

学 位 論 文 題 名

LNG タンク底面・側壁同時加熱時の
タンク内伝熱流動に関する研究

学位論文内容の要旨

液化天然ガス(Liquefied Natural Gas, LNG)の主成分は、メタン、エタン、プロパン、ブタン、などであり、その成分割合は産地・ガス田によって異なるが、通常その組成の 90% 以上を CH_4 が占めているので、LNG の各種混合物性は CH_4 の単体物性に近く、その沸点も約 -160°C となっている。LNG 地下埋設型貯蔵タンク内部では、このように LNG が周囲環境に比べてきわめて低温なため、側面と底面では地中からの熱が伝達され、また上部液面では蒸発潜熱により熱が奪われているので、自然対流が生じている。このとき発生する気化流出ガス (Boil Off Gas, BOG) はほぼ大気圧であるため、都市ガスや発電燃料としてこれを消費するには圧縮して昇圧する必要がある、そのための設備費と動力費がかかる。ここで、通常の都市ガス供給は、LNG を液体のまま昇圧し、これを海水で加熱気化させて行っており、気体の昇圧に比べると圧縮機動力が大幅に小さい。このような理由から、LNG タンク内伝熱挙動を求め、BOG 発生量を確度高く求めるための予測技術の要請があるが、LNG タンクの Ra 数が約 10^{14} と非常に大きいため、この値に近い高 Ra 数の実験が行われていないのが現状である。また、LNG タンク内では、上述のように、底面・側壁加熱、上面冷却の自然対流層であるが、このような系における伝熱挙動もこれまで定式化されていなかった。

現在、BOG の発生量予測は、ハセミ式と呼ばれる実験式により計算されている。ハセミ式とは、底面で加熱され上面が冷却されている準定常状態にある LNG 貯槽・容器の熱移動特性式を利用して蒸発量を求める式であり、加熱される底面からの自然対流による流体層上面への熱伝達を考慮しているが、加熱される側壁からの伝熱が陽に入っていない式となっている。しかし、実際の LNG タンクは側壁からも熱が伝達されており、底面と側壁から同時に熱が伝達される系をモデル化し、各壁面及び上部液面とバルクの液層との間の熱伝達を求め、これらの定式化を行う必要がある。

本研究では電気化学的手法を用いることにより、比較的实验しやすい大きさと高 Ra 数を実現した。この実験において、側壁と底面が同時加熱された系を模擬した物質伝達系で、各壁面での物質伝達率を測定し、熱伝達と物質伝達のアナログを通じて熱伝達率を求めた。また、全体の対流パターンをシュリーレン法で可視化し、流動と物質伝達率の関係を考察した。

本論文は 5 章より構成されている。

第 1 章は序論であり、LNG タンク底面・側壁同時加熱時のタンク内伝熱流動モデル実験

の背景、これまでの BOG 発生量予測手法、本研究に関する従来の自然対流に関する研究、および、本研究の概要・目的に関して述べている。

第 2 章は本実験の理論的背景について述べており、熱伝達系を電気化学的手法により物質伝達系にモデル化する手法に関して述べている。特に、電気化学的手法における Ra 数の定義と、 Sh 数の測定方法に関して limiting current について述べている。

第 3 章は水平層自然対流実験（底面加熱，側壁断熱，液面冷却の境界条件）について述べており、物質伝達実験手法と系内の自然対流流動状態の可視化手法の確立，実機タンクと本実験系における上部液面での境界条件の違いに関する考察について述べている。ここでは水平層自然対流実験を行い，従来の熱・物質伝達実験の結果と比較を行った。本実験 ($10^{11} \leq Ra \leq 10^{13}$) で得られた結果は，これまで行われた実験 ($10^4 \leq Ra \leq 10^{11}$) 結果の延長上にあり，高 Ra 数域で良好な結果を示していると言える。また，本結果は，同様の電気化学的手法を用いた Goldstein らの結果ともよく一致していたので，本研究における実験手法・装置の妥当性が示された。

第 4 章では，LNG タンクモデル実験（底面・側壁同時加熱，液面冷却の境界条件）を 2 種類の実験系（直方体の系，円筒型の系）で行い，底面の物質伝達率に及ぼす側壁の影響を調べた。その結果，底面の単独加熱を模擬した系での底面の物質伝達率に比べ，底面と側壁の同時加熱を模擬した系での底面の物質伝達率が低下することがわかった。側壁の物質伝達率は，側壁の単独加熱を模擬した場合と，底面と側壁の同時加熱を模擬した場合でほぼ同じ値になった。また，側壁の物質伝達率が高 Ra 数域にもかかわらず層流域と同形となったのは，系内の対流のために，側壁付近で流れが層流化しているためであると考えた。直方体の実験系では，物質伝達実験と同時に可視化を行い，底面の局所 Sh 数分布と比較し，弱い下降流の部分で局所 Sh 数が低下していることがわかった。また，実機タンクと同じ円筒型の実験系での底面の平均 Sh 数は，直方体の実験系での底面の平均 Sh 数より小さいことがわかった。

第 5 章は本研究で得た結果を要約した，本論文の結言である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 藤 田 修

学 位 論 文 題 名

LNG タンク底面・側壁同時加熱時の タンク内伝熱流動に関する研究

沸点が約 - 160℃の液化天然ガス(Liquefied Natural Gas、LNG)地下埋設型貯蔵タンク内部では、LNG が周囲環境に比べてきわめて低温なため、側面と底面では地中からの熱が伝達され、また上部液面では蒸発潜熱により熱が奪われているので、自然対流が生じている。このとき発生する気化流出ガス (Boil Off Gas、BOG) の量の把握は、これの再圧縮動力およびタンク内の圧力制御上重要な問題であるが、LNG タンクのサイズが非常に大きいため、 Ra (レイリ数) 数が約 10^{14} と非常に大きくなり、このような高 Ra 数の実験が行われていないのが現状である。また、LNG タンク内では、上述のように底面・側壁加熱、上面冷却の自然対流層となっているが、このような系における伝熱挙動もこれまで定式化されていなかった。

現在、BOG の発生量予測は、ハセミ式と呼ばれる実験式により計算されている。ハセミ式とは、底面で加熱され上面が冷却されている準定常状態にある LNG 貯槽・容器の熱移動特性式を利用して蒸発量を求める式であり、加熱される底面からの自然対流による流体層上面への熱伝達を考慮しているが、加熱される側壁からの伝熱が陽に入っていない式となっている。しかし、実際の LNG タンクは側壁からも熱が伝達されており、底面と側壁から同時に熱が伝達される系をモデル化し、各壁面及び上部液面とバルクの液層との間の熱伝達を求め、これらの定式化を行う必要があった

本研究では高 Ra 数の実験が可能となる電気化学的手法を用いることにより、比較的实验しやすい大きさで高 Ra 数を実現している。この実験において、側壁と底面が同時加熱された系を模擬した物質伝達系で、各壁面での物質伝達率を測定し、熱伝達と物質伝達のアナログを通じて熱伝達率を求めている。また、全体の対流パターンをシュリーレン法で可視化し、流動と物質伝達率の関係を考察している。

本論文は5章より構成されている。

第1章は序論であり、LNG タンク底面・側壁同時加熱時のタンク内伝熱流動モデル実験の背景、これまでの BOG 発生量予測手法、本研究に関する従来の自然対流に関する研究、

および、本研究の概要・目的に関して述べている。

第2章は本実験の理論的背景について述べており、熱伝達系を電気化学的手法により物質伝達系にモデル化する手法に関して述べている。特に、電気化学的手法における Ra 数の定義と、 Sh 数の測定方法に関して limiting current について述べている。

第3章は水平層自然対流実験（底面加熱、側壁断熱、液面冷却の境界条件）について述べており、物質伝達実験手法と系内の自然対流流動状態の可視化手法の確立、実機タンクと本実験系における上部液面での境界条件の違いに関する考察について述べている。ここでは水平層自然対流実験を行い、従来の熱・物質伝達実験の結果と比較を行った。本実験 ($10^{11} \leq Ra \leq 10^{13}$) で得られた結果は、これまで行われた伝熱実験 ($10^4 \leq Ra \leq 10^{11}$) 結果の延長上にあり、高 Ra 数域で良好な結果を示していると言える。また、本結果は、同様の電気化学的手法を用いた Goldstein らの結果ともよく一致しており、本研究における実験手法・装置の妥当性が示された。

第4章では、LNG タンクモデル実験（底面・側壁同時加熱、液面冷却の境界条件）を2種類の実験系（直方体の系、円筒型の系）で行い、底面の物質伝達率に及ぼす側壁の影響を調べた。その結果、底面の単独加熱を模擬した系での底面の物質伝達率に比べ、底面と側壁の同時加熱を模擬した系での底面の物質伝達率が低下することがわかった。側壁の物質伝達率は、側壁の単独加熱を模擬した場合と、底面と側壁の同時加熱を模擬した場合でほぼ同じ値になった。また、側壁の物質伝達率が高 Ra 数域にもかかわらず層流域と同形となったのは、系内の対流のために、側壁付近で流れが層流化しているためであると考えた。直方体の実験系では、物質伝達実験と同時に可視化を行い、底面の局所 Sh 数分布と比較し、弱い下降流の部分で局所 Sh 数が低下していることがわかった。また、実機タンクと同じ円筒型の実験系での底面の平均 Sh 数は、直方体の実験系での底面の平均 Sh 数より小さいことが述べられている。

第5章は本研究で得た結果を要約している。

これを要するに著者は、LNG タンク内での壁面から LNG への伝熱のような、巨大系での自然対流伝熱、特に側壁と底面から同時に加熱され、液面が冷却されているような複雑な系を対象として、電気化学的手法を用いて内部の伝熱・流動を定式化しており、熱工学上有益な多くの新知見を得たものであり、熱工学の進歩に貢献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。