら移動するだけでなく、防波堤や港湾構造物からの反射波・回折波など波浪変形の度合も時々刻々の位置ごとに大きく異なる。よって船体動揺を考えるにあたり、波向、出会周期、波振幅が時間・場所ごとに著しく変化する状況を計算上で考慮する必要がある。港外から港内への波浪伝播・変形については、前報で述べたとおり対象水域(7000 m×8000 m)を10 m間隔で格子計算点を設定し、沖合にあるナウファス観測点での0.5 s間隔の波形記録を入力波形とした船体位置ごとの時間波形を求めた。数値解析については水深変化および構造物まわりの波浪変形を考慮できる修正ブシネスク方程式を用いた(平山, 2002)。つぎに時々刻々の船体位置での波浪によって発生する船体動揺を以下の手順で求めた。まず流体力については周波数ごとに求めた値を遅延関数と不変付加質量にフーリエ変換した。波浪強制力については、計算点ごとに波向と船首方位が変化するため、船体に対する相対波向を次式にて計算ステップごとに定義する必要がある。

$$\phi(t) = \phi_w(t) - \Psi(t) + 90 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\phi(t)$ ：船に対する相対波向、 $\phi_w(t)$ ：波浪の絶対波向、 $\Psi(t)$ ：船首方位、 t ：時間を示す。波浪の絶対波向については、修正ブシネスク方程式の計算にて求められる計算点ごとの x および y 方向への平均流速値 $u(t)$ および $v(t)$ に対し、うねり成分の周期帯である10～20 sの流速成分のみをフーリエ解析にて抽出し、これらにより描かれるリサージュ波形から決定した。船首方位については船体動揺の観測時にジャイロコンパスにて計測された値を用いた。このように計算ステップごとに相対波向が変化するため、まず波浪の応答関数を15度ごとに24方位全て計算しておき、時々刻々の相対波向 $\phi(t)$ に対応した応答関数の振幅と位相を補間することによって求めた。これより入出港時の船体に対する波浪強制力は次式にて求められる。

$$\begin{aligned} FWV_j(x, y, t) = & \sum_{i=1}^N Y_i(x, y, t) W_j(\phi(t)) \\ & \times \cos((\sigma_i - k_i U)(t) \sin \phi(t)) - R_i(x, y, t) \\ & - P_j(\phi(t)) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 $FWV(x, y, t)$ ：位置 (x, y) 、時刻 t での波浪強制力、 $Y(x, y, t)$ ：計算点での各成分波の振幅、 $W(\phi(t))$ ：

波向 $\phi(t)$ での応答関数、 σ ：各周波数、 k ：波数、 $R(x, y, t)$ ：計算点での各成分波の位相、 $P(\phi(t))$ ：波向 $\phi(t)$ での応答関数の位相、 $U(t)$ ：船体速度を示す。なお、流体力および応答関数は船体形状を詳細に考慮できる三次元グリーン関数法によって求めた。一方、港口付近で大角度変針を行う場合、操舵時に発生する遠心力の影響で船が外側に傾斜する外方傾斜と呼ばれる現象を生じる。そこで次式で表される近似的な操舵遠心力を港口での変針局面では考慮した(元良, 1982)。

$$FRUD(t) = m \frac{U(t)^2 \cos \beta(t)}{R} \left(OG + \frac{d}{2} \right) \dots\dots (3)$$

ここで、 $FRUD(t)$ ：操舵遠心力、 m ：船体質量、 R ：旋回半径、 $\beta(t)$ ：船首方位と接線方向とのずれ角、 OG ：水面上から重心までの高さ、 d ：喫水を示す。ここで R は実験データより入港時は1500 m、出港時は1200 mとした。以上から、次式に示す遅延関数を考慮した運動方程式(白石ら, 1999)により船体動揺を解析した。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{\infty}) \ddot{X}_j(t) & + \sum_{i=1}^6 \left(\int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{X}_j(\tau) d\tau + D_j(t) \right) \\ & + \sum_{i=1}^6 C_{ij} X_j(t) = FWV_j(t) + FRUD(t) \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 $m(\infty)$ ：不変付加質量、 $L(t)$ ：遅延関数、 $D(t)$ ：粘性抵抗係数、 C ：復原力係数をそれぞれ示す。

4. 数値解析モデルによる再現計算結果

前章での計算方法により実際に入出港する局面の船体動揺について数値的な再現を行った。表-1に数値計算の対象としたケースの計算条件を示す。

これらはそれぞれ着離岸を含めた入出港操船が非常に困難であった状況の再現を試みたものである。前報で示したとおり、S港のフェリー岸壁近くでは港外の長周期波が大きく増幅し、うねり成分は30～40%程度に低減する傾向が数値計算で確認された。また各計算点の波向については修正ブシネスク方程式で求められた平均流速値から求められる周期10～20 sの x および y 方向への流速時系列 $u(t)$ および $v(t)$ の計算値から設定しており、図-2にケースAの港外、港口付近、港内のフェリー岸壁付近での流速リサージュ波形を示す。

図より、港外では沖波波向とほぼ一致しているが、港口付近では防波堤からの反射波、散乱波の影響により沖合波向から約20度ずれていることが分かった。港内の岸壁近くでは構造物の影響で波向はさらに複雑で沖合波向から約60度ずれた流速成分が支配的となっており、移動する船の位置に対応して波向が大きく変化している。この条件設定によりケースAおよびBの船体動揺について、計算・比較した結果を図-3および図-4に示す。

表-1 再現計算を実施したケース (2002 年)

ケース	日時	局面	港外の有義波
A	7月8日8時	入港	$H_{1/3}: 1.9\text{ m}$, $T_{1/3}: 12.6\text{ s}$
B	7月14日13時	出港	$H_{1/3}: 3\text{ m}$, $T_{1/3}: 14.9\text{ s}$

入港時および出港時ともに港口付近で Pitch および Roll が、港内の岸壁付近で Roll が大きくなる傾向が実用上十分な精度で再現できている。本研究で新たに構築された計算手法が沖合で観測された波形記録、船舶の入出港時の操船データを用いて入出港する船舶の動揺を連続的に再現できるものであることが検証された。ただし Roll の動揺時系列にやや違いがあり、港口部での操舵力による外方傾斜角が実測値より過小評価されている点については波向の設定、粘性抵抗力、操舵遠心力の設定などに課題が残されていると考えられる。一方、入港時の港外での Pitch の周期特性が実測値よりも短くずれている点についても、今後検討が必要である。

5. 着離岸時の作業困難に関する定量的評価

S 港では岸壁に着離岸する局面で最も操船が困難となり、ここでの困難度を明確に定量化する必要がある。前報では船橋の作業位置での水平・鉛直方向への変位量と波浪の関係に注目したが、ここでは高所での立位姿勢による作業の困難さという観点から検討をさらに進めた。船舶の着離岸局面は、船橋の端（ウィング）にて立位姿勢を保持したまま集中した作業環境が必要とされる。この状態で Roll や Pitch のような動揺が発生するため、足場の動揺による立位姿勢の維持限界について検討した。過去に人間工学の分野にて、人体に作用する水平方向の

表-2 立位姿勢の限界加速度

年齢	作業時の足幅	限界加速度
19-27	20 cm	0.118G (1.156 m/s ²)
19-27	40 cm	0.267G (2.616 m/s ²)
60-65	20 cm	0.088G (0.862 m/s ²)
60-65	40 cm	0.144G (1.411 m/s ²)
平均値		0.154G (1.51 m/s ²)

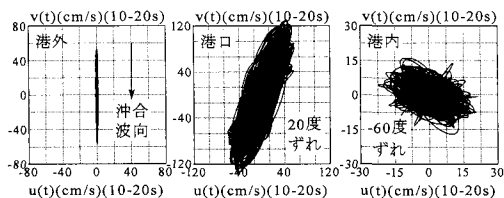


図-2 流速リサージュ波形 (ケース A)

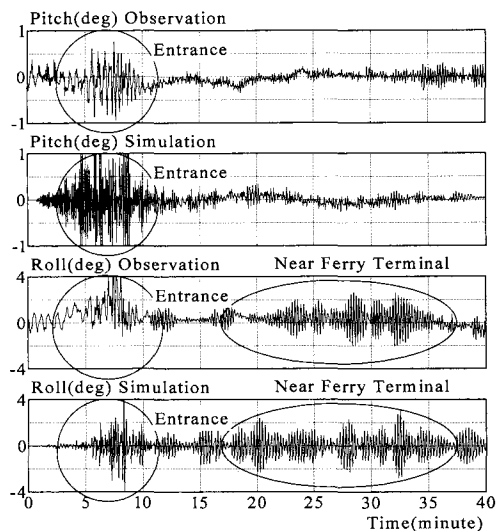


図-3 船体動揺の実測値と計算値の比較 (ケース A)

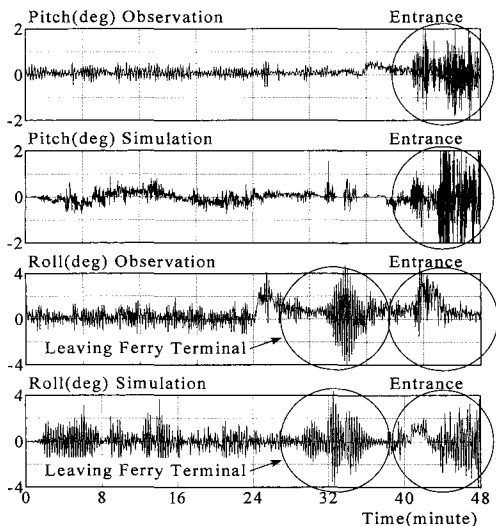


図-4 船体動揺の実測値と計算値の比較 (ケース B)

加速度が立位姿勢の維持限界に非常に深い関係があるという研究結果がある (永田, 1990)。表-2 に作業時の足幅および年齢ごとに求めた立位姿勢に関する水平方向の限界加速度の値を示す。

年齢および足幅でかなり限界値が異なるが、平均的な値を取って限界加速度を 1.5 m/s^2 とした。Roll および Pitch の動揺量を水平・鉛直方向の変位量に変換した後、これらを 2 回微分した加速度を求め、時系列中の最大値と限界値を比較した。さらに水平および鉛直方向の変位量が描く軌跡の面積にて立位姿勢の困難度を評価した事例も参考とした (渡辺ら, 1987)。図-5 に港外波浪の周期 10~15 s における周期帯別波高と水平方向への最大

加速度 $\alpha_{\max}$ 、移動軌跡の面積 S との関係を示す。

図よりうねり成分が1mを超えると船体動揺の増加によって限界加速度を超えており、作業困難となっていることが確認できる。また波高と面積もかなり相関が高いことが窺え、波高の上昇とともに作業の困難となる状況を明確に表している指標と言える。これより、水平方向への最大加速度と移動軌跡の面積について、両者の無次元値の和による新たな評価関数を以下のように定義した。

$$DBF(\alpha_{\max}, S) = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\lim}} + \frac{S}{S_{\lim}} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $\alpha_{\max}$ ：最大加速度、 $\alpha_{\lim}$ ：限界加速度(1.5 m/s²)、 S ：軌跡の面積、 $S_{\lim}$ ：作業限界面積を表す。作業限界となる面積は決め難いが、 $\alpha_{\max}$ と S の関係から以下の帰帰式を求め、 $\alpha_{\max}=1.5$ m/s²のときの値を $S_{\lim}$ と定義した。

$$S_{\lim} = 0.422 \alpha_{\lim} = 0.422 \times 1.5 = 0.633 \quad (\text{m}^2) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\alpha_{\max}$ と S をパラメータとする DBF を着離岸困難度関数と定義した。図-6 に沖合の周期帯別有義波高と着離岸困難度関数の関係を示す。

図より、港外で周期帯波高が1~1.5m以上のとき DBF の値が1に近づくかまたは1を超えている。これは現地観測にて着離岸が非常に困難と体感した時に一致しており、必要な精度で作業の困難さを定量化できている。これまでの港内静穏度では定義されていなかった船体動揺による着離岸の困難度についての詳細な分析が可能となり、今後の港湾計画・運用での検討が期待される。

6. 船型・港湾が異なる場合での入出港時の船体動揺

これまでS港における大型フェリーを対象に検討してきたが、海域、港湾、船舶、操船方法などが変化した場合との比較が必要である。2003年に太平洋に面したK港を対象に中型フェリーが入出港する状況を観測した。対象船舶は5,000 DWT型フェリー(全長：118m、幅：

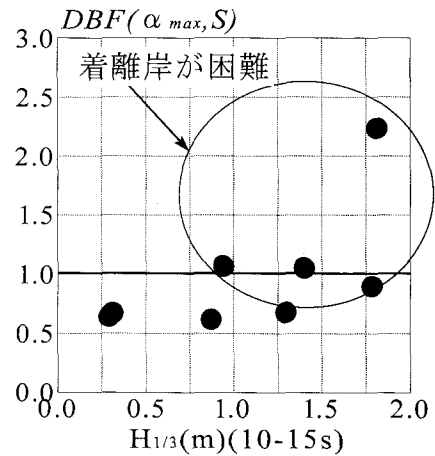


図-6 周期帯別波高と着離岸困難度関数の関係

21m、喫水：4.47m、排水量：5524t、メタセンター高さ：3m)であり、図-7および図-8に2003年9月13日にK港へフェリーが入港する時の航跡図および港口付近でのPitchおよびRoll、船速の観測波形を示す。この時の港外波浪は非常に強い台風が日本南方を通過した影響で有義波高2m、有義周期9sであった。

この場合、港口付近で反射波等の影響で動揺量が若干大きくなっているが、Pitch、RollともにS港ほど動揺量の大きな空間・時間変化は見られないことが分かる。これは図-7に示すとおり、港外から港口に入る時点までほぼ一定の針路で入港しており、大角度の変針や速力低減が少ない操船パターンが大きく影響していると考えられる。ただし、より厳しい海象条件での入出港限界の比較検討や全国規模での運用状況の調査などにより、海域、港湾形状、操船パターン、船型の違いが入出港の難易度に与える影響を多面的に考察することが必要である。

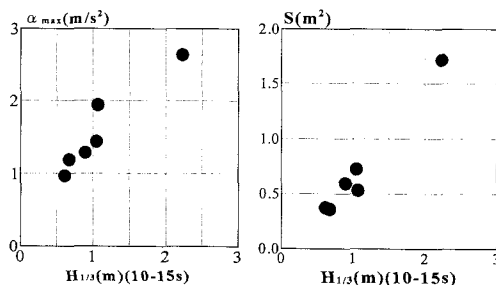


図-5 周期帯別の波高と最大加速度および移動軌跡による面積との関係

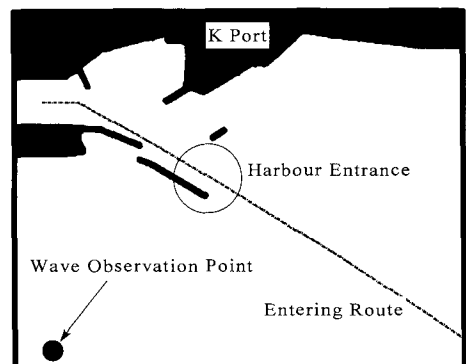


図-7 K港でのフェリー入港時の航跡図

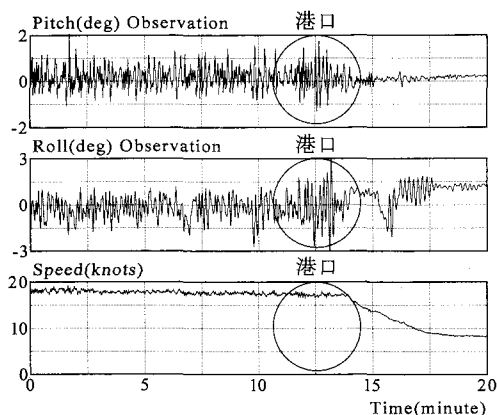


図-8 港口付近での Pitch, Roll および船速の観測波形

7. 結論および今後の課題

以下のように結論および課題が要約される。

(1) 港外から港内に至る入出港局面での船体動揺について、波浪場、船への入射波向、出会周期などが時々刻々に大きく変化しながら発生する状況を数値解析できるモデルを新たに開発した。

(2) 大型フェリーがS港に入出港する状況について、本モデルによる再現・比較計算を行った。この結果、入出港時ともに着離岸局面を含めて船体動揺の時間・空間波形を実用的な精度で再現できていることを確認した。

(3) 港口部での変針局面にて発生する操舵力による外方傾斜が実測値よりも過小評価されている点や入港時における港外での Pitch の動揺波形について、波向や操舵力などの設定が不十分であり、今後詳細な検討が必要である。

(4) 船体動揺により作業位置の足場に作用する水平方向への加速度と水平・鉛直方向への変位軌跡の面積をパラメーターとした着離岸困難度関数 (DBF) を新たに定義した。港外でのうねり成分が1~1.5 m以上で DBF の値が1に近づくか1を超え、着離岸作業の困難さを定

量的に評価できる指標であることが検証された。

(5) 海域、船型、港湾などが異なる条件にて船体動揺を観測し、S港の観測結果と定性的な比較を行った。K港の場合、港口付近での動揺量がS港ほど変化しておらず、これは港湾形状や操船パターンが大きく影響していると考えられる。この点については、今後さらに様々なデータを計測・分析し、総合的に比較・検討していく必要がある。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、資料整理およびデータ分析に終始意欲的に助力頂いた広島商船高等専門学校・学生 太田知孝君に深く感謝の意を示す次第である。また数値モデルの構築にあたり、波浪伝播の部分に関して「平山克也：非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No. 1036, 162 p., 2002 年」を参考とした。なお本研究は平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) (1) 研究代表者：神戸商船大学 久保雅義教授) の交付を受けて実施されたことを付記する。

参 考 文 献

- 久保雅義・水井真治・井上和博・橘 英敏・芳田利春 (1997): 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.
- 笹 健児・久保雅義・白石 悟・永井紀彦・趙 翼順・水井真治・小林 豪 (2003): 外洋性港湾における入出港時の着離岸作業障害に関する研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 1311-1315.
- 白石 悟・久保雅義・柳原繁樹・笹 健児 (1999): 長周期船体動揺の数値計算による再現性に関する研究，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 861-865.
- 永田久雄 (1990): 急加速刺激を加えた場合の立位姿勢の安定性に関する基礎的研究，人間工学，Vol. 26, No. 4, pp. 173-180.
- 平山克也 (2002): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No. 1036, 162 p.
- 元良誠三 (1982): 船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店，362 p.
- 渡辺興作・横山清子・高田和之・竹内伸也 (1987): 荷重負荷時の直立姿勢動揺の解析，人間工学，Vol. 23, No. 4, pp. 233-240.