

学 位 論 文 題 名

変形海水の強度特性とその移動による
海底掘削現象に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究の対象分野が属する「氷工学」は、主として氷と構造物との干渉問題・相互作用を扱う学問分野であり、1969 年のアラスカ・ノーススロープの石油発見を契機とし、その研究需要とともに研究者数が急増し、活発に研究されることになった。近年にみる氷海域での油田・ガス田の開発はめざましく、最近ではサハリン大陸棚の石油・天然ガス開発において、1999 年夏に原油生産が開始されている。陸域、海域における巨大油田が発見し尽くされ、開発領域は急速に狭められつつある現状においては、氷海域の膨大な資源を積極的に利用していくことが望まれており、その供給源の多角化と安定性をもたらす意味でも氷海域における開発は期待されている。

本研究の研究対象は、海水の中でも喫水の大きな変形海水に関する問題（氷による海底掘削現象と氷の強度特性）を扱ったものである。その変形海水について、本研究が対象とするのは、平坦氷、氷盤の圧縮作用、せん断、座屈によって破壊した氷片が上下にパイルアップし、丘状、山脈状に盛り上がったものであり、これを一般に Hummock ice（氷丘氷）、ridge ice（氷脈氷）と呼ばれるものである。この氷の喫水は数十mにも達する大規模な氷塊であり、観測史上最大の北極海において 47m であること報告されている。Hummock と ridge では力の作用形態によってその破壊線が直線状になっているものを特に ridge と呼ばれるが、両者は工学的応用上しばしば同様な意味に用いられる場合が多く、本研究においても喫水の大きな変形海水を一意にハンモック「hummock」と呼ぶ事にしている。このハンモックの内部構造は破壊氷片が乱雑に配列され、極めて複雑で、その本質性はまだよく理解されていない。最近では、プロジェクトの大規模化にともなって、この大きな変形海水の存在が脅威となっており、後述する諸問題に有効な手法が開発されていない。述べたように、氷海域での石油天然ガス等のエネルギー開発にニーズが高まっており、これらの解決法が急務な技術的課題となっている。本研究はこれらの背景から実用性のある早急な解決手法に寄与する幾つかの研究成果を得る事を目的としたものである。

まず、ハンモックの移動にともなう海底掘削現象を扱う。これは風・流れ・コリオリ力、あるいは周りの平坦氷との相互作用も含む広義の driving force と呼ばれる原動力をもとに、喫水の大きなハンモックがより浅海域に移動する場合、海底地盤を掘削する現象であり、Ice Scour Event と呼ばれる。これによりパイプライン等埋設構造物の破損事例が報告されている。ハンモックと海底構造物の直接的な干渉問題を扱わず、むしろ干渉しないようハンモックによって削られる深さ以下に構造物を配置即ち埋設するという消極的な防御法に主眼が置かれており、ハンモックによる掘削深を推定するという問題に帰着する。逆に積極的にハンモックの来襲に立ち向かう耐氷性のコンクリートシェルなどを用いたパイプラインを保護する方法もあるが特にその延長距離が長い場合は莫大なコストを有する。このようにこの研究分野では氷と構造物の直接的な干渉を扱わず、むしろ地盤との干渉問題であるといえる。また氷が地盤に貫入する場合に、氷自身の破壊問題があるが、これは様々な理由により通常考慮されず、氷を剛体として扱う場合が一般的である。このように氷と構造物の干渉問題を扱わず、氷の特性も考慮しないといふコンセプトから、従来の氷工学としての研究分野にしては特殊な研究対象

分野であるといえる。またこの分野は近年までその知識を必要とするプロジェクトが少なく、研究者数、研究量としても他の分野よりも少なく、「氷工学」の中でも比較的新しい研究分野である。

本研究では、様々な条件下（砂の種類、海底勾配、氷の全面形状、氷の移動速度）における小規模実験、中規模模型実験を通じて氷の貫入によって発生する掘削プロセスを理解し、その掘削深の実現に支配的な基礎パラメータの抽出とその特性について検討した。掘削深、氷の挙動（運動軌跡）である Scour curve は、主に氷の全面形状、移動速度によって大きく変化し、地盤内間隙水圧の発生機構に大きく依存することを示した。また中規模実験を実施し、小規模実験における力学相似性について検討し、掘削力はフルードの相似側が成り立つ事を示した。また Scour curve を導入した氷の運動方程式に基づく Scour Event に関する数学モデルを構築し、小規模・中規模実験を通じ間接的にその妥当性を示した。以上は Scour Event に関するメカニズムの理解であるが、次に掘削深推定システムの構築を試みた。まず実験によって抽出された基礎パラメータを掘削深推定システムのサブプログラムとなるニューラルネットワークへ適用し、パターン学習させることにより、任意の条件が入力されたときの応答値を推定するツールとして導入した。それにすでに妥当性が示された Event の力学モデルをメインプログラムとし、氷の停止位置を推定した。これには周囲の氷の相互干渉を含む driving force を含んでいる。さらに氷の喫水深、海底勾配など環境パラメータの確率分布を考慮して掘削深について試験的にモンテカルロシミュレーションを実施した。またその結果は実海域における Scour Event の観測結果における掘削深、Scour length（氷が地盤に接触して停止するまでの距離）のオーダーとその確率分布、それに Event の発生率、条件（水深）による大局的な傾向特性について遜色ない結果が得られ、その妥当性が示された。提案した掘削深推定システムはさらに改良する余地は残されているが、現段階でも、実用的な一つの埋設構造物等の設計支援ツールとしてその適用可能性を示した。本研究結果は主にハンモック等、変形海氷の Scour Event を取り扱ったものであるが、Iceberg による Scouring への応用は可能である。

本研究のもうひとつの研究対象としては、ハンモックの強度特性に関するものである。従来から平坦氷に関する強度特性と、構造物の干渉・相互作用は活発に行われてきており、これまで十分な研究成果が得られている。一方、ハンモックについては、その大きさ、外形構造、発生率・発生プロセス等は現地観測を含めた諸研究が豊富に行われてきているが、工学的応用上、具体的な構造物との干渉問題、内部構造・物理特性、強度特性といった十分な研究成果はほとんど得られていない。これは極めて複雑で不確実性あるハンモックの内部構造と変化に富んだ外形・寸法が背景にあるものと思われ、事実極めて扱いの困難な物体である。本研究はハンモックと構造物の干渉問題のうち、構造物に作用する氷荷重の推定にとって重要な要素となるハンモックの強度について検討した。

本研究は、まず固結層の中でも比較的高い強度を有していると思われる水面付近である「0 porosity」の強度特性を検討するため系統的な室内実験を行った。これはまず、ハンモックを単純化し、破壊氷片を模擬した ice block を ice tank に投入して再凍結させた氷の母体の 1 軸圧縮試験を実施した。そこで、ice block の大きさ、供試体の寸法を様々変化させ、供試体寸法と block の比、寸法効果、さらに供試体採取位置、方向性といった強度の依存性を明らかにし、氷荷重推定の重要なパラメータである 1 軸圧縮強度の実用的な取り扱いに関する提言した。それによれば、ハンモック強度とレベルアイス強度は全く同一視すべきという単純明快な提案であり、いわば「現場の不確実性をも考慮するなら、ハンモック強度の特性を細かく議論するより、むしろ安全上、大き目の Level ice の強度と同一視すべき事が賢明である」という提案であった。これは主として強度の漸近値（供試体寸法が大きい場合の強度）はレベルアイスとほぼ同等であるという実験結果そのものと極値統計論にもとづく解析結果による根拠から発生している。またそれは実規模に適用できるような試験方法、寸法効果といった、これまで最大の難点であった「構成している破壊氷片に対して供試体の寸法が小さい場合どうすればいいのか？」といった場合の解決をおのずと含んでいる。これはまた従来ではしかるべき根拠がなかった「ハンモックの固結層部の強度は Level ice と同一視する」という他の研究者による意見があり、本実験・解析もその概念を支持する一つの重要な根拠を与えるものである。また同時にハンモック強度のみにとどまらず、各種統計手法、知的情報処理技術を導入した氷強度に関するデータ分析、定量評価についての方法論アプローチを行い、その有効性を示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 教 授 長谷川 和 義
副 査 教 授 三 浦 清 一

学 位 論 文 題 名

変形海水の強度特性とその移動による

海底掘削現象に関する研究

著者は、喫水の大きな変形海水に関する問題（氷による海底掘削現象と氷の強度特性）を扱ったものである。その変形海水について、著者が対象とするのは、平坦氷、氷盤の圧縮作用、せん断、座屈によって破壊した氷片が上下にバイルアップし、丘状、山脈状に盛り上がったものであり、これを一般に Hummock ice（氷丘氷）、ridge ice（氷脈氷）と呼ばれるものである。この氷の喫水は数十mにも達する大規模な氷塊であり、観測史上の最大は北極海において 47m であることが報告されている。Hummock と ridge では力の作用形態によってその破壊線が直線状になっているものを特に ridge と呼ばれるが、両者は工学的応用上しばしば同様な意味に用いられる場合が多く、本研究においても喫水の大きな変形海水を一意にハンモック「hummock」と呼ぶ事にしている。このハンモックの内部構造は破壊氷片が乱雑に配列され、極めて複雑で、その本質性はまだよく理解されていない。最近では、プロジェクトの大規模化にともなって、この大きな変形海水の存在が脅威となっており、後述する諸問題に有効な手法が開発されていない現状にある。しかし氷海域での石油天然ガス等のエネルギー開発のニーズが高まっており、これらの解決法が急務な技術的課題となっている。本研究はこれらの背景から実用性のある早急な解決手法に寄与する幾つかの研究成果を得る事を目的としたものである。

まず、ハンモックの移動にともなう海底掘削現象については、風・流れ・コリオリ力、あるいは周りの平坦氷との相互作用も含む広義の driving force と呼ばれる原動力をもとに、喫水の大きなハンモックがより浅海域に移動する場合、海底地盤を掘削する現象であり、Ice Scour Event と呼ばれる。これによりパイプライン等埋設構造物の破損事例が報告されている。ハンモックと海底構造物の直接的な干渉問題を扱わず、むしろ干渉しないようハンモックによって削られる深さ以下に構造物を配置、埋設するという消極的な防御法に主眼が置かれており、ハンモックによる掘削深を推定するという問題に帰着する。このようにこの研究分野では氷と構造物の直接的な干渉を扱わず、むしろ地盤との干渉問題であるといえる。また氷が地盤に貫入する場合に、氷自身の破壊問題があるが、これは様々な理由により通常考慮されず、氷を剛体として扱う場合が一般的である。このように氷と構造物の干渉問題を扱わず、氷の特性も考慮しないというコンセプトから、従来の氷工学としての研究分野にしては特殊な研究対象分野であるといえる。

本研究では、様々な条件下（砂の種類、海底勾配、氷の全面形状、氷の移動速度）におけ

る小規模実験、中規模模型実験を通じて氷の貫入によって発生する掘削プロセスを理解し、その掘削深の実現に支配的な基礎パラメータの抽出とその特性について検討した。掘削深、氷の挙動（運動軌跡）である Scour curve は、主に氷の全面形状、移動速度によって大きく変化し、地盤内間隙水圧の発生機構に大きく依存することを示した。また中規模実験を実施し、小規模実験における力学相似性について検討し、掘削力はフルードの相似側が成り立つ事を示した。また Scour curve を導入した氷の運動方程式に基づく Scour Event に関する数学モデルを構築し、小規模・中規模実験を通じ間接的にその妥当性を示した。以上は Scour Event に関するメカニズムの理解であるが、次に掘削深推定システムの構築を試みた。まず実験によって抽出された基礎パラメータを掘削深推定システムのサブプログラムとなるニューラルネットワークへ適用し、パターン学習させることにより、任意の条件が入力されたときの応答値を推定するツールとして導入した。それにすでに妥当性が示された Event の力学モデルをメインプログラムとし、氷の停止位置を推定した。これには周囲の氷の相互干渉を含む driving force を含んでいる。さらに氷の喫水深、海底勾配など環境パラメータの確率分布を考慮して掘削深について試験的にモンテカルロシミュレーションを実施した。またその結果は実海域における Scour Event の観測結果における掘削深、Scour length（氷が地盤に接触して停止するまでの距離）のオーダーとその確率分布、それに Event の発生率、条件（水深）による大局的な傾向特性について遜色ない結果が得られ、その妥当性が示され、実用的な一つの埋設構造物等の設計支援ツールとしてその適用可能性を示した。本研究結果は主にハンモック等、変形海水の Scour Event を取り扱ったものであるが、Iceberg による Scouring への応用も可能である。

本研究のもうひとつの研究対象としては、ハンモックの強度特性に関するものである。従来から平坦氷に関する強度特性と、構造物の干渉・相互作用は活発に行われてきており、これまで十分な研究成果が得られている。一方、ハンモックについては、その大きさ、外形構造、発生率・発生プロセス等は現地観測を含めた諸研究が豊富に行われてきているが、工学的応用上、具体的な構造物との干渉問題、内部構造・物理特性、強度特性といった十分な研究成果はほとんど得られていない。これは極めて複雑で不確実性あるハンモックの内部構造と変化に富んだ外形・寸法が背景にあるものと思われ、事実極めて扱いの困難な物体である。本研究はハンモックと構造物の干渉問題のうち、構造物に作用する氷荷重の推定にとって重要な要素となるハンモックの強度について検討した。

本研究では、まず固結層の中でも比較的高い強度を有していると思われる水面付近での強度特性を検討するため系統的な室内実験を行った。ここでは、ハンモックを単純化し、破壊氷片を模擬した ice block を ice tank に投入して再凍結させた氷の母体の 1 軸圧縮試験を実施した。そこで、ice block の大きさ、供試体の寸法を様々変化させ、供試体寸法と block の比、寸法効果、さらに供試体採取位置、方向性といった強度の依存性を明らかにし、氷荷重推定の重要なパラメータである 1 軸圧縮強度の実用的な取り扱いに関する提言をした。これは主として強度の漸近値（供試体寸法が大きい場合の強度）はレベルアイスとほぼ同等であるという実験結果そのものと極値統計論にもとづく解析結果による根拠から発生している。また同時にハンモック強度のみにとどまらず、各種統計手法、知的情報処理技術を導入した氷強度に関するデータ分析、定量評価についての方法論アプローチを行い、その有効性を示した。

これを要するに、本研究は、変形海水の強度特性と変形海水と海底との相互作用のメカニズムさらに海底埋設施設設計の基本的考え方を明らかにしたもので、氷工学・寒冷地海洋工学に寄与するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。