

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：17104
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2012～2014
課題番号：24560336
研究課題名(和文)FPGAを用いた交流-交流電力変換器のデジタルハードウェア制御に関する研究

研究課題名(英文)Digital hardware control of ac-ac power converter using FPGA

研究代表者

花本 剛士 (HANAMOTO, Tsuyoshi)

九州工業大学・生命体工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30228514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：交流電源から、異なる大きさや周波数の交流電源に直接変換できる装置であるマトリックスコンバータ(MC)を静止機器に利用することで電力の有効利用・高効率運転を行うことを目的とし、以下の成果を得た。MCを電力系統の補償装置に適用し、電力を有効に使用できることを示した。応答性能を向上させ、適用範囲を広げるための制御器ゲインの設計手法を開発した。また、デジタルハードウェアを構築し、まず出力を単相高周波にしたMCの制御回路をFPGAで作成し、実験にて有効性を確認した後、三相-三相MCにも拡張して動作確認した。

研究成果の概要(英文)：To obtain high-performance and high efficiency control of matrix converter (MC), which converts ac to ac power directly, determination methods of the controller gains are proposed. One method is using the CDM (Coefficient Diagram Method), and the other is employing the FRIT (Fictitious Reference Iterative Tuning). These methods are applied to the MC based electrical power compensation equipment (Unified Power Flow Controller). The computer simulation results show the validity of the proposed methods for the load change. To construct the digital hardware controller, the single phase high frequency MC is developed and succeeds to implement digital circuit into the FPGA device. In addition, the three to three phases MC are also developed, where DDPWM (Direct Duty ratio Pulse Width Modulation) is selected for generating the gate signals to expand the flexibility of the load condition. The experimental results show the validity of the proposed method.

研究分野：工学

キーワード：パワーエレクトロニクス マトリックスコンバータ デジタルハードウェア制御

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や低炭素社会の実現に向けて化石燃料に置き換わる電力の発生とエネルギー変換効率の向上は必要不可欠な技術となっている。特にパワーエレクトロニクス技術を用いた電力変換装置は入出力の波形を柔軟に制御できるためインバータをはじめ様々な駆動源として使用されている。

ここでは、特にマトリックスコンバータ(以下MCと略す)に着目した。MCは商用電源から直接任意の周波数に変換できる交流-交流直接変換であり、電源側の力率改善と負荷側の高性能制御が同時に実現できるという特徴を有している。またエネルギー蓄積のためのコンデンサが不要であり、半導体技術の発達により導通素子数も少なくなる可能性もあることから、高効率化や小形化にも十分貢献できる装置として注目されている。一方で適用する装置によっては制御が複雑になることや停電後の復電が困難なことから普及していない。そこで、MCの産業界での普及を目指している。

2. 研究の目的

ここでは、静止機器の電力変換装置として使用することを提案している。このような装置として「重ね抵抗溶接機」、「自動車用急速充電器」、「電力補償装置」等が考えられる。これらの装置を実現するには変換器の適切な動作(スイッチング方式)と装置や系の制御系の構築を考える必要がある。そこで、

- (1) 係数図法(以下CDM)を用いたMCの制御器設計
- (2) MCスイッチング方式の検討とFPGAを用いた装置への実装、制御系の構築を研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) CDMを用いたMCの制御器設計
CDMは制御器を含む特性多項式の係数からゲインを設計する手法であり、共振系の振動制御等に使用されてきた。しかしそれ以外の適用例は少ないため、ここではMCへ適用するモデルを提案する。図1は電力補償装置の1つである高速位相器(UPFC)をMCにより構築した電力系統図である。MCを用いることで、従来のPWMコンバータとインバータをコンデンサを挟んで逆向きに接続するBTB(Back To Back)方式に比べて、受動素子であるコンデンサを省略することができる。ここで、MCを制御可能な理想可変電源としてモデル化し、回転座標変換を施すと制御系は図2のブロック線図で表される。図中、p軸は瞬時有効電力をq軸は無効電力を制御できる電流成分である。無効成分とは電圧と電流の位相差に関する量であり、無効電力が大きいことは電力の一部が負荷側の仕事には寄与しないことを意味している。このため、通常は効率を向上させるため0に制御することが行われる。

図2に示される制御系にCDMを用いた制御器ゲインの設計を行うためq軸成分を0とし、1入力1出力系(SISO)とすることを考える。図3はこの場合のブロック線図であり、図より4次特性方程式が導出できる。設計すべきゲインは4個あり、しかも和や積が混在した形になっているため、解析的な導出が困難である。そこでPSO(粒子群最適化)を用いて最適解を探索する。PSOの評価関数は係数図が標準形となるよう設定した。提案手法は、コンピュータシミュレーション(MATLAB/Simulink)を使用して有効性を確認する。

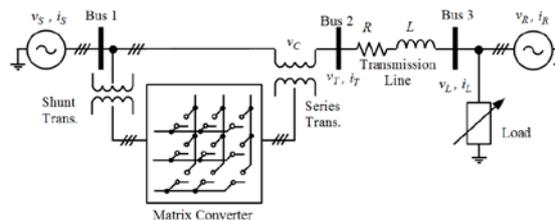


図1 MCを使用したUPFC構成図

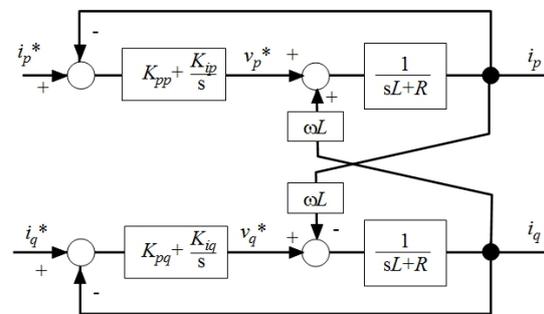


図2 UPFC制御ブロック線図

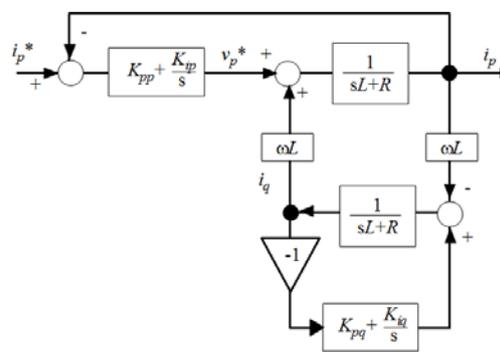


図3 SISOシステムへの変換

(2) MCスイッチング方式の検討とFPGAを用いた装置への実装、制御系構築
MCの産業界への適用を普及するためにはスイッチング等のロジック回路構築、及び制御系の実装についても検討が必要となる。ここではユーザーが書き換え可能なハードウェア素子であるFPGAを用いて、制御系まで含めて1チップで構成することを検討する。MCのスイッチングパターンを作成については三相-単相高周波MCの場合に、電流形PWMコンバータのスイッチングパターンを基本動作とし、制御周期毎に極性を切り替える方式での稼働を確認した。三相-三相MCについては、出力電圧から直接スイッチング

パターンを導出できる DDPWM (Direct Duty ratio Pulse Width Modulation)方式の FPGA への実装を検討した。これは静止機器への応用を考えた場合、蓄電を備えた交流-直流混合システムを考慮するためである。

一方で制御系の構築は DDPWM 方式の特徴を活用するため、三相独立した制御も考えられるため各相毎に PID 制御器を組み込むことを計画した。制御システム構成を図 4 に示す。

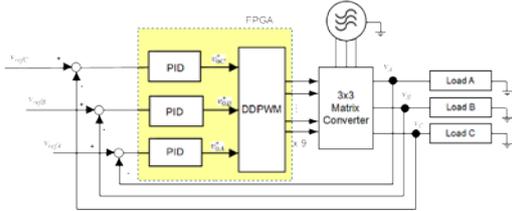


図 4 DDPWM を用いた MC 制御系

4. 研究成果

(1) MC の制御器設計

① CDM を用いた制御器設計

図 3 で提案した SISO システムの特性多項式は以下となり最適解を解析的に解くのが困難であるので PSO(粒子群最適化)を用いて最適解を探索した。

$$D(s) = L^2 s^4 + L(2R + K_{pq} + K_{pp})s^3 + \{R(K_{pq} + K_{pp}) + L(K_{ip} + K_{iq}) + R^2 + K_{pp}K_{pq} + \omega L^2\}s^2 + \{R(K_{ip} + K_{iq}) + K_{pp}K_{iq} + K_{pq}K_{iq}\}s + K_{ip}K_{iq}$$

CDM は、特性多項式の係数に着目した制御器設計手法であり、上式を

$$D(s) = a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i s^i$$

とすれば、

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1} \cdot a_{i-1}} \quad (i = 1 \dots n-1)$$

で定義された安定度指標を

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5$$

とすることが推奨されている。CDM を用い

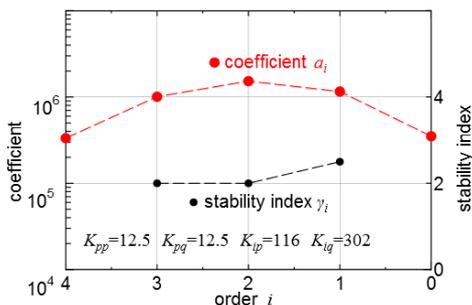


図 5 PSO で探索した係数結果

た探索結果を図 5 に示す。ここから得たゲインを用いて UPFC の電力を制御した結果を図 6 に示す。ここでは、瞬時実電力を 0.2p.u. から 0.5 p.u.に、瞬時虚電力を 0.0 p.u.から 0.2 p.u.にし、その後-0.1 p.u.にステップ上に変化させている。両軸が干渉すること無く速やかな応答が得られていることがわかる。

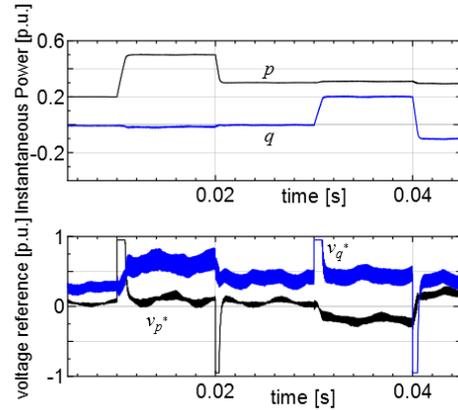


図 6 CDM で設計した UPFC の過渡応答波形

(2) FRIT を用いた制御器設計

CDM を用いた MC の制御器設計で、速やかな応答が得られたが、特性多項式を用いて制御器を設計しているため設計はシステムのパラメータに依存している。また、制御器を PID 型や 2 自由度型など、外乱に対してもロバストなものにしようとする特性多項式が複雑になり、PSO を用いてもゲインの探索ができないことが判明した。そこで、1 回の入出力データのみで未知システムの制御器パラメータ設計がオフラインで実行できる FRIT (Fictitious Reference Iterative Tuning) という手法を用いて MC ゲイン設計ができるかを検討する。図 7 に示したのは未知プラントを有し、制御器を C とする線形時不変離散システムである。ここで未知プラントは MC を用いた UPFC とする。この閉ループシステムで一度実験を行い、入力データ $u_0(k)$ と出力データ $y_0(k)$ を取得し、以下の疑似参照入力を作成する

$$\tilde{r}(k) = C^{-1}u_0(k) + y_0(k)$$

T_d を閉ループ理想応答とし、誤差信号 $\tilde{e}(k)$ を作成すると以下となる。

$$\tilde{e}(k) = y_0(k) - T_d \tilde{r}(k)$$

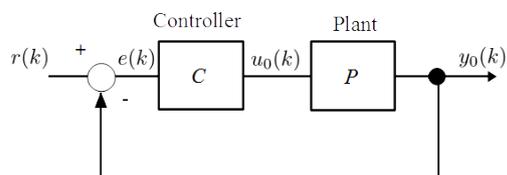


図 7 未知プラントを含む閉ループ系

この誤差信号の二乗和を用いた評価関数が最少となるように制御器を設計すれば理想応答に追従するようなゲインを求めることができる。ゲイン探索には①と同様に PSO を用いた。

シミュレーション結果を以下に示す。ここで瞬時実電力を $t=0.03s$ 地点で $0.5p.u.$ から $0.7p.u.$ に、瞬时无効電力を $t=0.07s$ で 0 から $-0.2p.u.$ に指令値を変化させている。また $t=0.04\sim 0.06s$ の間では負荷変動を起こしている。指令値や負荷の変動は互いの軸に影響を与えるが制御器を簡単にするため非干渉制御は行わず、2軸独立した2自由度系としている。構成は比例・積分・比例(P-IP)型とした。この場合6つのゲインを探索することになるが、提案手法で探索でき、このゲインを用いることで図8の応答を得ることができた。図より軸の干渉による外乱を抑制し、負荷変動の影響も小さく抑えることができていると同時に、理想波形通りにプラントが応答していることが確認できる。目標値応答と負荷応答を同時に実現することが可能という2自由度PID制御系をUPFCに適用でき、さらにFRITにより2自由度P-IP制御器を設計できることを確認した。

次にMCをDDPWMと組み合わせ、出力を単相AC+DC混在システムとした場合においてもFRITを用いれば、適切な制御器設計ができることを図9の結果を用いて示す。図9は、図4に示すシステムで出力の内、1相をAC、2相を逆極性のDCとして電圧制御した例であり、制御器はAC制御とDC制御では異なったものを設計しているがDC制御を2自由度系とし、FRITを用いて制御器設計を

行うことでほぼ満足する結果を得ることができた。

以上まとめると、MCの適用分野として静止機器を想定し、電力変換用に使用した結果、UPFCについては、瞬時電力制御を実現し、適切なゲインパラメータ設計をCDM又はFRITで行うことで高応答が実現できた。AC-DC混在システムについてもMCのスイッチング手法にDDPWMを用い、制御器設計手法にFRITを使用することで所望の応答を得ることを確認し、本研究での提案の有効性を示すことができた。

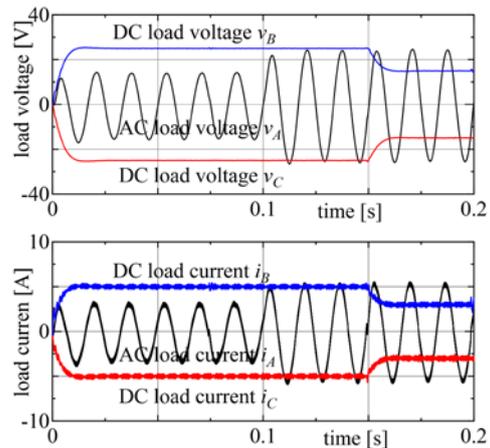


図9 MCのAC-DC混在システムへの適用例

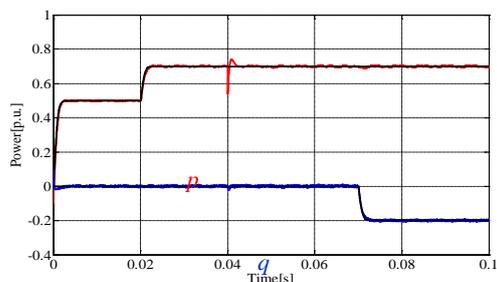


図8 FRITで設計したUPFCの過渡応答波形

表1 2自由度制御系(P-IP型)制御器のゲイン

探索ゲイン	探索結果
K_{pp}	3.92×10^{-1}
K_{Ip}	7.66×10^3
K_{pp_b}	5.73
K_{pq}	8.85×10^{-1}
K_{Iq}	1.73×10^4
K_{pq_b}	12.3

(2) MCスイッチング方式の検討とFPGAを用いた装置への実装、制御系構築

①三相・単相高周波MC

図10はFPGAで制御系を構築した三相・単相高周波MCの電流波形を示している。ここでは負荷電流を1Aから2Aにステップ状に変化させている。制御は電源電圧に同期したdq

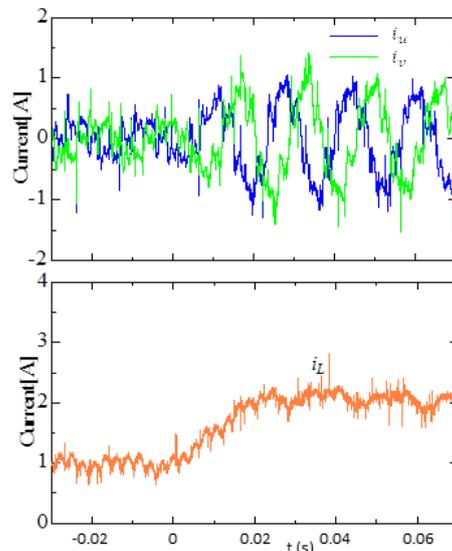


図10 三相・単相高周波MC出力電流波形

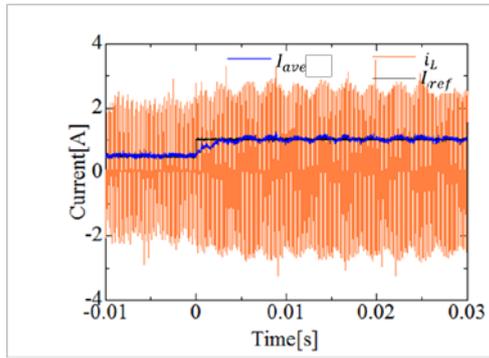


図 11 回生モードを使用した三相-単相高周波 MC ステップ応答波形

座標変換を用いて行っている。FPGA を使用しているため、三角関数はテーブルで作成し、dq 変換、逆 dq 変換を行っている。電源側の電流の大きさ及び位相、出力電流の大きさを 3 つの PI 制御器を実装することで実現している。

高周波出力を得るためには電流の極性が出力周波数に従って入れ替わらないといけないが、回路中のインダクタンス成分により時定数が大きくなる場合がある。そのため MC の特徴の 1 つである負荷側の電流を電源に強制的に戻す回生モードを組み込むことを提案した。図 11 は回生モードを使用した場合のステップ応答の結果を示している。高速応答が実現しており、三相 - 単相高周波 MC のデジタルハードウェア制御系が FPGA 用いて構築できたと言える。

②DDPWM を実装した MC

出力を高周波とする目的は、負荷と電源側を絶縁する変圧器の小型化であるが、MC の適用用途を拡大するためには UPFC 等の商用周波数を用いた周波数可変出力システムの実現が望ましい。そこで DDPWM のスイッチングパターンを FPGA に実装した。図 12 は定常状態でのデューティ比の値を出力したものであり最大、中間、最少相の計算が

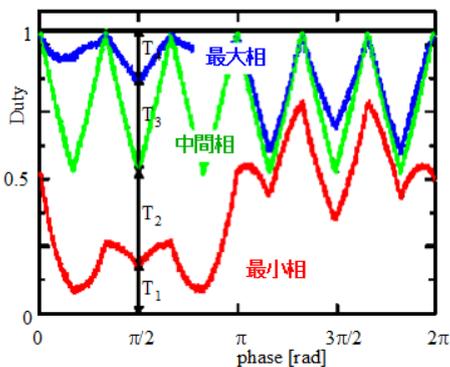


図 12 DDPWM 方式で計算したデューティ比

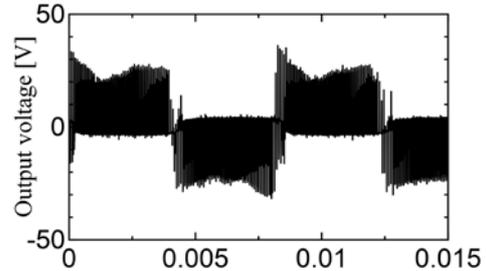
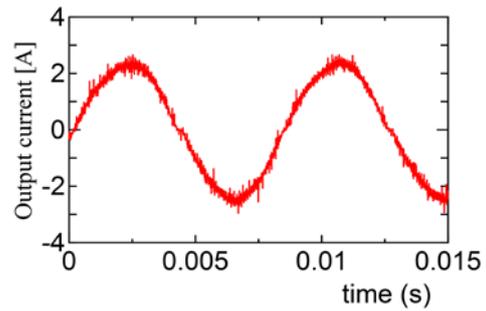


図 13 120Hz 時の出力電流電圧波形

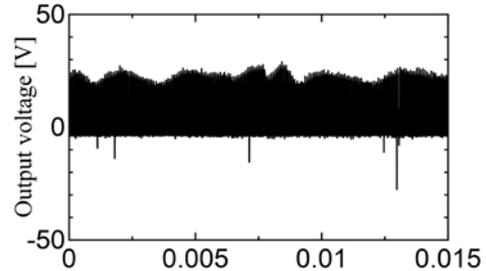
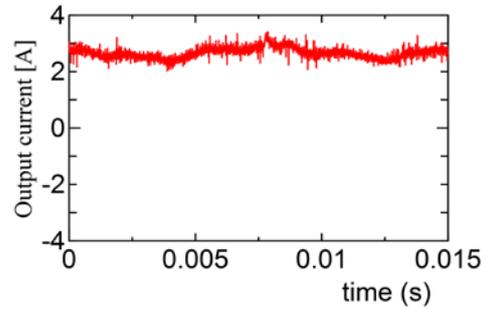


図 14 直流出力電流電圧波形

ハードウェアで実現できていることを示している。

次に実験機での出力電圧電流波形を示す。図 13 は出力周波数を 120Hz に設定した場合の MC 出力電流電圧であり、電圧は PWM により矩形波状になっているが、電流は高調波の少ない所望の交流波形が得られている。図 14 は DDPWM の特徴である柔軟なスイッチングパターンの例として直流出力を発生させている。同図より約 3A の直流電流を出力できていることが分かる。

以上まとめると MC のスイッチング方式に DDPWM を使い、それを FPGA に実装することで適切に AC-AC 変換が行えていることを、供試機を用いて確認することができた。

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 2 件)

- ① K.Motoyama, T.Hanamoto, H.Yamada, N.F.Mailah, M.Norhisam, Study of Matrix Converter Based Unified Power Flow Controller Applied PI-D Controller, Journal of Engineering Science and Technology Special Issue on Applied Engineering and Science, 査読有, Vol.9 pp.30-38, 2014
- ② Tsuyoshi Hanamoto, Hiroaki Yamada, Nashiren Mailah, Misron Norhisam, Controller Design Using Coefficient Diagram Methods for Matrix Converter Based Unified Power Flow Controllers, pp.369-374, Journal of Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics (JSAEM), 査読有, Vol.21, No.3, 2013

[学会発表] (計 6 件)

- ① 本山海地、花本剛士、山田洋明、マトリクスコンバータを用いた Unified Power Flow Controller の制御器設計、平成 26 年電気・情報関係学会九州支部連合大会、04-1P-07、2014 年 9 月 19 日、鹿児島大学(鹿児島)
- ② T.Hanamoto, H.Yamada, S.Toosi, N.F.Mailah, M.Norhisam, DDPWM based Power Conversion System Using Matrix Converter for Isolated Power Supply, The 8th Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, July 25, 2014, 台中(台湾)
- ③ 松木健太、花本剛士、山田洋明、DDPWM 方式を用いたマトリクスコンバータのデジタルハードウェア制御に関する研究、平成 25 年電気・情報関係学会九州支部連合大会、04-2A-05、2013 年 9 月 13 日、熊本大学(熊本)
- ④ 山田洋明、花本剛士、マトリクスコンバータを用いた風力発電システムにおけるかご形誘導機系統並列時の突入電流抑制法、平成 25 年電気学会産業応用部門大会、1-37、2013 年 8 月 28 日、山口大学(山口)
- ⑤ 竹下京佑・花本剛士・山田洋明、三相 - 単相高周波マトリクスコンバータにおけるデジタルハードウェア制御に関する研究、電気関係学会九州支部連合大会、04-1P-08、2012 年 9 月 24 日、長崎大学(長崎)
- ⑥ 川邊慎伍・花本剛士・山田洋明、マトリクスコンバータを用いた電力用高速位相器(UPFC)の制御器設計に関する研究、電気関係学会九州支部連合大会、04-1P-07、2012 年 9 月 24 日、長崎大学

(長崎)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花本 剛士 (HANAMOTO, Tsuyoshi)

九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授

研究者番号：30228514