

JNC TJ7420 2005-092

永久凍土が地質環境に与える影響調査

(核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 業務委託報告書)

平成14年2月

三井金属資源開発株式会社

永久凍土が地質環境に与える影響調査

(核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 業務委託報告書)

平成 14 年 2 月

三井金属資源開発株式会社

~~限定資料~~

~~FIG~~

平成 14 年 2 月

永久凍土が地質環境に与える影響調査

要旨

基盤岩層のかなりの深さまでに永久凍土が形成されると、地下水環境に大きな変化が生ずる。そこで気候変動のもとで、北海道での永久凍土形成の可能性を予測することは重要である。そこで本研究では、最終氷期とその後の完新世において、非線形熱伝導方程式に基づく数値解析を用いて北海道での永久凍土の形成復元を行った。計算にあたって、時間とともに変化する地表面境界温度は、北海道各地で採取した泥炭層を用いて得られた花粉ダイアグラムから推定した。地表面温度条件に加えて、積雪深さとその密度が時間とともに変化する条件を考慮した。現在の最深積雪深さを最終氷期での推定最大値とし、無積雪条件を最終氷期の乾燥した環境を考慮して、その極小の条件と仮定した。積雪の熱伝導率値の推定には、密度による推定経験式が用いられた。北海道各地の実際の地質柱状から、構成する層ごとに熱伝導率などの熱常数を決めた。

数値解析の妥当性を検証するため、東シベリアでのサーモカルスト（アラス）とタリクの形成が、本数値解析で正しく再現できるかを確認した。その結果、北海道での永久凍土の消長を復元することに有効であることが分かった。

北海道での事例解析では、永久凍土の形成は、地表面温度条件と同じ程度に地表面の積雪条件に依存することが分かった。道北（釧淵と富良野）では無積雪条件では、最終氷期には厚い永久凍土が形成された。道南（黒松内）では、現在と同じ程度の積雪条件では、気温低下にかかわらず、永久凍土は形成されなかった。

本報告書は、三井金属資源開発株式会社が、核燃料サイクル機構東濃地科学センターとの契約により実施した業務の成果である。

契約番号：1306A01132

* 三井金属資源開発株式会社 環境事業部 情報処理部

February, 2002

Effects of Permafrost Occurrence on Geological Environment

Abstract

Permafrost Occurrence induces the drastic changes of ground water condition in considerable depths of bedrocks. It is necessary to evaluate possible development of permafrost under changing climate in Hokkaido. As to reconstruct permafrost occurrence and depth at each point during Last Glacial Periods and Holocene, numerical analyses based on non-linear heat conduction equation were carried out in this study. Ground surface boundary temperature condition as time series was estimated by pollen diagrams, which were previously obtained using peat samples at various locations in Hokkaido. In addition to ground surface temperature condition, snow accumulation was taken into account with variable densities of snow depth. Present maximum snow accumulation in Hokkaido was assumed as the possible maximum snow accumulation in the past. No snow accumulation was assumed in extreme case of arid environment in Last Glacial Period. Empirical equation for estimation of thermal conductivity of snow was employed as the function of density of snow deposit. Ground thermal condition such as thermal conductivity at each layer of sediment was properly assumed at five sites in Hokkaido.

As to verify the numeric analysis, formation of Thermokarst(Alas) and Talik in east Siberia was simulated by present analysis. The result of verification suggests that proposed numeric analysis of this study is applicable in case of permafrost formation in Hokkaido. As overall results of analyses suggest that permafrost occurrence strongly depends on snow accumulation condition as well as ground surface temperature.

Deep permafrost formation was estimated in northern Hokkaido "Kenbuchi and Furano" without snow accumulation on the ground. However once snow accumulation in the past is the same amount as present even under depression of ground surface temperature, no permafrost develops in southern Hokkaido "Kuromatsunai".

This work performed by Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

* Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd., Environment Division, Geomatics Department

永久凍土が地質環境に与える影響調査

目 次

	頁
1. 業務概要	1
1.1 件名	1
1.2 目的	1
1.3 研究対象地域	1
1.4 実施項目	1
1.5 実施内容	1
1.6 受託者側実施責任者	1
1.7 受託者側実施担当者	1
1.8 研究期間	1
2. 過去3万年間の温度分布解析	2
2.1 研究概要	2
2.2 花粉化石から古気候を復元する手順について	2
2.3 古気候復元の基礎資料としての花粉分析結果の検討	5
2.4 解析条件	31
2.5 積雪分布	31
3. 永久凍土形成深度の解析	33
3.1 数値解析	33
3.2 解析条件	35
3.3 解析結果	48
4. 考察	85
4.1 数値解析による永久凍土の形成過程復元の妥当性の検討	85
4.2 北海道における永久凍土形成復元	89
参考文献	93

目 次

	頁
図 2-1 北海道の花粉分析試料採取地点	7
図 3-1 復元された温度変動 (北限值)	36
図 3-2 復元された温度変動 (南限值)	36
図 3-3 古気温と積雪深分布 (30000 年前)	37
図 3-4 古気温と積雪深分布 (25000 年前)	38
図 3-5 古気温と積雪深分布 (18000 年前)	39
図 3-6 古気温と積雪深分布 (14000 年前)	40
図 3-7 古気温と積雪深分布 (10000 年前)	41
図 3-8 古気温と積雪深分布 (8000 年前)	42
図 3-9 古気温と積雪深分布 (6000 年前)	43
図 3-10 古気温と積雪深分布 (4000 年前)	44
図 3-11 古気温と積雪深分布 (2000 年前)	45
図 3-12 地盤柱状と熱伝導率	46
図 3-13 北海道における積雪深さと熱伝導率の経時変化	47
図 3-14 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 北限值積雪あり	49
図 3-15 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 南限值積雪あり	50
図 3-16 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 北限值無積雪	51
図 3-17 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 南限值無積雪	52
図 3-18 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 北限值積雪あり	53
図 3-19 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 南限值積雪あり	54
図 3-20 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 北限值無積雪	55
図 3-21 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 南限值無積雪	56
図 3-22 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 北限值積雪あり	57
図 3-23 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 南限值積雪あり	58
図 3-24 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 北限值無積雪	59
図 3-25 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 南限值無積雪	60
図 3-26 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 北限值積雪あり	61
図 3-27 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 南限值積雪あり	62
図 3-28 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 北限值無積雪	63
図 3-29 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 南限值無積雪	64
図 3-30 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 北限值積雪あり	65
図 3-31 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 南限值積雪あり	66
図 3-32 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 北限值無積雪	67
図 3-33 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 南限值無積雪	68
図 3-34 永久凍土分布図 (25000 年前) 積雪あり	69
図 3-35 永久凍土分布図 (25000 年前) 無積雪	70
図 3-36 永久凍土分布図 (18000 年前) 積雪あり	71
図 3-37 永久凍土分布図 (18000 年前) 無積雪	72
図 3-38 永久凍土分布図 (14000 年前) 積雪あり	73

図 3-39	永久凍土分布図 (14000 年前)	無積雪	74
図 3-40	永久凍土分布図 (10000 年前)	積雪あり	75
図 3-41	永久凍土分布図 (10000 年前)	無積雪	76
図 3-42	永久凍土分布図 (8000 年前)	積雪あり	77
図 3-43	永久凍土分布図 (8000 年前)	無積雪	78
図 3-44	永久凍土分布図 (6000 年前)	積雪あり	79
図 3-45	永久凍土分布図 (6000 年前)	無積雪	80
図 3-46	永久凍土分布図 (4000 年前)	積雪あり	81
図 3-47	永久凍土分布図 (4000 年前)	無積雪	82
図 3-48	永久凍土分布図 (2000 年前)	積雪あり	83
図 3-49	永久凍土分布図 (2000 年前)	無積雪	84
図 4-1	ピンパ・アラス遠景		87
図 4-2	TEM 法による比抵抗構造断面		88
図 4-3	計算結果 (事例 1)		91
図 4-4	計算結果 (事例 2)		92

表 目 次

表 2-1	花粉群型と対応する植生型	3
表 2-2	花粉群型と対応する植生の現在の分布域北限と南限における気象資料と現在の調査地間の気象資料の比較	4
表 2-3	調査地域と引用文献一覧	8
表 2-4	気象資料の観測地および出典	9
表 2-5	花粉分析試料採取地域の現在の気象資料	10
表 2-6	花粉群型と対応する植生型	11
表 2-7	年代別にみた化石花粉群の採取地点と植生型	12
表 2-8	調査地の現在と 2,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	13
表 2-9	調査地の現在と 4,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	15
表 2-10	調査地の現在と 6,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	17
表 2-11	調査地の現在と 8,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	19
表 2-12	調査地の現在と 10,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	21
表 2-13	調査地の現在と 12,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	23
表 2-14	調査地の現在と 14,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	25
表 2-15	調査地の現在と 16,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	26
表 2-16	調査地の現在と 18,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	27
表 2-17	調査地の現在と 20,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	28
表 2-18	調査地の現在と 25,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	29
表 2-19	調査地の現在と 30,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較	30
表 2-20	解析条件	32

1. 業務概要

1.1 件名

「永久凍土が地質環境に与える影響調査」

1.2 目的

氷期に主に北日本で発達が予想される永久凍土は、不透水性層となることから、地下水流動などに大きな影響を与えることが想定される。本件ではこの影響の範囲と程度を予測するため、氷期の日本列島を例として永久凍土の形成深度を、コンピュータシミュレーションで解析する。

1.3 研究対象地域

対象地域は北海道である。

1.4 実施項目

- 過去3万年間の温度分布の整理
- 永久凍土形成深度の解析
- 地下温度構造の解析
- 報告書の作成

1.5 実施内容

- 過去3万年間の温度分布の整理：北日本を対象にした文献調査を行い、過去3万年間の気温変遷を把握する。
- 永久凍土形成深度の解析：凍結深度解析コードを用いて、解析対象地域、地表温度（気温）の低下、積雪深度および最深積雪深への到達時間、地盤条件の組み合わせで、永久凍土の形成深度を2次元断面で解析する。
- 地下温度構造の解析：解析対象地域、地表温度（気温）の低下、積雪深度および最深積雪深への到達時間、地盤条件の組み合わせで、地下の温度構造を2次元断面で解析する。

1.6 受託者側実施責任者

三井金属資源開発株式会社 環境事業部

1.7 受託者側実施担当者

三井金属資源開発株式会社 環境事業部情報処理部

1.8 研究期間

平成13年11月1日～平成14年2月22日

2. 過去3万年間の温度分布解析

2.1 研究概要

本調査は、北海道における既存の花粉分析結果及び過去3万年の気候の変遷を示す文献によって各時間間隔での温度を復元する。それらを数値計算の境界条件として与える。積雪の条件については、極大と極小の条件を仮定し、積雪の計時変化による熱伝導率値の推定を行った。

2.2 花粉化石から古気候を復元する手順について

花粉は植物で生産される生殖細胞で、一個の大きさは平均30~40ミクロンである。花粉膜は、化学的に極めて安定した組成の炭化水素からできている。ただし、酸化された場合は分解してしまう。従って、もし酸化を免れる環境（湿原や湖底、海底など）に堆積した場合は、何億年でもその形態や花粉膜の構造を保ったまま化石として保存される。花粉は泥炭、シルト、粘土、細粒砂など多くの堆積物に含まれる。しかも1試料中から検出される種類と数が豊かであり、古植生を復元する際の有力な手段となる。

堆積物から花粉化石を抽出するには、試料に数種の酸やアルカリを加えて花粉以外の物質を除去する化学的な処理と比重分離を行って化石を濃集させる物理的な処理を合わせ行う。化石の同定は、400~1000倍の光学顕微鏡で行う。1試料について最低200個の化石を、鏡下に現れる順に同定する。こうして得られた化石花粉群に基づいて、以下に述べる手法により試料堆積時の植生や気候を復元する研究を花粉分析学と呼ぶ。さらに化石花粉群の特徴から地層の堆積時代の推定や、地層間の対比を行うことにも役立っている。

つぎに北海道の過去3万年間について、花粉化石群から植生や気候を復元する方法を簡単に述べる。検出された花粉のうち、気候変動を示す木本類の組成変化に注目して、化石花粉群をA~Fの6花粉群型に分類した（表2-1）。次に、表2-1に示した各花粉群型に対応する植生（アナログ）について、現在の地球上のどの地域に分布するかを調べ、分布の南限と北限について気象資料を求めた（表2-2）。北海道の氷期のアナログは、現在のサハリンやオホーツク海北部に求められる（五十嵐ほか、1993；Mikishin and Gvozdeva, 2001）。

例えば、北海道北部の剣淵盆地では過去3万年間の連続的な化石花粉群が得られている。これを花粉群の特徴に基づいてA~Fに分類した。3万年前についてみると、花粉群型はCで、対応する植生（エゾマツ・トドマツ・グイマツと冷温帯広葉樹の混交林）の南限はサハリン南部であり、北限はサハリン中部である。従って、南限のコルサコフと北限のアレクサンドロフスク・サハリンスキーの気象観測値を剣淵の気象資料と比較して較差を割り出した。

花粉群型	対応する植生
A	グイマツ・ハイマツ・エゾマツ林
B	エゾマツ・トドマツ・グイマツ林
C	エゾマツ・トドマツ・グイマツと冷温帯広葉樹の混交林
D	エゾマツ・トドマツ(常緑針葉樹)林
E	エゾマツ・トドマツと冷温帯広葉樹の針広混交林
F	ブナを除く冷温帯広葉樹林

表 2-1 花粉群型と対応する植生型

対応する花粉群型	A		B		C	
	南限	北限	南限	北限	南限	北限
地域	サハリン北部	オホーツク海北部	サハリン中部	サハリン北部	サハリン南部の湿原	サハリン中部
1月平均気温(°C)	-19.1	-24.5	-17.3	-19	-11.2	-18.2
8月平均気温(°C)	15.4	12.9	15.7	15	17.2	16.4
年平均気温(°C)	0.3	-5.3	0	0.3	3	0.3
年間降水量(mm)	570	378	550	566	742	763
観測地	ノグリキ	オホーツク	ポロナイスク	オハ	コルサコフ	アレクサンドロフスク・サハリンスキイ

対応する花粉群型	D		E		F	
	南限	北限	南限	北限	南限	北限
地域	北海道の山地	サハリン中部の山地	北海道中央部	北海道東部	北海道南部	北海道北部
1月平均気温(°C)	-8.3	-18.3	-6.7	-10.9	-2.9	-10.4
8月平均気温(°C)	18.4	14.7	20.3	17.4	21.2	19.9
年平均気温(°C)	4.5	-1	6.6	3.6	8.5	5.3
年間降水量(mm)	1585	550	1170	1221	1115	1208
観測地	倶知安の400m上位	ポロナイスクの200m上位	野幌	阿寒湖畔	岩内	和寒

表 2-2 花粉群型と対応する植生の現在の分布域北限と南限における気象資料と現在の調査地間の気象資料の比較

2.3 古気候復元の基礎資料としての花粉分析結果の検討

古気候復元の一方法として花粉分析学的研究がある。原理は年代値の確定している堆積物に含まれる化石花粉群から、その時代の古植生を復元する。植生はある範囲の気候条件のもとに成立していることから、つぎに古植生の分布域の南限と北限の気象資料と試料採取地の気象資料を比較して現在との比較を行った。

本報告では、北海道における既存あるいは未公表の資料のうち、年代の明らかな地点を選び、上述した方法で30000yBP以降の古気候を復元した。

2.3.1 調査年代 (yr B.P.)

資料蒐集の年代は、30000年前、25000年前、20000年前、18000年前、16000年前、14000年前、12000年前、10000年、8000年前、6000年前、4000年前、2000年前に設定した。

2.3.2 調査地点

上記の年代を示す北海道の花粉分析資料を蒐集した。調査地点は図2-1に示した30地点である。なお、石狩湾大陸棚と石狩は石狩湾岸平野として一括した。復元に用いた花粉資料の出典を30篇選び、引用文献リストに示した(表2-3)。

2.3.3 気象資料

- (a) 氷期の北海道の植生が現在分布するサハリンの気象資料の観測地と出典を示した(表2-4)。
- (b) 化石花粉群の得られた北海道の30地点の気象資料(1月平均気温、8月平均気温、年平均気温、年間降水量)を示した(表2-5)。

2.3.4 化石花粉群型と対応する森林型と古気候

- (a) 3万年前以降の北海道から得られた化石花粉群を、その特徴からA~Fの6型に分類し、各花粉型に対応する古植生型を示した(表2-6)。
- (b) 石花粉群型(A~F)から復元された古植生の現在の分布域の南限と北限の気象資料と調査地の気象資料を比較した(前出表2-2)。
- (c) 図2-1の30地点から得られた化石花粉群を年代、植生型に分けて表示した(表2-7)。

2.3.5 結果

年代別に復元された古植生型について、現在の分布地の南限と北限の気象資料と調査地の気象資料との差を示した。各年代ごとの結果を以下の表にまとめた。

- (a) 2000 yBP (表2-8)
- (b) 4000 yBP (表2-9)

- (c) 6000 yBP (表 2-10)
- (d) 8000 yBP (表 2-11)
- (e) 10000 yBP (表 2-12)
- (f) 12000 yBP (表 2-13)
- (g) 14000 yBP (表 2-14)
- (h) 16000 yBP (表 2-15)
- (i) 18000 yBP (表 2-16)
- (j) 20000 yBP (表 2-17)
- (k) 25000 yBP (表 2-18)
- (l) 30000 yBP (表 2-19)

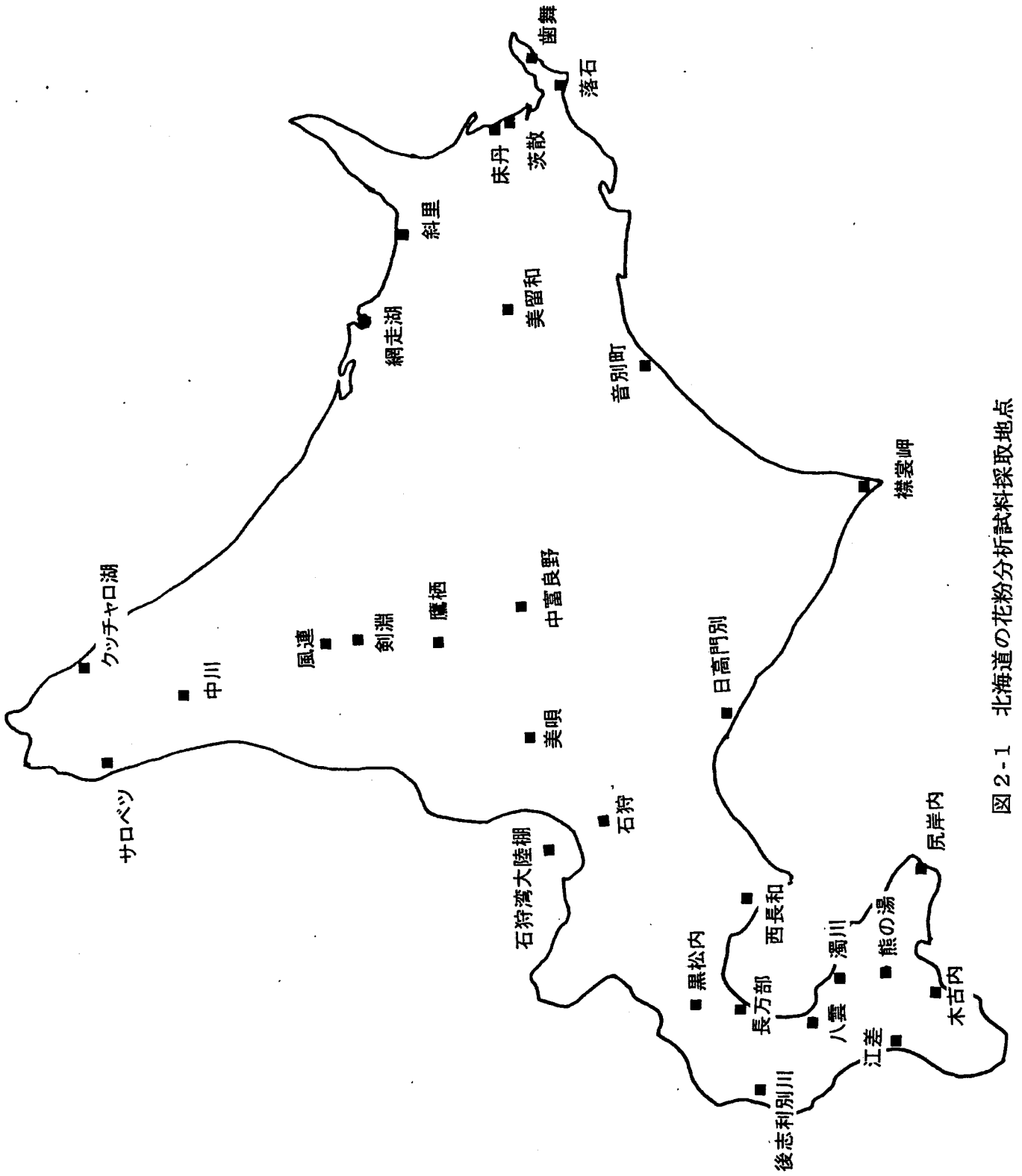


図 2-1 北海道の花粉分析試料採取地点

地点	引用文献
枝幸郡クッチャロ湖	前田、1982
茨散	遠藤ほか、1988
床丹	五十嵐ほか、1990
鹵舞	五十嵐ほか、2001
網走湖	Igarashi et al.,2001
落石	五十嵐ほか、2001
斜里トーツル沼	松田、1983
湧別	五十嵐・熊野、1973
美留和原野	五十嵐、1994
音別町ノ口遺跡西方湿地	松田・前田、1984
襟裳	星野・松沢、1987
中富良野	五十嵐ほか、1993
剣淵	五十嵐ほか、1993
鷹栖	
風連	中村、1968
中川	
日高門別	柳井・五十嵐、1990
サロベツ原野	五十嵐、1988
石狩湾大陸棚	石井ほか、1981
石狩平野地下	Igarashi,1975:五十嵐・熊野、1981
石狩角山・東米里	小野・五十嵐、1991
江別市元野幌	
美唄市開発	五十嵐、1987
黒松内	Sakaguchi,1989
ウグイ沼	小野・五十嵐、1991
後志利別川	鈴木ほか、1999
濁川	川村・紀藤、2000
蓬揃山	小野・五十嵐、1991
渡島半島熊の湯	中村・塚田、1960
亀田郡尻岸内古武井	中川、1961
八雲町花浦	紀藤・滝本、1999
長万部町北豊津	矢野ほか、1975
江差町東山	矢野ほか、1978
木古内町吉堀	
有珠郡西長和	

表 2-3 調査地域と引用文献一覧

地点	観測地	文献
クツチャロ湖	浜頓別	日本気象協会、1982
床丹	別海	日本気象協会、1982
齒舞	根室	日本気象協会、1991
茨散	別海	日本気象協会、1982
網走湖	網走	日本気象協会、1991
落石	茶内	日本気象協会、1982
斜里トーツル沼	斜里	日本気象協会、1982
釧路支庁美留和	弟子屈	日本気象協会、1982
音別町	白糖	日本気象協会、1982
襟裳岬	えりも岬	日本気象協会、1982
中富良野	富良野	日本気象協会、1982
上川支庁剣淵	和寒	日本気象協会、1982
上川支庁鷹栖	鷹栖	日本気象協会、1982
上川支庁風連	上士別	日本気象協会、1982
上川支庁中川	中川	日本気象協会、1982
日高門別	日高門別	日本気象協会、1982
宗谷支庁サロベツ	豊富	日本気象協会、1982
石狩湾岸平野	石狩	日本気象協会、1982
黒松内	黒松内	日本気象協会、1982
北桧山うぐい沼	瀬棚	日本気象協会、1982
後志利別川	瀬棚	日本気象協会、1982
渡島支庁濁川	濁川	日本気象協会、1982
渡島支庁蓬揃山	大野	日本気象協会、1982
渡島支庁熊の湯	大野	日本気象協会、1982
渡島支庁尻岸内	尻岸内	日本気象協会、1982
八雲町花浦	八雲	日本気象協会、1982
長万部町北豊津	長万部	日本気象協会、1982
江差町東山	江差	日本気象協会、1991
木古内町吉堀	知内	日本気象協会、1982
有珠郡西長和	豊浦	日本気象協会、1982
針葉樹林	倶知安の400m上	日本気象協会、1991
サハリン北部	オハ	中央气象台、1942
サハリン中部	ポロナイスク	中央气象台、1942
サハリン南部	コルサコフ	中央气象台、1942
オホーツク海北部	オホーツク	Muller,M.J. 1982

表 2-4 気象資料の観測地および出典

地点	1月平均気温 °C	8月平均気温	年平均気温	年間降水量mm
浜頓別(クッチャロ湖)	-8.4	17.6	4.8	1156
別海(床丹・茨散)	-8.6	18	5.2	1192
根室(齒舞)	-4.5	17.1	5.9	1035
網走(網走湖)	-6.5	19.1	6	815
茶内(落石)	-8.1	17.7	5	1201
斜里	-8.8	18.6	5.3	825
弟子屈(美留和)	-9.4	18	4.7	1101
白糠(音別町)	-6.9	17.5	5.4	1019
えりも岬	-2.4	17.5	7	1147
富良野(中富良野)	-9.6	20.4	5.8	1040
和寒(剣淵)	-10.4	19.9	5.3	1208
鷹栖	-11	19.9	5.2	1058
上士別(風連)	-9.6	19.8	5.5	1147
中川	-9.8	19.1	5	1406
日高門別	-5.7	20.3	7.2	970
豊富(サロベツ)	-7.9	18.5	5.3	1228
石狩	-5.5	20.8	7.4	1069
岩見沢(美唄)	-6.2	21.1	7.2	1204
黒松内	-5.1	20.7	7.1	1616
瀬棚(うぐい沼・後志利別)	-2.4	20.8	8.4	1184
濁川	-6.2	20.8	6.9	1515
大野(蓬揃山・熊の湯)	-4.5	21.2	7.9	1209
尻岸内	-2.2	21.5	8.7	1574
八雲	-4	20.8	7.7	1413
長万部	-4.7	20.6	7.2	1405
江差	-1.4	22.3	9.6	1209
知内(木古内)	-3	21.6	8.6	1704
豊浦(西長和)	-8	18.5	4.9	1763

表 2-5 花粉分析試料採取地域の現在の気象資料

花粉群型	対応する植生
A	グイマツ・ハイマツ・エゾマツ林
B	エゾマツ・トドマツ・グイマツ林
C	エゾマツ・トドマツ・グイマツと冷温帯広葉樹の混交林
D	エゾマツ・トドマツ(常緑針葉樹)林
E	エゾマツ・トドマツと冷温帯広葉樹の針広混交林
F	ブナを除く冷温帯広葉樹林

表 2-6 花粉群型と対応する植生型

地点	3000yBP	2500yBP	2000yBP	1800yBP	1600yBP	1400yBP	1200yBP	1000yBP	800yBP	600yBP	400yBP	200yBP
枝幸郡クッチャロ湖	—	—	—	—	—	—	—	—	E	E	—	—
茨散	A	A	—	—	—	—	B	A	—	F	F	F
床丹	—	—	—	—	—	D	E	—	C	—	—	—
齒舞	B	—	—	—	—	—	—	—	D	—	—	—
網走湖	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
落石	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
斜里トーツル沼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
美留和原野	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
音別町	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
襟裳	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
中富良野	C	C	B	A	A	B	A	A	E	E	—	—
剣淵	C	C	B	A	A	B	A	A	E	E	—	—
鷹栖	—	—	B	B	C	C	C	C	E	E	—	—
風連	—	—	B	B	C	C	C	C	E	E	—	—
中川	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
日高門別	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
サロベツ原野	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
石狩湾岸平野	C	C	B	—	—	—	—	—	—	—	—	—
美唄市開発	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
黒松内	—	—	B	B	A	D	D	F	F	F	F	F
後志利別川	—	—	—	A	A	D	D	F	F	F	F	F
濁川	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
渡島半島鹿の湯	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
亀田郡尻岸内古武井	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
八雲町花浦	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
長万部町北豊津	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
江差町東山	C	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
木古内町吉堀	C	—	B	—	—	—	—	—	—	—	—	—
有珠郡西長和	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 2-7 年代別にみた化石花粉群の採取地点と植生型

2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
茨散	F	-8.6	18	5.2	1192
南限との差		5.7	3.2	3.3	-77
北限との差		-1.8	1.9	0.1	1.6
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
根室半島・齒舞	F	-4.5	17.1	5.9	1035
南限との差		1.6	4.1	2.6	80
北限との差		-5.9	2.8	-0.6	173
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	F	-6.5	19.1	6	815
南限との差		3.6	2.1	2.5	300
北限との差		-3.9	0.8	-0.7	393
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
落石	E	-8.1	17.7	5	1201
南限との差		1.4	2.6	1.6	-31
北限との差		-2.8	-0.3	-1.4	20
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
斜里トーツル沼	E	-8.8	18.6	5.3	825
南限との差		2.1	1.7	1.3	345
北限との差		-2.1	-1.2	-1.7	396
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
釧路支庁美留和	E	-9.4	18	4.7	1101
南限との差		2.7	2.3	1.9	69
北限との差		-1.5	-0.6	-1.1	120
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
音別町	E	-6.9	17.5	5.4	1019
南限との差		-0.2	2.8	1.1	151
北限との差		-4	-0.1	-1.8	202
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	F	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		6.7	0.8	2.7	75
北限との差		-0.8	-0.5	-0.5	168
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	F	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		7.5	1.3	3.2	-93
北限との差		0	0	0	0
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	F	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		8.1	1.3	3.3	57
北限との差		0.8	0	0.1	150

表 2-8 調査地の現在と 2,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	E	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		2.9	0.5	1.1	-32
北限との差		-1.3	-2.4	-1.9	74
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
留萌支庁中川	D	-9.8	19.1	5	1406
南限との差		1.5	-0.7	-0.5	-179
北限との差		-8.5	-4.4	-6	-856
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
日高門別	E	-5.7	20.3	7.2	970
南限との差		-1	0	-0.6	200
北限との差		-5.2	-2.9	-3.6	251
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
サロベツ原野	F	-7.9	18.5	5.3	1228
南限との差		5	2.7	3.2	-113
北限との差		-2.5	1.4	0	-20
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	E	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		-1.2	0.5	-0.8	100
北限との差		-5.4	-3.4	-3.8	152
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
美唄	F	-6.2	21.1	7.2	1204
南限との差		3.3	0.1	1.3	-89
北限との差		-4.2	-1.2	-1.9	4
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	F	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		2.2	0.5	1.4	-501
北限との差		-5.3	-0.8	-1.8	408
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	F	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-0.5	0.4	0.1	-69
北限との差		-8	0.9	-3.1	24
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	F	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		1.6	0	0.6	-94
北限との差		-5.9	-1.3	-2.6	-1
2,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
八雲町花浦	F	-4	20.8	7.7	1413
南限との差		1.1	0.4	0.8	-298
北限との差		-6.4	-0.9	-2.4	-205

表 2-8 調査地の現在と 2,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
茨散	F	-8.6	18	5.2	1192
南限との差		5.7	3.2	3.3	-77
北限との差		-1.8	1.9	0.1	16
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
根室半島・歯舞	F	-4.5	17.1	5.9	1035
南限との差		1.6	4.1	2.6	80
北限との差		-5.9	2.8	-0.6	173
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	F	-6.5	19.1	6	815
南限との差		3.6	2.1	2.5	300
北限との差		-3.9	0.8	-0.7	393
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
落石	E	-8.1	17.7	5	1201
南限との差		1.4	2.6	1.6	-31
北限との差		-2.8	-0.3	-1.4	20
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
斜里トーツル沼	E	-8.8	18.6	5.3	825
南限との差		2.1	1.7	1.3	345
北限との差		-2.1	-1.2	-1.7	396
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
釧路支庁美留和	F	-9.4	18	4.7	1101
南限との差		6.5	3.2	3.8	14
北限との差		-1	1.9	0.6	107
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
音別町	E	-6.9	17.5	5.4	1019
南限との差		0.2	2.8	1.1	151
北限との差		-4	-0.1	-1.8	202
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	E	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		2.9	-0.1	0.8	130
北限との差		-1.3	-3	-2.2	181
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	F	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		7.5	1.3	3.2	-93
北限との差		0	0	0	0
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	F	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		8.1	1.3	3.3	57
北限との差		0.6	0	0.1	150

表 2-9 調査地の現在と 4,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	E	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		2.9	0.5	1.1	23
北限との差		-1.3	-2.4	-1.9	74
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
留萌支庁中川	D	-9.8	19.1	5	1406
南限との差		1.5	-0.7	-0.5	179
北限との差		-8.5	-4.4	-6	-856
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
日高門別	F	-5.7	20.3	7.2	970
南限との差		2.8	0.9	1.3	145
北限との差		-4.7	-0.4	-1.9	238
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
サロベツ原野	F	-7.9	18.5	5.3	1228
南限との差		5	2.7	3.2	-113
北限との差		-2.5	1.4	0	-20
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	F	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		2.6	0.4	1.1	46
北限との差		-4.9	-0.9	-2.1	139
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
美唄	F	-6.2	21.1	7.2	1204
南限との差		3.3	0.1	1.3	-8.9
北限との差		-4.2	-1.2	-1.9	4
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	F	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		2.2	0.5	1.4	-501
北限との差		-5.3	-0.8	-1.8	408
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	F	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-0.5	0.4	0.1	-69
北限との差		-8	-0.9	-3.1	24
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	F	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		1.6	0	0.6	-94
北限との差		-5.9	-1.3	-2.6	-1
4,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
八雲町花浦	F	-4	20.8	7.7	1413
南限との差		1.1	0.4	0.8	-298

表 2-9 調査地の現在と 4,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
クッチャロ湖	E	-8.4	17.6	4.8	1156
南限との差		1.7	2.7	1.8	-14
北限との差		-2.5	-0.2	-1.2	65
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
茨敷	F	-8.6	18	5.2	1192
南限との差		5.7	3.2	3.3	-77
北限との差		-1.8	1.9	0.1	16
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
根室半島・齒舞	E	-4.5	17.1	5.9	1035
南限との差		-2.2	3.2	0.7	135
北限との差		-6.4	0.3	-2.3	186
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	F	-6.5	19.1	6	815
南限との差		3.6	2.1	2.5	300
北限との差		-3.9	0.8	-0.7	393
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
斜里トーツル沼	F	-8.8	18.6	5.3	825
南限との差		5.9	2.6	3.2	290
北限との差		-1.6	1.3	0	383
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
釧路支庁美留和	E	-9.4	18	4.7	1101
南限との差		2.7	2.3	1.9	69
北限との差		-1.5	-0.6	-1.1	120
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
音別町	E	-6.9	17.5	5.4	1019
南限との差		0.2	2.8	1.2	151
北限との差		-4	0.1	-1.8	202
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	E	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		2.9	-0.1	0.8	130
北限との差		-1.3	-3	-2.2	181
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	F	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		7.5	1.3	3.2	-93
北限との差		0	0	0	0
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	E	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		4.3	0.4	3.3	57
北限との差		0.1	-2.5	-1.6	163

表 2-10 調査地の現在と 6,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	E	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		2.9	0.5	1.1	-32
北限との差		-1.3	-2.4	-1.9	74
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
留萌支庁中川	D	-9.8	19.1	5	1406
南限との差		1.5	-0.7	-0.5	179
北限との差		-8.5	-4.4	-6	-856
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
日高門別	F	-5.7	20.3	7.2	970
南限との差		2.8	0.9	1.3	145
北限との差		-4.7	-0.4	-1.9	238
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
サロベツ原野	F	-7.9	18.5	5.3	1228
南限との差		5	2.7	3.2	-113
北限との差		-2.5	1.4	0	-20
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	F	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		2.6	0.4	1.1	46
北限との差		-4.9	-0.9	-2.1	139
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	F	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		2.2	0.5	1.4	-501
北限との差		-5.3	-0.8	-1.8	408
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	F	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-0.5	0.4	0.1	-69
北限との差		-8	0.9	-3.1	24
6,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	F	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		1.6	0	0.6	94
北限との差		-5.9	-1.3	-2.6	-1

表 2-10 調査地の現在と 6,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
クッチャロ湖	E	-8.4	17.6	4.8	1156
南限との差		1.7	2.7	1.8	14
北限との差		-2.5	-0.2	-1.2	65
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
根室半島・歯舞	C	-4.5	17.1	5.9	1035
南限との差		-6.7	-0.1	-2.9	-293
北限との差		-13.2	-0.7	-5.6	-272
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	D	-6.5	19.1	6	815
南限との差		-1.8	-0.7	-1.5	770
北限との差		-11.8	-4.4	-7	-265
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
斜里	E	-8.8	18.6	5.3	825
南限との差		2.1	1.7	1.3	345
北限との差		-2.1	-1.2	-1.7	396
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
音別町	E	-6.9	17.5	5.4	1019
南限との差		0.2	2.8	1.2	151
北限との差		-4	-0.1	-1.8	202
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	E	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		2.9	-0.1	0.8	130
北限との差		-1.3	-3	-2.2	181
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	C	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-0.8	-2.7	-2.3	-466
北限との差		-7.8	-3.5	-5	-445
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	C	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-0.2	-2.7	-2.2	-316
北限との差		-7.2	-3.5	-4.9	-295
8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	E	-9.6	20.4	5.8	1147
南限との差		2.9	-0.1	-0.8	732
北限との差		-1.3	-3	-2.2	761

表 2-11 調査地の現在と 8,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
日高門別	F	-5.7	20.3	7.2	970
南限との差		2.8	0.9	1.3	145
北限との差		-4.7	-0.4	-1.9	238

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
サロベツ原野	F	-7.9	18.5	5.3	1228
南限との差		5	2.7	3.2	-113
北限との差		-2.5	1.4	0	-20

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	F	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		2.6	0.4	1.1	46
北限との差		-4.9	-0.9	-2.1	139

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	F	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		2.2	0.5	1.4	-501
北限との差		-5.3	-0.8	-1.8	-408

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	F	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-0.5	0.4	0.1	69
北限との差		-8.3	-1.9	-3.1	24

8,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	F	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		1.6	0	0.6	94
北限との差		-5.9	-1.3	-2.6	-1

表 2-11 調査地の現在と 8,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
根室半島・齒舞	A	-4.5	17.1	5.9	1035
南限との差		-14.6	-1.7	-5.6	-465
北限との差		-20	-4.2	-11.2	-657
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	F	-6.5	19.1	6	815
南限との差		3.6	2.1	2.5	300
北限との差		-3.9	0.8	-0.7	393
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	A	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-9.5	-5	-5.5	-470
北限との差		-14.9	-7.5	-11.1	-662
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	A	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-8.7	-4.5	-5	-638
北限との差		-14.1	-7	-10.6	-830
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	C	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-0.2	-2.7	-2.2	-316
北限との差		-7.2	-3.5	-4.9	-295
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	D	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		1.3	-1.4	-1	438
北限との差		-8.7	-5.1	-6.5	-597
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
日高門別	A	-5.7	20.3	7.2	970
南限との差		-13.4	-4.9	-6.9	-400
北限との差		-18.8	-7.4	-12.5	-592
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
サロベツ原野	B	-7.9	18.5	5.3	1228
南限との差		-9.4	-2.8	-5.3	-678
北限との差		-11.1	-3.5	-5	-662
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	E	-5.5	20.8	7.4	1089
南限との差		-1.2	-0.5	-0.8	101
北限との差		-5.4	-3.4	-3.8	152
10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	D	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		-3.2	-2.3	-2.6	-31
北限との差		-13.2	-6	-8.1	-1066

表 2-12 調査地の現在と 10,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	F	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-0.5	0.4	0.1	-69
北限との差		-8	-0.9	-3.1	24

10,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	D	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		-3.8	-2.8	-3.4	376
北限との差		-13.8	-6.5	-8.9	-659

表 2-12 調査地の現在と 10,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
根室半島・歯舞	B	-4.5	17.1	5.9	1035
南限との差		-12.8	-1.4	-5.9	-485
北限との差		-14.5	-2.1	-5.6	-469
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	E	-6.5	19.1	6	815
南限との差		-0.2	-1.2	0.6	355
北限との差		-4.4	-2	-2.4	406
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	B	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-7.7	-4.7	-5.8	-490
北限との差		-9.4	-5.4	-5.5	-474
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	A	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-8.7	-4.5	-5	-638
北限との差		-14.1	-7	-10.6	-830
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	C	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-0.2	-2.7	-2.2	-316
北限との差		-7.2	-3.5	-4.9	-295
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	D	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		1.3	-1.4	-1	438
北限との差		-8.7	-5.1	-6.5	-597
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
日高門別	A	-5.7	20.3	7.2	970
南限との差		-13.4	-4.9	-6.9	-400
北限との差		-18.8	-7.4	-12.5	-592
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
サロベツ原野	D	-7.9	18.5	5.3	1228
南限との差		-1.4	-0.1	-0.8	357
北限との差		-10.4	-3.8	-6.3	-678
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	D	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		-3.2	-2.3	-0.3	-31
北限との差		-13.2	-6	-8.1	-1066
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	F	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-0.5	-0.4	0.1	-69
北限との差		-8	-0.9	-3.1	24

表 2-13 調査地の現在と 12,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の
気象資料の比較

12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
濁川	C	-6.2	20.8	6.9	1515
南限との差		-5	-3.6	-3.9	-773
北限との差		-12	-4.4	-6.6	-752
12,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	D	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		-6.4	-3.8	-4.3	12
北限との差		-13.8	-6.5	-8.9	-659

表 2-13 調査地の現在と 12,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の
気象資料の比較

14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	D	-6.5	19.1	6	815
南限との差		-1.8	-0.7	-1.5	-770
北限との差		-11.8	-4.4	-7	-265
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	B	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-7.7	-4.7	-5.8	-490
北限との差		-9.4	-5.4	-5.5	-474
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	A	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-8.7	-4.5	-5	-638
北限との差		-8.6	-4.9	-5	-642
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	C	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-0.2	-2.7	-2.2	-316
北限との差		-7.2	-3.5	-4.9	-295
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	D	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		-1.3	-1.4	1	438
北限との差		-8.7	-5.1	-6.5	-597
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	B	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		-12.2	-5	-7.1	-1066
北限との差		-13.9	-5.7	-6.8	-1050
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	D	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-5.9	-2.4	-3.9	401
北限との差		-15.9	-6.1	-9.4	-634
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	D	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		-3.8	-2.9	-3.4	376
北限との差		-13.8	-6.5	-8.9	-659
14,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
有珠郡西長和	B	-8	18.5	4.9	1763
南限との差		-9.3	-2.8	-4.9	1213
北限との差		-11	-3.5	-4.6	-1197

表 2-14 調査地の現在と 14,000yBP の古植生型分布地 (南限と北限) の気象資料の比較

16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	A	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-9.5	-5	-5.5	-470
北限との差		-14.9	-7.5	-11.1	-662
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	A	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-8.7	-4.5	-5	-638
北限との差		-14.1	-7	-10.6	-830
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	C	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-0.2	-2.7	-2.2	-316
北限との差		-7.2	-3.5	-4.9	-295
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	C	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		-1.6	-2.6	-2.6	-4.5
北限との差		-8.6	-3.4	-5.2	-384
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	B	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		-12.2	-5	-7.1	-1066
北限との差		-13.9	-5.7	-6.8	-1050
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	A	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-16.7	-5.4	-8.1	-614
北限との差		-22.1	-7.9	-13.7	-806
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
渡島半島熊の湯	D	-4.5	21.2	7.9	1209
南限との差		-3.8	-2.8	-3.4	376
北限との差		-14.5	-6.2	-7.6	-643
16,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
有珠郡西長和	B	-8	18.5	4.9	1763
南限との差		-9.3	-2.8	-4.9	-1213
北限との差		-11	-3.5	-4.6	-1197

表 2-15 調査地の現在と 16,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

18,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	A	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-9.5	-5	-5.5	-470
北限との差		-14.9	-7.5	-11.1	-662

18,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	A	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-8.7	-4.5	-5	-638
北限との差		-14.1	-7	-10.6	-830

18,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	B	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-6.3	-4.2	-5.2	-508
北限との差		-8	-4.9	-4.9	-492

18,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	B	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		-7.7	-4.1	-5.5	-597
北限との差		-9.4	-4.8	-5.2	-581

18,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	B	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		-12.2	-5	-7.1	-1066
北限との差		-13.9	-1.7	-6.8	-1050

18,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
後志利別川	A	-2.4	20.8	8.4	1184
南限との差		-16.7	-5.4	-8.1	-614
北限との差		-22.1	-7.9	-13.7	-806

表 2-16 調査地の現在と 18,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
襟裳岬	B	-2.4	17.5	7	1147
南限との差		-14.9	-1.8	-7	-597
北限との差		-16.6	-2.5	-6.7	-581
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	B	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-7.7	-4.7	-5.8	-490
北限との差		-9.4	-5.4	-5.5	-474
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	B	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-6.9	-4.2	-5.3	-658
北限との差		-8.6	-4.9	-5	-642
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡鷹栖	B	-11	19.9	5.2	1058
南限との差		-6.3	-4.2	-5.2	-508
北限との差		-8	-4.9	-4.9	-492
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	B	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		-7.7	-4.1	-5.5	-597
北限との差		-9.4	-4.8	-5.2	-581
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	B	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		-11.8	-5.1	-7.4	-519
北限との差		-13.5	-5.8	-7.1	-5.3
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
黒松内	B	-5.1	20.7	7.1	1616
南限との差		-12.2	-5	-7.1	-1066
北限との差		-13.9	-5.7	-6.8	-1050
20,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
木古内町吉城	B	-3	21.6	8.6	1704
南限との差		-14.3	-5.9	-8.6	-1154
北限との差		-16	-6.6	-8.3	-1138

表 2-17 調査地の現在と 20,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

25,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
床丹	A	-8.6	18	5.2	1192
南限との差		-10.5	-2.6	-4.9	-622
北限との差		-15.9	-5.1	-10.5	-814

25,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	C	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-1.6	-3.2	-2.8	-298
北限との差		-8.6	-4	-5.5	-277

25,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	C	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-0.8	-2.7	-2.3	-466
北限との差		-7.8	-3.5	-5	-445

25,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
上川郡風連	C	-9.6	19.8	5.5	1147
南限との差		-1.6	-2.6	-2.5	-405
北限との差		-8.6	-3.4	-5.2	-384

25,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾大陸棚	C	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		-5.7	-3.6	-4.4	-327
北限との差		-12.7	-4.4	-7.1	-306

表 2-18 調査地の現在と 25,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の
気象資料の比較

30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
床丹	A	-8.6	18	5.2	1192
南限との差		-10.5	-2.6	-4.9	-622
北限との差		-15.9	-5.1	-10.5	-814
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
網走湖	B	-6.5	19.1	6	815
南限との差		-10.8	-3.4	-6	-265
北限との差		-12.5	-4.1	-5.7	-249
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
中富良野	C	-9.6	20.4	5.8	1040
南限との差		-1.6	-3.2	-2.8	-298
北限との差		-8.6	-4	-5.5	-277
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
剣淵	C	-10.4	19.9	5.3	1208
南限との差		-0.8	-2.7	-2.3	-466
北限との差		-7.8	-3.5	-5	-445
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
石狩湾岸平野	C	-5.5	20.8	7.4	1069
南限との差		-5.7	-3.6	-4.4	-327
北限との差		-12.7	-4.4	-7.1	-306
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
尻岸内古武井	C	-2.2	21.5	8.7	1574
南限との差		-9	-4.3	-4.7	-832
北限との差		-16	-5.1	-8.4	-811
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
長万部町北豊津	C	-4.7	20.6	7.2	1405
南限との差		-6.5	-3.4	-4.2	-664
北限との差		-13.5	-4.2	-6.9	-642
30,000 yBP/analogue	古植生型	現在の1月気温	現在の8月気温	年平均気温	降水量
江差町東山	C	-1.4	22.3	9.6	1209
南限との差		-9.8	-5.1	-6.6	-467
北限との差		-16.8	-5.9	-9.3	-446

表 2-19 調査地の現在と 30,000yBP の古植生型分布地（南限と北限）の気象資料の比較

2.4

表 2-20 に花粉分析によって復元された、各調査地点の過去 3 万年間の年間平均気温を示す。

2.5 積雪分布

永久凍土の形成条件として、気温と積雪条件が重要となる。積雪の効果が無視できれば、北極域の永久凍土分布南限は年平均地表面温度が 0℃の地点に一致するはずである。しかし、実際には-2℃等温線が南限となる。気温と地表面温度のズレは無論あるものの、積雪による断熱効果がより大きい。そこで北海道での積雪分布（根雪期間と最深積雪値）について検討を加える。福田(1982)は、北海道各地で自然積雪と無積雪条件での地盤凍結の分布と変動を調べた。積雪による季節凍土の深さは、単に最深積雪値だけでなく、断熱効果が有効となる積雪が何時の時点でどの厚さまで積もるかが重要となるからである。例えば帯広（1975～76）では積雪深さが 30cm に達したのは 1 月初旬であった。この時点までの地盤凍結深さは 41cm であった。その後は 30cm を超える積雪のために、自然積雪下ではほぼ 41cm を保っていた。無積雪地点では最深凍結深さは 83cm に到達した。この期間の凍結指数は 771℃・day であった。同じ年の冬季で旭川での凍結指数はほぼ同じであったが、11 月初めから 30cm を超える根雪があり、地盤凍結は発生しなかった。そこで北海道内の積雪分布の特徴を、経過時間ごとの変動を 30 地点から分類する。つまり冬の初期にかなりの積雪がある場合と、冬の中期から後期にかけてドカ雪型の積雪がある場合である。脊梁の日高山脈で大きく北海道を西と東に分ける。西側では 1 2 月初めには根雪に覆われる。降雪をもたらす大気は、優勢なシベリア高気圧からの吹き出しによってもたらされる。こうした湿って寒冷な気塊は、脊梁山脈の手前側に大量の降雪をもたらす。したがって、東側では乾燥した大気が吹き下ろし、積雪に至らない。

冬季の中頃から、シベリアの高気圧の勢力が弱まると、いわゆる台湾坊主とよばれる低気圧が日本列島の東側の太平洋上を北上する。これが北海道に接近し、オホーツク海に抜けるコースをとる場合には、北海道東側にドカ雪をもたらす。そこで、北海道での積雪分布は、大きく東西で、最深積雪値と根雪発生時期が異なってくる。

本解析では、永久凍土に影響する積雪分布を以下のように分類した。

(1) 北海道西側

12 月 1 日から 2 月 1 日までの期間には、最深積雪の 50%の積雪が安定して覆う。

2 月 1 日から 3 月 1 日までは最深積雪が覆う。

3 月 1 日以降消雪日（4 月 1 日）までは最深量の 50%が覆う。

(2) 北海道東側

1 月 15 日から 2 月 15 日の間には、最深積雪の 50%が覆う。

2 月 15 日から 3 月 15 日の間には最深積雪が覆う。

3 月 15 日から 4 月 15 日までは最深積雪の 50%が覆う。

上記の変動を計算時パラメーターとして入力した。また各地の最深積雪値は、日本雪氷学会北海道支部編「北海道の雪氷」(1986)にまとめられた値を用いた。

表2-20 解析条件

		30ka	25ka	20ka	18ka	16ka	14ka	12ka	10ka	8ka	6ka	4ka	2ka	現在
劍淵	北限	0.3	0.3	0.3	-5.3	-5.3	-5.3	-5.3	-5.3	0.3	5.3	5.3	5.3	5.3
	南限	3.0	3.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	8.5	8.5	8.5
富良野	北限	0.3	0.3	0.3	-5.3	-5.3	0.3	0.3	-5.3	3.6	3.6	3.6	5.3	5.8
	南限	3.0	3.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.3	6.6	6.6	6.6	8.5	5.8
石狩平野	北限	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	3.6	5.3	5.3	5.3	3.6	7.4
	南限	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	6.6	8.5	8.5	8.5	6.6	7.4
黒松内	北限	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	-1.0	-1.0	5.3	5.3	5.3	5.3	7.1
	南限	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	4.5	8.5	8.5	8.5	8.5	7.1
十勝平野	北限	0.3	0.3	0.3	-5.3	-5.3	0.3	0.3	-5.3	3.6	3.6	3.6	5.3	5.8
	南限	3.0	3.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.3	6.6	6.6	6.6	8.5	5.8

3. 永久凍土形成深度の解析

3.1 数値解析

気候変動に伴う永久凍土深度の変動を、数値シミュレーションを用いて解析した。以下に、本解析で用いた計算コード (Paleo_Permafrost) のアルゴリズムの概略を記す。

永久凍土層は、複数年にわたって温度が氷点 (= 0°C) を越えない層として定義される。従って、与えられた気候条件下での永久凍土の形成深度を知るためには、地中の温度分布変動を知る必要がある。すなわち、この問題は地表面温度を境界条件として与え、その結果生じる土中の熱の流れを解くという、一次元の熱伝導問題を解くことに帰着される。

ただし、この問題は土壌の凍結・融解、すなわち媒質の相変化考慮した上で解く必要があり、相の境界が移動する「移動境界値問題」の一種である。移動境界の位置が未知であることから、基礎方程式である熱伝導方程式が線形であるにも関わらず、水の潜熱を考慮することで非線形問題となるため、厳密解を得ることは難しく、また適用範囲も狭い。そこで基礎方程式を差分近似し、数値解法により解の時間発展を求める方法を用いる。

本解析では、前進差分スキームを用いて1次元鉛直座標系での熱伝導の時間発展問題を解いた。潜熱の扱いはコンベンショナル法を適用し、土壌中での水分移動は無視した。各グリッドは温度と熱伝導率の値を持ち、土質の違いによる熱伝導率の違いは考慮することが出来る。上端の境界条件として地表温度を与え、この値を変化させることで気候変動を考慮する。冬季の積雪による効果も考慮されている。

以下、詳細を項目別に述べる。

基本方程式

本解析では、地中の熱は熱伝導によってのみ伝わるとし、土壌水分ないしは他の物質の移動による熱輸送は考えていない。従って基本方程式は以下の熱伝導方程式となる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_u \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.2)$$

ただし、 T は温度、 t は時間、 x は座標軸（鉛直下方を正）、 κ は熱拡散率であり、添え字の u と f はそれぞれ未凍土 (unfrozen) と凍土 (frozen) を表す。

差分化

基本方程式を時間積分する手法としては、斎藤(1986)に示された時空間多点前進差分法 (MAB法) を用いる。この計算法は前進差分スキームの一種であるため計算時間が短くすむこと、また時間差分は3点を用いており、時間について2次・空間について4次の高い精度を持ち、計算ステップが多い場合も誤差を小さく押さえることが出来る点が特徴である。

ただし、前進差分である以上、解が安定に収束するためには、安定性条件を満たす必要があり、空間差分・時間差分の値の取り方はその範囲内に限定される。すなわち、空間グリッドを小さくすると、その分時間刻みを小さくしなければならない。

本解析では、空間差分は1 m、時間差分は1日として計算を行った。

土質条件

土質は5層までの違いを考慮できる仕様とし、それぞれについて現実の土質調査で得られた熱伝導率を与えた。いずれも、凍土と未凍土での熱伝導率の違いを考慮するため、土壌温度が零度未満が否かによって場合を分け、該当する熱伝導率を与える。土壌水分は、全層で一定とし、一律に10%とした。

潜熱

凍結・融解に伴う潜熱の扱いはコンベンショナル法に基づき、凍結面での熱収支を計算することで、その深さを決定する方法を取る。この方法は、凍結面を挟んでの熱量の釣り合いが成立しているため、凍結面の位置を正しく再現できる。その手順を以下に示す；

- (1) 基本方程式に従い、潜熱の効果を考慮せずに次の時間ステップの温度分布 T_n を計算する。
- (2) 前の時間ステップで凍結の起きていたグリッドではその温度を 0°C に固定する。
- (3) この時、(1)で求めた T_n との温度差から、時間刻み dt の間にこのグリッドに流入した熱量を求める。
- (4) 流入した熱量は積算し、このグリッドの持つ潜熱に達したとき、このグリッドの凍結・融解が完了し、凍結面は次、または一つ前、のグリッドに移動する。

本解析では、永久凍土の上面から融解が進むような、複数の凍結面が存在する場合の計算にも対応し、3つまでの凍結境界面を想定することが出来る。これにより、タリク（永久凍土中の融解層）の再現も可能となった。

境界条件と積雪の効果

計算の境界条件は、モデルの上端（地表面）で地表温度を時間の関数として与え、下端で地殻熱流量を与える。地殻熱流量は現在の値 ($50[\text{mW}/\text{m}^2]$) で一定とした。

地表温度の季節変化は三角関数的な変動を仮定し、年間の気温振幅をパラメータとして与えている。花粉分析の結果に基づいて年平均気温の変動を復元し（表 2-20）、これに従って長期の気候変動を表した。

冬季には、地表面の上に行き雪の熱伝導率を持った層を仮定し、地表温度は積雪層の上面に与えた。積雪量・雪の熱伝導率は季節進行と共に3段階に変化させて値を与え、降雪期間もパラメータとしてコントロール出来る。

初期条件

初期条件は、計算開始時の地表面温度と平衡な温度分布とした。地殻熱流量一定であることから、地表から地下に向かって各層の熱伝導率に応じた温度勾配が実現される。この状態を初期状態として、地表温度を変えていった時の土中温度の変化を計算していくことになる。

なお、今回いくつか行った計算の中では固定しているパラメータとして、土壌水分と地殻熱流量は本来変わりうるものである。

土壌水分の多いケースでの計算では、凍結融解に伴う潜熱発生が大きくなるため、凍結の進行はよりゆっくりとしたものになり、平衡に達するにはさらに時間が要する。また、地殻熱流量が大きければ、やはり凍結の進行は遅くなり、さらに平衡に達したときの凍結面の深さも今回のケースより浅くなる結果となる。

3.2 解析条件

数値解析のための各パラメータの条件は図 3-1 から図 3-11 に示したとおりである。古気温の復元は、花粉分析によって求められた対応植生に基づいている。対応する植生が分布する北限での値と南限での値をそれぞれ北限值・南限值として用い、分布の幅をおさえる手法を用いた。このため、調査地点のそれぞれにつき、寒冷的な条件（北限值）と温暖な条件（南限值）の 2 通りのパラメータ・セットが存在する。図 3-1 と図 3-2 は、北限值と南限值をそれぞれまとめ、温度変動を時系列にプロットしたものである。

また、積雪を考慮した場合の他に、積雪の効果を無視した場合も合わせて計算を行った。積雪を無視した場合、寒冷的な時期の地表面冷却が最大に作用するため、永久凍土形成の最大見積もりを与えることになる。

図 3-12 は各調査地点の土質調査に基づくモデル柱状図である。数値解析で用いた熱伝導率の値はこの図に基づいている。

地表面を覆う積雪は、その厚さと積雪期間によって凍土の形成に大きな影響を与える。最終氷期の積雪分布については、それを示す指標が存在しないため、現在の積雪深さ分布から推定する。最終氷期には、日本海の凍結が長い期間にわたるという仮定から、海からの水蒸気供給が減少していたと考えられることから、現在よりも積雪は少なかったと予想される。そこで現在の北海道最深積雪分布が、過去に発生した極大値であるとし、無積雪を極小値とする。

積雪がある場合の凍結への影響は、以下の手順で計算条件としてパラメータを決める。積雪期間については、現在の北海道における積雪変動を類型化し、北海道西側と東側に分類する。福田(1982)によれば、西側では季節風の吹き出しによる降雪が中心であるので、12月1日から根雪期間とする。12月1日から2月1日までを、最深積雪量の50%の積雪期間とする。その後2月1日から3月1日までを最深積雪期間とする。3月1日から3月31日までには再び最大値の50%積雪期間とし、4月1日を消雪日とする。

北海道東側では、冬の中頃から終わりにかけて、太平洋沿岸を移動する低気圧に伴う豪雪によって積雪が涵養されることから、根雪発生日を1月15日とし、2月15日までは最大値の50%が積雪として覆う。次に2月15日から3月15日までを最深積雪期間とする。消雪日は西側より半月遅く4月15日とする。

積雪は時間とともに密度が変化する。成瀬ら(1978)は札幌での平地積雪の密度の経時変化を求めた。それに基づき、積雪深さが最大値の50%の場合と最大値に達した場合について密度の変化を、0.2, 0.3(g/cm³)とした。冬の終わりには再び積雪が減少するが、他方密度は増加する。さらに Yen, Y.C.(1981)によれば、積雪の熱伝導率は密度を関数とした、以下の経験式で得ることが出来る。

$$\lambda = 2.22362 \times DS^{1.8585} \quad (3.3)$$

単位系は、 λ : W/mK, DS : Mg/m³ (g/cm³) である。従って経時変化する積雪密度から、熱伝導率の変化に置き換えることが可能となった。凍結深さの計算には、積雪深さと熱伝導率の経時変化が必要となるが、上記の方法で北海道の西側と東側の変動を推定した結果を図 3-13 に示す。

復元された年平均気温（北限值）

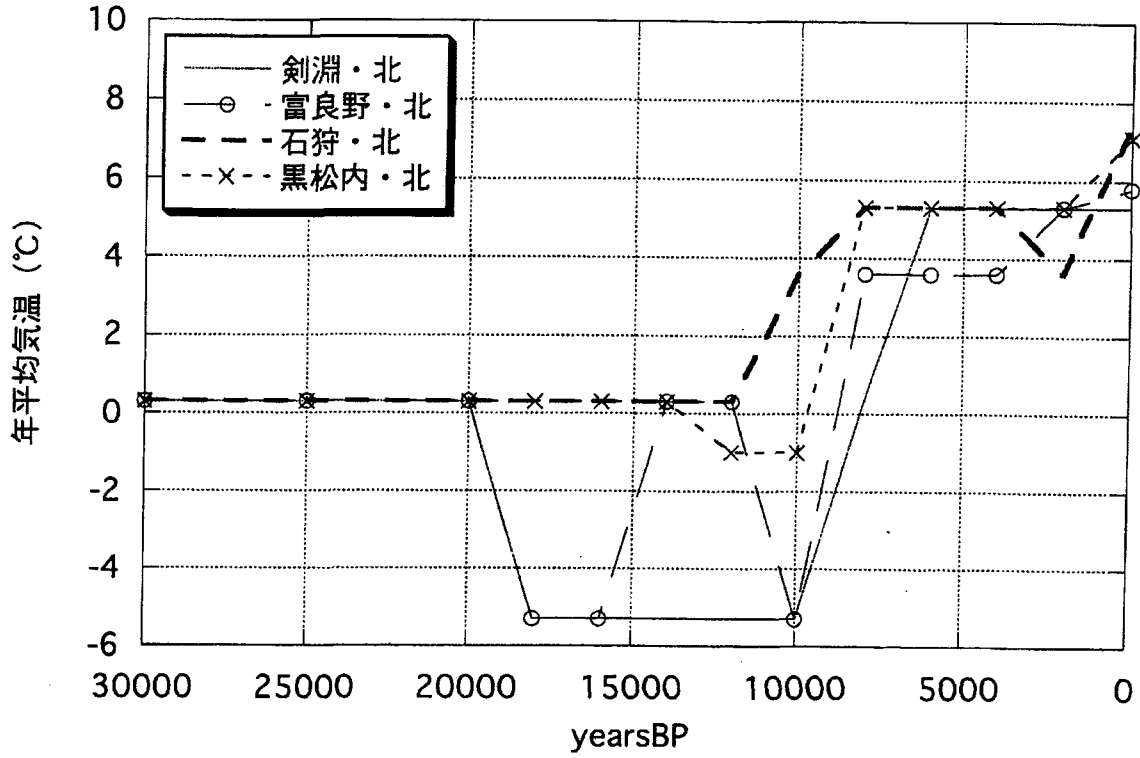


図3-1 復元された温度変動（北限值）

復元された年平均気温（南限值）

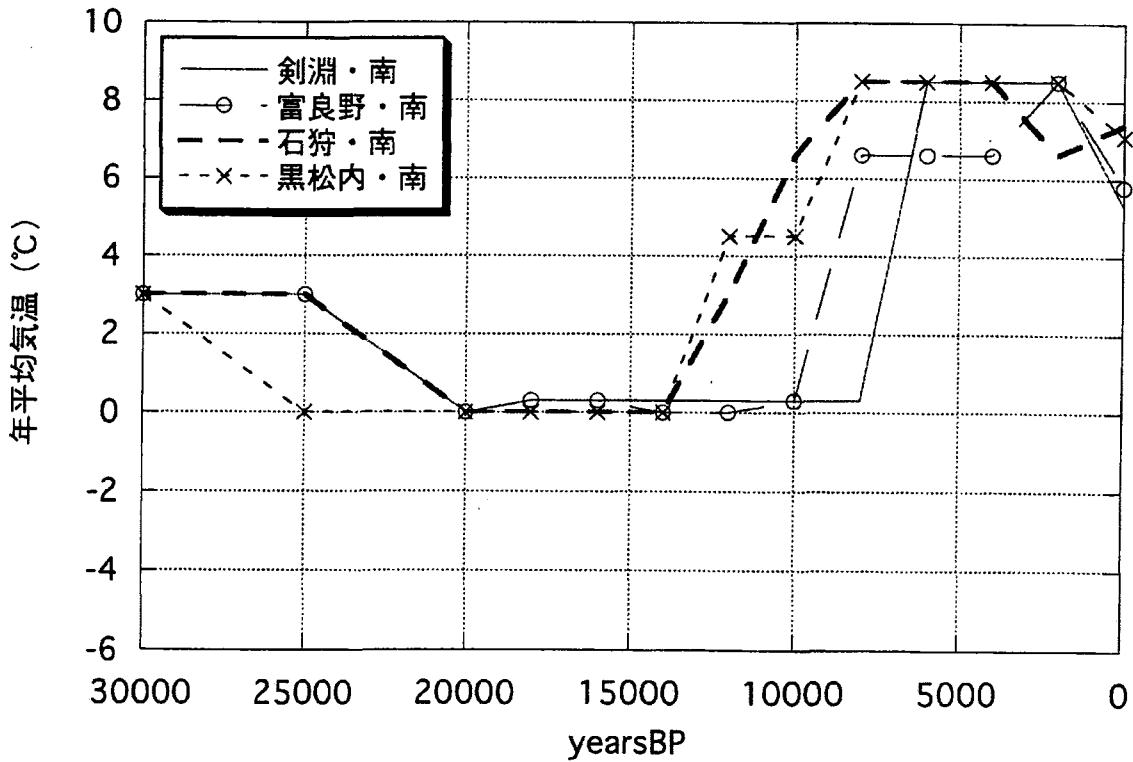
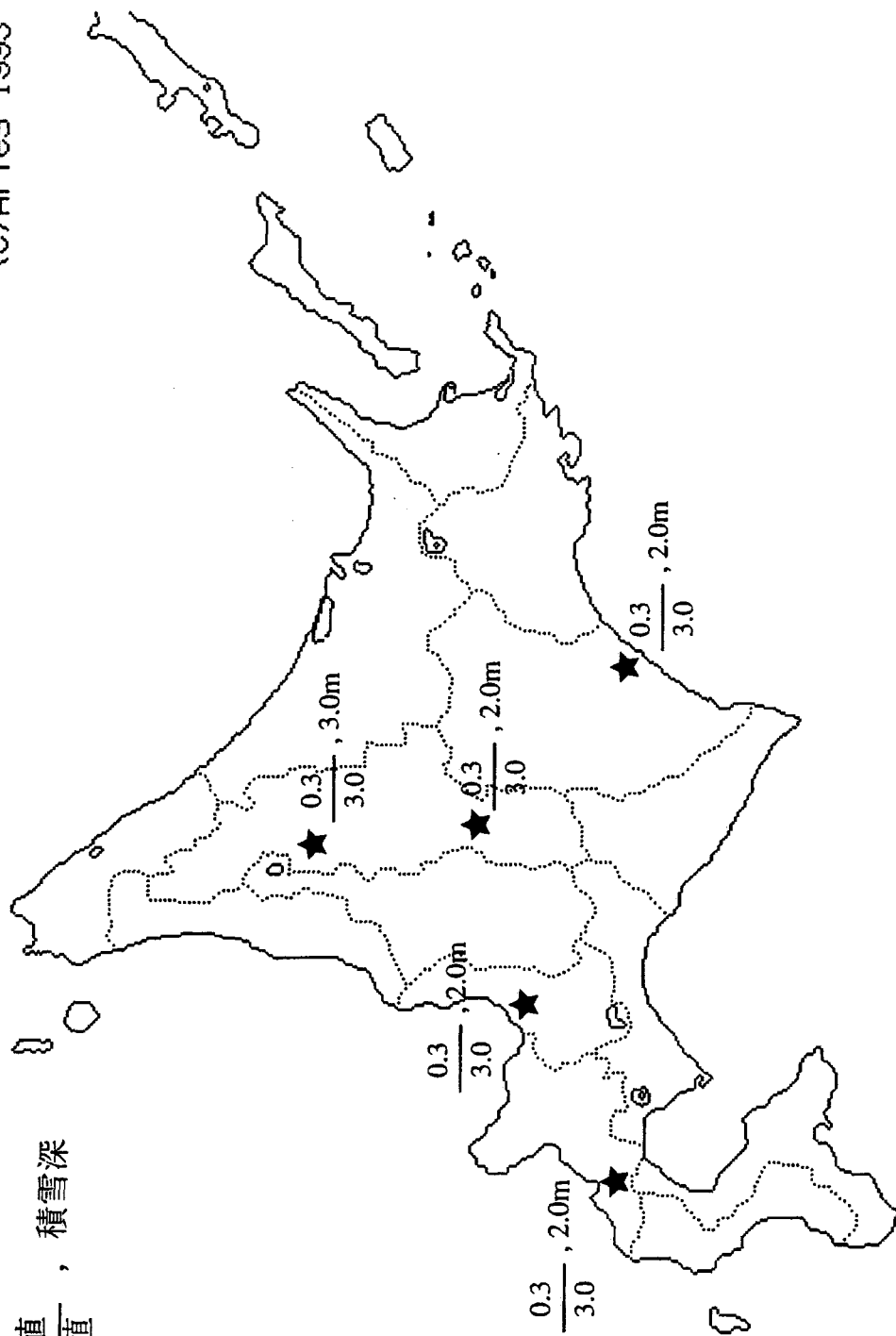


図3-2 復元された温度変動（南限值）

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993



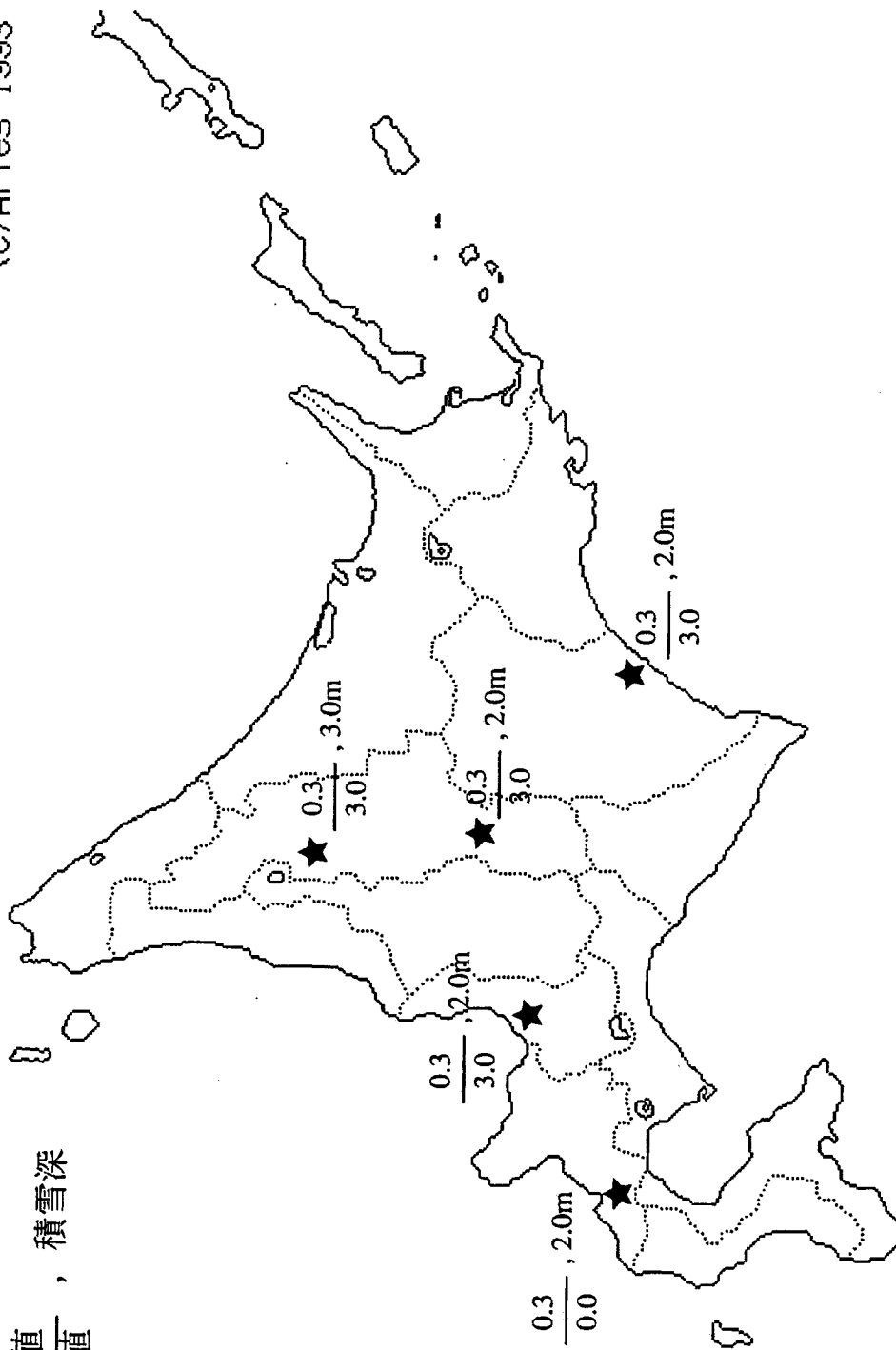
30000年前 (初期条件)

図 3-3 古気温と積雪深分布 (30000年前)

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993



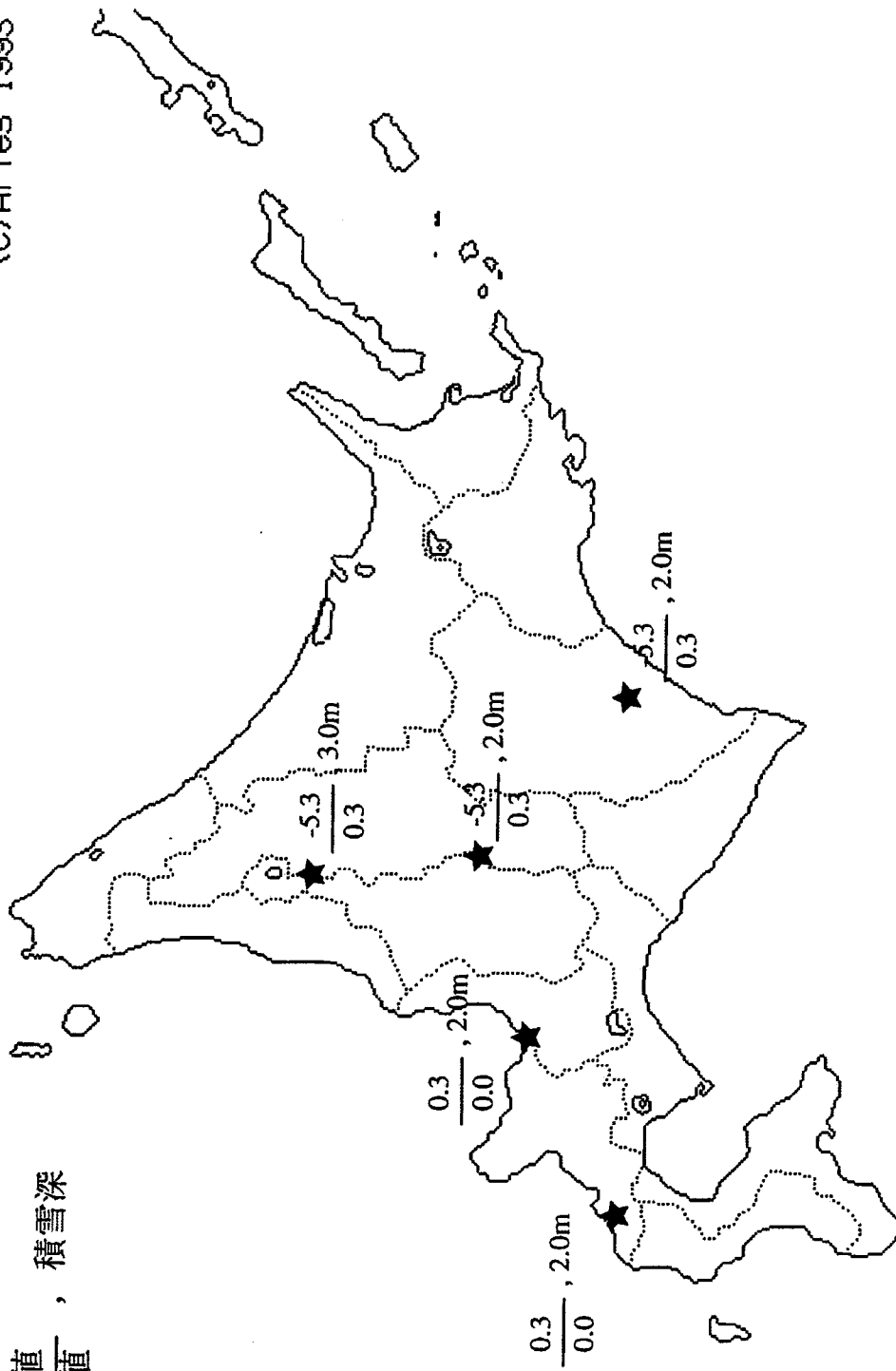
25000年前

図 3-4 古気温と積雪深分布 (25000年前)

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993

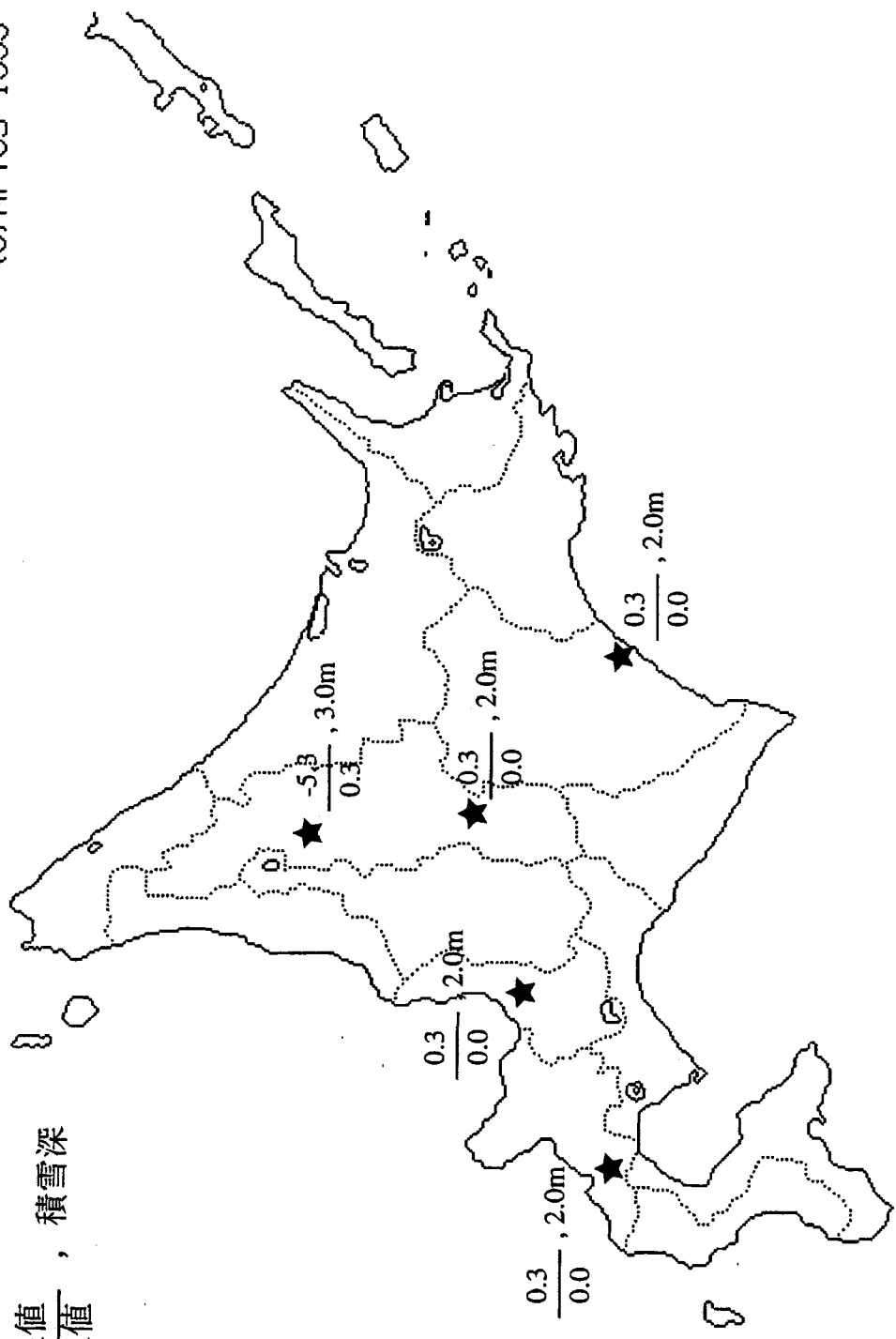


18000年前

図3-5 古気温と積雪深分布 (18000年前)

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

(C)Aries 1993



14000年前

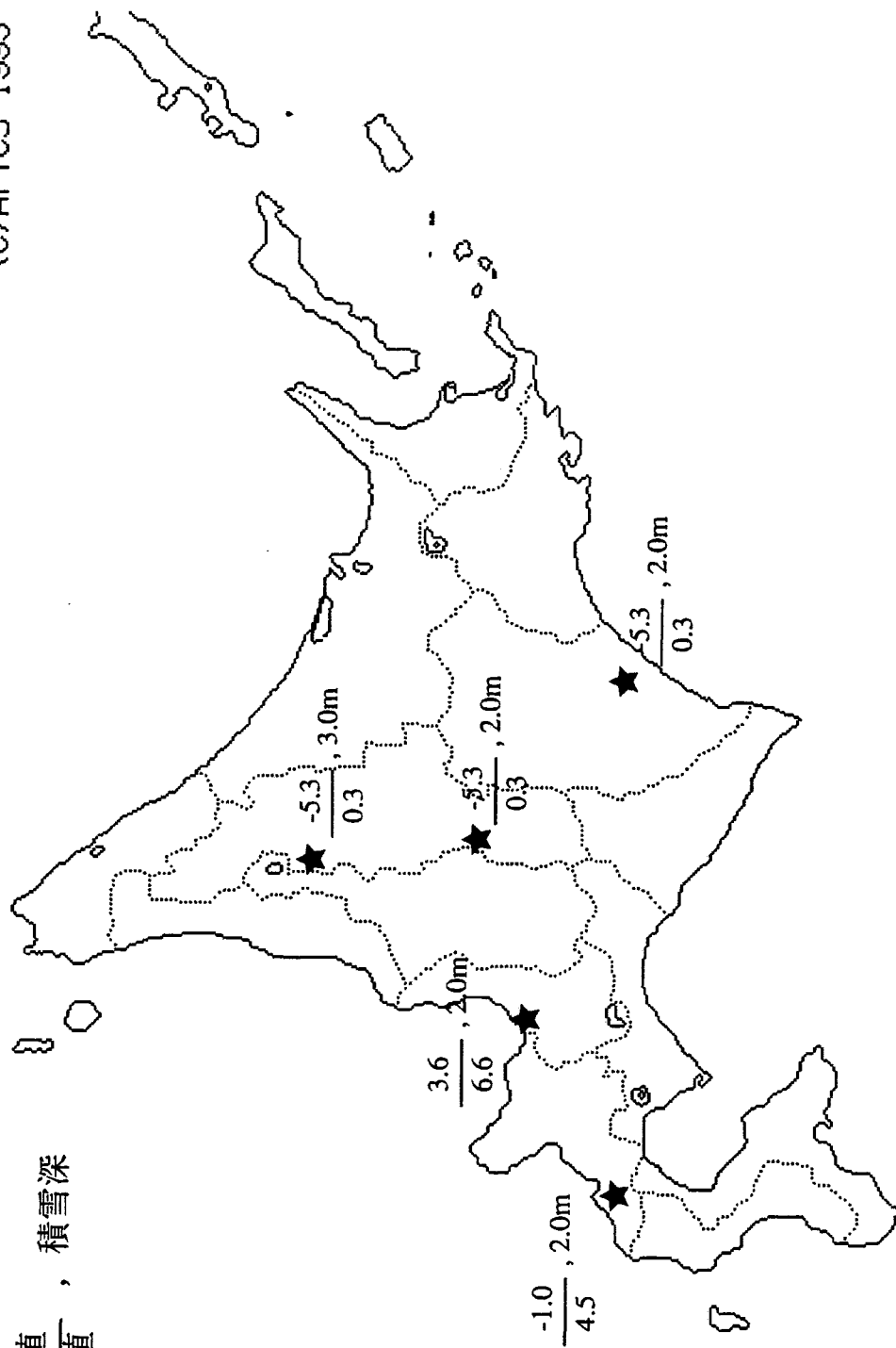
図3-6 古気温と積雪深分布 (14000年前)

入力条件:

古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993



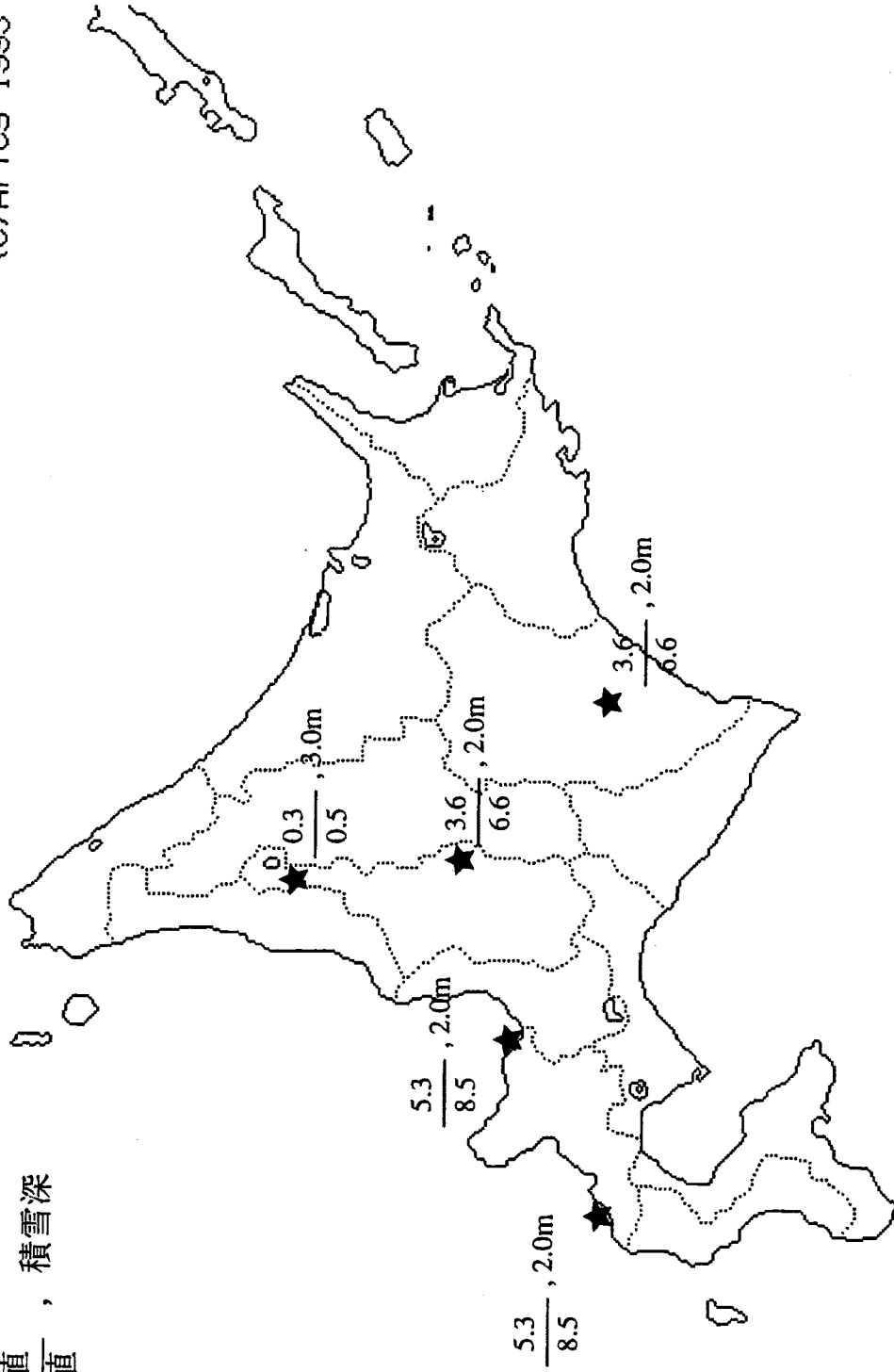
10000年前

図 3-7 古気温と積雪深分布 (10000年前)

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C) Aries 1993



8000年前

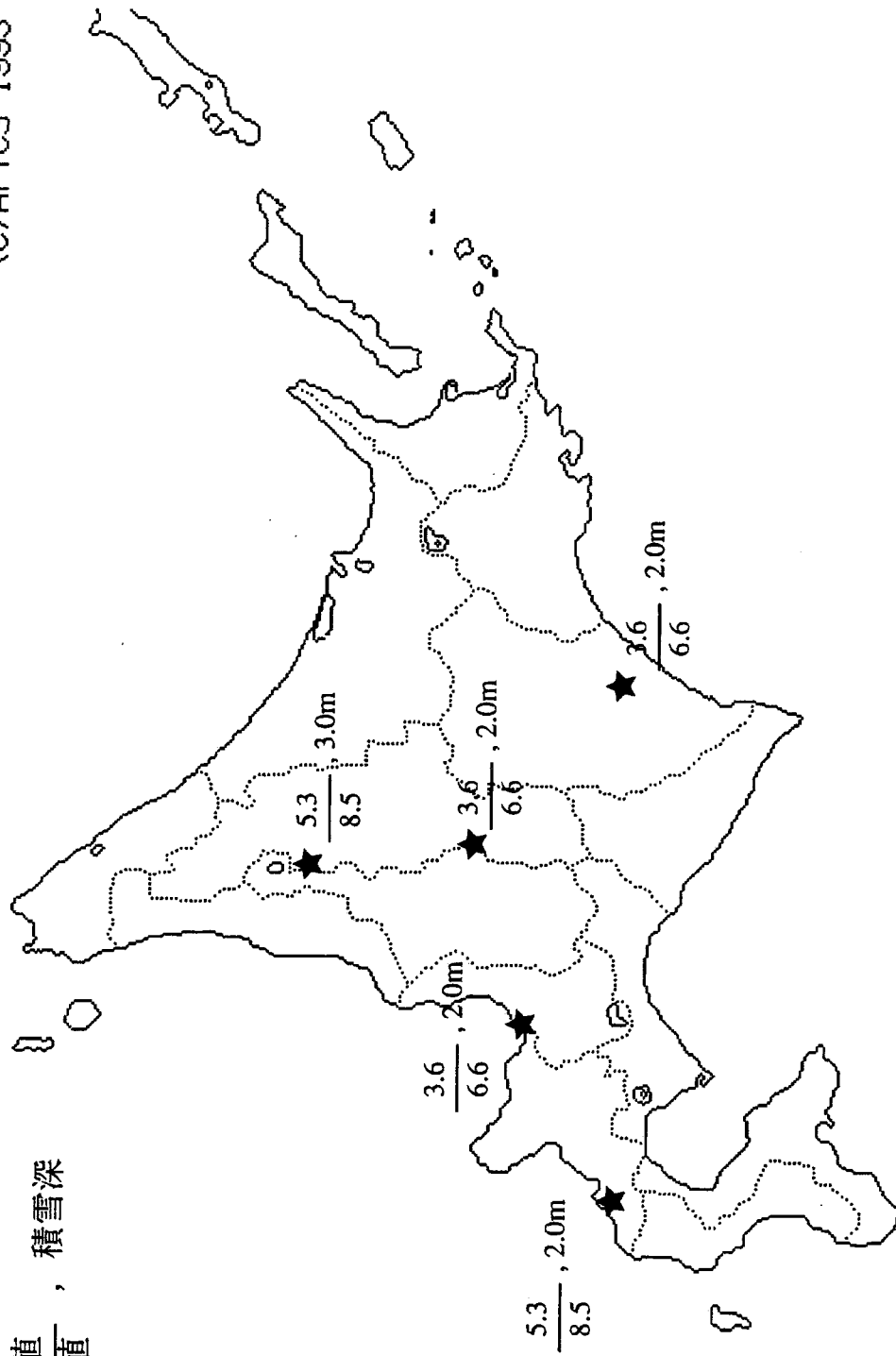
図 3-8 古気温と積雪深分布 (8000年前)

入力条件:

古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993



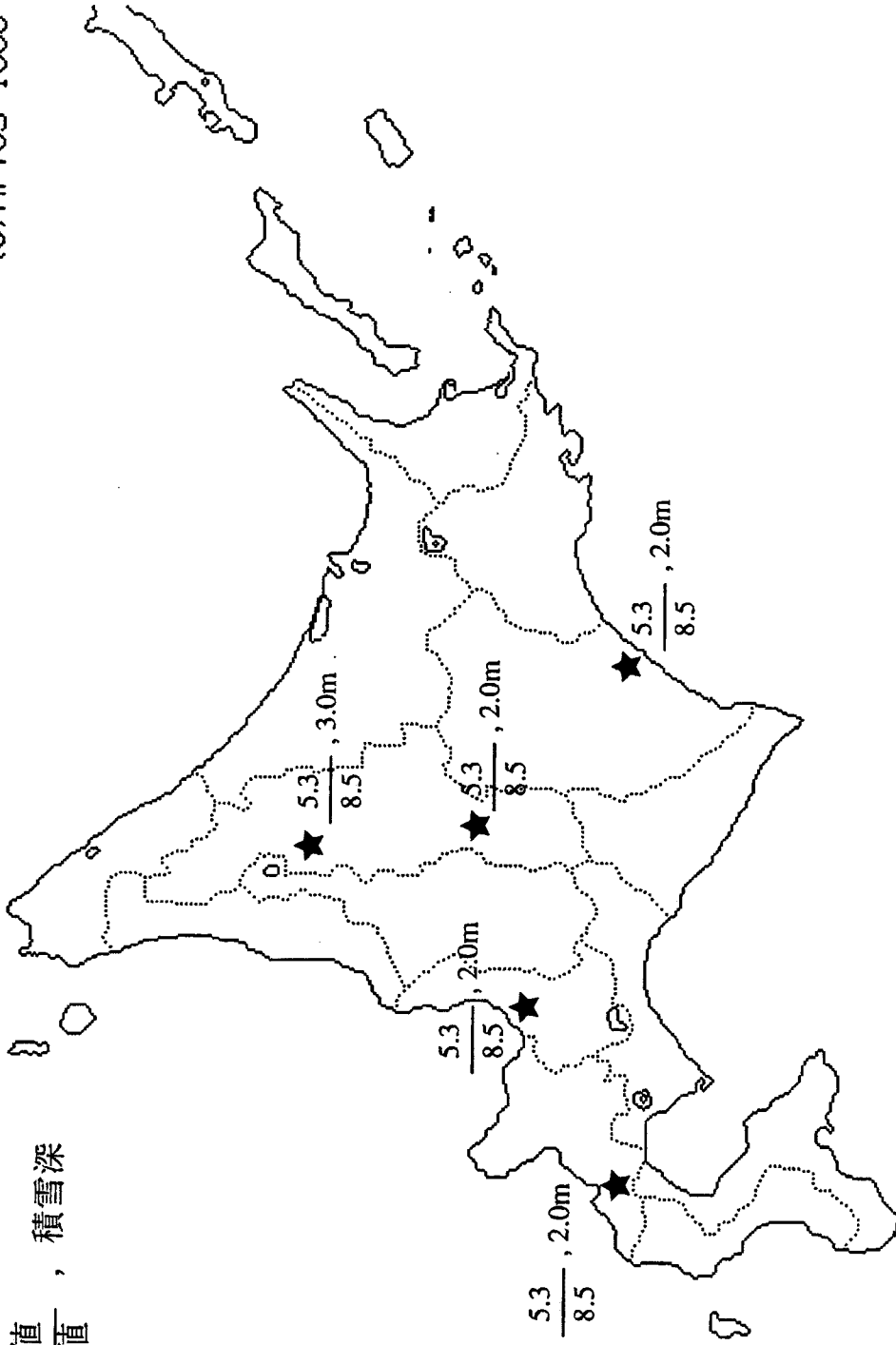
6000年前

図3-9 古気温と積雪深分布 (6000年前)

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993



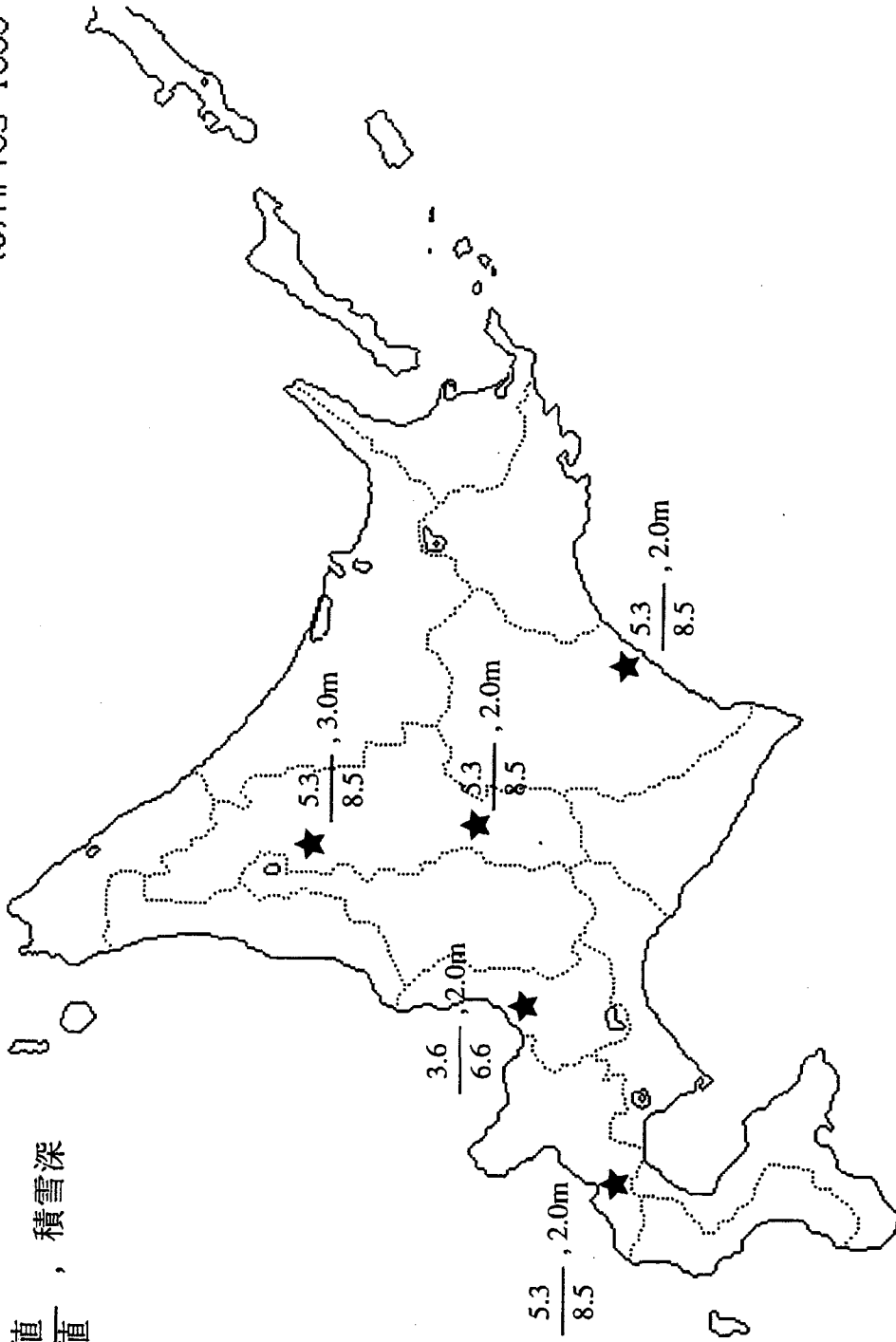
4000年前

図 3-10 古気温と積雪深分布 (4000年前)

入力条件：
古気温 (°C) ・ 冬季最大積雪深 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$, 積雪深

(C)Aries 1993



2000年前

図 3 -11 古気温と積雪深分布 (2000年前)

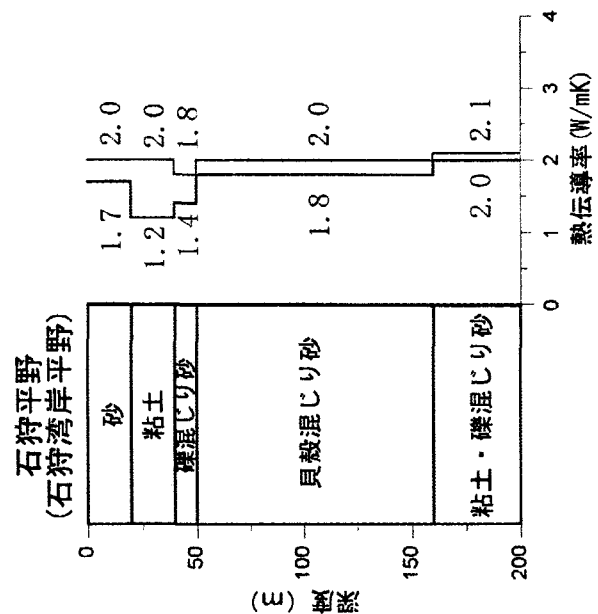
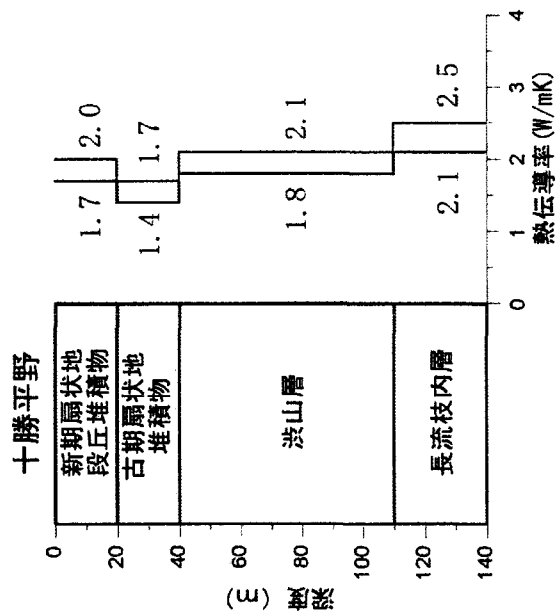
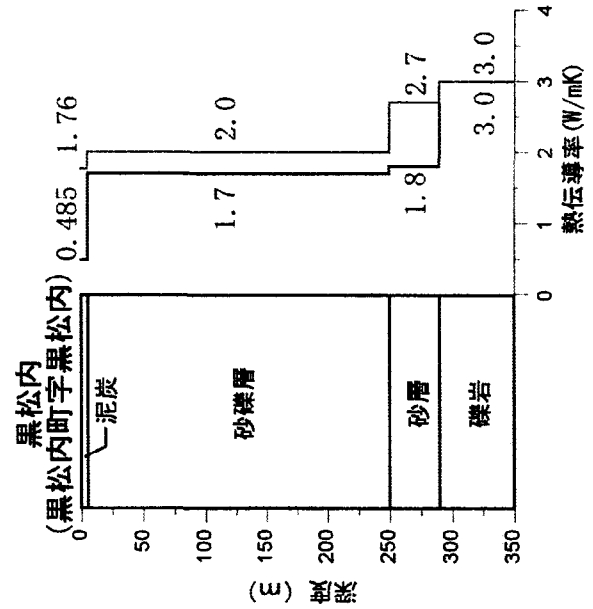
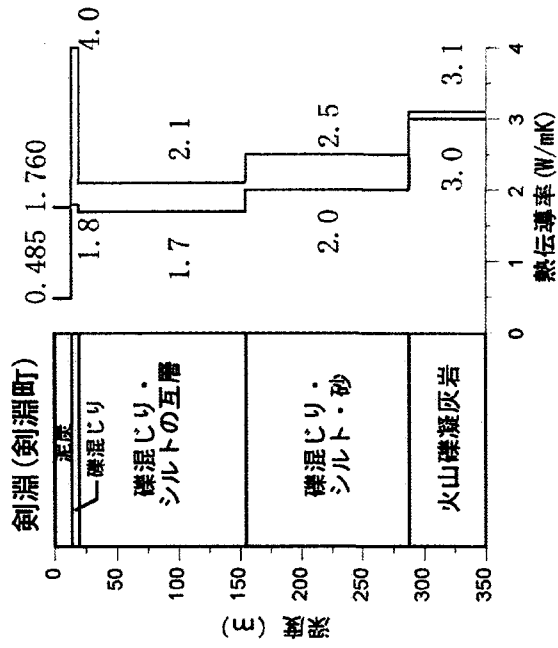
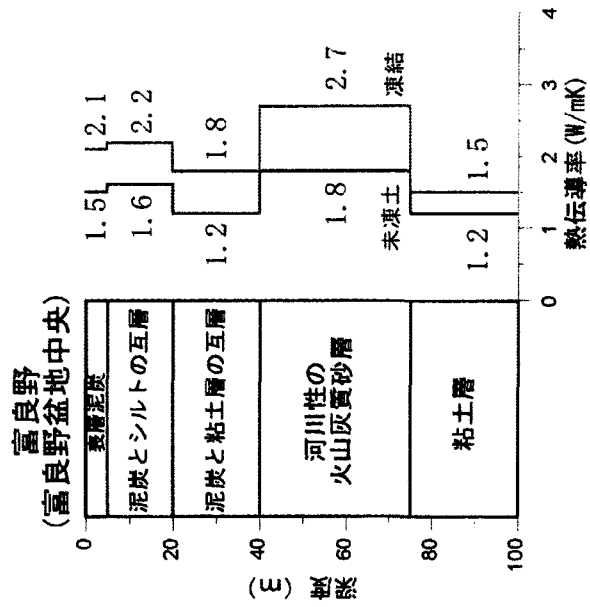


図 3-12 地盤性状と熱伝導率

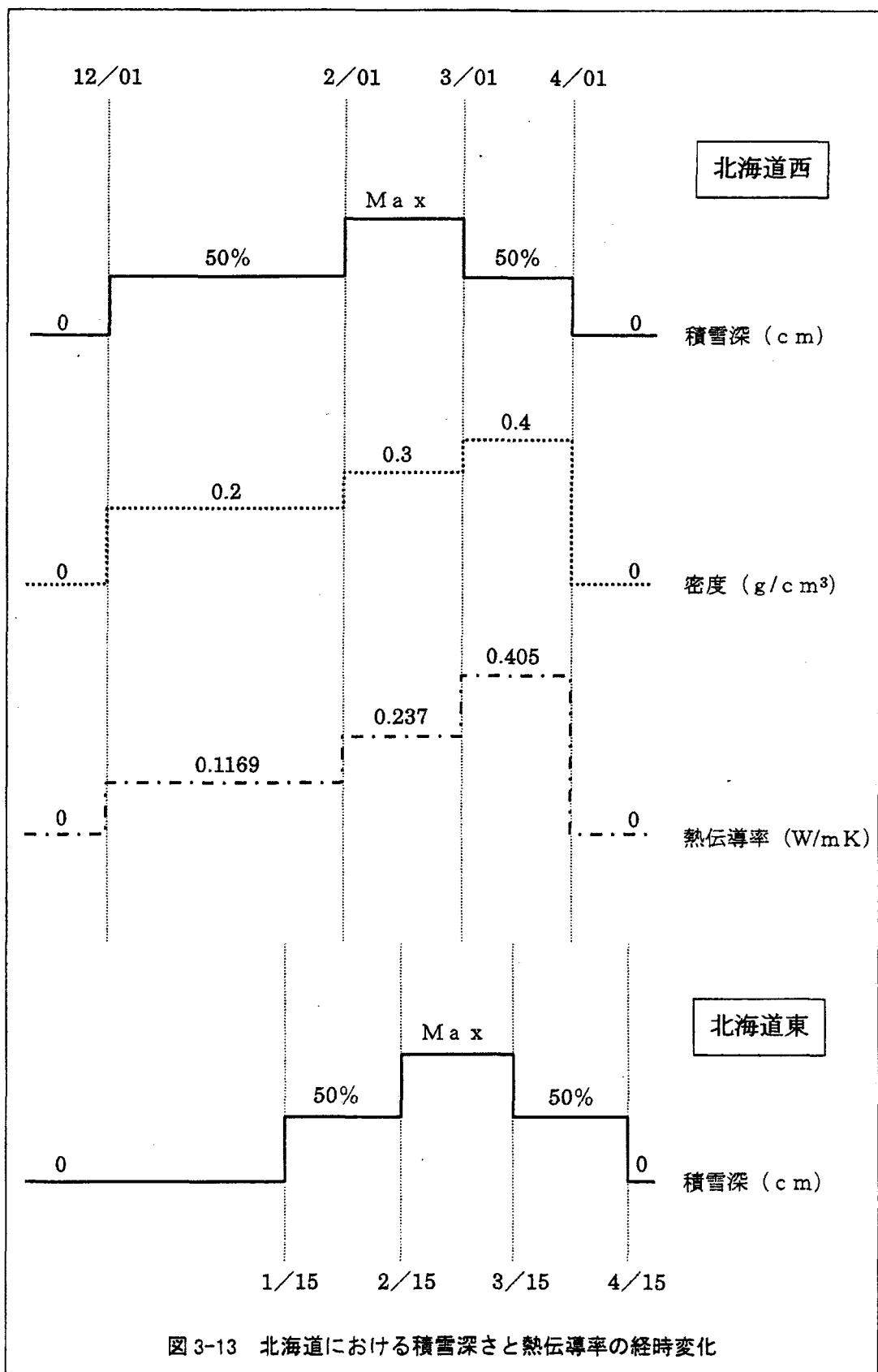


図 3-13 北海道における積雪深さと熱伝導率の経時変化

3.3 解析結果

解析結果は図 3-14 から図 3-49 に示した。図 3-14 から図 3-33 に各地点ごとの地温プロファイルの変動と永久凍土（あるいは季節凍土）の深さの変動を積雪がある場合とない場合、気温復元の北限值と南限值についてそれぞれ示してある。さらに図 3-34 から図 3-49 には、代表的な時代断面における永久凍土深の分布を地図上に表した。

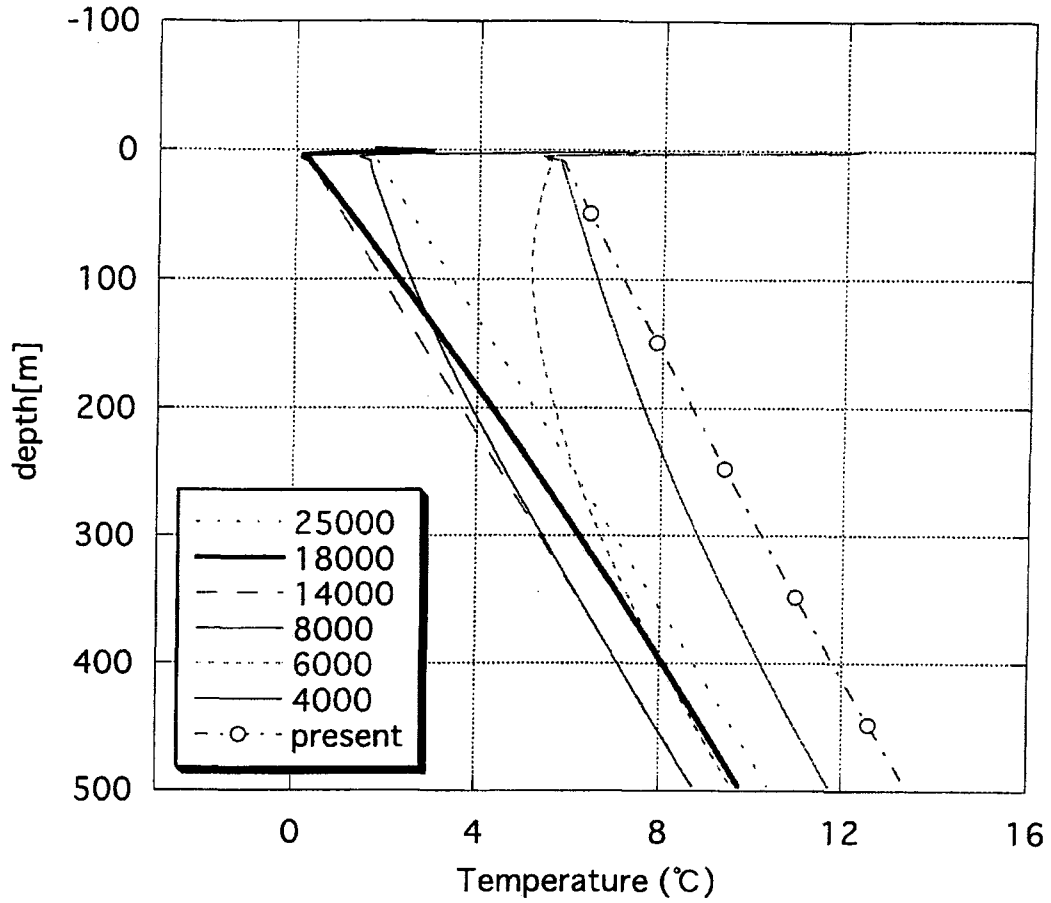
これらの結果から、北海道での永久凍土の発達に関しては、積雪条件・土質条件が非常に大事であることが分かる。

復元された古気温を見ると、最終氷期でも道央から道南にかけては年平均気温が 0°C を下回ることがほとんどなく、これらの地域では永久凍土が発達する可能性は低いと考えられる。積雪を考慮しない場合の計算結果はこのことをよく表しており、永久凍土が発達している釧淵・富良野・十勝のケースは、過去の長い期間にわたって、年平均気温が 0°C を下回っている。

一方で、積雪を考慮した場合に永久凍土が発達するのは、富良野の北限值の場合に限られる。十勝・釧淵の場合では積雪が効果的に冬季の地表面冷却を抑制し、永久凍土の大規模な発達を阻害している。

また、いずれの場合も古気温の復元が南限值の場合には永久凍土は発達していない。このことから、北海道の気候環境は、常に永久凍土帯に含まれるか否かのちょうど境界付近にあったと言える。過去に永久凍土が地下深くまで形成されたか否かは、微妙な境界条件の違いによって結論を変えなくてはならないが、現在、高山の一部を除き永久凍土が見られないことを考慮すると、あまり深い永久凍土が存在したと考えるのは困難があると思われる。

地温プロファイル（剣淵：北限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（剣淵：北限值・積雪あり）

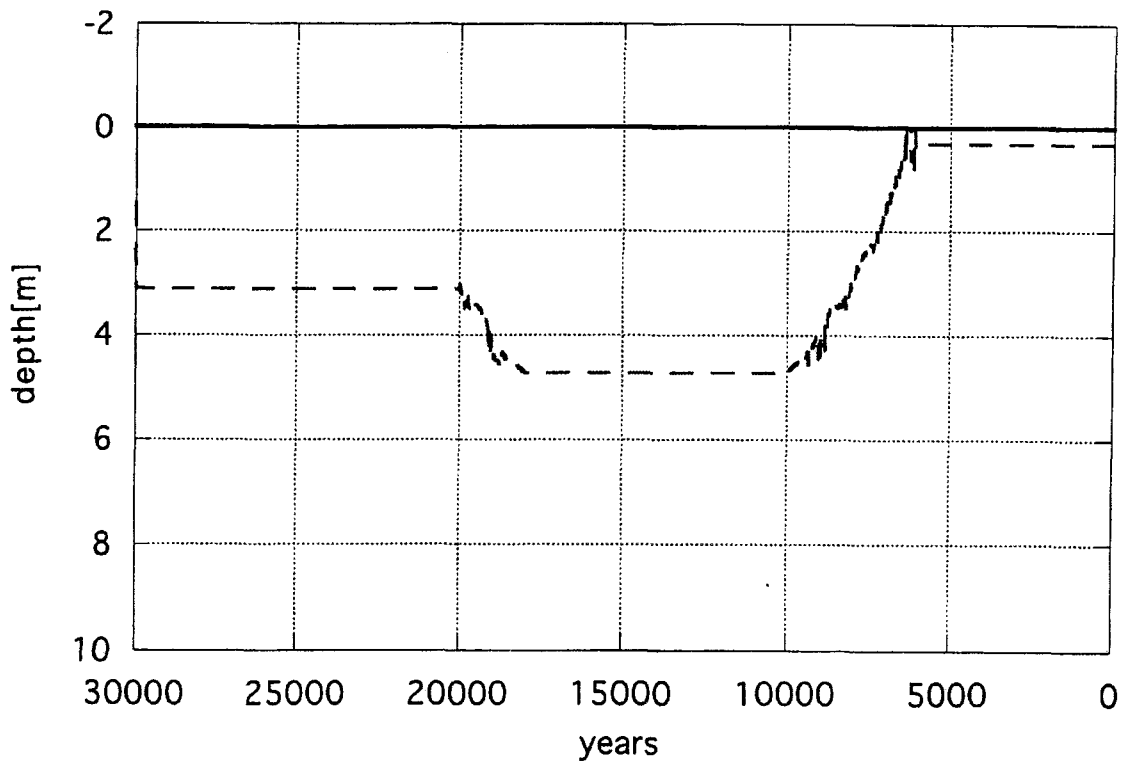
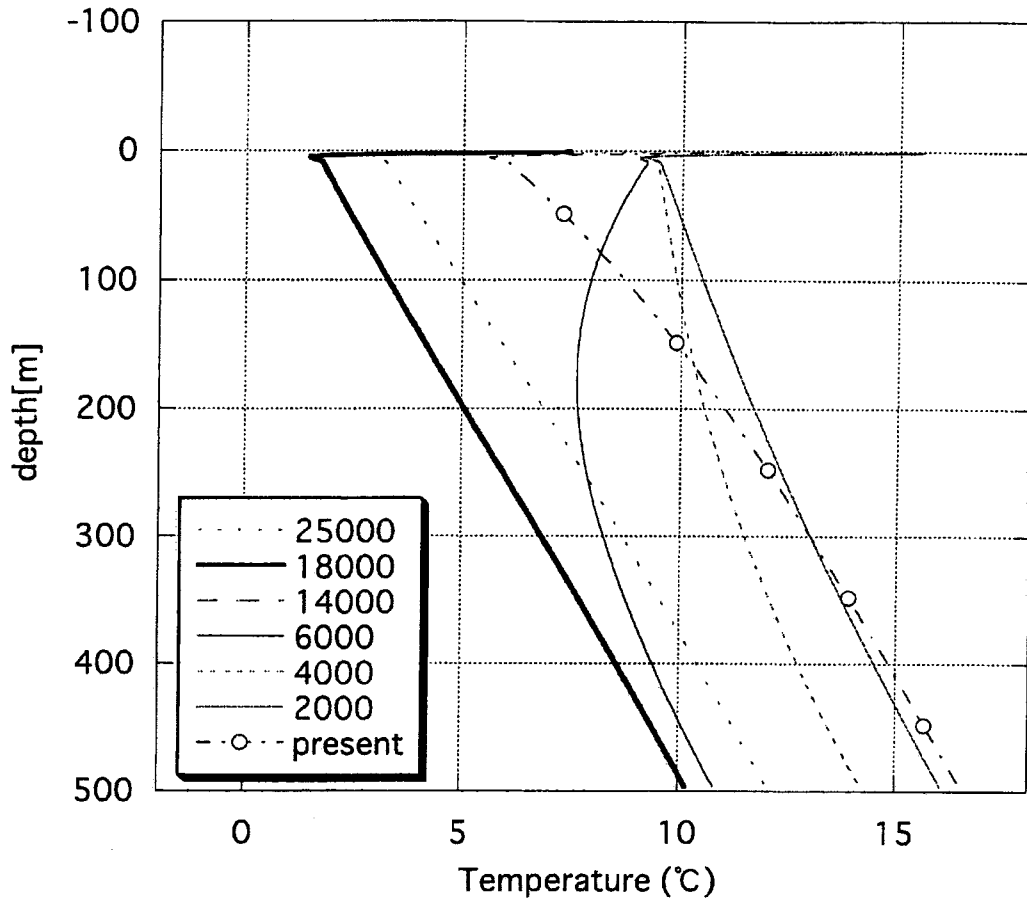


図3-14 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 北限值積雪あり

地温プロファイル（剣淵：南限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（剣淵：南限值・積雪あり）

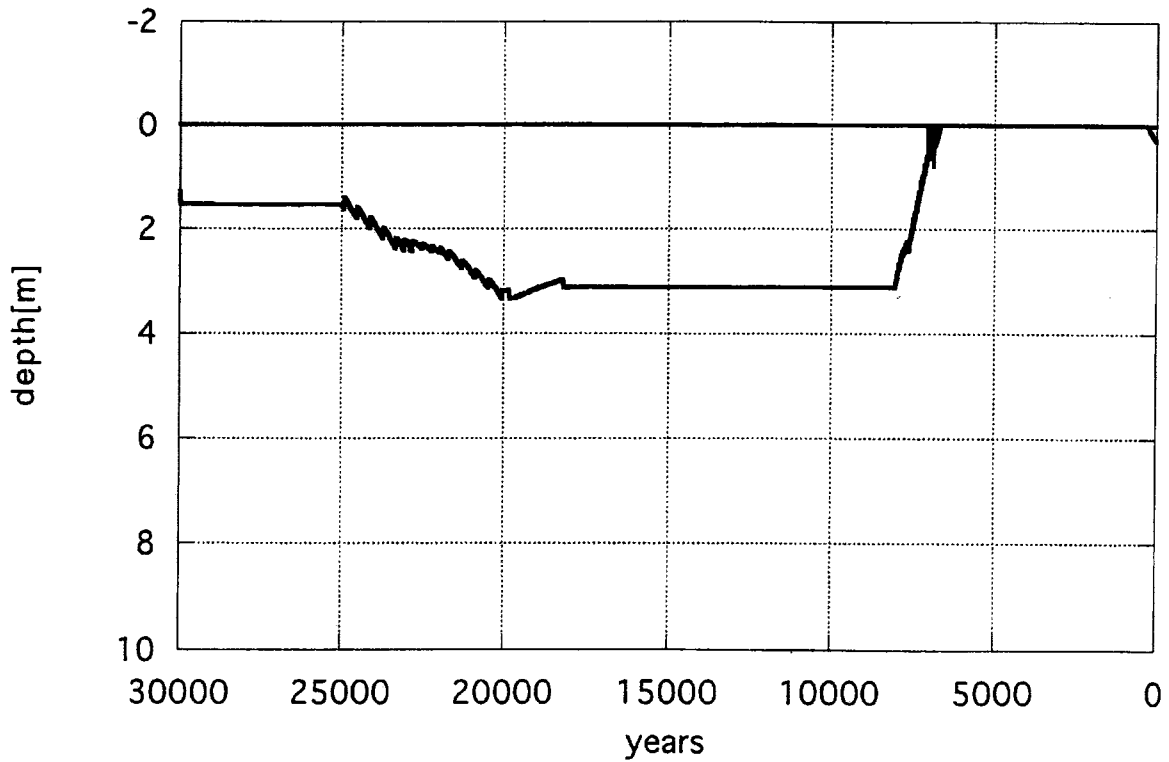
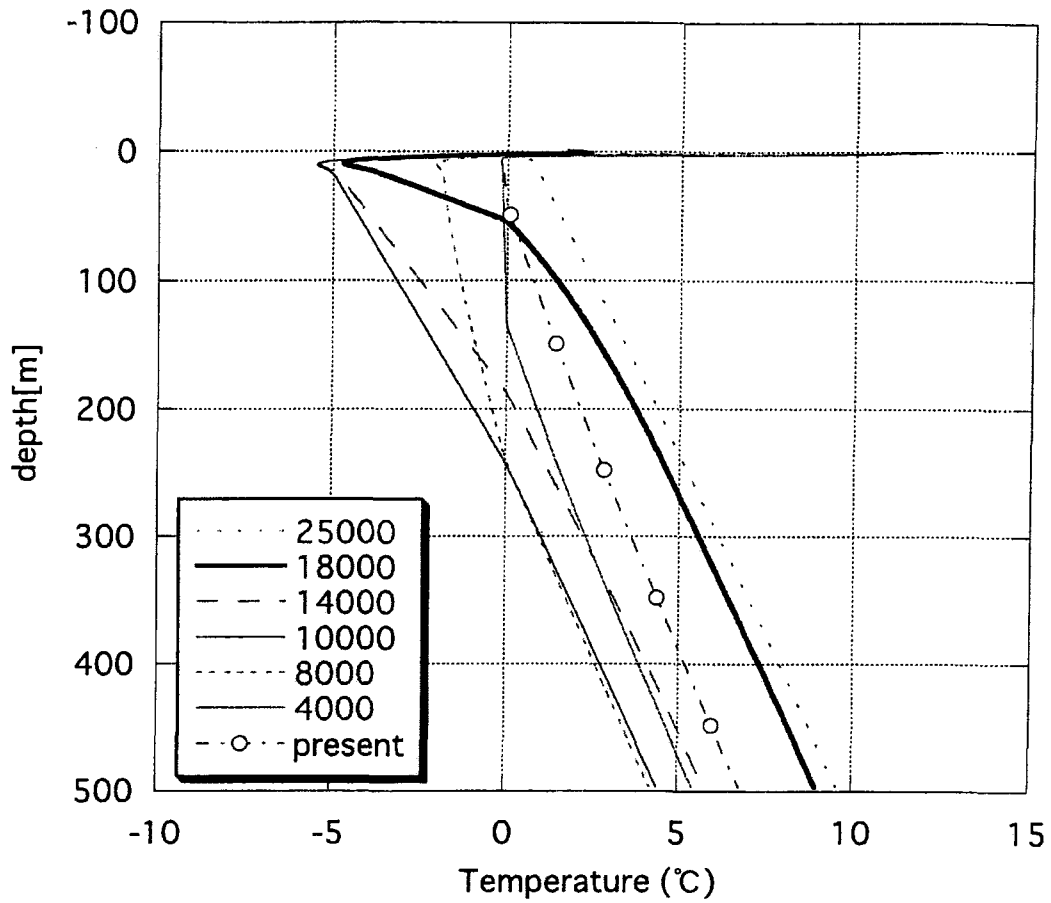


図 3-15 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 南限值積雪あり

地温プロファイル (剣淵：北限值・積雪なし)



剣淵：永久凍土深 (北限值・積雪なし)

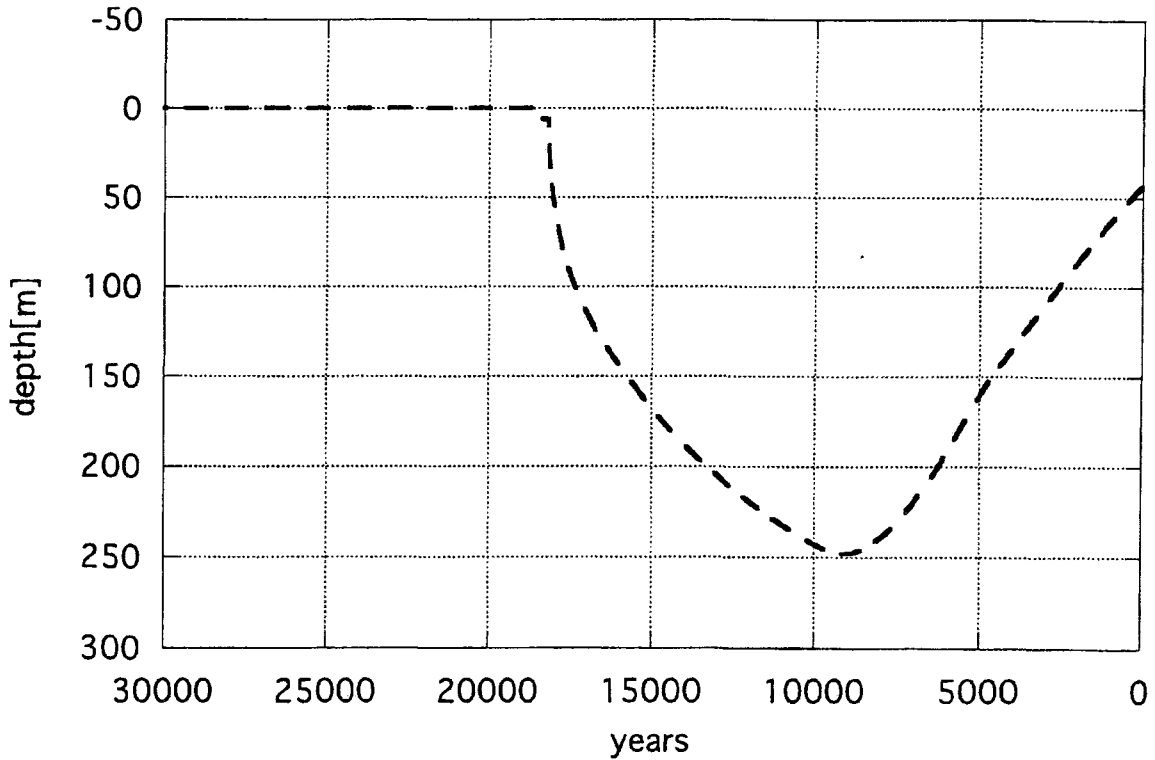
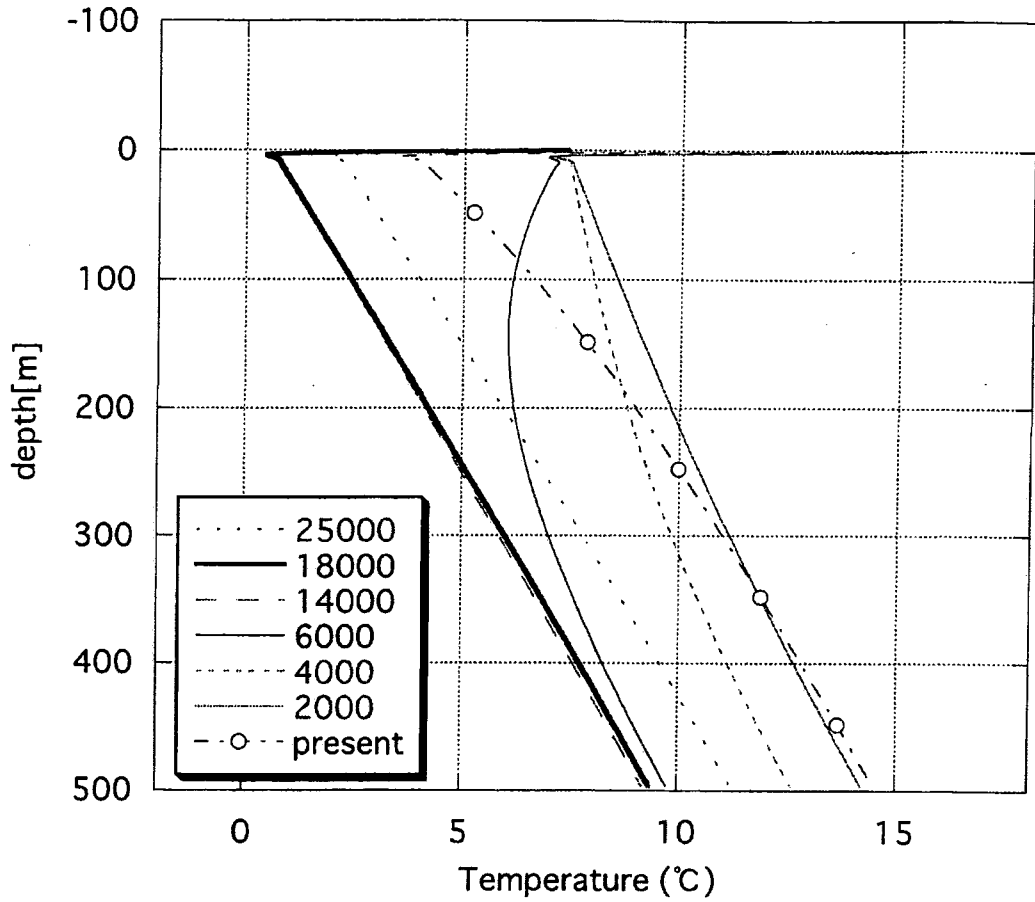


図 3-16 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 北限值無積雪

地温プロファイル（剣淵：南限值・積雪なし）



季節凍土・最大深度（剣淵：南限值・積雪なし）

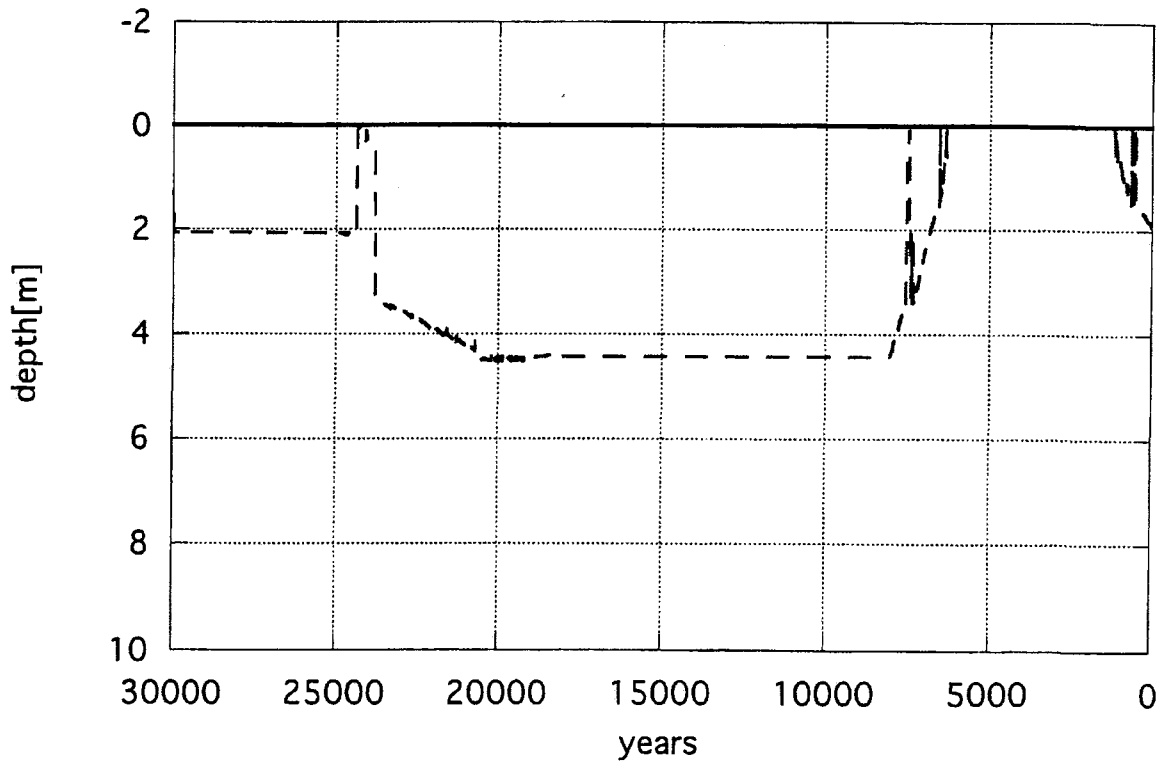
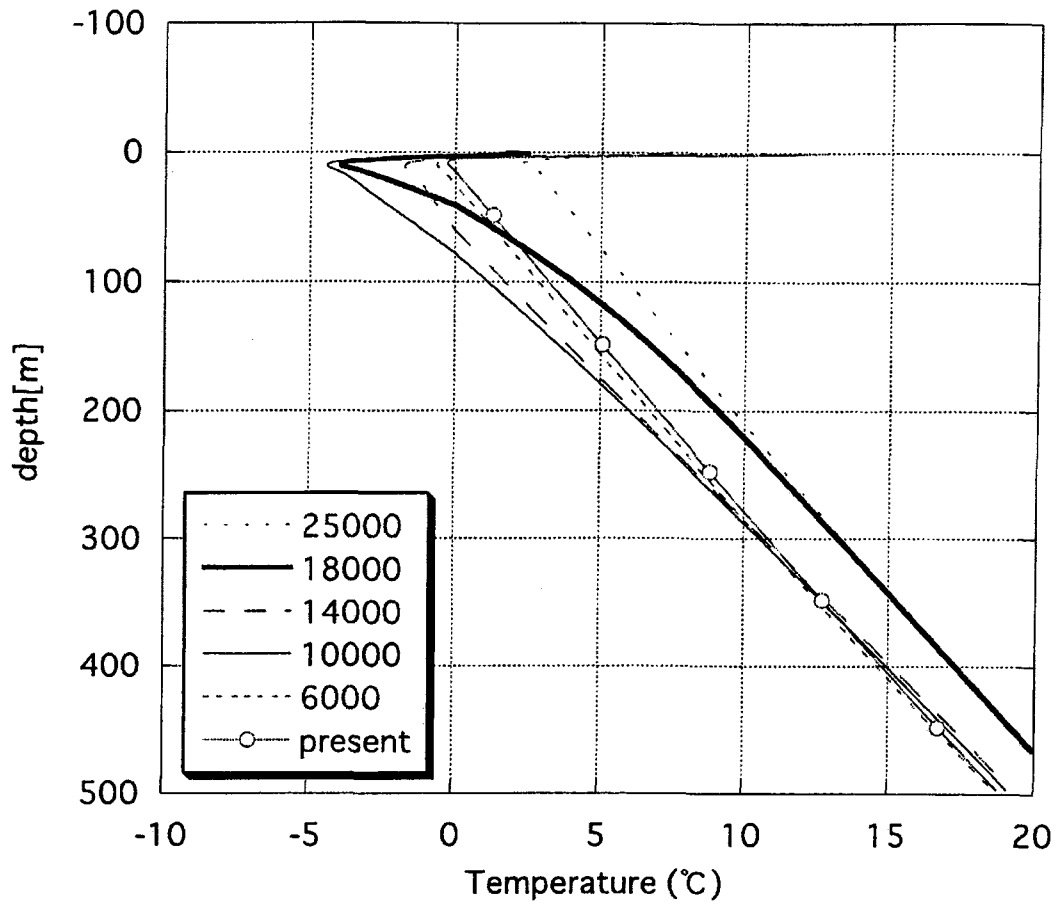


図3-17 地温プロファイル及び永久凍土深 剣淵 南限值無積雪

地温プロファイル（富良野：北限值・積雪あり）



永久凍土深（富良野：北限值・積雪あり）

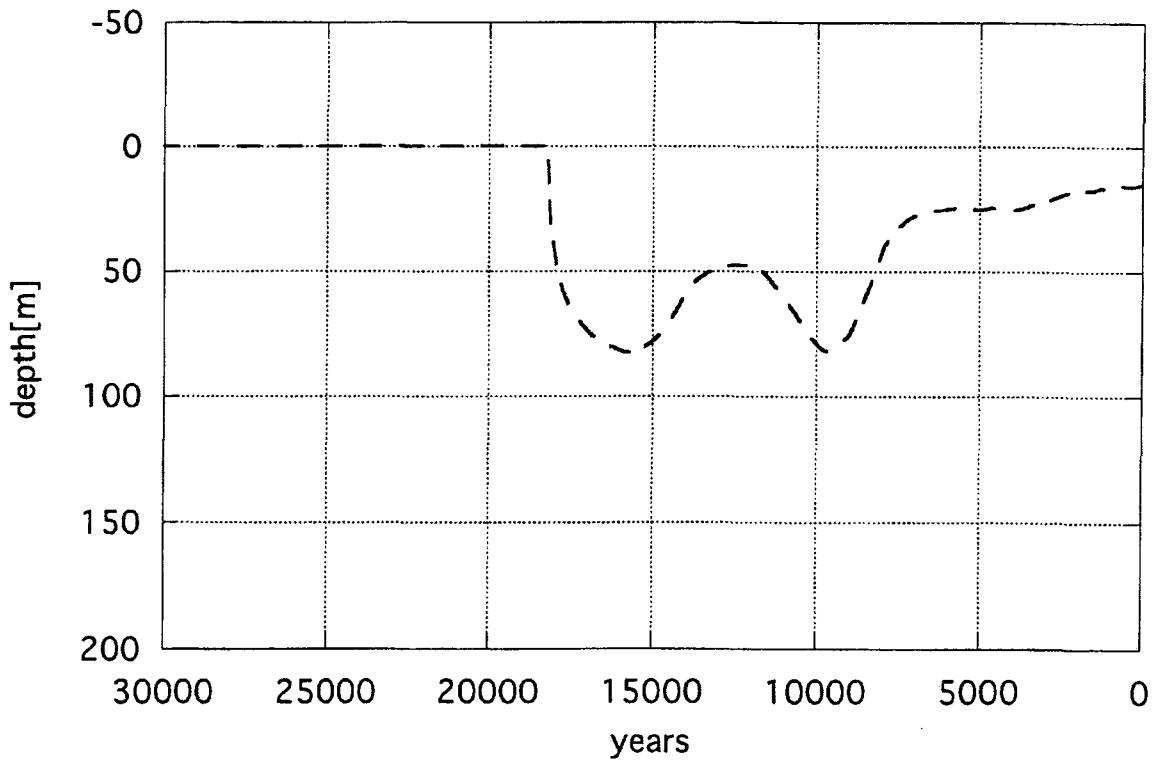
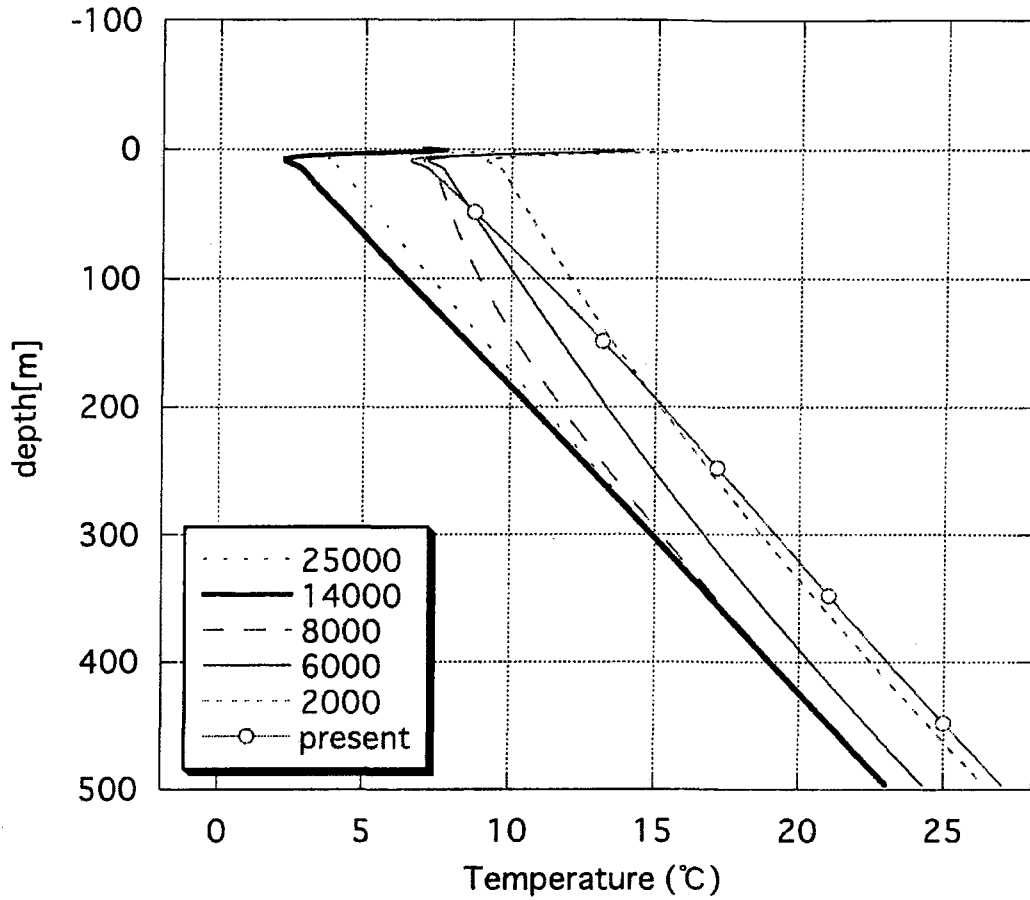


図 3-18 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 北限值積雪あり

地温プロファイル（富良野：南限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（富良野：南限值・積雪あり）

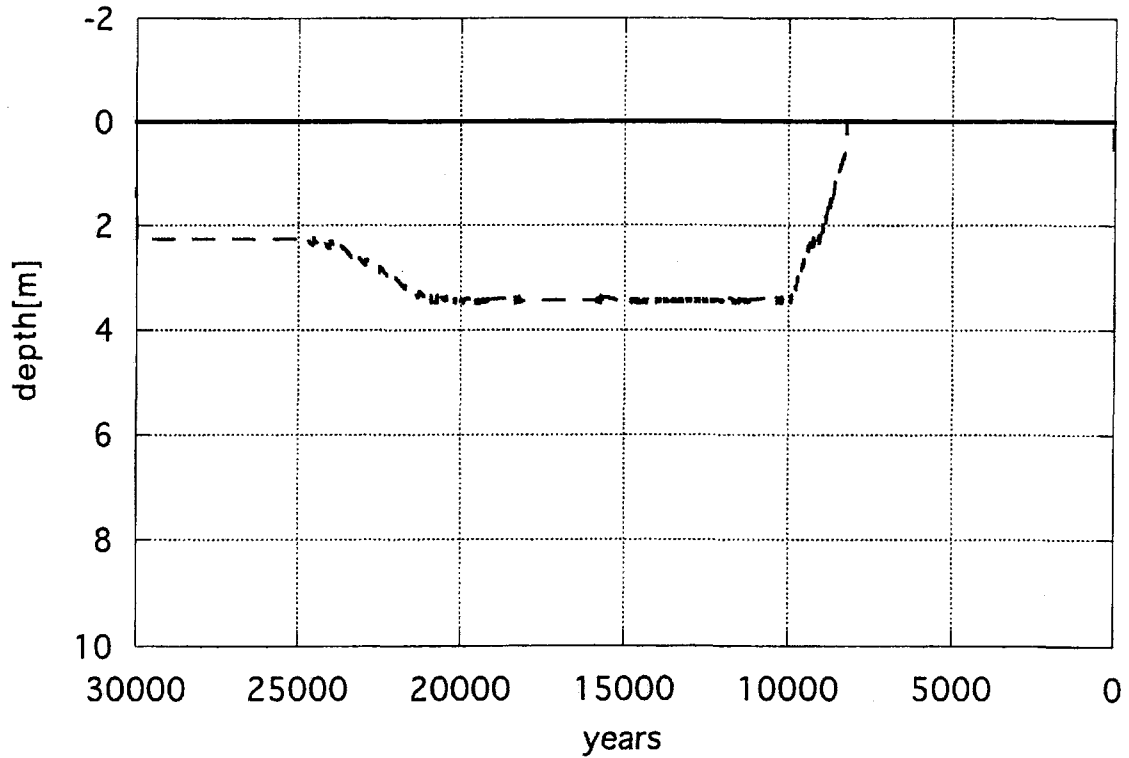
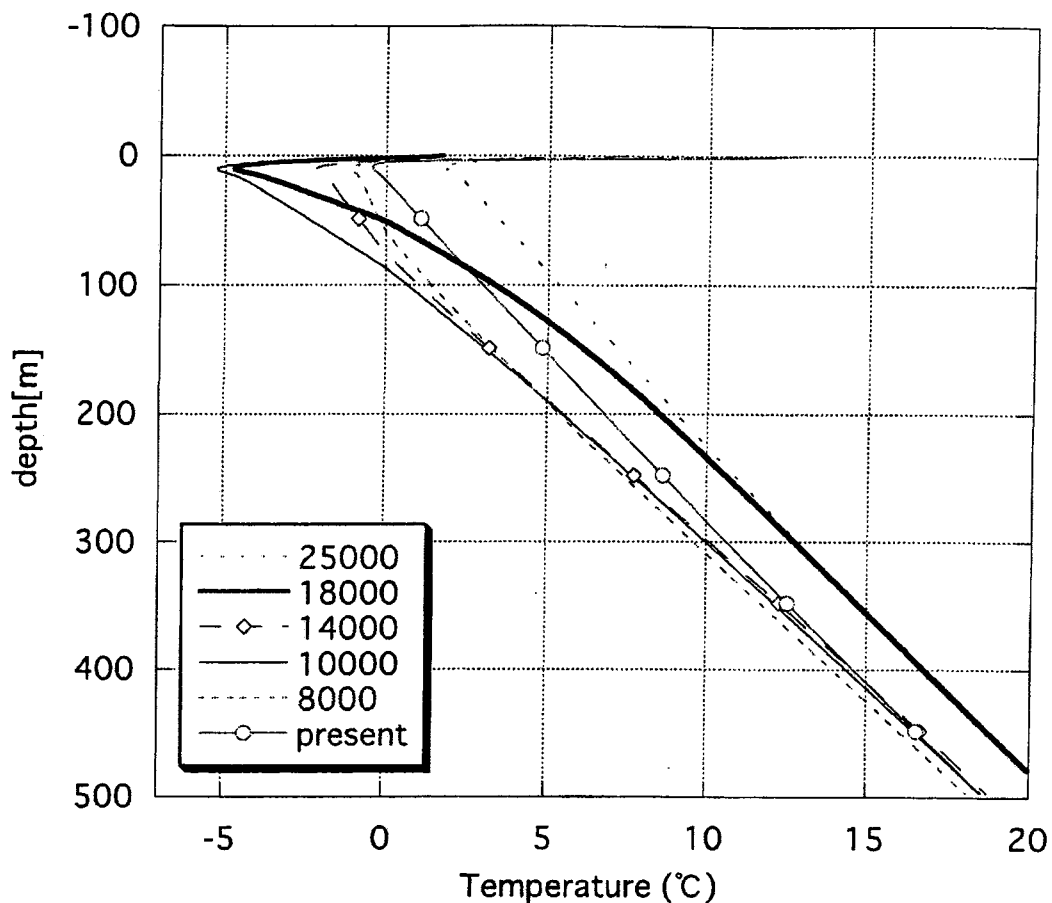


図 3-19 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 南限值積雪あり

地温プロファイル（富良野：北限值・積雪なし）



永久凍土深（富良野：北限值・積雪なし）

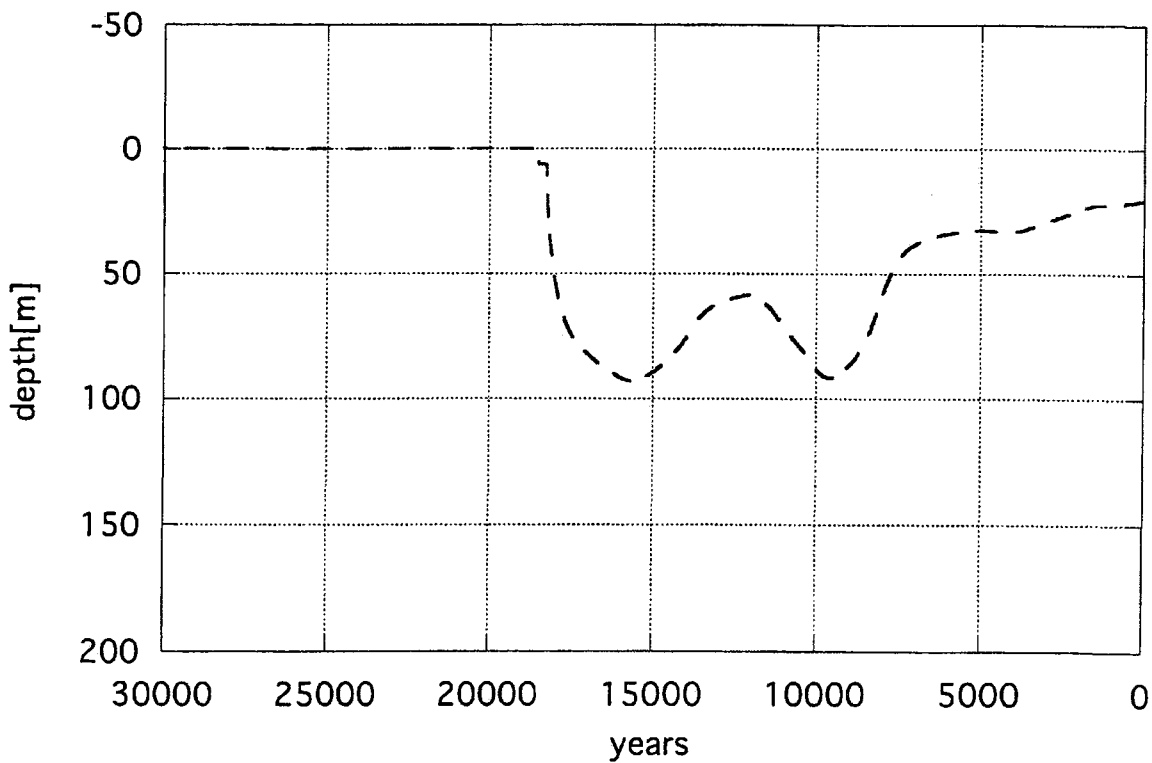
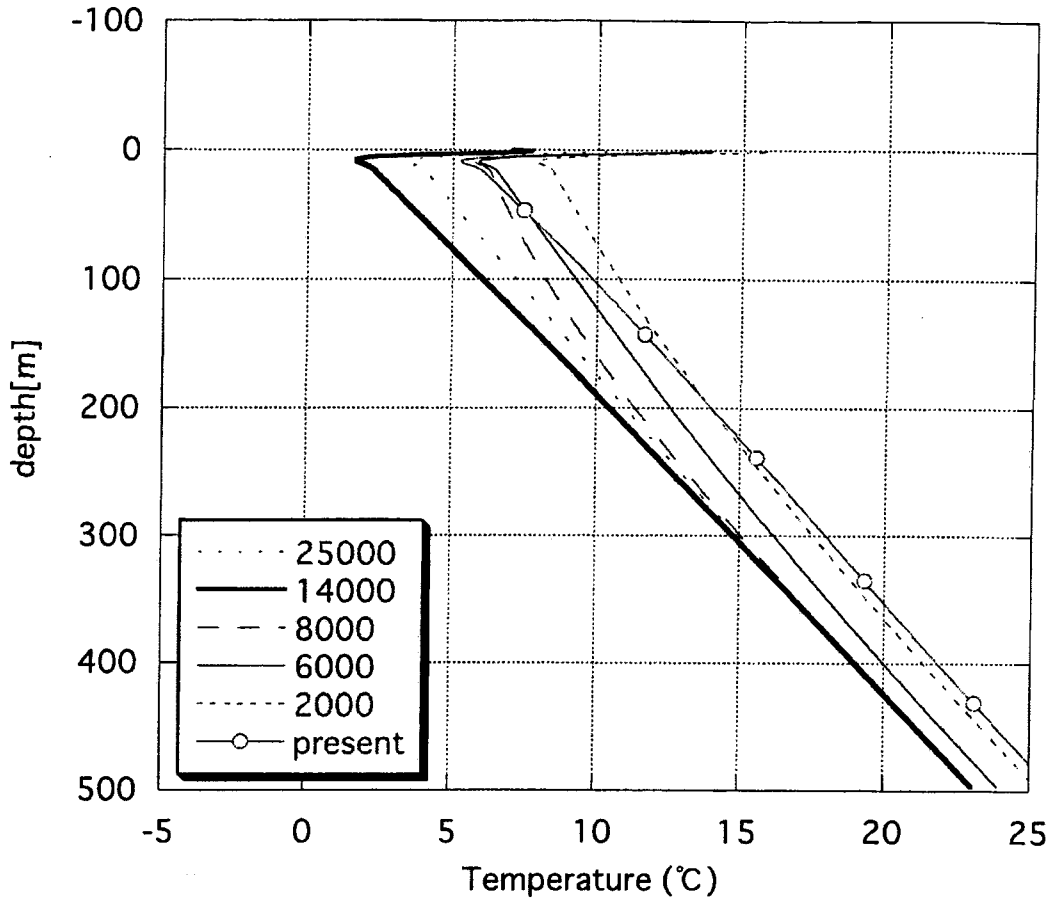


図 3-20 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 北限值無積雪

地温プロファイル (富良野：南限值・積雪なし)



季節凍土・最大深度 (富良野：南限值・積雪なし)

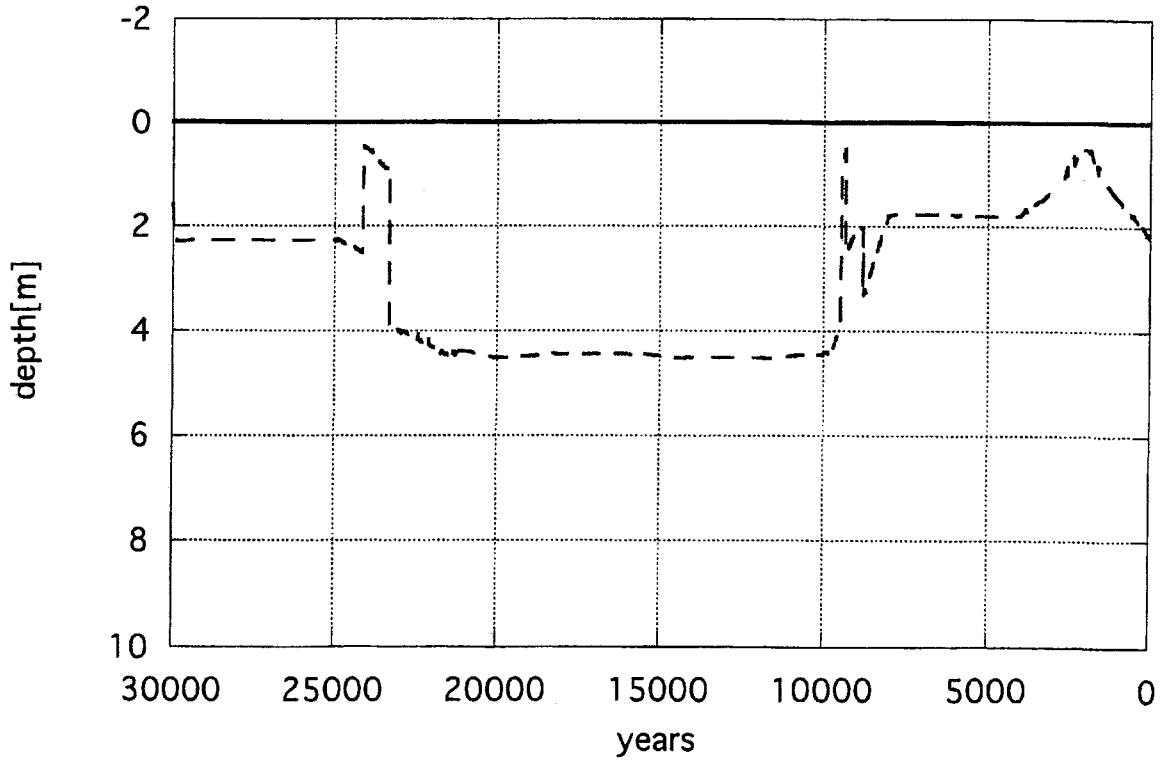
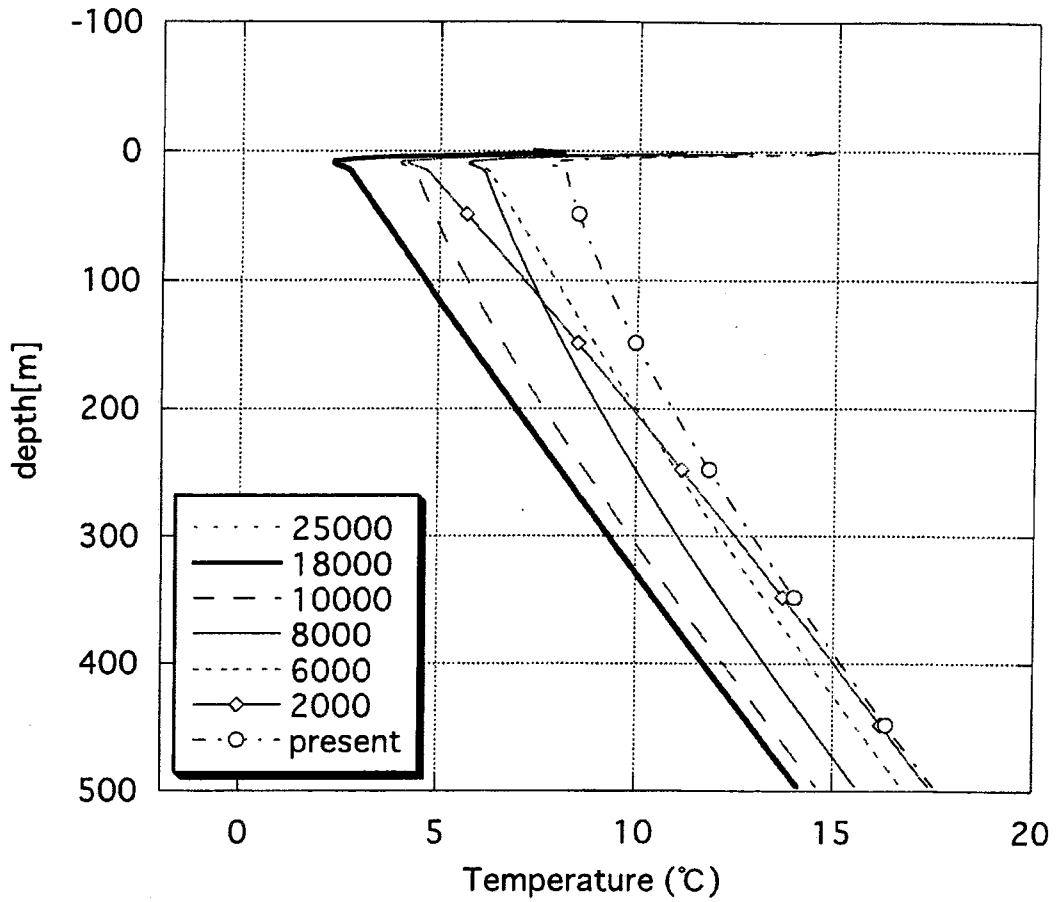


図 3-21 地温プロファイル及び永久凍土深 富良野 南限值無積雪

地温プロファイル（石狩平野：北限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（石狩平野：北限值・積雪あり）

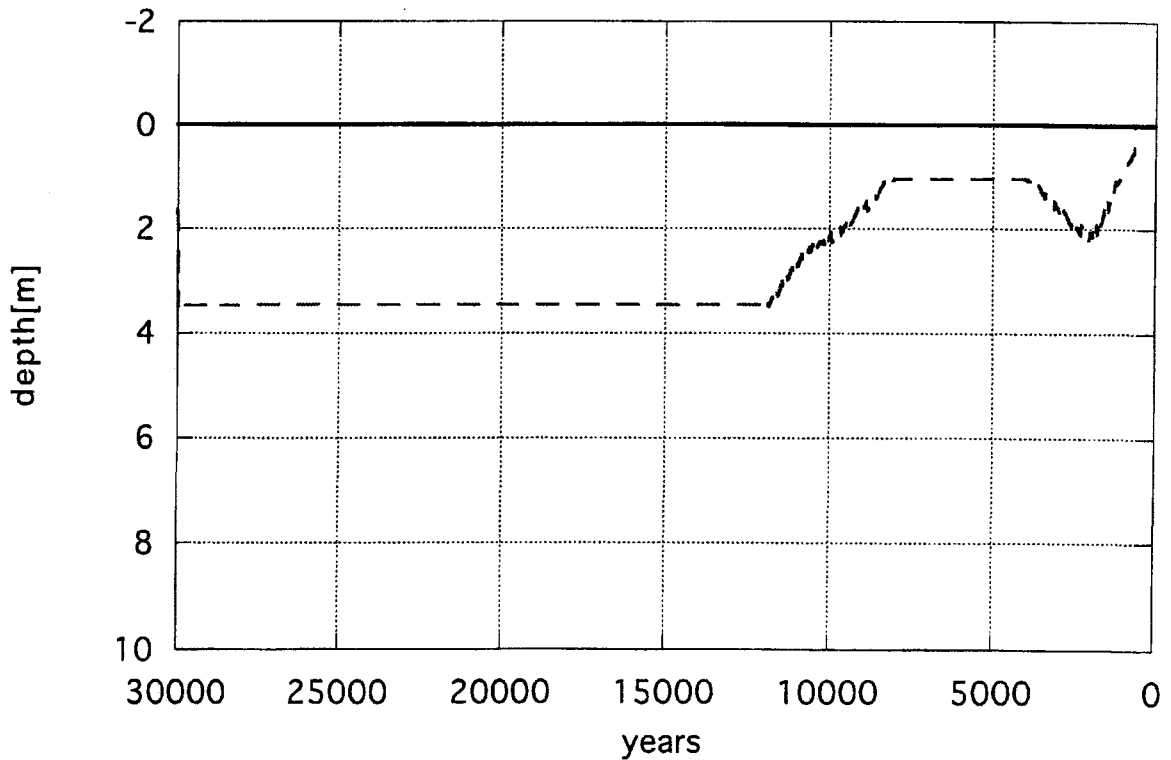
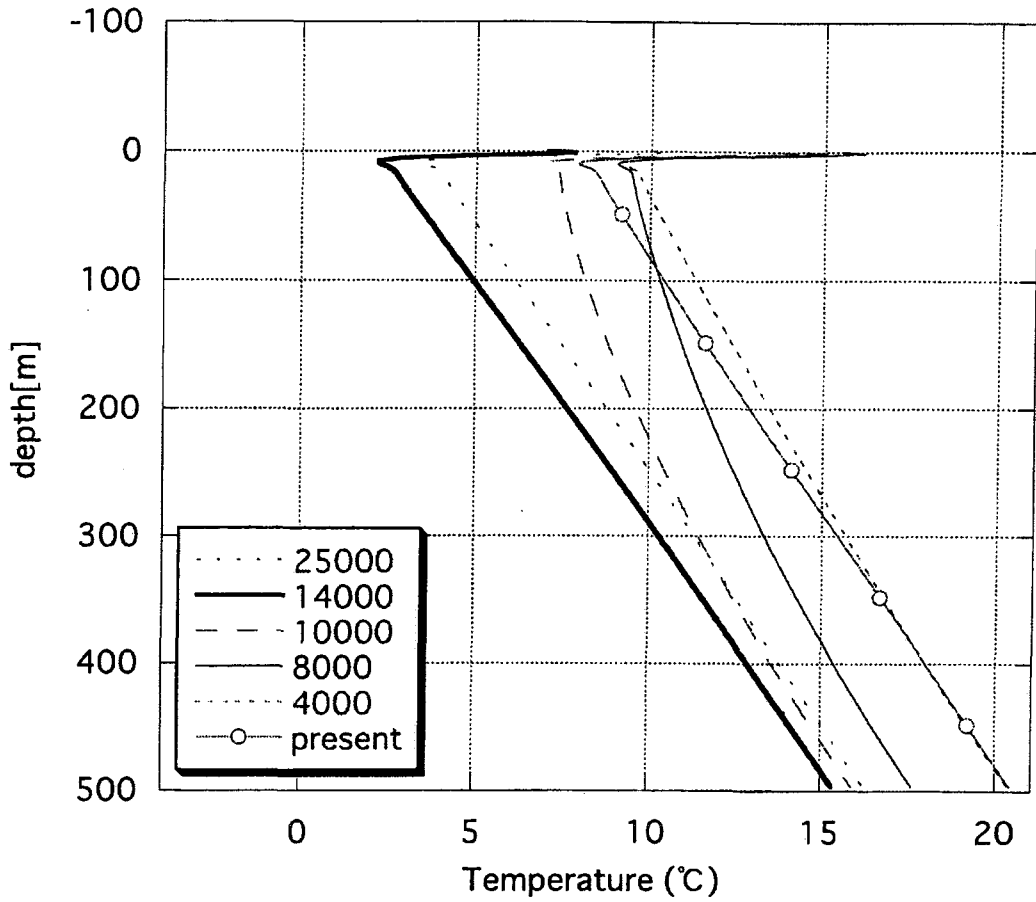


図3-22 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 北限值積雪あり

地温プロファイル（石狩平野：南限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（石狩平野：南限值・積雪あり）

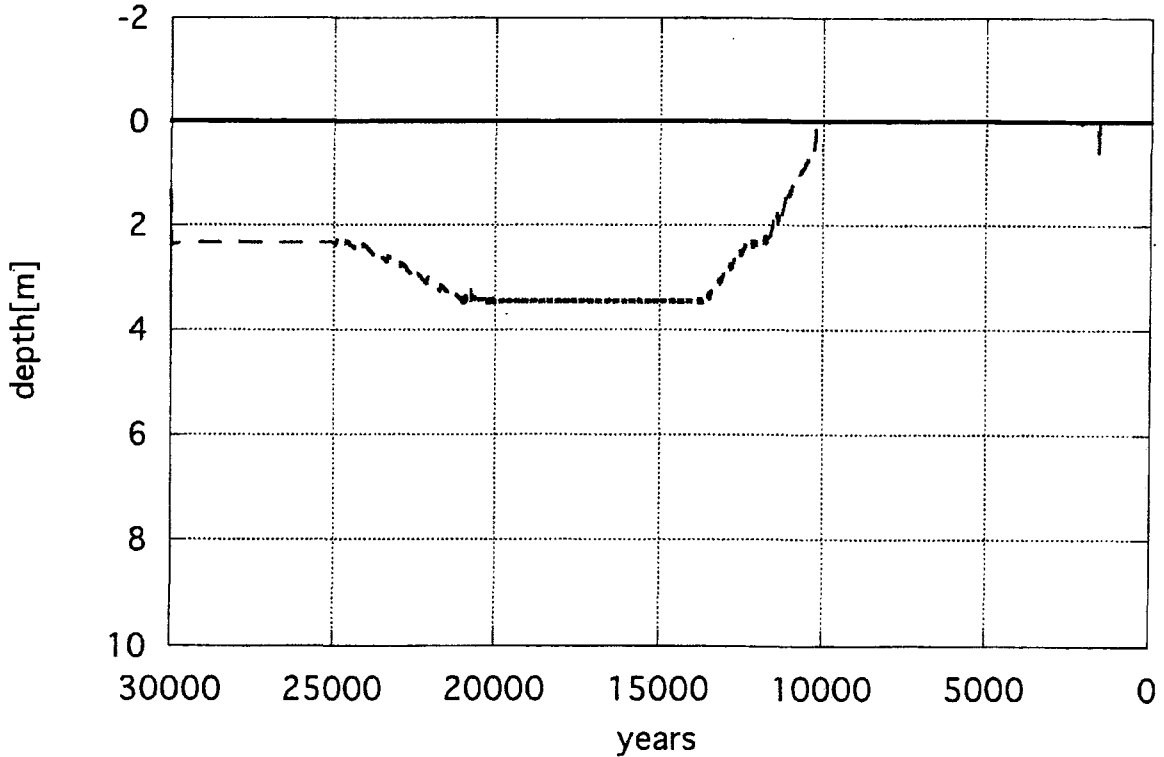
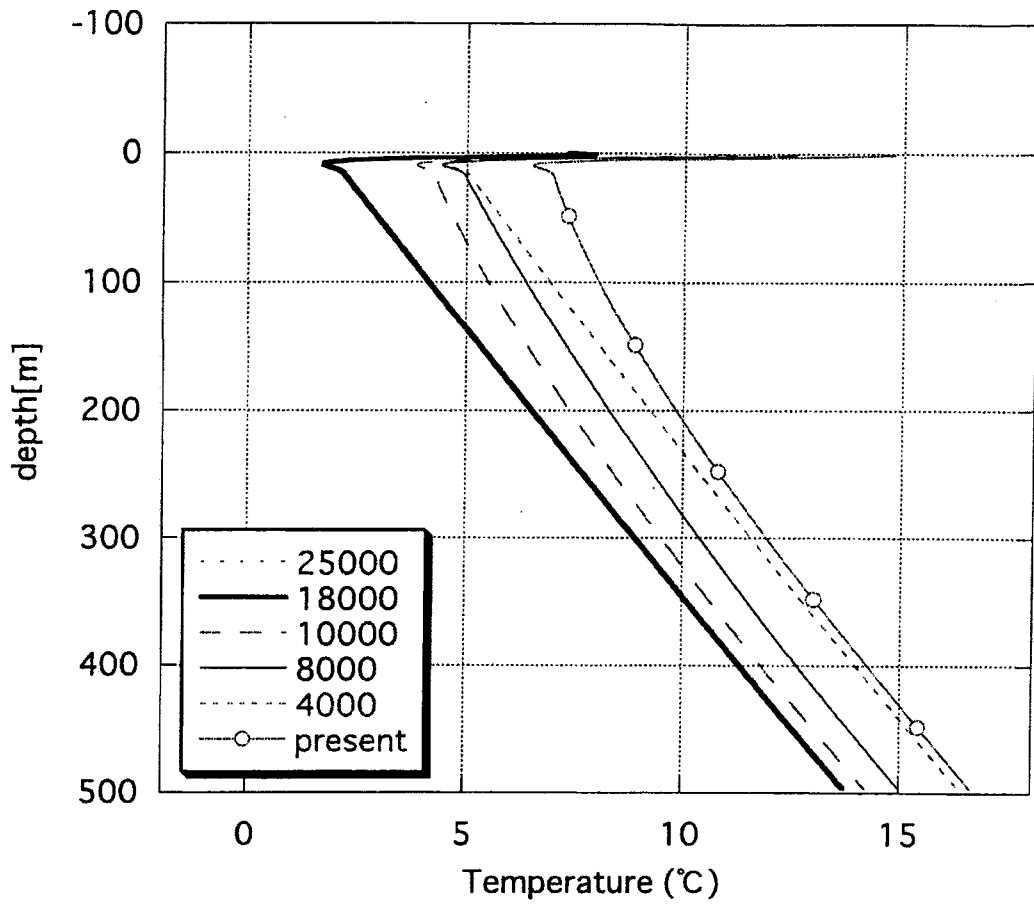


図 3-23 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 南限值積雪あり

地温プロファイル (石狩平野：北限值・積雪なし)



季節凍土・最大深度 (石狩平野：北限值・積雪なし)

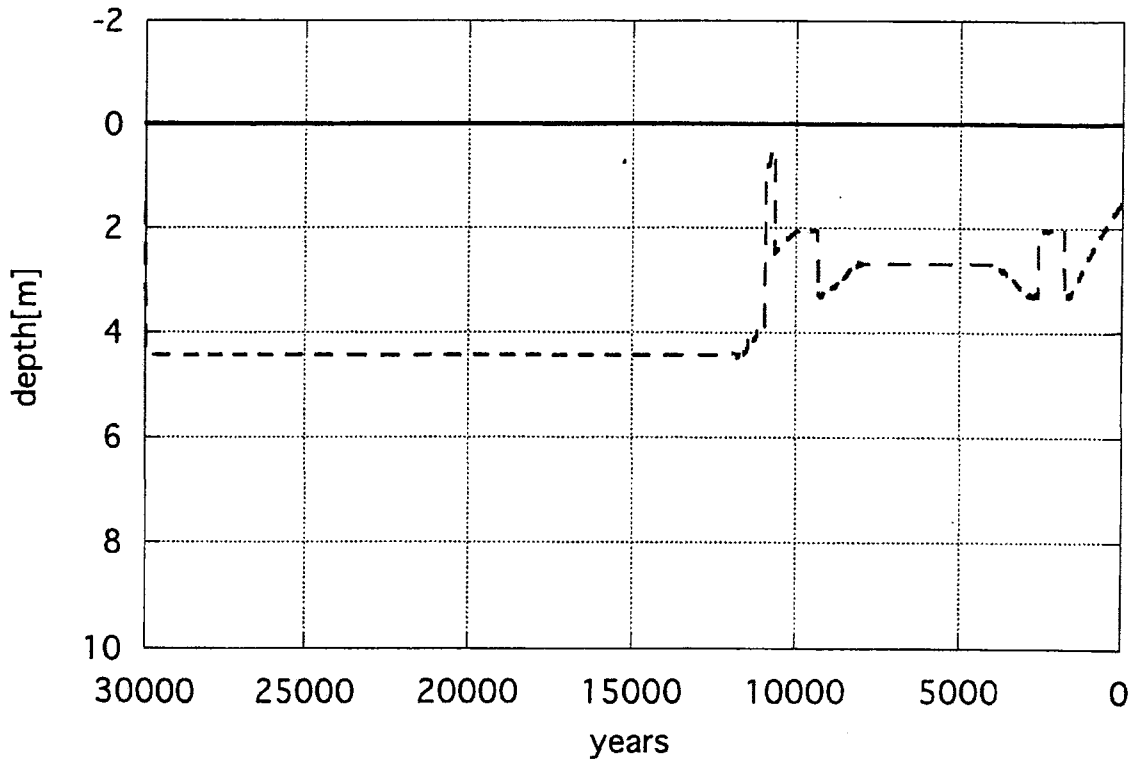
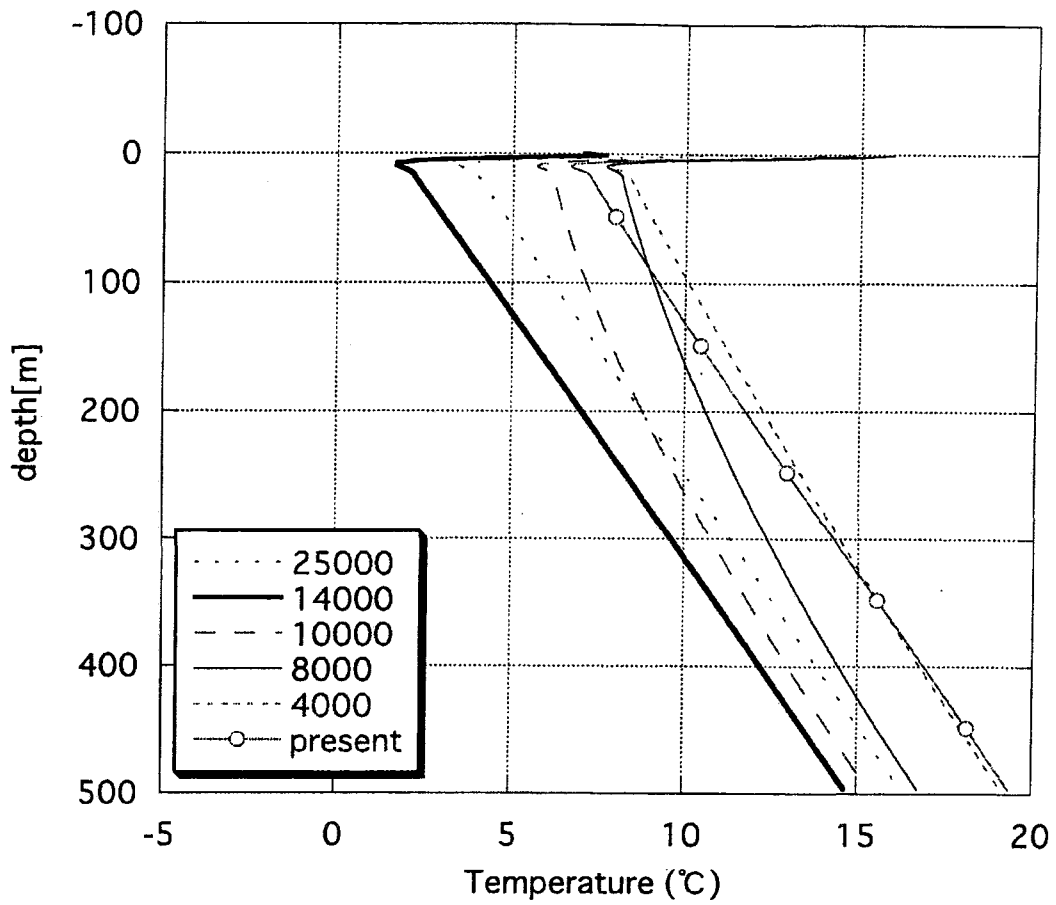


図 3-24 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 北限值無積雪

地温プロファイル（石狩平野：南限值・積雪なし）



季節凍土・最大深度（石狩平野：南限值・積雪なし）

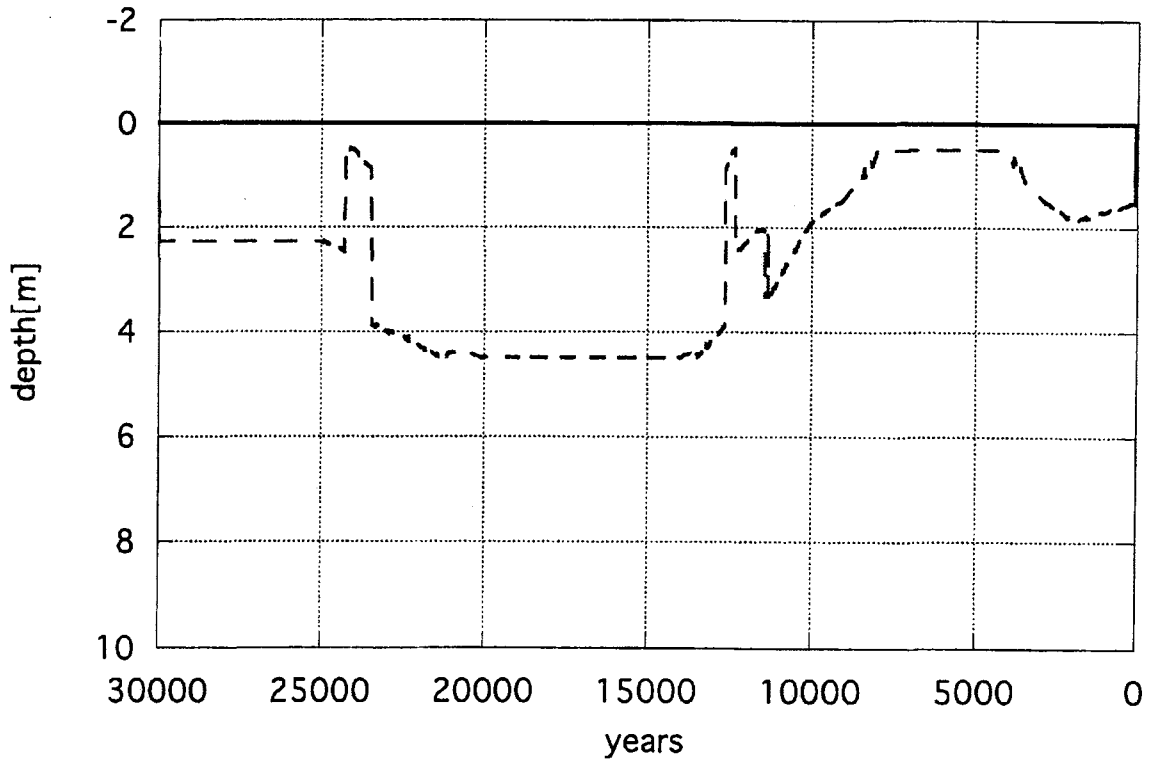
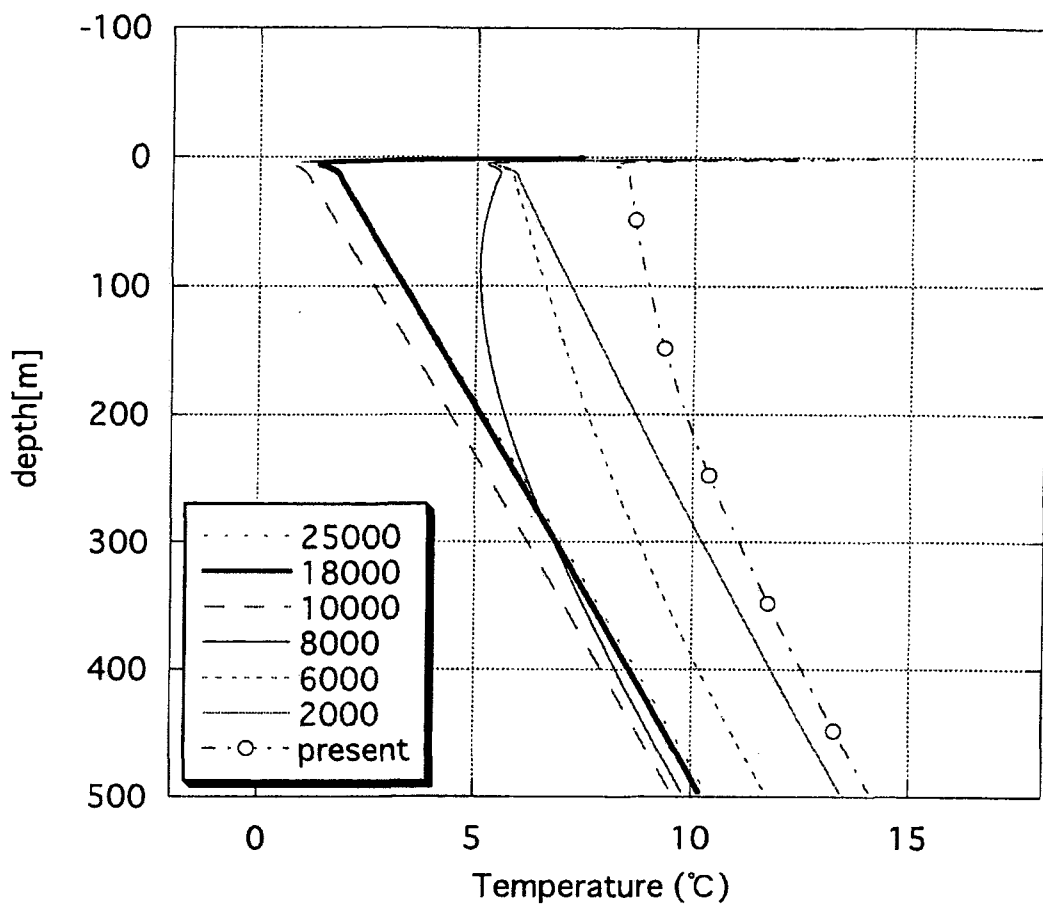


図 3-25 地温プロファイル及び永久凍土深 石狩 南限值無積雪

地温プロファイル（黒松内：北限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（黒松内：北限值・積雪あり）

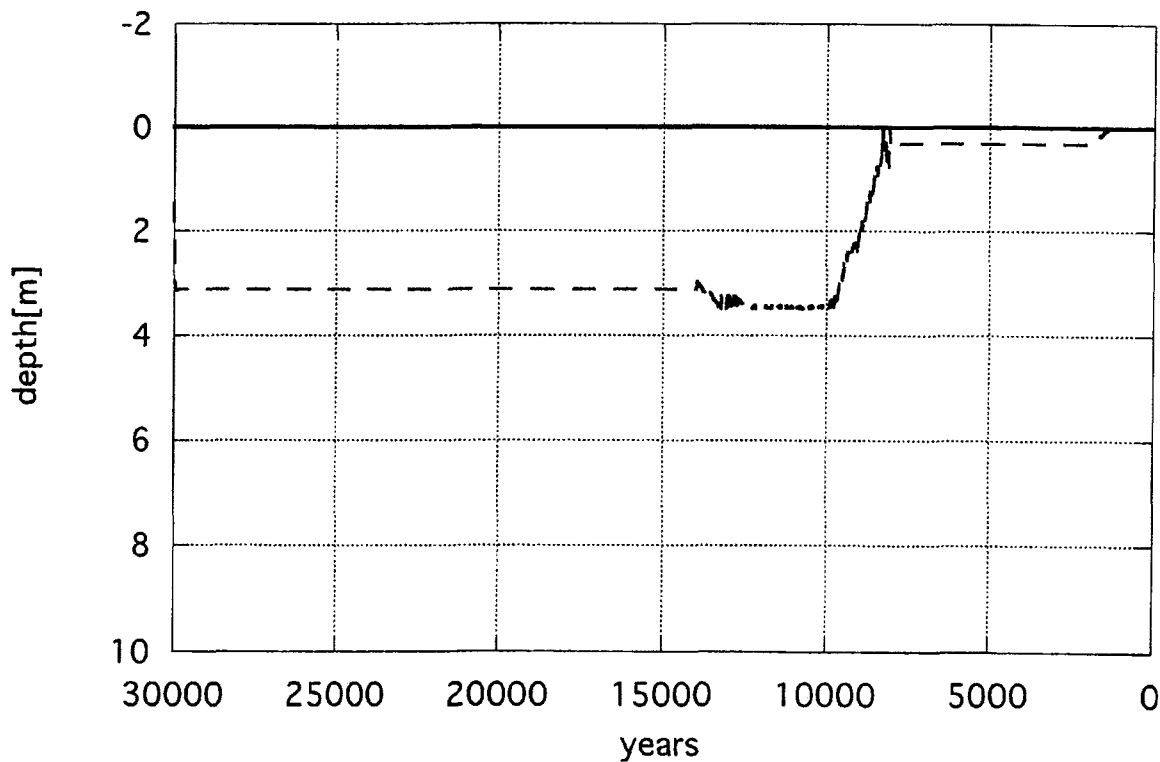
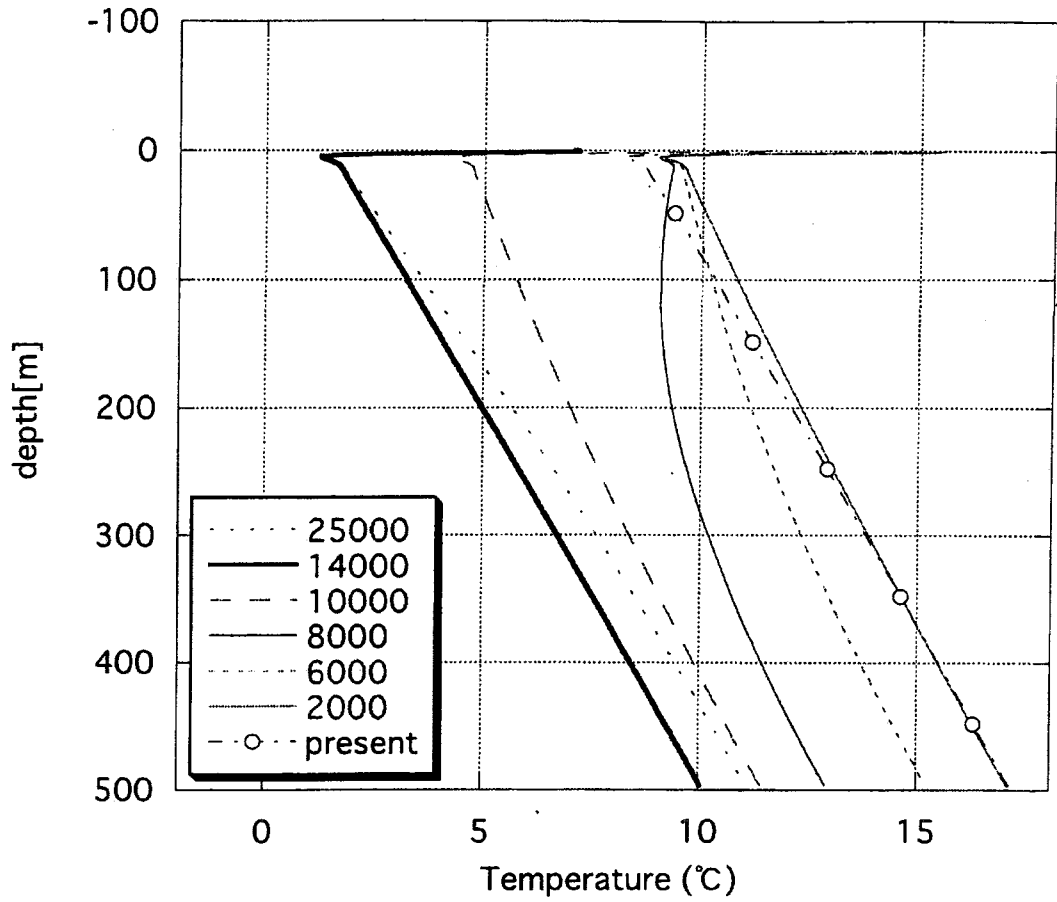


図 3-26 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 北限值積雪あり

地温プロファイル（黒松内：南限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（黒松内：南限值・積雪あり）

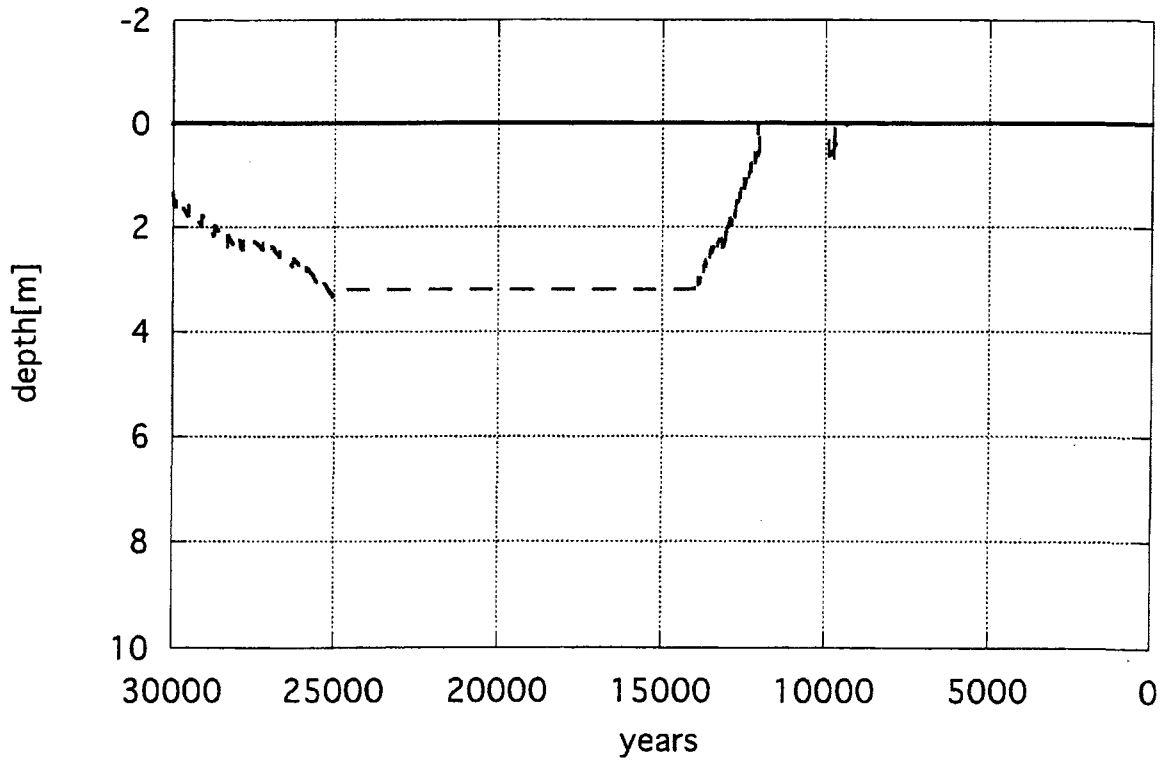
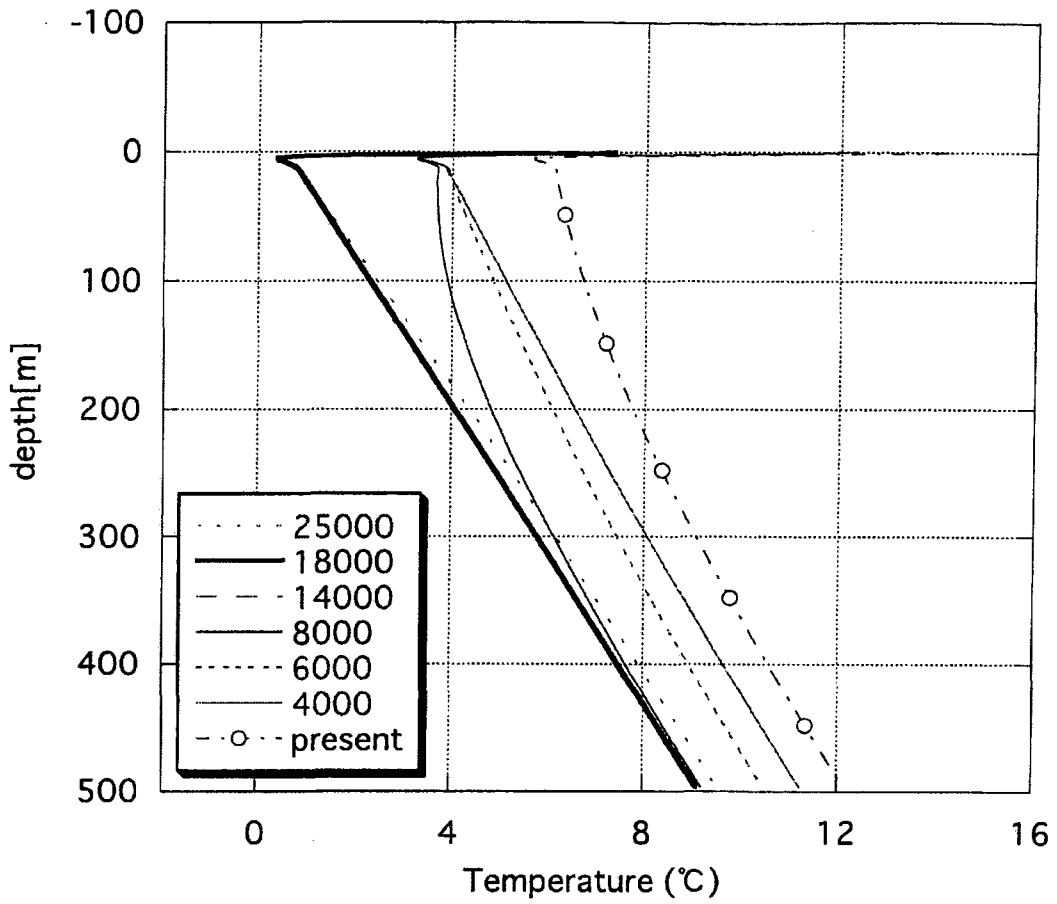


図 3-27 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 南限值積雪あり

地温プロファイル（黒松内：北限值・積雪なし）



季節凍土・最大深度（黒松内：北限值・積雪なし）

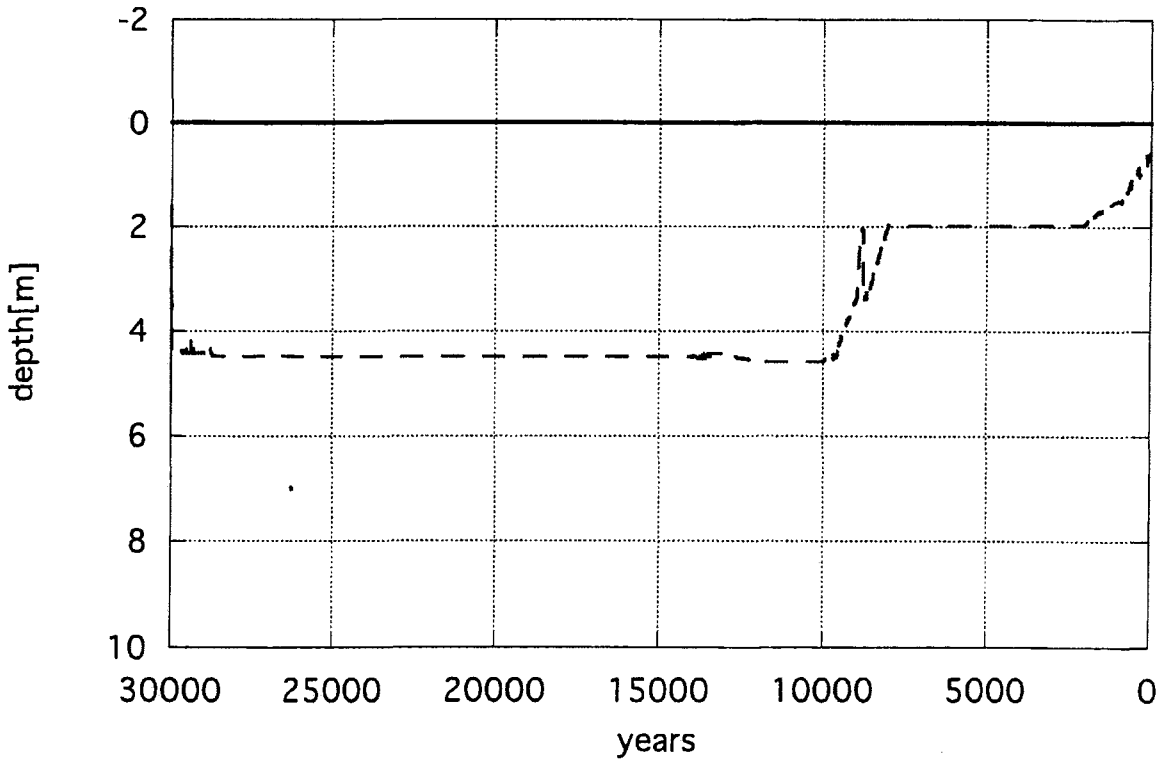
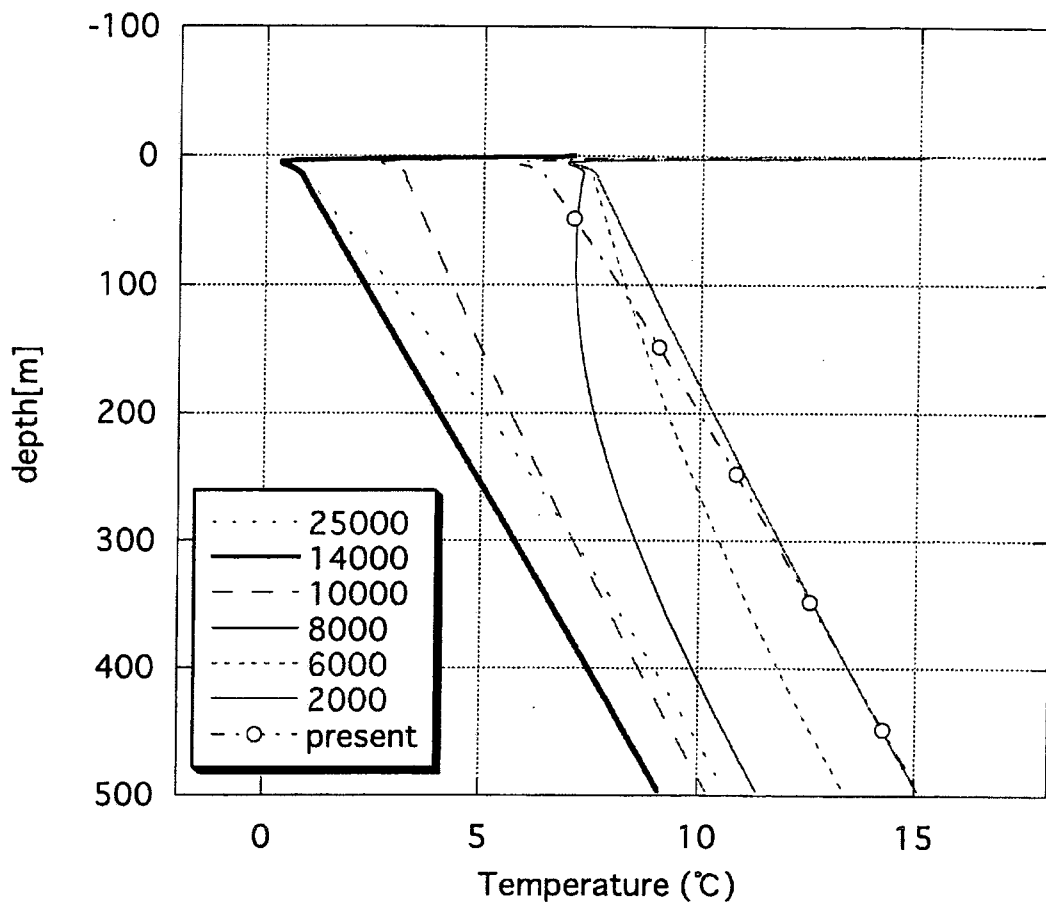


図 3-28 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 北限值無積雪

地温プロファイル（黒松内：南限值・積雪なし）



季節凍土・最大深度（黒松内：南限值・積雪なし）

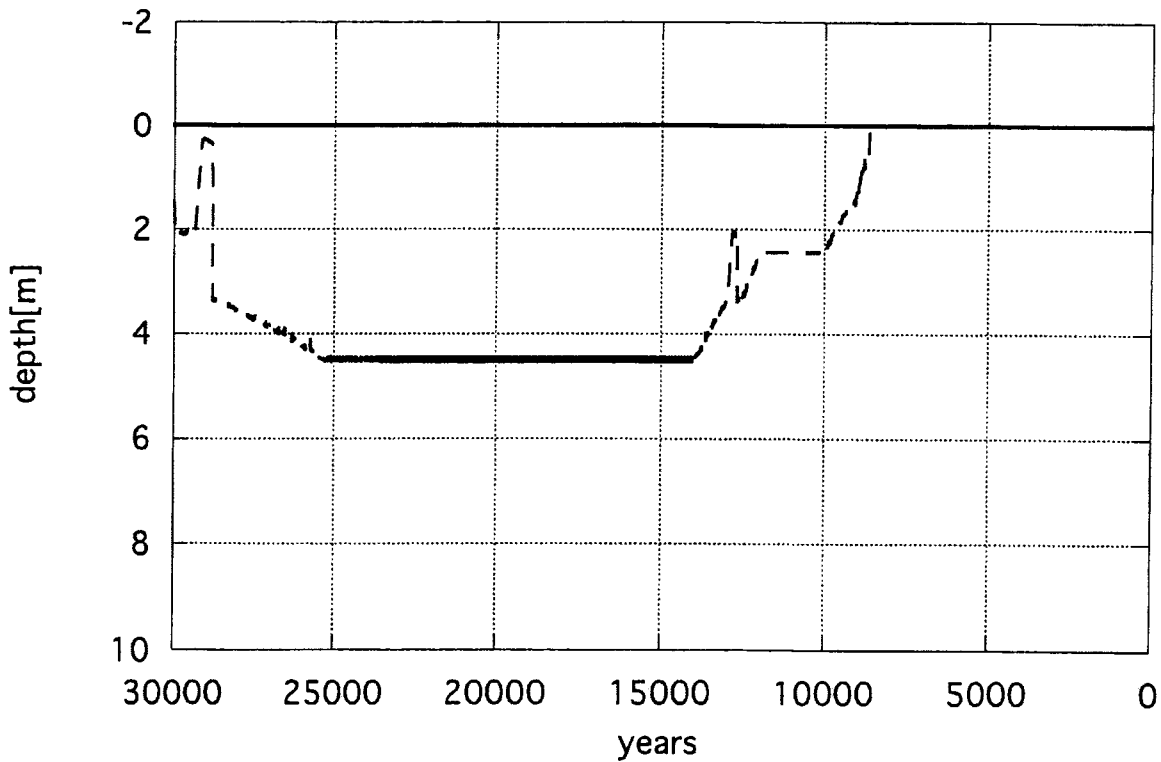
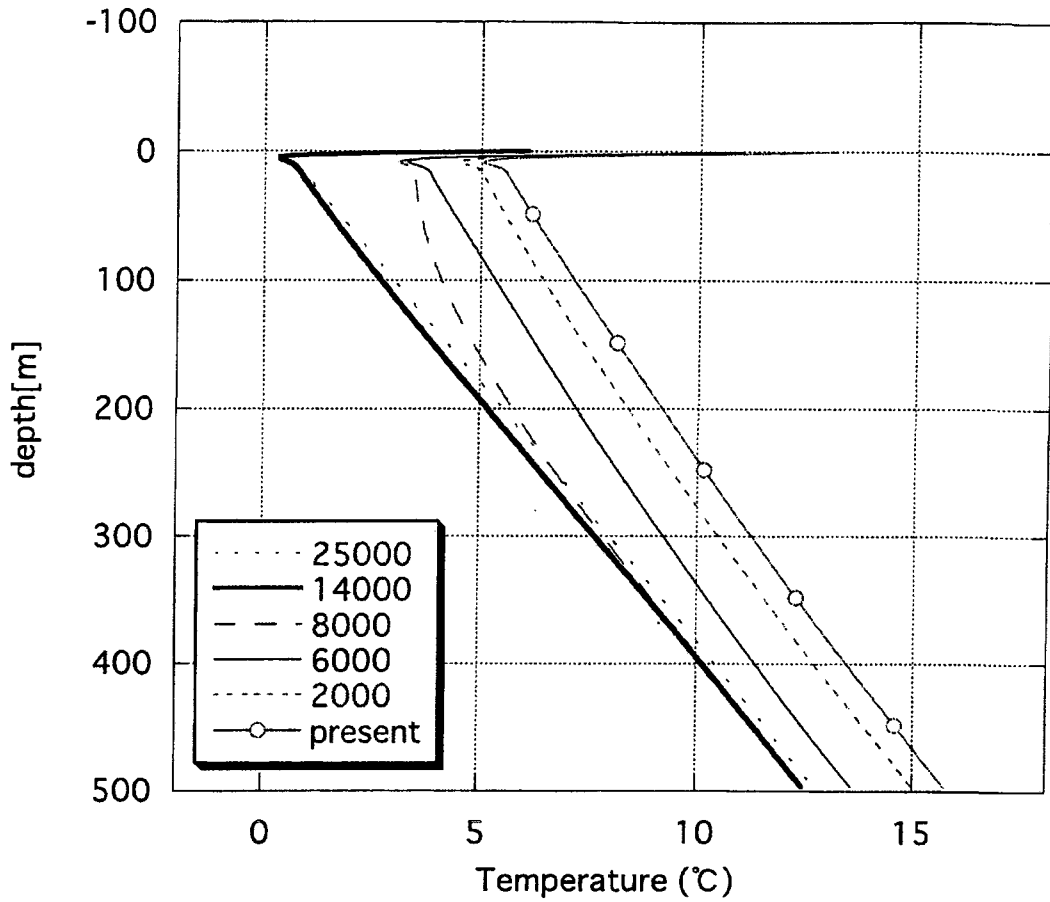


図 3-29 地温プロファイル及び永久凍土深 黒松内 南限值無積雪

地温プロファイル（十勝平野：北限值・積雪あり）



季節凍土・最大深度（十勝平野：北限值・積雪あり）

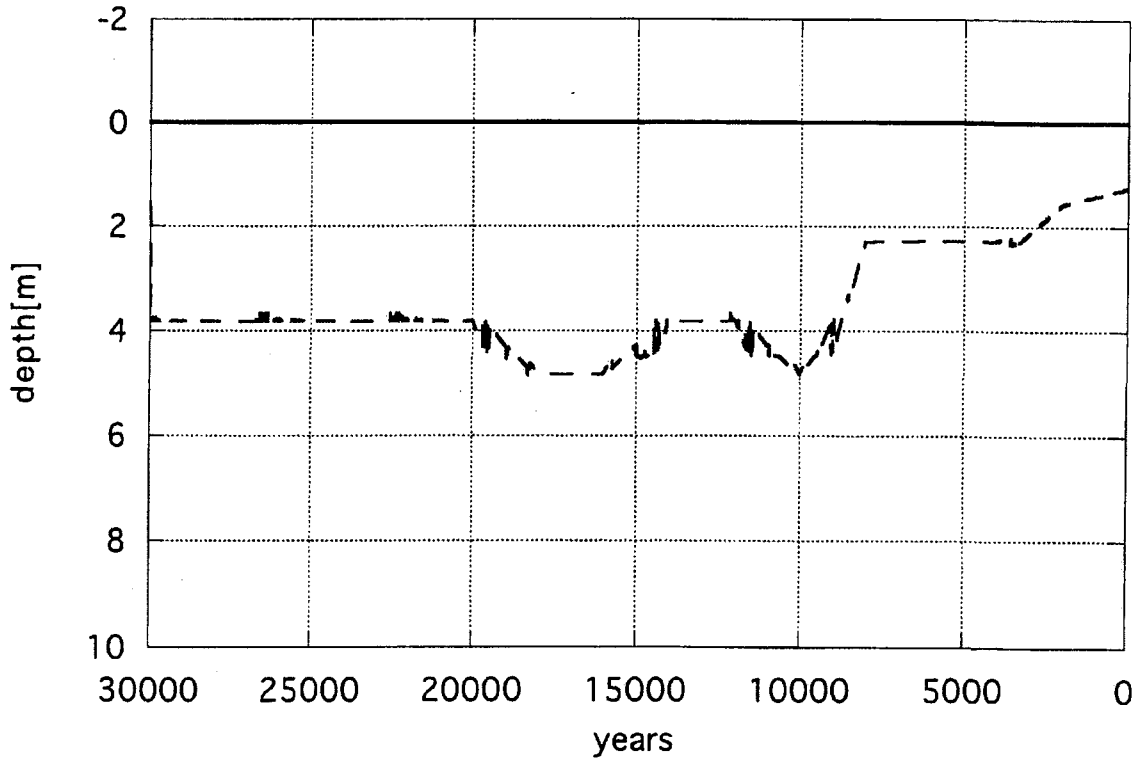
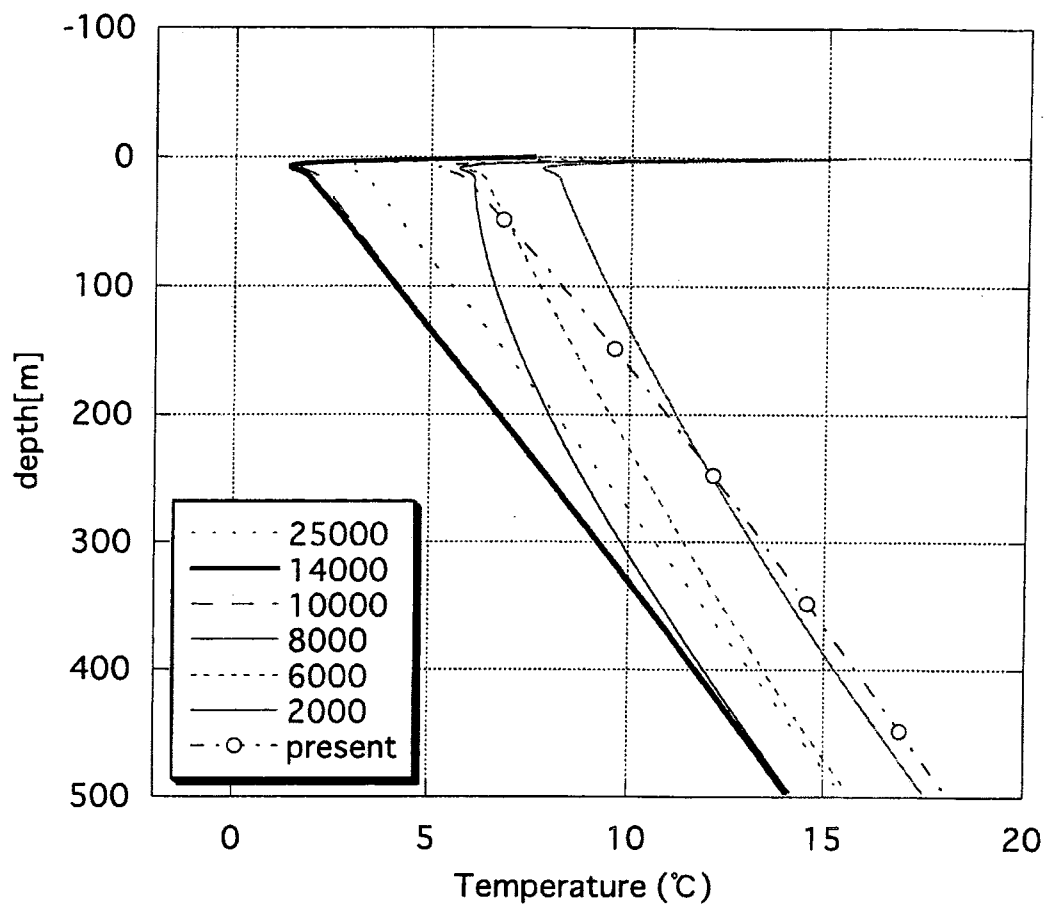


図 3-30 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 北限值積雪あり

地温プロファイル (十勝平野：南限值・積雪あり)



季節凍土・最大深度 (十勝平野：南限值・積雪あり)

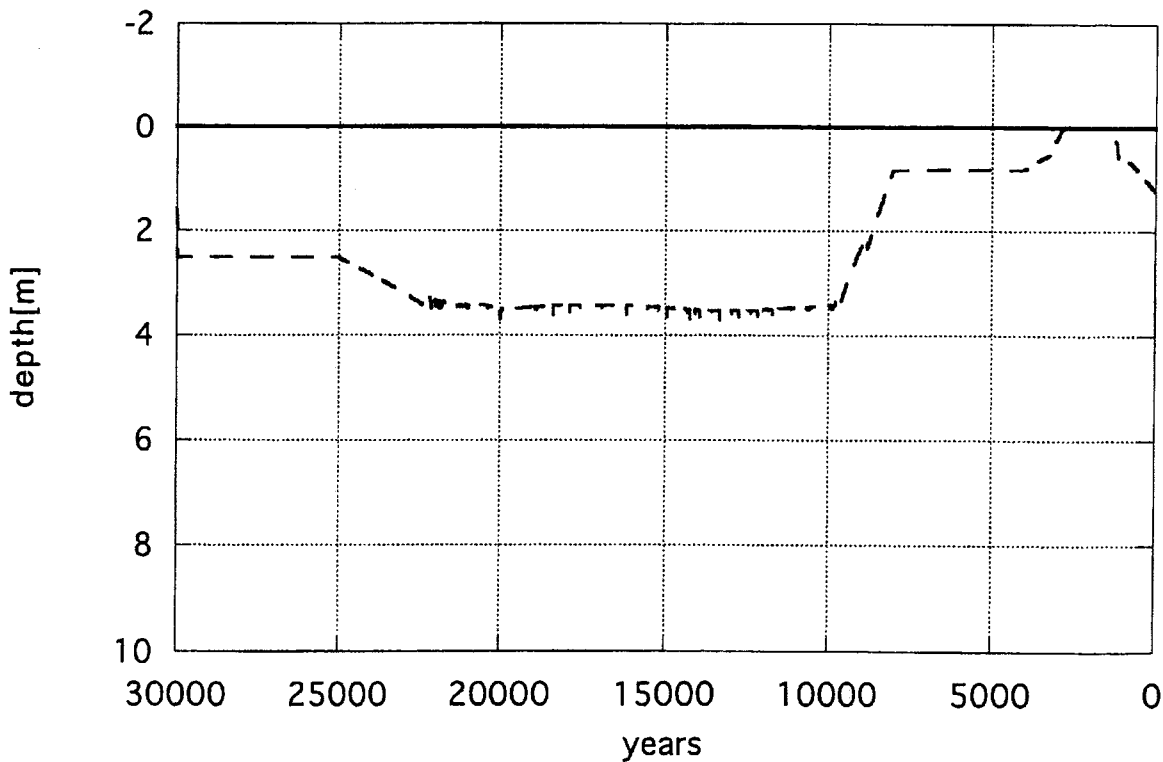
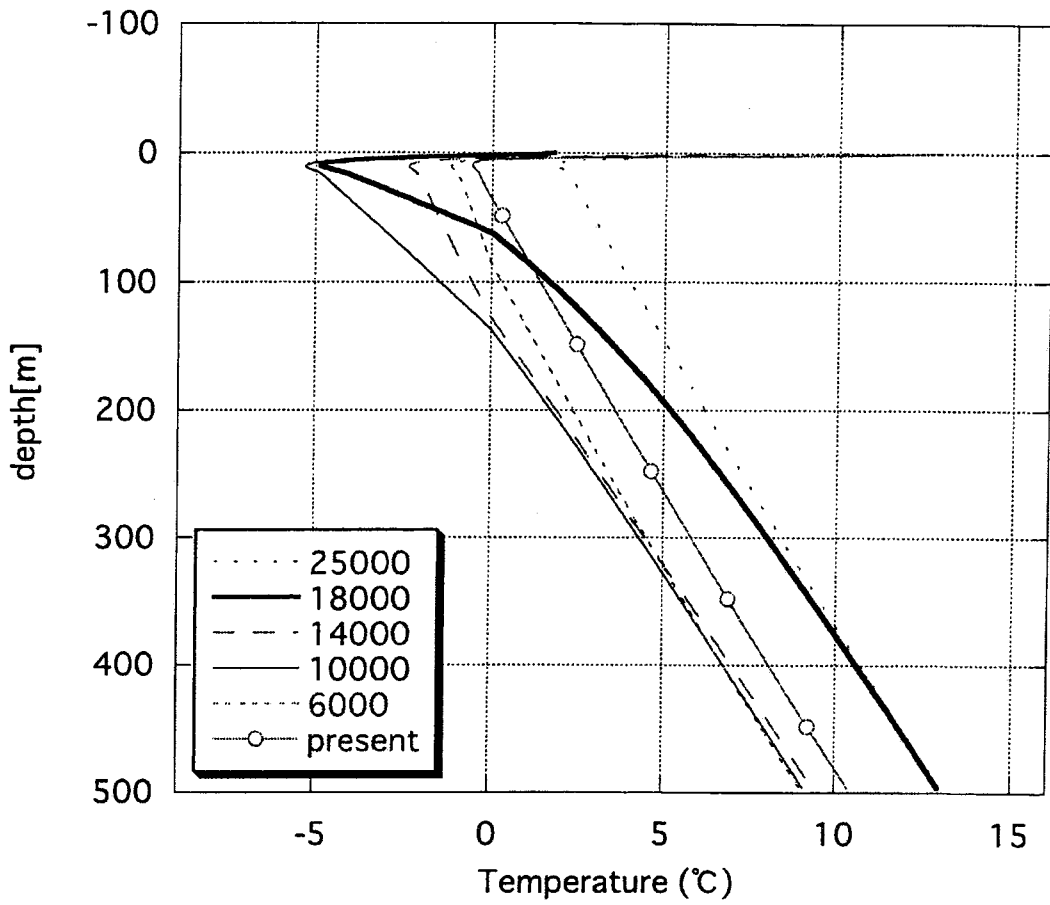


図 3-31 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 南限值積雪あり

地温プロファイル（十勝平野：北限值・積雪なし）



永久凍土深（十勝平野：北限值・積雪なし）

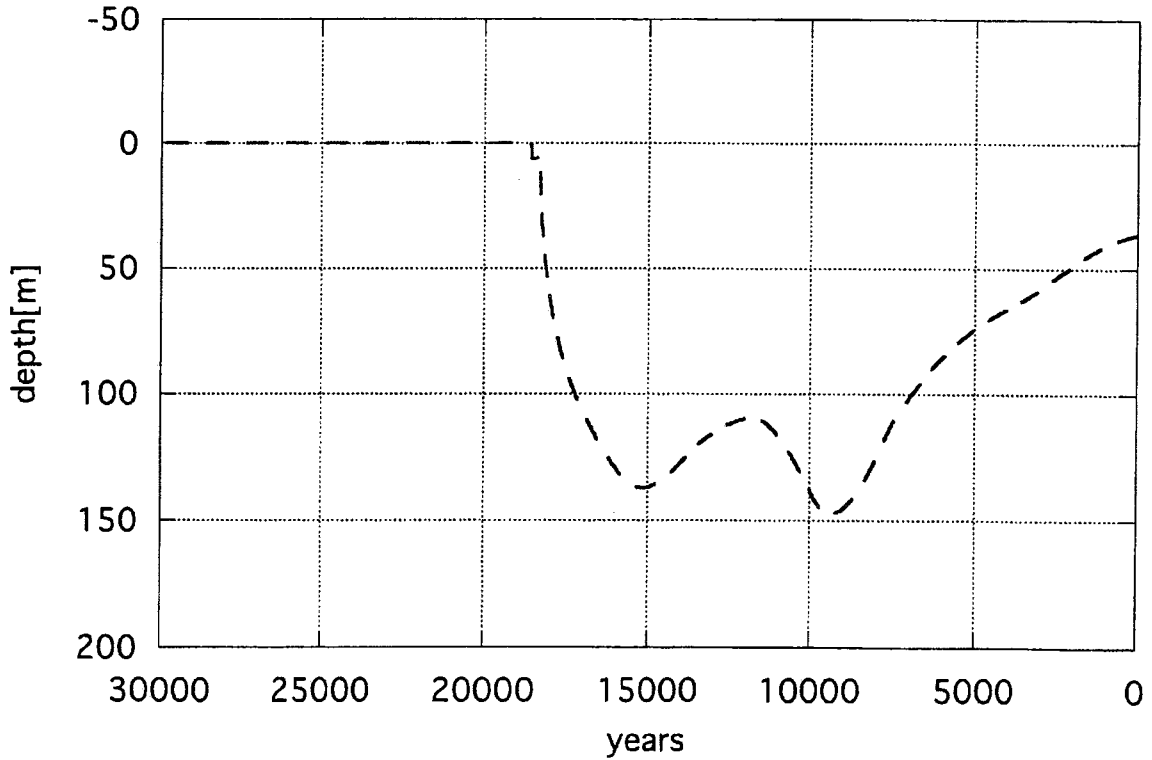
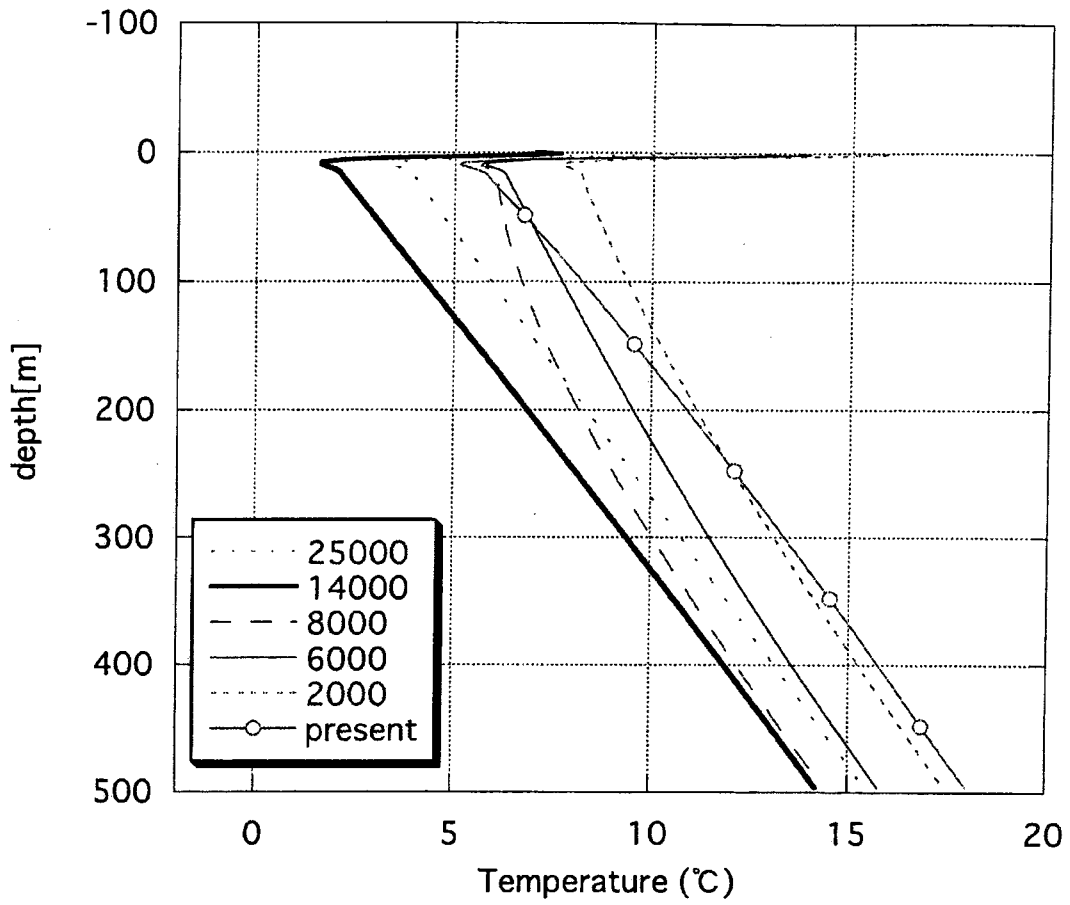


図 3-32 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 北限值無積雪

地温プロファイル (十勝平野 : 南限值・積雪なし)



季節凍土・最大深度 (十勝平野 : 南限值・積雪なし)

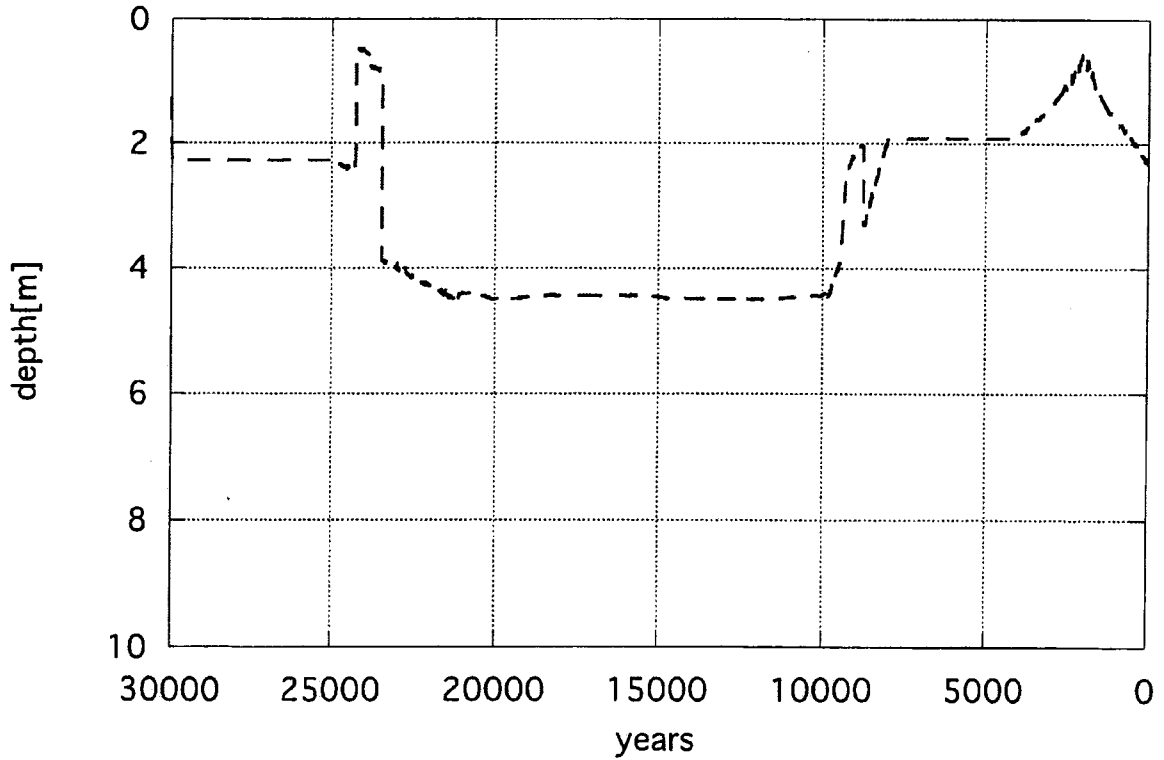
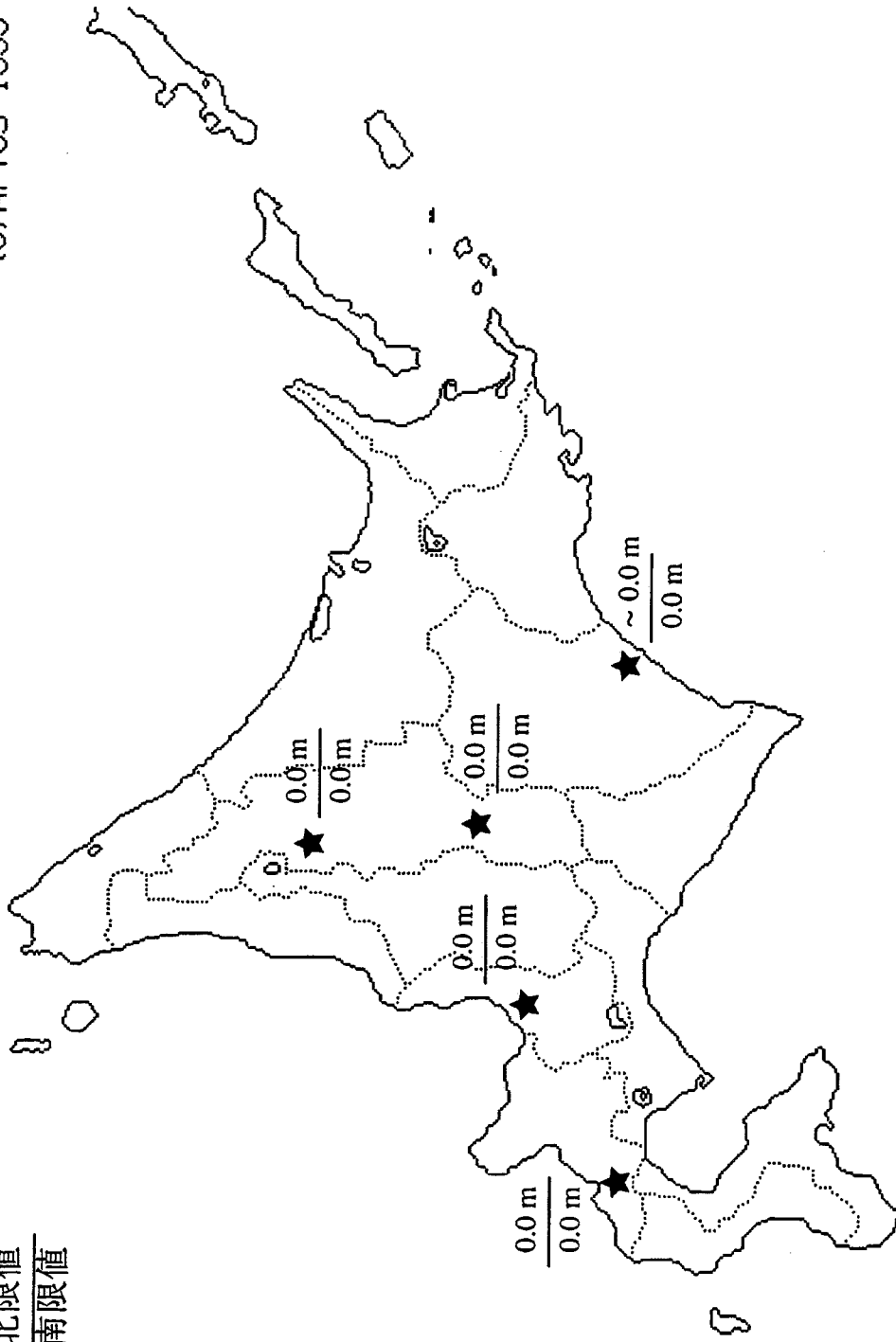


図 3-33 地温プロファイル及び永久凍土深 十勝平野 南限值無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值
南限值

(C)Aries 1993



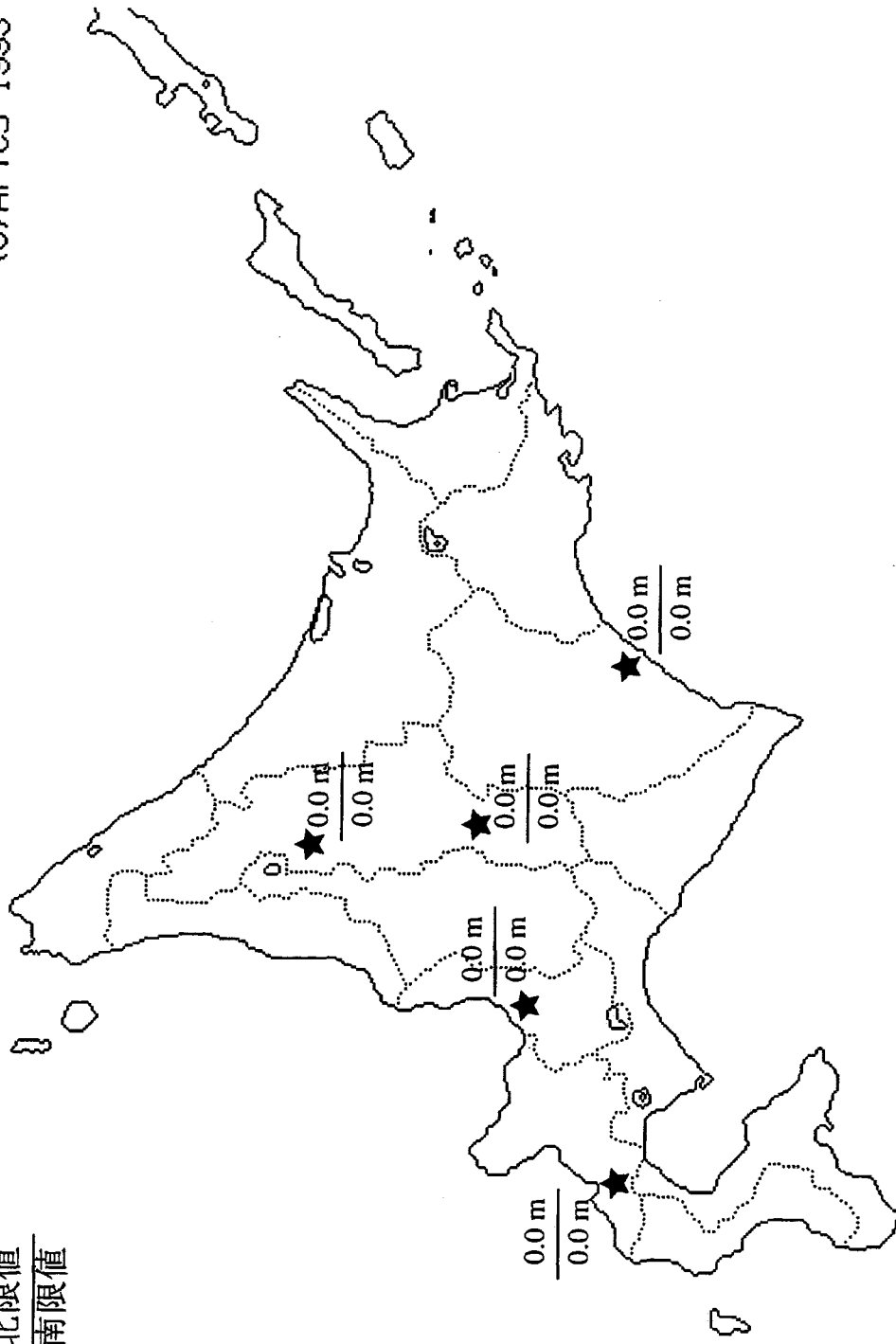
25000年前

図 3-34 永久凍土分布図 (25000年前) 積雪あり

計算結果 (無積雪条件) :
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值 / 南限值

(C)Aries 1993



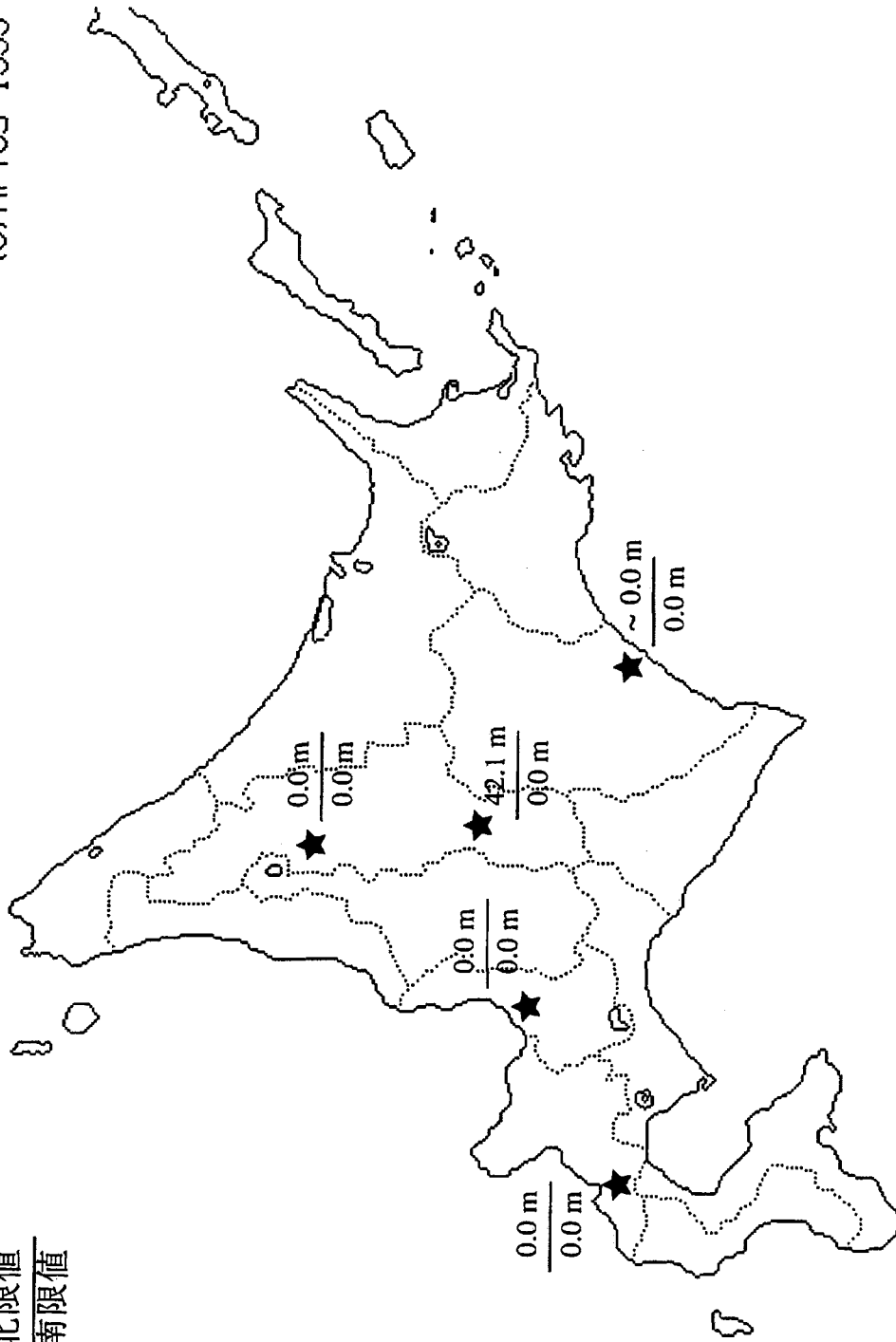
25000年前
積雪無し

図 3-35 永久凍土分布図 (25000年前) 無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值
南限值

(C)Aries 1993



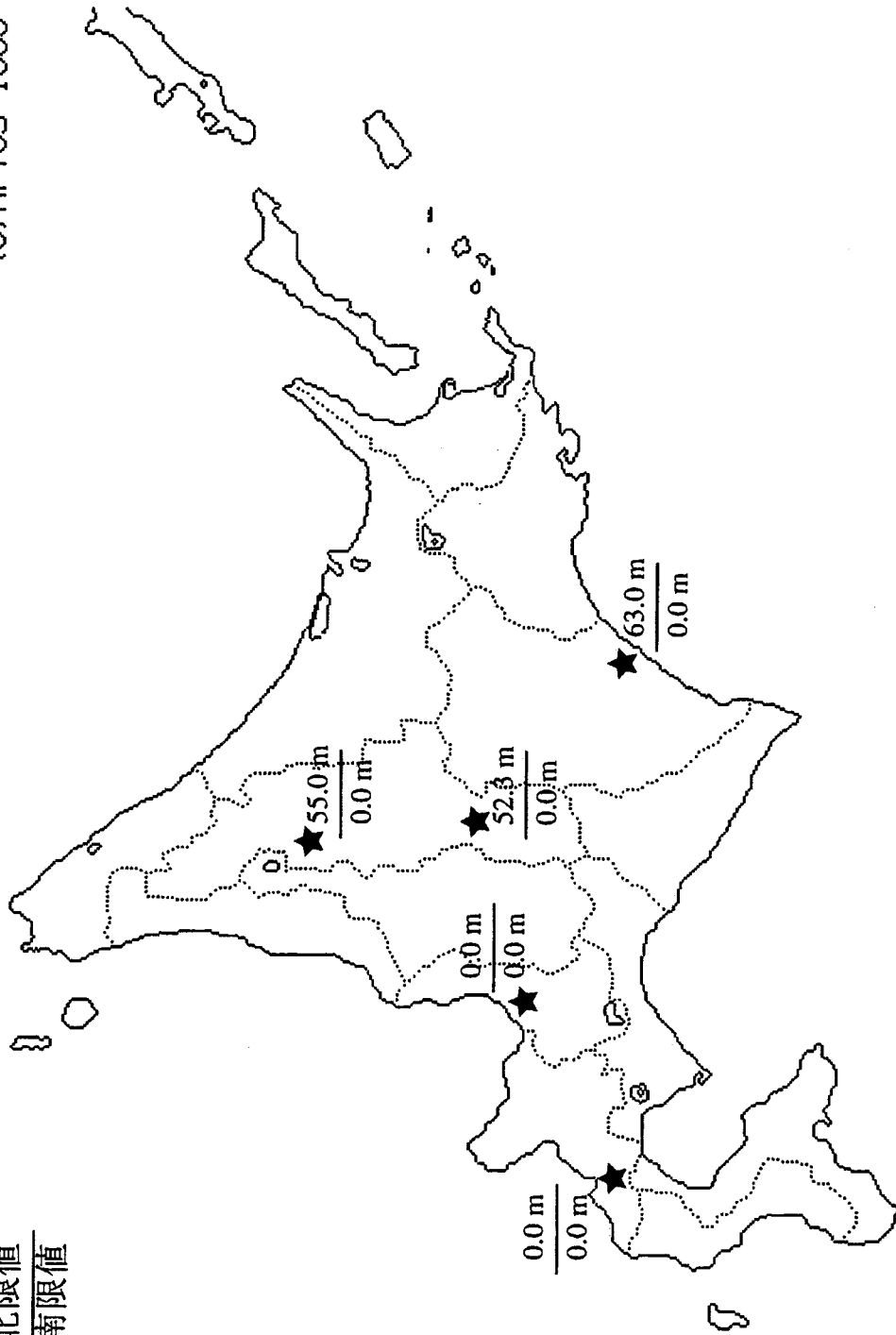
18000年前

図 3-36 永久凍土分布図 (18000年前) 積雪あり

計算結果（無積雪条件）：
永久凍土深度（m）

古気温復元の
北限値 / 南限値

(C) Aries 1993



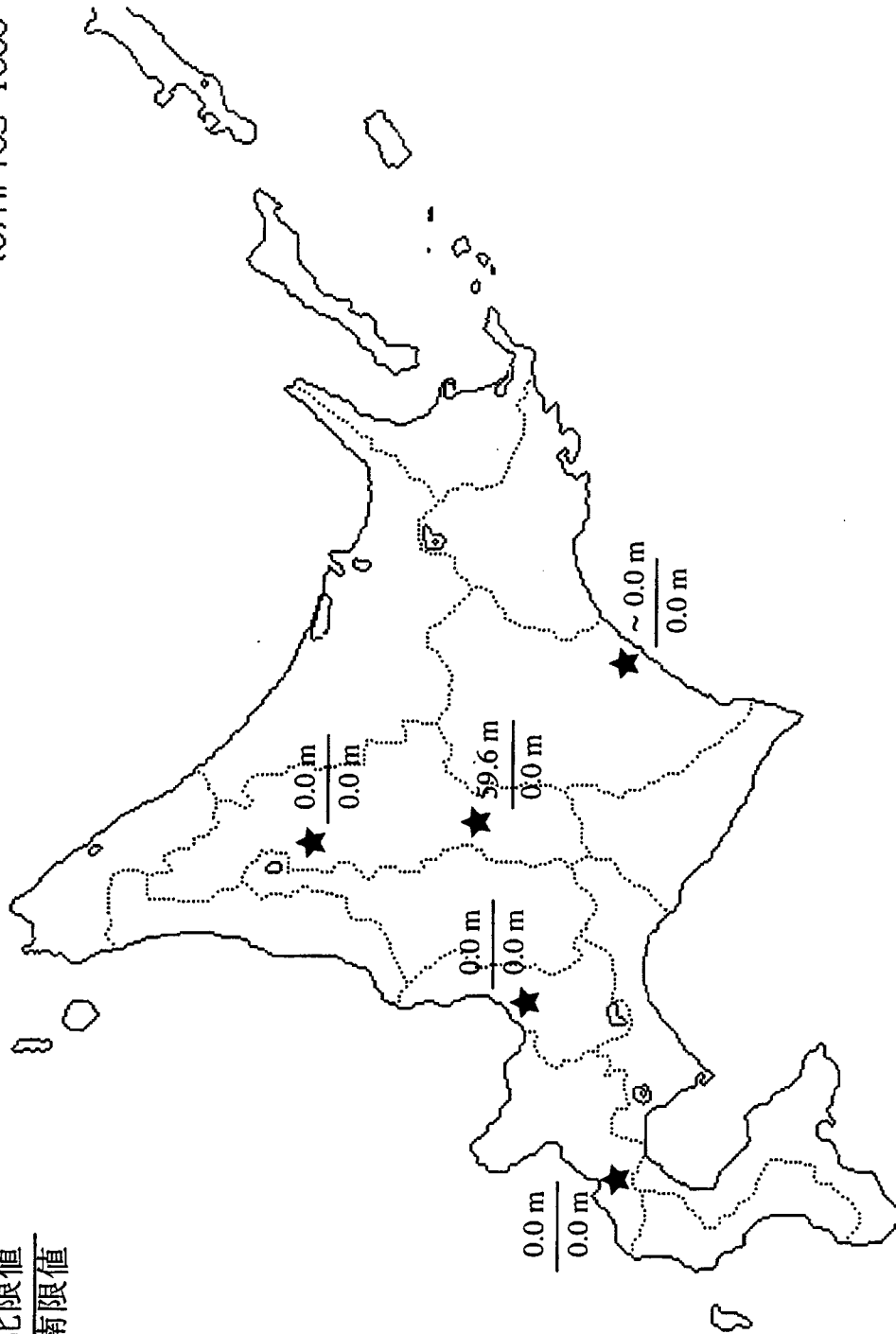
18000年前
積雪無し

図 3-37 永久凍土分布図（18000年前） 無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值
南限值

(C)Aries 1993



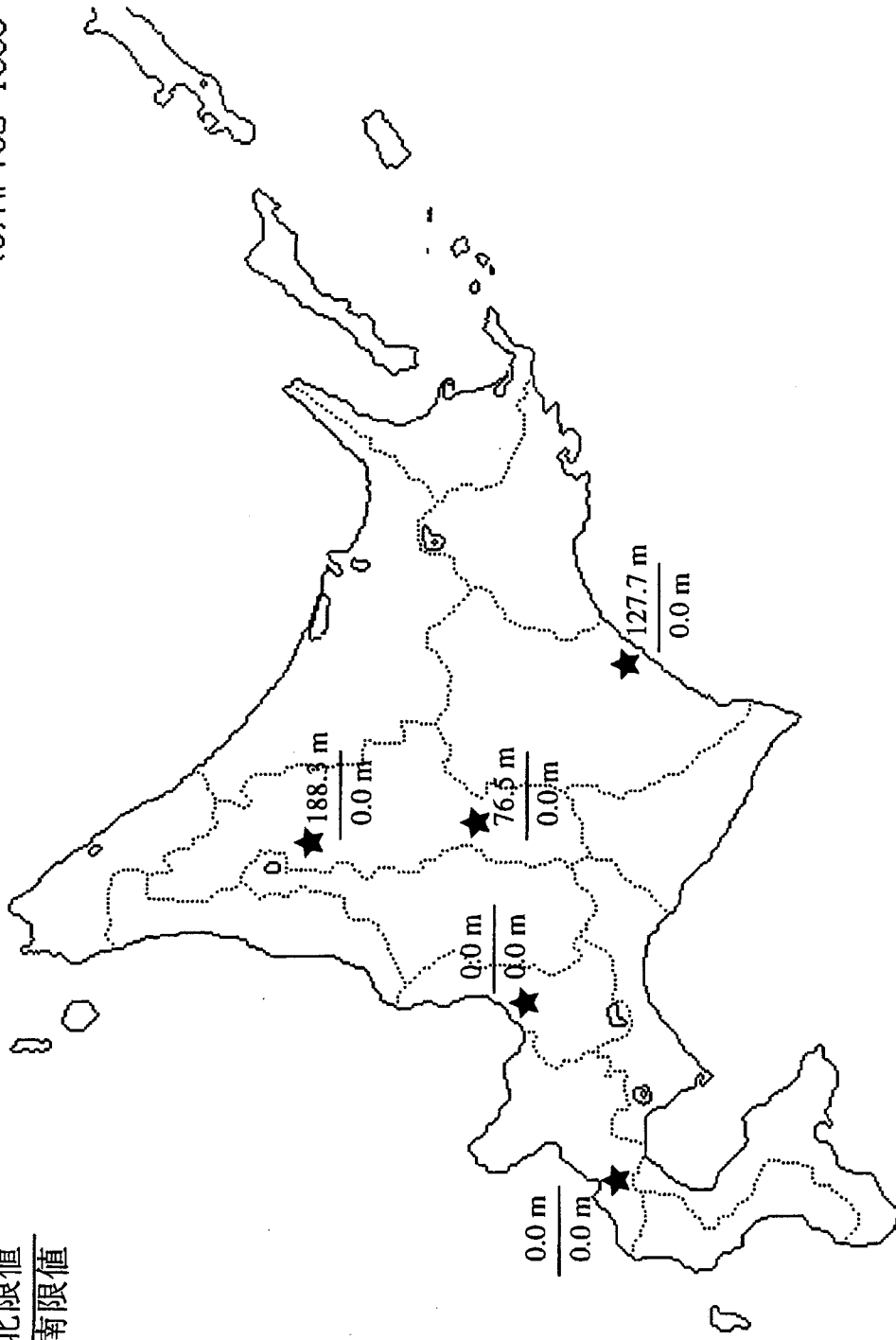
14000年前

図 3 -38 永久凍土分布図 (14000年前) 積雪あり

計算結果 (無積雪条件) :
永久凍土深度 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$

(C) Aries 1993



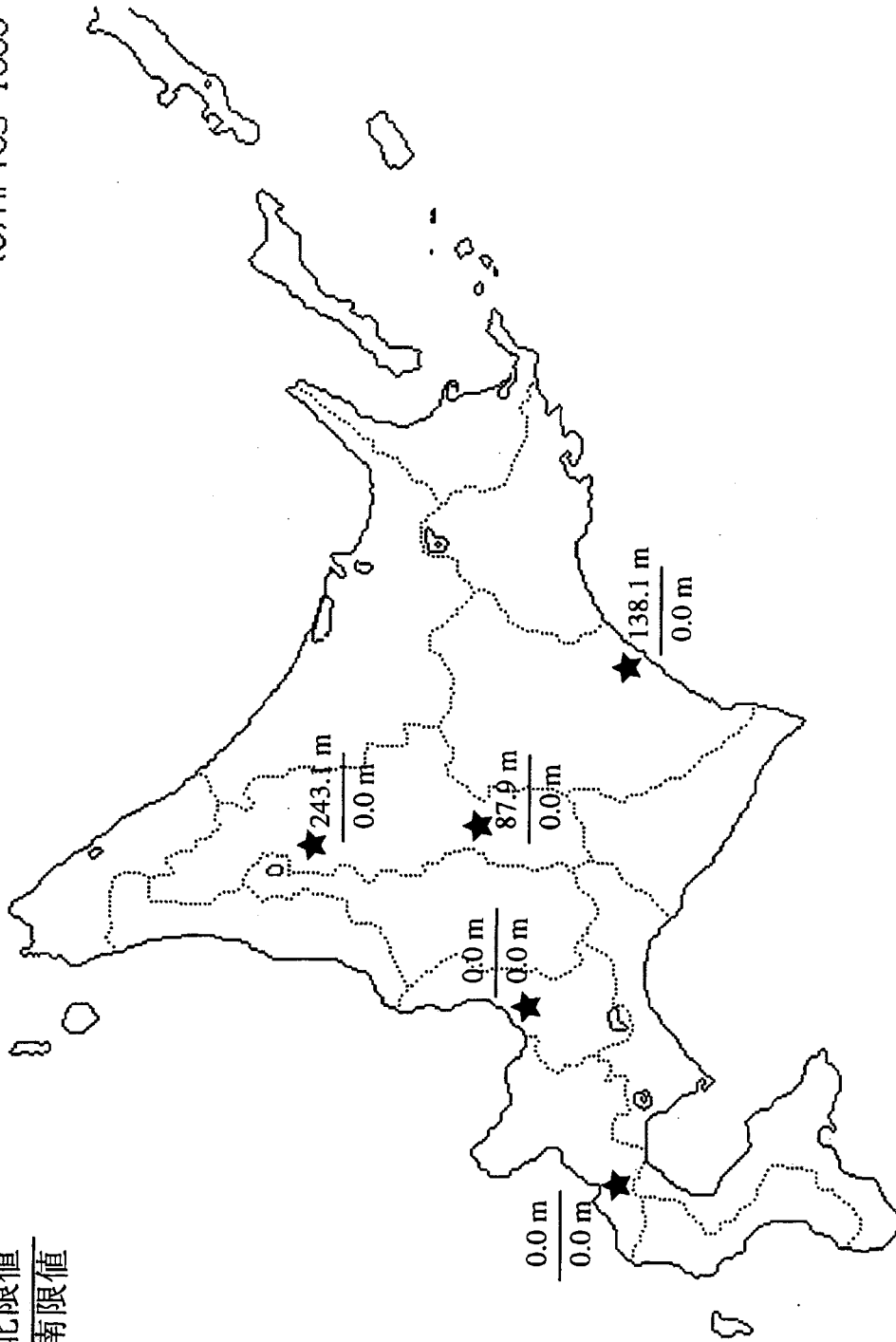
14000年前
積雪無し

図 3-39 永久凍土分布図 (14000年前) 無積雪

計算結果（無積雪条件）：
永久凍土深度（m）

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$

(C) Aries 1993



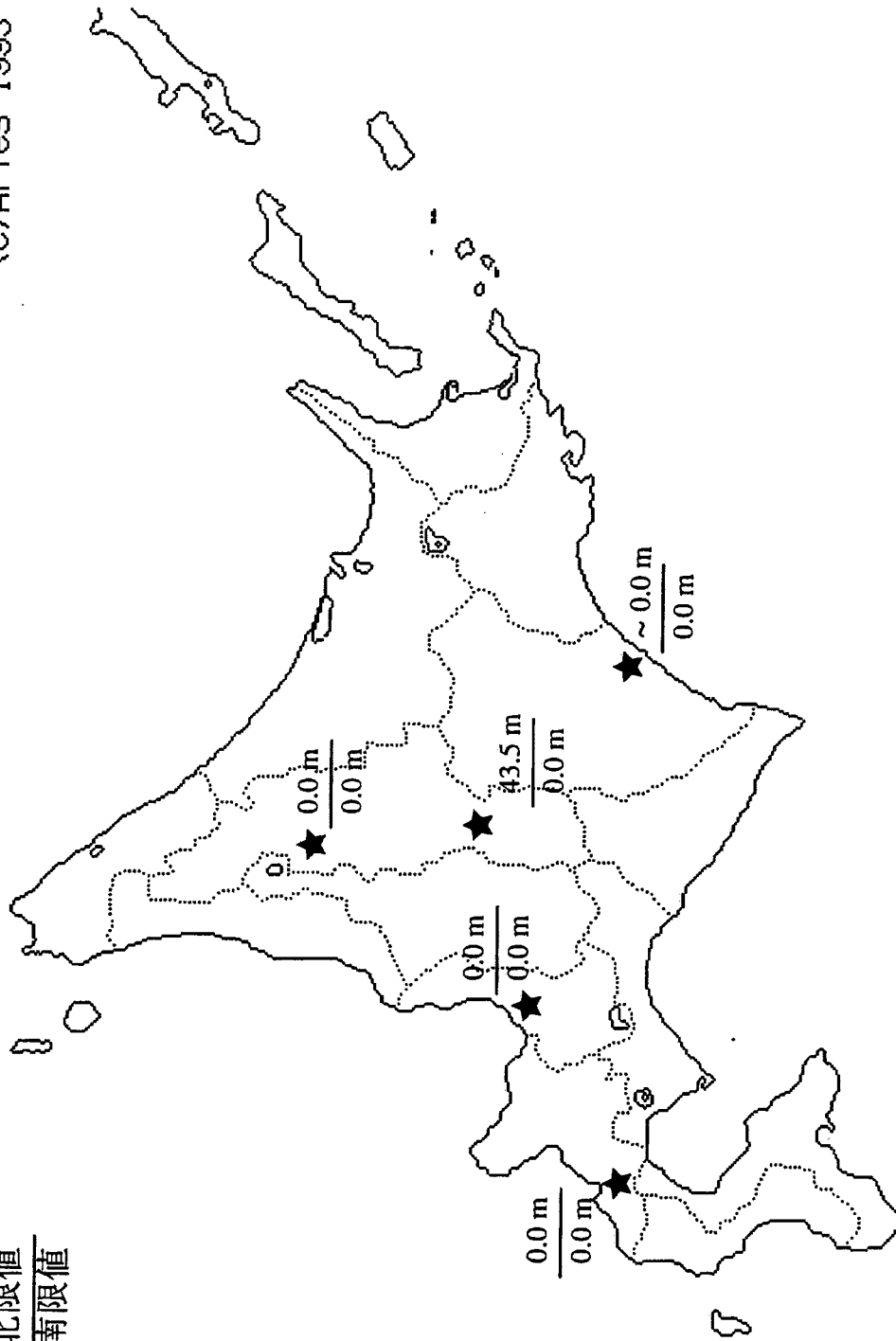
10000年前
積雪無し

図 3-41 永久凍土分布図（10000年前） 無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值
南限值

(C)Aries 1993



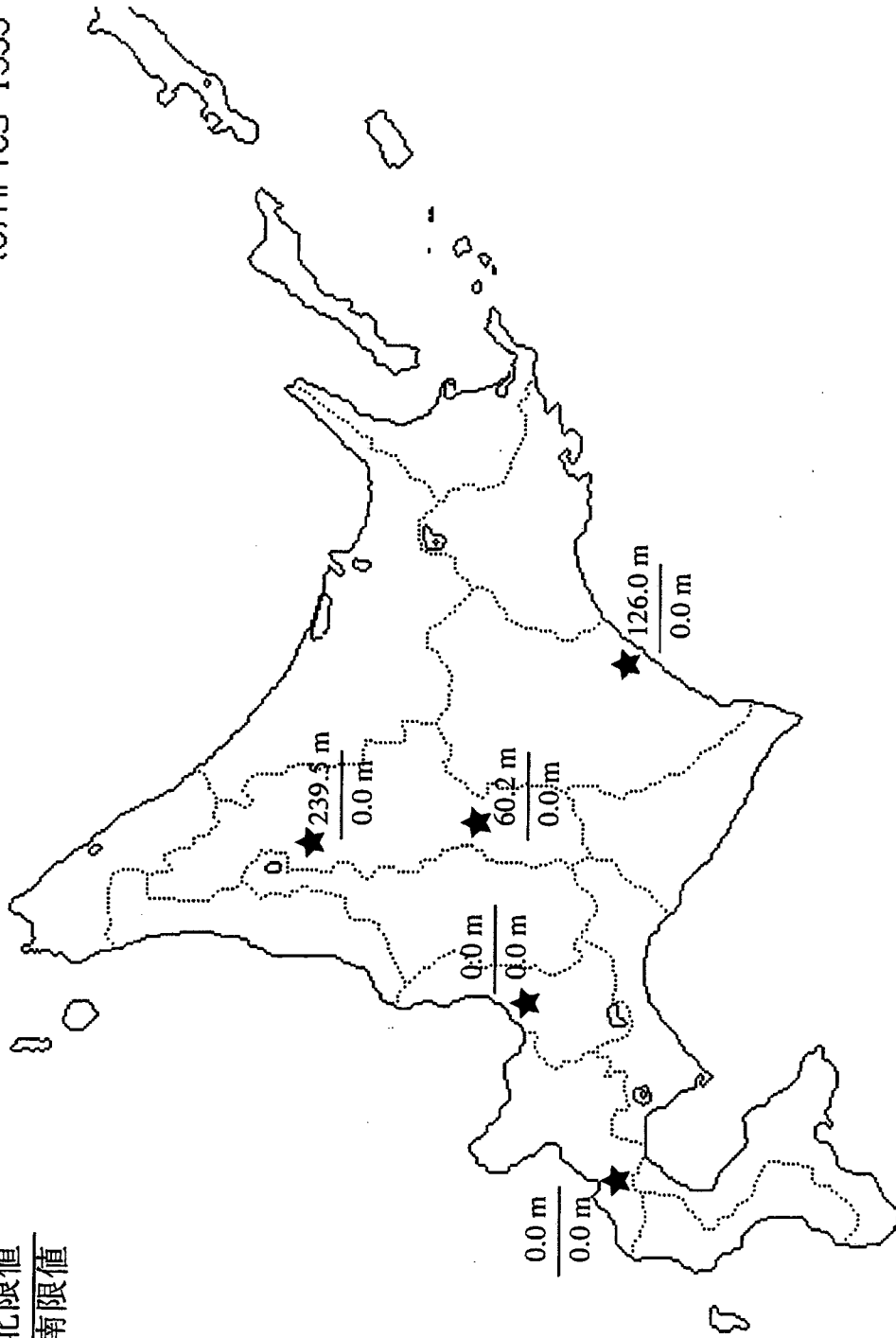
8000年前

図 3-42 永久凍土分布図 (8000年前) 積雪あり

計算結果 (無積雪条件) :
永久凍土深度 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$

(C)Aries 1993



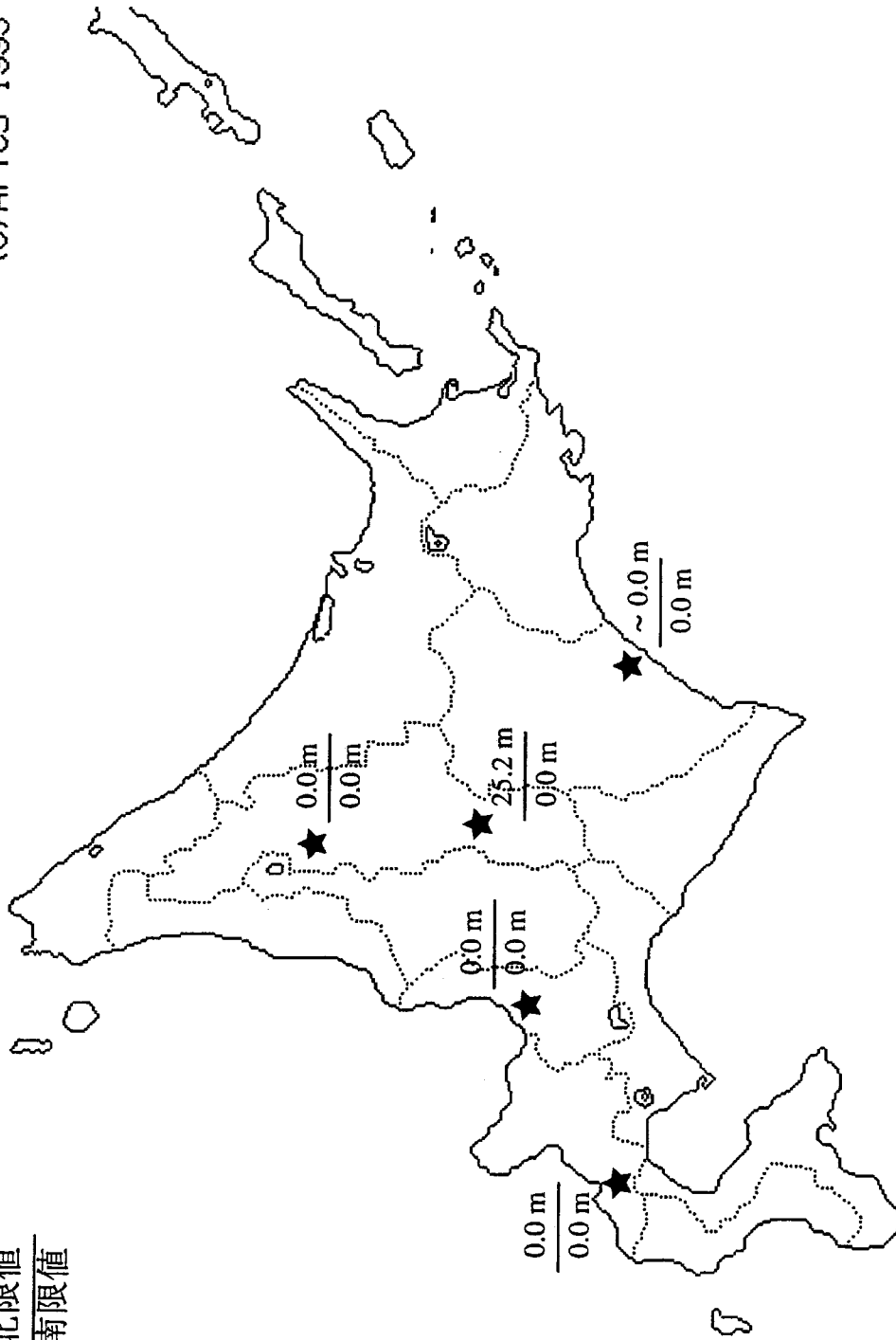
8000年前
積雪無し

図3-43 永久凍土分布図 (8000年前) 無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值 / 南限值

(C)Aries 1993



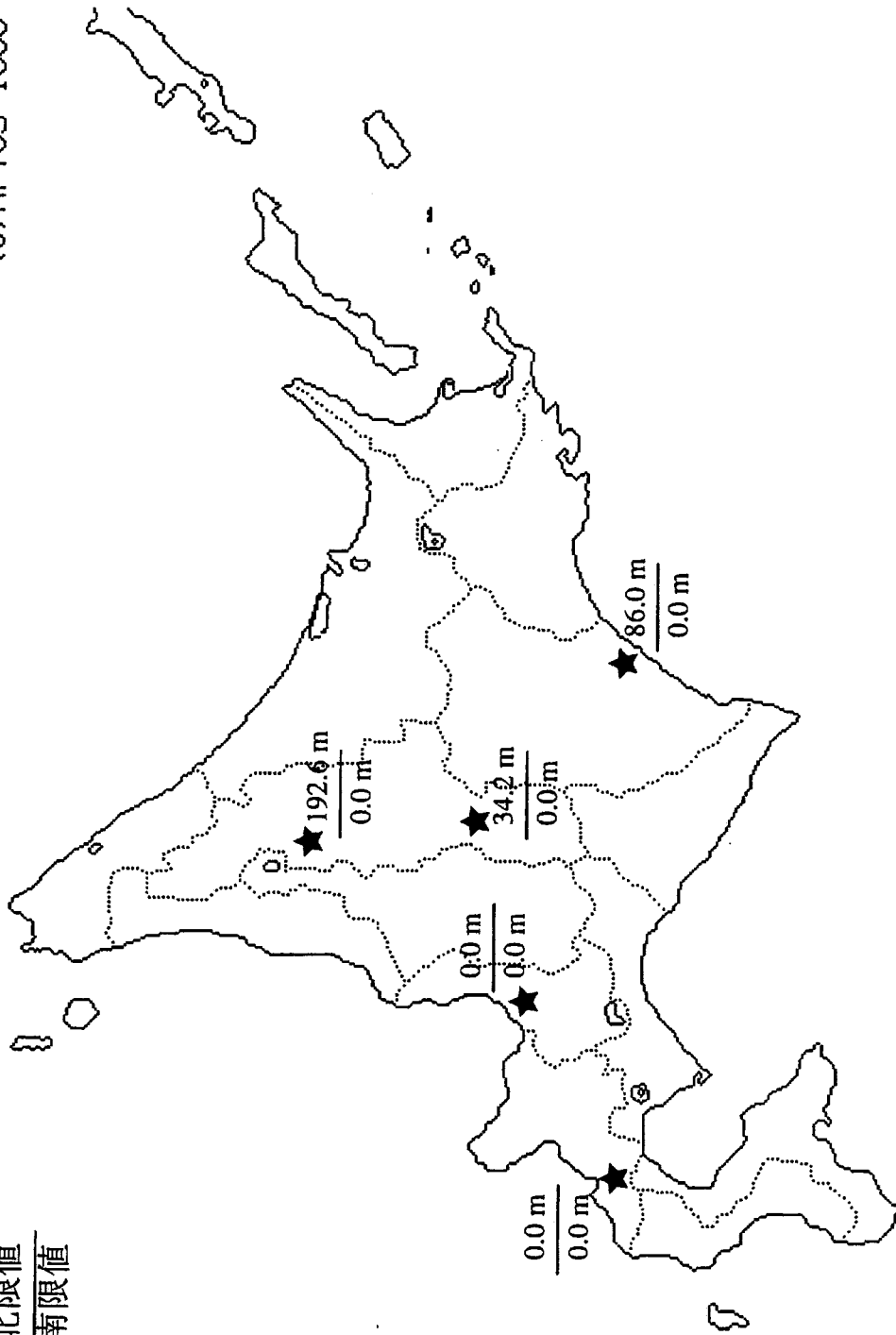
6000年前

図3-44 永久凍土分布図 (6000年前) 積雪あり

計算結果 (無積雪条件) :
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值 / 南限值

(C) Ar ies 1993



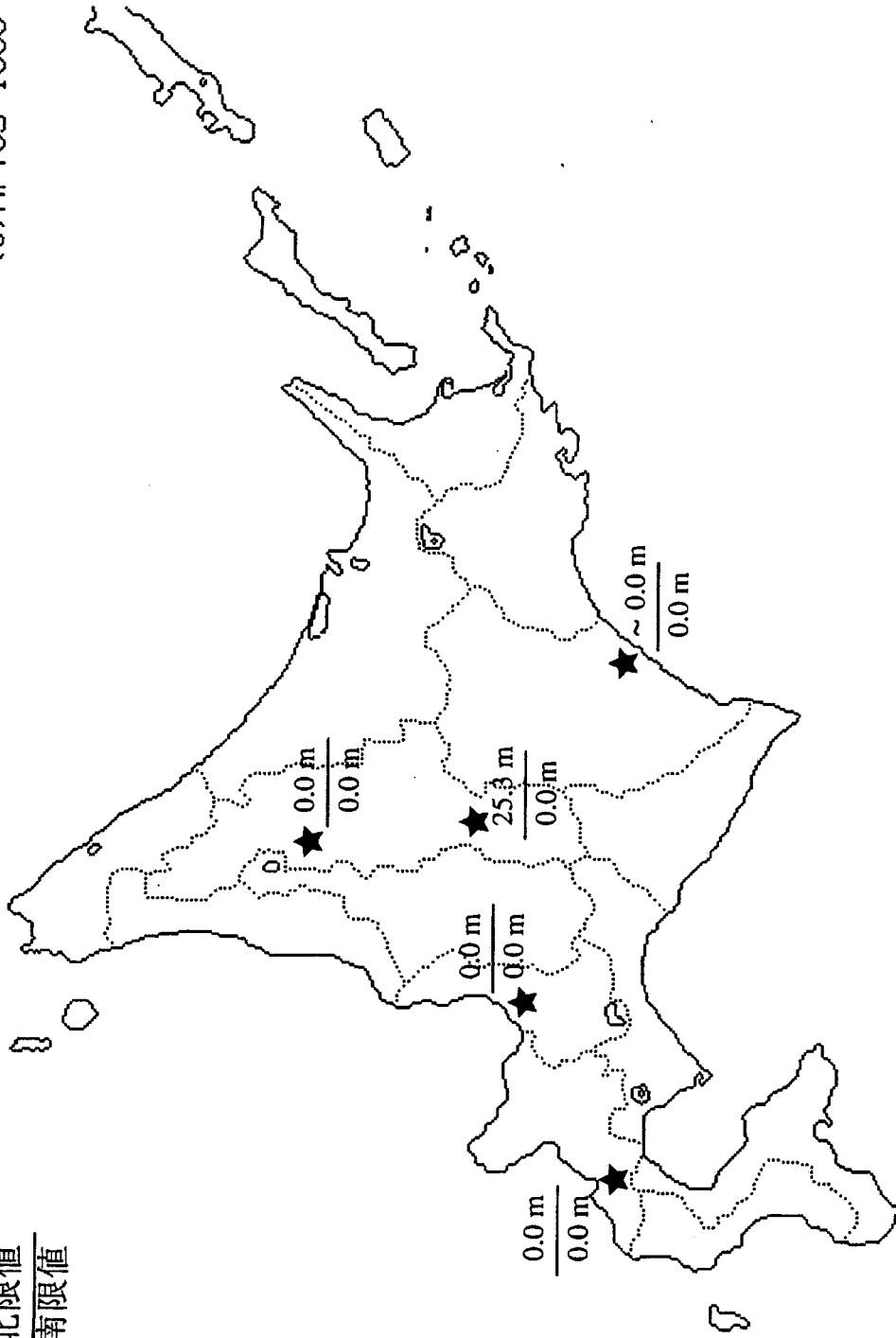
6000年前
積雪無し

図 3-45 永久凍土分布図 (6000年前) 無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值 / 南限值

(C) Aries 1993



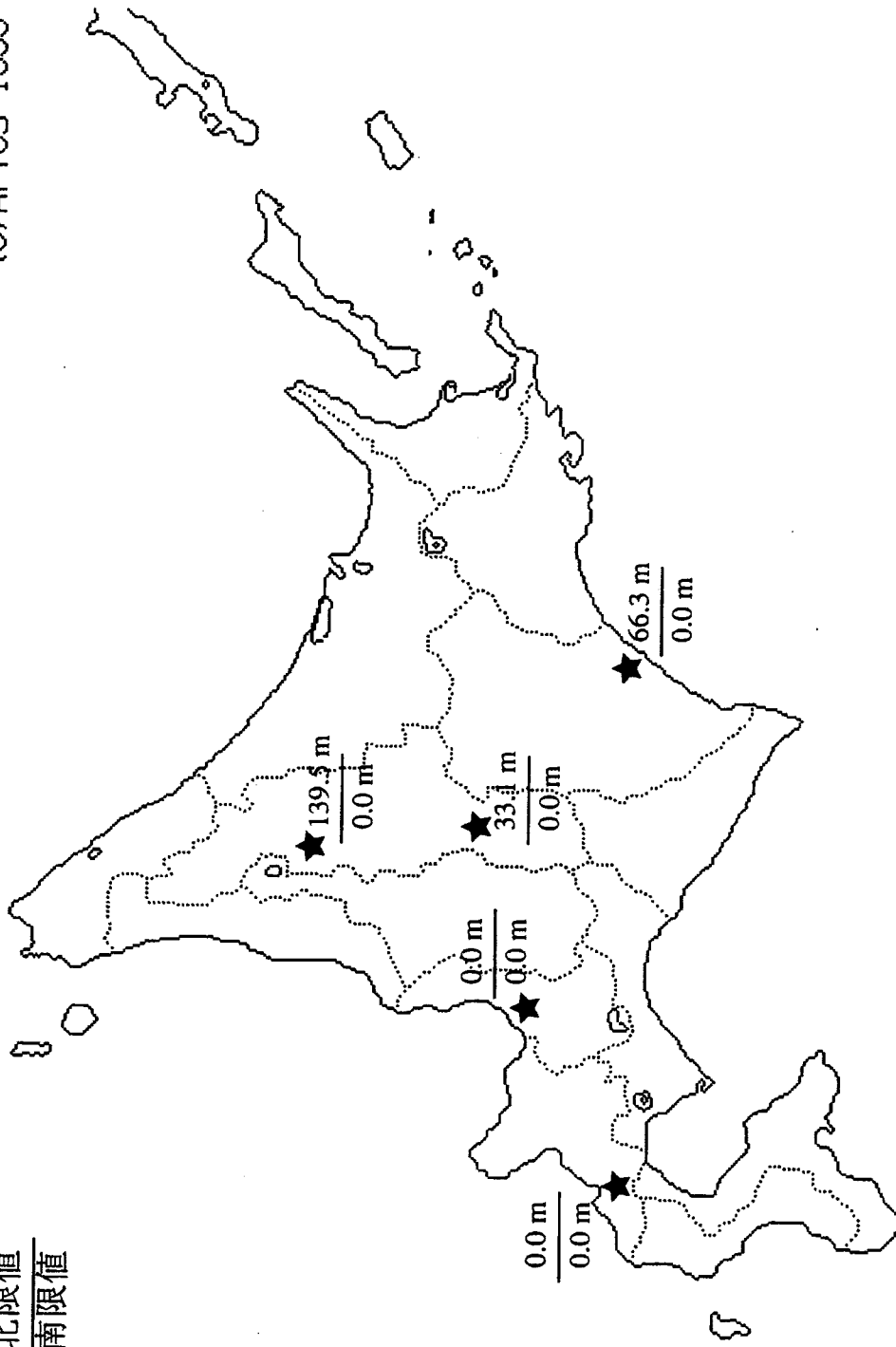
4000年前

图 3-46 永久凍土分布図 (4000年前) 積雪あり

計算結果（無積雪条件）：
永久凍土深度（m）

古気温復元の
北限值 / 南限值

(C) Aries 1993



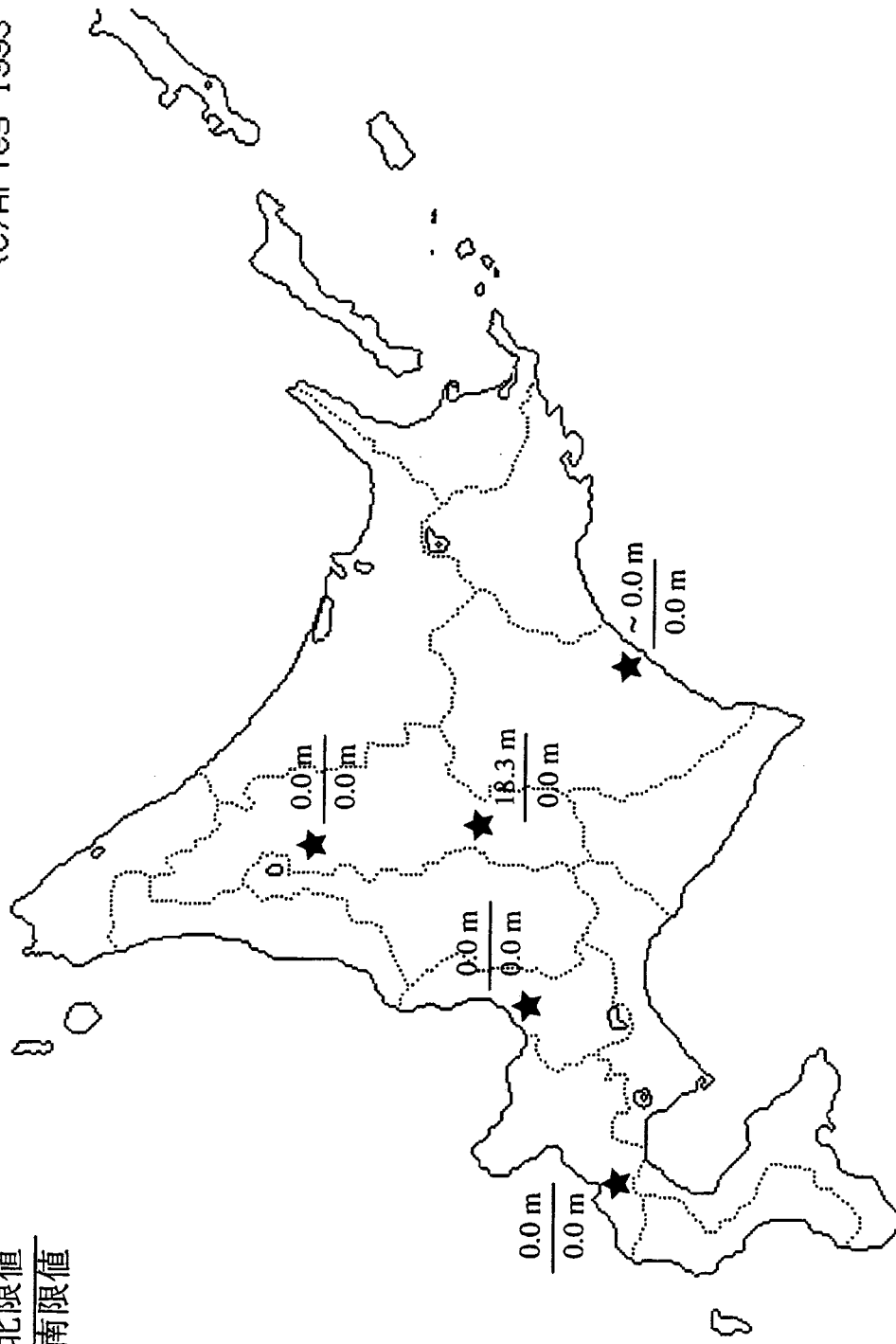
4000年前
積雪無し

図3-47 永久凍土分布図（4000年前） 無積雪

計算結果：
永久凍土深度 (m)

古気温復元の
北限值 / 南限值

(C) Aries 1993



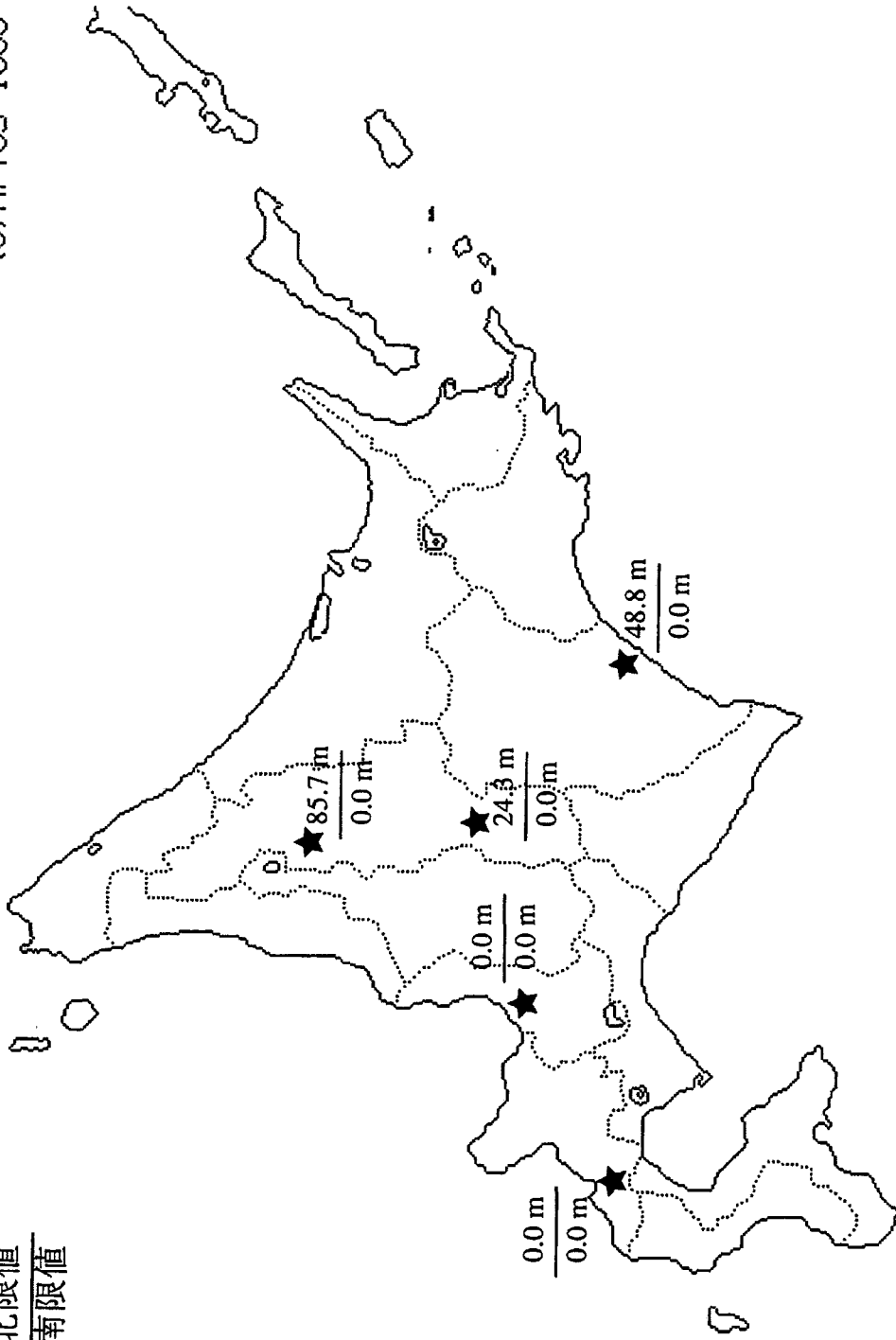
2000年前

図 3-48 永久凍土分布図 (2000年前) 積雪あり

計算結果 (無積雪条件) :
永久凍土深度 (m)

古気温復元の $\frac{\text{北限值}}{\text{南限值}}$

(C)Aries 1993



2000年前
積雪無し

図3-49 永久凍土分布図 (2000年前) 無積雪

4. 考察

4.1 数値解析による永久凍土の形成過程復元の妥当性の検討

本数値解析プログラムの妥当性を検証するには、過去の気候変動が永久凍土の消長に与えた影響とその履歴を再現しなければならない。しかし、化石氷楔などのかつての永久凍土の存在を示す指標は、北海道ではごくわずかであり、こうした地学的根拠からの永久凍土の消長を復元することは難しい。永久凍土中の地中温度プロファイルから、いわゆるインバージョンで過去の地表面温度の変動を復元する試みが、アラスカで試みられた。しかし、永久凍土中の地中温度の変動幅は 0.001°C 程度とわずかであり、こうした微小温度変動を検知出来る程の高分解の地温測定はない。そこで、過去の永久凍土の消長が保存されている事例として、永久凍土の部分融解とそれに伴う地盤沈下の地形（サーモカルスト、アラス）と永久凍土層中の部分融解層（タリク）がある。これは東シベリアのヤクーツク周辺で、永久凍土表面を覆う植生タイガが森林火災などで攪乱を受けると、地表面熱収支が乱されて永久凍土の融解が生ずる。この地域の永久凍土中には氷が多数含まれており、一旦融解が進むと地下水融解によって凍土体積が減少する。その結果地表面が陥没して凹地が形成される。これがサーモカルスト地形であり、シベリアではアラスと呼ばれている。凹地に融解水が貯留されることで、湖底面温度は年間を通じてプラスに保たれ、その結果湖盆下では、永久凍土の融解が進行する。やがて湖水が排出されたりあるいは蒸発してなくなると、湖底面は再び厳しい寒さに曝され、上部から永久凍土が再形成される。一方下方の部分融解層は未だに未凍結状態となっている。この段階では表面から再永久凍土層一部分融解層（タリク）－下方永久凍土層－未凍結層という永久凍土層－未凍結層の互層が形成される。つまり過去の永久凍土の消長が、こうした互層として保存されることになる。そこで、本数値解析プログラムによって、適切な境界条件を仮定して、上記のアラスやタリクの形成が可能かどうか再現することで、数値解析の妥当性を検証することが可能となる。

TEM法によるタリクの存在の確認

シベリア地域は、世界で最も凍土層の厚い地域とされている。2000年8月に、サハ国ヤクーツク市北西30kmに位置するネレゲル (Neleger) 地域において、永久凍土の性状調査が行われた (Wada et al., 2001)。本地域は、レナ河の西岸で中位の河岸段丘面上に位置し、ボーリング調査などにより永久凍土層の厚さは400~500mとされている。図4-1には、調査位置の遠景を示す。写真中央は、アラスの中に発達したピンゴである。このピンゴは直径50~60m、比高差は3~4mである。後方にはタイガの森林が見られる。本地域でのアラスは、タイガの森林から数10cmから数m程度の陥没地形を呈している。

この地域は、Yakutsk-Kangalassky 炭田地域にあり、深部ボーリングや物理探査などによりViluysky 背斜構造によって特徴付けられている (Wada et al., 2000)。レナ川西岸では、ジュラ紀の陸性堆積物が広く分布し1000m以上の厚さで存在し、北側に向かって厚くなる傾向を示す。

永久凍土層の構造を調査するためにTEM法（時間領域電磁法）による比抵抗調査が行われた。土壌や岩石は 0°C 以下になると間隙中の水分が凍結し、比抵抗が急激に上昇することから土壌や岩盤の比抵抗値の変化によって凍結状況の推定が可能である。図4-2はアラスからタイガの森に至る測線上で、20m間隔で計測をおこない、層構造インバージョンにより得られた比抵抗構造を示している。地表下400~450mには10-17ohm-mの低比抵抗層が見られる。この比抵抗境界は凍土層の最下部を示しており、この結果は周辺のボーリング結果による凍土層の層厚と調査している。また、深度100~200m付近には21~27ohm-mの低比抵抗層が見られる。これは、永久凍土層中のタリクと考えられる。

数値解析の結果について

前述のアラスとタリクの存在について、既存の以下のデータから数値解析を行った。まずアラスの形成年代については、レナ河対岸でのアラス堆積物の年代測定から、約 8000 年前から 4000 年前に地盤沈下と湖成堆積があったとする。また現在から 4000 年前までの気温変動は小さく、ほぼ年平均気温は -10°C であったとする。極地カナダの例から湖底の表面温度は $+2^{\circ}\text{C}$ であったと仮定する。構成地層は3層とし、上部から湖成層（シルト）-砂層-基盤岩石層とした。

数値解析では2事例を想定してパラメータを決めた。

—事例1—

(1) 4100 年前 年平均地表面温度 -10°C

この時には既に 400m の永久凍土が存在していた。

(2) 4100 年間～100 年前まで（融解期間 4000 年）

アラスの形成に伴い、次第に水が貯留され、湖盆の温度は $+2^{\circ}\text{C}$ に上昇した。このため凍土は表面から融解が進行する。永久凍土下面も表面加熱の影響で次第に浅くなる。

(3) 100 年前に湖水が干上がる。

地表面温度は 100 年間かけて再び -10°C になり、表面から永久凍土が再形成される。

—事例2—

(1) 3500 年前 年平均地表面温度 -10°C

この時には既に 400m の永久凍土が存在していた。

(2) 3500 年間～500 年前まで（融解期間 3000 年）

アラスの形成に伴い、次第に水が貯留され、湖盆の温度は $+2^{\circ}\text{C}$ に上昇した。このため凍土は表面から融解が進行する。永久凍土下面も表面加熱の影響で次第に浅くなる。

(3) 500 年前 500 年前に湖水が干上がる。

地表面温度は 500 年間かけて再び -10°C になり、表面から永久凍土が再形成される。

これらの条件下での数値解析結果を図 4-3 と図 4-4 に示す。事例 1 では、4000 年経過したあとでタリクの下限は約 200m に達する。再凍結が最上部から進行し、約 600 年間タリクが存在する。ネレゲルサイトでの実測ではタリク下限は約 200m であり、また上限は約 80m であった。これに適合するケースとしては、湖水が干上がり再凍結が開始して 200 年後になる。事例 2 では、アラスに湖水が貯留される期間が短く、タリクの下限は 200m に達しない。また再凍結が進行して、タリク下限と合致するには約 800 年を要することが分かる。

以上の事例比較から、本数値解析によって、ネレゲルでのタリクの形成が 4000 年間程度の湖水貯留と数 100 年後の再凍結で形成された過程が正しく再現され、本数値解析の妥当性を示すことが出来た。

This is a blank page.

4.2 北海道における永久凍土形成復元

北海道内5地点についての数値解析による永久凍土形成復元の結果は以下の通りである。

* 剣淵 永久凍土が形成される場合

北限值 無積雪 (図3-16) 11000年ころに250mまで永久凍土が形成され、後氷期以降も残存する。

北限值 積雪あり (図3-14) 19000年ころから浅い永久凍土が形成される。活動層を約2mとすると、厚さ5m程度の永久凍土が7000年まで維持される。

永久凍土が形成されない場合

南限值 無積雪 (図3-17)

南限值 積雪あり (図3-14)

以上から剣淵では、北限値を適用すると積雪の有無に関係なく永久凍土が形成される。その厚さから連続的永久凍土に対応する。南限值の場合には、無積雪条件でも永久凍土は形成されない。

* 富良野 永久凍土が形成される場合

北限值 無積雪 (図3-20) 18000年から急激に永久凍土が深くまで進行し、16000年ころに約100mに達する。

北限值 積雪あり (図3-18) 永久凍土形成の時期と期間は、無積雪条件とほぼ同じであるが、永久凍土厚さは減少する。

永久凍土が形成されない場合

南限值 無積雪 (図3-21)

南限值 積雪あり (図3-19)

無積雪では季節凍土が4mを超えており、北向き斜面のように場所によっては点状的永久凍土が存在する。積雪下では永久凍土は形成されない。

以上から富良野では剣淵と同じように北限値を適用した場合には、積雪条件にかかわらず連続的永久凍土が形成される。南限值で無積雪では、点状的永久凍土が形成されるが、積雪条件では永久凍土は形成されない。

* 石狩 すべての条件で永久凍土は形成されない。(図3-22, 23, 24, 25)。しかし、無積雪条件では北限値及び南限値ともに季節凍土が4mを超えており、点状的永久凍土が形成される可能性を示す。これは復元された温度の北限値と南限値の差が小さいことによる。

* 黒松内 石狩と類似の結果が得られた。点状的永久凍土の形成可能性がある。

* 十勝 永久凍土が形成される場合

北限值 無積雪 (図3-22) 北海道で最も厚い永久凍土が
18000年から形成される。最も厚くなるのは氷期
の終わりで10000年である。

点状的な永久凍土が形成される場合

北限值 積雪あり (図3-30) 20000年から15000年の間に
点状的な永久凍土が形成される。

永久凍土が形成されない場合

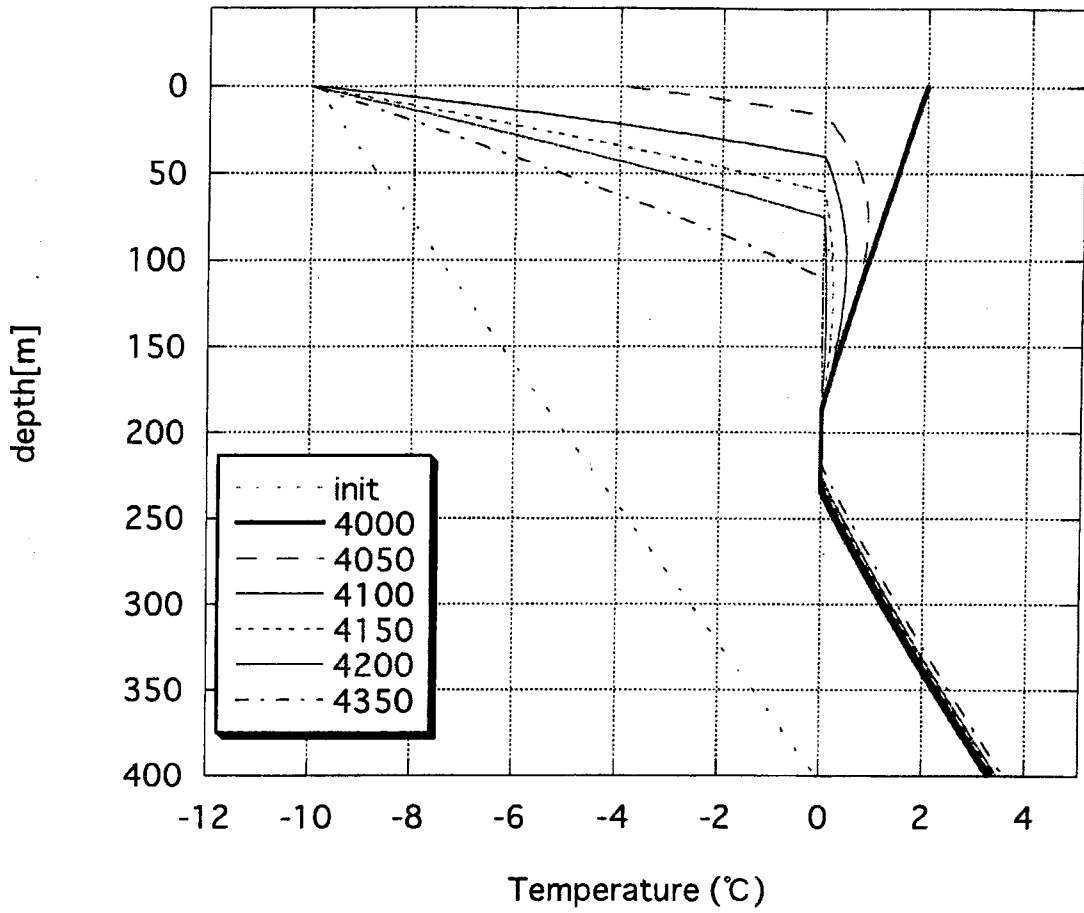
南限值 無積雪 (図3-33)

南限值 積雪あり (図3-31)

最後に経過時間ごとの北海道内永久凍土の形成過程を図3-34から図3-49に示す。無積雪条件では、永久凍土は剣淵、富良野、十勝で18000年以降から形成され、剣淵では10000年に最深で200mを超える。この期間は北海道東側では連続的永久凍土が形成されていた。いずれの地点も2000年まで永久凍土が残存していた。これは後氷期の温度上昇が遅いことを反映している。積雪条件では富良野のみで永久凍土が形成され、その存在期間も無積雪条件とほぼ同じであった。

これらの推定された永久凍土の分布から、北海道では温度条件とともに積雪の有無が永久凍土の形成に大きく影響していることが分かる。北海道東側では200mを超える永久凍土が形成されることが示された。現在と同じ程度の積雪があれば、一部を除いて連続的永久凍土は形成されない。既に化石氷楔の存在が十勝平野、根釧平野、オホーツク沿岸で報告されており、またその他の周氷河現象も北海道東側に限られていることから、今回の復元された温度と推定された積雪条件による永久凍土形成復元は妥当なものと言える。

Alas:4000years, Cooling:100years



Thickness of permafrost and talik

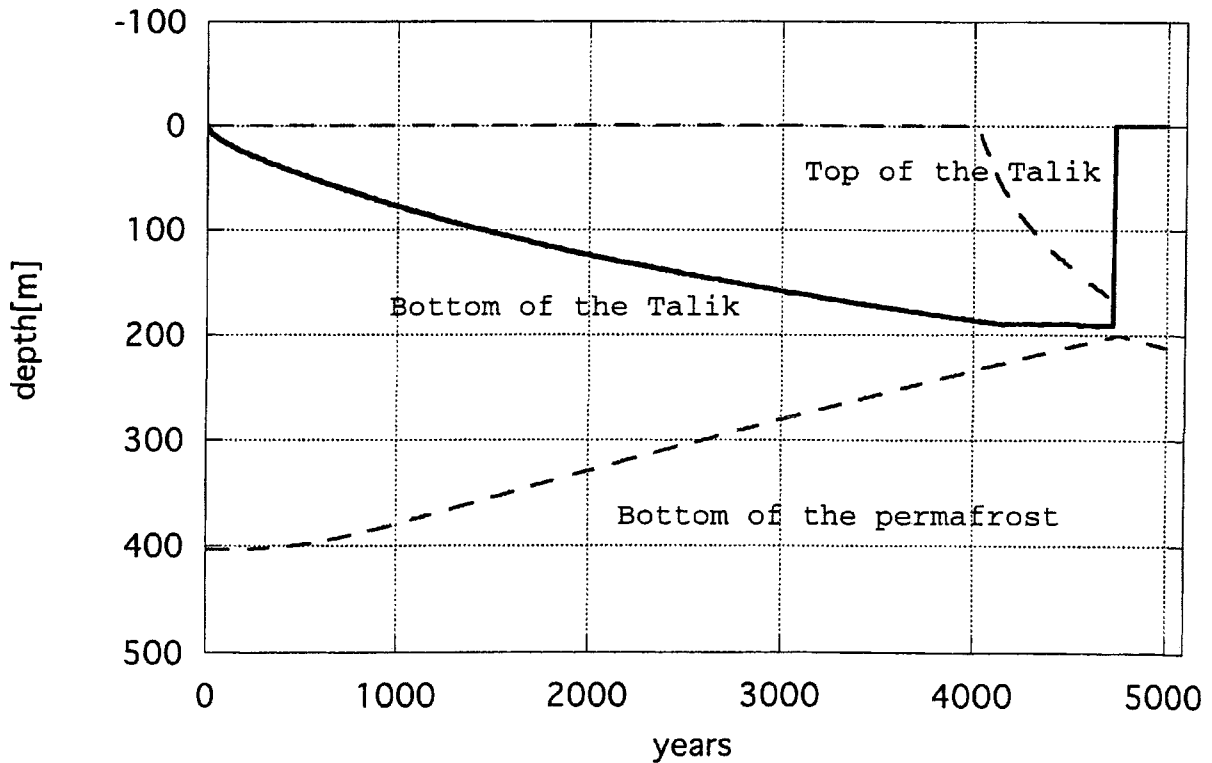
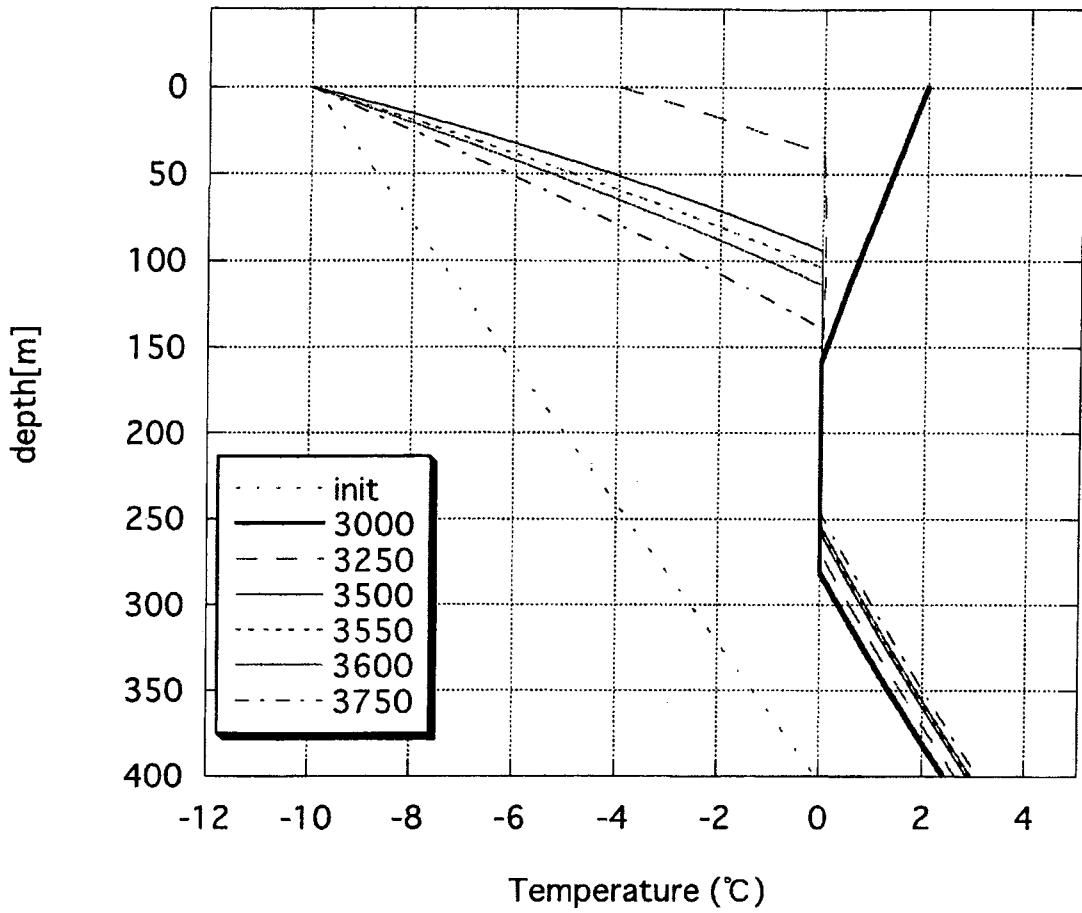


図4-3 計算結果 (事例1)

Alas:3000years, Cooling:500years



Thickness of permafrost and talik

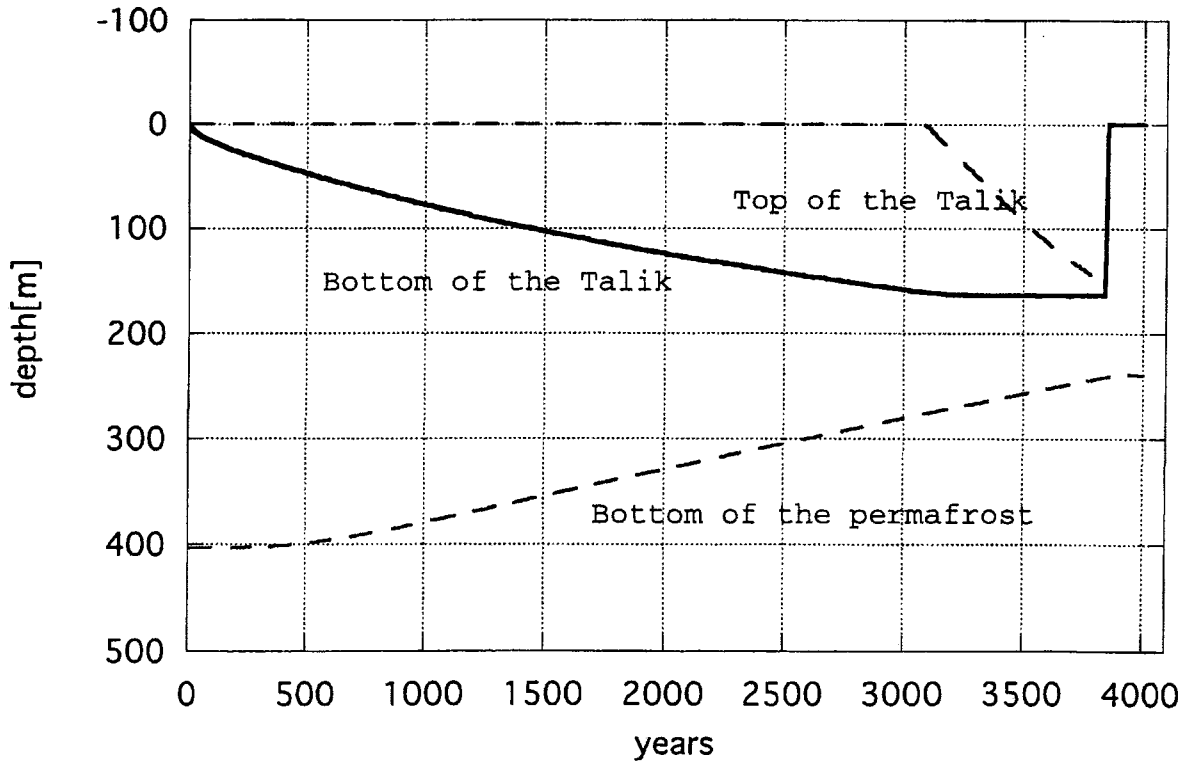


图 4-4 計算結果 (事例 2)

参考文献

土質工学会編, 「土の凍結 その理論と実際」(1994)

福田正己: “自然積雪下の土の凍結の深さの推定法について. 北海道全域における積雪の分布と特性ならびにそれが地面凍結, 植生, 昆虫生態に及ぼす影響に関する研究”, pp.55-74(1982)

五十嵐八枝子ほか: “北海道の剣淵盆地と富良野盆地における 32,000 年間の植生変遷史”, 第四紀研究, 32, 2(1993)

Mikishin, Y. A. & Gvozdeva, I. G. : “Subfossil spore and pollen assemblages of northern Sakhalin as basis for reconstruction of the Holocene vegetation”, Reports of the International Workshop on the Global Changes Studies in the Far East, Vol. 1(2001)

仲山智子, 雪氷 Vol.57 pp.125-132(1995)

成瀬廉二・油川英明・石川信敬: “札幌市における雪の堆積分布の特性”, 低温科学, 物理編, 36, pp.139-153(1978)

斎藤武雄, 数値伝熱学, 養賢堂(1986)

Wada, K. et al. : “Deep resistivity structure of permafrost area in Siberia by transient electromagnetic method”, in Proceeding of the Eighth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, pp.264-272(2000)

Wada, K. et al. : “Deep resistivity structure of permafrost area in Siberia”, in Proceeding of the Ninth Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia, pp.191-198(2001)

Yen, Y.C. : “Review of Thermal Properties of Snow, Ice and Sea Ice”, CRREL Rep., 81-10, pp.27(1981)