

別海町ケネヤウシュベツ川沿いのアースハンモック

曾根 敏雄*・原田鉱一郎*・田中 静幸**

キーワード：アースハンモック，凍結深，凍上，不完全沈下

I. はじめに

周氷河現象のひとつであるアースハンモックは、植生におおわれた高さ50cm程度の半球状の地形であり、不淘汰構造土の一種と分類されている(Washburn, 1979)。これらは寒冷な極地域から、年平均気温が6°Cの地域まで分布する(小疋ほか, 1974)。日本では主に山岳地帯に分布するが、北海道では大雪山のような高山に加えて、主として道東、道北地方の低地にもアースハンモックの分布が知られている(天井澤, 1997, 1998; 沖田ほか, 1979; 小疋, 1965; 佐々木, 1979; 曽根・田中, 1982; 田村, 1963; 野川, 1965, 1980; 野川ほか, 1978; 山田, 1959)。アースハンモックの形成には、凍結融解が関わっていると考えられてきたが、北上山地における観測(澤口, 1988)を除いて、冬期の凍結深・凍上量に関する観測はほとんど行なわれていなかった。

筆者のひとりは、別海町において1990-91年の冬期に凍上観測を行ない、アースハンモックでは約40cm深まで土が凍結し約4cm凍上すること、アースハンモック間の凹地では凍結深、凍上量共に半分以下であることを明らかにした(曾根, 1991)。その後、1991-92年にも観測点を増設して凍上観測を行なった。本稿ではその観測結果についての報告に加えて、アースハンモックの形態、内部構造、土壤特性についても触れ、成因について考察を行なった。

II. 観測地点のアースハンモック

1. 分布

調査地点は北海道東部に位置する別海町の市街

地から約10km南のケネヤウシュベツ川の流域である(図1)。ここはケネヤウシュベツ川とその支

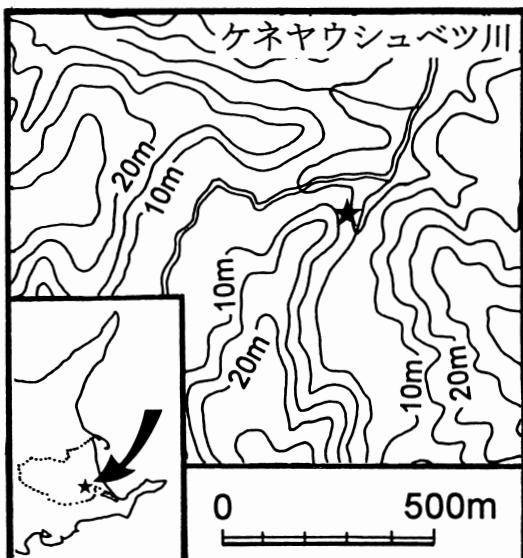


図1 調査地点

流の合流点付近で、アースハンモックはこの支流から谷地坊主の発達する泥炭地を約20-30m隔てて分布する。この分布地の一部(10m×10m正方形区内)において、20cm間隔で支流の水面からの比高をレベルで測定することにより、アースハンモックの分布図を作成した(図2)。アースハンモックは最大高さ60cm、直径200cm程度であり、この区内に約35個分布する。アースハンモックの形態には、半円球状、繭状等のほか複数が連続した形態のアースハンモックもみられ、北-南方向、北東-南西方向に連なるものが多い(図2)。

* 北海道大学低温科学研究所

** 北見農業試験場

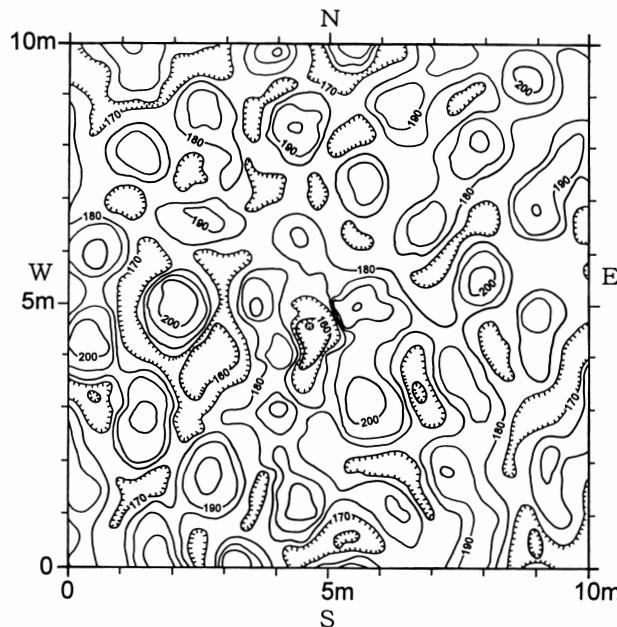


図2 アースハンモックの実測図

2. 内部構造

アースハンモックの内部構造（図3）は、中心部では表層から黒色火山灰土層、褐色火山灰土層、黒色火山灰土層、褐色火山灰土層、摩周f軽石層となっており、褐色火山灰土層と黒色火山灰土層との間に擾乱がみられる。いっぽう周辺部では表層から黒色火山灰土層、灰白色火山灰層、黒色火山灰土層、褐色火山灰土層、摩周f軽石層となっている。灰白色火山灰層は以前に雌阿寒a火山灰といわれた火山灰である。現在では、雌阿寒a火山灰は、樽前a（Ta-a-1739年噴火）、駒ヶ岳c_{1,2}（Ko-c₁-1856年噴火、c₂-1694年噴火）に対比され、本地域ではKo-c₁あるいはc₂である可能性が

高い（遠藤ほか、1989）。

表層部では植物の根が密集し、アースハンモック中心部では黒色火山灰土の発達する表層から約40-50cm深にまで達している。アースハンモックを覆う植生は、ミヤコザサと草本類が優占するが、カンバ、カシワといった木本類も比較的乾燥した頂部にまばらに分布する。

3. 土壌特性

アースハンモック内部の土壤の諸特性（粒度分布、腐植含量、容積重、固相率、液性限界、透水係数）を図4に示す。各試験は、100ccの採土管に採取した試料を用いて行なった。粒度組成については、シルトと砂がともに約45%を占めるが、下層ではシルトが減少し砂の割合が増加する。腐植含量は表層付近で多く、深部になるにつれ少なくなるが、埋没黒色火山灰土層でわずかに増加し、摩周f軽石層にかけて再び少なくなる。容積重は表層付近で0.4g/cm³前後であるが、内部の褐色火山灰層の部分では0.7g/cm³を超える。固相率は、表層から約40cm深付近まで、一部(36.2%)を除き、15-23%程度であるが、深さ50cm付近では28-36%程度まで増大する。アースハンモックの内部は、表層から40cm深付近まで膨軟である。

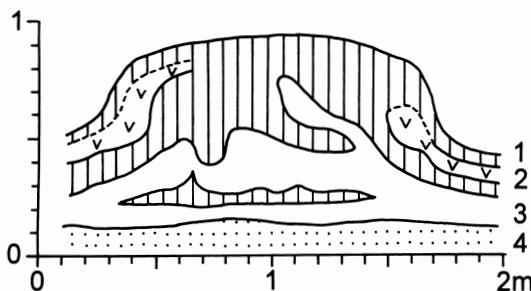


図3 アースハンモックの断面図

- | | |
|-----------|-----------|
| 1 黒色火山灰土層 | 2 灰白色火山灰層 |
| 3 褐色火山灰土層 | 4 摩周f軽石層 |

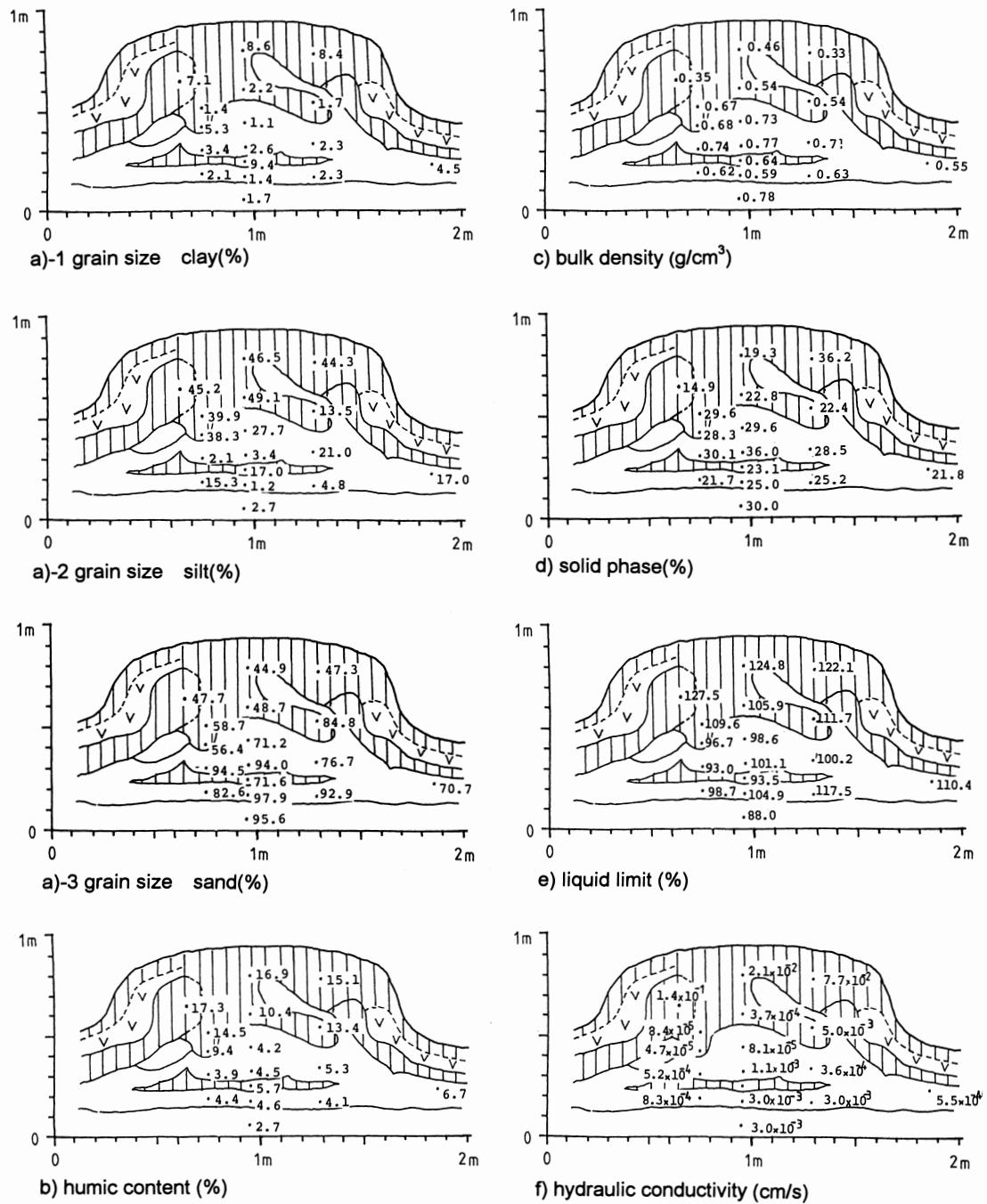


図4 アスハンモック内部の土壤の諸特性

a) 粒度組成 a)-1 粘土 a)-2 シルト a)-3 砂
 b) 腐植含量 c) 容積重 d) 固相率 e) 液性限界 f) 透水係数

III. 凍上觀測

1. 方法

1990-91年の観測では、凍上量の測定をハンドレベルにより行なった(曾根, 1991)。今回は測定誤差をより小さくするために、測線上に水平に張った水糸と測点間の距離を測定することにより凍上量を測定した。水糸は測線の延長上に設けた2個所の不動点の間に張った。不動点は、80cm深にアンカーを付けた木製の棒をアースハンモック間の凹地に埋めることにより設けた。凍結深の観測は、凍上量観測の測線から約2m離れた地点A, Bで行なった。これらの地点は前年と同じ観測地点(曾根, 1991)である。凍上観測点(地点1~8)のプロファイルと凍結深観測点の地表の高さの関係を図5に示す。地点A, 地点1, 3, 5, 6, 7はアースハンモック頂部に、地点B, 地点2, 4, 8はアースハンモック間の凹地に位置する。地点6は凹地の中であるが、凸部にあり頂部とみなせる。

観測は、1991年12月9日、1992年1月20日、2月2日、2月22日、4月5日、5月10日、5月24日に行なった。凍上量は1991年12月5日を基準としているが、この時点では既に土壤凍結が始まっている、相応の凍上が生じていたものと考えられる。

2. 結果

地点2, 4では1月20日の時点で沈下が記録されたが、他の地点では12月上旬から1月20日にかけて凍上はゆっくりと進行した(図6a)。1月20日から2月22日にかけては、すべての地点において急速に凍上が進行し、約1.0~3.2cmの凍上が

記録された。4月5日にはすべての地点で最大凍上量が観測された(図6a)。この後、地表面は沈下するが、5月24日の観測では地点2, 3, 4, 8では、1991年12月5日のレベル以下に沈下した。この原因は、12月5日には既に凍結が始まっていたこと、融解期のゆるんだ地表が測定時に標尺の重さで沈下した可能性等がある。

凍上量には各地点でばらつきが見られるが、2月22日以降の凍上（沈下）量の変化傾向に着目し、各地点をグループ分けすることができる。ひとつは2月22日と4月5日の凍上量変化の差が比較的小なく、4月5日と5月10日の差が大きいグループ（2, 4, 8）である。もうひとつは4月5日と5月10日の差が小さく、5月10日と5月24日の差が大きいグループ（1, 5, 6, 7）である。また地点3はそれらの中間型と考えられる。

凍結深は、アースハンモック頂部の地点 A で 4 月 5 日に最大46.8cm を記録した。本地点での融解は 4 月 5 日には始まっていたが、凍土は 5 月 24 日時点でも残存していた(図 6 b)。凹地の地点 B では、2 月 22 日に凍結深が18.5cm と最大となっ た。4 月 5 日には融解が始まっており、5 月 10 日までに全層融解した。

観測期間中の別海地域気象観測所(AMeDAS)における凍結・融解指数(積算寒度、積算暖度)を図6cに示した。なおここで用いた凍結指数には、凍結期間中に日平均気温がプラスの日があった場合には、その値を凍結指数から減じた実効値で示した。融解指数についても同様である。また凍上観測地点と別海地域気象観測所における積雪深を図6dに示す。

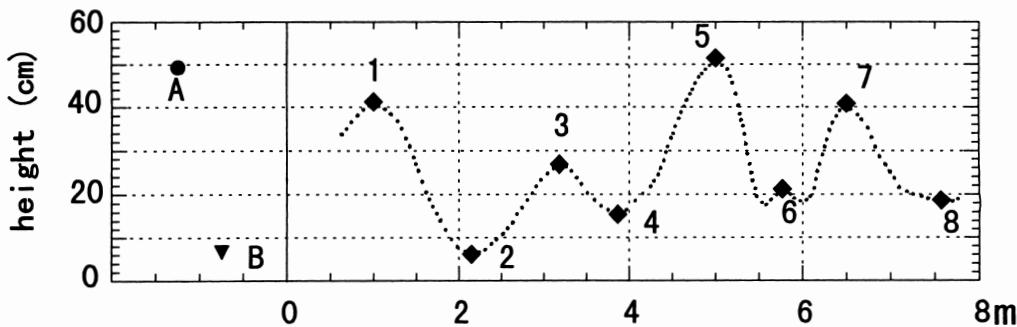


図5 観測点の高さの関係
凍結深観測地点—A, B 凍上観測地点 1-8

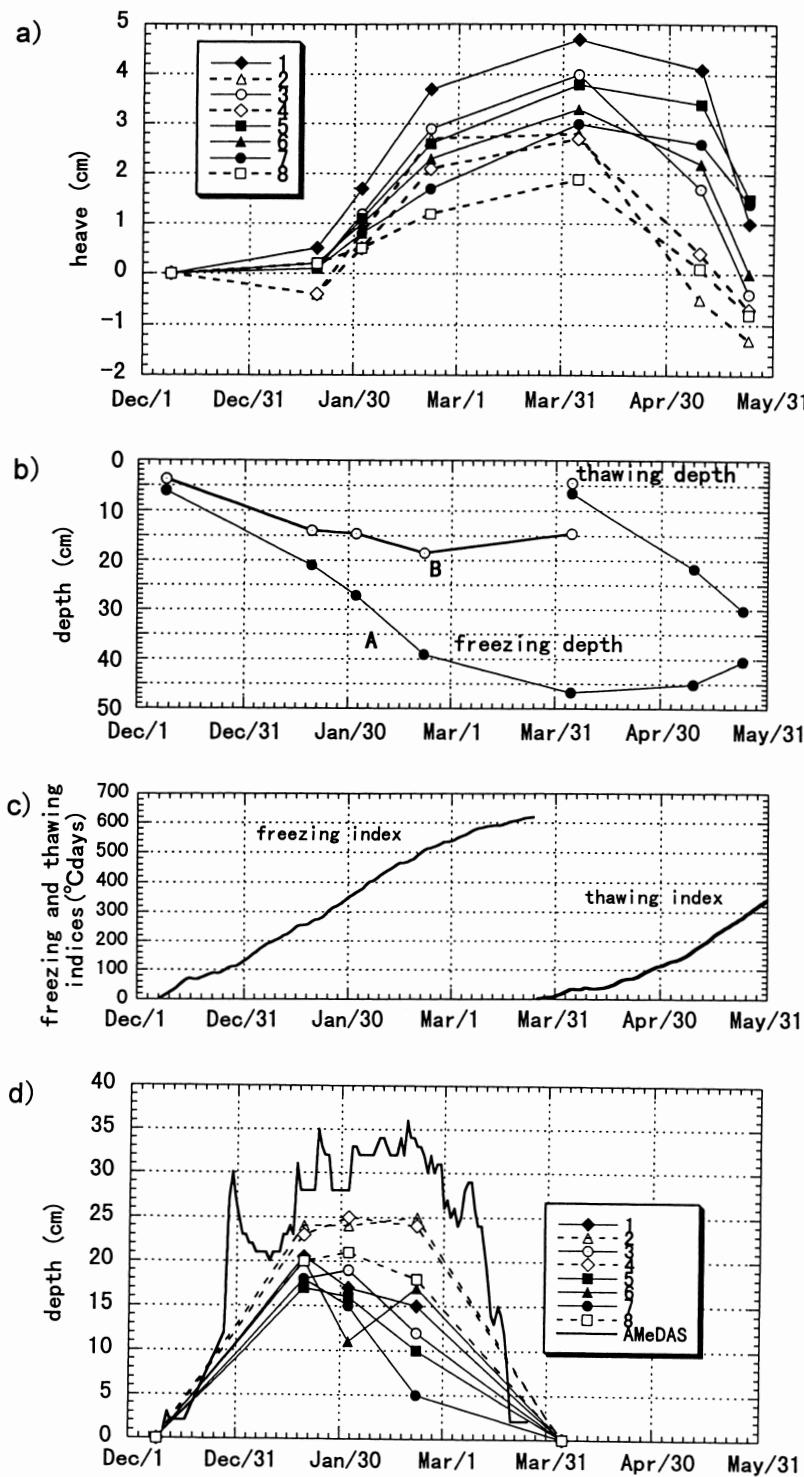


図 6 1991-92年における地点1-8の観測結果

a) 凍上量 b) 凍結・融解深 c) 凍結・融解指数（別海 AMeDAS データ）
d) 積雪深

IV. 考 察

1. 凍結深と凍上量

凍上観測地点において凍結深観測を行なっていないので、凍上観測地点の正確な凍結深はわからないが、凍結深の変化の傾向は地点 A (頂部), B (凹地部) の凍結深観測から窺うことができる。アースハンモック頂部では、地点 A で 4 月 5 日に最大凍結深を記録し、地点 1, 3, 5, 6, 7 において凍上量も最大であった。しかし凹地部では、地点 B で 2 月 22 日に最大凍結深を記録したが、凍上観測地点 2, 4, 8 において最大凍上量は 4 月 5 日に記録されている。一般的には、最大凍結深発生時に近い時期に最大凍上量を記録する (石崎ほか, 1991)。凍上観測地点 2, 4, 8 においては、2 月 22 日以降も凍結が進行し、おそらく 3 月初～中旬くらいまでの時期に最大凍結深が生じたのであろう。しかし 2 月 22 日から 4 月 5 日の間には凍上観測が行なわれていないので、これらの地点の最大凍上量が 4 月 5 日と記録されたのである。

前述のように凍上観測において、2 月下旬と 4 月初めの凍上量変化が比較的少なく、4 月初めと 5 月初めの沈下量の差が大きいグループ (2, 4, 8) と、4 月初めと 5 月初めの沈下量の差が小さく、5 月初めと 5 月下旬の沈下量の差が大きいグルー

プ (1, 5, 6, 7) が認められた。前者のグループは、2 月下旬に近い時期に最大凍結深に達したため、2 月下旬と 4 月初めの凍上量変化が少なかったのであろう。またこれらのグループは、凹地部にあり積雪深が他の地点よりも多い (図 6 d)。したがって局所的な積雪の違いが、凍結深と凍上量に影響を及ぼしているものと考えられる。ただし積雪は低い地点ほど多い傾向はあるが、地点 6 のように低い地点であっても (図 5)，常に積雪が多いとは限らない (図 6 d)。この局所的な積雪の違いは、微地形と風によるものであろう。ところで 4 月 5 日に凹地部の地点 B では、融解深が地点 A より浅くなっていた。この理由は、両地点における冬期の積雪量、消雪時期、日射量等に差があるためと考えられる。

つぎに凍結と凍上の進行状態から、凍上の生じる深さについて考える。観測日と観測日との間の期間における凍結深の増加量に対する凍上量の割合は、例えば地点 A と地点 1, 5, 6, 7 をみると、表 1 のようになっている。これからアースハンモック頂部では地表下 21.0 cm から 46.8 cm の位置で凍上が生じ易いことがわかる。ところで、凍結期 (1991 年 3 月 28 日) の凍土試料解析結果 (表 2) によると、表層ほど含水率は高いが、深さ 42.5 cm でも 100% を越えている。これらの値は一

表 1 凍結深(地点1,5,6,7)の増加に対する凍上量(地点 A)の割合 (%)

period	depth(cm)	site 1	site 5	site 6	site 7
Dec.05 to Jan.20	6.0 - 21.0	3	1	1	1
Jan.20 to Feb.02	21.0 - 27.2	19	16	13	11
Feb.02 to Feb.22	27.2 - 39.1	17	13	11	8
Feb.22 to Apr.05	39.1 - 46.8	13	16	13	17

表 2 凍土試料の含水(氷)率と容積重

depth(cm)	water content (%)	bulk density
0.0 - 4.0	282.2	0.99
4.0 - 8.5	193.2	1.05
8.5 - 13.0	178.6	1.28
13.0 - 18.0	168.4	1.13
18.0 - 23.0	147.9	1.16
23.0 - 28.0	141.5	1.19
28.0 - 33.0	139.0	1.21
33.0 - 38.0	137.8	1.23
38.0 - 42.5	134.2	1.23

スハンモック内部の液性限界値(図4 e)を越えており、融解期には液性限界値を超えた含水量を持ちうると考えられる。したがって根系の妨げがなければ、内部で液状化による地層の乱れが生じる可能性がある。アースハンモック内部での褐色火山灰土層の突き上げ状の変形(図3)がみられる深さ20~50cmは、凍結・凍上が発生する深さ約21~47cmに一致する。このことは、この位置で凍上・沈下等の活動が盛んであることを示すものだろう。

1990-91年の冬期には、アースハンモック頂部では最大凍結深は約40cm、最大凍上量は約4cm、凹地部ではそれぞれ約15cm、約2cmであった(曾根、1991)。1990-91年に比較して、1991-92年の方(約47cm)が最大凍結深は深かった。凍結指数は、1990-91年が $372.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ 、91-92年には $619.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{days}$ であり、1991-92年の方が寒冷であった。積雪の影響が無ければ土壤凍結深は凍結指数の平方根に比例する(木下、1984)。本地点の場合、積雪を考慮に入れないと、比例定数は約2前後の値となる。

2. アースハンモックの成因

アースハンモックの成因は、突き上げ説、割れ目説、凍結と水流説、不等凍上説、またこれらの組み合わせによるという説(藤木、1975)などがある。例えばアイスランドの季節凍土地帯では、乾燥割れ目と突き上げがその成因とされる(Van Vliet-Lanoe et al, 1998)。また永久凍土地帯では、アースハンモック下の凹型の活動層内の上下双方から凍結と表層からの融解の繰り返しにより、物質の対流が生じてアースハンモックが形成されるという説もある(Mackay, 1980)。しかしどれもあまり実証的ではなく、アースハンモックの成因は、はっきりわかっていない(Schunke and Zoltai, 1988)。このような状況のなかで澤口(1988)は、凍上一不完全沈下説を唱えた。凍結期間にアースハンモックに生じた霜柱状の氷層の部分が春に融解しても、凍上により盛り上がった地面は植生のマット状の根によって支持され、すぐには沈下しない。この間に霜柱状の氷層が作った空隙が上部からの土で補填され、アースハンモックは完全には元の位置に戻らない。このように凍

上と不完全沈下を繰り返して成長するという説である。傍証として澤口(1988)は、アースハンモックの内部が膨軟で固相率が低いことを挙げている。本地点においてもアースハンモックの表層部は植物根の発達が良く、内部が膨軟で固相率が低いことは、アースハンモックが不完全沈下によって成長することを示唆するものであろう。ただし澤口(1988)の説だけでは、不完全沈下のプロセスについての説明が不充分である。おそらく融解した地表が元の位置に戻る前に、霜柱状氷層の融解後の空隙を、上部からの土粒子が配列を変えて補填したり、新たに成長した植物の根が空隙を支持するといった現象が生じているものと考えられる。

前述のようにアースハンモック内部では融解時に液性限界値を越える含水率に達し得ることから、内部の地層の擾乱の原因には凍結圧を必要としない。したがって突き上げ説に成因を求める必要はない。ただしアースハンモック頂部と凹地部との灰白色火山灰層と摩周f軽石層との間の火山灰土の厚さに明瞭な差があることから(図3)、藤木(1975)の言うように流水による侵食も形成に関わった可能性もある。

一旦アースハンモックが周囲よりも盛り上がり、そこでは周囲の凹地よりも凍結が進行し、より凍上量が大きくなる。凍上量がより大きい方がアースハンモックの発達には有利と考えられるので、アースハンモックが小丘状の地形を造るという意味においては、不等凍上もアースハンモックを形作るうえで、重要な要因と考えられる。

ところでアースハンモックの高さは、道北では最大117cmというものあるが(佐々木、1979)、通常20cmから100cmで平均50cm程度と報告されており(沖田ほか、1979; Gerrard, 1992; Schunke and Zoltai, 1988)、アースハンモックの高さには限界があると考えられる。アースハンモックの盛り上がりが凍上一不完全沈下によるとすると、アースハンモックの成長が止まる理由として、凍結が進行しても凍上が生じなくなるか、凍上が生じても完全沈下するようになるためと考えることができる。前者の例としては、アースハンモックが成長することによって相対的に地下水位が低下し、凍上の際に必要な水分の供給が減少すること

が挙げられる。後者については、凍上—不完全沈下が生じる部分が、アースハンモックの成長と伴に地下深部へと移り変わっていき、限界に達するため成長が止まるという仮説が考えられる。しかし、不完全沈下のメカニズムがよくわかっていない現段階では、まずこれを先に解明する必要がある。

V. まとめ

別海町ケネヤウシュベツ川支流沿いのアースハンモックの調査を行ない以下のことことが明らかになった。

1. 1991-92年の冬期にはアースハンモックでは約47cm深まで凍結し、約5cm凍上した。しかしアースハンモック間の凹地では、積雪の影響を強く受け、凍結深は約19cm深で、凍上量は約3cmであった。

2. アースハンモックの表層部は植物根系の発達が良く、内部が膨軟で固相率が低い。これらはアースハンモックが凍上—不完全沈下によって盛り上がったことを示唆する。

3. いったん高まりが生じると、アースハンモックは周囲よりも積雪深が浅くなる。すると盛り上がった部分で凍結が促進されて選択的に凍上が生じ、アースハンモックという凸型の微地形が造られる。したがって不等凍上もハンモックが成長するための要因のひとつと考えられる。

参考文献

- 天井澤暁裕(1997)：根室半島におけるアースハンモックの形成環境と分布形態。國立館大學地理學報告, 6, 27-33.
- 天井澤暁裕(1998)：根室半島におけるアースハンモックの形成環境。地理要旨集, 53, 116-117.
- 石崎武志・福田正己・原田鉱一郎・鳥田宏行(1991)：苦小牧における凍上観測(1982~1991冬期)。低温科学物理篇資料集, 50, 71-92.
- 遠藤邦彦・隅田まり・宇野リベカ(1989)：北海道東部の完新世後期テフラ層序とその給源火山。地学雑誌, 98, 506-510.
- 沖田良隆・斎藤万之助・赤沢 伝(1979)：釧路市美濃のアースハンモック。土木試験所月報, 316号, 1-19.
- 木下誠一(1984)：永久凍土の分布と特徴。福田正己・小疋尚・野上道男編：『寒冷地域の自然環境』北海道大学図書刊行会, 99-121.
- 小疋 尚(1965)：大雪火山群の構造土。地理評, 38, 179-199.
- 小疋 尚・野上道男・岩田修二(1974)：ひがし北海道の化石周氷河現象とその古気候学的意義。第四紀研究, 12, 177-191.
- 佐々木清一(1979)：北海道北部におけるEarth Hummockについて。第四紀研究, 18, 31-37.
- 澤口晋一(1988)：北上山地中部一杯森のアースハンモック観測と実験一。駿台史学, 74, 111-133.
- 曾根敏雄(1991)：根釧原野におけるアースハンモックにおける凍結深観測。北海道の雪氷, 10, 24-25.
- 曾根敏雄・田中静幸(1982)：ひがし北海道別海町のアースハンモック。日本第四紀学会講演要旨集, 12, 90-91.
- 田村昇市(1963)：樽前粗粒火山灰に見出される構造土について。土肥誌, 34, 92-94.
- 野川 潔(1965)：根室半島における二、三の気候地形。北海道地理, 37, 26-30.
- 野川 潔(1980)：根室半島の気候地形。『西村嘉助先生退官記念地理学論文集』, 135-140.
- 野川 潔・小坂利幸・松井 愈・松澤逸巳・木村方一(1978)：十勝平野における周氷河現象。地団研専報, 22, 「十勝平野」, 215-229.
- 藤木忠美(1975)：大雪山構造土地形研究小史。北海道自然保護協会誌, 13, 2-7.
- 山田 忍(1959)：野地坊主と十勝坊主について。土肥誌, 30, 49-52.
- Gerrard,J.(1992) : The nature and geomorphological relationships of earth hummocks (thufa) in Iceland. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 86, 173-182.
- Mackay, J.R.(1980) : The origin of hummocks, western Arctic coast, Canada. Can. J. Earth Sci., 17, 996-1006.
- Schunke, E. and Zoltai, S. C.(1988) : Earth hummocks(thufur). In Clark, M. J. (ed.), Advances in Periglacial Geomorphology. Wiley, Chichester, pp. 231-245.
- Van Vliet-Lanoe,B., Bourgeois,O. and Dauteuil, O. (1998) : Thufur formation in Iceland and its relation to Holocene climate change. Permafrost and Periglacial Processes, 9, 347-365.
- Washburn, A.(1979) : Geocryology—A survey of periglacial processes and environments. Edward Arnold, London, 406p.

Earth Hummocks along the Keneyaushubetsu River, in Bekkai Town, Eastern Hokkaido, Japan

Toshio SONE*, Koichiro HARADA* and Shizuyuki TANAKA**

Key words : earth hummocks, ground freezing, frost heave, imperfect subsidence

There are active earth hummocks in eastern Hokkaido. Ground freezing and frost heave were observed at an earth hummock site in Bekkai town in 1991-92 winter. The ground was frozen to 47cm deep and heaved about 5cm at an earth hummock, while it was frozen to 19cm deep and heaved about 3cm at an inter-hummock depression due to the difference of snow depth. Differential frost heave is considered to be one of the factors which promote the upheaval of the surface of earth hummocks. Internal structure and soil properties such as dense roots, low bulk density and ratio of solid phase suggest that the surface upheaval of earth hummocks is caused by the repetition of "frost heave and imperfect subsidence".

* The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

** Kitami Agricultural Experiment Station