

分布型情報を導入した全球氷河モデルHYOGA2の 開発とヨーロッパ地域における検証

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A GLOBAL GLACIER MODEL
HYOGA2 WITH DISTRIBUTED GLACIER INFORMATION OVER EUROPE

平林由希子¹・鼎信次郎²
Yukiko HIRABAYASHI and Shinjiro KANAE

¹正会員 博士 (工学) 東京大学 大学院工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生2丁目11-16)

²正会員 博士 (工学) 東京工業大学 大学院情報理工学研究科 准教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

Water from small glaciers and ice caps are sensitive against the ongoing global climate change. However, previous researches have been estimated current water resources from glaciers based on area-weight method of available mass balance observations. It is therefore difficult to estimate the future volume change of glaciers due to the lack of available data. This paper reports our latest effort to develop a global glacier model that can be coupled with global hydrological and land surface models by including individual glacier inventory data in a distributed way. Simulation result over European small glaciers showed that the newly developed model successfully replicates average mass balance obtained from available observation-based estimates, indicating the advantage of new model which includes detail location and area distribution of glacier inventories, comparing to the original glacier model assuming one large glacier within each 0.5-degree grid. Sensitivity test revealed that the calculation excluding small glaciers within 0.5-degree grid in a random manner shows similar mass changes, indicating the potential method to save calculation cost of the new model. Preliminary experiment using warming climate scenario by a climate model showed that the new model has lower climate sensitivity than that of the previous model due to the loss of small glaciers at low altitude.

Key Words : glacier, mass balance, water resources

1. 研究の背景と目的

近年, 世界の山岳氷河 (以降, 「山岳氷河」はグリーンランドや南極の氷床を除いた陸域の氷河を指す) は急激に縮退していることが報告されており¹⁾, ある地域では氷河からの溶け水の増大による水資源の増加が観測されている一方で, 近い将来の氷河の消失と河川の基底流量の著しい低下が危惧されており²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾, 将来の氷河の質量変動とその融解水の変化による水資源量の変動を把握することは, 重要な研究課題である. また, 将来懸念されている地球温暖化に伴う氷河縮退に伴う海洋への淡水供給の増加は, 昇温による海水膨張と並び将来の海水準上昇に一定の寄与をすると考えられており⁶⁾, 過去から将来の氷河の質量変動や, 氷河から海へ流出する

淡水量を, 広域かつ定量的に推定することも重要である.

一方, 質量収支の変化が観測されている氷河は, 約16万個とも言われる世界の山岳氷河のうちの300地点にも満たず, 数十年単位の継続的な質量観測が行われている氷河は約30程度である. そのため, 山岳氷河からの融解水が河川流量へ及ぼす影響が算定されている氷河は, ヨーロッパアルプスやアメリカ, 北欧などの観測データが揃っている限られた一部の地域の氷河だけであり, 大陸規模の氷河の質量変化と海への淡水供給量の総量の推定は, 既存の質量収支観測データから地域ごとの面積や気象要素などを勘案した重み付け平均で求められることが多い (たとえばMeier et al, 1984⁶⁾).

数十km²以上の広域を対象に数値モデルを用いて山岳氷河の質量変化を算定した例としては, Immerzeel et al. (2010)⁴⁾やRadic and Hock(2011)⁷⁾が挙げられる. 前

者はアジアの5大河川を対象に、日単位の降水量、衛星データから得られた積雪面積と氷河分布、河川流量から数値モデルにおける融雪と融氷のパラメータを決定し、氷河起源の水資源が下流の河川流量へ与える影響を算定している。しかし、この研究では温暖化の前後の気温の上昇に応じて氷河も氷河からの融解水も一定の減少を続ける傾向を示しており、降雪量の増加による氷河の涵養の影響や、氷河の融解に伴う一時的な河川流量の増加などの時系列の変化などは示されていない。

後者はCogley(2009)⁸⁾による個々の氷河のインベントリー(WGI-XF)を基礎とし、月平均気温と月降水量を入力データとして氷河の質量変動を算定する数値モデルであるが、観測データを用いた過去の氷河質量変動の検証が不十分であることが問題である。また、この研究では大陸ごとの山岳氷河の質量変化が示されている点が従来の研究と比べて画期的であるものの、将来の氷河の変化が水資源へ与える影響を評価するためには、広域の集計量のみならずグリッドベースなど分布型の氷河融解量を算定することも必要であると思われる。

以上の背景をもとに、著者らは、これまで陸面モデルへの結合が可能である全球0.5度グリッドで世界の山岳氷河の質量変動を算定する数値モデルを開発してきた⁹⁾。しかし、この既存の全球氷河モデルHYOGAは0.5度グリッド内の複数の氷河の質量収支を陽に計算せず、それらを集計した1つの仮想的な氷体を仮定してその質量収支を計算する構造である。HYOGAで算定された20世紀の氷河の質量変動は、質量観測データの広域平均と比べて概ね妥当な変動を示しているが、気候変化に対する氷河の縮退と進行の感度が観測と比べて低い傾向を示すこと、氷河体積の変化は相対的には求まるものの、体積の絶対量の推定ができないことが弱点であり、将来の気候変動に伴う氷河消失の時期を推定するなどの研究には十分な精度が無いことが問題であった。

そこで本研究ではHYOGAモデルをさらに発展させ、仮想的な1つの氷体ではなく個々の氷河の形状や位置・標高等の分布型情報をモデルへ与えることにより、個々の氷河の質量収支を計算するモデルの開発に取り組む。対象とする地域は氷河の位置や形状、過去の質量変化などが氷河インベントリーWGI-XF⁸⁾に揃っており、かつその精度も他の地域と比べて比較的良好と思われるスイスアルプスと北欧のヨーロッパ地域に存在する7620個の山岳氷河とする。この改良により、グリッド内の個々の氷河の涵養や消耗、温暖化による氷河の消失のタイミングなどが算定できるようになり、日単位や月単位などの時系列で河川流量への氷河起源の融解水の寄与がより精度よく推定できるようになると期待される。

また、全ての山岳氷河を算定する代わりに、ごく小さい氷河は統計的に選出することによってモデルの計算時間を短縮する方法を試し、HYOGA2の全球への適用可能性についても考察を行った。最後にHYOGA2が新たに氷河の

体積の絶対量を推定できるようになった利点を活かし、将来気候が温暖化した際に氷河が消失する数とタイミングについての試算を紹介する。

2. 全球氷河モデルHYOGA2

(1) モデルの概要

本研究は既存の全球氷河モデルHYOGAを基礎とし、0.5度グリッド内に存在する個々の氷河が算定できるように改良を加えたHYOGA2の開発を行った。モデルの時間ステップは日単位、入力データは氷河の分布型情報(緯度・経度、最高・最低標高、長さ、面積の初期値)と日単位の地表平均気温と降水量であり、日単位の時間ステップで50mの標高帯分布ごとに氷河とその上の雪の質量収支を計算する。ただし、氷の上に1年以上残留した雪は氷の涵養に使われる。気温は0.0065°C/mの一定の気温減率で標高帯ごとに変化させ、地表気温が2°Cを境に降雪と降雨を判別した。この閾値(2°C)は、湿度や地表気温から降雪と降雨を推定する高度な降水判別手法と比べて概ね似たような降雪量が推定できる¹⁰⁾ことから選定した。なお、全球への適用性を考慮し、サブグリッド内の降水は全て同じ値を与えた。以上の基礎となるモデルは、観測データの存在する氷河の年質量収支や平衡線高度が概ね再現できていることが確認されている⁹⁾。

HYOGAでは0.5度グリッドに含まれる氷河の面積を合計して仮想的な1つの氷河を仮定したのに対し、HYOGA2では氷河インベントリーWGI-XFに含まれる個々の氷河全ての質量収支を別個に計算する。そのためHYOGAの手法に比べると、0.5度グリッドに含まれる氷河の個数倍だけ計算量が増えるため、全球では計算コストが約50倍程度多くかかると見積もられる。

また、HYOGAでは氷河のタイプに関わらずBahr et al (1997)¹¹⁾とChen and Ohmura (1990)¹²⁾による谷氷河のパラメータを用いた1つの面積-体積の関係式(V-A関係式)を適用し、氷河の質量収支計算を行って次の時間ステップの体積(V)を更新した後に面積(A)を更新したのに対し、本研究では1)氷帽と氷帽以外の氷河を区別してRadic and Hock (2010)⁷⁾による異なるパラメータをV-A関係式に使用すること、2)新たに氷河の長さパラメータ(L)を導入して氷河の体積の更新に応じて氷河の長さを更新し、その長さ情報をもとに氷河の最低標高を更新するV-A-L関係を用いる、という2点の変更をモデルに適用した。これにより、氷河の形状(山岳氷河・氷帽の別)に応じたV-A関係が反映されると共に、氷河の形状に応じたV-A-L関係に応じて氷河の縮退・拡大のスピードが決定されるようになった。

Radic and Hock (2010)⁷⁾もHYOGA2と同様にWGI-XFを基礎とする数値モデルを開発したが、彼らのモデルでは36個の氷河質量観測データを用いてモデルの7つのパラ

表-1 HYOGAとHYOGA2の比較

	HYOGA	HYOGA2
形状	0.5度グリッド内に1つの谷氷河を仮定	氷河インベントリーWGI-XFより個々の氷河の情報を導入
V-A関係 $V = c_a A^\gamma$	全て同じパラメータ $c_a : 0.2055, \gamma : 1.375$	谷氷河と氷帽を区別 $c_a : 0.2055, \gamma : 1.375$ 谷氷河 $c_a : 1.7026, \gamma : 1.25$ 氷帽
長さ(L)	初期面積と標高から設定	$V = c_l L^q$ $q: 2.2, c_l: \text{WGI-XFより設定}$
融解係数	質量収支観測の長期平均に合うようにキャリブレーション	HYOGAの0.5度グリッドの値
キャリブレーションパラメータ	グリッドごとに5つ: 雪と氷の融解係数、最高・最低標高、初期の氷河面積	氷河ごとに1つ: 初期の氷河面積

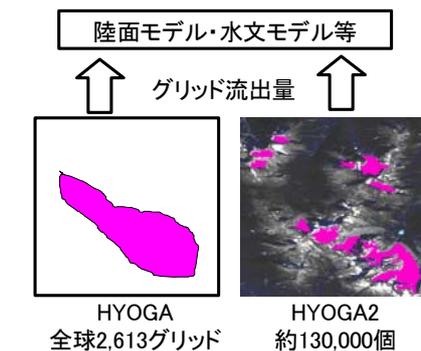


図-1 モデルのイメージ。ピンク色が氷河。

メータを決定し、気候や地形からそのパラメータを他の地域へ適用する手法で広域のパラメータを設定して、広域の氷河の計算を行っている。また、Radic and Hock (2010)⁷⁾はWGI-XFの氷河面積を2000年の初期値と仮定し、2000年以降の温暖化実験を行って広域の氷河の融解量を算定した感度実験の結果のみを示しており、過去の質量観測データを用いた過去のシミュレーションの検証などは行われていない。一方のHYOGA2では、以下に述べるように1948年時点の氷河面積の初期値を求め、最小限のパラメータ数でより広域に適用できる構造となっている。過去数十年のモデル実験も行えるため、既存の氷河質量観測データを用いた検証を行うことも可能である。

(2) モデルのキャリブレーション

既存のモデルHYOGAでは、0.5度グリッドごとに1)氷河面積の1948年の初期値、2)氷河の最低・最高標高、3)雪ならびに氷のしきい値以上の気温に対する融解係数(mm/°C/day)に関して、キャリブレーションを行った。1)は氷河インベントリーから得られる氷河の面積が観測された年月日の面積に近くなるように初期値を変える繰り返し計算をすることによって求める。2)と3)に関しては、対象とするグリッドから最も近い氷河のマスバランスデータが得られた期間の平均と、モデルで計算される対象グリッドの氷河のマスバランスの同期間の平均が近くなるようにキャリブレーションを行っている。

一方のHYOGA2では個々の氷河を別々に計算するため、2)はWGI-XFから与えられる最高・最低標高をそのまま用いる。3)に関しては、ほぼ同じ気候条件であれば氷河の標高やサイズに関わらず雪と氷の融解係数は一定であると仮定して、既存のモデルHYOGAで求めたグリッドごとの値をそのまま用いることとした。従って新しいモデルでは、1)の1948年1月1日時点の氷河面積の初期値を繰り返し計算することで求めるだけであり、その他のキャリブレーションは行わない。

以上の今回新たに開発を試みたモデルHYOGA2の元のモデルとの違いの概要と模式図は、表1と図1に示される。

3. 使用データ

(1) 気象データ

本研究ではHirabayashi et al. (2008)¹³⁾による1948年から2007年までの全球0.5度グリッドの日降水量と日平均気温(H08)を気象外力データとしてモデルに与えた。H08は0.5度グリッドの月平均気温と月降水量の観測データを、統計的に日単位にダウンスケーリングして作成したものであり、雨量計タイプごとの降雨と降雪の捕捉率を用いた補正も行っている¹⁰⁾。使用したデータセットの基礎となる月平均気温はCRU TS2.0 (1948-2002)¹⁴⁾とGHCN+CAMS (2003-2007)¹⁵⁾であり、GHCN+CAMSのデータはCRU TS2.0との月ごとの気候値(1961-2000)の比を用いて補正したものを用いた。降水量はGPCC ver. 5の月平均値を基礎とし、0.5度グリッドの日降水量データがAPHRODITE V1003R1¹⁶⁾から得られるグリッドに関してはダウンスケーリングした日データは用いず、APHRODITEに雨量計捕捉率の補正を適用したものを使用した。

将来の気候データ(GCM)はMIROC-HiのA1B-AR4実験¹⁷⁾を用いた。このシナリオ・GCMを選んだ理由は、世界のGCMの中でも将来の昇温が高く、モデルの感度を試すのに都合が良いからである。GCMのバイアスは、GCMの1961-2000年(20C)と同期間のH08データを用いて補正した。気温はGCMとH08の月気温の20Cの平均の差を各月の補正值とした。降水日数はH08の20Cの降水日数に、GCMの20Cから2001-2100の将来実験の20年ごとの月降水日数の増減率を乗じて求め、降水強度は8つのクオンタイル(1, 5, 10, 15, 20, 25, 30%の降水強度とその残り)ごとに20Cの平均のH08とGCMの比を算定して、その比にGCMの20Cからの将来の増減率を加味することで算定した。

(2) 氷河データ

氷河モデルに与える山岳氷河の位置・長さ、面積は氷河インベントリー(WGI-XF)⁸⁾を使用した。同データセットの対象地域(ヨーロッパの2つの矩形領域、60-70N, 5W-33E; 43-48N, 2W-13E)に含まれる氷河の登録数は

7631であるが、そのうち11は面積情報が存在しないため、計7620個、合計面積5993km²の氷河がモデルで計算される。最高標高もしくは最低標高が得られなかった氷河に関しては、最高標高と最低標高の差が1500mと仮定して、得られない他方の代わりに算定して求める。ただし、Shuttle Radar Topography Mission (SRTM90)の標高データを用いて対象の氷河が含まれる0.5度グリッドの最高標高と最低標高を取得し、作成した最高標高または最低標高の値がその範囲を超える場合は、グリッド内の最高標高もしくは最低標高を与えることとした。このような措置を行う必要がある氷河は、全球では約13万個のWGI-XF登録データのうち約2000個、本研究の対象地域では7620個のうちの25個とごくわずかであり、最終的なモデル算定結果にはあまり影響を与えないと仮定した。

V-A-L関係を適用するためのLの初期値は、WGI-XFの氷河の最大長さ(L_{max})を用いた。しかし、L_{max}がインベントリに登録されている氷河に限られており、対象地域の7620個の氷河のうち1549個しかない。そのため、最高標高・最低標高と氷河のL_{max}が得られる氷河において最高標高と最低標高の差とL_{max}の比の平均値を求め、その値(0.004188)を最高標高と最低標高の差に掛けることで、L_{max}を推定した。L_{max}の精度は氷河の位置や形状によりまちまちであるが、その誤差によるモデルの不確実性よりも、面積に対する標高差の情報でも氷河の形状と前進・後退のスピードが間接的に代表できることの利点が大きいと考え、推定したL_{max}を用いることとした。

4. 結果

(1) HYOGA2による質量収支計算

まず、新たに改良を加えた氷河モデルHYOGA2の挙動を既往のモデルHYOGAと比較した。

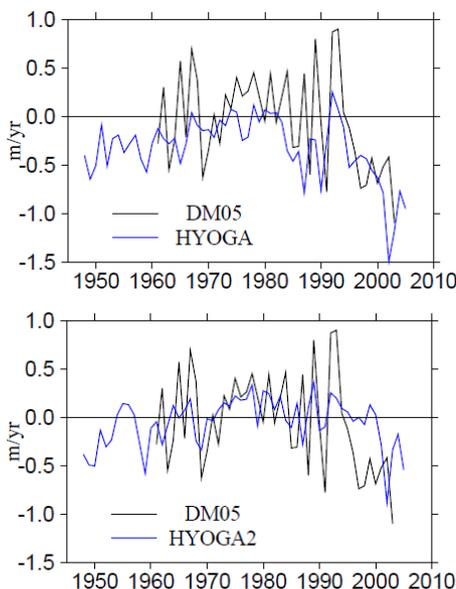


図-2 対象地域の平均の年平均質量収支 [m/yr]

図2は対象地域の全氷河の平均の質量収支を示す。黒線が観測された質量収支データの面積重み付け平均から推定された値(DM05; Dyurgerov and Meier, 2005¹⁸⁾)、青線がモデルの出力結果である。ただし、DM05の作成に用いられた氷河の質量収支観測データは対象地域の氷河全体のごく一部であり、DM05の値が必ずしもヨーロッパ地域の氷河の平均の質量収支を代表しているとは限らない。従って対象地域の全氷河を計算しているHYOGAやHYOGA2とDM05を比較する際には、注意が必要である。

新旧のモデルで同じ融解係数のパラメータを用いているため、HYOGAとHYOGA2の平均的な質量収支はあまり変わらないように見える。しかし、HYOGA2は1970年代後半から1990年代にかけての正の質量収支が再現できるなど、経年の変動についてDM05に近くなっていることがわかる。また、HYOGA2はHYOGAと比べて質量収支の年々変動の振幅が大きくなり、よりDM05の変動幅に近くなっている。この理由は氷河の形状や位置をHYOGA2に取り入れたことにより、標高が低い場所に位置する氷河や、面積に比べて標高方向に長細い氷河など気温や降水量の変動に対する質量収支の変動が大きい氷河の変動が反映されやすくなったためであると思われる。

一方HYOGA2では、DM05に見られる2000年前後の大きい負の質量収支は見られない。そもそも1960年代以前や1990年以降はDM05の作成に使われた観測データの数がかなり限られるため、面積重み付け平均で求めた推定値は限られた観測の値を反映して本来の領域平均値よりも過大や過小になりやすい。HYOGA2はヨーロッパ地域の全氷河を面積重み付け平均していることから、データ数の限られる期間のDM05とは必ずしも一致しないであろう。ただし2000年以降の気象データの質が悪いこと¹³⁾は、2000年以降のHYOGA2の算定値に誤差をもたらしている可能性があると思われる。観測が比較的多く存在する1970-1990年代の平均的な質量収支と変動がDM05と近くなっていることから、HYOGA2の妥当性を評価したい。

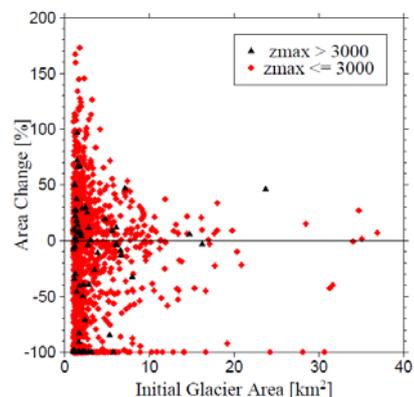


図-3 HYOGA2による1948-2007の氷河面積変化。

図3はHYOGA2による各氷河の面積の変化を示す。横軸はシミュレーションの初期面積を示す。面積が小さい(<10km²)氷河はサンプル数が多く、面積の増減が50%以

上の氷河も数多く存在することが分かる。一方、面積が20km²以上の氷河の増減の幅は概ね±20-30%前後である。この理由は、氷河が小さいと氷河の高さが50mの標高帯では解像することが困難で気温や降水などの変化に対する氷河の増減への感度が高くなるためである。また、氷河の標高による増減の傾向に顕著な違いは見られなかった(図3では最低標高Z_{max}を3000mで分類した例を示す)。

なお、図3では氷河が100%消失している所もいくつか見られる。しかしHYOGA2では個々の氷河に対して融解係数などのキャリブレーションをしておらず、0.5度グリッド平均の気温データを入力として50mの標高帯ごとに一定の気温減率で求めた気温を与えたことによるバイアスがあるため、個々の氷河の消失や増加が必ずしも現実のタイミングとぴったり一致しているとは限らない。

(2) 小さい氷河を統計的に選出して計算する手法

以上のように、HYOGA2は観測値から推定した質量収支と比べてより現実的な変動を示しており、既存のモデルHYOGAより優れていることが判明した。しかし、HYOGAでは全球で2613個の0.5度グリッドの氷河を計算すれば良かったのに対し、HYOGA2で約13万個の全球の氷河を計算する為には、その50倍の計算時間がかかる。将来の氷河の算定を行う際に、複数のGCMシナリオ×複数の温室効果ガスシナリオの全てについて算定するためには、結果をほとんど変えない範囲でモデルの計算速度を効率良く上げることも必要である。

そこで、WGI-XFに登録されている氷河のうち、あるしきい値よりも小さいものに関しては、個々の0.5度グリッドに含まれるものをランダムに抽出して代表の質量変動を計算し、残りの小さい氷河の質量収支は面積重み付けで算定するという、統計的な選択手法を試した。小さい氷河の代表を0.5度グリッドごとに選ぶ際には乱数を発生させてランダムに選出したが、モンテカルロ式に同様の作業を複数回試しても結果はほぼ同じであったため、ある1つの選定の組み合わせの結果を図4に示す。それぞれ、黒線が対象地域の全氷河7620個を計算したHYOGA2の結果(図1の青線と同一)、赤が初期面積が0.5km²、緑が1km²、青が2km²以下の小さい氷河の代表サンプルのみを計算して平均を作成した際の結果を示す。

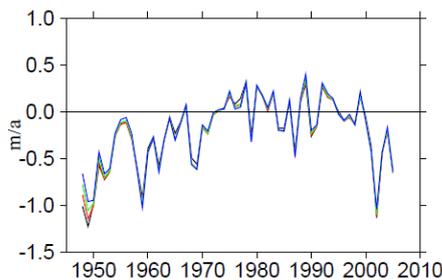


図-4 図1と同様、ただし閾値以下の氷河を統計的に選出した結果との比較(本文参照)。線の色は表2の分類に対応。

表-2 小さい氷河を統計的に選択する際のしきい値と、しきい値以上の氷河の面積ならびにサンプル数

しきい値(km ²)	総面積(km ²)	氷河の数
なし	5994	7620
>0.5	5113	1972
>1	4567	1173
>2	3789	613

図4より、小さい氷河をランダムに選出して計算を行っても、対象領域の平均の質量収支については、ほとんど差異が無いことがわかる。たとえば1km²未満の氷河で行った場合(緑)、約7分の1の数の氷河、面積にして約25%少ない氷河に対してしか質量収支計算を行わなくとも、結果がほとんど変わらないということが示された。

(3) 温暖化実験に対するHYOGA2の感度

最後にバイアス補正したGCM, MIROC-Hiを入力として与えた温暖化実験の結果を紹介する。

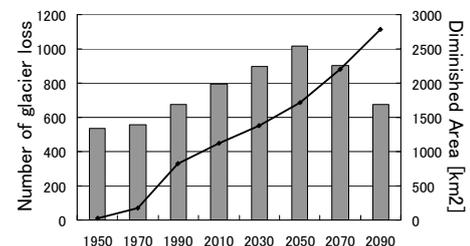
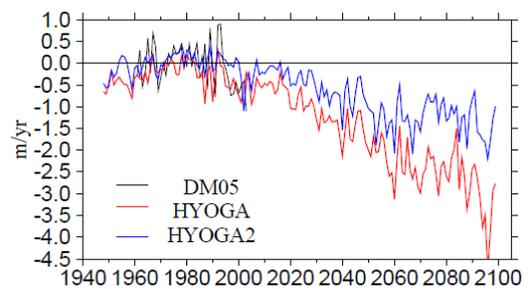


図-5 MIROC-Hiを与えた温暖化実験。上が将来の質量収支変化、下は消失する氷河の個数(棒)と積算の面積(折れ線)。

図5上より、氷河の質量収支はHYOGA2の方がHYOGAよりも昇温に対する減少が低いことが示された。この理由は、HYOGAは大きい1つの氷体を仮定しているために同じ合計面積に対して相対的な体積が大きくなるため、温暖化しても氷河が消失しないで標高の上方に残存するためである。HYOGA2では分布型の氷河情報を入れて氷河の体積の絶対量をモデルに導入したため、気候が温暖化すると標高が低い場所に位置している氷河から融解して消失してゆく。図5上は面積重み付け平均で計算しており、消失した氷河はHYOGA2の質量収支の結果に影響しなくなる為、平均の質量収支の値はHYOGA2の方がHYOGAよりも大きくなることは妥当な結果である。また、氷河からの融解水についても、HYOGA2からの淡水流出量はHYOGAよりも少なくなる(図無し)。このように各氷河の分布情報、面積ならび

に体積の絶対量をモデル内に取り入れることにより、氷河からの水資源を定量的に議論することが可能となった。

また、ヨーロッパの氷河の約半数は21世紀の半ば頃、約8割は2100年までに消失する結果となった（図5下）。氷河消失のピークはMIROC-Hiの昇温率が最も高い2040-2060年である。MIROC-Hiは21世紀の北半球高緯度の昇温が大きいシナリオではあるが、小さい氷河の質量収支計算を行う際の標高帯の刻み幅が適切であるか、氷河の縮退に伴う氷河の標高上方への移動によるフィードバックがきちんと効いているかなど、HYOGA2の気候感度についてはさらに詳細な解析が必要であると思われる。

5. まとめ

本研究では、氷河インベントリーを利用して個々の氷河の特徴を導入しながらも広域の氷河を対象に質量計算を行う新しいモデルHYOGA2を開発した。ヨーロッパ地域の氷河を対象に既往のモデルとの比較を行ったところ、0.5度グリッド内の氷河について分布型の情報を氷河インベントリーからモデルに導入することにより、より観測データからの推定値に近い質量収支の年々変動が再現できることが判明し、その有用性が確認できた。小さい氷河を統計的に選択することにより計算時間を短縮しても結果にあまり大きい影響を与えないことも示され、HYOGA2を全球へ適用する可能性が示唆された。

また、HYOGA2に温暖化実験データを与えた試算から、将来の地表気温の温暖化に対する氷河の融解スピードと消失を時系列で示した。今後は他の地域を対象にした実験や、他のGCMを用いた温暖化実験を行い、より詳細な解析を行っていく予定である。

謝辞：本研究は最先端・次世代研究開発支援プロジェクト「山岳氷河の融解が世界の水資源逼迫に与える影響」ならびにJST/CRESTの研究課題「世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成」から支援を受けた。

参考文献

- 1) Parry, M. L. and Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II: Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability: Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2007.
- 2) Jansson, P., Hock, R. and Schneider, T.: The concept of glacier water storage – a review, *J. Hydrol.*, Vol.282, pp.116-129, 2003.
- 3) Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, Junsheng, Zhou, L., Liu, H., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, C., Tan, K., Yu, Y., Zhang, Y. and Fang, J.: The impacts of change on water resources and agriculture in China, *Nature*, Vol.467, pp.43-51, 2010.
- 4) Immerzeel, W.W., van Beek, L.P.H. and Bierkens, F.P.: Climate change will affect the Asian water towers, *Science*, Vol.328, pp.1382-1385, 2010.
- 5) Kaser, G., Grosshauser, M. and Marzeion, B.: Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regions, *PNAS*, Vol.47, pp.20223-20227, 2010.
- 6) Meier, M.F.: Contribution of small glaciers to global sea level, *Science*, Vol.226, pp.1418-1421, 1984.
- 7) Radic, V. and Hock, R.: Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice capst to future sea-level rise, *Nature Geo.*, Vol.4, pp.91-94, 2011.
- 8) Cogley, J.G.: A more complete version of the world glacier inventory, *Ann. Glaciol.*, Vol.50, pp.32-38, 2009.
- 9) Hirabayashi, Y., Döll, P. and Kanae, S.: Global-scale modeling of glacier mass balances for water resources assessments: glacier mass changes between 1948 and 2006, *J. Hydrol.*, Vol.390, pp.245-256, 2010.
- 10) Hirabayashi, Y., Kanae, S., Masuda, K., Motoya, K. and Döll, P.: A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models. Part II: Global snowfall estimation, *Hydro. Res. Lett.*, Vol.2, pp.65-69, 2008.
- 11) Bahr, D.B., Meier, M.F. and Peckham, S.D.: The physical basis of glacier volume-area scaling, *J. Geophys. Res.*, Vol.102, pp.20355-20362, 1997.
- 12) Chen, J. and Ohmura, A.: Estimation of Alpine glacier water resources and their changes since the 1870s, *IAHS Publ.*, Vol.193 (Symposium at Lausanne 1990- Hydrology in Mountainous Regions I), pp.127-135, 1990.
- 13) Hirabayashi, Y., Kanae, S., Masuda, K., Motoya, K. and Döll, P.: A 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity, *Hydro. Res. Lett.*, Vol.2, pp.36-40, 2008.
- 14) Mitchell, T.D. and Jones, P.D.: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *Int. J. Climatol.*, Vol.25, pp.693-712, 2005.
- 15) Fan, Y. and van den Dool, H.V.D.: A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present, *J. Geophys. Res.*, Vol.113, doi:10.1029/2007JD008470, 2008.
- 16) Yatagai, A., Arakawa, O., Kamiguchi, K., Kawamoto, H., Nodzu, I. and Hamada, A.: A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges, *SOLA*, Vol. 5, pp.137-140, doi:10.2151/sola.2009-035, 2009.
- 17) K-I model developers: K-I coupled model (MIROC) description, Technical report, CCSR, Univ. Tokyo, Tokyo, Japan, 2004.
- 18) Dyurgerov, M.B. and Meier, M.F.: Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot, Occasional Paper No.58, Institute of Arctic and Alpine Research, Univ. Colorado, USA, 2005.