

氏名	TRAN DANG AN		
学位の種類	博 士（環境学）		
学位記番号	博 甲 第 9 5 0 0 号		
学位授与年月日	令和2年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	Groundwater Flow Dynamics and Hydro-geochemical Processes in Coastal Aquifers of the Mekong Delta, Vietnam (ベトナム・メコンデルタの沿岸帯水層における地下水流動系と水文地球化学プロセス)		
主査	筑波大学教授	博士（理学）	辻村 真貴
副査	筑波大学教授	博士（農学）	野村 暢彦
副査	筑波大学教授	Ph.D.	浅沼 順
副査	筑波大学准教授	博士（理学）	山中 勤

## 論 文 の 要 旨

本論文は、ベトナム南部のメコンデルタ地域を対象とし、地下水流動、水質形プロセスを明らかにするとともに、地下水利用量と地下水位低下との関係に関し、将来予測を行ったものである。沿岸域における貴重な淡水資源である地下水は、飲用水、生活用水、工業用水、農業用水等に必要不可欠であるとともに、過剰揚水、気候変動、海面上昇等に対しきわめて脆弱である。そして本論文の対象地であるメコンデルタ地域は、こうした諸問題がまさに今進行しており、現状の科学的な把握と問題解決の方向性の提示は喫緊の課題である。こうした問題を解決するためには、フィールド調査に基づく現状の正確な把握と、モデル化、将来予測を行う必要がある。そのため著者は、2017年および2018年に、メコンデルタにおいて地下水278箇所、河川水・水路水79箇所の採取・測定を行うとともに、これら試料の無機溶存成分濃度、水素・酸素安定同位体比、6フッ化硫黄濃度等の分析を行った。さらに著者は、実測データに基づき、地下水流動および地下水塩素イオン濃度を再現する数値モデルを構築し、複数の地下水利用シナリオに基づく地下水流動および塩素イオン濃度の将来予測を行った。

著者は、当該地域における地下水面が、とくにメコンデルタ中心部の都市・工業地域近傍において顕著に低下しており、この特徴がとくに、乾期において顕著であることを示した。また、平行して、地下水の無機溶存成分が深度等により、ナトリウム－塩素イオン型、ナトリウム－マグネシウム－カルシウム－重炭酸イオン型、ナトリウム－重炭酸イオン型等により特徴付けられることを示した。

さらに著者は、とくに都市域近傍の地下水面低下地域においては、帯水層間に存在する不透水層が不連続あるいは顕著に薄いこと、不圧地下水から被圧地下水への、あるいは、より深層の被圧地下水への地下水移

行が生じており、そのため、地下水の水質特性が浅層から深層に変化するとともに、若干の類似性もみられるものと解析している。

その上で、メコンデルタの地下水における海水の影響を定量的に評価する目的で著者は、**End Member Mixing Analysis** を適用し、塩素イオンおよび安定同位体組成をトレーサーに用い、地下水涵養における降水、蒸発の影響を受けた地表水、海水の役割を算定した。その結果、地下水涵養に果たす降水の影響は、不圧地下水、被圧地下水のいずれも 50%を超えて卓越していた。また、蒸発の影響を受けた地表水が涵養に果たす役割は、不圧地下水において 40%程度、被圧地下水において 15%であるものの、深層の被圧地下水においても、一定程度の役割を果たしており、この結果は、前述の帯水層間における地下水移行の存在と整合的である。さらに、海水の影響は、不圧地下水において 15%、被圧地下水において 5%である。海水、すなわち高塩素イオン濃度の水については、現在の海水の直接・間接的影響と、帯水層・不透水層中に存在する古海水の影響が考えられるが、本論文においては、明確に区別することはできなかった。

以上の観測、解析結果に基づき著者は、地下水流動プロセスを再現する数値モデルを構築した。本モデルは、地下水揚水を考慮した非定常計算を行うものである。現在の都市域近傍における地下水面の低下が、当モデルにより良好に再現されたことが確認された上で、著者は現行の地下水揚水量を 1 年あたり 1%増加、5%増加、1%減少、5%減少させる 4 つのシナリオを構築し、2030 年における地下水面の形状を予測した。その結果、1 年あたり 5%揚水を増加させることにより、2030 年における地下水面低下が現在のおよそ 2 倍になること、また、揚水を 1 年あたり現行の 5%減少させることにより、2030 年に地下水面の低下がほぼ解消することを示した。

## 審 査 の 要 旨

本論文は、ベトナム南部のメコンデルタ地域を対象とし、地下水流動、水質形プロセスを明らかにするとともに、地下水利用量と地下水面低下との関係に関し、将来予測を行ったものである。沿岸域の地下水過剰揚水に伴う地下水面低下および塩水侵入に関しては、従来研究事例があるが、地下水の涵養源、帯水層間の地下水移行プロセスを明らかにした例は少ない。本論文では、雨期および乾期において延べ 350 箇所以上の地下水、河川水、灌漑用水、海水等を採取し、その水素・酸素安定同位体比、無機溶存成分濃度、六フッ化硫黄濃度分析を行い、地下水流動系、起源、滞留時間等の空間分布を明らかにした。

その結果、地下水の水頭低下域において、顕著に塩素イオン濃度が高く、酸素安定同位体比も高い傾向が認められた。また、浅層地下水および深層地下水の両方において、塩素イオン濃度が相対的に高いものに、蒸発の影響によるものと海水との混合による特徴を示すものが示された。地下水の過剰揚水に伴い、表層付近において蒸発の影響を受けた地表水が浅層地下水を涵養し、さらにそれらが深層の帯水層に移行した場合と、堆積物中に存在する古海水による影響を考慮し評価を行っている。さらに、数値計算により揚水量と地下水位の関係を予測したところ、現行揚水量を年 5%抑制することにより、約 10 年後に地下水位の低下が回復する可能性のあることを示している。本論文は、地下水揚水にともなう地下水面低下において、帯水層間の地下水移行が果たす役割を、地球化学的データからも明らかにした点、さらに、実態解明のみならず、数値解析による将来予測を行い、一つの問題解決策を示している点において、学術的かつ社会的観点から、博士（環境学）に相応しい学位論文であると評価される。

令和 2 年 1 月 23 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査および最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士（環境学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。