

学 位 論 文 題 名

Study on the Formation and Classification of the Open System Pingos

(開放系ピングの形成と分類に関する研究)

学位論文内容の要旨

本研究は、開放系ピングの主要な分布地域であるスバルバルからアラスカの地域について、空中写真判読と現地調査によってまず開放系ピングのインベントリを行い、またその内部構造の詳しい調査とピング氷の結晶や同位体分析を基に、開放系ピングの特徴と成長プロセスを論じたものである。開放系ピングは閉鎖系ピングに比べて、その形成メカニズムがわかっていない。それは、開放系ピングの内部構造や地下水の定期的継続的観測が行われなかったためである。そこで本研究では、まず、内部構造を明らかにするために、6つのピングを選別し、とくにそのうちの一つは大規模な掘削により11mの露頭を作りそこからさらに5.2mの氷のトンネルをピングの中心まで掘って測定とサンプリングを行った。さらに開放系ピングの成長に主要な地下水環境を含め、5つのピングについて2年から4年間定期的に地形変化、水質調査、流量観測などを行い、ピングとピングを取り巻く内的特徴と構造を把握した。

本論文は6章から成っている。第1章では、ピングの定義と研究史を中心としたIntroductionからなり、本論文の目的と意義もここでふれた。第2章では、Field Observationsとして、研究方法と研究地域の説明とピングの記載を納めた。調査地域はスバルバルからアラスカであるが、現地調査を行ったピングはそのうち典型的のものを選び、スバルバルで6つ、西グリーンランドで4つ、アラスカからカナダのユーコン準州で3つのピングについて行った。それらの研究地域でピングのマッピング、データロガーによる長期無人観測、地形変化、冬期積雪及びアイスマウンド観察を行った。今まで開放系ピングの研究で欠如していたのがこのような長期観測であり、本研究では最大4年間にわたりそれぞれのピングで観測を続けた。また、現地でのサンプリングと実験室での分析は、花粉分析、粒度分析、炭素同位体による年代測定など多岐にわたった。第3章では、開放系ピングの内部構造と地下水環境の把握を行った。いままでは開放系ピングの氷を大規模に掘削された例は皆無であり、従ってピング氷の物理的・化学的特徴は分からなかった。6つのピングについて氷の構造を分析したが、そのうちの一つは大規模な掘削により11mの露頭を作り、そこからさらに5.2mの氷のトンネルをピングの中心まで掘り、氷の測定とサンプリングを行った。それらの氷は日本に持ち帰り、気泡圧やC軸の測定を行った。またトリチウムと酸素同位体測定も行い、それらの結果は、それぞれの研究項目ごとにこの章でふれた。地下水環境では5つのピングを2年から4年間定期的に水質調査、流量観測などを行い、ピングとピングを取り巻く内的特徴と構造を把握した。第4章では、作成したInventoryをもとにピング分布を分類しグループに分けた。そして、第5章で特にアラスカで見られる斜面型とスバルバルからグリーンランドに見られる離水型のピングについて詳しくそれらの成長プロセスを

研究し、モデル化した。モデル化にあたっては、スバルバルと西グリーンランドの離水型ピングの発達過程を海底の地温から離水に伴って永久凍土がどのように発達するかを加味して論じた。最後に第6章で、それらすべての結果を総括し、開放系ピングの成長プロセスと分布の特徴をまとめた。

本研究から導き出された主な結論は以下の通りである。1、開放系ピングは、連続的永久凍土地域の南限部に多く分布しているが、アラスカ、西カナダの内陸部では、不連続永久凍土地域に分布している。アラスカ、西カナダの内陸部では、不連続永久凍土地域に分布している。アラスカ内陸部などに見られる開放系ピングには、基盤上にある風化層や堆積物の厚さよりも永久凍土の厚さが薄くなくては、透水層ができない。このため永久凍土が極端に薄くまた斜面上部が函容域となりうる程度に永久凍土の発達が疎外されなくてはならない。その結果この地域の積算暖度の値が他のピング地域に比べ2倍から3倍高い特徴があった。2、開放系ピングは、永久凍土下のタリク（未凍結層）から一定の水が継続的に供給され、下からつけ加わることで氷が発達する。ピングを持ち上げる力は、地下水圧ではなく、凍上によるところが大きい。また、発達初期に大きく成長する。3、ピングの発達プロセスについては、従来言われていた断層上や氷河末端、斜面下部に分布する3つのタイプのうち、アラスカで多く見られる斜面型について初めて詳しい現地調査を行い、理論的に提唱されていたモデルが正しいことをはじめて実証した。また、これまで全く知られていなかったピングのタイプとして、新たに後氷期の離水に伴って発達したピングがスバルバルやグリーンランド西部に分布していることを明らかにできた。4、離水地域に発達する開放系ピングは、開放系ピングの成長に必要な(1)被圧状態、(2)みず道、(3)冷却効果の条件が、離水直後からの永久凍土の発達にともなって整うことにより発生する。ピングの成長は、これら3つの条件のバランスに関わっている。離水にともなう開放系ピングの形成は、スバルバルと西グリーンランドでの研究結果から、完新世の約7000-6000年前に始まり、成長期間はせいぜい2000-4000年ぐらいであったことが明らかにできた。

本研究で開放系ピングのシベリアとチベットを除くすべての範囲のピングのinventoryができたことは、今後のピング研究が前進するだけでなく、北方圏における人類の諸活動の上でも建造物を破壊から防止できるであろう。また、さらに、発生のバランスを数量的に解明し、閉鎖系ピングメカニズムと対比することにより、地球上または火星上の永久凍土の発達史と形成環境の推定ができると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 野 有 五

副 査 教 授 平 川 一 臣 (大学院地球環境科学研究科)

副 査 助 教 授 福 田 正 己 (大学院地球環境科学研究科)

副 査 助 教 授 渡 邊 悌 二 (大学院地球環境科学研究科)

学 位 論 文 題 名

Study on the Formation and Classification of the Open System Pingos

(開放系ピングゴの形成と分類に関する研究)

本研究は、開放系ピングゴの主要な分布地域であるスバルバールからアラスカの地域について、空中写真判読と現地調査によってまず開放系ピングゴのインベントリーを行い、またその内部構造の詳しい調査とピングゴ氷の結晶や同位体分析をもとに、開放系ピングゴの特徴と成長プロセスを論じたものである。開放系ピングゴは閉鎖系ピングゴに比べて、その形成メカニズムがわかっていない。それは、開放系ピングゴの内部構造や地下水の定期的継続的観測が行われなかったためである。そこで本研究では、まず、内部構造を明らかにするために、6つのピングゴを選別し、とくにそのうちの一つは大規模な掘削により11mの露頭を作りそこからさらに5.2mの氷のトンネルをピングゴの中心まで掘って測定とサンプリングを行った。さらに開放系ピングゴの成長に主要な地下水環境を含め、5つのピングゴについて2年から4年間定期的に地形変化、水質調査、流量観測などを行い、ピングゴとピングゴを取り巻く内的特徴と構造を把握した。

本論文は6章から成っている。第1章では、ピングゴの定義と研究史を中心としたIntroductionからなり、本論文の目的と意義もここでふれた。第2章では、Field Observationsとして、研究方法と研究地域を説明するとともに、ピングゴの記載を行った。調査地域はスバルバールからアラスカにわたり地球上の主要な開放系ピングゴの大部分をカバーしている。現地調査を行ったピングゴはそのなかの典型的なものであり、スバルバールで6つ、西グリーンランドで4つ、アラスカからカナダのユーコン準州で3つである。それらのピングゴについて、マッピング、データーロガーによる長期無人観測、地形変化、冬期積雪及びアイスマウンドの観察を行った。今まで開放系ピングゴの研究で最も欠如していたのがこのような長期観測である。本研究では最大4年間にわたりそれぞれのピングゴで観測を続けピングゴの経年的変化を明らかにした。これは本研究の大きな貢献の一つである。また、現地でのサンプリングと実験室での分析は、花粉分析、粒度分析、炭素同位体による年代測定など多岐にわたった。第3章は、開放系ピングゴの内部構造と地下水環境の解析にあてられている。今まで開放系ピングゴの氷を大規模に掘削した例は皆無であり、従ってピングゴ氷の物理的・化学的特徴は分からなかった。本研究では6つのピングゴについて氷の構造を分析したが、そのうちの一つは掘削により11mの露頭を作り、そこからさらに5.2mの氷のトンネルをピングゴの中央まで掘り、氷の測定とサンプリン

グを行うという大規模なものであった。それらの氷は日本に持ち帰り、気泡圧やC軸の測定を行った。またトリチウムと酸素同位体測定も行い、それらの結果は、それぞれの研究項目ごとにこの章でふれた。地下水環境では5つのピンゴを2年から4年間定期的に水質調査、流量観測などを行い、ピンゴとピンゴを取り巻く内的特徴と構造を把握した。第4章では、作成したInventoryをもとにピンゴ分布を分類し、グループに分けた。

第5章ではとくにアラスカで見られる斜面型とスパールパールからグリーンランドに見られる離水型のピンゴについて詳しくそれらの成長プロセスを研究し、モデル化した。モデル化にあたっては、スパールパールと西グリーンランドの離水型ピンゴの発達過程を海底の地温から離水に伴って永久凍土がどのように発達するかを加味して論じた。最後に第6章で、それらすべての結果を総括し、開放系ピンゴの成長プロセスと分布の特徴をまとめた。

本研究から導き出された主な結論は以下の通りである。(1) 開放系ピンゴは、連続的永久凍土地域の南限部に多く分布しているが、アラスカ、西カナダの内陸部では、不連続永久凍土地域に分布している。アラスカ、西カナダの内陸部では、不連続永久凍土地域に分布している。アラスカ内陸部などに見られる開放系ピンゴには、基盤上にある風化層や堆積物の厚さよりも永久凍土の厚さが薄くなくては、透水層ができない。このため永久凍土が極端に薄くまた斜面上部が涵養域となりうる程度に永久凍土の発達が疎外されなくてはならない。その結果この地域の積算暖度の値が他のピンゴ地域に比べ2倍から3倍高い特徴があった。

(2) 開放系ピンゴは、永久凍土下のタリク（未凍結層）から一定の水が継続的に供給され、下からつけ加わることで水が発達する。ピンゴを持ち上げる力は、地下水圧ではなく、凍上によるところが大きい。また、発達初期に大きく成長する。(3) ピンゴの発達プロセスについては、従来言われていた断層上や氷河末端、斜面下部に分布する3つのタイプのうち、アラスカで多く見られる斜面型について初めて詳しい現地調査を行い、理論的に提唱されていたモデルが正しいことをはじめて実証した。また、これまで全く知られていなかったピンゴのタイプとして、新たに後氷期の離水に伴って発達したピンゴがスパールパールやグリーンランド西部に分布していることを明らかにできた。(4) 離水地域に発達する開放系ピンゴは、開放系ピンゴの成長に必要な被圧状態、みず道、冷却効果の3つの条件が、離水直後からの永久凍土の発達に伴って整うことにより発生する。ピンゴの成長は、これら3つの条件のバランスに関わっている。離水に伴う開放系ピンゴの形成は、スパールパールと西グリーンランドでの研究成果から、完新世の約7000-6000年前に始まり、成長期間はせいぜい2000-4000年ぐらいであったことが明らかにできた。

本研究は、シベリアとチベットを除く地球上のすべての範囲で、初めて開放系ピンゴのInventoryをまとめただけでなく、開放系ピンゴの成長プロセスについて、内部構造を長期間にわたる地下水環境の研究から明らかにしたもので、周氷河地形学の分野では画期的な貢献といえる。とくにこれまで明らかにされていなかった離水型ピンゴを新たに定義し、最終氷期から完新世への環境変化のなかにその成長プロセスを位置づけたことはきわめて高いオリジナリティーをもつものである。

よって審査担当者一同は、これらの成果を高く評価し、また申請者は堅実かつ熱心であり、研究者としての資質を十分備えているものと考え、大学院課程における研鑽や単位取得なども併せ、申請者が博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判断した。