

## 学 位 論 文 題 名

## 寒地河川における水力発電所の流氷雪制御法に関する研究

## 学位論文内容の要旨

積雪寒冷地の河川、特に北海道のほとんどの河川では、冬期間に、結氷の発達、フラジルスラッシュ（泥状晶氷）の流下および蓄積がみられる。近年、厳冬期に上水、工業用水、発電取水などのほかに流雪溝のための水利使用が行われるようになり、フラジルスラッシュなどの流氷雪がもたらす種々の技術的な問題を事前に予測検討しておく必要がある。

本論で筆者らは1992年から1994年までの3年間、北海道電力(株)仁宇布川発電所において、流氷雪の取水口への流入を防止するためにフェンブーム型の対策工を考案し設置した。人工的にアイスダムを形成させ、氷板の形成過程、結氷面下の流速分布を観測し対策工の評価を行うとともに、気象・水象観測を実施した。また、発電所上流の天塩川水系ペンケニウップ川では、フラジルスラッシュの発生、アンカーアイスの形成によりステップ・プールによる河道の貯留現象が生じ、特に冬期渇水期間の後期に河川流量が大きく日周期で変動していることが観測され、流量変動とアンカーアイスの関係を考察し予測手法を開発した。

本論文の目的は次の3点である。

- 1) 水力発電所の流氷雪制御方法の開発
- 2) 結氷河川の水理特性の把握、特にフラジルスラッシュの堆積過程の解明
- 3) 冬期渇水期に日周期で発生する流量変動の予測手法の開発

上記1)については、寒冷地における水力発電所で発生する流氷雪問題とその対策方法について、現状の問題点を明らかにし、わが国と諸外国における河川または湖の結氷に関する研究成果から、自立型のフェンスブーム (Fence Boom) と石積堰の組合せによる対策工を考案した。筆者らは仁宇布川発電所で現地実験を行い、流氷雪制御法としての対策効果の確認と河川に形成されたプールの結氷板の発達など種々の観測成果を得た。対策工の上流に形成されたプールに堆積するフラジルスラッシュは、観測精度 1/100 の水温観測データーによるアクティブとパッシブ状態を示した過冷却インデックスを導入することによって説明することができ、冬期の取水条件を管理するうえで有用な手法と考える。また、結氷面下のフラジルスラッシュが最大に堆積する時は水位が最も高くなり、逆に流水面積は最小となる。ペンケニウップ川の流量約  $2\text{m}^3/\text{sec}$  に対し、流水面積はピーク後に  $3\sim 5\text{m}^2$ 、 $V_{\max}=0.8\text{m}/\text{sec}$ 、 $F_r=0.2$  とほぼ一定の結果が得られた。

2)については、北海道電力(株)上岩松発電所の取水ダムにおいて、1967年～1978年までの12年間にわたり調整池内のフラジルスラッシュ先端の挙動を観測した記録があり、フラジルスラッシュの動きと気温（日最低気温）との関係について考察した。河川が下流から上流に向かってフラジルスラッシュが堆積していくのに対し、調整池の場合は上流端から下流に向かって堆積する。上岩松調整池では日最低気温が $-15^\circ\text{C}$ を下回ると大量のフラジルスラッシュ

が発生し、フラジルスラッシュ先端の移動が大きくなることがわかった。

3)については、仁宇布川発電所の取水河川であるペンケニウップ川において、冬期渇水期間中の1~3月の河川流量は日周期の流量変動を示していることを見いだした。結氷期間の河川流量は緩やかに逡減するものと考えられていたが、懸垂氷堰や閉塞氷にアクティブフラジルが付着堆積するほか、河川勾配急変部において氷の堰(Anchor Ice Dam)が形成されることを現地観測で確認し、日単位で流量の減少あるいは増加現象が生じていることがわかった。特に冬期渇水後期である3月上旬には、全面結氷状態から流心付近が開水路となった状態で、放射冷却現象によるアクティブフラジルが河道にアンカーアイスダムを発達させ、階段状のステップ・プールを形成するが、このステップ・プールをモデル化した計算手法を提案した。この結果、放射収支がマイナスとなる夜間の平均気温が $-4\sim-6^{\circ}\text{C}$ を下回ると流量変動の振幅が大きくなり、Anchor Ice Damはアクティブフラジルの状態で発達し、パッシブ状態で退行すると仮定した計算モデルにより、日周期で発生する流量変動を説明できることがわかった。冬期渇水後期の3月上旬は、夜間の気温低下ならびに日中の気温上昇にともない水温のアクティブ/パッシブが明瞭に現れるため、河川流量の日周期の振動現象が毎年同じ時期に発生する。

以上、本研究の成果について概説したが、寒冷地における冬期の水力発電所を保守する場合、または、北海道よりも以北の北方圏の国々における河川・湖沼の技術開発を行う場合に、氷点下の気温条件での河川水理のもつ問題点を明らかにし、流氷雪を制御するための手法を提示した。特に、アンカーアイスは興味ある雪氷現象であるが、これまでの研究報告例が少ない。気温が氷点下になるとアンカーアイスが玉石の間を埋めつくし、水位を上げ結氷板の発達を促す。結氷板が河川全体を覆えば、積雪がその上加わり、河川水の過冷却が抑えられる仕組みになっていて、対策工の木製フェンスの目を塞いだ氷もアンカーアイスと言うことができる。フェンスブーム型の対策工は水深の浅い河川で適用し成果をあげることができたが、同様の流氷雪問題を抱える個々の発電所において、河川状況、調整池の大きさ、取水方式など適切な対策工法を選定する必要がある。

寒冷地の水力発電所を保守する場合、または流氷溝などの取水を管理する場合に、本論文で提示した河川水温による過冷却インデックスと河川流量の時間変化をモニターすることによって、フラジルスラッシュおよびアンカーアイスの発生、取水口への流入を予測することが可能となる。また、降雨出水期間とは考えられていなかった、12月または3月の出水予測には、氷点下の気温条件における河道貯留効果を考慮する必要があり、適正なゲート操作を行うために、寒地河川における水文現象は今後解明していくべき重要な研究課題と考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 睦 博

副 査 教 授 板 倉 忠 興

副 査 教 授 佐 伯 浩

副 査 教 授 小 林 大 二 (低温科学研究所)

## 学位論文題名

### 寒地河川における水力発電所の流氷雪制御法に関する研究

本論文は、積雪寒冷地の河川の水力発電所に特有な流氷雪障害とその対策法、および、取水施設の適正なゲートを妨げる冬期渇水期間に生じる流量変動の解析とその予測手法の開発を目的にしている。

本論文は、6章より構成されている。

第1章は、序論で流氷雪に関する既往の研究を概説し、研究の目的を述べている。

第2章は、北海道内の水力発電所を対象にして流氷雪障害を分類し、対策法を検討ためのプロセスを次のようにまとめている。

- 1) 結氷河川の水理特性の把握、特にフラジルスラッシュの堆積過程の解明
- 2) 水力発電所の流氷雪制御方法の開発
- 3) 冬期渇水期に日周期で発生する流量変動の予測手法の開発

第3章は、第2章の1)の課題を検討している。特に、調整池内のフラジルスラッシュの発生・衰退過程を解明している。すなわち、北海道電力榑上岩松発電所の取水ダムにおいて、1967年～1978年までの12年間にわたる調整池内のフラジルスラッシュの観測記録を用いて、フラジルスラッシュの動きと気温（日最低気温）との関係について考察している。河川が下流から上流に向かってフラジルスラッシュが堆積していくのに対し、調整池の場合は上流端から下流に向かって堆積することを見いだしている。また、新たに水温のアクティブとパッシブ状態を示す過冷却インデックスの概念を提案し、フラジルスラッシュ消長過程を説明できることを示している。貯水池を有する発電所の冬期の取水条件を管理する上で有用な手法を与えている。

第4章は、第2章の2)の課題を検討している。すなわち、貯水池を持たない発電所取水口へのフラジルスラッシュの流入問題に関しては、自立型のフェンスブームと石積堰を組み合わせた対策工を提案している。仁宇布川発電所においてこの対策工の現地実験を3年間にわたり実施している。対策工がフラジルスラッシュを捕捉して上流側に堆積を促し、その有効性を確かめている。現在、仁宇布川発電所ではこの対策工が冬期間常設され、有効に機能している。

第5章は、第2章に示す3)の課題について検討している。冬期渇水期における河川の流量を仁宇布川発電所の取水河川であるペンケニウップ川において現地調査を行っている。この原因が河道中に形成されるアンカーアイスダムが河水を貯留することを新たに見いだしている。更に、アン

カーアイスダムの消長が、河川水の正味吸収放射量に依存していることを確かめている。最後に、実用的な流量変動の予測モデルとして、堰の理論と貯留方程式を組み合わせ、アンカーアイスダムの高さとその越流係数の変化を気温の関数で与える手法を提案している。渇水期の流量変動を良好に推定できることを示している。

第6章は、本論文で得られた成果をまとめている。

以上のように、本論文は、国内ではほとんど取り上げられることのなかった積雪寒冷地の水力発電所における流氷雪流入問題、流量変動問題に関して長期間の観測を実施し、多くの知見を得るとともに実用的対策法および解析モデルの提案をおこなってその有効性を確認しており、寒地工学および水文学の進歩に大きく寄与している。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。