

平成 25 年度

小水力と地中熱を活用した分散型農村エネルギー  
自給構想に関する研究

報告書

2014 年 3 月

富山国際大学  
富山高等専門学校  
富山大学

## 共同研究者プロフィール

---

【共同研究者代表】 上坂 博亨

富山国際大学 現代社会学部 教授

【共同研究者】 丁子 哲治

富山高等専門学校 物質化学工学科 教授

【共同研究者】 上田 晃

富山大学 大学院理工学研究部 教授

### 【事務局】

一般社団法人 北陸地域づくり協会 企画部長 五十嵐 晃

〃 〃 企画部副参事 須田 敦司

〃 〃 企画部主任 大堀 和明

本書は、一般社団法人北陸地域づくり協会が公益事業で実施している「北陸地域の活性化に関する研究助成事業」で共同研究を行った[小水力と地中熱を活用した分散型農村エネルギー自給構想に関する研究]の成果をまとめた報告書として、刊行したものです。

平成 26 年 3 月

一般社団法人 北陸地域づくり協会  
企画部

## 目 次

1. はじめに .....	1
1.1 研究の全体的な背景 .....	1
1.2 24年度事業の概要 .....	3
1.3 25年度事業の内容とその特徴 .....	6
2. 農村地帯におけるバッテリー基地の最適配置の検討 .....	8
2.1 研究の背景と目的 .....	8
2.2 モデリングの説明 .....	10
2.3 モデル化 .....	11
2.3.1 理想的なモデル .....	11
2.3.2 分析時に用いるモデル .....	14
2.4 トリップ密度関数の推定 .....	17
3. 農業地帯における軽トラック利用状況調査 .....	19
3.1 研究の背景と目的 .....	19
3.2 調査方法 .....	19
3.3 軽トラックの利用状況結果 .....	21
3.3.1 富山市内と入善町における軽トラックの走行台数 .....	21
3.3.2 時間帯別の軽トラックの走行状況 .....	23
3.3.3 道路幅員に対する軽トラック走行台数の分布 .....	24
3.3.4 軽トラック走行台数の空間的分布 .....	24
3.4 まとめ .....	26
4. EV（電気自動車）の電力消費特性調査および電気軽トラック改造技術調査 .....	27
4.1 研究の背景と目的 .....	27
4.2 開発内容 .....	28
4.3 結果および考察 .....	32
4.4 まとめ .....	33
5. 地下水動態と水質の連続調査および地中熱 HP 適所の抽出と検討 .....	34
5.1 研究の背景と目的 .....	34
5.1.1 研究の背景 .....	34
5.1.2 研究の目的 .....	38
5.2 調査内容 .....	38
5.3 分析結果と考察 .....	40

5.3.1	広域的な水質の特徴 .....	40
5.3.2	黒部扇状地地下水の水質の経年変化 .....	47
5.3.3	水質の連続モニタリング .....	48
5.4	まとめ .....	50
6.	研究成果からの提言 .....	50
6.1	各調査研究結果を踏まえた総括 .....	50
6.2	地域への研究成果公開・還元 .....	51

## 目 次

図 1.1-1	小水力と地中熱を活用した分散型農村エネルギー自給構想	1
図 1.1-2	地中熱ヒートポンプの概要	2
図 1.1-3	密閉型（左）と開放型（右）地中熱ヒートポンプ	3
図 1.2-1	制御回路のブロックダイアグラム	4
図 1.2-2	軽トラック 1 日あたりの走行距離分布	5
図 1.2-3	黒部川扇状地における地下水の $\text{HCO}_3$ （アルカリ度）と Ca 濃度	6
図 2.1-1	電気軽トラックのトリップと追加コスト	9
図 3.2-1	調査位置図（富山市）	19
図 3.2-2	調査位置図（入善町）	20
図 3.2-3	調査風景写真 1	20
図 3.2-4	調査風景写真 2	20
図 3.3-1	入善町（黒部川扇状地）における時間帯別走行台数	23
図 3.3-2	富山市（常願寺川扇状地）における時間帯別走行台数	23
図 3.3-3	道路幅と交通量の関係（入善町）（◆は半日分の計測値による）	24
図 3.3-4	道路幅と交通量の関係（富山市）	24
図 3.3-5	扇状地における 1 日間の軽トラック分布状況（入善町）	25
図 3.3-6	扇状地における 1 日間の軽トラック分布状況（富山市）	25
図 4.2-1	走行テスト出発地点での EMU	30
図 4.2-2	計測用の多機能携帯端末と電力計	31
図 4.2-3	モーターとバッテリー間のケーブルからの電力測定	31
図 4.3-1	道路勾配と電費の関係	32
図 5.1-1	富山県内の河川の傾斜（県資料）	35
図 5.1-2	用途別地下水採取量の経年変化（地下水条例指定地域）（県資料より）	35
図 5.1-3	地下水位の変化（平成 21 年度地下水の現況：富山県より）	36
図 5.1-4	過去 16 年間の地盤沈下量（県資料より）	36
図 5.1-5	地下水中の塩化物イオン濃度（平成 16 年）（県資料より）	37
図 5.1-6	富山県の最高気温と最低気温の変化と降水量	37
図 5.2-1	地下水・河川水採取場所	39
図 5.2-2	地下水採水	39
図 5.2-3	地下水採水 2	40

図 5.3-1	地下水の水温 (°C) .....	41
図 5.3-2	地下水の電気伝導度(EC ; mS/m) .....	42
図 5.3-3	地下水の酸化還元電位(ORP ; mV) .....	42
図 5.3-4	地下水の pH.....	43
図 5.3-5	地下水中の Ca と炭酸濃度 (HCO <sub>3</sub> ) (単位 : mg/L) .....	43
図 5.3-6	地下水中の Ca 濃度(mg/L) .....	44
図 5.3-7	地下水中の炭酸濃度 (HCO <sub>3</sub> : mg/L) .....	44
図 5.3-8	地下水の主要化学成分 .....	45
図 5.3-9	地下水の主要化学成分の分布 .....	45
図 5.3-10	地下水の CaCO <sub>3</sub> スケール飽和度 .....	46
図 5.3-11	地下水の酸素同位体組成 .....	46
図 5.3-12	地下水中の電気伝導度の経年変化 (EC : mS/m) .....	47
図 5.3-13	地下水中の電気伝導度 (EC : mS/m) .....	47
図 5.3-14	2012 年と 2013 年の地下水中の Ca 濃度の経年変化 (単位 : mg/L) .....	48
図 5.3-15	2012 年と 2013 年の地下水中の Ca 濃度 (単位 : mg/L) .....	48
図 5.3-16	八幡地区の地下水の連続水質モニタリング結果 .....	49

## 表 目 次

表 1.3-1	研究課題とスケジュール .....	7
表 2.3-1	トリップ $i, j, i', j'$ の出発エリアと到着エリア .....	15
表 3.3-1	地点別軽トラック走行台数集計結果（富山市内） .....	21
表 3.3-2	地点別軽トラック走行台数集計結果（入善町内） .....	22

## 1. はじめに

### 1.1 研究の全体的な背景

県内の農業地帯には用水路水が持つ運動エネルギーや、地下水が持つ熱エネルギーをはじめとして、様々な未利用エネルギー資源が存在する。このうち、農業用水路で有望視されている10kW以下の小水力発電の技術開発が、中小企業により精力的に推進されている。一方、地下水や地熱水が持つ熱エネルギーは、最近ではHP（ヒートポンプ）による室内の冷暖房や消雪に利用されつつある。県内には豊富な地下水が存在するが、その熱利用は未開発である。以上のような背景の中で、我々は地域が持つ再生エネルギー資源利用として、農業用水による小水力発電の電力を、地域の作業用・移動用交通手段である軽トラックに供給すると共に、余剰電力を利用しての地中熱HPによって生産された温熱を室内冷暖房・温室などへ利用をすることを着想した（図 1.1-1）。軽トラックはマニュアルシフト車が多く、電気自動車に改造することは技術的には比較的容易である。この電気軽トラックにガソリン代替として電力を供給すると、電力価値はガソリン換算されるため経済的メリットが大きい。またバッテリーを交換可能とする一方で、小水力発電によって常時バッテリーを充電して、必要に応じて交換する仕組みを確立し、充電時間が節約されるだけでなく電池交換しながら航続距離を気にすることなく日常利用が可能になる。以上のようにして本研究は、農業地帯における低炭素社会の実現と農業コストの低減のために、小水力と地中熱を併用した分散型農村エネルギー自給システムのモデル開発を目指すものである。

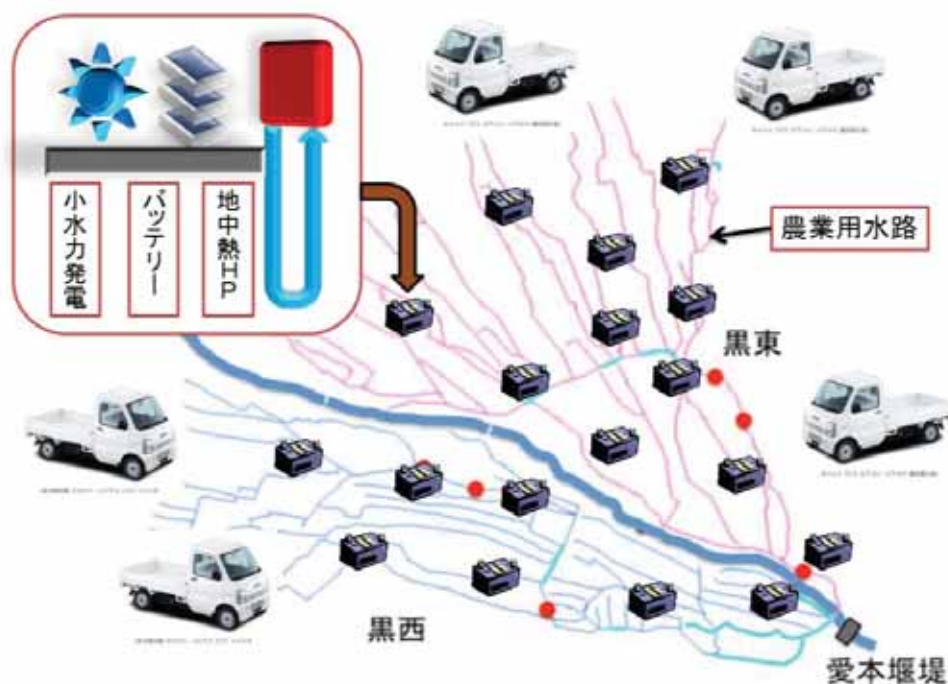


図 1.1-1 小水力と地中熱を活用した分散型農村エネルギー自給構想



この構想を実用化するためには、地中熱ヒートポンプの利用が不可欠である。地中熱ヒートポンプ（Geo-HP）は、図 1.1-2 地中熱ヒートポンプの概要に示すように、地下 10~100m の井戸を掘削し、そこへU-チューブと呼ばれるU字型の配管を埋設する。このチューブに熱媒体をポンプで循環させて、地下水と熱交換させる。地下水の水温は年間を通じて 15℃と一定であることから、夏は 30℃近い熱媒体がU-チューブを通して地下に送られ、地下水へ熱を放出して、冷却される。冷たくなった熱媒体は、地表へ運ばれ、ヒートポンプにより、より低温に冷却される。これを室内に送風して通常のクーラーのように部屋を冷房することができる。冬は、0℃近い熱媒体が地下水から熱を吸収して温められて、地表のヒートポンプにより高温となり、部屋の暖房用として利用される。

地中熱ヒートポンプには2種類あり、密閉型は、世界的にも普及している装置であるが、これは地下水資源が豊富でない地域を対象としている。一方、富山県は熊本県と同様に、国内でも豊富な地下資源を有していることから、開放型 Geo-HP が利用できる利点がある。この装置は、投資コストが少なく、また富山県内では既存の地下水井を所有している事業所や家庭が多いことから、新たな投資としてはヒートポンプ本体と関連の配管工事だけですむ。

本研究の最終目標は、地下水が持つ熱エネルギーを利用し、夏季は冷房を、冬季は暖房を行うと共に、無散水消雪や農業用温室への適用を検討するものである。Geo-HP を利用するには、安定した地下水の供給と良質の水質が維持されることが必要である。水質が悪い、すなわち多くの溶存成分を含んでいると、スケールと呼ばれる沈殿物が熱交換器や配管に付着沈殿し、熱効率を低下させる原因となる。このための地下水の水質や流動状況を正確に把握することを目的としている。

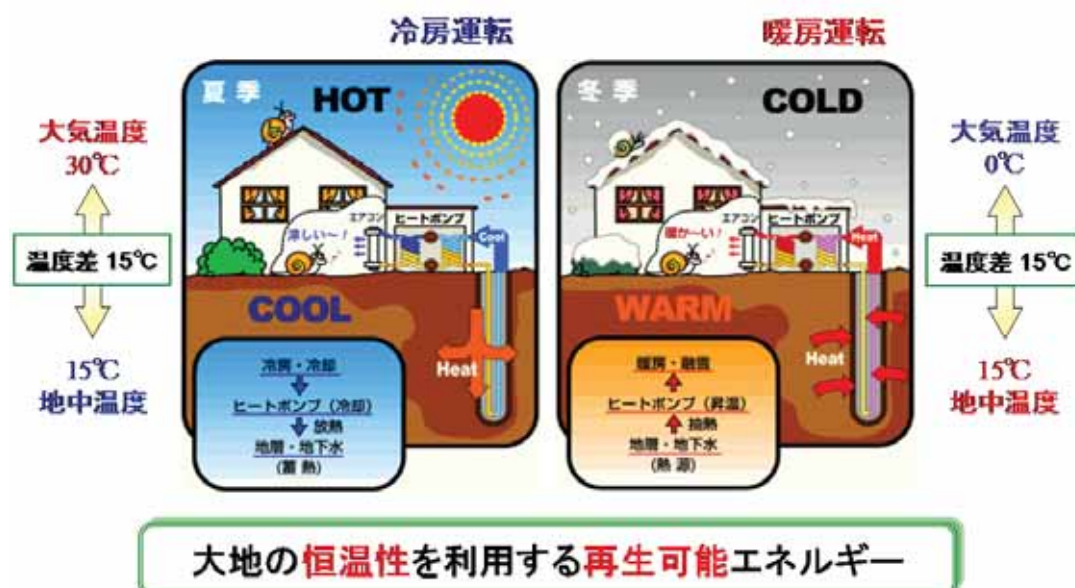


図 1.1-2 地中熱ヒートポンプの概要

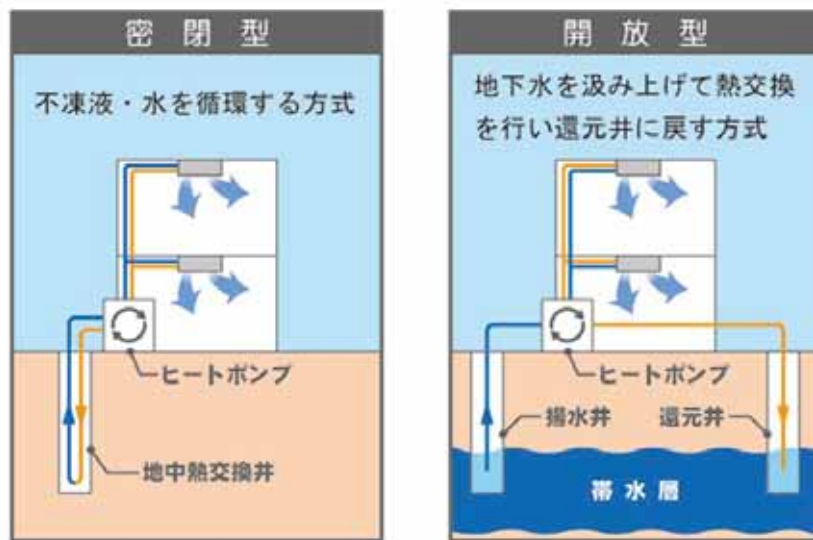


図 1.1-3 密閉型（左）と開放型（右）地中熱ヒートポンプ

## 1.2 24年度事業の概要

平成 24 年度までに我々は次のような研究開発を実施してきた。

### ①小水力発電による電気軽トラック用バッテリー基地機能の検討

農業用水を利用した小水力発電電力の効率的な地域利用方法として、電気軽トラックのバッテリー充電とその余剰電力を用いた地中熱 HP の駆動のための制御回路の設計を行った（図 1.2-1）。ここでは 1kW から 5kW 程度の小水力発電所を対象として、電気軽トラック用バッテリー（2 本）の充電と、地中熱ヒートポンプの運転制御を自動的にかつスムーズに行うことを目的とする。設計した回路は大きく分けて①電源部、②蓄電部（回路安定化用）、③軽トラックバッテリー充電回路、④Geo-HP 駆動回路、⑤制御コントローラ部からなる。電源部および蓄電部では、小水力発電所からの入力（200V ・ 3 層交流）を DC24V に変換し、鉛蓄電池にバッファリングする。これによって水車の出力変動を平準化し、回路の最終出力を安定化させる。安定化された電力は軽トラックバッテリー充電回路と Geo-HP 駆動回路によってそれぞれ適正な電圧に変換されて利用される。これらの設計結果はシミュレーションプログラムによって動作させ正常動作を確認した。

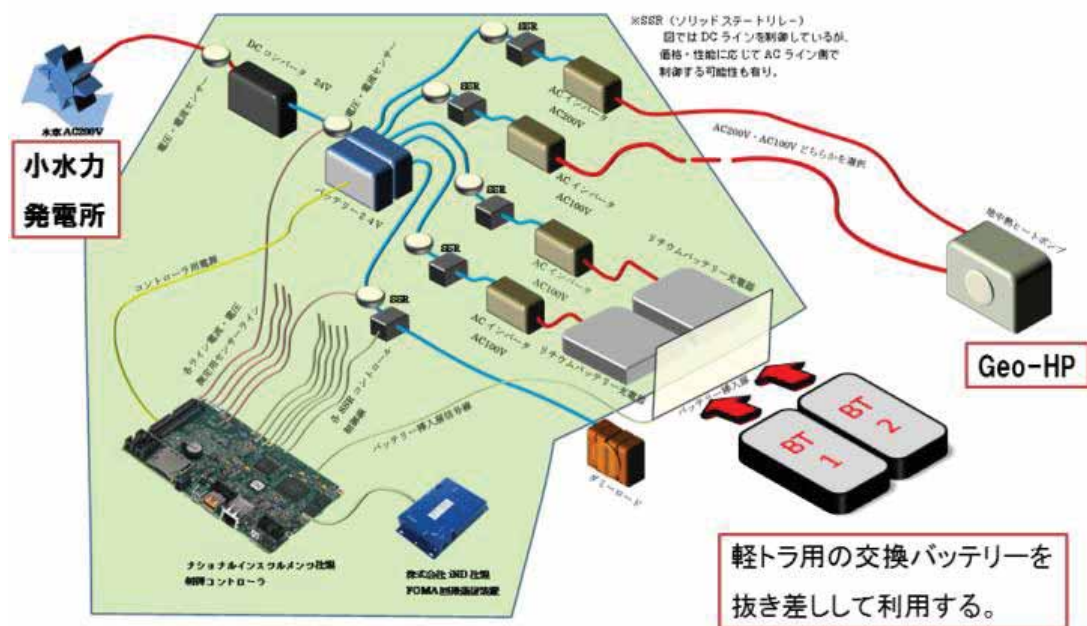


図 1.2-1 制御回路のブロックダイアグラム

②EV（電気自動車）の電力消費特性調査および電気軽トラック改造技術調査

10 台の農業用の小型トラックの 1 用件当たりの走行距離について約 3 か月調査した結果、軽トラックのほとんど活動範囲は 10km 以内であった（図 1.2-2）。すなわち、往復で 20km を超えることは多くないことが明らかとなった。この結果から、電気軽トラックの充電の要領は 5kWh 程度で十分であることが示され、充電の容量も大きくする必要がないため安価な車体価格とすることが可能であることが示された。

さらに農業用小型トラックの走行状況を、より具体的に把握するために、その 1 台に携帯電話を搭載した走行状況の計測を行った。この計測により、どのような勾配を上下して走行したかの詳細データが得られた。その結果、軽トラックの高さ方向の移動については 2 パターンが観測され、まず出発点が最高位置にあり、業務を果たすために低位置に移動する、V 字パターン、および、その逆の A パターンもある。前者の場合は出発地点で充電すると坂を下る際の回生システムが働きにくくなり電力の無駄となる。一方後者の場合は出発地点の充電は勾配を登るときの大量エネルギー消費に備える事ができ、出発地点に戻る際には、勾配を下り回生システムが機能して充電に充電される。この様にいずれの場合においても充電場所あるいはバッテリーステーションは低い位置に設置するほうが効率が良いことが明らかとなった。

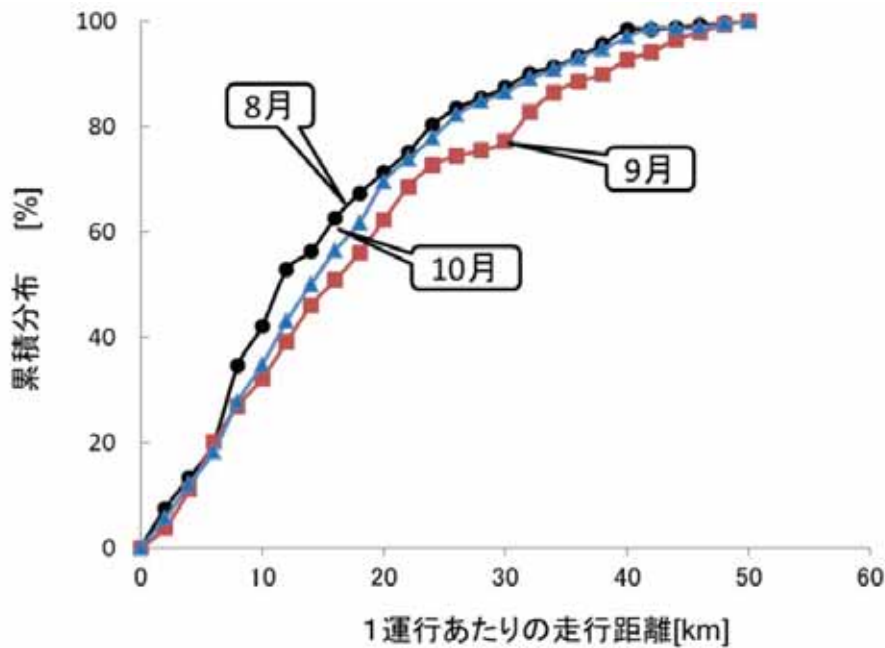


図 1.2-2 軽トラック 1 日あたりの走行距離分布

### ③地中熱ヒートポンプに適した地下水の水質の検討

Geo-HP を利用するには、安定した地下水の供給と良質の水質が維持されることが必要である。水質が悪い、すなわち多くの溶存成分を含んでいると、スケールと呼ばれる沈殿物が熱交換器や配管に付着沈殿し、熱効率を低下させる原因となる。そこで黒部川扇状地地下水系の大まかな水系区分及びその水質や物理特性、また涵養源を特定した。平成 24 年 7 月 18 日と 19 日に、黒部川扇状地内の 67 箇所地下水と 4 箇所の河川水を採取して、現地では水温、pH、電気伝導度(EC)、酸化還元電位(ORP)を測定し、研究室で主要化学成分と水素・酸素同位体組成を分析した。その結果から、それぞれの地域での適切な Geo-HP を用いなければならない事が確認された (図 1.2-3)。河川からの希釈効果のため水質濃度は低く開放型 Geo-HP が適切である。しかし地下水位は、河川流量に依存しているため、その対策が必要と思われる。扇状地の中央部(入善町市街地付近)は、地下水の EC が高く、 $\text{Ca}^{2+}$ や  $\text{HCO}_3^-$ 濃度も高い。これは、Geo-HP の熱交換部分や配管に、炭酸カルシウムなどが沈殿(スケール)し、熱交換率の低下が起こる問題が発生しやすいことを示す。クローズ型 HP を用いるなど、定期的なバルブ洗浄作業が必要となることが示唆された。

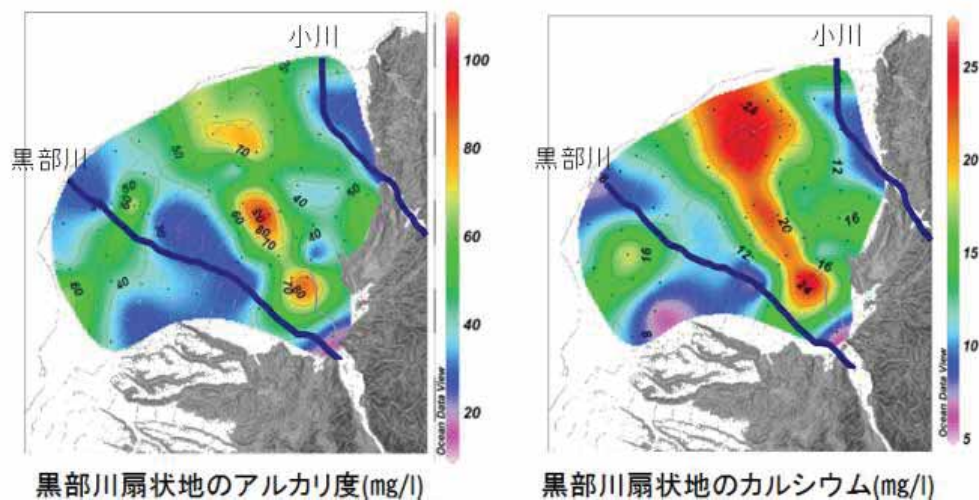


図 1.2-3 黒部川扇状地における地下水の  $\text{HCO}_3$  (アルカリ度) と Ca 濃度

### 1.3 25 年度事業の内容とその特徴

本年度事業では平成 24 年度に得られた成果に基づいて以下の 4 つの課題を設定し研究を実施した。表 1.3-1 にスケジュールを示す。

- ① 農村地帯におけるバッテリー基地の最適配置の検討 (富山国際大・上坂)  
扇状地におけるバッテリー基地の最適配置モデルを開発し実装可能な測定条件を明らかにする。
- ② 農業地帯における軽トラック利用状況調査(富山国際大・上坂、富山高専・丁子)  
扇状地における農繁期を対象として、時間当たりの軽トラックの通過台数から農村における軽トラックの分布を調査推計する。
- ③ EV (電気自動車) の電力消費特性調査および電気軽トラック改造技術調査 (富山高専・丁子)  
扇状地を対象とした農業用軽トラックの走行状況について調査する。また独自に開発した多機能携帯電話を用いた詳細走行状況測定システムによって、電気自動車の走行状況と消費電力量との関係を解析する。
- ④ 地下水動態と水質の連続調査および地中熱 HP 適所の抽出と検討 (富山大・上田)  
地下水の温度・水質を数箇所において連続記録し、詳細な水質変化を明らかにする。また水質の面からみた、小水力発電所および地中熱 HP の最適な装置仕様や位置を検討する。

表 1.3-1 研究課題とスケジュール

項目（担当）	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
EV特性調査（丁子）	軽トラック利用特性調査					電力消費特性調				まとめ		
小水力調査（上坂）	軽トラック利用特性調査 ・密度調査					バッテリー基地配置検				まとめ		
地下水調査（上田）	連続地下水質モニタリング					水質評価/Geo-HP 仕様検				まとめ		

## 2. 農村地帯におけるバッテリー基地の最適配置の検討

### 2.1 研究の背景と目的

用水路など比較的小さな水路に流れる水で発電する小水力発電は、新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法における新エネルギーとして定義され、昨今、注目を集めているが、本研究では、農業用水を流れる水の水力による小水力発電の電気を電気軽トラックに活用することを考える。JST 社会技術研究開発センターの研究費による研究プロジェクト「小水力を核とした脱温暖化の地域社会形成」では、富山県の黒部川扇状地に広がる農業地帯である入善町において、電気軽トラックの活用方法、及び農業におけるエネルギー需要についてアンケート調査を行った。農業従事者から得られた回答によれば、農業において1年を通して安定的にエネルギー需要がある機器は、農作物保管用冷蔵庫と農事用軽トラックのみであった(水林 [8])。

また、同アンケート調査では、小水力発電によって発電した電気を電気軽トラックに用いる場合の仕組みとして、次の1から5の中から最も利用したいものを選択してもらった。

1. バッテリーを供給するバッテリースタンドに交換に行く仕組み
2. バッテリーを配達してもらう仕組み
3. 電気自動車をレンタルにし、自動車ごと交換する仕組み
4. 家の近くの充電スタンドに充電に行き、歩いて家に戻る仕組み
5. 急速充電スタンドまで車で向かう仕組み

最も利用したいものとして最も多くの回答者が選択した方式は、1のバッテリー交換ステーションでの交換方式であり、全体の33.7%を占めた<sup>1</sup>。そこで、本研究では小水力発電による電気を電気軽トラックに用いるにあたり、バッテリー交換ステーションにおいてバッテリーを交換する仕組みを考える。1日の仕事を終えた電気軽トラックは自宅に戻るが、自宅においては電力会社からの電気が供給されているため、自宅において電気軽トラックのバッテリーを充電することも可能であると仮定する。以上の仮定におけるバッテリー交換ステーションの最適配置が、本研究での問題である。

ところで、電気自動車のバッテリーを交換するシステムに関しては、既に提唱され、研究されてきた。小柳、瓜生ら [4] ではバッテリー交換ステーションの最適配置を考えるにあたり、自宅や職場からの距離に着目し、重み付きボロノイ図を用いて、バッテリー交換ステーションへの平均距離を最小化する手法を議論している。また、本間 [7] ではバッテリー交換ステーションを運用する場合のバッテリーの安全在庫問題に関す

---

<sup>1</sup>最も利用したいものとして2番目に多く回答者が選択した方式は、5の急速充電スタンドまで車で向かう仕組みであり、全体の28.3%を占めた

る研究がある。この研究ではバッテリー交換ステーションにおけるバッテリー数の確率過程を M/M/s/N 待ち行列モデルを用いて定式化し、バッテリー交換ステーションにおける安全在庫数を見積もっている。

一方、本研究では電気軽トラックが満充電で自宅を出発し、終日電気軽トラックで動き回るケースを考察する。その場合、通常のポロノイ図を用いて自宅から至近距離にあるバッテリー交換ステーションを考察することは、何の意味も成さない。ここで考察したいことは、満充電のバッテリーを積んだ電気軽トラックが、その航続距離よりも長く走る場合、移動の途中で立ち寄りやすいようにバッテリー交換ステーションを配置する問題である。

電気軽トラックのバッテリー交換のタイミングを考えるにあたり、ガソリン自動車での給油のタイミングを考えたい。合理的に給油のタイミングを考える人は、1日の走行ルートとガソリンスタンドの位置をあらかじめ想定し、どこからどこまで移動する間に、どのガソリンスタンドで給油すべきかを導き出すかもしれない。しかしながら、そのように合理的に給油のタイミングを考える人は希であり、燃料がなくなりそうになってから給油のタイミングを考える人の方が多数を占める。そこで、本研究では電気軽トラックの各トリップに対して、最寄りのバッテリー交換ステーションに立ち寄るための迂回ルートの道のりの総和が最小になるようなバッテリー交換ステーションの配置を考える。

その際、小水力発電による電気によってバッテリーの充電を行うことによって発生する、特殊な制約を考える必要がある。電力系統からの電気を用いて充電スロットを設置する場合は、常識的な範囲内で十分に多くの充電スロットを準備することができる。その場合とは異なり、小水力発電による電気によってバッテリーの充電を行う場合、小水力発電の発電量は、水路を流れる水量によって設置できる充電スロットの数が制限される。

そこで、場所によって設置可能な充電スロットの数が制限される中で、バッテリー交換ステーションが待ち行列モデルにおいての定常状態が保たれ、かつバッテリーの呼損が起きないバッテリー交換ステーション数、及び充電スロット数を考察したい。

	A		B				
						E	
	C		D				

図 2.1-1 電気軽トラックのトリップと追加コスト



## 2.2 モデリングの説明

まず、本研究における電気軽トラックのトリップについて説明する。電気軽トラックが自宅  $A_0$  を出発し、1 日を掛けて地点  $A_1$ , 地点  $A_2$ ,  $\dots$ , 地点  $A_n$  と回る場合、電気軽トラックのトリップとは、2 地点の対  $(A_1, A_2)$ ,  $(A_2, A_3)$ ,  $\dots$ ,  $(A_{n-1}, A_n)$  を差す。ただし、各地点  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\dots$ ,  $A_n$  は電気軽トラックの運転手が目的を持って訪れる場所であるとする。

ところで、図2.1-1 の直線部分に道があり、電気軽トラックは地点 A から地点 D に向かうものとする。このとき、長方形 ABCD の内部、及びその周上にバッテリー交換ステーションがあるならば、電気軽トラックは地点 A から地点 D への最短の道のりの走行でバッテリー交換ステーションに立ち寄ることができる。しかし、同じく地点 A から地点 D に向かう軽トラックが地点 E のバッテリー交換ステーションに立ち寄るならば、地点 A から地点 D に向かう最短の道のりに加えて、長方形 ABCD と点 E との距離の2 倍分だけ、余計に走行する必要がある。

このように考えると、トリップ  $(A, D)$  に対して、軽トラックがバッテリー交換ステーションに立ち寄る場合の追加コストは、長方形 ABCD とバッテリー交換ステーションとの距離の2 倍分の走行であると考えることができる。

他方、4つの異なるトリップ  $(A, D)$ ,  $(D, A)$ ,  $(B, C)$ ,  $(C, B)$  に対して、地点Eのバッテリー交換ステーションへ立ち寄る際の追加コストはすべて等しい。従って、追加コストの考察において、先の4つの異なるトリップ  $(A, D)$ ,  $(D, A)$ ,  $(B, C)$ ,  $(C, B)$  を区別する必要がない。そこで、この 4つの異なるトリップを同一視し、これらすべてを  $[A, D]$  と書くことにする<sup>2</sup>。すなわち、 $[A, D] = [D, A] = [B, C] = [C, B]$  である。

図2.1-1 における考察では、道が長方形を成すように敷設されている状況を考えたが、一般的な農村において、田畑は長方形に区画整理され、それを取り囲むように道が整備されているため、図2.1-1 のように農村を捉えることは妥当であると考えられる。さらにモデルをより単純化するため、道の場所を仮定せず、2 地点間の距離として Manhattan 距離<sup>3)</sup>を用いるものとした。

ところで、農村には複数の軽トラックの所有者が存在する。それぞれの軽トラックに対して、複数のトリップが存在し、それらのトリップには密度が考えられる。本研究では、バッテリー交換ステーションの個数  $v$  を 所与とし、 $v$  個のバッテリー交換ステーションを配置した場合、すべてのトリップに対するバッテリー交換ステーションへの迂

---

<sup>2</sup>厳密な定式化は後で行う。

<sup>3</sup>  $\mathbb{R}^2$  における Manhattan 距離は、 $\mathbf{x} = (x, y)$ ,  $\mathbf{x}' = (x', y')$  に対して、 $\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = |x - x'| + |y - y'|$  により定義される。

回ルートの道のりの総和が最小になるようなバッテリー交換ステーションの配置を考察したい。以下、この問題を厳密に定式化する。

## 2.3 モデル化

農村において複数の電気軽トラックが用いられており、それらの電気軽トラックのバッテリーはすべて取り替え可能であるとする。バッテリーは自宅で充電が可能であるが、村落に存在するバッテリー交換ステーションにおいて交換可能である。村落は平面であると考え、そこに直交座標系を導入する。考えている村落のエリアを  $S$  とし、 $S$  は 2 次元 Euclid 空間  $\mathbb{R}^2$  の部分集合であるとみなす。

次にバッテリー交換ステーションをエリア  $S$  内に  $\nu$  ヶ所設置するものとする。ただし、 $\nu > 0$  とする。ここで、 $N = \{1, 2, \dots, \nu\}$  とする。また、 $\mathbf{z}_k \in S$  ( $k = 1, 2, \dots, \nu$ ) は  $k$  番目のバッテリー交換ステーションの位置を表すものとする。

各トリップには単位時間あたりの軽トラックの発生トリップを表すトリップ密度関数が定義されるものとする。このトリップ密度関数が連続であるものを、以下「理想的なモデル」ということにする。ただ、実際には連続なトリップ密度関数を与えることは難しい。そこで、現実に即した問題を考えるため、エリア  $S$  を適当な格子に区切って、離散的にトリップ密度を扱うことにしたい。そのときのモデルを以下では「分析時に用いるモデル」ということにする。

さらに、バッテリー交換ステーションにおける呼損確率も考察したい。そこで、地点  $\mathbf{z} \in S$  における設置可能最大充電スロット数を  $s(\mathbf{z})$  とする。これは地点  $\mathbf{z} \in S$  付近を流れる水路の流量によって決定される<sup>4</sup>。また、バッテリー交換を希望する電気軽トラックのバッテリーステーションへの到着は、平均  $1/\lambda$  のポアソン過程に従って発生し、バッテリーの充電時間は平均  $1/\mu$  の指数分布に従うものと仮定する。さらに、バッテリー交換ステーション  $\mathbf{z}_k$  に準備する総バッテリー数を  $N_k$  とする。

### 2.3.1 理想的なモデル

ここでは、理想的なモデルを記述する。まず、電気軽トラックのトリップを定義する。 $\mathbb{R}^2$  の要素に対して同値関係  $\sim$  を次のように定義する。

$$((x, y), (x', y')) \sim ((x', y'), (x, y)) \text{ または } ((x, y), (x', y')) \sim ((x, y'), (x', y)) \quad (1)$$

<sup>4</sup>地点  $\mathbf{z} \in S$  に水路が流れていない場合であっても、付近の水路に発電機を設置し、地点  $\mathbf{z} \in S$  まで電線で送電できる場合は、その付近の水路で発電可能な電気料で  $s(\mathbf{z})$  を決定する。

この同値関係  $\sim$  によって定義される商集合を  $T$  と表し、 $T$  の要素をトリップと定義する。この同値関係  $\sim$  による  $((x, y), (x', y'))$  の同値類を  $[(x, y), (x', y')]$  と表すものとする。この同値類の代表元  $((x, y), (x', y'))$  は  $x \leq x'$  かつ  $y \leq y'$  をみたすように取ることができる。この空間  $T$  には  $\mathbb{R}^4 \cong \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2$  から自然に誘導される可微分構造が導入できる。また、 $T$  には  $\mathbb{R}^4$  から自然に誘導される測度が定義できる。その測度を  $\xi$  で表す。

トリップ密度を定義する。各トリップ  $\tau \in T$  に対して、トリップ  $\tau$  の密度を  $f(\tau)$  で表す。すなわち、単位時間あたり  $f(\tau)$  台の電気軽トラックのトリップ  $\tau$  が発生するものとする。従って  $f(\tau) \geq 0$  である。この関数  $f: T \rightarrow \mathbb{R}$  をトリップ密度関数というものとする。理想的なモデルにおいては、トリップ密度関数  $f$  が連続であることを仮定する。

トリップとバッテリー交換ステーションとの距離  $d: T \times S \rightarrow \mathbb{R}$  を定義する。トリップ  $\tau = [(x, y), (x', y')] \in T$  (ただし、 $x \leq x'$  かつ  $y \leq y'$  とする。) と、バッテリー交換ステーション  $\mathbf{z} \in S$  に対して、それらの距離  $d(\tau, \mathbf{z})$  を

$$d(\tau, \mathbf{z}) = \text{dist}([x, x'] \times [y, y'], \mathbf{z}) \quad (2)$$

により定義する。ただし、 $[x, x']$  及び  $[y, y']$  は  $\mathbb{R}$  における閉区間を表し、 $\text{dist}$  は  $\mathbb{R}^2$  における Manhattan 距離を表すものとする。

ここで、バッテリー交換ステーションの数  $\nu$  を所与とし、 $\nu$  個のバッテリー交換ステーションの位置からなる列  $(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)$  を考える。このとき、各トリップからすべてのバッテリー交換ステーションまでの距離の最小値を与える関数  $m(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu): T \rightarrow \mathbb{R}$  を定義する。すなわち、任意のトリップ  $\tau \in T$  に対して、

$$m(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)(\tau) = \min_{k \in N} d(\tau, \mathbf{z}_k) \quad (3)$$

と定義する。 $T$  上にはボロノイ領域を定義することができる。 $k$  番目のバッテリー交換ステーションに対するボロノイ領域  $V(\mathbf{z}_k)$  は

$$V(\mathbf{z}_k) = \{\tau \in T; \arg \min_{\ell \in N} d(\tau, \mathbf{z}_\ell) = k\} \quad (4)$$

により定義できる。すなわち、 $k$  番目のバッテリー交換ステーションを利用するのは、電気軽トラックのトリップが  $V(\mathbf{z}_k)$  に属する場合であると考えられる。 $k \neq l$  のとき、2 つのボロノイ領域  $V(\mathbf{z}_k)$  と  $V(\mathbf{z}_l)$  はそれらの交わり  $V(\mathbf{z}_k) \cap V(\mathbf{z}_l)$  が空集合ではないこともあり得るが、 $T$  上で測度 0 の集合である。

以下、バッテリー交換ステーションにおけるバッテリーの呼損確率に関する考察を行いたい。バッテリー交換を目的としてバッテリー交換ステーション  $\mathbf{z}_k$  を訪れる電気軽トラックの到着は

$$\tilde{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu) := \lambda \int_{\tau \in V(\mathbf{z}_k)} f(\tau) d\xi \quad (5)$$

として、平均  $1/\tilde{\lambda}_k$  のポアソン過程に従う。このとき、本間 [7] によれば、バッテリー交換ステーションにおけるバッテリー在庫の確率過程は M/M/s/N 待ち行列モデルで表現される。それに従えば、 $k$  番目のバッテリー交換ステーション  $\mathbf{z}_k$  におけるバッテリーの呼損確率  $p_{N_k}(k) = p_{N_k}(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)(k)$  は、

$$s_k := s(\mathbf{z}_k) \quad (6)$$

$$\rho_k := \rho_k(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu) = \frac{\tilde{\lambda}_k(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)}{s(\mathbf{z}_k)\mu} \quad (7)$$

とおくとき、

$$p_{N_k}(k) = p_{N_k}(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)(k) = \frac{s_k^{s_k}}{s_k!} \rho_k^{N_k} \left( \sum_{n=0}^{s_k} \frac{(s_k \rho_k)^n}{n!} + \frac{s_k^{s_k}}{s_k!} \sum_{n=s_k+1}^{N_k} \rho_k^n \right)^{-1} \quad (8)$$

と表される。なお、 $\rho_k < 1$  となることが定常分布となるための必要十分条件である。この  $\rho_k$  は充電スロットの利用率を表す。

考察する問題は、バッテリー交換ステーションの個数  $\nu$ 、トリップ密度関数  $f$ 、設置可能最大充電スロット数  $s(\mathbf{z})$  を所与として、条件

$$\rho_k < 1 \quad (k = 1, 2, \dots, \nu) \quad (9)$$

の下、

$$\int_{\tau \in T} m(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)(\tau) f(\tau) d\xi \quad (10)$$

を最小化する  $\nu$  個のバッテリー交換ステーションの位置  $\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu \in S$  を求めることである<sup>5</sup>。

最後に呼損確率について考える。許容可能な呼損確率を  $\delta$  とする。いま、上記最小化問題の解  $\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu \in S$  が存在すれば、それらの解が条件 (9) をみたしていることから、

$$\lim_{N_k \rightarrow \infty} p_{N_k}(k) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, \nu) \quad (11)$$

である。従って、 $N_k$  を十分に大きく選ぶことにより、呼損確率を  $\delta$  未満に抑えることができる。

### 2.3.2 分析時に用いるモデル

ここでは、分析時に用いるモデルについて記述する。なお、理想的なモデルにおける記述と異なる部分についてのみ詳述する。 $A = \{1, 2, \dots, \alpha\}$ ,  $B = \{1, 2, \dots, \beta\}$  とし、実数  $x_i$  ( $i = 0, 1, \dots, \alpha$ ) と実数  $y_j$  ( $j = 0, 1, \dots, \beta$ ) を、次のように取る。

$$x_{i+1} - x_i = x_i - x_{i-1} > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, \alpha - 1) \quad (12)$$

$$y_{j+1} - y_j = y_j - y_{j-1} > 0 \quad (j = 1, 2, \dots, \beta - 1) \quad (13)$$

$$x_{i+1} - x_i = y_{j+1} - y_j \quad (i = 0, 1, \dots, \alpha; j = 0, 1, \dots, \beta) \quad (14)$$

さらに、 $\mathbb{R}$  の部分集合  $X_i$  ( $i \in A$ ) と  $Y_j$  ( $j \in B$ ) は、 $(x_i)_{i \in A \cup \{0\}}$  と  $(y_j)_{j \in B \cup \{0\}}$  を用いて、

$$X_i = \{x \in \mathbb{R}; x_{i-1} \leq x < x_i\} \quad (i \in A) \quad (15)$$

---

<sup>5</sup>条件 (9), (12) を満たす  $\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu \in S$  が存在する最小の  $\nu$  を考察することにより、エリア  $S$  におけるバッテリー交換ステーションの最低限必要な設置箇所数を求めることができる。また、式 (10) は、ポロノイ領域  $V(\mathbf{z}_k)$  を用いて

$$\int_{\tau \in T} m(\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_\nu)(\tau) f(\tau) d\xi = \sum_{k=1}^{\nu} \int_{\tau \in V(\mathbf{z}_k)} d(\tau, \mathbf{z}_k) f(\tau) d\xi$$

と書くことができる。

$$Y_j = \{y \in \mathbb{R}; v_{i-1} \leq y < v_i\} (j \in B) \quad (16)$$

と表されるものとする。このとき、 $\{X_i \times Y_j\}_{(i,j) \in A \times B}$  がエリア  $S$  を被覆すること、すなわち

$$S \subset \bigcup_{(i,j) \in A \times B} X_i \times Y_j \quad (17)$$

を仮定する。また、インデックス対の集合  $I$  を

$$I = \{(i, j) \in A \times B; (X_i \times Y_j) \cap S \neq \emptyset\} \quad (18)$$

により定義する。以上により、 $S$  が格子によって正方形の区画に分けられ、1つの区画は  $I$  に属する  $(i, j)$  により  $X_i \times Y_j$  と表される。この  $X_i \times Y_j$  をエリア  $(i, j)$  と呼ぶことにする。

また、 $k$  番目のバッテリーステーションの存在エリアを  $(m_k, n_k)$  と表すことにする。すなわち、 $z_k \in X_{m_k} \times Y_{n_k}$  をみたしている。

トリップを定義する。まず、 $I^2$  の要素に対して同値関係  $\sim$  を次のように定義する。

$$((i, j), (i', j')) \sim ((i', j'), (i, j)) \text{ または } ((i, j), (i', j')) \sim ((i, j'), (i', j)) \quad (19)$$

この同値関係  $\sim$  によって定義される商集合を  $T$  と表し、 $T$  の要素をトリップと定義する。この同値関係  $\sim$  による  $((i, j), (i', j'))$  の同値類を  $[(i, j), (i', j')]$  と表すものとする。この同値類  $[(i, j), (i', j')]$  の代表元  $((i, j), (i', j'))$  は  $i \leq i'$  かつ  $j \leq j'$  をみたすように取ることができる。実際には、表2.3-1 に示す次の4つの移動を同一視し、記号  $[(i, j), (i', j')]$  で表すものとする。

表 2.3-1 トリップ  $[(i, j), (i', j')]$  の出発エリアと到着エリア

出発エリア	到着エリア
$(i, j)$	$(i', j')$
$(i, j')$	$(i', j)$
$(i', j)$	$(i, j')$
$(i', j')$	$(i, j)$

トリップ密度を定義する。各トリップ  $\tau \in T$  に対して、 $\tau$  の密度を  $f(\tau)$  で表す。ただし、 $f(\tau) \geq 0$  である。この関数  $f: T \rightarrow \mathbb{R}$  をトリップ密度関数というものとする。

トリップとバッテリー交換ステーションの存在エリアとの距離  $d: T \times I \rightarrow \mathbb{Z}$  を定義する。トリップ  $\tau = [(i, j), (i', j')] \in T$  (ただし、 $i \leq i'$ かつ  $j \leq j'$ とする。) と、バッテリー交換ステーションの存在エリア  $(m, n) \in I$  に対して、 $\tau$  と  $(m, n)$  の距離  $d(\tau, (m, n))$  を

$$d(\tau, (m, n)) = \text{dist}([i, i'] \times [j, j'], (m, n)) \quad (20)$$

により定義する。ただし、 $[i, i']$  は  $\mathbb{R}$  における閉区間を表し、 $\text{dist}$  は  $\mathbb{R}^2$  における Manhattan 距離を表すものとする。

$T$  上におけるボロノイ領域を定義する。 $k$  番目のバッテリー交換ステーションの存在エリアに対するボロノイ領域  $V(m_k, n_k)$  は

$$V(m_k, n_k) = \{\tau \in T; \arg \min_{\ell \in N} d(\tau, (m_\ell, n_\ell)) = k\} \quad (21)$$

により定義できる。すなわち、 $k$  番目のバッテリー交換ステーションを利用するのは、電気軽トラックのトリップが  $V(m_k, n_k)$  に属する場合であると考えられる。理想的なモデルにおいては、 $k \neq l$  のとき、2つのボロノイ領域  $V(\mathbf{z}_k)$  と  $V(\mathbf{z}_l)$  の交わり  $V(\mathbf{z}_k) \cap V(\mathbf{z}_l)$  は  $T$  上で測度 0 の集合であったため、確率的にはこの交わりを無視できた。しかしながら、分析時におけるモデルにおいては、離散化したために、その交わり  $V(m_k, n_k) \cap V(m_l, n_l)$  を無視できない。そこで、バッテリー交換ステーション  $\mathbf{z}_k$  への電気軽トラックの到着間隔  $\tilde{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k((m_1, n_1), \dots, (m_\nu, n_\nu))$  を記述するため、どの最寄りのエリアのバッテリー交換ステーションが選択されるかは、最寄りのエリアのバッテリー交換ステーションの中から等しい確率で選択されるものと仮定する。各トリップ  $\tau \in T$  に対して、離散化された最寄りのバッテリーステーションの個数  $\sigma(\tau)$  を

$$\sigma(\tau) := \#\{k \in N; \tau \in V(m_k, n_k)\} \quad (22)$$

により定義するとき、

$$\tilde{\lambda}_k = \tilde{\lambda}_k(z_1, \dots, z_\nu) := \lambda \sum_{\tau \in V(z_k)} \frac{f(\tau)}{\sigma(\tau)} \quad (23)$$

と表される。ただし、記号  $\#$  は集合の要素の個数を表す。

バッテリー交換ステーションにおけるバッテリーの呼損確率  $p_{N_k}$  充電スロットの利用率  $\rho_k$  は、先の理想的なモデルと同様に与えられる。なお、設置可能最大充電スロット数はエリアごとに与えられ、各エリア  $(m, n)$  に対して、設置可能最大充電スロット数  $s(m, n)$  が与えられているものとする。

ここで、バッテリー交換ステーションの数  $\nu$  を所与とし、バッテリー交換ステーションの存在エリアからなる列  $((m_1, n_1), \dots, (m_\nu, n_\nu))$  を考える。このとき、各トリップからすべてのバッテリー交換ステーションまでの距離の最小値を与える関数  $m((m_1, n_1), \dots, (m_\nu, n_\nu)) : T \rightarrow \mathbb{Z}$  は、理想的なモデルと同様に

$$m((m_1, n_1), \dots, (m_\nu, n_\nu))(\tau) = \min_{k \in N} d(\tau, (m_k, n_k)) \quad (\tau \in T) \quad (24)$$

と定義される。

考察する問題は、バッテリー交換ステーションの個数  $\nu$ 、トリップ密度関数  $f$ 、設置可能最大充電スロット数  $s(m, n)$  を所与として、条件

$$\rho_k < 1 \quad (k = 1, 2, \dots, \nu) \quad (25)$$

の下、

$$\sum_{\tau \in T} m((m_1, n_1), \dots, (m_\nu, n_\nu))(\tau) f(\tau) \quad (26)$$

を最小化する  $\nu$  個のバッテリー交換ステーションの配置エリア  $((m_1, n_1), \dots, (m_\nu, n_\nu))$  を求めることである。

## 2.4 トリップ密度関数の推定

先述の最小化問題を考えるにあたり、ある農村におけるトリップ密度関数を推定したい。前節「分析時に用いるモデル」において述べた通り、農村のエリア  $S$  をいくつかの格子に分割する。



次に、トリップ密度関数の推定のため、農村のエリア S 内の複数の軽トラックに GPS と測位の記録装置を取り付ける。軽トラックの位置が 5 分以上変わらない場合、その場所が軽トラックの運転手の目的地のひとつであると見なし、その位置を記録する。これによってトリップがカウントされ、トリップ密度関数を推定できる。

#### 参考文献

- [1] S. Rahman, G. B. Shrestha: ' An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system' , " IEEE Transactions on Power Delivery" , Vol. 8, No. 2, pp. 591-597, 1993.
- [2] M. M. Collons, G. H. Mader: ' The timing of EV recharging and its effect on utilities' , " IEEE Transactions on Vehicular Technology" , Vol. 32, No. 1, pp. 90-97, 1983.
- [3] P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis, R. S. Thallam: ' A statistical analysis of the effect of electric vehicle battery charging on distribution system harmonic voltages' , " IEEE Transactions on Power Delivery" , Vol. 13, No. 2, pp. 640-646, 1998.
- [4] 小柳 文子, 瓜生 芳久: 「重み付きボロノイによる電気自動車用充電設備の適正配置の検討」, 『電気学会 論文誌 B』, Vol. 119, No. 12, pp. 1412-1419, 1999.
- [5] 小柳 文子, 瓜生 芳久: 「電気自動車による消費電力のモデル化と電力需要に与える影響」, 『電気学会論文誌. B, 電力・エネルギー部門誌』, Vol. 117, No. 1, pp. 41-46, 1996-12-20.
- [6] 石亀 篤司, 松田 真典: 「充電インフラの適正配置に関する検討」, 『オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学』, Vol. 56, No. 7, pp. 388-394, 2011-07-01.
- [7] 本間 裕大: 「EV バッテリー交換ステーションにおける安全在庫モデル」, 『オペレーションズ・リサーチ : 経営の科学』, Vol. 55, No. 6, pp. 347-352, 2010-06-01.
- [8] 水林 義博, 前田 隆: 「農業用水を利用した小水力発電を取り巻く法律・制度の現状と課題」, 『金沢大学 大学院人間社会環境研究』, Vol. 21, pp. 69-82, 2011-03-31.
- [9] 岡部 篤行, 鈴木 敦夫: 『最適配置の数理』, 朝倉書店, 1992.
- [10] 杉原 厚吉: 『なわばりの数理モデル : ボロノイ図からの数理工学入門』, 共立出版, 2009.

### 3. 農業地帯における軽トラック利用状況調査

#### 3.1 研究の背景と目的

本研究で目標としている分散型農村エネルギー自給構想においては、エネルギープラント（＝電気軽トラックのバッテリーステーション）の農村全体における配置は重要な問題である。その論理的背景については前章で詳説したが、実際に農村地帯の中を軽トラックがどのように移動しているかについて把握するために、農繁期の1日間における軽トラックの動きを、交通量調査を用いて調査した。これにより、農村地帯の中での軽トラックの空間的密度を得る事を目的とする。

#### 3.2 調査方法

黒部川扇状地周辺地域（入善町）、常願寺川扇状地周辺地域（富山市）にて収穫期の1日における軽トラックの走行状況について各10カ所程度の地点で走行時間、走行方向、車両ナンバーを記録する調査を9月14日（土）に実施した。

各調査地点における農道等の道路断面を通過する軽トラックの記録を行った。調査時間は9:00~16:00の7時間とした。設定した道路の断面を通行した軽トラックの通行時間、車両番号（4ケタの番号のみ）を、方向別に調査員が記録用紙に記録した。また、各地点の道路の幅員を計測した。軽トラックの通行量の計測は、富山市内で10地点（図3.2-1）と入善町内で11地点（図3.2-2）について実施した。



図 3.2-1 調査位置図（富山市）

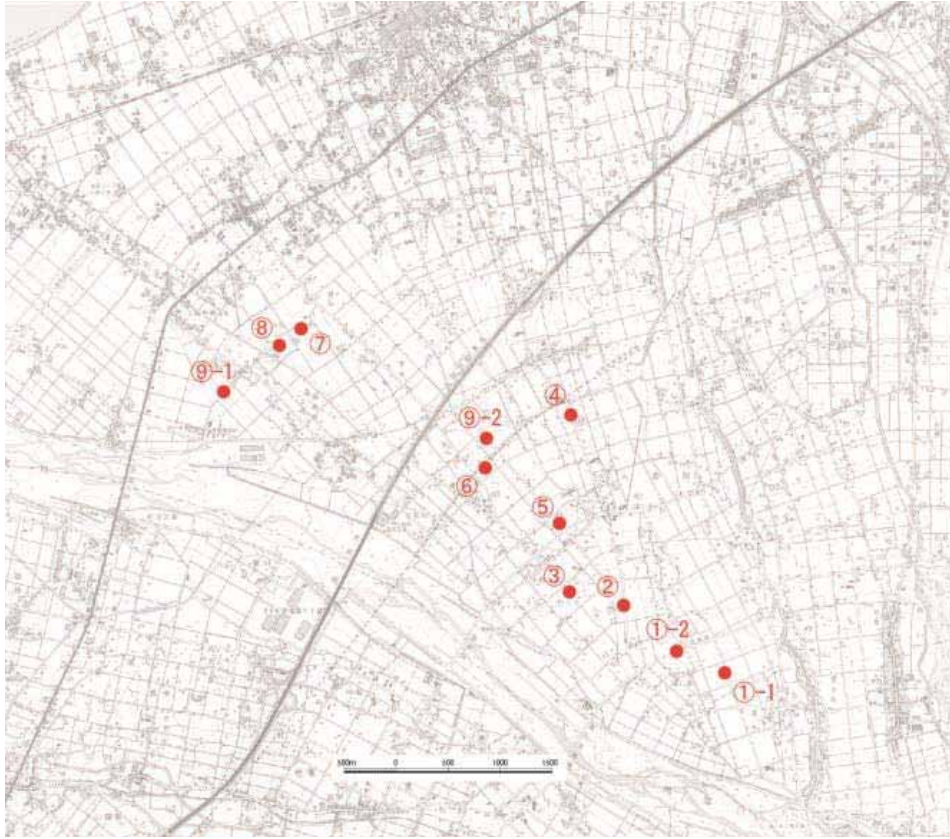


図 3.2-2 調査位置図 (入善町)



図 3.2-3 調査風景写真 1



図 3.2-4 調査風景写真 2

### 3.3 軽トラックの利用状況結果

#### 3.3.1 富山市内と入善町における軽トラックの走行台数

以下に、各調査地点別の走行台数集計結果および各地点の調査データを示す。ここで各地点において「右→左」「左→右」の表記は、互いに逆向きの交通を表すが、必ずしも絶対的な向きを表すものではなく単に逆向きの交通であることを示している。

表 3.3-1 地点別軽トラック走行台数集計結果（富山市内）

調査地点	①流杉用水口			②安政の流石			③大庄小学校横		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	0	1	1	5	5	7	1	1	2
10:00～11:00	3	2	5	3	3	5	1	2	2
11:00～12:00	0	1	1	2	5	6	1	3	3
12:00～13:00	1	2	3	3	3	4	2	1	3
13:00～14:00	0	1	1	4	2	5	4	5	6
14:00～15:00	0	0	0	2	4	5	1	2	2
15:00～16:00	1	0	1	4	6	9	2	1	3
合計	5	7	11	17	15	23	10	13	15

調査地点	④西の番北口バス停前			⑤清水又用水交差点			⑥立山化学前		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	2	3	4	2	3	4	1	1	1
10:00～11:00	5	7	11	2	8	9	0	3	3
11:00～12:00	2	0	2	3	1	3	2	3	4
12:00～13:00	1	1	1	2	0	2	3	5	7
13:00～14:00	3	3	4	3	5	6	6	5	8
14:00～15:00	3	3	4	1	3	4	3	1	3
15:00～16:00	1	2	3	2	1	3	0	1	1
合計	13	14	22	15	19	27	13	16	20

調査地点	⑦北電放水路			⑧月岡駅前			⑨セレモニーホール前		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	4	5	8	6	5	7	0	0	0
10:00～11:00	8	7	11	3	6	8	1	0	1
11:00～12:00	4	5	6	4	5	7	2	2	4
12:00～13:00	3	3	4	3	2	4	0	0	0
13:00～14:00	7	5	9	3	5	7	0	0	0
14:00～15:00	2	7	7	2	2	4	1	1	2
15:00～16:00	2	2	3	2	4	5	1	1	1
合計	20	19	27	17	26	30	5	4	7

調査地点	⑩広域農道コメリ前		
	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	2	9	10
10:00～11:00	7	8	11
11:00～12:00	3	7	8
12:00～13:00	2	3	5
13:00～14:00	4	8	9
14:00～15:00	10	9	13
15:00～16:00	4	5	7
合計	27	45	49

※車両番号より識別し、重複しない台数カウントとするため、合計は必ずしも一致しない

表 3.3-2 地点別軽トラック走行台数集計結果（入善町内）

調査地点	1-1			1-2			2		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	4	3	5				11	7	16
10:00～11:00	0	1	1				6	2	8
11:00～12:00	0	1	1				2	5	6
12:00～13:00				2	3	5	7	2	8
13:00～14:00				4	3	7	4	3	6
14:00～15:00				7	13	17	6	11	15
15:00～16:00				3	7	9	8	8	12
合計	4	5	7	14	25	30	33	35	49

調査地点	3			4			5		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	2	0	2	14	9	19	2	3	5
10:00～11:00	5	4	8	4	5	8	4	2	6
11:00～12:00	1	2	2	4	5	8	3	4	6
12:00～13:00	1	1	2	1	4	4	3	3	6
13:00～14:00	2	4	5	2	2	4	7	8	14
14:00～15:00	5	4	6	2	4	5	5	10	13
15:00～16:00	4	7	7	7	11	16	1	8	9
合計	13	11	18	32	35	56	24	31	43

調査地点	6			7			8		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	2	4	5	0	4	4	0	2	2
10:00～11:00	6	7	10	3	1	4	3	2	3
11:00～12:00	4	3	6	2	6	7	3	4	6
12:00～13:00	2	1	3	0	3	3	0	2	2
13:00～14:00	4	5	7	0	1	1	0	1	1
14:00～15:00	2	1	3	3	2	5	1	1	2
15:00～16:00	4	5	7	1	8	8	0	4	4
合計	16	19	26	9	19	20	7	14	15

調査地点	9-1			9-2		
	左→右	右→左	合計	左→右	右→左	合計
9:00～10:00	0	1	1			
10:00～11:00	4	4	5			
11:00～12:00	2	3	3			
12:00～13:00	1	0	1			
13:00～14:00				6	3	9
14:00～15:00				3	1	3
15:00～16:00				4	4	7
合計	5	7	8	13	7	17

※車両番号より識別し、重複しない台数カウントとするため、合計は必ずしも一致しない

### 3.3.2 時間帯別の軽トラックの走行状況

上記で求められた1時間ごとの軽トラック分布について、計測開始から夕方までの総通行台数を時間ごとに表示したのが図 3.3-1（入善町）および図 3.2-2（富山市）である。いずれのグラフからも解るように、昼食時には一時的に軽トラックの交通量がへるものの、午後になった再び交通量が増えることが解る。

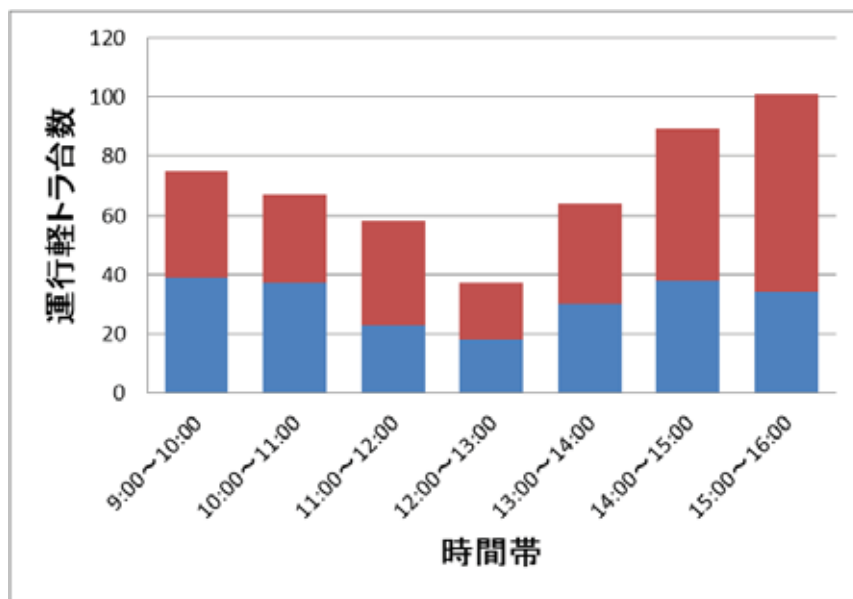


図 3.3-1 入善町（黒部川扇状地）における時間帯別走行台数

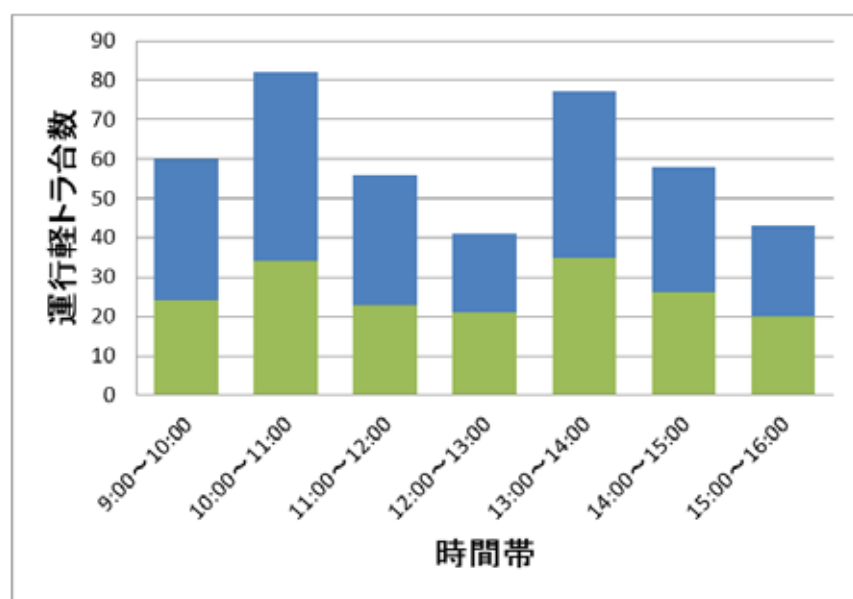


図 3.3-2 富山市（常願寺川扇状地）における時間帯別走行台数

### 3.3.3 道路幅員に対する軽トラック走行台数の分布

道路幅員と軽トラックの交通量との関連を調査した結果を図3.3-3および図3.3-4に示す。道路の幅員は路側帯の白線の外側から外側までを巻尺で計測した求めたものである。ここで道路幅員と交通量との相関係数は、それぞれ入善町で0.474、富山市で0.823であり、どちらも幅員と交通量とは正の相関があることが示唆された。この事から、農繁期などの軽トラック移動が集中する時期においては、道路の幅員が軽トラック分布を求めるための一つのパラメータとなり得ることが示唆された。

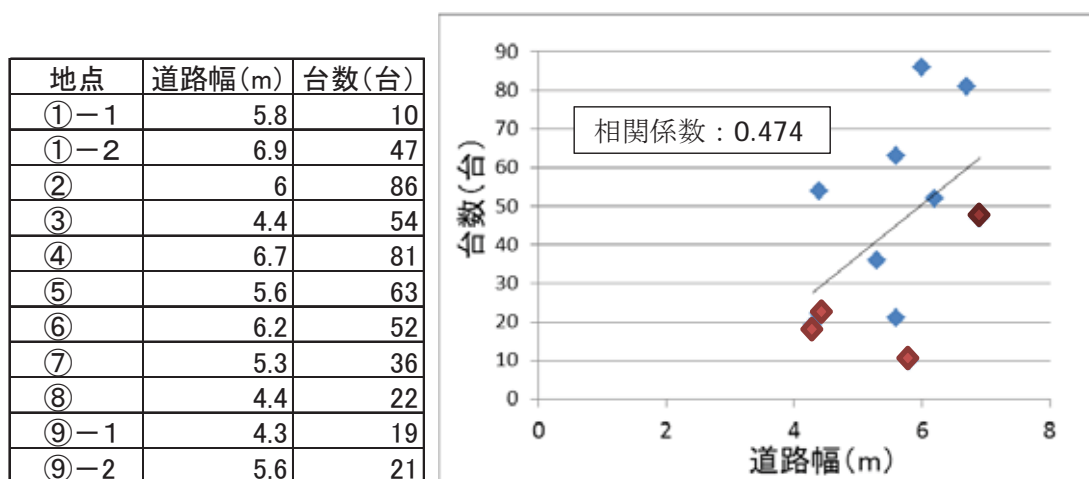


図 3.3-3 道路幅と交通量の関係（入善町）（◆は半日分の計測値による）

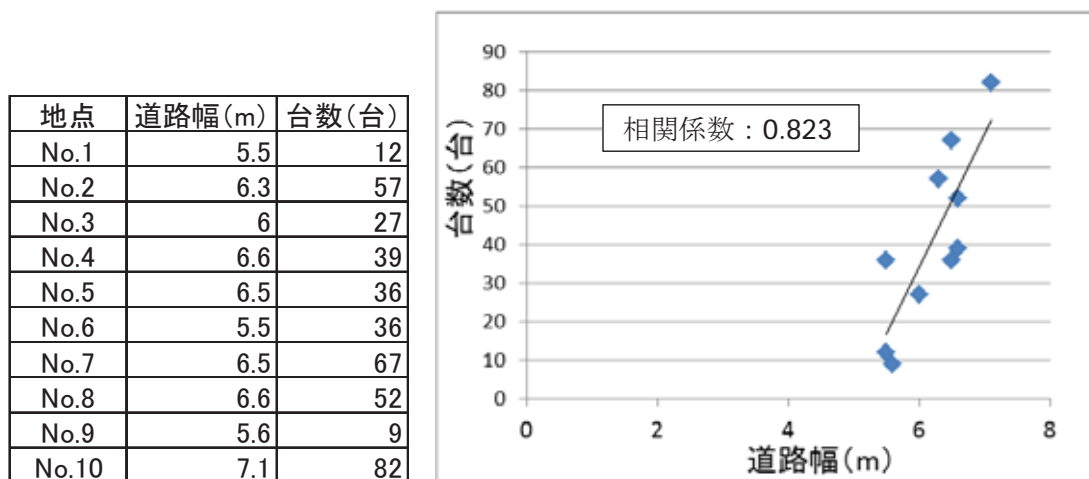


図 3.3-4 道路幅と交通量の関係（富山市）

### 3.3.4 軽トラック走行台数の空間的分布

扇状地などの農村空間内にバッテリーステーションを配置するにあたり、ある時間に軽トラックがどのように分布しているかを明らかにすることは参考になる。そこで今回の交通量調査に基づいた1日の軽トラック分布を地図上にプロットした（図3.3-3 図3.3-4）。

これによると空間的に明らかに分布が優位になる箇所は見られなかったが、分布は一様では無く一定の偏在性を示すことが解る。その分布は前節で示したように道路幅員にも影響されていることが示唆されているが、空間的な分布特長を明らかにするには更なるデータが必要と考えられる。



図 3.3-5 扇状地における 1 日間の軽トラック分布状況（入善町）

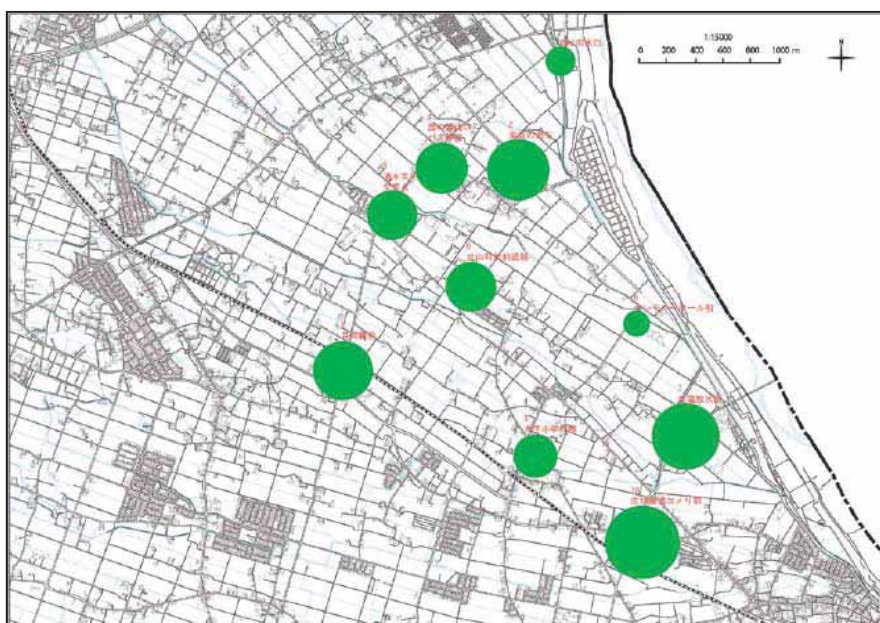


図 3.3-6 扇状地における 1 日間の軽トラック分布状況（富山市）



### 3.4 まとめ

本調査により次の事が明らかとなった。

- ・ 農繁期における農村地帯での軽トラック利用の時間的・空間的分布はある程度不均一である。
- ・ 時間的にみると、正午の時間帯の分布が最も小さく 1 時間あたり 40 台程度の走行が見られた。
- ・ 午前・午後とも軽トラック小の交通量は増大し、多い時間帯には 1 時間あたり 60 台～100 台の軽トラックが往来している。
- ・ 軽トラックの分布は道路幅員と関連が示唆され、幅員が大きくなるほど軽トラック交通量が多くなる傾向が見られた。

本調査は秋の農繁期（9 月 14 日）に実施した。当日は本県のコシヒカリの収穫ピークにあたり、年間でもっとも軽トラックが動員される日でもある。交通量測定は午前 9 時から実施したが、入善町においては 11 地点（内 4 地点は半日づつ）でのべ 491 台、富山市においては 10 地点で延べ 412 台の軽トラックが通行して行った。実際にはさらに早朝から農作業が開始されており、さらに多くの軽トラックが移動していたとみられる。

第 2 章で報告したバッテリー基地の最適配置の検討のモデルにおいて重要となるのがトリップ密度関数である。これは農村地帯全体の中での起点  $A(x, y)$  から終点  $B(x', y')$  までのすべての運行ルート of 頻度を表すものである。今回の交通量測定においては起点と終点を特定できないためトリップ密度を推定するまでには至らなかったが、道路幅員と交通量との相関が高いことが見出されており、この点でトリップ密度関数を推定するための重要な要素として道路幅員が指摘できることが明らかとなった。

## 4. EV（電気自動車）の電力消費特性調査および電気軽トラック改造技術調査

### 4.1 研究の背景と目的

近年の最も重要な環境問題は地球温暖化であるが、その喫緊の対策は二酸化炭素の排出量の削減である低炭素化である。我が国の二酸化炭素排出量のうち、運輸部門からの排出量は約 20%で、産業部門に次ぐ量である。さらに、この運輸部門のうち、自動車全体ではその 88.1%（我が国全体の 17.1%）を排出している。1990 年度から 1996 年度までの間に、運輸部門における二酸化炭素の排出量は 21.0%増加したが、その後、1997 年度から 2001 年度にかけてほぼ横ばいに転じ、2001 年度以降はデフレ経済の中で減少傾向を示している。しかし、最近では輸送量の増加等に伴い自家用乗用車による排出量は増加する結果となっている。

運輸部門の二酸化炭素削減方法としては、自動車の効率的利用、交通流の改善、燃料の多様化、自動車単体の燃費改善が考えられている。自動車の効率的利用では、いわゆるエコドライブのことであり、そのための支援ツールなどの普及がある。交通流の改善では、自動車走行量に即した道路延長、バイパス、自動車専用道路等の整備があるが、最近では ITS 技術の利用が有効な手段の一つとなっている。ガソリンエンジンなど性能を向上させるための燃料品質の向上技術や、バイオ燃料等の普及が進められている。しかし、最も高い効果が期待されているのは、自動車単体の燃費改善であり、自動車メーカーが競って既存のガソリン自動車に加えて、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車などの開発が進められている。特に、ハイブリッド車の普及は急速に拡大している。

ここで、個々の自動車単体の二酸化炭素削減の元となる燃費に関しては、カタログ基準と言われるように統一した測定方法によっている。しかしながら、カタログ燃費は実走行燃費と大きくかけ離れていることが、特に高燃費車で顕著であることなどが問題となってきた。そこで、実際に走行している自動車の燃料消費特性を把握するために多くの研究が試みられている。しかし、その多くは燃料消費量を説明する上で回帰式などの経験的モデルが使用されており、必ずしも論理的根拠が十分ではない。一方、エンジンの熱機関モデルと車両の運動力学的モデルに基づいて実証分析結果を比較した、論理的整合性に優れた研究が最近報告された。しかしながら、これらの研究のほとんどはガソリン自動車のみを対象としたものであり、今後発展が期待される電気自動車などの特性解析に活かせるものではない。また、道路勾配により燃費が影響を受けることは知られているが、このことについて詳細に解析した報告はほとんどない。

また、これまでの研究では自動車単体の情報については詳細に解析されているが、その自動車が走行する道路の状況まで同時に取得して検討されていない。最近の IT 技術の進歩により、自動車の走行特性とその走行道路の状況を一括してデータ処理することが容易にできるようになった。このことは、大手自動車メーカーでは既に高級車に取り付けているテレマティクス機能により可能となっている。しかし本研究では、高級車以外の種々の自動車の計測も可能とするように、多機能携帯電話を利用して、自動車の燃

料消費特性と走行道路の状況を計測し、かつそれらのデータを一括してサーバーに無線送信するシステムを開発した。このような、実測データに基づいて、道路の勾配のアップダウンでの燃料消費の特性についてエネルギー収支式に基づいて解析を試みた。また、その結果に基づいて社会技術的観点から種々考察した。

## 4.2 開発内容

実走行中の自動車の理論的な瞬時燃費  $f$ [L/s]は次のように表現される。

$$f = f_{(idle)} + K \sin \theta MgV + K \mu MgV + K \kappa V^3 + K(M + m) \alpha V \quad (1)$$

ただし、 $K = 1 / \varepsilon \eta H$  であり、エンジンの性能に関する値で、個々のエンジンによって異なるが、基本的にそのエンジンに固有な値を示すと考えられる。なお、ここで、 $f_{(idle)}$  : アイドリング燃費、 $\mu$  : 転がり摩擦係数、 $\theta$  : 路面勾配、 $M$  : 搭乗者等を含む車両質量[kg]、 $g$  : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $\varepsilon$  : 正味熱効率、 $\eta$  : 熱伝達効率、 $H$  : ガソリンの熱当量[J/ L]、 $V$  : 車速[m/s]、 $\kappa$  : 空気抵抗に相当する抵抗係数[kg/ m]、 $m$  : 加速時回転部分相当質量[kg]、 $\alpha$  : 車両加速度[m/s<sup>2</sup>]である。したがって、第 1 項はアイドリング時の燃費であり、自動車が停止していても高速で走行していても一定の値を示すと考えられている。第 2 項は道路の勾配による抵抗を示す。第 3 項は、路面の転がり抵抗を示す。第 4 項は、車体が空気中を移動する際に受ける空気抵抗に相当し、最後の第 5 項は車両が加速しているときに生ずる抵抗を意味している。

(1) 式に示される、 $f$  は瞬時燃費と呼ばれ、単位時間あたりにエンジンに供給されるガソリン量である。これを一般的に燃費と呼ぶ、単位走行距離あたりのガソリン供給量  $E$ [L/km]に換算するには、両辺を速度  $V$ [km/h]で割ることによって得られる。すなわち、

$$E = f_{(idle)} / V + K \sin \theta Mg + K \mu Mg + K \kappa V^2 + K(M + m) \alpha \quad (2)$$

この関係式をエネルギー保存則から説明してみよう。第 2 項は、位置エネルギーを意味し、上り勾配では上昇し、下り勾配では減少する。第 5 項は、自動車が加速することによって得られる速度エネルギーで、減速することにより速度エネルギーが他に変換されることになる。第 3 項および第 4 項は路面や空気面と接することによって失われるエネルギー量である。第 1 項は、エンジンが回転している限り供給される無駄なガソリン量である。ここで、勾配のない直線道路を一定速度で走行させることにすると、第 2 項及び第 5 項は、それぞれ 0 となる。この場合の  $E$  は、第 1 項、第 3 項、第 4 項に相当するエネルギーであり、そのエネルギーを得るためにガソリンをエンジンに供給することになる。

一方、一定速度で自動車を走行させた場合には、 $\alpha = 0$  となり、しかも

$$f_{(idle)}/V + K_{\mu} Mg + K_{\kappa} V^2 = \text{const.} \quad (3)$$

なる関係となることから、(2)式は次のように簡略に表される。

$$E = A \sin \theta + B \quad (4)$$

すなわち、エネルギー消費量は道路勾配の一次関数として表されることになる。ここで、A及びBは、等速度走行する場合に一定値を示す定数である。

以上は、ガソリンエンジンに基づくものであるが、ガソリンエンジンを電気モーターに置き換えることにより、電気自動車にも適応が可能と思われる。もちろん、自動車走行の詳細な解析は、駆動部分の性能、車体の形状やドライバーの運転特性などを十分に考慮する必要があるが、本研究では、上式の関係から解析を試みた。

#### <計測方法>

自動車を運転するドライバーが自ら、自車がどのような走行ルートでどのような走行特性をとるのかを実際に走行させることによって理解するツールを作成することを目的として、走行中の実車から、走行ルートの地理的条件や燃料消費を同時に計測するシステムを作成した。使用した機器は、GPS機能付きの多機能携帯電話（SAMUSUNG製 GALAXY Tab）であり、GPS機能によりその位置情報ばかりではなく、標高データや車速等を計測する。電気自動車の電力消費量は、バッテリーからモーターに繋がるケーブルにおける電流を計測することによって計測した。使用した電力測定装置は日置製の電気自動車用電力計 AC/DC パワーハイテスタ 3334-10型である。また電流センサとして日置製ユニバーサルクランプオン CT（AC/DC200A）型を使用した。この電力計のデータを Bluetooth 無線により多機能携帯電話に送信し、GPS機能によるデータとともに富山高等専門学校（Toyama National College of Technology）のサーバーに3G（電気通信事業者：NTT ドコモ）を使って送信した。また、本測定で使用した電気自動車の最高速度は19 km/hで制限されていることから、手動で維持した最高速度付近での電力消費量のデータを解析に用いた。

また、計測に使用した電気自動車は、(株)シンクトゥギャザーおよび川端鐵工株式会社製の EMU である。EMU の詳細な仕様は次の通りである。

## EMU の主要諸元

---

乗車定員： 10 名

外観寸法： 全高 2,425 mm, 最低地上高 135 mm,  
全長 4,405 mm, 全幅 1,850 mm

空車時重量： 1,080 kg

車輻総重量 (10 人乗車時)： 1,630 kg

最高速度： 19km/h

一充電走行距離： 40 km (19km/h 定地)

最小回転半径： 5.6 m

モーター： DC ブラシレスインホイールモーター,  
最大出力 20 kW (2.5kW×8)

最大トルク： 52 Nm (6.5Nm×8)

駆動方式： 全 8 輪駆動

バッテリー： リチウムポリマー電池, 電圧 52 V, 容量 100 Ah

---



図 4.2-1 走行テスト出発地点での EMU



図 4.2-2 計測用の多機能携帯端末と電力計



図 4.2-3 モーターとバッテリー間のケーブルからの電力測定

### 4.3 結果および考察

電気自動車 EMU を一定速度で走行させた時の走行ルート of 勾配と燃料消費量との関係について実測した結果を図 4.3-1 に示す。なお、勾配は GPS で計測した標高データから算出した。

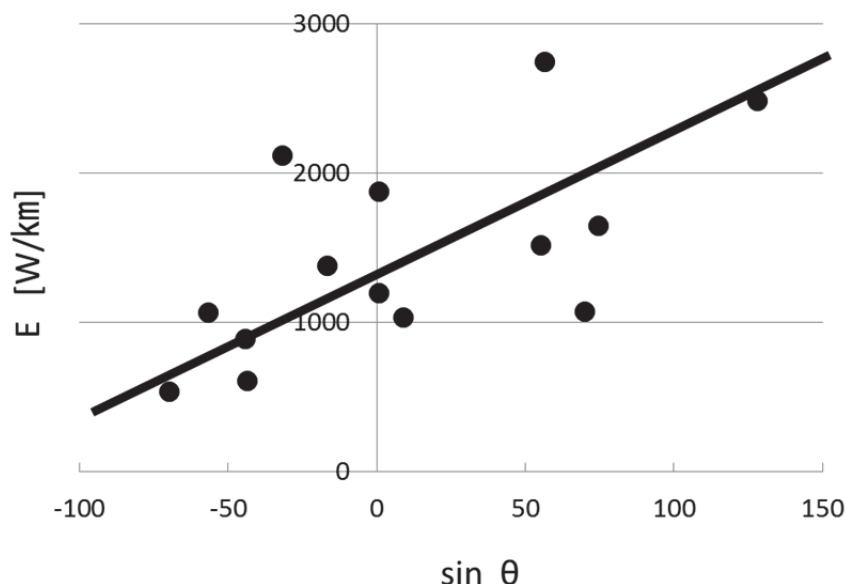


図 4.3-1 道路勾配と電費の関係

図 4.3-1 から、電気自動車でも等速度で走行する場合の電力消費量は道路勾配に対して (4) 式で示される一次関数で示されることが分かった。なお、測定ではほぼ 19 km/h の速度のみで行われたが、他の速度でも傾き  $A$  は車体重量に相当する値であるので、ほぼ一定の値を示すものと考えられる。また、切片に相当する  $B$  の値は自動車走行時の空気抵抗やころがり抵抗を意味しており、走行速度によって影響を受けることが想定できる。

個々の自動車において、 $A$  及び  $B$  の値は実測する必要があるが、本研究で使ったように多機能携帯電話等の機能を用いることによって簡便に測定が可能である。これらのデータを地域で一元管理するシステムを用いることにより、地域全体の交通システムにおける低炭素化の対策に資するデータとすることが期待できる。実際に、全市民が参加するシステム構築は容易ではないと考えられるが、農業従事者が使用する農業用軽トラックを対象にする場合には実用化が期待できる。

なお、現在の GPS システムは誤差がそれほど小さいわけではない。本研究で得られたデータも比較的大きな誤差を含んでいる。しかしながら、この問題に関しては、現在進められている準天頂衛星システムの整備により極めて精度の高い測定が可能となることが期待できる。

#### 4.4 まとめ

本研究では、電気自動車を実際に一定速度で走行させ、道路勾配と電費について種々測定した。その結果、一定速度で上り下り勾配を走行する電気自動車のエネルギー消費に関しては次の簡単な式で表示できることが分かった。

$$E = A \sin \theta + B$$

この関係は、穏やかな勾配の道路では、上り勾配で使用したエネルギーは下り勾配で回収されることを意味し、ある起点からどのような経路を辿ろうとも元の起点に戻ることを考えた場合には、平坦路を走行する場合と等しいことを示唆している。さらに、電気自動車の場合には、下り勾配では走行エネルギーをバッテリーに回収できる回生システムが機能することにより、より高い電費が期待できる。

一方で、個々の車体の電費向上ばかりではなく、地域全体としての低炭素化を図るためには、車体の走行特性に応じて、道路の勾配などの地理的条件を改善することが必要であることが示唆された。

#### 引用文献

- [1]Chohji, T., Takamatsu, S., Ikeda, S., Koizumi, A., Uesaka, S. and Uesaka, H. (2014) Use of Small Electric Agricultural Trucks in the Kurobe River Alluvial Fan, J. Ecotech. Res., (投稿中)
- [2]Chohji, T., Takamatsu, S., Ikeda, S., Koizumi, A., Uesaka, S., Uesaka, H., and Nabil, M. H. (2014) Study of Low Carbon Transport System, J. Ecotech. Res., (投稿中)
- [3]島野安雄・辻村真貴・嶋田純・榎根勇・堀内清司 (1992) 黒部川扇状地における地下水の水文学的研究. 文星紀要, 第4巻, A17-A52.
- [4]平田大道・中易佑平・張勁・手計太一・上田晃 (2012) 熱利用のための黒部川扇状地地下水系の流動解析-基礎的研究. 日本地熱学会, A41.



## 5. 地下水動態と水質の連続調査および地中熱 HP 適所の抽出と検討

### 5.1 研究の背景と目的

#### 5.1.1 研究の背景

富山県内、特に黒部扇状地周辺は、地下水が豊富なことで知られている。これは、立山連峰から海岸までの距離が短く、河川の傾斜が急であるため、山岳地域の降雪・降雨が短期間の間に多量の地下水となって、扇状地を流れるためである（図 5.1-1）。このことから、この地域の地下水は、岩石とあまり反応していないため、ミネラル成分が少ない軟水となっている。

県内では、豊富な地下水を様々な用途に利用している（図 5.1-2）。平成 16 年度では、県全体で 1 億 3,200 万トンの水が汲み上げられている。用途別にみると、県全体では、道路用消雪として、年間約 3,000 万トンが汲み上げられている。図 5.1-2 は、県の観測井の年間の水位変化を示したもので、冬場の消雪用に地下水が汲み上げられることにより、水位が 5m 以上低下している（図 5.1-3）。このような地下水の水位の低下は、地盤沈下を発生させる原因の 1 つとなっている県内では、過去 16 年間で最大 86mm も沈下した場所もある（図 5.1-4）。また、地下水の汲み上げによる、地下水の塩水化（海水が混入）も発生しており、平成 16 年度の調査時には、河口から上流の内陸部まで 100mg/L 以上の塩濃度の地下水が観測されていた（図 5.1-5）。

現在、富山県民は、冬の季節は空調暖房以外に灯油を燃焼させて室内暖房をしている。その暖房用灯油代は、約 5 万円/年（灯油代が 1,600 円の時）以上である。灯油を燃焼させると、2.489 kg-CO<sub>2</sub>/L の CO<sub>2</sub> が排出される（「特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令」（経済産業省・環境省）に基づく）。1 家庭での CO<sub>2</sub> 排出量は、年間約 500L の灯油を消費することから、約 1,250kg-CO<sub>2</sub> に相当し、富山県全体では、（38.6 万世帯）約 45 万トン/年の CO<sub>2</sub> 量に相当する。即ち、灯油を用いない室内暖房、給湯設備が充実すれば、大きな CO<sub>2</sub> 削減効果も期待される。

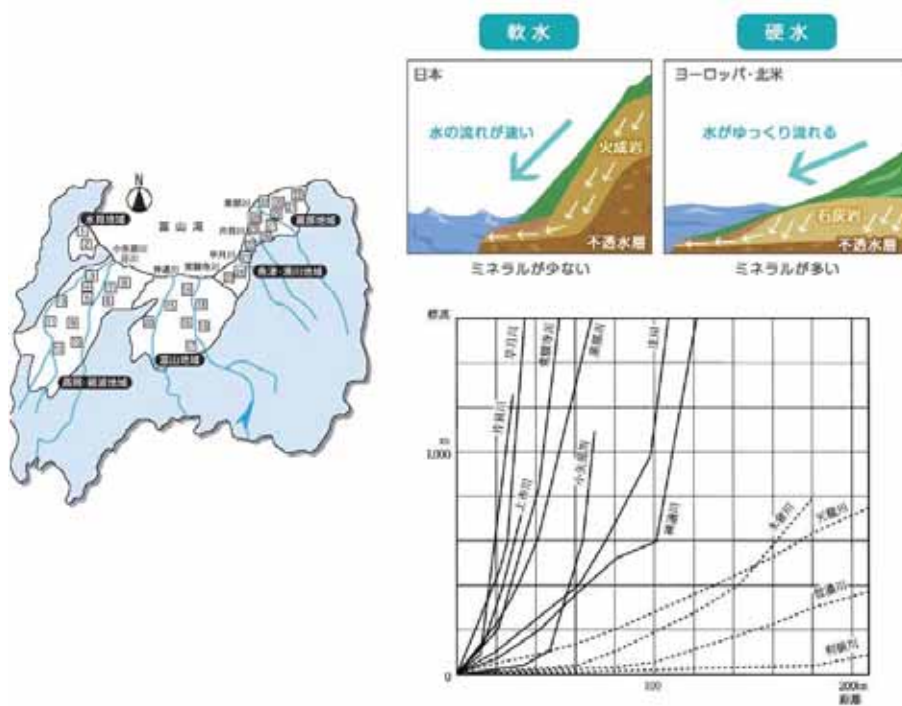


図 5.1-1 富山県内の河川の傾斜 (県資料)

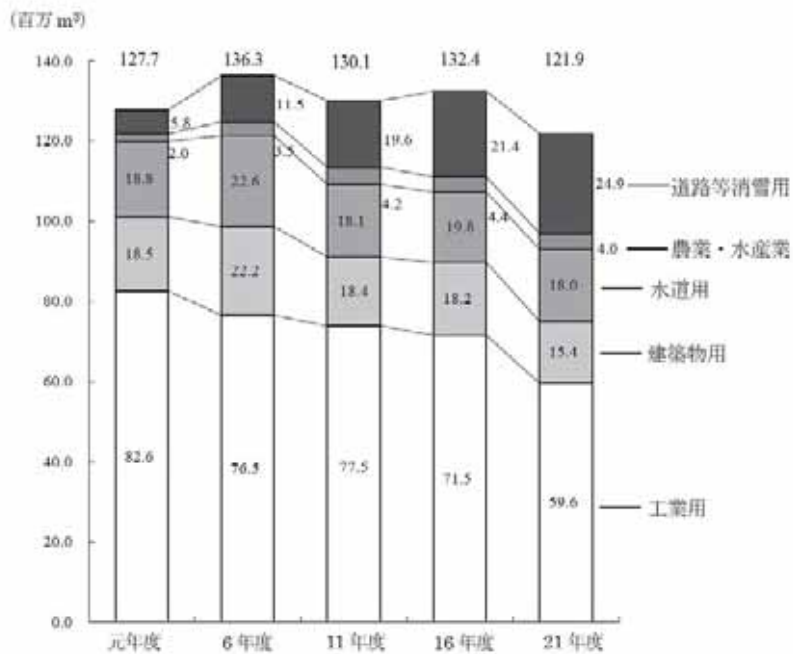


図 5.1-2 用途別地下水採取量の経年変化 (地下水条例指定地域) (県資料より)

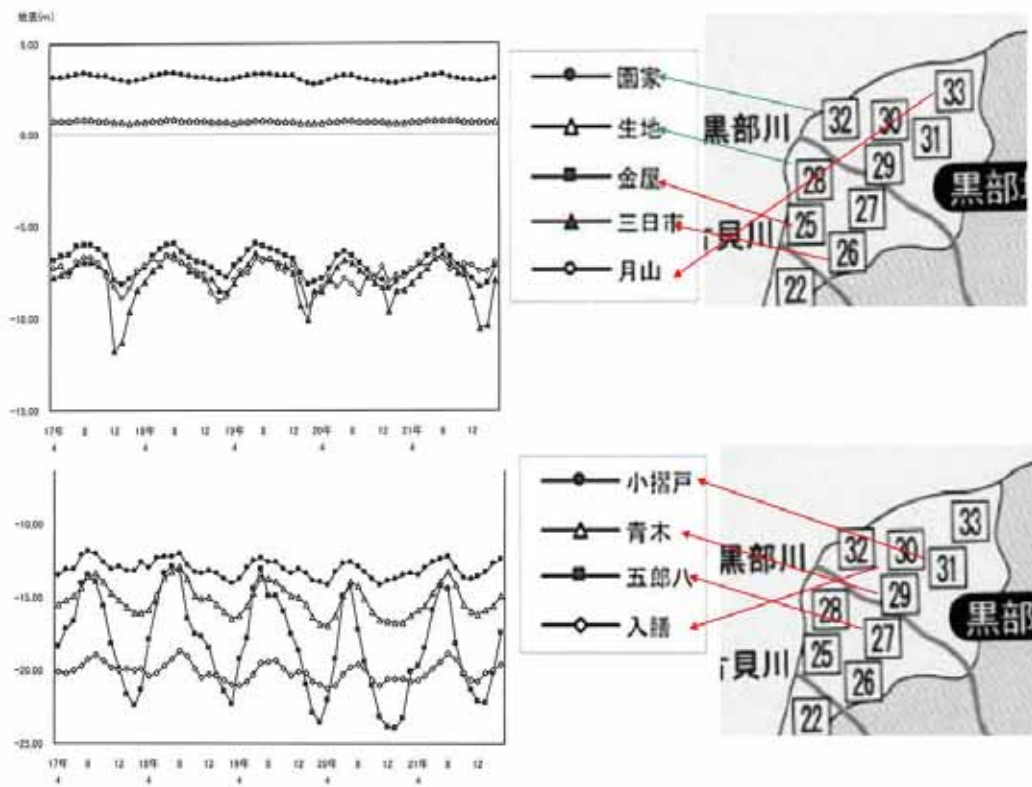


図 5.1-3 地下水位の変化（平成 21 年度地下水の現況：富山県より）

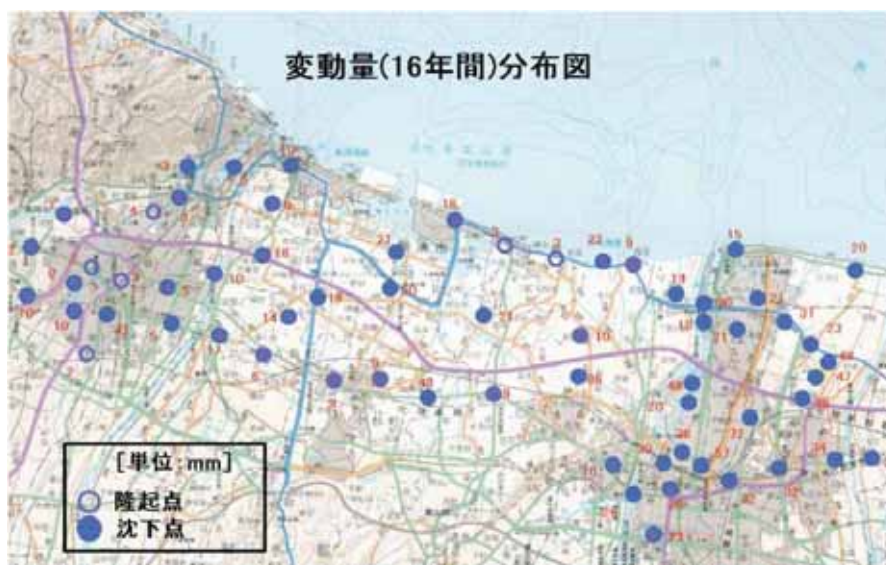


図 5.1-4 過去 16 年間の地盤沈下量（県資料より）

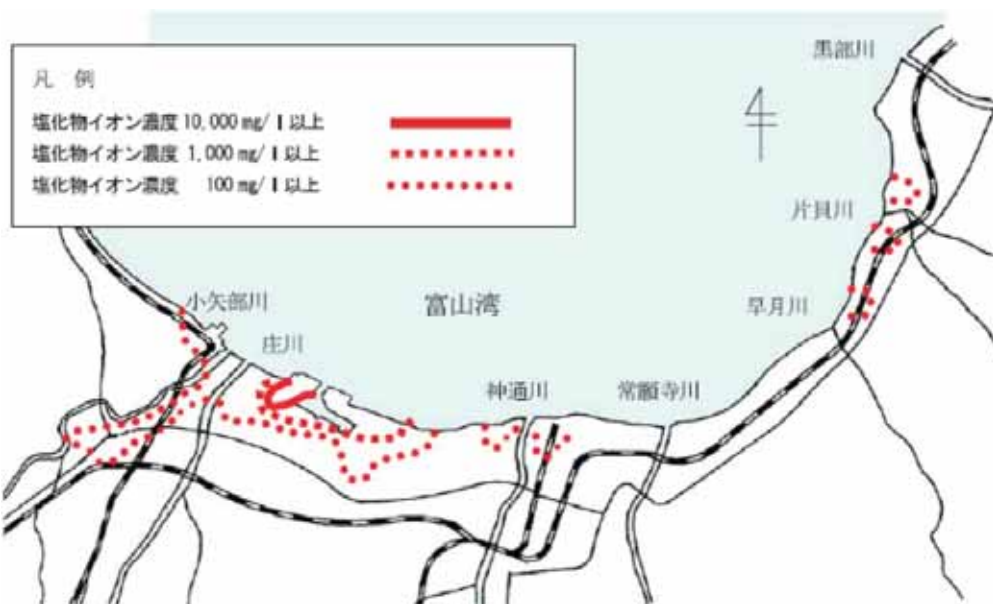


図 5.1-5 地下水中の塩化物イオン濃度（平成 16 年）（県資料より）

図 5.1-6 は、富山県の年間の気温変化を示している。県内では、夏は 35℃に、冬は 0℃となる。一方、地下水の水温は年間を通じて、15℃に維持されている。この気温と地下水との温度差を利用して、工場や家庭での夏は冷暖に、冬は暖房に使うことが可能となる。また、道路用消雪としては、現在行われている地下水の散水による消雪ではなくて、地下水と熱交換した熱媒体を道路に埋設したパイプ内を循環させることにより、消雪を行うことが可能となる。

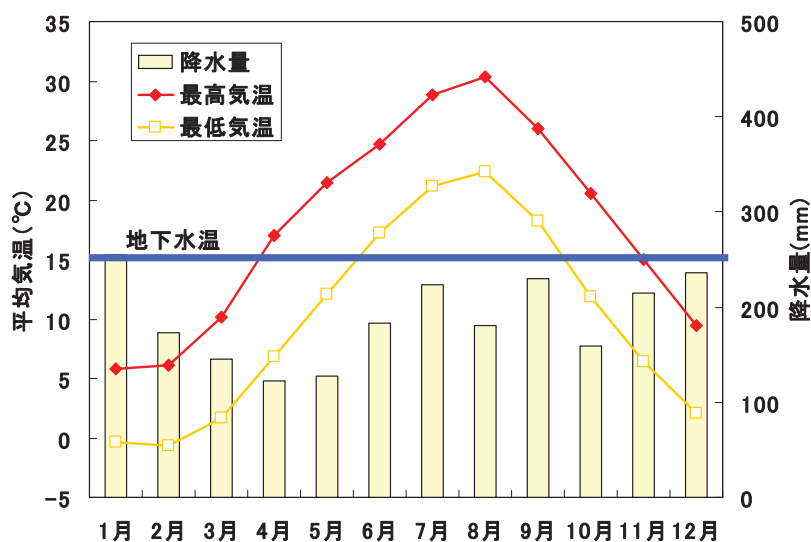


図 5.1-6 富山県の最高気温と最低気温の変化と降水量（県資料データをもとに作図）

### 5.1.2 研究の目的

本研究の最終目標は、地下水が持つ熱エネルギーを利用し、夏季は冷房を、冬季は暖房を行うと共に、無散水消雪や農業用温室への適用を検討するものである。Geo-HPを利用するには、安定した地下水の供給と良質の水質が維持されることが必要である。水質が悪い、すなわち多くの溶存成分を含んでいると、スケールと呼ばれる沈殿物が熱交換器や配管に付着沈殿し、熱効率を低下させる原因となる。このための地下水の水質や流動状況を正確に把握することを目的としている。

対象とする地域は、富山県東部の黒部扇状地の地下水である。黒部川扇状地は、標高128mの愛本堰堤を扇頂とする面積約107km<sup>2</sup>の扇状地であり、黒部市、入善町、朝日町が含まれ、立山連峰を流れてきた黒部川は、直接日本海に没している。扇角は約60度、黒部川を基準にすると扇端までの距離は約13kmである。黒部川扇状地はきれいな扇形を形成していて、等高線も一定間隔でほぼ円形に描けるのが特徴である。これは黒部川が扇状地上で流路を左右に変遷しながらほぼ均等に上流から砂礫類を堆積した結果による（島野ほか,1992）。湧水群のある黒部市生地地区は、500～600戸ほどの家庭が現在も自前の井戸を利用できるほど水量が豊かで、18か所の清水（しょうず＝自噴井）がある。

富山県北東部に位置する黒部川扇状地は、多雨多雪地域であると共に、地形は礫質や砂質で構成されているため、環境特性から豊富な地下水を有する。その豊富な地下水の熱エネルギーを消雪や室内冷暖房を利用する地中熱ヒートポンプの検討を行うものである。黒部川扇状地地下水系は、古くから盛んに研究が行われているが、熱利用のための地下水系の流動解析は行われていない。そのため本研究では、化学的・物理的な視点から熱利用のための地下水系を解明することを目的に研究を行った。

## 5.2 調査内容

試料採取は、平成25年8月29日と9月20日に、黒部川扇状地内の45箇所の地下水と3箇所の河川水を採取した（図5.2-1）。なお、これらの採取地点は、昨年度に実施した地下水採取地点の67か所から選定した。これは、経年変化を同じ井戸で検討するためである。

現地では、緯度、経度、水温、pH、電気伝導度(EC)、酸化還元電位(ORP)を測定し、研究室で主要化学成分と水素・酸素同位体組成を分析した。その分析法は次の通りである。

Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> 、Ca <sup>2+</sup> 、Cl <sup>-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	イオンクロマトグラフ (Metrohm)
	(測定誤差 ±0.1 ~ 0.2 mg/L)
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH 4.8 アルカリ度滴定
SiO <sub>2</sub>	分光光度法 (UVmini1240-SHIMADZU)
δ <sup>18</sup> O	質量分析計(PRISM) (測定誤差 δ <sup>18</sup> O ±0.1‰)

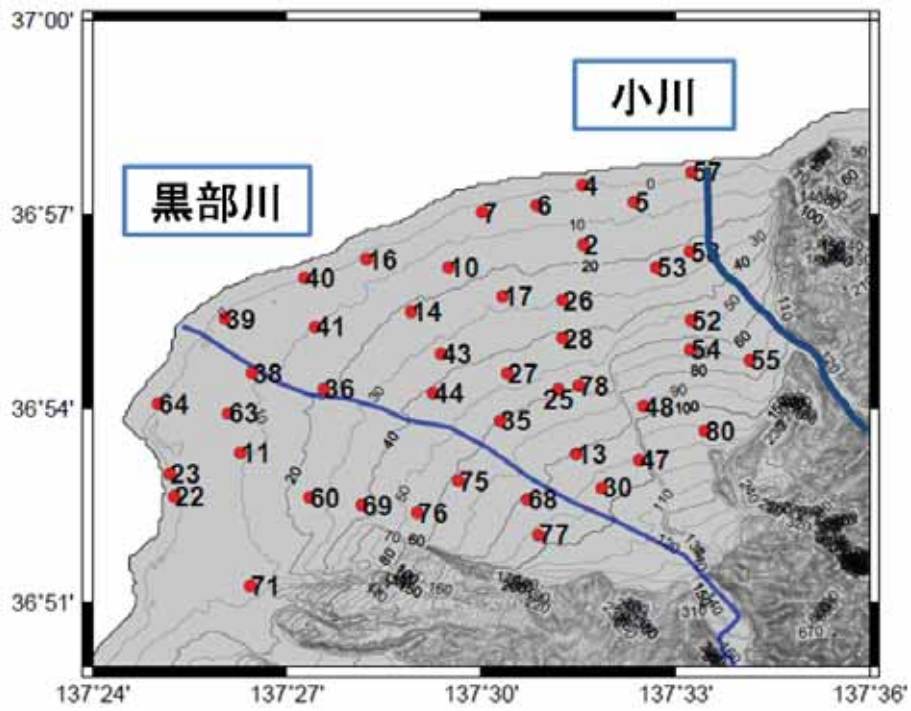


図 5.2-1 地下水・河川水採取場所



図 5.2-2 地下水採水



図 5.2-3 地下水採水 2

### 5.3 分析結果と考察

#### 5.3.1 広域的な水質の特徴

本調査で得られた黒部川扇状地の地下水と河川水の主要化学成分と酸素同位体組成の分析結果のうち、主なものは次にまとめられるが、昨年度とほぼ同じ結果が得られた(図 5.3-1~図 5.3-9)。

- 水温は、12~20℃の範囲を示した。このうち、黒部川河口付近では水温は低く 12℃程度であるが、扇央付近は、20℃と高いことが判明した(図 5.3-1)。
- EC は、黒部川の扇央から扇端付近は低く、河川に離れるにつれ高くなる(図 5.3-2)。黒部川付近の扇央から扇端にかけ地下水に影響を与えている結果である。
- $\text{Ca}^{2+}$ 濃度(図 5.3-6)と炭酸濃度( $\text{HCO}_3^-$ )(図 5.3-7)の分布状況は、概ね一致しており、これらは、図 5.3-2 の EC 分布を反映している。このことは、EC が高くなっている地域(入善町市街地付近から扇頂地域)では、 $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{HCO}_3^-$ 濃度が高いことが起因していると判断される。
- 酸素同位体組成から、黒部川扇状地の地下水は、黒部川河川水と雨水が混合したものであると判断される。この結果から、 $\delta^{18}\text{O}$  値が低いものほど、黒部川からの浸透量が多いことを示す。

地中熱ヒートポンプを利用する際として、

- 黒部川扇状地の地下水の起源として、黒部川及び小川近傍は、河川水の浸透が多いが、扇央では雨水起源の水が直接地下へ浸透している割合が多いことを示す。これらの結果は、過去の研究結果と調和的である。
- 黒部川近傍の地域は、開放型 Geo-HP を使うには水質が適している。河川の影響が少ない地域(EC 値が高い地域)でも、炭酸カルシウムスケール( $\text{CaCO}_3$ )については、すべての地下水で不飽和であったことから、熱交換器にスケールが発生する

危険性は少ないと判断される（図 5.3-10）。ただし、本年度は、鉄濃度を測定していないが、Fe の水酸化物が沈殿する可能性が高いため、開放型 Geo-HP を使う際には、Fe スケール防止策を講じる必要がある。

## 2013 temp(°C)

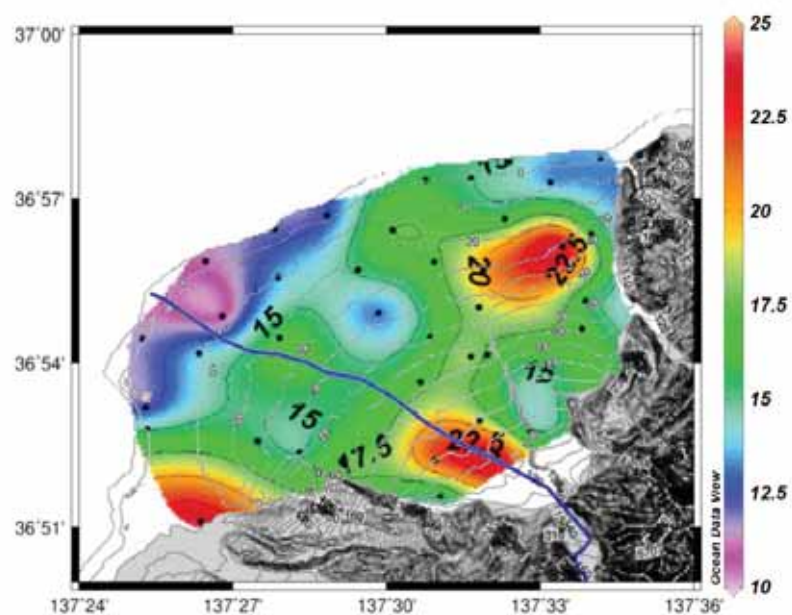


図 5.3-1 地下水の水温 (°C)



## 2013 EC(mS/m)

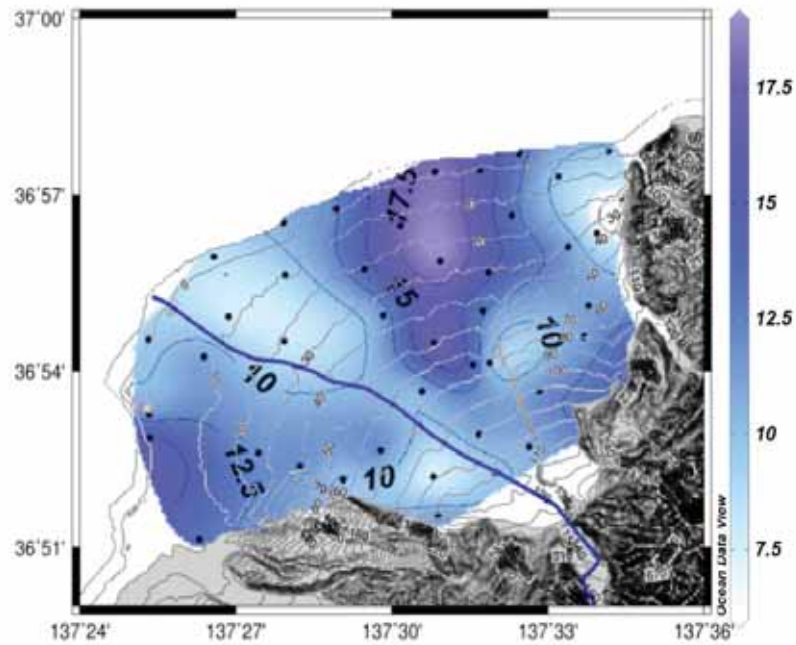


図 5.3-2 地下水の電気伝導度(EC ; mS/m)

## 2013 ORP(mV)

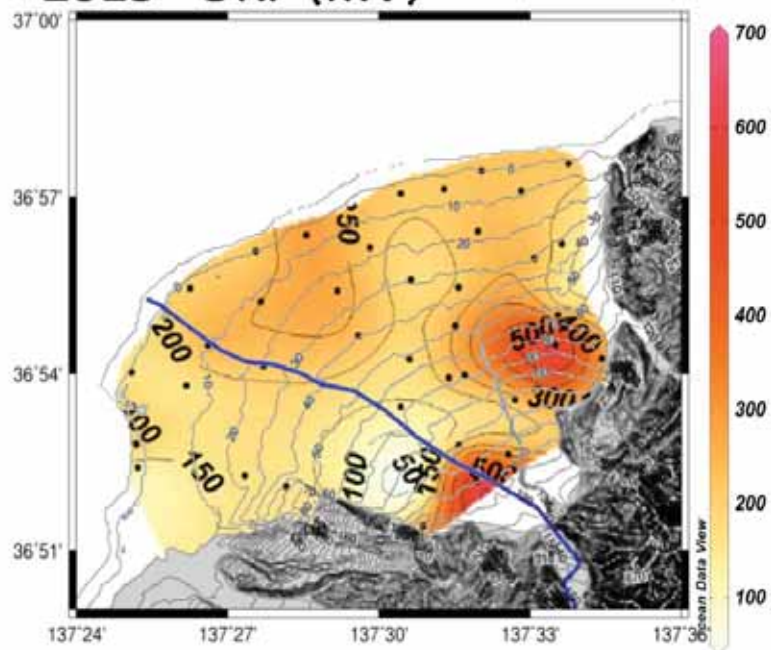


図 5.3-3 地下水の酸化還元電位(ORP ; mV)

## 2013 pH

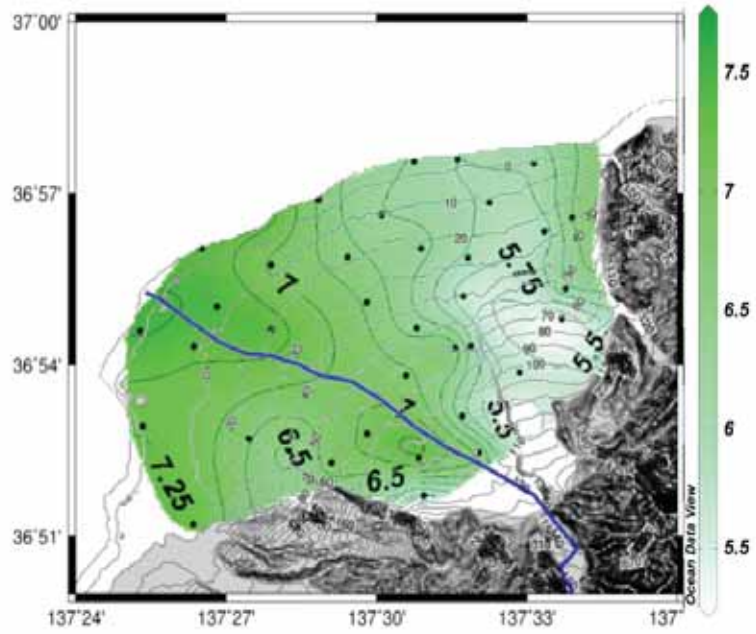


図 5.3-4 地下水の pH

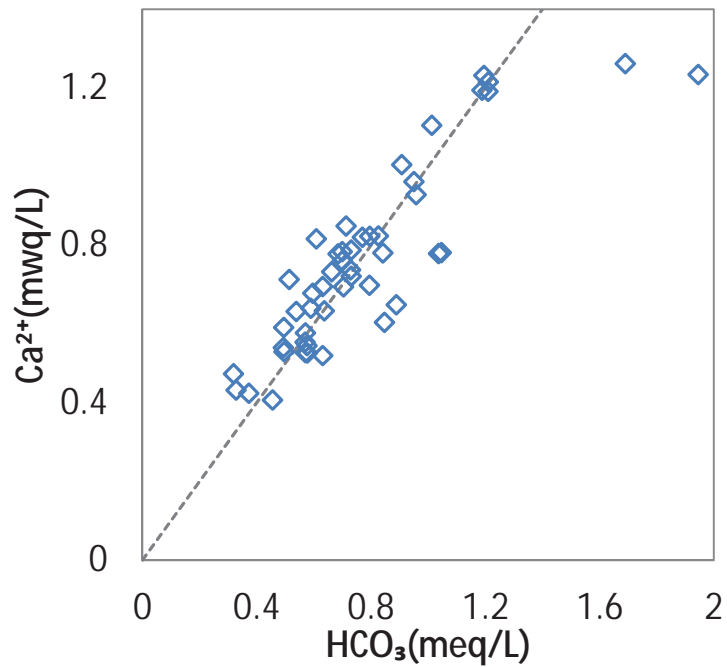


図 5.3-5 地下水中の Ca と炭酸濃度 ( $\text{HCO}_3$ ) (単位 : mg/L)

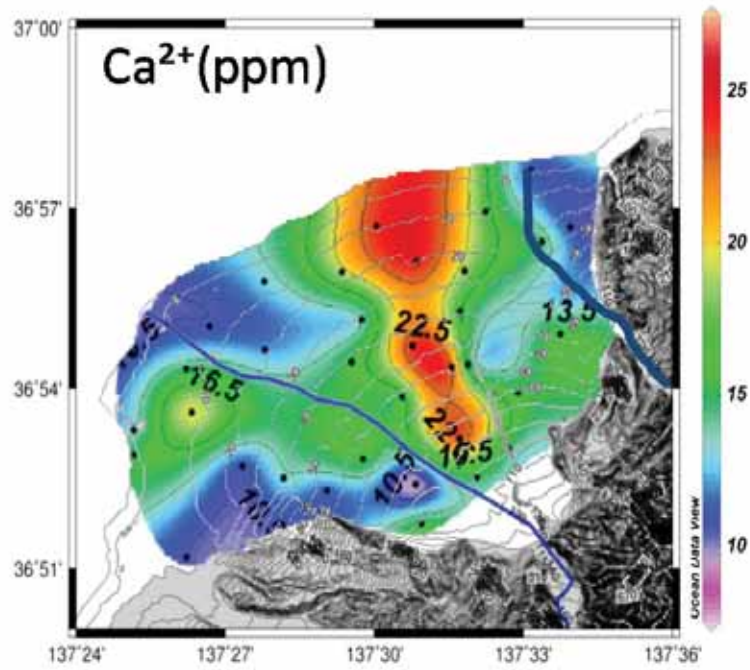


図 5.3-6 地下水中の Ca 濃度(mg/L)

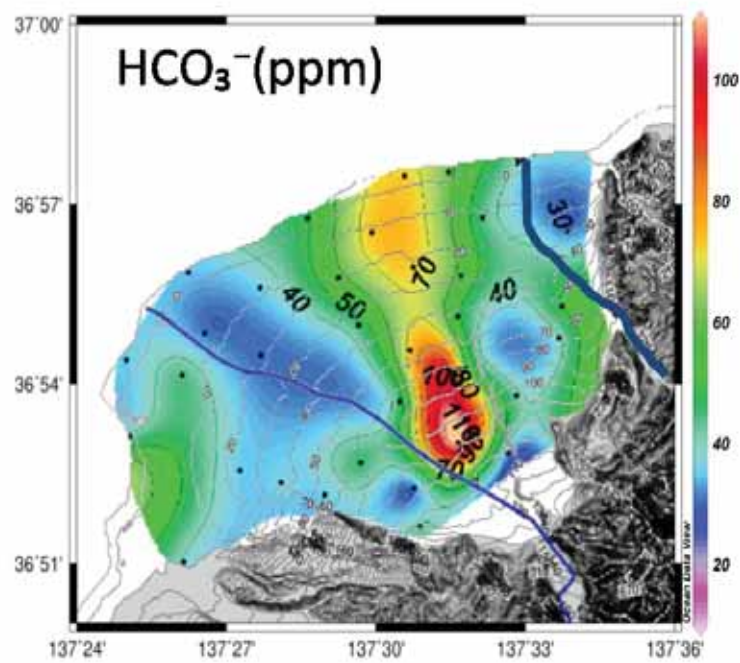


図 5.3-7 地下水中の炭酸濃度 (HCO<sub>3</sub> : mg/L)

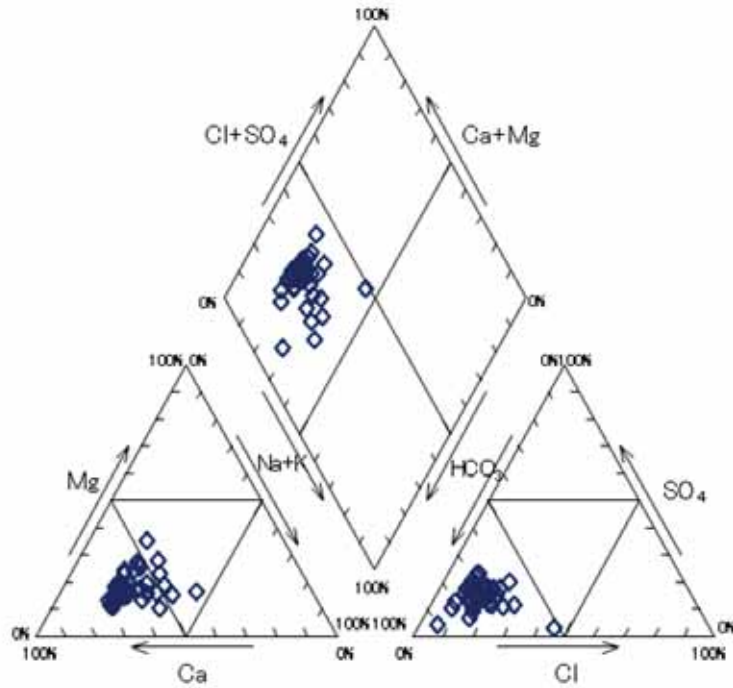


図 5.3-8 地下水の主要化学成分

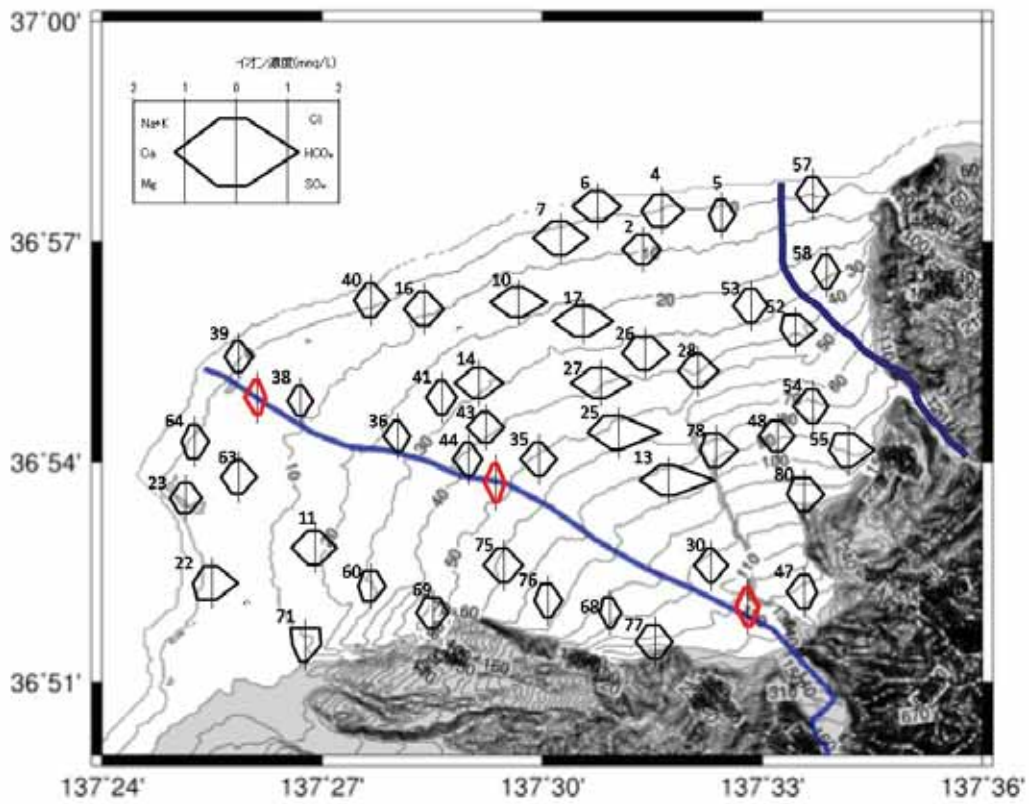


図 5.3-9 地下水の主要化学成分の分布

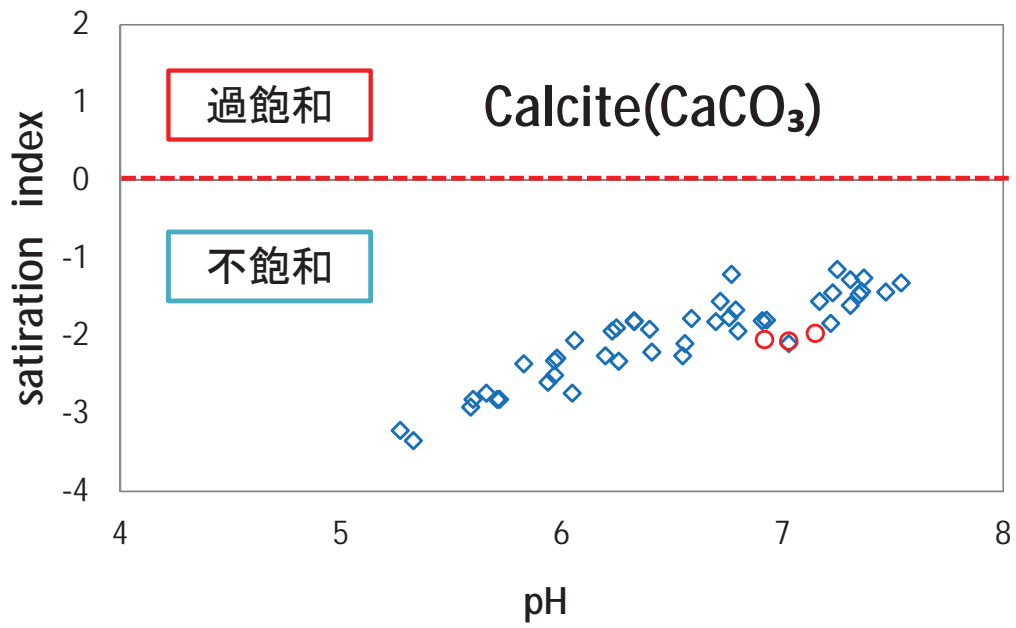


図 5.3-10 地下水の  $\text{CaCO}_3$  スケール飽和度

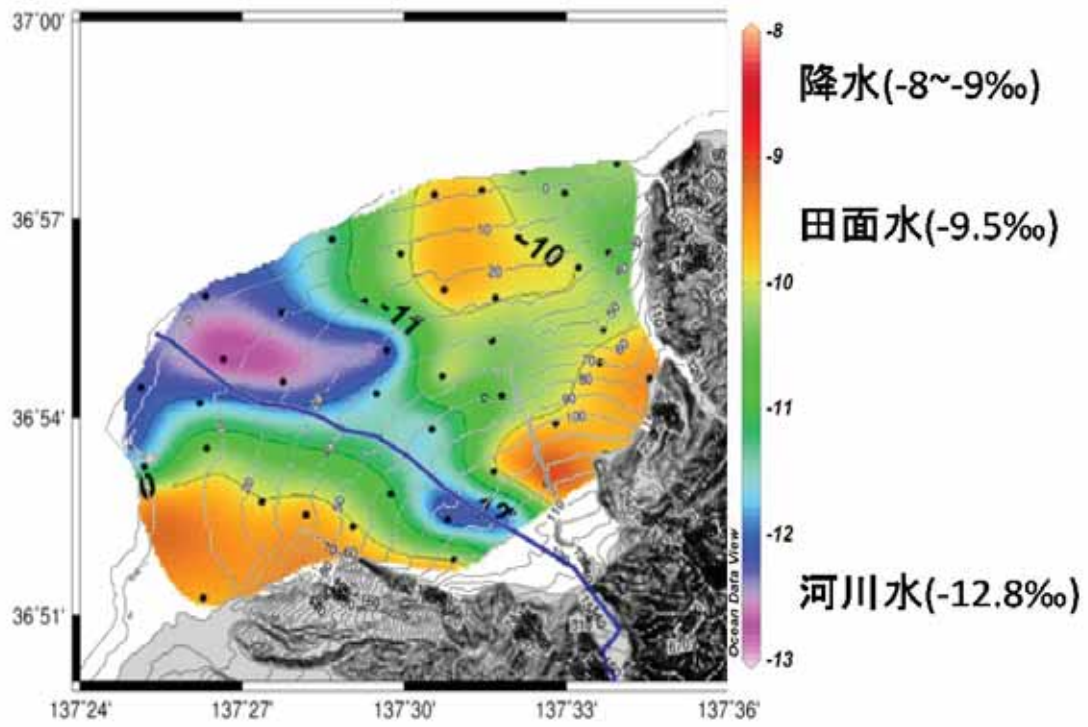


図 5.3-11 地下水の酸素同位体組成

### 5.3.2 黒部扇状地地下水の水質の経年変化

地中熱ヒートポンプを利用する際には、地下水の水質と流動状況の把握が必須である。特に、数10年間の運転期間中に水理や水質が変化する際には、水位変動やスケール成分の増加などが懸念される。そこで、本研究では、短期間ではあるが、同じ地下水井戸を2年間モニタリングして、その水質変化や流動変化を検討した。図5.3-12と図5.3-13は、地下水中の電気伝導度(EC)の分析結果を、図5.3-14と図5.3-15は、Ca濃度を示しており、2012年度と本年度のものを比較している。その結果、一部の地域に変化は見られたものの、EC値に大きな変動は観測されなかった。図5.3-12に見るようなEC分布は、過去の研究でも同様の結果が報告されていることから、少なくとも数10年間は、大きな変化はないと予想される。

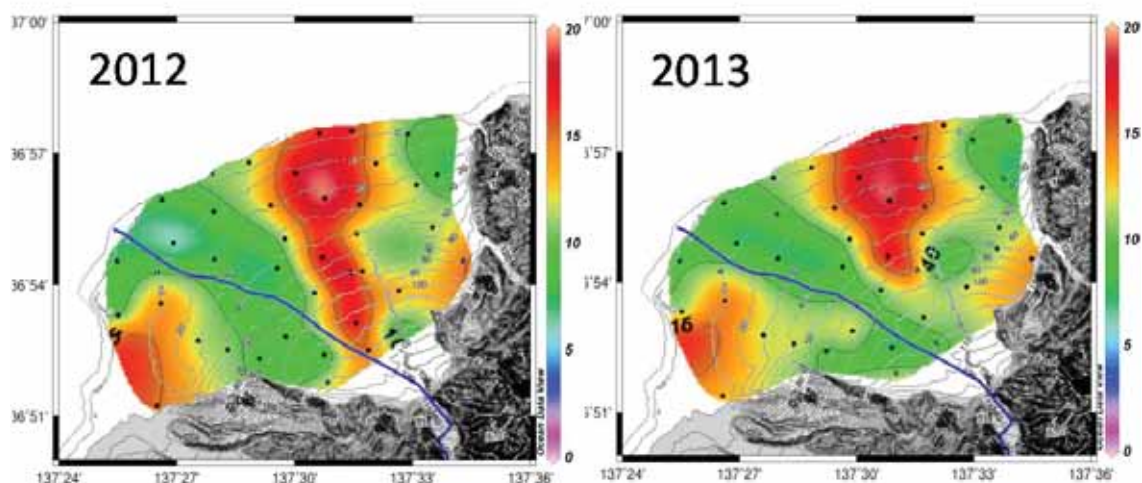


図 5.3-12 地下水中の電気伝導度の経年変化 (EC : mS/m)

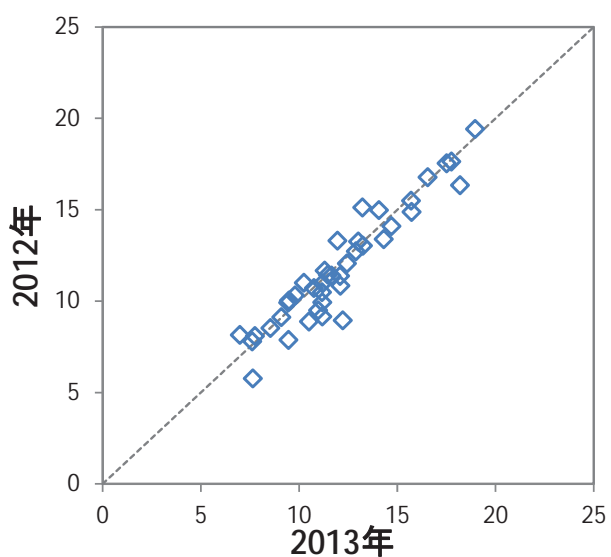


図 5.3-13 地下水中の電気伝導度 (EC : mS/m)

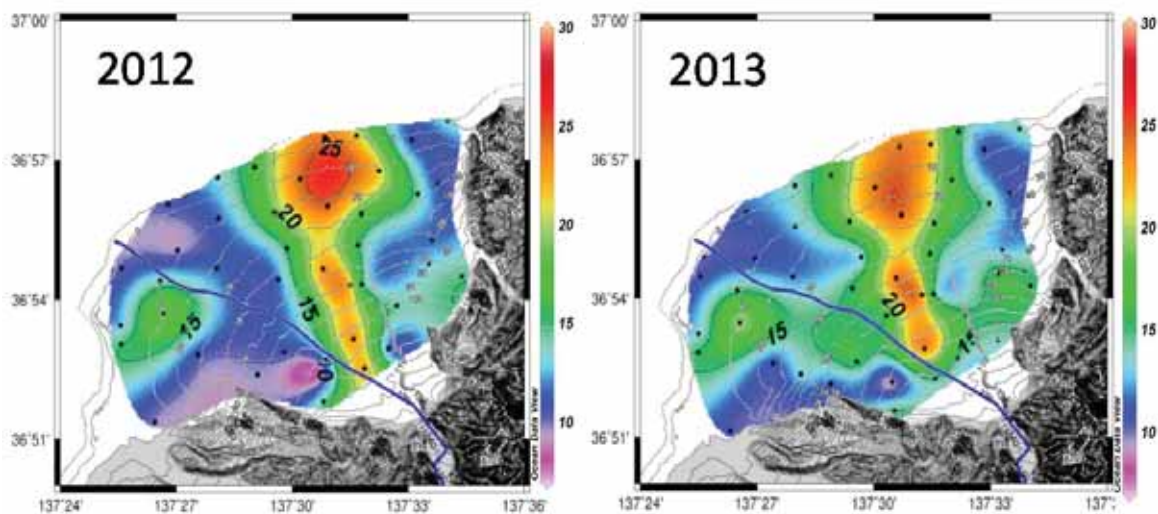


図 5.3-14 2012 年と 2013 年の地下水中の Ca 濃度の経年変化 (単位 : mg/L)

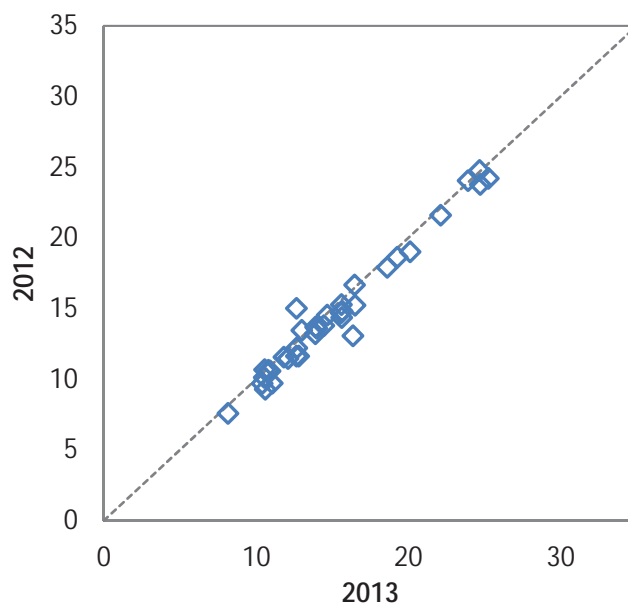


図 5.3-15 2012 年と 2013 年の地下水中の Ca 濃度 (単位 : mg/L)

### 5.3.3 水質の連続モニタリング

本研究では、黒部川扇状地の地下水の水質を 2 年間調査しているが、長期的な変化を把握するには連続的な水質のモニタリングが必要となる。そこで、扇状地内の地下水井に水質センサーを設置した。用いた水質センサーは、大起理化工業㈱の CTD ダイバー水位計 (水位+水温+導電率 ; DIK-603C-C1) であり、地下水の水位、水温、EC 値を連続観測できる。

今回、CTD センサーを設置した箇所は、1 箇所である。八幡地区での現在までに得られた結果を、図 5.3-16 に示す。このデータは、平成 24 年 12 月 4 日~平成 26 年 1 月 23 日のもので、現在も測定を継続中である。本 CTD センサーでは、水位は、大気圧が 10m として表示されており、観測期間中は、1300~1400m の範囲で変動していることが分かった。このセンサーは、水深が 3m 程度と浅い地下水を測定しており、2 年間の間に 1 m 程度の水位変動があることが分かる。水温では、9~14°C と大きく変化している。EC は、25°C に温度補正した値を示している。EC 値は、10~20mS/m の範囲であり、時間と共に減少してゆく。

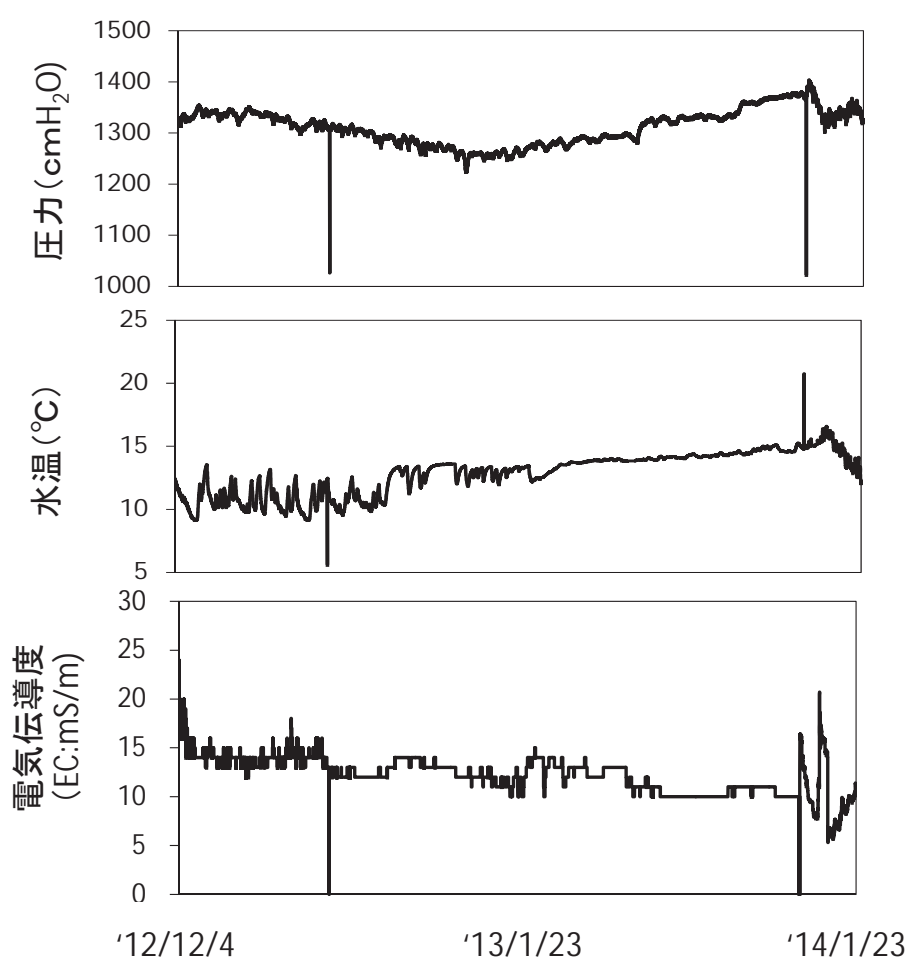


図 5.3-16 八幡地区の地下水の連続水質モニタリング結果  
(平成 24 年 12 月 4 日~平成 25 年 2 月 7 日)



## 5.4 まとめ

本調査により、次のことが判明した。

- ・電気伝導度 (EC)、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度 (アルカリ度)、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の分析結果から、黒部川付近は濃度が低く、河川から離れるにつれて濃度高くなる。
- ・酸素同位体比から扇状地の地下水は、河川水と降水が起源であると考えられる。

本研究によって、黒部川扇状地地下水系の大まかな水系区分及びその水質や物理特性、また涵養源を特定した。その結果から、それぞれの地域での適切な Geo-HP を用いなければならない事が確認された。河川からの希釈効果のため水質濃度は低く開放型 Geo-HP が適切である。しかし地下水位は、河川流量に依存しているため、その対策が必要と思われる。扇状地の中央部 (入善町市街地付近) は、地下水の EC が高く、 $\text{Ca}^{2+}$  や  $\text{HCO}_3^-$ 濃度も高いが、炭酸カルシウムなどはこれらの水温では沈殿しないが、温度が増加するとスケールが沈殿する危険性もある。その結果、Geo-HP の熱交換部分や配管に、熱交換率の低下が起こる問題が発生することも危惧されるため、クローズ型 HP を用いるなど、定期的なバルブ洗浄作業が必要となる。

## 6. 研究成果からの提言

### 6.1 各調査研究結果を踏まえた総括

農村地域において、農業用水を用いた小水力発電で得られた電力を、電気軽トラックに供給し、また地下水や地熱水が持つ熱エネルギーをヒートポンプで濃縮して農村で活用する、エネルギー自給を促進する社会システムの構築に関する研究を行った。モデル地域として富山県黒部川扇状地を選定し、平成 24 年度には秋の農繁期の軽トラック利用実態調査・バッテリーステーションの制御回路設計・地下水質調査を実施した。他に、小水力発電による電力をバッテリー充電と地中熱 HP の双方に効率よく利用するための制御回路を設計した。また農業地帯における軽トラックの利用実態を調査し、1日の平均走行距離が 20 km程度であることを明らかにした。さらに地下水質の分布から地中熱 HP の設置指針を明らかにした。

平成 25 年度には昨年度の成果を踏まえて、モデル地域としてさらに富山市常願寺川扇状地の一部を加えたうえでの下記の調査研究をおこなった。

- ①農業地帯での軽トラック利用実態調査 (交通量調査)
- ②軽トラックを EV 化した場合の電力消費特性調査
- ③軽トラックが電池を補充するためのバッテリー基地配置のモデル化
- ④黒部川扇状地地下水の動態調査
- ⑤黒部川扇状地地下水の水質の経年変化評価
- ⑥同地下水の水質連続モニタリング調査

これによって、軽トラックの走行密度は道路幅員と密接な関係がある事・EV軽トラックの電力消費特性はガソリン車と異なり扇状地のような斜面でも平坦路と同じ電力消費に近い事を明らかにした。バッテリー基地の最適配置については、実装的にはその地域における軽トラックの起点と終点を含む走行軌跡を測定することで配置の検討ができ得ることを明らかにした。黒部川扇状地の地下水に関しては、まず電気伝導度（EC）、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度（アルカリ度）、 $\text{Ca}^{2+}$ 濃度の分析結果から、黒部川付近は濃度が低く、河川から離れるにつれて濃度が高くなる事、酸素同位体比から扇状地の地下水は、河川水と降水が起源であると考えられる事を明らかにした。さらに黒部川扇状地地下水系の大まかな水系区分及びその水質や物理特性、また涵養源を特定した。その結果から、それぞれの地域の水質に応じて、適切なGeo-HP（クローズド型、オープン型など）を用いなければならない事が確認された。

## 6.2 地域への研究成果公開・還元

本事業では、次のことが成果として期待される。

### (1) ガソリン軽トラックから電気軽トラックへ移行することによる農村全体でのコスト低減およびCO<sub>2</sub>削減効果

電気軽トラックは扇状地のような緩やかな斜面地域では、上りで消費した電力を下りで回生できるため、論理的には平坦路と変わらない電力消費で移動が可能。電気自動車の移動コストはもともとガソリン車の1/5～1/20と安価であり、さらに斜面でのロスが少ないことから、農村全体での移動コストの大幅削減が期待できる。

### (2) 扇状地農村地帯で効率的に利用可能な電気軽トラックの改造指針

軽トラックの1日当たりの走行距離は20km以下が60%、40km以下で95%を占める事から、バッテリーの容量を5kWh程度まで削減可能。しかもカセット式で交換可能とし2.5kWhの2本立てとする。これによって製造コストを下げ、バッテリー切れにも対応可能な電気軽トラックを製造可能である。

### (3) 電気軽トラックのバッテリー充電基地における電気制御装置の製造指針

鉛バッテリーを安定化装置として使用する小水力発電を用いたバッテリー充電基地の電気制御装置の回路設計が完了した。これに基づいて安価に回路製造が可能であり、地域の電気業種で製造が可能となっている。

### (4) 遠隔バッテリー情報システムの試作品

スマートホンを使用したEV情報システムの試作品を構築した。これを応用することで電気軽トラックとバッテリー基地が遠隔通信し、バッテリー充電状況などをモニターしながら農業地帯を走行できる隔バッテリー情報システムの基礎技術を構築した。

(5) 扇状地における地中熱 HP による獲得熱エネルギーの利用指針

電気伝導度 (EC)、 $\text{HCO}_3$  濃度 (アルカリ度)、 $\text{Ca}^{2+}$  濃度の分析結果から、黒部川付近は濃度が低く、河川から離れるにつれて濃度が高くなる事から、Geo-HP システムの利用指針が明らかとなり、熱エネルギー利用のための機器選定方針が明確となった。

富山県内で電気軽トラックを改造し提供するとともに、車両運用に必須の保守・整備体制を地域内に確保することができ、地域が自立して製造・運用・保守可能となる。電気自動車の改造ビジネスはすでに県内でも始まっており、軽トラックを改造の指針を明らかにすることでさらに動きは加速する。EV 社会が加速することで地域エネルギー利用度が高まり、小水力発電をはじめとする自然エネルギーによる分散発電が促進されると期待できる。電気軽トラックおよび地中熱 HP の普及により農家のガソリン利用料が低減し、燃料代が節約される。これに伴って農村地帯全体での  $\text{CO}_2$  放出量が減少する。また温熱の農業への積極的利用促進によって農業コストおよび生活コストが低減し、都会からの U/I ターンによる農業従事者の増加を期待する。

以上