安全弁による低圧化システムの圧力制御対策 (I)

- 自動減圧弁を単独設置した場合 -

高橋研二¹・稲垣仁根²・多炭雅博³・竹下伸一⁴Pressure Countermeasure Control on Pressure-reducing Pipeline System
Using Safety Valve (I)

- A Case of Single Installation of Automatic Control Valve

Kenji Takahashi¹, Hitone Inagaki², Masahiro Tasumi³ and Shinichi Takeshita⁴

Abstract: An on-site experiment concerning pressure reduction in a pipeline system was conducted using a test pipeline located in Ohno Mountain in Kagoshima Prefecture. A conventional and a new type of automatic control valve were installed in the pipeline independently and in combination with a safety valve; and a comparative study of the pressure control behavior was conducted under four experimental conditions.

The results were as follows:

- (1) The use of the conventional control valve caused pressures on both of its downstream and upstream sides when the terminal valve was briefly operated, inevitably causing a large increase in pressure which affected the entire system.
- (2) With the conventional control valve, it was necessary to use the safety valve to block the upsurge of the upstream and downstream pressures; and to control and set the pressure on the downstream side. Therefore, the performance of the pressure-reducing system depends entirely on the safety valve.
- (3) The new type of control valve is sensitive to increases in downstream-side pressure caused by closing the terminal valve. It fully closes in response to such increases, enabling the suppression of increases in downstream-side pressure.
- (4) Moreover, the new type of control valve closes quickly when the terminal valve is closed abruptly. This, in turn, causes a pressure increase on the upstream side of the control valve. Thus, it is necessary to have a safety valve fitted on the upstream side of the new type of control valve.

Keywords: Automatic Control Valve; Pressure-reducing Pipeline; Single Installation; Safety Valve; Pressure Control

1 はじめに

農業用パイプラインにおいて、安価で耐圧強度の低い塩化ビニル管を安全に使用することを可能にして、コストダウンを図るために、斎藤・稲垣(1996, 1997)は、実際に運用されている農業用パイプラインにおいて現地試験を行い、自動減圧弁と安全弁を併用することにより静水压を制御し、減圧弁下流側の管路の設計圧力の削減を行う低圧化システムを提案している。

自動減圧弁には、上水道での実績の多い従来型と作動機構を改良した新型の2タイプがあるが、稲垣・國武(1996)と稲垣ら(1998)は、減圧弁等の数値モデルを作成して数値シミュレーションを行い、両者の圧力制御の機能には違いがあり、これを認識した上で低圧化システムを構築する必要性があることを示している。しかし、実運用を行っ

ているパイプラインでは弁などの施設や実験の条件などに制約があること、また数値モデルでは考慮できる機能に限界があることなどから、さらに詳細な現地実験を行い、低圧化システムの技術的な課題と解決策を確認する必要があることを指摘していた。

そこで、著者らは、鹿児島県の大野岳に設置した実験専用のパイプラインを用いて現地実験を行い、パイプラインシステムの低圧化に関して、従来型および新型の自動減圧弁を単独で設置し、安全弁と組み合わせた4ケースの設定条件における圧力制御の挙動について、実験結果に基づいて比較検討を行った。

2 低圧化システムの概要

農業用パイプラインは、水源に近い大規模な送水系幹線水路ばかりでなく、ファームボンドから圃場までの配水系支線・末端水路においても普及しており、水源から受益地区までの水路系全体がパイプラインで構成される事例が多くなっている。配水系パイプラインでは、経済性を考慮するために、安価な塩化ビニル管の使用が一般的となっているが、ダクタイル管など他の管種に比べて管体の耐水圧強度が劣る点が課題となる。

配水系パイプラインにおいて、管体への作用圧力が大きくなる場合は、図 1 に示すような従来型の自動応答型の減圧弁と安全弁を組み合わせた低圧化システムを導入

¹ 宮崎大学大学院農学工学総合研究科, Postgraduate Student, Interdisciplinary Graduate School of Agriculture and Engineering, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

² 宮崎大学農学部教授, Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan (Corresponding Author) E-mail: a03221u@cc.miyazaki-u.ac.jp

³ 宮崎大学農学部准教授, Associate Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

⁴ 宮崎大学農学部助教, Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan

し、最適な位置で設計圧力を減少させる方法が提案されている(斎藤・稲垣, 1996;1997)。現在は、静水時の水圧も遮断できる減圧機能を有する新型の自動減圧弁が提供されており(稲垣・國武, 1996), この減圧弁を直列に配置することで、設計水圧を段階的に減少させる方法も提案されている(稲垣・國武, 1998)。

さらに、分水操作による急激な圧力変動に対しても自動減圧弁の上下流に安全弁を設置することにより、安定した減圧機能が確保されるようになり(稲垣ら, 1999), 設計基準において「比較的小規模な配水系パイプライン」については安全弁との併用を前提として認められ、現地での導入が始まっている(農林水産省, 1998)。

図 1: 低圧化システムの概要

3 自動減圧弁の制御機構

自動減圧弁は減圧弁上流側圧力を利用して、減圧弁下流側圧力を設定圧力に保持するように作動することに特徴がある。しかし、従来型自動減圧弁は上流側の圧力変動や流量変化時に設定圧力に多少のずれが生じることがあり、また通水中に下流側の流量が変化してゼロまたは微小になった場合に上流側の圧力が下流側に通じてしまう現象が発生する問題がある。

3.1 従来型自動減圧弁

図 2 に従来型自動減圧弁の作動機構を示すが、減圧弁上流の1次側圧力 P_1 をバイパス管で取り出し、ニードル弁を通過させた後、主弁ピストンの上部へ作動させ、さらにピストン上部と減圧弁下流をもう一本のバイパス管で結んでいる。バイパス管にはパイロット弁が設置されており、設定圧力で主弁ピストンが安定するように抵抗を与えている。

2次圧 P_2 が設定圧より大きければ、パイロット弁がバイパス管を閉じ、1次側圧力 P_1 を主弁ピストン上部に作動させて、閉方向に駆動することに特徴がある。

定常状態では、減圧弁の1次側圧力 P_1 とピストン上部圧力 P_0 により生じる上流側バイパス管の流量と P_0 と2次側圧力 P_2 により生じる下流側バイパス管の流量が等しくなり、主弁ピストンが安定することになる。

応答感度の調節は、減圧弁上流側のバイパス管に設置したニードル弁の開度を変化させることにより行う。このバルブで抵抗を与えて、主弁ピストン上部に導入する1次圧を変化させ、主弁ピストン上部の圧力の大きさを調整して、主弁ピストンの動作速度を変化させる。ニードル弁を開けば、減圧弁の1次圧 P_1 が多く導入されるため、感度は鋭敏になり、主弁ピストンの閉鎖速度は速くなる。一方、ニードル弁を絞れば主弁ピストン上部に導入される1次圧 P_1

の大きさは減少し、感度は鈍くなり、主弁ピストンの閉鎖速度が遅くなる。(長ら, 1987; 稲垣・國武, 1996; 稲垣ら, 1998)。

図 2: 従来型自動減圧弁の作動機構

3.2 新型減圧弁

図 3 に新型の自動減圧弁の作動機構を示すが、減圧弁上下流の管路圧力を細管で取り出し、2次圧を一定にするように外部のパイロット弁で弁体を駆動する方式である(稲垣・國武, 1996; 稲垣ら, 1998; 農業土木事業協会, 2000)。

実際の2次圧 P_2 が設定圧より大きければ、1次側圧力 P_1 を主弁ピストン上部に作動させて、閉方向に駆動し、2次圧 P_2 が設定圧より小さい時には、2次側圧力 P_2 を主弁ピストン上部に作動させて、開方向に駆動することに特徴がある。

2次圧 P_2 が設定圧力付近にあり安定している状態では、主弁ピストン上部にはパイロット弁内で1, 2次圧と回路の水理的抵抗とのバランスによって生じる圧力 P_0 が作用している。減圧弁の2次圧制御に対する応答感度は、上下流側の圧力取出細管に設置したバルブA, Bの開度を変化させて、パイロット弁への減圧弁上下流の導入圧力を調節することにより行う。

1次圧 P_1 に対する感度の調節は、減圧弁上流側の圧力取出細管に設置したバルブAの開度を変化させて、パイロット弁に導入する1次圧 P_1 の大きさを調節することにより行う。バルブAを開けば、減圧弁の1次圧 P_1 がそのまま導入されるので、感度は鋭敏になり、主弁ピストンの閉鎖速度は速くなる。一方、バルブAを絞ればパイロット弁に導入される1次圧 P_1 の変動は減少し波形が平滑化されるため、感度は鈍くなり、主弁ピストンの閉鎖速度が遅くなる。

2次圧制御に対する応答感度の調節は、減圧弁下流側の圧力取出細管に設置したバルブBの開度を変化させて、パイロット弁に導入する2次圧 P_2 の大きさを調節することにより行う。バルブBを開くことは、2次圧 P_2 に対する応答感度を鋭敏にすることであり、開度を絞ることは、応答感度を鈍くすることになる。

作動機構としては、バルブBを開けば、減圧弁の2次圧 P_2 がパイロット弁のB弁部にそのまま導入され、圧力検知部に作用する。設定2次圧に対応するコイルバネ荷重とB弁部の圧力が釣り合うまで、ピストンが左右に移動し、主弁ピストンに作用させる圧力を選択する。一方、バルブBを絞ればB弁部に導入する2次圧 P_2 が、バルブの抵抗によって大きさが減少し、波形が平滑化される。

図 3: 新型自動減圧弁の作動機構

4 安全弁の作動機構

安全弁には、バネを用いた直動式安全弁とパイロット弁を用いたパイロット弁式安全弁がある。本実験では、図 4に示すパイロット弁式安全弁を使用した。パイロット弁式安全弁は、安全弁入口側の1次側圧力を細管で取り出し、1次圧が上昇し設定圧以上になった場合に、管路内過剰圧力を管路外に放出するように外部のパイロット弁で圧力を検出して、主弁ピストンを駆動する方式である。

図 4に作動機構を示すが、安全弁入口側の1次側圧力 P_1 をバイパス管で取り出し、パイロット弁を通過させた後、主弁ピストンの上部へ作動させ、さらにパイロット弁と安全弁出口側をもう一本のバイパス管で結んでいる。

通常時は P_1 と P_0 は等しく主弁は閉じているが、安全弁入口側圧力 P_1 が設定圧より大きくなれば、パイロット弁を開方向に作動させて、主弁ピストン上部圧力 P_0 を安全弁出口側に通過させ、主弁を開方向に駆動することに特徴がある。パイロット弁式安全弁は圧力検知部が本体外部にあるため一般的に流量特性にすぐれているが、作動は緩やかである。

図 4: パイロット弁式安全弁の作動機構

5 実験施設および実験内容

5.1 実験施設の概要

実験用パイプラインは、ポンプ送水系パイプラインと自然流下系パイプラインから構成され、その概要を図 5に示す。ポンプ送水系パイプラインは、西部第2吐出槽から吐水槽(加圧機場の吸水槽)まで圧送するラインであり、自然流下系パイプラインは、加圧機場から沈砂池まで加圧ポンプを用いて増圧し、減圧弁で減圧しながら送水するラインである。本実験では図 6に示す自然流下系パイプラインを使用した。このラインでは、加圧ポンプ出口側に加圧タンクが接続されており、1号減圧弁室、2号減圧弁室が設置され、沈砂池の入り口に末端弁が設置されている。加圧タンクについては、加圧タンク内の液面と圧力を一定の範囲に保つために、空気の吸排気を行いつつ、ポンプのON-OFF制御を行う自動運転を行っている。

2カ所の減圧弁室内には従来型自動減圧弁と新型自動減圧弁が並列に据え付けられており、運転の切り替えが可能になっている。減圧弁の上下流には安全弁が設置されていて、実験内容により安全弁の有無や機種を選択できる。

本実験では、2号減圧弁室の自動減圧弁を単独設置した場合について実験を行った。図 6に示す様に、2号減圧弁室の安全弁の設定水位については、減圧弁上流側は最大静水位に設定し、減圧弁下流側は減圧弁2次側設定水位より10m高い水位に設定した。

ポンプ、パイプライン、減圧弁および安全弁の諸元を表 1~5に示す。

表 1: パイプラインの諸元

口径	100	mm
延長	334	m
管種	VP, VH, SGPW	混成
管厚	6.6, 7.6, 4.5	mm
吸水槽水位	210.80	EL.m

表 2: 加圧ポンプの諸元

揚程	47	m
揚水量	0.6	m ³ /min
台数	1	台
原動機出力	11	KW

表 3: 自動減圧弁の諸元

タイプ	従来型／新型	
口径	100	mm
設置標高	198.79	EL.m
1次側静水位	262.00	EL.m
2次側設定水位	218.00	EL.m

表 4: 安全弁の諸元

タイプ	パイロット式
口径	50 mm
減圧弁上流側設定水位	262.00 EL.m
減圧弁下流側設定水位	228.00 EL.m

表 5: 末端弁の諸元

タイプ	仕切弁
口径	100 mm
設置標高	186.30 EL.m

図 5: 実験施設の平面図

図 6: 自然流下系パイプラインの縦断面図

5.2 計測装置

図 7に計測装置の設置状況を示す。管路の圧力は圧力トランスミッタ、管路流量は超音波流量計により計測し、安全弁についてはオリフィス前後の差圧を差圧トランスミッタを用いて計測し、この差圧から換算式(土木学会, 1999)により流量を求めた。

図 7: 計測装置の設置状況

5.3 実験内容

実験ケースは表 6に示すが、自動減圧弁は従来型と新型を対象とし、両者を切り換え、安全弁がない場合とある場合について実験を行った。

末端弁を全閉から設定開度まで開き、流量を安定させてから、全閉まで閉じる操作を行った。また、末端弁を操作する場合、操作速度を48秒,24秒,12秒に変化させて実験を行った。

表 6: 実験ケース

ケース	減圧弁タイプ	安全弁	操作時間(秒)
A-1-48	従来型	なし	48
A-1-24			24
A-1-12			12
A-2-48	従来型	あり	48
A-2-24			24
A-2-12			12
B-1-48	新 型	なし	48
B-1-24			24
B-1-12			12
B-2-48	新 型	あり	48
B-2-24			24
B-2-12			12

5.4 実験方法

減圧弁が全閉した静水状態から末端弁を設定した操作速度で開操作することにより、減圧弁の2次側圧力を設定圧より下げて、システムを稼働させた。流量を10L/s程度とし、末端弁の開度については全閉より一回転半開いたところを全開位置として設定した。流況が安定した後、設定した

操作速度で末端弁を全閉まで閉じる操作を行った。

6 実験結果

図8～19にケースA-1, A-2, B-1, B-2における48秒, 24秒, 12秒の開閉時間での全閉→全開→全閉までの1サイクルの圧力, 流量の変化を示す。図中のHおよびQは以下に示す管路地点の計測値を示している。

- H₁ : 加圧タンク圧力標高
- H₂ : 減圧弁上流側圧力標高
- H₃ : 減圧弁下流側圧力標高
- H₄ : パイプライン末端圧力標高
- Q₁ : パイプライン流量
- Q₂ : 減圧弁上流側の安全弁吹出流量
- Q₃ : 減圧弁下流側の安全弁吹出流量

6.1 従来型減圧弁の単独使用（ケースA-1）

従来型減圧弁を単独設置した場合は通水停止時の圧力遮断が不完全で, 24秒以下で全閉した場合に上下流の圧力が連続する結果となっている。また, パイプライン流量Q₁は超音波流量計の特性により実際の現象より少し遅れ, かつ波形が平滑化されて表示されている。

図 8: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースA-1-48)

6.2 従来型減圧弁と安全弁の併用（ケースA-2）

末端弁操作時間が短い場合においては, 従来型減圧弁に安全弁を併用することにより, 静水圧を設定圧力に制御することが可能となる。このとき, 末端弁を全閉する操作速度が速いほど, 減圧弁の下流側に設置した安全弁からの吹出流量Q₃と吹出時間は大きくなっている。これは減圧弁が全閉するまでの間は, 安全弁が配管圧力を逃がしていることを示しており, 減圧弁上下流の圧力遮断が安全弁に常に依存することを意味している。

図12に示す24秒で末端弁を閉鎖する場合に, Q₂で表される減圧弁上流側安全弁が作動している。これは, 末端弁閉鎖中に自動運転中の加圧ポンプが起動したために減圧弁上流側の圧力が急上昇したためである。

図 9: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースA-1-24)

図 10: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースA-1-12)

6.3 新型減圧弁の単独使用（ケースB-1）

新型減圧弁を使用した場合, 単独で通水停止時の圧力が設定水圧に制御されており, 圧力の遮断が可能になる。一方, 減圧弁の下流側圧力の変化に対して, 弁の反応速度が速いためバルブ作動時に圧力の振動が発生している。また全閉後には減圧弁下流側において制御水位から5m程度の圧力上昇を生じている。これは, 減圧弁の作動機構として主弁が全閉するために, 5m程度の圧力で下を押さえる必要があることに起因する。

6.4 新型減圧弁と安全弁の併用（ケースB-2）

図19では, 12秒での通水停止時に生じる減圧弁上流側の圧力上昇に対して, 上流側の安全弁が作動して圧力の上昇を抑制している。これは, 末端弁を短時間で閉鎖すると新型減圧弁が速く閉鎖され, 減圧弁上流側に圧力上昇が発生することに原因がある。

図 11: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースA-2-48)

図 14: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースB-1-48)

図 12: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースA-2-24)

図 15: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースB-1-24)

図 13: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースA-2-12)

図 16: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースB-1-12)

図 17: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースB-2-48)

図 18: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースB-2-24)

図 19: 減圧弁上下流の圧力・流量変化(ケースB-2-12)

7 減圧弁と安全弁の機能評価

図20～23にケースA-1, A-2, B-1, B-2における弁操作時間毎の各計測地点の圧力の最大値と最小値の差を示す。この結果に基づいて、従来型および新型の自動減圧弁を単独で使った場合と安全弁を組み合わせた場合の圧力制御の機能について検討する。

7.1 従来型減圧弁を単独使用した場合

減圧弁上流側は、減圧弁の開閉に伴い30m程度の圧力変動を生じている。減圧弁下流側は、弁操作時間が長く、下流側圧力が設定圧力に制御されていれば、変動幅は小さい。しかし、末端弁の操作時間が短い場合には、下流側圧力が上流側圧力と連続するため50mを超える圧力変動となっている。また、圧力変動の発生源である末端部ではさらに大きな圧力変動を生じている。

図 20: 末端弁操作時間と圧力変動幅(ケースA-1)

7.2 従来型減圧弁と安全弁を併用した場合

減圧弁の下流側に設置した安全弁の作動水位は、減圧弁2次側の設定水位より10m高い水位に設定している。そのため、減圧弁下流側の圧力変動幅は、最大で25m程度であり、図20のケースA-1と比較すると安全弁の効果により減圧弁下流側と末端の圧力変動が半減していることがわかる。さらに、減圧弁上流側の圧力変動もケースA-1より小さくなっている。

また、弁の操作時間が短くなるほど圧力変動幅が増加している。これは、末端弁を短時間で開くほど減圧弁の作動遅れによる減圧弁下流側の圧力低下が大きくなることと、末端弁を短時間で閉めるほど安全弁の作動遅れにより減圧弁下流側の圧力が上昇することが影響している。

図 21: 末端弁操作時間と圧力変動幅(ケースA-2)

7.3 新型減圧弁を単独使用した場合

図22のケースB-1における減圧弁の下流側と末端の圧力変動幅を図20のケースA-1と比較すると、その大きさは半減している。さらに、従来型減圧弁と安全弁を併用した図21のケースA-2と比較しても、末端部における圧力変動については、弁操作時間12sの場合、ケースA-2が32.9mに対して、図ケースB-1では22.6mであり、末端部において圧力変動が10.3m小さくなっている。これにより、新型減圧弁の下流側の圧力上昇に対する防止能力は高いと考えられる。

また、弁の操作時間が短くなると圧力変動幅が増加している。これは、末端弁を短時間で開くほど、減圧弁の作動遅れが影響して、減圧弁の下流側の圧力が低下するためである。しかし、従来型減圧弁とは異なり、末端弁を速く閉めるほど減圧弁の閉鎖遅れが発生し、減圧弁下流側の圧力が上昇する現象は生じない。

図 22: 末端弁操作時間と圧力変動幅(ケースB-1)

7.4 新型減圧弁と安全弁を併用した場合

末端弁の閉鎖による圧力上昇は、新型減圧弁により十分に制御され、安全弁の稼働頻度が少なくなっている。そのため、図23のケースB-2を図22のケースB-1と比較すると、圧力変動幅の違いが小さいことがわかる。

図 23: 末端弁操作時間と圧力変動幅(ケースB-2)

8 おわりに

自動減圧弁と安全弁を用いてパイプラインの低圧化を行う場合の技術的な課題について、今回の実験結果により以下の点を確認した。

①従来型減圧弁については、末端弁の操作時間が長い場合は、減圧弁の下流側圧力を設定圧力に制御することは可能である。しかし、末端弁の操作時間が短い場合は、減圧弁上下流の圧力が通じて、大きな圧力上昇が全体に及ぶことは避けられない。

②従来型減圧弁を用いる場合は、減圧弁上下流の圧力を遮断し、下流側圧力を設定圧力に制御するため、安全弁を併用する必要がある。但し、低圧化システムの機能がすべて安全弁に依存することとなり、減圧弁下流側の圧力変動の発生が避けられない。

③新型減圧弁は末端弁の閉鎖による下流側圧力の上昇に敏感に反応して全閉するため、下流側圧力の上昇を抑えることができる。本実験における末端弁の操作時間の範囲であれば、新型減圧弁の下流側圧力の制御は減圧弁単独で行うことが出来る。

④末端弁を急閉鎖すると新型減圧弁が速く閉鎖して、減圧弁上流側に圧力上昇が発生する可能性がある。そのため、新型減圧弁の上流側において、安全弁を設置する必要がある。

今後の課題としては、末端弁を急閉鎖した場合の対策について検討する必要がある。末端弁を6, 3秒で閉鎖した実験を行っているので、別途報告する。

謝辞

本研究は、平成19,20年度日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号19580282)ならびに九州農政局計画基礎諸元調査解析(用水・畑)南九州地区委託事業の助成を受けた。また、現地実験では、南薩土地改良区の樋渡実広氏、俵積田秀人氏、寺田功次氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- [1] 土木学会 (1999): 水理公式集[平成11年版], pp.383-384.
- [2] 稲垣仁根・國武昌人 (1996): 新型自動減圧弁による管路圧力の制御技術, 農業土木学会誌, 64(3), pp.57-62.
- [3] 稲垣仁根・小路順一・近藤文義 (1998): 新型自動減圧弁を直列配置した低圧化パイプラインシステムのシミュレーション, 農業土木学論文集, 196, pp.27-39.
- [4] 稲垣仁根・小倉邦雄・角田範明・近藤文義 (1999): 安全弁による低圧化パイプラインシステムの水撃圧対策, 農業土木学論文集, 200, pp.93-103.
- [5] 農業土木事業協会 (2000): かんがいパイプライン機器便覧, pp.162-165.
- [6] 農林水産省構造改善局 (1998): 土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」, pp.368-369.
- [7] 斎藤正樹・稲垣仁根 (1996): 自動減圧弁によるパイプラインの低圧化システムと現地計測, 農業土木学論文集, 183, pp.129-141.
- [8] 斎藤正樹・稲垣仁根 (1997): 自動減圧弁によるパイプラインの実測とシミュレーション, 農業土木学論文集, 187, pp.111-122.
- [9] 長 勝史・長 智男・黒田正治(1987): 管水路における減圧弁の動特性(I), 農業土木学論文集, 127, pp.43-50

この論文の公開の質疑または討議は2010年6月30日まで受付けます。