

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 6 年 3 月 13 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K14555

研究課題名（和文）施設園芸の省エネを推進するユーザー指向型設計プラットフォームの開発

研究課題名（英文）Development of an user-oriented greenhouse design platform to promote energy-saving agricultural production

研究代表者

土屋 遼太（Tsuchiya, Ryota）

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・研究員

研究者番号：30782205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、パイプハウスや温室など園芸施設の栽培環境と消費エネルギーの同時シミュレーションが可能なプログラムを構築した。本プログラムは、商用ビルや住居など一般建築物のエネルギー消費計算のため広く使用されるEnergyPlusに、園芸施設特有の伝熱プロセスを組み込むことで開発した。開発にあたっては、無栽植条件で側窓を閉鎖したパイプハウスの内部環境の計測から改良点を明らかにし、この結果から園芸施設エネルギー消費・環境シミュレーションプログラムを構築した。また、施設園芸でエネルギー消費の大半を占める温風暖房機およびヒートポンプ（HP）のモデルを構築し、HPへの切り替えによる省エネ効果を算定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

施設園芸では、冬季暖房での石油燃料消費や夏季冷房による電力消費などにより、多大なエネルギー消費を伴う栽培である。エネルギー分野の温暖化ガス排出量として農林水産業全体の3分の1を占めており、脱炭素化の流れが加速するなか、施設園芸分野からの排出量削減は重要である。地政学・経済学的要因による石油価格の高騰に伴い、これまでも暖房・冷房負荷を軽減する個別技術は開発されてきたが、現場での脱炭素化をすすめるためには、当地の気象条件や栽培作物の違いを反映させた最適な技術の組み合わせにより、施設・設備の設計を行うことが必要であり、本研究で開発したプログラムはこの最適設計を行うツールとして活用できるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, the program available to simulate internal environment and energy consumption of greenhouses was developed. The program was developed through introducing greenhouse-specific heat transfer process to EnergyPlus, which is globally utilized to simulate energy consumption in commercial and residential buildings based on heat transfer and HVAC calculation. The heat transfer and internal environment of the simple greenhouse were measured and compared with the EnergyPlus simulation. From this comparison, the points to be improved were revealed. The new program of greenhouse energy and internal environment simulation was developed based on this result. For the environmental control simulation of greenhouses, a fossil fuel heater and an air to air heat pump were modeled and the effect of energy saving by replacing a fossil fuel heater with a heat pump was simulated using EnergyPlus.

研究分野：農業環境工学

キーワード：施設園芸 エネルギー収支 栽培環境 温室モデル シミュレーション ユーザー指向プログラム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1．研究開始当初の背景

施設園芸は、特に冬季暖房の石油依存による農林水産業の3割を占めるエネルギー消費の大きさが特徴であり、脱炭素化に向けた省エネルギー（省エネ）対策の実施や様々な再生可能エネルギーの複合利用が必要である。これまでも、地政学的・経済学的なリスクに伴う化石燃料の大幅な価格変動が生じる度に施設栽培における省エネ技術が開発・提案されてきた。一方、初期には冬季の作物栽培を目的として開発されてきた温室は、現在では冷房の利用による周年栽培が目指されるようになっており、地球温暖化がすすむ中でエネルギー消費量は更に増大する傾向にある。しかし、世界的に脱炭素化の流れが加速化する中、施設園芸分野でのエネルギー大規模消費・化石燃料依存からの脱却は必須となっており、これを達成するためには個別技術の開発のみならず、ヒートポンプなどの空調技術と新たな保温資材の導入など、各種技術の最適な組み合わせによる省エネ・脱炭素効果の最大化が必要である。最適な対策技術の組み合わせを検討する上で、温室やパイプハウスなどの園芸施設の構造や使用資材の物性値を反映させることが可能な熱収支モデルは園芸施設のエネルギー消費と生産性に直結する環境要因の変動を最適化する強力なツールとなり得る。さらに、こうした最適化により、設備への過剰投資を避けることにより、農業経営上のコスト削減も期待できる。これまでに、様々な研究グループにより、園芸施設の熱収支モデルが開発されてきた。しかし、これらは研究者・研究チームごとに開発され、プログラムの公開・共有はなされていない場合が多いことや、研究目的で開発されてきたため、現場で利用する場合、利用難度が高い場合が多い。今後、各地域の気象特性に合わせて最適な施設設計、設備・資材選定、環境制御のシステム設計を行う上で、現場レベルで利用できるユーザーインターフェースを有し、継続的なモデル開発の基盤となり得る園芸施設エネルギー・熱収支モデルの開発が必要である。

2．研究の目的

園芸施設工学分野と比較して、一般建築分野では汎用的なエネルギー・熱収支モデルが利用されており、20年以上にわたる継続的な開発が行われているプログラムが存在している。こうしたモデルの特徴として、ユーザーインターフェースの機能性の高さ、豊富な空調設備モジュールの存在、プログラムの拡張性、長期間にわたる一つの計算モデルのブラッシュアップによる数値計算の安定性などが考えられる。こうした特徴は、園芸施設を対象としたエネルギー消費・施設内環境予測においても活用できるものである。そこで、本研究では長期間にわたり開発が行われてきた建築物エネルギーモデルをベースに、園芸施設特有の伝熱プロセスを反映させたモジュールを構築・導入することにより、既往プログラムの利便性の高さを活かした、ユーザ指向型プログラムの開発を行う。

3．研究の方法

本研究で開発する園芸施設エネルギー・環境シミュレーションプログラムは、米国エネルギー庁(U.S. Department of Energy; DOE)および国立再生可能エネルギー研究所(National Renewable Energy Laboratory; NREL)により開発されたEnergyPlusをもとに開発した。EnergyPlusは20年以上にわたり開発の続く建築物エネルギーモデルであり、様々なサードパーティプログラムをインターフェースとして利用可能であり、また、オープンソースで開発されたプログラムであるため、拡張性の高さを特徴として有する。本研究では、EnergyPlusの熱収支計算アルゴリズムの数値計算上の安定性を最大限に活用すべく、EnergyPlusで想定する伝熱プロセスと園芸施設の伝熱プロセスの相違を明らかにした上で、施設園芸への省エネ技術導入効果の算定へのEnergyPlusの有効性を評価する。これらによって得られるEnergyPlusの長所を最大限活かすため、公開されているEnergyPlusプログラムのソースコードを解析し、EnergyPlusのアルゴリズム上不自然のない形で園芸施設モジュールを導入することで、園芸施設エネルギー・環境シミュレーションプログラムを構築する。

(1) EnergyPlusによるシミュレーション結果と実際の園芸施設伝熱プロセスの比較

日本国内で設置面積が最大の園芸施設であるパイプハウス(6.0 m×9.9 m)を茨城県つくば市の農研機構農村工学研究部門に設置し、換気を行わない完全閉鎖・無栽植条件での内部気象(気温・相対湿度・日射量・地表伝熱量・放射収支)を2019年2月7日～13日の期間計測した。

また、3次元建築設計プログラムSketchUpを用いてパイプハウス構造モデルを作成し、当該モデルを、EnergyPlusを視覚的に運用することを補助するサードパーティプログラムOpenStudioを用いて入力し、現地で計測した外部気象データにより内部環境シミュレーションを実施した。なお、EnergyPlusでは法線面直達日射強度と散乱日射強度の入力が必要であるが、現地では全天日射量のための計測であるため、引用文献に基づき、日時、緯度経度、太陽定数を入力することで全天日射量から法線面直達日射強度と散乱日射強度を算出するプログラムを作成した。

これらにより得られたシミュレーション結果と実測データの比較により、オリジナルのEnergyPlusの伝熱モデルと園芸施設内の伝熱プロセスの相違を明らかにし、新たに構築するモ

デルの必要条件を明らかにした。

(2) EnergyPlus を用いた園芸施設の空調設備シミュレーション

EnergyPlus のシミュレーションは空間の熱収支計算と空調システム計算からなる。また、EnergyPlus では、多様な空調機器モジュールのライブラリを有しており、それらのモジュールを組み合わせることで石油暖房やヒートポンプの運転シミュレーションを行うことが可能である。そこで、現行の EnergyPlus を用いて温室のエネルギー消費モデルを構築し、化石燃料に依存した暖房(温風暖房機)から空気熱源ヒートポンプに移行した場合の省エネ効果をシミュレーションした。

本研究では、園芸施設で使用される化石燃料使用型の温風暖房機およびヒートポンプのモデルを OpenStudio の既存ライブラリの空調設備モジュールの組み合わせにより構築し、茨城県つくば市の農研機構農村工学研究部門に設置された実際に栽培に共用されているガラス温室の構造モデルを利用してシミュレーションを行った。ただし、本試験は空調シミュレーションの実験としてシンプルにするため、保温被覆等の効果や園芸施設特有の伝熱プロセスは反映していない。また、このシミュレーションを通じて、温風暖房機をヒートポンプに切り替えた場合の省エネルギー効果の検証を試験的に行った。

(3) 園芸施設エネルギー・環境シミュレーションプログラムの開発と実証データによる検証

研究方法(1)の結果から得られた EnergyPlus と園芸施設の伝熱過程の相違を解消するため、既往研究の文献調査により園芸施設熱収支モデルを複数比較し、EnergyPlus の計算アルゴリズムとの相性の良さや入力パラメータが比較的単純であることを基準に数値モデルの構築を行った。EnergyPlus の計算アルゴリズムについて、以下の引用文献 ~ を参考にコード解析を行い、園芸施設用モジュールを導入した新モデルのアルゴリズムを設計しフローチャートを作成した上で、コーディングした。

また、新たに開発した園芸施設エネルギー・環境シミュレーションプログラムと EnergyPlus のシミュレーション結果、および方法(1)で得た実測データとの比較から新たに構築したプログラムのパフォーマンスを評価した。

4. 研究成果

(1) EnergyPlus を用いた無暖房単棟パイプハウス環境のシミュレーション

現行の EnergyPlus を用いて、暖房を行わない単層被覆の単棟パイプハウスにおいて、無栽植条件での環境のシミュレーションを行った。

まず、シミュレーションに必要な気象データのうち、直接計測するのが難しい法線面直達日射量と分散日射量を全天日射量から計算するために作成したプログラムの精度について、NEDO が公表している日射量データベース(引用文献)の値との比較を行い、十分な精度を有していることを確認した(図1)。

ここで求めた直達・分散日射量を含めた気象データを使用して行った、EnergyPlus ver9.3.0 のシミュレーションの結果とパイプハウスでの実測値との比較結果を図2に示す。気温と床表面温度については、計測値と予測値の間の時間変動の相関性を評価する決定係数(R^2)はそれぞれ0.87と0.91、誤差の大きさを示す根平均二乗誤差(RMSE)はそれぞれ3.0と4.1であり、誤差の大きさは多少あるものの、一定水準で予測していることを確認した。一方、相対湿度と絶対湿度(水蒸気密度を乾燥空気密度で除することで求める)に着目すると、 R^2 はそれぞれ0.68と0.00026、RMSEはそれぞれ26、0.0034となっており、既存の EnergyPlus では、園芸施設内の水蒸気変動を再現することができていないことを確認した。本試験では、換気を行わない完全閉鎖条件を対象としている。そのため、計測データに見られる絶対湿度の時間変動の要因は、床面土壌からの水分蒸発によるものである。EnergyPlus は一般的な建築物を対象としており、農地のように地中からの水分蒸発が多く発生する環境を想定して設計されていない。従って、この

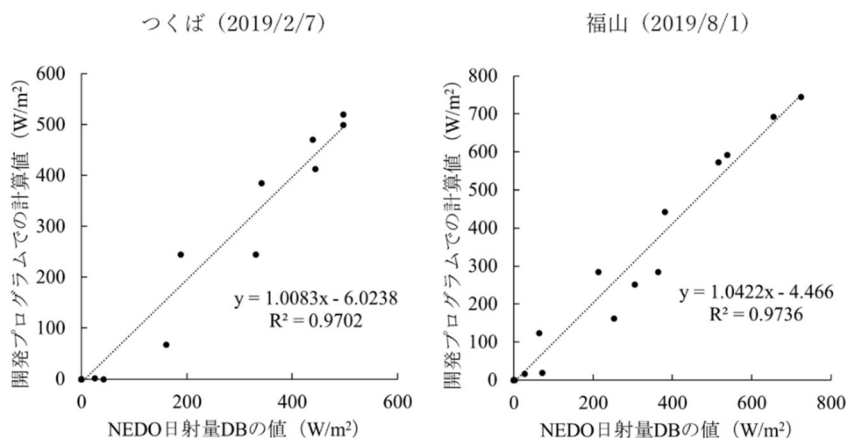


図1 NEDO 日射量データベースと本研究のプログラムによる水平面直達日射量計算値比較

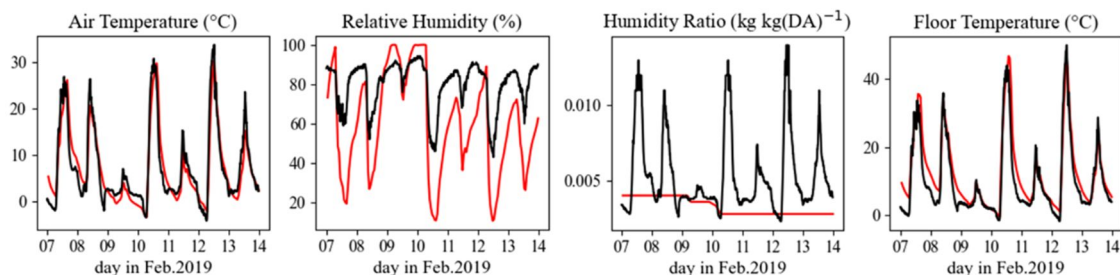


図 2 EnergyPlus(原版)によるパイプハウスの環境シミュレーション (左から気温, 相対湿度, 絶対湿度, 床面温度; それぞれ赤線がシミュレーション値, 黒線が計測値)

(a) 設定気温14°C

(b) 設定気温12°C

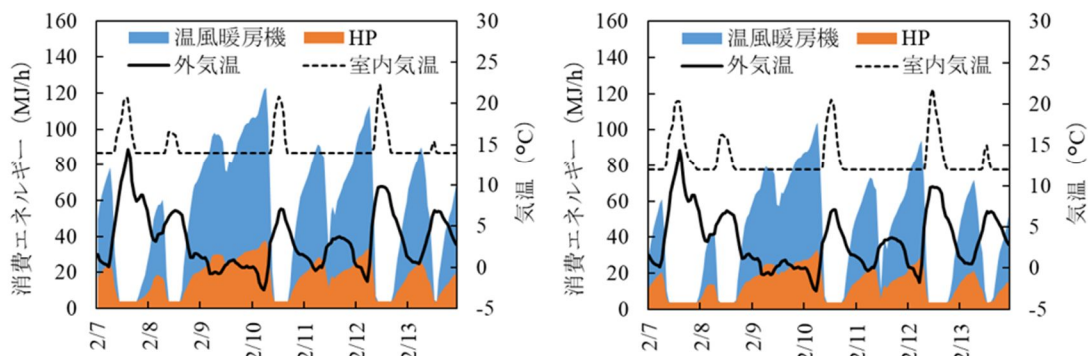


図 3 2019 年 2 月 7 日 ~ 13 日のエネルギー消費・室内気温の計算値と屋外気温の比較

差異はモデルの構造上の問題であると指摘できる。既往研究において園芸施設でのエネルギー利用評価に EnergyPlus を使用した事例はあるが(引用文献 ~),湿度環境について検討した事例はない。園芸施設床面での水分蒸発は潜熱伝達として園芸施設の熱収支に影響を与えるものであるため,水分蒸発を再現しないモデルでのシミュレーションには正確性の問題があるといえる。そのため,この点についてはモデルの改良が必要である。

(2) EnergyPlus の既存モジュールによる園芸施設の環境制御機器シミュレーション

農研機構農村工学研究部門のガラス温室の構造モデルを対象に石油使用の温風暖房機(本温室では灯油を使用)とヒートポンプを使用した場合のシミュレーションを行った。本研究では 2019 年 2 月 7 日 ~ 13 日の 1 週間において,設定気温を 12 と 14 で変化させた場合のエネルギー消費量と室温の予測結果を比較した(図 3)。暖房方法および設定温度を変化させた場合の消費エネルギーを比較すると,図 4 に示されるように設定温度を 2 下げることによる省エネ効果は 20%程度である一方で,灯油を使用した温風暖房機をヒートポンプに交換することで 60%以上の省エネ効果が得られるという結果を数値的に示すことが可能であることを示した。ただし,本シミュレーションは園芸施設の伝熱プロセスを反映させていない原版の EnergyPlus を用いているため,正確な効果の算定のためには,次項で述べる園芸施設モジュールの導入による精度の向上が必要であることに留意が必要である。

(3) EnergyPlus をベースにした園芸施設エネルギー・環境モデルの開発と検証

図 2 に示された通り,現行の EnergyPlus を園芸施設のシミュレーションに適用するにあたっては,本モデルが空気中の水収支を全く再現できていないという問題がある。また,その他にも園芸施設は一般建築物と概念面でも相違している。そこで,施設園芸の脱炭素シミュレーションを行うため,EnergyPlus に以下の点の改良を加えた。改良点の概念については,図 5 に図示する。

a. 植物体および耕地土壌の熱収支・蒸散モデルの導入

EnergyPlus は建築設計向けのプログラムであり,床面は床材で被覆されているため,多くの場合,水蒸気の発生源およびダイナミックな吸湿・放湿過程は想定されていない。そこで,本改

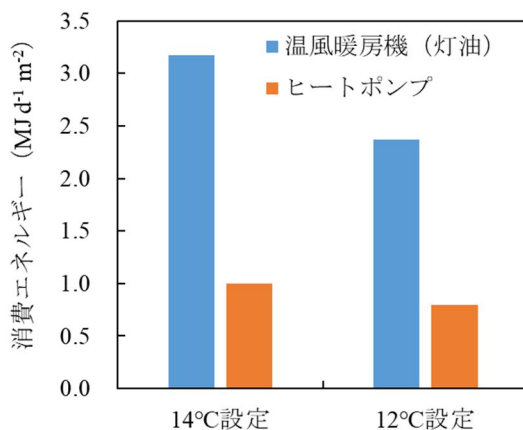


図 4 暖房方法・設定温度を変更した場合の日当たり・単位面積当たりの消費エネルギーの比較

良モデルでは、既存の温室専用環境モデルを複数参照し、EnergyPlus との相性を考慮しモデルを構築した。参照したモデルは、GDGCM モデル(引用文献) Stanghellini らのモデル(引用文献) EnergyPlus に内蔵されている Green Roof Model (屋上緑化モデル; 引用文献) の 3 種で、EnergyPlus のアルゴリズムを俯瞰したうえでそれぞれの過程に対し、各モデルから最適なサブモデルを選択して EnergyPlus のソースコードに組み込んだ。

また、GDGCM モデルに組み込まれている園芸施設の被覆面での結露計算も導入した。結露は、水蒸気圧やそれに関連した潜熱収支に影響する。また、水が園芸施設床面や植物体からの、本来プラスチックフィルムハウスでは壁面を透過する長波放射を吸収するという面でも、園芸施設の熱収支に影響するため、この点への注目は重要である。

b. 空気の水収支モデルの改良

項目 a で開発したサブモデルで発生させた水蒸気(園芸水蒸気)を適切に EnergyPlus における空間空気水収支計算に組み込むため、アルゴリズムの最適な部分で園芸水蒸気を空間空気に追加するようコードを書き換えた。

以上の改良を加えたモデルによりシミュレーションを行うと、図 2 に見られたような絶対湿度の無反応性を解消し、日中の絶対湿度の上昇を再現することに成功した。ただし、気温、絶対湿度、床表面温度の予測精度は低下した。これらから、今回行ったコードの書き換えでモデル構造についてはオリジナルの EnergyPlus より園芸施設に近づけられたが、今後、変数の調整が必要である。

なお、本プログラムはオリジナルのプログラムとデータ入力形式を共有しているため、OpenStudio などの GUI をモデル運用に活用できる点を特徴のひとつとしている。

<引用文献>

- 日本太陽エネルギー学会, 新太陽エネルギー利用ハンドブック, 2000, 1-41.
- U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.3.0 Documentation: Engineering Reference, 2020.
- U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.3.0 Documentation: Input Output Reference, 2020.
- U.S. Department of Energy, EnergyPlus Version 9.3.0 Documentation: Guide for Module Developers, 2020.
- 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 日射量データベース閲覧システム, <https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/index.html> (2021/6/9 閲覧)
- Enrico Fabrizio, Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection, Energy and Buildings 53, 2012, 57-63.
- In Tak Hyun, Jae Ho Lee, Yeo Beom Yoon, Kwang Ho Lee, Yujin Nam, The Potential and Utilization of Unused Energy Sources for Large-Scale Horticulture Facility Applications under Korean Climatic Conditions, Energies 7, 2014, 4781-4801.
- Alessandro Deiana, Enrico Fabrizio, Raffaella Gerboni, Energy performance optimization of typical Chinese solar greenhouses by means of dynamic simulation, Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, 2014, C0233.
- J.G. Pieters and J.M. Deltour, Performances of Greenhouses with the Presence of Condensation on Cladding Materials, Journal of Agricultural Engineering Research 68 (2), 1997, 125-137.
- Cecilia Stanghellini, Bert van 't Ooster, Ep Heuvelink, Greenhouse horticulture: Technology for optimal crop production, Wageningen Academic Publishers, 2019.

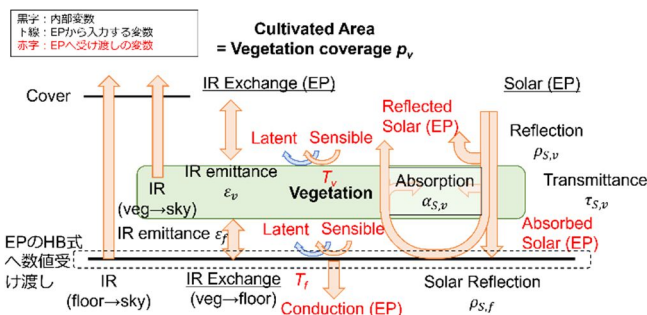


図 5 新たな園芸施設モデルの概念図

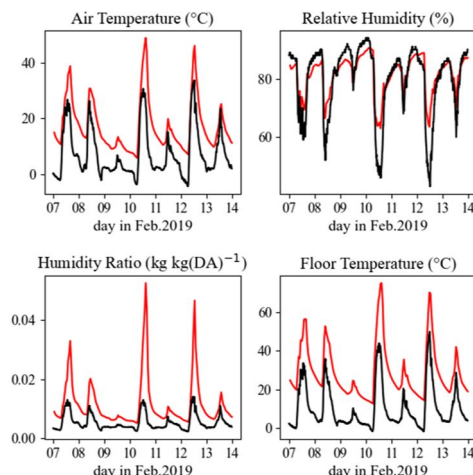


図 6 新たなモデルでの計算結果(凡例は図 2 に準ずる)

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1．発表者名 土屋 遼太，奥島里美，石井雅久，山口智治
2．発表標題 建築物エネルギーモデルEnergyPlusによる園芸施設環境のシミュレーション
3．学会等名 2019年農業食料工学会・農業施設学会・国際農業工学会第6部会合同国際大会
4．発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------