

学 位 論 文 題 名

融雪流出の遅延機構の研究

学位論文内容の要旨

融雪流出において積雪は流出する水の供給源であるが、流出する水の径路でもある。積雪表面で生じた融雪水は積雪内を浸透してから地表に到達し、その後土壌を経由して河川に流出する。このため、融雪による流出は降雨による流出に比べその応答が遅れる。山地源流域では、晴天日の場合、雪面における融雪は正午ごろピーク値が出現するが、河川流量のピーク値は夕刻から夜間にかけて出現する。融雪から河川流出までに要する時間のうち積雪内浸透に要する時間は積雪深1mでおよそ1/3から1/2を占める(Kobayashi and Motoyama 1986)。

この論文では、積雪内浸透を融雪流出における主要な流出遅延過程のひとつとして捉え、次のような目的に沿って議論を行なった。第一に、平坦地における積雪内浸透の機構を明らかにし、積雪内浸透モデルを提示する。第二に、流域内の標高や地形の異なる場所の積雪内浸透の違いを明らかにし、平坦地の一地点を対象にした積雪内浸透の議論を流域に拡張し、融雪流出の遅延過程としての積雪内浸透の特性を明瞭にする。

この目的のために、北海道幌加内町母子里にある試験流域で1989年から1992年の4ヶ年の融雪期に観測を行なった。試験流域は流域面積が1.3km²で標高290mから540mに位置する。主な観測項目は、融雪量の測定、雪ライシメーターを用いた積雪下面流出量の測定、積雪断面観測、河川流量の測定である。河川流量の測定は流域末端で行ない、その他の観測は流域末端付近の観測露場と流域内の最高点である山頂で行なった。雪ライシメーターは底面が3.6m×3.6m(13m²)の大きさで、積雪内の融雪水の非一様な流下の影響を直接受けない平均的な積雪下面流出量を測定できる。本論文では、これらの観測結果のうち、活発な融雪・河川流出の起こる融雪最盛期中の晴天日の結果を用いて議論した。

河川流量のピーク出現時刻と積雪深の関係を調べると、積雪深が低下するとピーク

出現時刻が早まるという関係が見られるが、同じ積雪深でもその時刻が年によって異なっていた。積雪深が100cmの時、早い年では17時頃、遅い年では18時30分頃にピークが出現した。積雪下面から河川に流出するまでの時間には年毎の違いはなく、河川流出のピーク出現時刻の年毎の差異は積雪内浸透に要する時間の年毎の差異に起因することがわかった。

そこで積雪内を融雪水が流下する速度を調べた。ここで用いた流下速度は、日融雪量の1/2と日流出量（積雪下面）の1/2が出現した時刻の時間差で積雪深を除した値である。この見かけの流下速度と日流出高（積雪下面）の関係を調べると、日流出高が大きいと速度も大きいという関係が見られた。そして、河川流出のピーク出現時刻の早い年は流下速度も大きく、遅い年は速度も小さかった。日流出高が20mmの場合、流下速度は約10cm/hから30cm/hの範囲にあった。浸透の媒体である積雪を見ると、密度や粒径には年による違いは見られなかったものの、流下速度の大きかった年は氷板が5,6ヶ所に存在したのに対し、小さかった年は1,2ヶ所であった。

氷板が存在すると流下が早くなる現象を次のような過程に起因すると考えた。(1)流下してきた融雪水が氷板で流下を妨げられる。(2)氷板上を融雪水が移動し氷板上の他の点に流下してきた融雪水と合流する。(3)氷板のある点からより大きなフラックスとなって流下を再開する。(4)フラックスの増大が流下速度を増大させる。このような流下をここで集中流下と呼ぶことにするが、この集中流下という過程を考慮した浸透の計算をするために、集中流下の観測を行なった。

集中流下の観測のために、底面全体が1.4m×1.4mで、その内部が14cm×14cmの大きさで100個に仕切られているライシメーターを用いた。このライシメーターを積雪下面に設置し観測を行なった結果、積雪内を融雪水が集中して流下していること、その径路が時期が進行しても変わらないことがわかった。集中流下の強度を日流出高を日融雪高で除した値とすると、その強度は広範囲であり最大では30を超えるような値であった。しかし、強度が増すとその頻度は低くなる。この観測結果を、強度は小さいが頻度の高い流下と強度は大きい頻度の低い流下の2種類に分類し、集中流下の仮定を行なった。さらに氷板を透水性のある部分とない部分から成るような構造と考え、透水性のない部分は集中化を起こさず流下するとみなし、積雪内の流下パターンを求めた。このような流下パターンとColbeck(1978)の積雪内浸透に対する重力流の考えを用いて計算を行なった。その結果、観測した積雪下面流出量を再現でき、氷板が多いと

流下速度が大きくなるという現象の説明が可能になった。

流域内で積雪深は標高が増加するとともに大きくなるが、山頂と平地（露場）の積雪構造は似通っており、流下速度はほぼ同じであった。また斜面の積雪で染料を雪面に撒き、色のついた融雪水が積雪下面に到達するまでの時間を調べたところ、積雪深100cmで140分から160分で、平坦地で同様の試験を行なった結果とほぼ同じであった。斜面の積雪では、斜面方向への融雪水の移動があるが、その距離は2m程度であり、さらに斜面方向への速度が鉛直方向の数倍以上あることから、積雪下面に融雪水が到達するまでの時間は鉛直方向の深さにほぼ支配されている。つまり、流域内で積雪内浸透を考える場合に最も重要なのは積雪深の分布であることがわかった。

流域の積雪深分布を考慮し、流域を積雪深の大きい上流部と積雪深の小さい下流部に分けた。そして、積雪内浸透の計算を行ない、さらに特性曲線法を用いて河川流出計算を行なった。その結果、河川ハイドログラフを再現でき、ピーク出現時刻に見られた年毎の違いが積雪の層構造による融雪水の流出遅延過程の年毎の差異に起因するとの結論を得た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 林 大 二
副 査 教 授 中 尾 欣 四 郎
副 査 教 授 藤 野 和 夫
副 査 助 教 授 石 川 信 敬

学 位 論 文 題 名

融雪流出の遅延機構の研究

融雪流出において、積雪表面で生じた融雪水は積雪内の浸透を経て地表に到達し、その後土壌を経由して河川に流出する。このため、降雨による流出に比べその応答が著しく遅れる。しかしながら流出過程における積雪内浸透の研究は現在までほとんど行われていない。

この論文では、積雪内浸透を融雪流出における主要な流出遅延過程のひとつとして、次のように議論が展開されている。第一に、平坦地における積雪内浸透の機構を明らかにし、積雪内浸透モデルを提示した。第二に、流域内の標高や地形の異なる場所の積雪内浸透の特性を明らかにした。第三に、平坦地を対象にした積雪内浸透のモデルを流域に拡張し、融雪流出の遅延過程としての積雪内浸透の役割を明瞭にした。

上述の議論は、山地源流域の試験流域における4ヶ年の融雪期の観測に基づいている。主な観測項目は、融雪量の測定、積雪ライシメーターを用いた積雪下面流出量の測定、積雪断面観測、河川流量の測定である。この観測で用いた積雪ライシメーターは底面が $3.6\text{m} \times 3.6\text{m}$ (底面積 13m^2)の大きさで、世界でも最大級のもので、精度のよい積雪下面流出量を測定できる。これらの観測で以下のような現象が見い出された。融雪期の河川流出のピーク出現時刻が年毎に異なっていること、この現象は積雪内浸透に要する時間の差異に起因していることなどである。これらの現象は、今回の観測によって初めて発見されたもので、積雪地域の水循環の研究においてきわめて重要な知見である。

そこでこの研究では、積雪内における融雪水の流下速度と積雪の構造の関係を調べた。その結果、積雪中に氷板存在すると流下速度が大きくなるという興味深い関係を

得た。この現象を説明するため、著者は、積雪内浸透について次のような機構が働くものとした。(1)流下してきた融雪水が氷板で流下を妨げられる。(2)氷板上を融雪水が移動する。(3)氷板のある点からより大きなフラックスとなって流下を再開する。(4)フラックスの増大が流下速度を増大させる。このような流下を、この研究では集中流下と呼んでいるが、この集中流下という過程を考慮して現象を説明できることがこれ以降の議論で示された。積雪内を融雪水が一様に流下しておらず、集中して流下していることは過去にも知られていたが、その定量化はなされていない。著者は、観測から集中流下の定量化を行なった。この観測では、底面(2m²)が100個に仕切られており、流下の分布を細かく測定できるライシメーターが用いられた。この観測によって、積雪内に融雪水が集中して流下する径路が存在することが明瞭になり、集中流下の強度や頻度も定量化された。これらの結果から、集中流下過程を考慮した積雪内浸透モデルが考案された。このモデルは、集中流下という流下の非一様性を考慮したことに最大の特徴があり、非常にユニークなものである。そして、このモデルにより、観測した積雪下面流出量を再現でき、氷板が多いと流下速度が大きくなるという現象の説明が可能になった。

さらにこの研究では、河川流出と関連づけるため、流域内での積雪内浸透の違いに考察を進めている。一般に積雪深は標高が増加するとともに大きくなることから、標高の異なる地点での積雪内浸透の比較観測を行ない、また、流域が斜面で形成されていることから斜面と平坦地の比較観測も行なわれた。その結果、平坦地であれば流下速度は同じであることがライシメーターの観測から示され、トレーサー試験から斜面の積雪内を浸透する時間が平坦地と同じであることも示された。これらの観測から、流域内で積雪内浸透を考える場合に最も重要なのは積雪深の分布であることが明らかになった。

最後にこの研究では、流域の積雪深分布を考慮し、積雪内浸透モデルを流域に適用し、流出解析が行なわれている。この解析により、河川流出ハイドログラフが再現され、河川流出の応答時間が積雪の層構造による融雪水の流出遅延過程の年毎の差異に大きく依存していることが明瞭に示された。積雪内浸透の機構を考慮した流出解析は過去に例がなく、貴重なものである。

このように、この研究は、流出過程としての積雪内浸透の機構を実測に基づきモデル化した上で流域における融雪流出の応答を解明している。このことは、過去に例を見ない独創的なものであり、積雪地域の水循環機構の解明に大きく寄与するものである。

る。

審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。