

中国東北部興安嶺地域における凍土研究

1. 興安嶺地域における永久凍土の分布概況

竹内 典之・酒井 徹朗・楊 潤田

Studies on the Soil Freezing and Thawing in Hingan Ling
1. The existing circumstance of permafrost in Hingan Ling

Michiyuki TAKEUCHI, Tetsurou SAKAI, Runtian YANG

要 旨

中国東北部興安嶺地域および東北平原における凍土の分布と道路、橋梁、建築物等の災害の概況について報告する。

1. 興安嶺地域および東北平原は、シベリアに中心を持つ周極の永久凍土帯と季節凍土帯との移行帯に位置する。一般に、永久凍土帯と季節凍土帯との移行帯においては、土の凍結深度や凍土の融解深度が大きい。

2. 興安嶺地域およびその周辺部は、冬季には厳寒なシベリア気団の影響を強く受けるため気温が極めて低く、他の同緯度地域に比べると凍結指数は $1,000\sim 1,500^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ も大きい。また、夏季には、この地域は比較的低緯度地域に位置するうえに、この地域に向かって太平洋高気圧から吹き込む温暖多湿な季節風の影響により比較的气温が上昇する。そのため、この地域においては、凍結指数、融解指数ともに極めて大きく、永久凍土地域にあっては活動層厚が、また、季節凍土地域にあっては最大凍結深度が極めて大きいのが特徴である。

3. 興安嶺地域および東北平原は、凍土の分布状況から(1)連続永久凍土区、(2)不連続永久凍土区、(3)点在永久凍土区、(4)季節凍土区に分けられ、この地域の地理、気象条件から点在永久凍土の分布面積が極めて広いのがこの地域の特徴の一つである。

4. 興安嶺地域および東北平原においては、永久凍土地域にあっては活動層が、また、季節凍土地域にあっては最大凍結深度が極めて大きいことから、土の凍結—(凍上)—凍土の融解の過程で発生するさまざまな現象によって引き起こされる道路、橋梁、建築物等の災害も多岐にわたり、被害の程度も極めて大きい。

5. 興安嶺地域および東北平原における道路、橋梁、建築物等の災害は、(1)土の凍結—(凍上)—凍土の融解の過程で発生するさまざまな現象によるもの、(2)永久凍土地域に特有な地表水、地下水の凍結による巨大氷塊(涎流水、氷椎、氷丘等)の生成と融解によるもの、(3)地被条件等の人的あるいは自然的な攪乱による土の凍結深度あるいは凍土の融解深度の増大によるもの、(4)その他とに大別できるようである。

はじめに

シベリアから中国東北部興安嶺地域にかけての広大な永久凍土地帯を中心に広く分布している亜寒帯針葉樹林は、木材生産の対象としてばかりでなく、地球環境の上からも保全すべき重要な森林の一つである。この森林は、永久凍土地帯という極めて厳しい立地条件の下で成立している森林であるため、乱開発は致命的な自然破壊、環境破壊につながりかねない。したがって、その開発にあたっては、土の凍結と凍土の融解の実態とくに森林と凍土との相互への影響等に十分な配慮をした計画を立てる必要がある。

そこで、われわれはシベリアを中心とする周極の永久凍土帯から季節凍土帯への移行帯に位置する中国東北部興安嶺地域および東北平原における土の凍結と凍土の融解の実態を把握するための共同研究に着手した。本報告では、とりあえず2回にわたる現地視察および意見交換、討論によって得た興安嶺地域および東北平原における凍土の分布と道路、橋梁、建築物等の災害の概況についての知見を取りまとめて報告する。

興安嶺地域および東北平原における凍土の分布と道路、橋梁、建築物等の災害の概況

中国東北部興安嶺地域は、中国における有数な森林地帯であり、木材生産活動の活発な地域である。中国の最北部に位置し、内蒙古自治区と黒龍江省とにまたがり、東北西の三面はソ連と国境を接し、呼倫貝爾高原、阿爾山からモンゴルに連なり、東経115°30′～130°50′、北緯43°30′～53°20′に位置し、大興安嶺と小興安嶺とに区分される。山地の一般的な海拔高は300～1,300m、高いところでは1,600～1,800mである。また、東北平原は、大、小興安嶺および長白山脈を水源とする松花江流域の広大な平原で、その海拔高は100～300m程度である。

表-1は、東北平原の中心的都市ハルビン（東経126°37′、北緯45°41′、海拔高143m）と小興安嶺の南部に位置する凉水自然保護区（東北林業大学凉水実験林場）（東経128°53′、北緯47°11′、海拔高300m）における月平均気温および年平均気温を示したものである。一般に、永久凍土と季節凍土の分布界は、年平均気温0℃線にほぼ一致するとされている。それからすると、凉水は永久凍土帯に、ハルビンは季節凍土帯に属し、興安嶺地域および東北平原はシベリアに中心を持つ周極の永久凍土帯から季節凍土帯への移行帯に位置することになる。

表-1. ハルビンと凉水における月平均気温と年平均気温

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年平均	備考
ハルビン	-19.7	-15.8	-4.8	6.5	14.7	20.0	22.5	21.2	14.2	5.8	-6.2	-16.0	3.5	理科年表 ¹⁾ より
凉水	-24.6	-19.8	-9.6	3.1	10.0	16.3	18.8	18.0	10.4	1.1	-10.0	-21.4	-0.6	1984年～1989年の平均

興安嶺地域および東北平原のように永久凍土帯と季節凍土帯との移行帯においては、冬季は寒さが比較的厳しいため土の凍結が地下深くまで進むが、夏季には太陽高度が高く気温も比較的高いので凍土の融解速度が大きく、凍土が地下深くまで融解する。したがって、永久凍土地域においては活動層の厚さが、また、季節凍土地域においては最大凍結深度が極めて大きい。そのため、土の凍結（凍上）-凍土の融解の過程で発生するさまざまな現象によって、特有な地形や

自然環境が創り出され、人間をも含めた生物の生活も直接的あるいは間接的に極めて大きな影響を受け、道路、橋梁、建築物等に発生する災害も多岐にわたり、その被害の程度も大きい。また、一方、土の凍結速度や凍土の融解速度等が自然環境とくに地被条件の変化等によって受ける影響も極めて大きい。

このような地域において合理的な森林開発計画、林道網整備計画等を立てるうえで、土の凍結の様態や土の凍結深度と凍土の融解深度の季節変化等土の凍結の実態を詳細に知り、さらに進んで、土の凍結深度や凍土の融解深度の季節変化の予測や制御の方法を知ることは重要である。

1. 土の凍結指数（積算寒度）と凍土の融解指数（積算暖度）

土の凍結の実態を把握するうえで、土の凍結深度と凍土の融解深度とは最も基本的な量的要素である。

一般に、土の凍結深度および凍土の融解深度は、それぞれ、

$$X_f = \alpha \sqrt{I_f} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで X_f : 土の凍結深度

α : その土地における土の凍結深度係数で、凍土の熱伝導率と容積含水量によってきまる定数

I_f : 凍結指数（積算寒度値）で、0℃以下の気温の積算値

$$X_u = \beta \sqrt{I_u} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで X_u : 凍土の融解深度

β : その土地における凍土の融解深度係数で、融解土の熱伝導率と凍土の容積含水量によってきまる定数

I_u : 融解指数（積算暖度値）で、0℃以上の気温の積算値

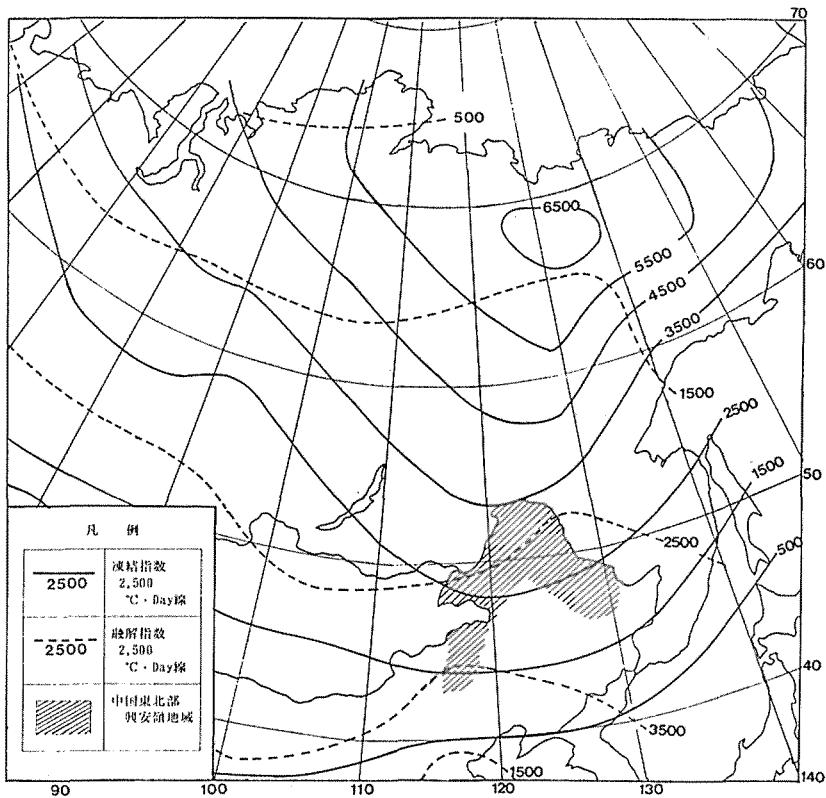
によって推定され、凍結指数（積算寒度値）と融解指数（積算暖度値）は、それぞれ、土の凍結深度と凍土の融解深度を決定する大きな要因の一つである。

図-1は、国立天文台編「理科年表 平成3年 1991 第64冊」¹⁾の世界各地の月平均気温から、各地の凍結指数および融解指数を概算し、シベリア、モンゴル、中国東北部における分布を示したものである。また、図-2は、比較対照するために北アメリカ北部における凍結指数と融解指数とを同様にして求め、その分布を示したものである。

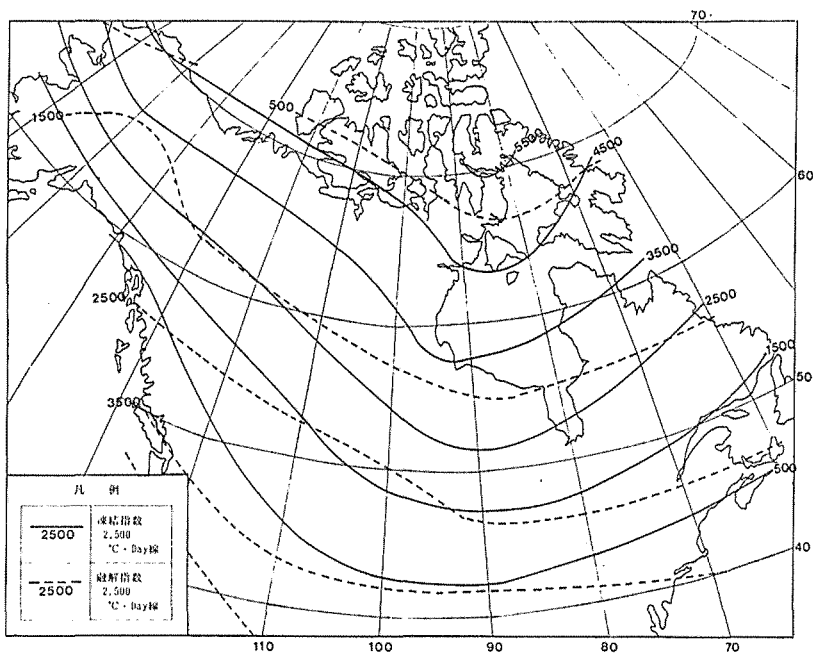
まず、凍結指数についてみると、図-1から明らかなように、中国東北部とくにその北部では同緯度の他の地域に比べると1,000℃・Day から1,500℃・Day 近くも大きくなっている。凍結指数2,500℃・Day 線に注目すると、図-2に示したように北アメリカ北部においても中央部では北緯52°近くを通過しているが、中国東北部とくに大興安嶺地域ではさらに400km近くも南に下がり、北緯48°近くを通過している。すなわち、興安嶺地域およびその周辺部では、冬季は極寒なシベリア寒気団の影響を強くうけて極めて寒冷である。

次に、融解指数2,500℃・Day 線についてみると、中国東北部周辺以外は北アメリカ北部の場合と同様に凍結指数2,500℃・Day 線の南方400~600kmをほぼ平行して通っている。しかし、中国東北部およびその周辺部ではその位置が逆転し、小興安嶺地域ではとくに著しい。これは、夏季には、この地域が比較的低緯度地域に位置するため太陽放射が強いうえに、この地域に向かって太平洋高気圧から吹き込む温暖多湿な季節風の影響を強く受けることによるものである。

永久凍土帯と季節凍土帯との分布界が年平均気温0℃線にほぼ一致するものとする、興安嶺



図一．シベリア，モンゴル，中国東北部における凍結指数と融解指数の分布



図二．北アメリカ北部における凍結指数と融解指数の分布

地域およびその周辺部における永久凍土帯と季節凍土帯との分布界付近の凍結指数および融解指数は $2,500\sim 3,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ で、他の地域が $2,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ 前後であるのに比べると $500\sim 1,000^{\circ}\text{C}\cdot\text{Day}$ も大きい。

2. 興安嶺地域および東北平原における凍土の分布

凍土は、その継続する期間によって永久凍土、季節凍土、短期間凍土に分類される。永久凍土とは「地表の下かなりの深さにわたって、 0°C 以下の温度が2年から数千年にわたって続くような土壌、堆積物、岩盤²⁾をいい、季節凍土とは毎年冬季には形成されるが夏季には全層が完全に融けてしまう凍土であり、短期間凍土とは短期間、たとえば、夜間だけあるいは厳寒期の数日間だけ凍結するがすぐに融けてしまう凍土である。また、永久凍土は、その分布状態によって(1)連続永久凍土(鉛直方向にも水平方向にも永久凍土が連続している)(2)不連続永久凍土(永久凍土の中に永久凍土でないものが不連続にある)(3)点在永久凍土(季節凍土の中に永久凍土が点々とある)等に分類される³⁾。

楊 潤田・林 風桐⁴⁾は、中国東北部興安嶺地域を凍土の分布状況によって、(1)大片連続多年凍土区、(2)島状融区多年凍土区、(3)島状多年凍土区、(4)季節凍土区に区分し、図-3のような東北大小興安嶺多年凍土分区図を示している。ここで、大片連続多年凍土(I)は連続永久凍土に、島状融区凍土(II)は不連続永久凍土に、島状多年凍土(III)は点在永久凍土にそれぞれ該当するものである。

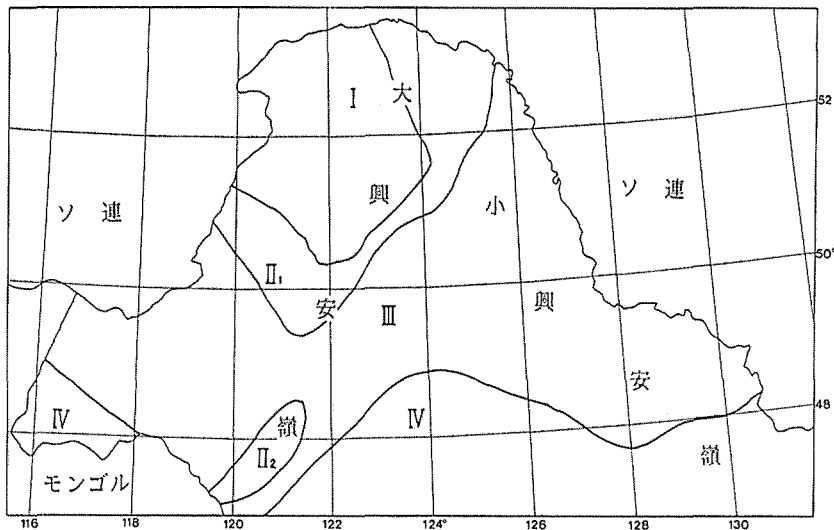


図-3. 東北大小興安嶺多年凍土分区図

(1) 連続永久凍土区(大片連続多年凍土区(I))

大興安嶺西斜面最北部にあり、年平均気温 -5°C 以下で、凍結期間は7ヶ月余りである。凍土層厚は、一般には $50\sim 60\text{m}$ 、厚いところでは 80m におよぶ。夏季の融解深度は比較的浅く、活動層の厚さは $0.3\sim 1.5\text{m}$ 程度であるが、凍土中に氷層が形成されやすく、氷厚は数 cm から $2\sim 3\text{m}$ にもなり、氷椎や氷丘といった特殊な現象が発生しやすい。分布面積は約 $6.2\times 10^4\text{km}^2$ である。

(2) 不連続永久凍土区（島状融区多年凍土区（Ⅱ））

本区の分布面積は約 5.4×10^4 km²で、次の二つの区に分かれる。

- Ⅱ₁：本区は、大興安嶺北部にあり、その分布界は連続永久凍土区の分布界とほぼ平行している。年平均気温は $-3 \sim -5$ ℃である。本区の凍土層厚は、土質、植被、斜面方位などによって大きく異なり、 $20 \sim 50$ ℃である。活動層厚は一般に $0.5 \sim 2.5$ mで、氷層が発生しやすい。
- Ⅱ₂：本区は、大興安嶺中部阿爾山周辺の海拔高 $1,000 \sim 1,300$ m以上の高海拔地にあり、年平均気温は $-3 \sim -4$ ℃で、凍土層厚は $20 \sim 30$ mである。

(3) 点在永久凍土区（島状多年凍土区（Ⅲ））

本区は、大興安嶺北中部および小興安嶺の北部に広く分布し、年平均気温は $0 \sim -3.5$ ℃で、凍土層厚は 20 m未満、一般には $5 \sim 10$ mである。本区の永久凍土は、永久凍土が保存されるに最も有利な条件を有する場所すなわち山間の谷間や沼沢地あるいは林冠密度の高い森林に覆われた山地などに分布する。活動層厚は、一般に比較的厚く $2.5 \sim 3.5$ mで、泥炭層の発達した沼沢地では $1.0 \sim 1.3$ mである。分布面積は約 26.6×10^4 km²で、本区の分布面積が極めて広いのが興安嶺地域における凍土の特徴の一つであると考えられる。なお、本区に点在する永久凍土は現在縮小する傾向にありとくに季節凍土帯との分布界近くでは著しい。これは、前に述べたように興安嶺地域周辺では他の永久凍土地域よりも低緯度地域に位置するため夏季には太陽放射が比較的強いうえに太平洋高気圧から温暖多湿な季節風が吹き込むため、凍土の融解深度が大きいことによるものであろう。

(4) 季節凍土区（季節凍土区（Ⅳ））

大、小興安嶺の南部および東北平原はこの区に属する。最大凍結深度は、南から北に向かって大きくなり、東南斜面より西北斜面で大きい。大興安嶺東麓や小興安嶺東南山麓一帯では最大凍結深度が $2.5 \sim 2.8$ mにも達し、特殊な場所では 3.0 m以上にもなる。

以上みたように、興安嶺地域およびその周辺部においては、永久凍土地域にあっては活動層厚が、また、季節凍土地域にあっては最大凍結深度が他の永久凍土帯から季節凍土帯への移行帯よりもさらに大きいことになる。したがって、土の凍結（凍上）－凍土の融解の過程で発生するさまざまな現象によって引き起こされる道路、橋梁、建築物などの災害も多岐にわたり、その被害も極めて大きい。

3. 道路、橋梁、建築物等の災害

興安嶺地域および東北平原における道路、橋梁、建築物等の災害は、1) 土の凍結－（凍上）－凍土の融解の過程で発生するさまざまな現象によるもの、2) 永久凍土地域に特有な地表水、地下水の凍結による巨大氷塊（涎流水、氷椎、氷丘等）の生成と融解によるもの、3) 地被条件等の人的あるいは自然的攪乱による土の凍結深度あるいは凍土の融解深度の増大によるもの、4) その他とに大別できるようである。それぞれの要因による災害の例を示すと以下のようである。

1) 土の凍結－（凍上）－凍土の融解の繰り返しによって発生するもの

- 路面下の路床、路盤が凍結する際に発生する不等凍上により路面の破壊が発生する。
- 凍上した路床、路盤が融解する際に発生する不等沈下および過剰水による路床、路盤の軟弱化により路面、路体の破壊が発生する。
- 興安嶺地域では橋梁としては一般に木橋が建設されているが、土の凍結に伴って発生する

凍着凍上により橋脚が凍上し、橋梁の破壊が発生する。

2) 永久凍土地域に特有の地表水、地下水の凍結による巨大氷塊の生成と融解によって発生するもの

- ・ 涎流水：道路が流水上を通過する場合や切り取り法面から湧水がある場合等に流れ出した水が道路上で凍結し、厚い氷層を形成し、冬季間の交通を阻害するとともに融解期には路面の軟弱化や路体の流亡、破壊を引き起こす。

- ・ 氷椎、氷丘：活動層が凍結する際に地下水が地中で、あるいは、加圧された地下水が薄い凍土層を突き破って地表に湧出して凍結し、巨大氷塊を生成する。これらの現象が道路や建築物の敷地内に発生した場合はもちろんのこと敷地の近くに発生した場合でも上に述べた涎流水と同様の災害が発生する。

3) 地被条件等の人的あるいは自然的な攪乱による土の凍結深度あるいは凍土の融解深度の増大によるもの

- ・ 道路が低(湿)地を通過する際には盛土によって路体を構築するが、その際に地被を攪乱、破壊すること等によって道路敷内の凍土の融解深度の増大を引き起こす。路体下の現地盤は凍結時には十分な支持力を有するが、融解期には過剰水により支持力を失い、路体の不等沈下を誘発し、路体の破壊が発生する。

- ・ 永久凍土上に建築物を構築する場合、暖房等により建築物下の凍土の融解深度の増大を引き起こし、建築物の不等沈下、破壊が発生する。

4) その他

- ・ 低(湿)地への道路の建設は、融解期には融雪融水水の流出の阻害となり、排水施設が十分でない場合はもちろんのこと排水施設が比較的良好な場合でも流出した水塊等によりダムアップし、融雪洪水を引き起こし、道路に溢流した流水により路体の流亡、破壊が発生する。

以上のような道路、橋梁、建築物等の災害に対する防止対策としてはさまざまなものが考えられるが、それらを大別すると、災害を引き起こす要因の除去あるいは削減と耐災害性を有する構造をもった道路、橋梁、建築物等の構築とに分けることができる。たとえば、

イ) 災害を引き起こす要因の除去あるいは削減

土の凍上性、凍土の含水量、土中の熱伝達量が、凍結進行時の不等凍上および融解進行時の不等沈下発生 of 三大要素であり、これらの要素の一つでも除去あるいは削減できれば道路、橋梁、建築物等の災害は削減できるのではないかと考えられる。

- ・ 置換工法・・・凍上性の土を非凍上性の土で置換することによって凍上を抑制する。
- ・ 排水法・・・土中の過剰水を排水することによって凍結時の含水量を少なくし凍上を抑制する。
- ・ 遮水法・・・不透水層や不透水膜等によって地下水面からの給水を遮断あるいは緩和することによって凍結時の含水量を少なくし凍上を抑制する。
- ・ 化学的方法・・・化学的処理により水の氷点をあげることによって地中への凍結侵入を抑制する。
- ・ 保温法・・・断熱材等により土中への熱伝達を遮断あるいは緩和することによって凍結侵入、融解侵入を抑制する。

建築物等の場合には高床式にするなど屋内の暖房による熱の土中への伝達を防止または削減することによって永久凍土の融解を抑制する。

ロ) 耐災害性を有する構造物の構築

- ・凍上, 凍着凍上に十分耐えられる基礎, 例えば深杭基礎, 錨固基礎等の構築
- ・不等凍上, 不等沈下に十分耐えられる柔構造の構造物の構築

等が考えられ, すでに置換工法, 排水法, 深杭基礎工法等については試験施工がなされ, 他の工法についても各種の試験がなされているが, 技術的, 経済的な諸問題から十分な成果が得られていないのが現状である。

おわりに

中国東北部興安嶺地域および東北平原における凍土の分布状況と道路, 橋梁, 建築物等の災害について概観した。われわれの共同研究はまだ緒についたばかりであり, 日中両国の情報交換もまだまだ不十分であるが, とりあえず2回にわたる現地視察および意見交換, 討論によって得た知見を取りまとめて報告した。

今後は, 道路, 橋梁, 建築物等の災害防止を中心課題とし,

- 1) 土の凍結深度, 凍土の融解深度, 凍上量, 凍着凍上量の観察, 測定方法の開発, 確立
- 2) 災害発生箇所における定点観測による各種災害の発生機構の究明
- 3) 災害発生箇所における災害の種類, 被害の程度, 微地形, 気象データ等に関するデータベースの作成

等を当面の研究課題として, 共同研究を進めていく計画である。

引用文献

- 1) 国立天文台編: 理科年表 平成3年 1991 第64冊. 丸善. 1990
- 2) 藤井理行・樋口敬二: 富士山の永久凍土. 雪氷. Vol.34. 1972
- 3) 日本雪水学会編: 雪氷辞典. 古今書院. 1990
- 4) 楊 潤田・林 風桐: 多年凍土区水文地質及工程地質学. 東北林業大学出版社. 中国哈尔滨. 1986.

Résumé

In this paper, the existing circumstances of permafrost and seasonally frozen ground in Hingan Ling is reported.

1. Hingan Ling belongs to the transition zone between the circumpolar permafrost area and the seasonally frozen ground area. It is well known that in this kind of transition zone the soil freezing and thawing penetrates extremely under the ground.

2. In winter, it is terribly cold in Hingan Ling where a very influential and cold Siberian air mass covers over. But it becomes comparatively hot because Hingan Ling is situated in relatively low latitude and sent a warm seasonal wind from a Pacific high. So, Hingan Ling shows the from 1,000 to 1,500°C·Day larger freezing index than another same latitudes and the greater depths of soil freezing and thawing penetration than another parts of the transition zone.

3. According to the distribution of permafrost Hingan Ling is classified the four divisions of continuous permafrost, uncontinuous permafrost, scattered permafrost and seasonally frozen ground. It is the chief distinction in Hingan Ling that scattered permafrost ranges very wide.