

Title	Numerical study on nonlinear wave-body interaction in time domain based on ALE-HOBEM
Author(s)	張, 傑
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/67159
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

Abstract of Thesis

Name (Zhang Jie)	
Title	Numerical study on nonlinear wave-body interaction in time domain based on ALE-HOBEM (ALE-HOBEMを用いた時間領域での数値計算による波と物体の非線形相互作用に関する研究)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>When extremely nonlinear waves and/or large-amplitude body motions are involved, various nonlinear phenomena in hydrodynamics of wave-body interaction problems become important in the design and safety of ships and offshore structures. In the present research, a solver named ALE-HOBEM (Arbitrary Lagrangian Eulerian, Higher Order Boundary Element Method) is developed based on the potential-flow theory and applied to study fully nonlinear wave-body interaction problems, in which large-amplitude body motions, moving boundary, complex geometry, and nonlinear incident waves are involved.</p> <p>To develop this solver, two problems should be resolved: (i) Proper treatment on a moving boundary, which requires not only the exact position of the free surface should be tracked, but also the mesh on the free surface should be able to self-adapt to the large-amplitude motion of a body. (ii) Accurate evaluation on the instantaneous hydrodynamic force, which is related to calculation of the temporal derivative of the velocity potential. Regarding problem (i), an Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) scheme is proposed in the present research, which is regarded as an optimized combination of the mixed-Eulerian-Lagrangian (MEL) and semi-Lagrangian (SL) scheme. Regarding problem (ii), the temporal derivative of the velocity potential is directly evaluated by solving a reconstructed boundary-value problem (BVP) with much simplicity as compared to the original method. In addition, a HOBEM is used as a BVP solver.</p> <p>Three nonlinear wave-body interaction problems with increase of complexity are investigated in detail: that is, the nonlinear wave diffraction, the nonlinear wave radiation, and the interaction between nonlinear incident waves and a freely floating body. In the computation, several body geometries (from a circular cylinder to a practical ship) are used. By systematic validation, the proposed ALE-HOBEM is proven to be accurate and robust in the nonlinear wave-body interaction problems studied.</p> <p>The main conclusions obtained in this thesis are:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. By taking advantage of the ALE scheme, tracking the free-surface deformation could be successfully performed, with flared body geometries above still waterline and large-amplitude motions of a body taken into account. 2. The HOBEM used in the present study is proven to be useful for fulfilling the requirements proposed by the ALE scheme. In other words, the HOBEM fits well with the ALE scheme. 3. The mutual dependence in the fluid-structure interaction is mainly due to the hydrodynamic force proportional to the body's acceleration. By means of the proposed method, not only the mutual dependence in the fluid-structure interaction is decoupled but also the pressure distribution can be explicitly calculated. 4. It is shown in both diffraction and radiation problems that the existence of a large flare could increase the variation of wetted body surface as well as the horizontal projection area of free surface, which makes the pressure variation around this region rapid and hence increases the degree of nonlinearity. 5. In a motion response problem, when the incident-wave frequency is 1/2 or 1/3 of the natural frequency of body motion, it is shown that higher-harmonic forces would trigger the springing or ringing phenomenon and even very small higher-harmonic forces would amplify the motion response of a body because of the resonance. 	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (Zhang Jie)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教 授	柏 木 正
	副 査	教 授	梅 田 直 哉
	副 査	准教授	箕 浦 宗 彦
	副 査	准教授	牧 敦 生

論文審査の結果の要旨

波浪中での船体運動に代表される水波と浮体の相互作用に関する研究では、計算時間や計算結果に対する信頼性の観点から、今でも線形ポテンシャル流れを仮定した数値計算法を用いることが主流であるが、大振幅波浪中では、浮体に働く流体力やそれによる浮体動揺などにおけるさまざまな非線形現象が浮体の設計や安全性評価において重要となることも多い。それらの問題に対して、最近では粘性流体力を考慮したナビエ・ストークス方程式を CFD と呼ばれる数値流体力学手法で直接解くことも行われるようになってきているが、信頼できる計算結果を得るためには非常に多くの計算メッシュ数、よって膨大な計算時間を要するので、水波と浮体の非定常自由表面問題では CFD は依然として実用的とは言えない。一方、非定常ポテンシャル流れの枠内で自由表面および浮体表面での境界条件式は非線形のまま数値解を求める手法として、これまで MEL (Mixed Eulerian Lagrangian) 法や ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 法などが特に 2次元問題に対して適用・研究されてきた。しかしそれらの数値計算法には、自由表面上での計算節点の偏りによって計算が不安定になることや、浮体と自由表面の交線の動きを正確に追跡することが難しいなどの問題が残っており、特に複雑形状の 3次元浮体に対する研究例は比較的少ない。そこで、本論文では、フレアーを有する 3次元浮体に対しても計算節点の再配置をすることなく、安定でしかも精度良く計算できる新しい手法として、ALE-HOBEM (Higher Order Boundary Element Method) を提案し、その妥当性を他の手法による数値計算結果や水槽実験結果と比較することによって検証している。

本論文の第 1 章では、関連する過去の研究や計算手法のレビューならびに研究目的が示され、第 2 章および第 3 章では、解くべき支配方程式ならびに境界条件式と本論文で提案している改良型 ALE 法で必要な式変形が示されている。具体的には、自由表面上の計算節点が動く経路を水線面付近の浮体形状に合わせてあらかじめ設定するが、その影響を考慮した力学的自由表面条件式を求めている。また、浮体表面に働く流体力の計算を運動方程式と連成させながら安定して行うためには、速度ポテンシャルの時間微分 $\partial\phi/\partial t$ ($\equiv\phi_t$) を各時間ステップの瞬時値として精度良く求める必要があるが、それに関する式変形や HOBEM に関する計算手順が示されている。

第 4 章では、フレアーを有する浮体による波の diffraction 問題を取り扱っている。比較的振幅の大きい入射波に対する浮体表面上での波の run-up および流体力の時刻歴を示すとともに、浮体近傍での水面変位の計算結果を水槽実験結果と比較し、両者が良く一致することを示している。また第 5 章では、同じ計算手法を浮体の強制動揺による波の radiation 問題に適用し、 ϕ_t に関する計算法の妥当性や計算の安定性について検証するとともに、流体力のフーリエ級数展開によって大振幅動揺時における非線形流体力の相対的な重要度について論じている。さらに第 6 章では、波浪中での浮体の運動方程式と ALE-HOBEM による速度ポテンシャル ϕ および ϕ_t に関する境界積分方程式を連成させて計算した結果を示し、波岨度の増加に伴って浮体動揺における高次項が大きくなる例や、浮体の上下揺れ固有周波数

の 2 倍および 3 倍周波数の入射波によって浮体の上下揺れ振幅が大きくなる高次同調の例を示している。第 7 章では本論文のまとめを述べている。

本研究によって得られた主な研究成果を列記すると、以下のとおりである。

- (1) 大振幅波浪中でのフレアーを有する 3 次元浮体に働く時々刻々の非線形流体力ならびに浮体動揺を非定常ポテンシャル流れの枠内で厳密に且つ安定して計算するために、自由表面上の計算節点が動く経路を水線面付近の浮体表面形状とほぼ平行にあらかじめ設定する改良型 ALE 法を示した。これによって自由表面上での計算節点の再配置を行う必要がなくなり、浮体表面と自由表面の交線の追跡も精度良く行えるようになった。また高次境界要素法と改良型 ALE 法を組み合わせた ALE-HOBEM による計算手法を提案し、他の手法による計算結果や実験結果と比較することにより、提案した計算手法の優位性を示した。
- (2) 速度ポテンシャルの時間微分項 ϕ_t に対する簡易かつ厳密な計算手法を示し、浮体に働く流体力の計算と浮体運動の連成計算を安定に行うことができることを示した。
- (3) その計算手法を 3 次元浮体の diffraction 問題、radiation 問題に適用し、大振幅波浪中での浮体に働く流体力や浮体動揺に見られる非線形現象について流体力学的ならびに運動力学的に考察し、幾つかの新しい知見を得た。

以上のように、本論文は、大振幅波浪とフレアーを有する 3 次元浮体の非線形相互作用を安定かつ精度良く計算できるように、改良型 ALE 法と高次境界要素法を組み合わせた新しい計算手法を提案し、計算結果の妥当性を流体力学的ならびに運動力学的に考察したものであり、水波と浮体の相互作用に関する非線形数値計算法の実用化に寄与する研究成果であると評価される。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。