

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19580301
 研究課題名(和文) 地域分散型エネルギーの実用的導入に資するマイクロ水力発電システムの開発
 研究課題名(英文) Development of micro hydro systems contribute to the practical implementation of distributed energy
 研究代表者 瀧本 裕士
 富山県立大学短期大学部・准教授
 研究者番号：60271467

研究成果の概要：これまで水力開発の行われなかった平野部において豊富に存在する農業用水を利用し、低流量・低落差の条件下でも効率良く稼働する小型水車を開発することは、マイクロ水力発電システムの核となる重要な課題である。そこで、本課題に対する取り組みとして、富山県立大学水理学実験室において、傾斜水路、管水路、落差工を想定した流況に対し、水理学的特性と水車発電出力の関係について重点的に研究を行い、実用レベルに達するシステムを開発することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：農業工学

科研費の分科・細目：農業土木学・農村計画学

キーワード：マイクロ水力発電，地域分散型エネルギー，らせん水車

1. 研究開始当初の背景

戦前までらせん水車は、重要な農業動力源として脱穀作業や藁(わら)加工作業に用いられてきた。この水車は富山県の扇状地に張り巡らされた農業用水の特徴を巧みに利用した水車である。簡便性と経済性に優れており、移動型動力源または定置動力源として全国的に普及し使用されてきた。しかし、戦後になって機械化の進展に伴い、らせん水車の数は急激に減退してしまった。ところで、地球環境の保全に向けたエネルギー確保は深刻な課題であるが、その一環として、自然エネ

ルギーの利用も重要である。近年では水害・台風・地震等の災害時の非常用電源や農業の生育管理用電源として、移動可能かつ、利便性に優れた小型発電機の開発が望まれている。自然エネルギー利用発電のうち水力発電は風力や太陽光発電に比べ24時間安定した出力が得やすい発電方式である。富山県には大小様々な多くの河川が身近に存在するが低落差・低流量を利用した高効率のマイクロ水力発電システムはいまだ製品化されていないのが現状である。そこで、富山県の産業遺産であるらせん水車に注目し、これをマイ

クロ発電システムとして復活させたいと考えている。らせん水車は従来農業用動力源として利用されてきたが、動力特性の理論的説明はなされていない。先人達の経験に基づく知恵を科学的に解明することで、より発電効率の高い水車の開発が可能となる。

2. 研究の目的

(1) らせん式水車の動力特性の科学的解明

らせん水車の水理的な動力特性についてはまだ解明されていない。そこで「低落差・低流量でいかに効率よく水車を回転させるか」をテーマに、出力特性に及ぼす羽根構造（羽根材質、形状、枚数、ピッチ、水流との角度等）および水路条件の影響を明らかにする。

(2) 高効率小型水車の新規構造の提案

現時点でのらせん水車の効率は40%程度であり、在来水車に比べ高い効率を示すものの、実用化に向けてはさらなる改良が必要である。実験および理論の両面から上記動力特性を追及し、併せて高効率小型水車の新規構造を提案する。

(3) 水車にマッチした発電機の試作と設計

低流量・低落差の条件下で水車を使用した場合、回転数は数十から数百回転程度となる。この回転数は発電機の従来製品から見ればかなりの低回転であり、この回転領域にマッチした発電機は殆ど存在しない。そこで本研究では水車とマッチングした発電機システムの設計・試作を行い高効率マイクロ水力発電システムの完成を目指す。

(4) 低コストの検討

既存の農業用水にそのまま設置できる発電システムを設計し、土木工事費の軽減を図る。土木工事費の負担がなくなることで、本開発のマイクロ発電システムは、太陽光や風力発電と比較しても採算性に優れた製品となり得る。

3. 研究の方法

(1) 水車動力特性の解明

富山県立大学水理学実験室において、傾斜水路、管水路、落差工を想定した流況に対し、水理的な動力特性と水車発電出力の関係について重点的に調査する。

(2) 研究会の開催

適宜研究会を開催し、産学連携で高効率水車の設計を行う。また、製品の採算性、適用法令の整理、維持管理に向けた対策等についても検討を行う。

4. 研究成果

マイクロ水力発電を行う際、その起動力となる水車を効率よく稼働させることは安定的な電力確保に向けて重要なポイントとなる。発電規模（ポテンシャル）および水車の

選定は、流量と落差で決定される。マイクロ水力発電では、小規模ながらも適用箇所が広範囲であることに着目し、低流量・低落差の条件下（例えば農業用水のような流量1~3m³/s, 落差1~2m程度）に適した水車を選定する必要がある。しかしながら、低流量・低落差の条件下で実際に水車を稼働させ発電を行う事例は少ないことから、水車の性能そのものがまだ明らかになっていないのが現状である。そこで、本研究では、大学の実験室を利用し、傾斜水路、管水路、落差工に水車を設置した場合の動力特性あるいは発電特性について計測し考察を行った。傾斜水路および落差工に設置する水車には、富山県の産業遺産という歴史的価値があり、流下するゴミにも強いなどの維持管理上優れるらせん水車を採用した。また、管水路に設置する水車には、近代水車の一つで管内の圧力を利用できるクロスフロー水車を採用した。以下に本研究で得られた成果を報告する。

(1) 傾斜水路に設置したらせん水車の動力特性、発電特性

写真1に示すような傾斜式開水路（水路幅72cm, 高さ80cmの長方形断面、水平から最大傾斜30度まで5度ピッチの傾斜可変型開水路）にらせん水車（羽根直径45cm, 全長1m）を設置し、動力特性および発電特性の計測を行った。

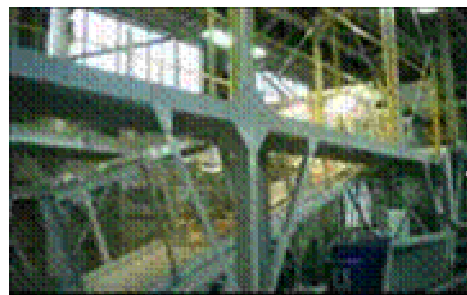


写真1 可変勾配傾斜式開水路

まず、動力特性についてであるが、一例として設置勾配25°の状況を図1に示す。

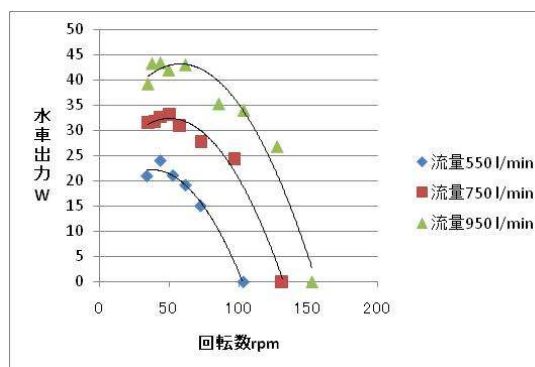


図1 らせん水車の動力特性

流量に比例して出力（＝トルク×回転数）が増加する傾向にある．最大出力は概ね回転数が 50rpm 付近で発生している．出力ピーク時の曲線勾配はほぼフラットであることから粘り強い動力が得られていると言える．水車効率は 50%程度であるが、水車稼働中に水漏れが発生しエネルギーロスが見られた（写真 2）．

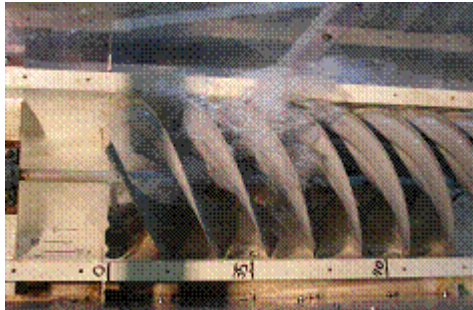


写真 2 水漏れの様子

これは水流の運動エネルギーが大きい場合に生じる現象であり、水流制御や水漏れ防止の工夫が必要である．簡便な方法としては、水車外周にカバーを取り付けて水漏れを防止することが考えられる．この方法で実験を行ったところ、急勾配の場合には効率が約 8% 向上したが、低勾配の場合には逆に効率が低下した．水漏れが水車羽根に対して抵抗として作用したためであると考えられる．水車の動力特性を向上させるためには、水の位置エネルギーを最大限に生かせるような設置法、水車羽根構造の改良が必要である．次に発電特性を計測するために、増速機と発電機を取り付けて実験を行った（写真 3）．

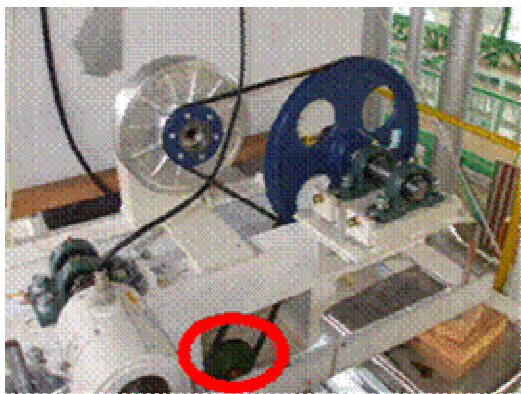


写真 3 増速機、発電機の設置

まず、発電可能な最低流量を調べたところ、 $0.05\text{m}^3/\text{s}$ ($3000\text{ l}/\text{min}$) であった．設置勾配が 25° の時、発電出力は 150W であり、発電効率を算出すると 25%程度である．発電効率の値そのものは低いが、水路の摩擦損失、機械損失、増速によるロスエネルギー、発電機によるロスエネルギー等の影響があることから正味の効率はもっと高いと考えられる．

なお、本研究では流量と発電出力の関係を求めようとしたが、流量を増加させるとプーリー（写真 3 中の赤丸部）が水没してしまい、増速機を繋ぐベルトがスリップしてしまった．この影響により多様な流量変化に応じた発電特性を解明することはできなかったが、スリップしないような工夫を施せば、数百 W レベルの発電が可能になると期待できる．

維持管理上、農業用水等の水路を流下するゴミ対策も考えておかなければならない．本実験装置においてペットボトル、空き缶、ひも、布、ビニール、枝、葉を流してみたところ、ほとんど問題なくゴミを流下させることができた．ただし、長いひもや大きなビニールは羽根に絡む傾向にあり、流入時に除去しておく必要がある．

(2) 管水路に設置したクロスフロー水車の発電特性

農業用パイプラインや工業排水といった管水路での発電を考えると適用箇所がさらに増えると期待できる．そこで本調査では、管内の圧力で稼働するクロスフロー水車を用いて発電特性を調べることにした．実験に用いたクロスフロー水車（写真 4）は、直径 15cm の小型水車である．



写真 4 クロスフロー水車

管水路の内径は 10cm であり、循環式ポンプで送水を行う．クロスフロー水車の力学的特徴は、流入部と流出部の 2 カ所で羽根に水流エネルギーが伝達されることである．

効率よくエネルギー伝達ができるようガイドベーンの設定角度がポイントとなる．管水路では直接落差が計測できないことから、以下のような式を用いて、オリフィスに近似させた形（仮想オリフィス）で検討することとする．仮想オリフィスの落差はベルヌーイの定理を用いると、次式が成り立つ．

$$H_0 = \frac{v^2}{2g} + \frac{P_A}{\rho g} \quad (1)$$

ここに、 v : 流速、 P_A : 管内圧力、 g : 重力加速度、 ρ : 水の密度
よって、理論出力 P は $P = gQH_0$ (2)

となる。ここに Q : 流量

発電効率は、(2)式の理論出力と実際の発電量の比で求められる。実験は図2のようなシステムで行った。水車と発電機の設置は写真5に示す通りである。

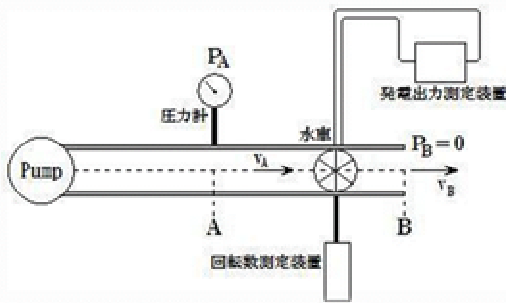


図2 実験システムの概要

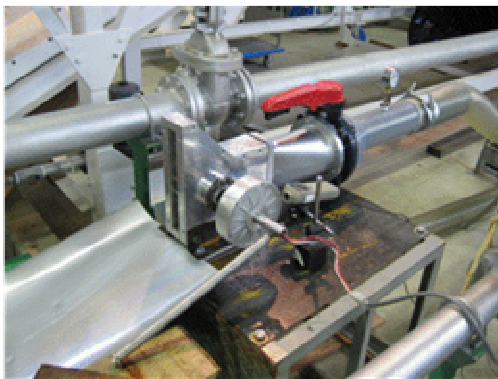


写真5 水車と発電機の設置

最大出力は、流量 $0.005\text{m}^3/\text{s}$ で 30W であった。回転数と効率の関係を図3に示すが、最大効率は25%程度であり、回転数が500rpmのところまで最大値が出ている。このことから定格回転数は500rpmに設定すれば良いことがわかった。なお、効率に影響する要因としては、ガイドベーンの数、発電機の性能等が挙げられる。今後更なる構造改良を行い、高効率の水車を開発していきたいと考えている。

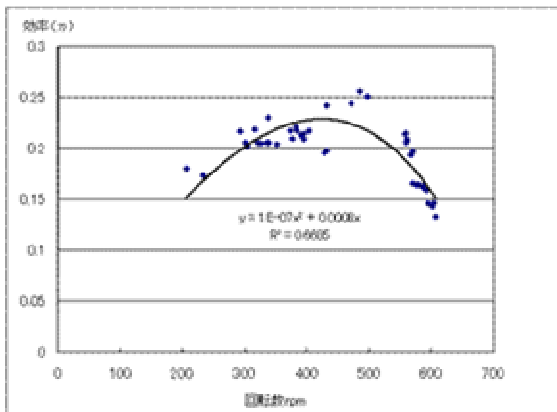


図3 回転数と効率の関係

(3) 落差工に設置したらせん水車の発電特性

富山県の扇状地を流れる農業用水では落差工が多く存在している。落差工での水流は滝のように鉛直に落ちることから、水車は位置エネルギーを利用するタイプが望ましい。本調査では、先述(1)の知見を基にらせん水車を鉛直に設置することを考えた。らせん水車を鉛直に設置することで、増速機や発電機が水流にさらされる危険性がなく、維持管理を行う上でも有利である。しかしながら、ただ単に鉛直に設置しただけでは水車羽根と水流の間に抵抗が生じてしまい、十分な効率を得ることはできない。実際に農業用水で $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 、落差 1.5m の条件下で実証試験を行ったところ、 1KW 程度の出力 (発電効率 23%) しか得られなかった。水のエネルギーを水車羽根に効率よく作用させることが重要である。また、らせん水車は回転数が低いという欠点があるので、水車羽根の枚数を少なくして軽量化を図り回転数を増加させる工夫の必要である。そこで、本調査で開発する水車は、図4に示すように整流制御のガイドベーンを設置し、羽根枚数は2枚にするなどの改良を加えた。水車羽根の直径は 70cm 、全長は 2m である。図4のシステムを農業用水の落差工に設置し、先述と同じ流況条件で実証試験を行ったところ (写真6)、出力 3.1KW 、発電効率 70% と目標とする実用レベルにまで達することができた。

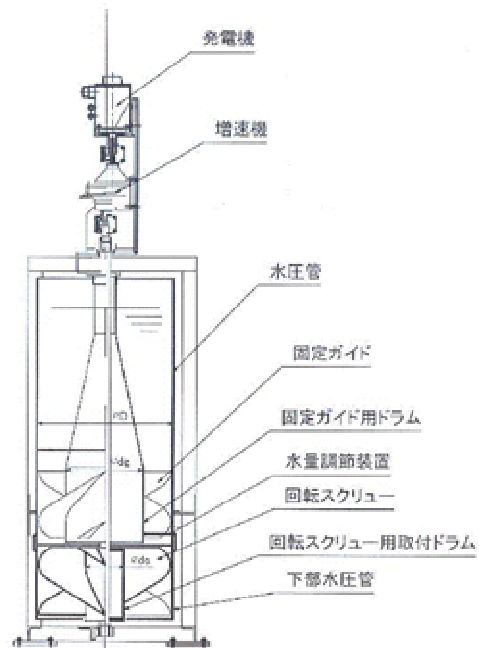


図4 鉛直型高効率らせん水車の開発



写真6 農業用水における落差工での実証試験の様相

(100Wの電球が30個安定的に点灯した)

本研究では、大学の実験室で図4のシステムを導入し、流量の変化と発電効率の関係を調べることにした。実験室の送水ポンプ容量の関係で流量は $0.05\text{m}^3/\text{s} \sim 0.1\text{m}^3/\text{s}$ の低流量の範囲で実験を行った。実験では、まず三角堰と流路内の流速分布から実測流量を観測した。そして、流量の変化に応じて発電量を計測し発電効率を算出した。発電効率の算定で用いる有効落差は損失水頭の定量評価が困難であったことから実落差の2mとした。また、流量と発電効率の関係を図5に示す。実験は低流量の条件下で行わざるを得なかったことから、発電効率は実証試験時に比べ低い値となっている。ただ、流量の増加と共に発電効率は向上する傾向にあり、 $0.1\text{m}^3/\text{s}$ の流量があれば発電効率は50%を超えることができる。図5の近似曲線を外挿して判断することは憶測の域を超えないが、実証試験時の流量 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ に対応する発電効率は67%となり、実証試験結果とほぼ一致することがわかった。

らせん水車は水の位置エネルギーを巧みに利用できる水車であるが、流量が増加し図4の水圧管に水が貯留する状態になれば圧力エネルギーも利用でき、効率の向上に繋がると考えられる。

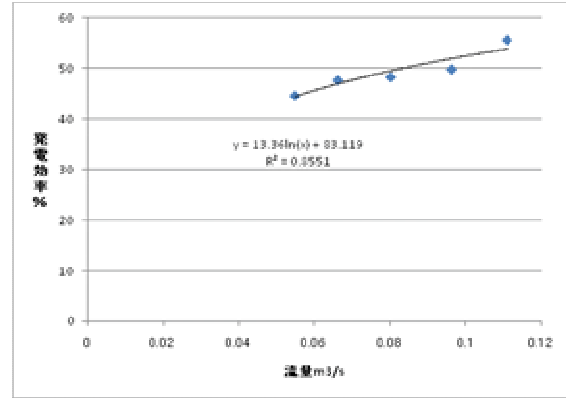


図5 流量と発電効率の関係

(4) 並列運転の検討

これまで富山県立大学では株式会社北陸精機と共同で螺旋水車を利用し実用化に十分資する効率の高い小型水車の開発に成功した。次のステップとして、発電機とのマッチングと発電システムの構築が課題となる。発電システムの部分では株式会社北陸精機と協力関係にある有限会社Eテク・ワタナベと共同で技術的なシステムを検討した。その結果、以下のような発電システムの提案があった(図6参照)。このシステムは小水力発電を単独で利用するのではなく複数で利用する際の並列運転に有効なシステムであり、構築に成功すれば社会のニーズに広く応えられるパッケージの創出が可能となる。

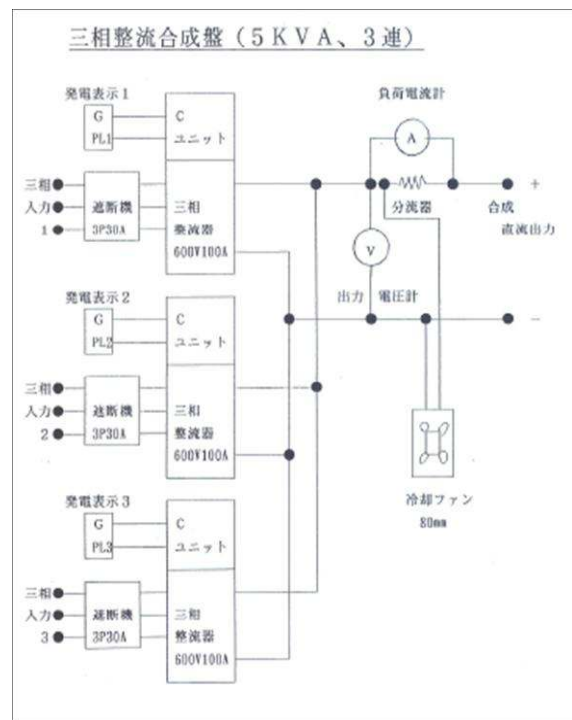


図6 渡辺氏からの並列運転に関するシステム提案

水車の動力特性（回転数、トルク）の安定化が指摘されており、富山県立大学の研究成果を生かせる構成である。今後、システムの構築に向けて実験を通じて検証していく予定である。

(5) 文献調査

発電効率について石田（2007）の文献を基に事例文献調査を行った。その結果を表1に示す。出力規模が大きくなるほど発電効率が向上する傾向にある。本調査結果と比較してみると、本開発の水車は全国的に導入されている現存の水車よりも高い発電効率を示していると言える。

表1 発電効率の比較

利用法	所在地	最大出力W	流量L/s	有効落差m	効率%	効率平均値
上下水道	岐阜	98	2	1	50.0	
深流水	愛知	10	3	5	6.8	
深流水	長野	14	3	3	15.9	
深流水	鳥根	40	10	2	20.4	
公園池水	広島	40	6	2	34.0	
深流水	北海道	50	15	2.5	13.6	
公園池水	福井	50	11	2	23.2	
公園池水	北海道	80	10	2	40.8	
深流水	岐阜	100	10	6	17.0	
農業用水	長野	100	975	0.6	1.7	
農業用水	岐阜	100	10	10	10.2	
深流水	岐阜	120	3.7	30	11.0	
深流水	岐阜	150	10	13	11.9	
農業用水	静岡	186	10	4.5	44.4	
深流水	岐阜	200	10	14	14.6	
深流水	長野	200	3	15	45.4	
農業用水	長野	200	6	6.3	54.0	200W以下
公園池水	長野	200	35	1.3	44.9	25.5
公園池水	富山	230	60	0.2	195.6	×
農業用水	長野	270	100	0.5	55.1	
河川水	鳥取	300	100	1	30.6	
深流水	岡山	300	3	40	25.5	
深流水	長野	300	4	10	78.5	
公園池水	山形	300	100	2	15.3	
実験用水	福井	300	7	80	5.5	
上下水道	滋賀	300	4	30	25.5	
農業用水	長野	300	6.3	9	54.0	350W以下
深流水	山梨	350	5	18	39.7	36.4
深流水	長野	400	700	5	1.2	
農業用水	長野	400	200	0.45	45.4	
深流水	鳥根	700	20	13	27.5	
農業用水	長野	700	130	1.2	45.8	890W以下
上下水道	北海道	890	125	2	36.3	31.2
深流水	長野	900	5	36	51.0	
深流水	岐阜	900	30	13	23.5	
深流水	三重	1000	10	40	25.5	
工場排水	広島	1000	18	20	28.3	
公園池水	山梨	1000	30	7	48.6	1kW以下
農業用水	長野	1000	130	1	78.5	42.6
農業用水	長野	1000	10.4	8.2	119.7	×

【参考文献】

石田正：超小型水力発電装置製作ガイドブック，パワー社，2007，pp.2-3

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

① 瀧本裕土，らせん水車を活用したマイクロ水力発電の可能性，水利科学 NO.303, 1-14, 2008 年，査読有

〔学会発表〕（計 1 件）

① 瀧本裕土，Possibility of Micro Hydropower Generation System by using the Spiral Water Mill，生物資源・エコフォーラム，2008 年，モンゴルウランバートル

〔図書〕（計 1 件）

① 瀧本裕土（共著：他 12 名），富山の水環境（改訂版），富山県立大学短期大学部環境システム工学科，2009 年発行予定

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：水力発電装置

発明者：瀧本裕土，谷口貞夫，南弘雄

権利者：富山県，株式会社北陸精機

特願 2008-64620

2008 年 3 月 13 日

国内

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ：
<http://www.kitanippon.co.jp/contents/knpnews/20090104/18328.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀧本裕土 (TAKIMOTO Hiroshi)

富山県立大学短期大学部・准教授

60271467

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

研究協力者

① 谷口貞夫

株式会社北陸精機会長

② 南弘雄

株式会社北陸精機顧問

③ 里深文彦

元東京農工大学教授

④ 高野雅夫

名古屋大学大学院環境学研究科准教授