

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年12月12日(12.12.2024)



(10) 国際公開番号
WO 2024/252510 A1

(51) 国際特許分類:
F02D 45/00 (2006.01)

市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学
法人東北大学内 Miyagi (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2023/020935

(22) 国際出願日: 2023年6月6日(06.06.2023)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 国立大学法人東北大学 (TOHOKU
UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒9808577 宮城県仙台
市青葉区片平二丁目1番1号 Miyagi (JP).

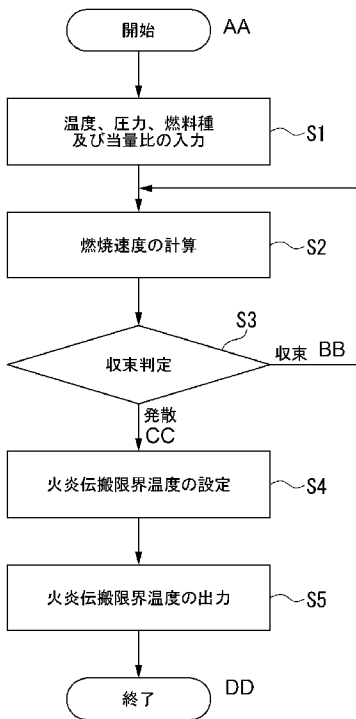
(72) 発明者: 丸田 薫 (MARUTA Kaoru); 〒9808577
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号
国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 森
井 雄飛 (MORII Yuhi); 〒9808577 宮城県仙台

(74) 代理人: 田 ▲ 崎 ▼ 聡, 外 (TAZAKI Akira et
al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一
丁目9番2号 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA,
BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN,
CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC,
EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU,
LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,

(54) Title: KNOCKING PREDICTION METHOD, KNOCKING PREDICTION DEVICE, COMBUSTION DEVICE
DESIGN METHOD, POWER GENERATION DEVICE DESIGN METHOD, VEHICLE DESIGN METHOD, AND
FUEL DESIGN METHOD

(54) 発明の名称: ノッキング予測方法、ノッキング予測装置、燃焼装置の設計方法、動力
発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法



S1 Input temperature, pressure, fuel type,
and equivalence ratio
S2 Calculate combustion speed
S3 Convergence determination
S4 Set fire propagation limit temperature
S5 Output fire propagation limit temperature
AA Start
BB Convergence
CC Divergence
DD End

(57) Abstract: The purpose of the present disclosure is to provide a knocking prediction method capable of further improving accuracy. The present disclosure pertains to a knocking prediction method for predicting knocking that may occur in a premixed combustion field, and adopts a means of predicting knocking on the basis of the knowledge that, in a pre-

PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK,
SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

規則4. 17に規定する申立て:

- 一 不利にならない開示又は新規性喪失の例外に関する申立て (規則4. 17(v))

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

mixed combustion field, a temporal change in a normalized fuel mass fraction and a normalized temperature in a zero-dimensional homogeneous ignition is equivalent to a spatial change in a one-dimensional laminar flow premixed flame.

(57) 要約: 本開示は、精度をより向上させることが可能なノッキング予測方法の提供を目的とする。本開示は、予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、予混合燃焼場において、ゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化と1次元層流予混合火炎における空間的变化とが等価であるという知見に基づいてノッキングを予測する、という手段を採用する。

明 細 書

発明の名称：

ノッキング予測方法、ノッキング予測装置、燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法

技術分野

[0001] 本開示は、ノッキング予測方法、ノッキング予測装置、燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法に関する。

背景技術

[0002] 周知のようにガソリン・エンジン等、予混合燃焼方式の内燃機関では、ノッキングの抑制が設計上の重要課題である。ノッキングは、燃焼室内の未燃ガスが自着火することによって発生する衝撃波を伴う現象であり、エンジンを破損する可能性がある。内燃機関の設計では、燃焼室の圧力及び温度(圧縮比)をノッキングが発生しないように下げることが行われる。

[0003] 一方、ノッキング予測方法として、「Livengood-Wu積分」が周知である。この「Livengood-Wu積分」は、燃焼室内の圧力及び温度を変化させた際の着火遅れ時間を見積もって時間積分していく手法であり、時間積分値が「1」になった時に自着火つまりノッキングが発生するというものである。「Livengood-Wu積分」は、下記特許文献1、2等 to 示すように実機エンジンの設計において広く利用されている

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：日本国特開2004-332584号公報
特許文献2：日本国特開2007-127004号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] ところで、「Livengood-Wu積分」は簡便な手法であり、ノッキング（着火）の発生をある程度予測できるものの、その予測精度は必ずしも十分なものとは言えない。動力発生装置として機能する内燃機関の能力を最大限利用するためには、「Livengood-Wu積分」よりも予測精度が高いノッキング予測方法の確立が切望されている。

[0006] 本開示は、上述した事情に鑑みてなされたものであり、精度をより向上させることが可能なノッキング予測方法及びノッキング予測装置の提供を目的とする。

また、本開示は、燃焼装置、動力発生装置、車両の設計方法及び燃料の実質的な性能を高めることが可能な燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0007] 本開示の第1の態様に係るノッキング予測方法は、予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、前記予混合燃焼場において、ゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化と1次元層流予混合火炎における空間的变化とが等価であるという知見に基づいてノッキングを予測するものである。

[0008] 本開示の第2の態様に係るノッキング予測方法は、予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、正規化温度と燃料の正規化燃料質量分率との関係を示す特性図において、ルイス数が1より大きい燃料を前記ノッキングの可能性があるとし、前記ルイス数が1より小さい燃料を前記ノッキングの可能性がないとするものである。

[0009] 本開示の第3の態様に係るノッキング予測方法は、予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、前記予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算する計算工程と、前記予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために前記燃焼速度が取得不能になったか否かを判定する判定工程と、最後に取得された前記燃焼速度に対応する前記入口温度を前記ノッキングの発生条件と

して取得する発生条件取得工程とを有するものである。

[0010] 本開示の第4の態様に係るノッキング予測方法は、第3の態様に係るノッキング予測方法において、前記計算工程では、前記予混合燃焼場における未燃混合気、火炎の反応帯及び既燃焼気体を含む領域の大きさを、火炎が包含できる限界まで小さくして計算するものである。

[0011] 本開示の第5の態様に係るノッキング予測方法は、第3又は第4の態様に係るノッキング予測方法において、ルイス数が1より大きい燃料を予測対象とするものである。

[0012] 本開示の第1の態様に係るノッキング予測装置は、予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測装置であって、前記予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算する計算手段と、前記予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために前記燃焼速度が取得不能になったか否かを判定する判定手段と、最後に取得された前記燃焼速度に対応する前記入口温度を前記ノッキングの発生条件として取得する発生条件取得手段とを備えるものである。

[0013] 本開示の第2の態様に係るノッキング予測装置は、第1の態様に係るノッキング予測装置において、前記計算手段は、前記予混合燃焼場における未燃混合気、火炎の反応帯及び既燃焼気体を含む領域の大きさを、火炎が包含できる限界まで小さくして計算するものである。

[0014] 本開示の第3の態様に係るノッキング予測装置は、第1又は第2の態様に係るノッキング予測装置において、前記計算手段は、ルイス数が1より大きい燃料を計算対象とするものである。

[0015] 本開示の第1の態様に係る燃焼装置の設計方法は、第3又は第4の態様に係るノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて燃焼装置を設計するというものである。

[0016] 本開示の第1の態様に係る動力発生装置の設計方法は、第3又は第4の態様に係るノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて動力発生装置を設計するというものである。

[0017] 本開示の第1の態様に係る車両の設計方法は、第3又は第4の態様に係るノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて車両を設計するというものである。

[0018] 本開示の第1の態様に係る燃料の設計方法は、第3又は第4の態様に係るノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて燃料を設計するというものである。

発明の効果

[0019] 本開示によれば、精度をより向上させることが可能なノッキング予測方法、ノッキング予測装置、燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法を提供することが可能である。

また、本開示によれば、燃焼装置、動力発生装置、車両の設計方法及び燃料の実質的な性能を高めることが可能な燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法を提供することが可能である。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]本開示の実施形態に係るノッキング予測方法を示すフローチャートである。

[図2]本開示の実施形態に係るノッキング予測装置の機能構成を示すブロック図である。

[図3]本開示の実施形態の理論説明で取り扱う各種物理量の一覧表である。

[図4]本開示の実施形態におけるノッキング予測特性を示す第1の特性図である。

[図5]本開示の実施形態におけるノッキング予測特性を示す第2の特性図である。

[図6]本開示の実施形態におけるノッキング予測特性を示す第3の特性図である。

[図7]本開示の実施形態におけるノッキング予測方法の比較例を示す特性図である。

発明を実施するための最良の形態

[0021] 以下、図面を参照して、本開示の実施形態について説明する。

図1は、本実施形態に係るノッキング予測方法を示すフローチャートである。このフローチャートは、燃料と空気（酸化剤）とからなる予混合気を火花点火のような強制的な手段により着火させることにより燃焼させる予混合燃焼場（燃焼室）について、ノッキングの発生条件である火炎伝播限界温度つまりノッキングが発生する初期温度の取得手順を示している。

[0022] また、このフローチャートは、所定のコンピュータによって実行されるノッキング予測プログラム（シミュレーションプログラム）の処理手順の概要を示すものである。すなわち、本実施形態に係るノッキング予測方法は、コンピュータを用いた情報処理（シミュレーション）によって実現されるものである。

[0023] 本実施形態に係るノッキング予測方法を実行するコンピュータつまり上記ノッキング予測プログラムが搭載されたコンピュータは、本実施形態に係るノッキング予測装置である。すなわち、本実施形態に係るノッキング予測装置は、ノッキング予測プログラムを実行することにより、予混合燃焼場におけるノッキングの発生条件を出力する装置である。

[0024] 図2は、本実施形態に係るノッキング予測装置Aの機能構成を示すブロック図である。ノッキング予測装置Aは、図2に示すように、ノッキング予測プログラムを予め記憶する記憶部1、ノッキング予測プログラムを実行する演算部2、演算部2に作業者の操作指示を入力する操作部3、演算部2の演算結果つまり上記火炎伝播限界温度（初期温度）を外部に出力する出力部4を少なくとも備えている。

[0025] ノッキング予測装置Aの構成要素のうち、記憶部1、演算部2及び操作部3は、本開示における計算手段を構成している。詳細については後述するが、記憶部1、演算部2及び操作部3は、協働することにより、予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算する。

- [0026] また、ノッキング予測装置 A における記憶部 1、演算部 2 及び操作部 3 は、本開示における判定手段を構成している。すなわち、記憶部 1、演算部 2 及び操作部 3 は、協働することにより、予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために燃焼速度が取得不能になったか否かを判定する。
- [0027] さらに、ノッキング予測装置 A における記憶部 1、演算部 2 及び操作部 3 は、本開示における発生条件取得手段を構成している。すなわち、記憶部 1、演算部 2 及び操作部 3 は、協働することにより、最後に取得された燃焼速度に対応する入口温度（火炎伝播限界温度）をノッキングの発生条件として取得する。
- [0028] ここで、本実施形態に係るノッキング予測装置 A の計算手段は、本実施形態に係るノッキング予測方法における計算工程に対応する。また、本実施形態に係るノッキング予測装置 A の判定手段は、本実施形態に係るノッキング予測方法における判定工程に対応する。さらに、本実施形態に係るノッキング予測装置 A の発生条件取得手段は、本実施形態に係るノッキング予測方法における発生条件取得工程に対応する。
- [0029] 本実施形態における予混合燃焼場は、例えば車両に動力発生装置として搭載されるガソリン・エンジン等の内燃機関（原動機）の燃焼室に相当する燃焼場である。ガソリン・エンジン等の設計においては、ノッキングが発生しないように、つまり未燃ガスの自着火が発生しないように圧縮比を下げる等の対策が施される。なお、上記内燃機関には、直噴エンジンや副室を有するエンジンが含まれる。
- [0030] すなわち、本実施形態に係るノッキング予測方法は、予混合燃焼場（燃焼室）を備える燃焼装置、動力発生装置（原動機）及び車両等の設計方法に係るものである。また、本実施形態に係るノッキング予測方法は、予混合燃焼場で燃焼する燃料の設計方法にも関係するものである。
- [0031] このような本実施形態に係るノッキング予測方法は、予混合燃焼場に火炎の時空間変換が適用される場合において、ゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化が 1 次元層流予混合火炎における

空間的变化と等価であることを前提としている。

[0032] すなわち、このノッキング予測方法は、ゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化と１次元層流予混合火炎における空間的变化との等価性に関する理論的根拠に基づくものである。

[0033] この理論的根拠によれば、予混合燃焼場の予熱域における正規化燃料質量分率の低下の度合いは、燃料のルイス数が１未満、ルイス数が１（＝点火）、ルイス数が１より大の順で速くなる。さらに、爆発的遷移付近の予熱域における自着火は、１より大きいルイス数を有する１次元層流予混合火炎に対してのみ起こり得ることが導き出される。

[0034] すなわち、火炎伝播の時間変化は、予混合燃焼場において圧縮された予混合気又は衝撃波と同程度の大きさである。また、予混合燃焼場における燃料のルイス数は、予混合火炎構造の存在を決定づける物理量であることがわかる。

[0035] 以下では、本実施形態に係るノッキング予測方法の理論的根拠について説明する。なお、図３は、以下の理論説明で取り扱う各種物理量の一覧表である。

[0036] 下式（１）、（２）は、正規化燃料質量分率及び温度を用いたゼロ次元均質点火の支配方程式である。この支配方程式（１）、（２）は、一定圧力及び一定エンタルピー下におけるエネルギー及び化学種の保存則であり、 k 番目の種の質量分率、 k 番目の種の化学生成速度、 k 番目の種の分子量、質量密度、温度、化学種の総数、 k 番目の種のエンタルピー、平均比熱及び時間によって与えられる。

[0037] [数１]

$$\frac{dY_k}{dt} = \frac{\dot{\omega}_k W_k}{\rho} \quad (k = 1, 2, \dots, K), \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p \rho} \quad (2)$$

[0038] また、質量密度は、下式（３）に示すように、圧力、密度及び温度の相互

変換に使用される気体の状態方程式として与えられる。なお、この状態方程式（３）におけるRは普遍的なガス定数である。

[0039] [数2]

$$\rho = \frac{p\bar{W}}{RT}, \quad (3)$$

[0040] ここで、多変量関数 f からのLegendre変換を考える。温度、質量密度、質量分率及び時間を変数としてガス混合物の特性を示す多変量関数 f の全微分は下式（４）で与えられる。

[0041] [数3]

$$df(T, \rho, \mathbf{Y}, t) = \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right) dT + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right) d\rho + \sum_{k=1}^K \left(\frac{\partial f}{\partial Y_k}\right) dY_k + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) dt \quad (4)$$

[0042] この式（４）において多変量関数 f の温度に対する偏微分を「a」と置くと、下式（５）に示す多変量関数 g が得られる。また、この多変量関数 g の全微分は、上記 a、質量密度、質量分率、時間を変数とする下式（６）のように表される。そして、多変量関数 g の全微分は、式（６）に基づいて下式（７）のように表される。

[0043] [数4]

$$g = aT - f. \quad (5)$$

$$dg = Tda - \left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right) d\rho - \sum_{k=1}^K \left(\frac{\partial f}{\partial Y_k}\right) dY_k - \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) dt. \quad (6)$$

$$dg = \left(\frac{\partial f}{\partial a}\right) da + \left(\frac{\partial g}{\partial \rho}\right) d\rho + \sum_{k=1}^K \left(\frac{\partial g}{\partial Y_k}\right) dY_k + \left(\frac{\partial g}{\partial t}\right) dt. \quad (7)$$

[0044] さらに、このような式（６）と式（７）との比較に基づいて式（８）が得られる。また、上記式（５）については式（９）に示すように定義することができるので、多変量関数 f と多変量関数 g との間には式（１０）に示す関

係が成立する。

[0045] [数5]

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) = -\left(\frac{\partial g}{\partial t}\right). \quad (8)$$

$$g = f - aT. \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial g}{\partial t}\right). \quad (10)$$

[0046] ここで、式（８）及び式（１０）における多変量関数 f の候補は、正規化温度である。また、多変量関数 g の候補は、式（８）のシングルステップ化学反応モデルの場合における正規化燃料質量分率、又は式（１０）のマルチステップ化学反応モデルの場合における正規化進捗変数が考えられる。

[0047] ある時間における多変量関数 f 又は多変量関数 g が決定されると、予混合燃焼場における予混合気の特性を表す変数（時間、質量密度及び燃料質量分率）が全て決定可能であると仮定すると、すなわち多変量関数 f 及び多変量関数 g が時間方向にのみ依存すると仮定すると、上式（８）、（１０）は偏微分式から常微分式に書き換えることができる。

[0048] この結果、正規化温度が多変量関数 f として適用され、また正規化燃料質量分率が多変量関数 g として適用される場合、上式（８）は正規化温度の時間変化と正規化燃料質量分率の時間変化との関係を示す下式（１１）のように表される。なお、正規化温度は、初期温度と最終温度とをパラメータとする下式（１２）によって定義される。正規化燃料質量分率は、初期燃料質量分率と最終燃料質量分率とをパラメータとする下式（１３）によって定義される。

[0049]

[数6]

$$\frac{d\tilde{T}}{dt} = -\frac{d\tilde{Y}_f}{dt}. \quad (11)$$

$$\tilde{Y}_f = \frac{Y_{f,1} - Y_f}{Y_{f,1} - Y_{f,0}}, \quad (12)$$

$$\tilde{T} = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0}. \quad (13)$$

[0050] また、正規化温度が多変量関数 f として適用され、多段階化学反応モデルの正規化進行変数が多変量関数 g として適用される場合には、上式(10)は正規化温度の時間変化と正規化進行変数の時間変化との関係を示す下式(14)のように表される。

[0051] [数7]

$$\frac{d\tilde{T}}{dt} = \frac{d\tilde{C}}{dt}. \quad (14)$$

[0052] ここで、Legendre変換を可能にするためには、正規化温度、正規化燃料質量分率及び正規化進行変数は凸関数でなければならず、また正規化温度の全微分は0より大きな値、正規化燃料質量分率の全微分は0より小さな値、また正規化進行変数の全微分は0より大きな値でなければならない。この制約条件は、常にシングルステップ化学反応モデルに当てはまり、通常ではマルチステップ化学反応モデルにも当てはまる。

[0053] 以下の説明では、説明を簡潔にするために正規化燃料質量分率を多変量関数 g とし、正規化進行変数については符号を単に反転させる。正規化温度及び正規化燃料質量分率は、いずれかが決定されると残りの全ての変数が決定される。この前提に基づくと、式(1)、(2)は、正規化温度及び正規化燃料質量分率を用いた下式(15)、(16)のように書換えられる。

[0054]

[数8]

$$\frac{d\tilde{Y}_f}{dt} = -\frac{\dot{\omega}_f W_f}{\rho(Y_{f,1} - Y_{f,0})} = -\frac{1}{Y_{f,1} - Y_{f,0}} \frac{dY_f}{dt}, \quad (15)$$

$$\frac{d\tilde{T}}{dt} = -\frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p \rho (T_1 - T_0)} = \frac{1}{T_1 - T_0} \frac{dT}{dt}. \quad (16)$$

[0055] 上述した式(11)に示されるように正規化温度と正規化燃料質量分率との関係は時間とは無関係である。したがって、式(11)は、滞留時間を用いることにより以下のように書き換えることができる。なお、滞留時間は、流体パーセルの速度と流体パーセルの位置からなる下式(18)によって定義されるものであり、流体小包が制御容積内で費やした総時間である。このような滞留時間の全微分は、下式(19)によって表される。

[0056] [数9]

$$\frac{d\tilde{T}}{d\tau} = -\frac{d\tilde{Y}_f}{d\tau} \quad (17)$$

$$\tau = \int_{x_0}^x \frac{1}{u} dx, \quad (18)$$

$$d\tau = \frac{1}{u} dx. \quad (19)$$

[0057] この式(19)を用いて式(15)、(16)を変形すると、下式(20)、(21)が得られる。また、式(17)は、パーセルの位置を用いることにより下式(22)のように書き換えることができる。さらに、この式(22)に基づいて式(23)に示す関係が成立する。

[0058]

[数10]

$$\rho u \frac{d\tilde{Y}_f}{dx} = -\frac{\dot{\omega}_f W_f}{Y_{f,1} - Y_{f,0}} \quad (20)$$

$$\rho u \frac{d\tilde{T}}{dx} = -\frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p (T_1 - T_0)}. \quad (21)$$

$$\frac{d\tilde{T}}{dx} = -\frac{d\tilde{Y}_f}{dx}. \quad (22)$$

$$\frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p (T_1 - T_0)} = -\frac{\dot{\omega}_f W_f}{Y_{f,1} - Y_{f,0}}. \quad (23)$$

[0059] 一方、1次元層流予混合火炎の保存方程式は、層流燃焼速度、k番目の種の混合拡散係数及び予混合気の熱伝導率からなる下式(24)～(26)によって与えられる。また、式(25)、(26)については、正規化温度及び正規化燃料質量分率を用いることにより下式(27)、(28)のように書き換えることができる。

[0060] [数11]

$$\rho u = \text{constant} = \rho_0 u_0 = \rho_0 s_L, \quad (24)$$

$$\rho u \frac{dY_k}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\rho D_k \frac{dY_k}{dx} \right) + \dot{\omega}_k W_k, \quad (25)$$

$$\rho u \frac{dT}{dx} = \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - \frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p}, \quad (26)$$

[0061] [数12]

$$\rho u \frac{d\tilde{Y}_f}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\rho D_f \frac{d\tilde{Y}_f}{dx} \right) - \frac{\dot{\omega}_f W_f}{Y_{f,1} - Y_{f,0}}, \quad (27)$$

$$\rho u \frac{d\tilde{T}}{dx} = \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{d\tilde{T}}{dx} \right) - \frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p (T_1 - T_0)}. \quad (28)$$

[0062] 式(22)、(23)を式(27)に代入することにより下式(29)が得られる。この式(29)を式(28)と比較するとわかるように、両式の違いは右辺の第1項のみである。

[0063] [数13]

$$\rho u \frac{d\tilde{T}}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\rho D_f \frac{d\tilde{T}}{dx} \right) - \frac{\sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k h_k W_k}{c_p(T_1 - T_0)}. \quad (29)$$

[0064] ここで、燃料のルイス数は下式(30)によって定義される。このルイス数に着目して式(28)、(29)を対比すると、両式はルイス数が1のとき等しくなることがわかる。すなわち、ルイス数が1の燃料について、ゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化と1次元層流予混合火炎における空間的变化とは等価である。

[0065] [数14]

$$Le_f = \frac{\lambda}{\rho c_p D_f}. \quad (30)$$

[0066] 図4は、水素、メタン、プロパン及びSNIaを燃料とした場合の予混合燃焼場におけるゼロ次元均質点火と1次元層流予混合火炎との関係を示す特性図である。SNIaは、Ia型超新星の核燃焼過程における炭素状態を示すものであり、非常に高いルイス数を有する。水素、メタン及びプロパンは、0.36、0.96及び1.95のルイス数を有する。

[0067] 上述したように、ルイス数が1の燃料では、正規化燃料質量分率及び正規化温度によって示されるゼロ次元均質点火は、正規化燃料質量分率及び正規化温度によって示される1次元層流予混合火炎に等しい。また、ルイス数が1より小さい燃料は、1次元層流予混合火炎のプロファイルは、ルイス数が1の燃料(ゼロ次元均質点火)のプロファイルよりも下に凸状である。

[0068] 一方、ルイス数が1より大きい燃料では、プロファイルは、ルイス数が1の燃料(ゼロ次元均質点火)のプロファイルより上に凸状であり、熱放出が高い火炎の高温領域(反応域)において、ルイス数が1の燃料(ゼロ次元均質点火

)のプロファイルと交差する可能性がある。

[0069] これは、ルイス数が1より小さい燃料では、燃料の物質拡散係数が熱拡散係数よりも大きいために、燃料は加熱されるよりも優先的に拡散されることを示している。これに対して、ルイス数が1より大きい燃料では、燃料の熱拡散係数が物質拡散係数よりも大きいために、燃料は拡散されるよりも優先的に加熱される。

[0070] すなわち、ルイス数が1より大きい燃料において拡散されるよりも優先的に加熱されるという事項は、周知の技術的知見に合致する。温度と燃料質量分率との間の関係に対するルイス数の影響は、周知のBuckmasterの書籍において理論的に論じられており、図4の特性はその理論と一致している。

[0071] 以下では、予混合燃焼場についてルイス数の影響が明らかな比較的低温の領域(予熱域)について検討する。なお、この検討では周知のソレット効果及びデューファー効果は無視できると仮定する。

[0072] 図4の特性図において、所定の正規化温度における正規化燃料質量分率の消費は、燃焼反応の進行度合いとみなすことができる。すなわち、燃焼反応の進行度合いは、ルイス数が1より小さい燃料、ルイス数が1の燃料(ゼロ次元均質点火)、ルイス数が1より大きい燃料の順となる。

[0073] ルイス数が1より小さい燃料では、予熱域における自己着火(ノッキング)は発生しない。すなわち、予混合燃焼場における初期温度及び初期圧力が非常に高い場合であっても、1次元層流予混合火炎が存在し得る。これに対して、ルイス数が1より大きい燃料では、予熱域において自己着火(ノッキング)が発生する可能性がある。すなわち、予混合燃焼場における初期温度及び初期圧力によっては、1次元層流予混合火炎が存在し得ない。

[0074] 例えば、燃料の1つであるガソリンは、ルイス数が1より大きいので、未燃ガス領域が火炎伝播を不可能にする温度及び圧力まで上昇するたびに自己着火(ノッキング)が発生することが予想される。すなわち、衝撃波の背後の火炎の特性時間が点火時と同程度の大きさであるため、火炎伝播から爆轟への遷移に影響を及ぼし得る。また、ガソリンでは、ルイス数が1を超えてい

るので、火炎伝播ができない衝撃波の背後の領域が存在する可能性がある。

[0075] ゼロ次元均質点火及び1次元層流予混合火炎について、定圧及び定エンタルピーを条件として2種類の予混合気、つまりルイス数が1よりも小さい水素と空気との予混合気（水素燃料）及びルイス数が1よりも大きいn-ヘプタンと空気との予混合気（n-ヘプタン燃料）についてシミュレーション（1次元定常解析）を行った。

[0076] このシミュレーションでは、周知の多段階化学反応モデルを用いることによりゼロ次元均質点火及び1次元層流予混合火炎の1次元定常解析を行った。水素燃料の多段階化学反応モデルは、周知のUT-JAXAモデルであり、n-ヘプタン燃料の多段階化学反応モデルは、周知のReduced（簡略化された）SIPモデルである。

[0077] このシミュレーションでは、Legendre変換を維持するために、正規化温度及び正規化燃料質量分率は凸関数でなければならないので、計算領域をできるだけ短くしなければならない。したがって、このシミュレーションでは、予混合燃焼場における未燃混合気、火炎の反応帯及び既燃焼気体を含む領域の大きさを、火炎が包含できる限界まで小さく設定する。なお、圧力及び当量比の数値条件（初期条件）は、例えば0.1 MPa及び1.0の固定値である。

[0078] また、このシミュレーションでは、1次元層流予混合火炎の1次元定常解析を入口温度を300～3000 Kまで100 K刻みで変化させることによって行った。計算領域を減少させても計算の失敗が確認された場合には、入口温度を1 K刻みで変化させることによって数値計算を実行した。

[0079] さらに、このシミュレーションでは、1次元層流予混合火炎の1次元定常解析を実施した後、1次元層流予混合火炎を計算し得る初期温度を使用して、ゼロ次元均質点火の数値計算を実施した。

[0080] このようなシミュレーション（1次元定常解析）は、本実施形態に係るノッキング予測方法に相当するものである。また、このシミュレーションは、本実施形態に係るノッキング予測装置の処理動作つまり記憶部1に予め記憶

されたノッキング予測プログラムに基づいて演算部2が実行する情報処理である。

[0081] すなわち、本実施形態に係るノッキング予測方法では、最初に作業者が操作部3を操作することによってシミュレーションに必要な初期条件である温度、圧力、また水素燃料やn-ヘプタン燃料等の燃料種及び当量比を演算部2に入力する（ステップS1）。

[0082] 演算部2は、ステップS1で入力された温度、圧力、燃料種及び当量比を用いるとともに入口温度（計算開始温度）を徐々に増加させて1次元定常解析（計算工程）を実行することにより、各燃料に関する火炎伝播限界温度を計算する（ステップS2）。

[0083] この1次元定常解析は、1次元予混合火炎構造を一意的な解になる最も狭い計算領域になるまで火炎前方及び火炎後方を縮める収束計算である。すなわち、演算部2は、予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算するが、入口温度の設定値に応じて燃焼速度の計算が収束する場合と発散する場合とがある。

[0084] 演算部2は、ある入口温度（計算開始温度）に関する対する燃焼速度の計算毎に収束判定（判定工程）を行う（ステップS3）。すなわち、ステップS3において、演算部2は、予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために燃焼速度が取得不能になったか否かを判定する。そして、演算部2は、ステップS3の判定結果が「収束」の場合、入口温度をさらに高く設定して燃焼速度の計算を実行する。

[0085] 一方、演算部2は、ステップS3の判定結果が「発散」の場合には、前回の燃焼速度の計算に対応する入口温度を火炎伝播限界温度に設定する（ステップS4：発生条件取得工程）。すなわち、演算部2は、最後に取得された燃焼速度に対応する火炎伝播限界温度（入口温度）をノッキングの発生条件として取得する。そして、演算部2は、このようにして取得した火炎伝播限界温度をノッキングの発生条件として含むシミュレーション結果を出力部4に出力する。

[0086] 図5は、このシミュレーション結果（1次元定常解析結果）つまり演算部2が出力部4に出力するノッキングの発生条件を含む計算結果の一例である。また、図6は、このようなシミュレーション結果に基づく予混合燃焼場の入口温度と燃焼速度との関係の一例である。

[0087] 図6は、水素燃料の場合、燃焼速度は入口または初期温度の上昇と共に増加し、3000Kの入口温度でも伝播火炎が存在することを示している。また、この図6は、n-ヘプタン燃料の場合、燃焼速度は入口温度の上昇と共に増加するが、伝播火炎は1270Kを超えて存在することができないことを示している。

[0088] すなわち、本実施形態における理論的根拠は、正規化燃料質量分率と正規化温度との関係が空間-時間変換後のルイス数が1を有するゼロ次元均質点火及び1次元層流予混合火炎について等価であることが理論的に示すものであり、またルイス数が予混合燃焼場における火炎の爆発的遷移付近の予混合火炎構造の存在を決定づける物理量であることを理論的に示すものである。

[0089] ルイス数が1よりも小さい燃料の1次元層流予混合火炎について、予熱域において点火は起こらず、よって火炎構造は常に存在する。これに対して、ルイス数が1よりも大きい燃料の1次元層流予混合火炎については、予熱域で発火する可能性があり、温度がある閾値より高い場合には、火炎構造が存在しない。

[0090] 換言すると、点火及び火炎の特徴的な時間が衝撃波の背後またはSIエンジンの爆発的遷移と同程度の大きさである場合、点火及び火炎についてはルイス数を介して論じられるべきである。

[0091] 図7は、本実施形態の比較例である。すなわち、この比較例は、直接数値計算（DNS）による「Livengood-Wu積分」の計算結果である。なお、直接数値計算（DNS）が予混合燃焼場の燃焼状態を精度よくシミュレートするものであることは周知事項である。また、周知のように、「Livengood-Wu積分」は、時間積分値が1になった時に自着火（ノッキング）が発生するというものである。

- [0092] しかしながら、この計算結果によれば、時間積分値が1になった時点（C F I）ではノッキングが発生していない。この計算結果によれば、ノッキングの発生は、時間積分値が1を超えた以降の時点（K O）である。したがって、「Livengood-Wu積分」に基づくノッキング予測方法は、精度の面で問題を含んでいる。
- [0093] これに対して、本実施形態によれば、ルイス数が1の燃料についてゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化と1次元層流予混合火炎における空間的变化とは等価であるという知見に基づくので、精度が「Livengood-Wu積分」より高い。すなわち、本実施形態によれば、精度をより向上させることが可能なノッキング予測方法及びノッキング予測装置を提供することが可能である。
- [0094] また、本実施形態に係るノッキング予測方法及びノッキング予測装置は、ノッキングの予測精度が高いため燃焼装置、動力発生装置（内燃機関）、車両及び燃料等の設計に対して多大な恩恵をもたらすものである。
- [0095] 例えば燃焼装置の設計分野では、ノッキングによる装置の破損を回避するために熱エネルギーの回収率をある程度犠牲にせざるを得ない。また、動力発生装置（内燃機関）及び車両の設計分野では、ノッキングによる装置の破損を回避するために出力をある程度犠牲にせざるを得ない。
- [0096] このような燃焼装置、動力発生装置（内燃機関）及び車両等の設計分野では、ノッキングの予測精度が向上することによって熱エネルギーの回収率及び出力の犠牲分を縮小することが可能となる。すなわち、本実施形態に係るノッキング予測方法及びノッキング予測装置によれば、燃焼装置、動力発生装置及び車両等の設計で考慮されるべきノッキングに対する余裕度をこれまでよりも狭く見積もることが可能となる。
- [0097] したがって、本実施形態に係るノッキング予測方法及びノッキング予測装置で推定されたノッキングの発生条件に基づいて燃焼装置、動力発生装置（内燃機関）及び車両等を設計することにより、燃焼装置、動力発生装置（内燃機関）及び車両等の性能を向上させる設計を実現することが可能である。

[0098] このような本実施形態に係るノッキング予測方法及びノッキング予測装置によれば、燃焼装置、動力発生装置及び車両等の性能を高めることが可能な燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法及び車両の設計方法を提供することが可能である。

[0099] なお、このような燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法及び車両の設計方法では、ルイス数が1より大きい燃料を予測対象（計算対象）とすることが考えられる。すなわち、図4の特性図に示すように、ルイス数が1より小さい燃料はノッキングが発生する虞がないので、予測対象（計算対象）から除外してもよい。

[0100] さらに、本実施形態に係るノッキング予測方法及びノッキング予測装置によれば、燃料の種別毎にノッキングを精度高く予測することが可能なので、ノッキングを回避するような燃料の設計に寄与することができる。したがって、本実施形態に係るノッキング予測方法及びノッキング予測装置によれば、燃料の性能を高めることが可能な燃料の設定方法を提供することが可能である。

[0101] ここで、本実施形態では、ノッキング予測の評価対象燃料の一例として、「Hydrogen（水素）」や「n-Heptane（ヘプタン）」等、単成分の燃料（純物質燃料）について本開示の有効性を説明した。しかしながら、本開示は、メタンやプロパン等、他の純物質燃料についても適用可能である。

[0102] また、本実施形態は、評価対象燃料に関する1次元定常解析（シミュレーション）に基づいて評価対象燃料のノッキングを予測するものである。したがって、本開示は、1次元定常解析（シミュレーション）が可能なものであれば、純物質燃料に限定されず、複数の成分が混合する多物質燃料に適用することが可能である。

[0103] 周知のように、燃料の1次元定常解析（シミュレーション）を実行するためには、燃料の燃焼現象に関与する化学種と当該化学種に基づく素反応とを特定する必要がある。現時点で化学種と素反応とが特定されている燃料には、例えばSIP（革新的燃焼技術）サロゲート化学反応機構において定義された

5種までの成分からなるサロゲート燃料がある。SIPサロゲート化学反応機構では、6種以上の成分からなる多物質燃料については化学種と素反応とが特定されていない状況である。

[0104] しかしながら、6種以上の成分からなる多物質燃料についても、今後、化学種及び素反応の特定が十分に期待される。すなわち、6種以上の成分からなる多物質燃料についても、化学種と素反応とが特定されて1次元定常解析（シミュレーション）が可能となることが十分に想定され、本開示に基くノッキング予測が十分に可能になると推測される。

産業上の利用可能性

[0105] 本開示は、ノッキング予測方法、ノッキング予測装置、燃焼装置の設計方法、動力発生装置の設計方法、車両の設計方法及び燃料の設計方法に利用することができる。

符号の説明

- [0106] A ノッキング予測装置
- 1 記憶部
 - 2 演算部
 - 3 操作部
 - 4 出力部

請求の範囲

- [請求項1] 予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、
- 前記予混合燃焼場において、ゼロ次元均質点火における正規化燃料質量分率及び正規化温度の時間的变化と1次元層流予混合火炎における空間的变化とが等価であるという知見に基づいてノッキングを予測するノッキング予測方法。
- [請求項2] 予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、
- 正規化温度と燃料の正規化燃料質量分率との関係を示す特性図において、ルイス数が1より大きい燃料を前記ノッキングの可能性がありとし、前記ルイス数が1より小さい燃料を前記ノッキングの可能性がないとするノッキング予測方法。
- [請求項3] 予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測方法であって、
- 前記予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算する計算工程と、
- 前記予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために前記燃焼速度が取得不能になったか否かを判定する判定工程と、
- 最後に取得された前記燃焼速度に対応する前記入口温度を前記ノッキングの発生条件として取得する発生条件取得工程と
- を有するノッキング予測方法。
- [請求項4] 前記計算工程では、前記予混合燃焼場における未燃混合気、火炎の反応帯及び既燃焼気体を含む領域の大きさを、火炎が包含できる限界まで小さくして計算する請求項3に記載のノッキング予測方法。
- [請求項5] ルイス数が1より大きい燃料を予測対象とする請求項3又は4に記載のノッキング予測方法。
- [請求項6] 予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測するノッキング予測装

置であって、

前記予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算する計算手段と、

前記予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために前記燃焼速度が取得不能になったか否かを判定する判定手段と、

最後に取得された前記燃焼速度に対応する前記入口温度を前記ノッキングの発生条件として取得する発生条件取得手段と
を備えるノッキング予測装置。

[請求項7] 前記計算手段は、前記予混合燃焼場における未燃混合気、火炎の反応帯及び既燃焼気体を含む領域の大きさを、火炎が包含できる限界まで小さくして計算する請求項6に記載のノッキング予測装置。

[請求項8] 前記計算手段は、ルイス数が1より大きい燃料を計算対象とする請求項6又は7に記載のノッキング予測装置。

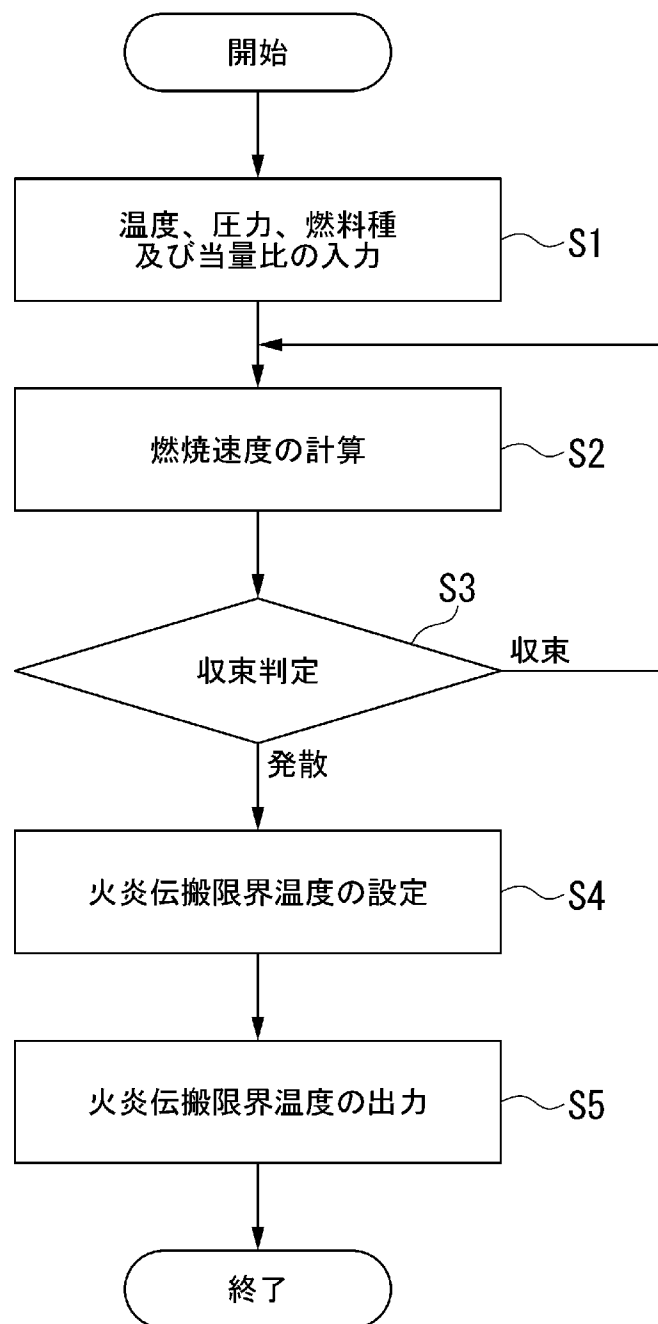
[請求項9] 請求項3又は4に記載のノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて燃焼装置を設計する燃焼装置の設計方法。

[請求項10] 請求項3又は4に記載のノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて動力発生装置を設計する動力発生装置の設計方法。

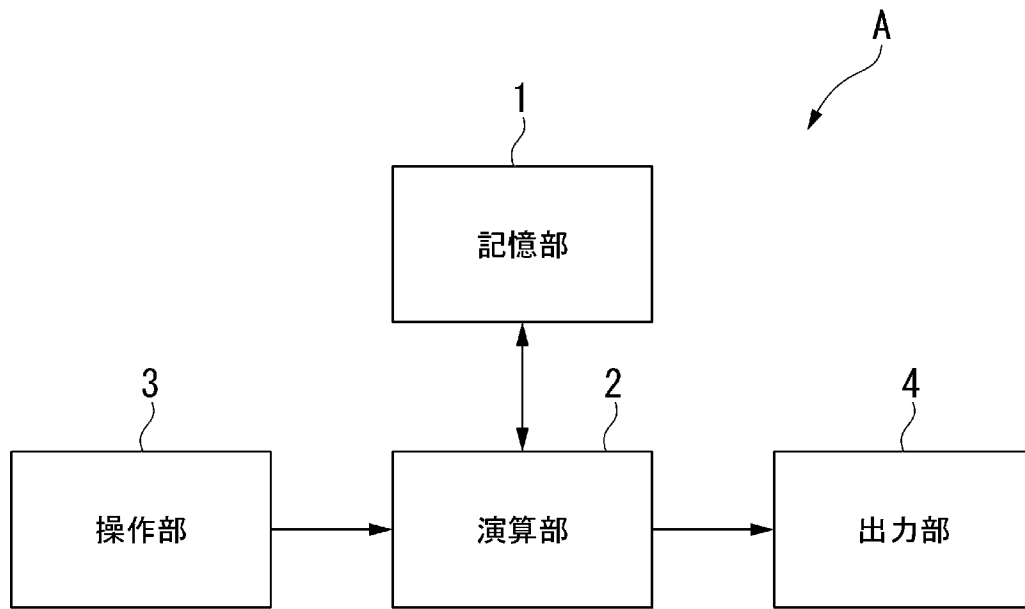
[請求項11] 請求項3又は4に記載のノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて車両を設計する車両の設計方法。

[請求項12] 請求項3又は4に記載のノッキング予測方法に基づいて推定されたノッキングの発生条件に基づいて燃料を設計する燃料の設計方法。

[図1]



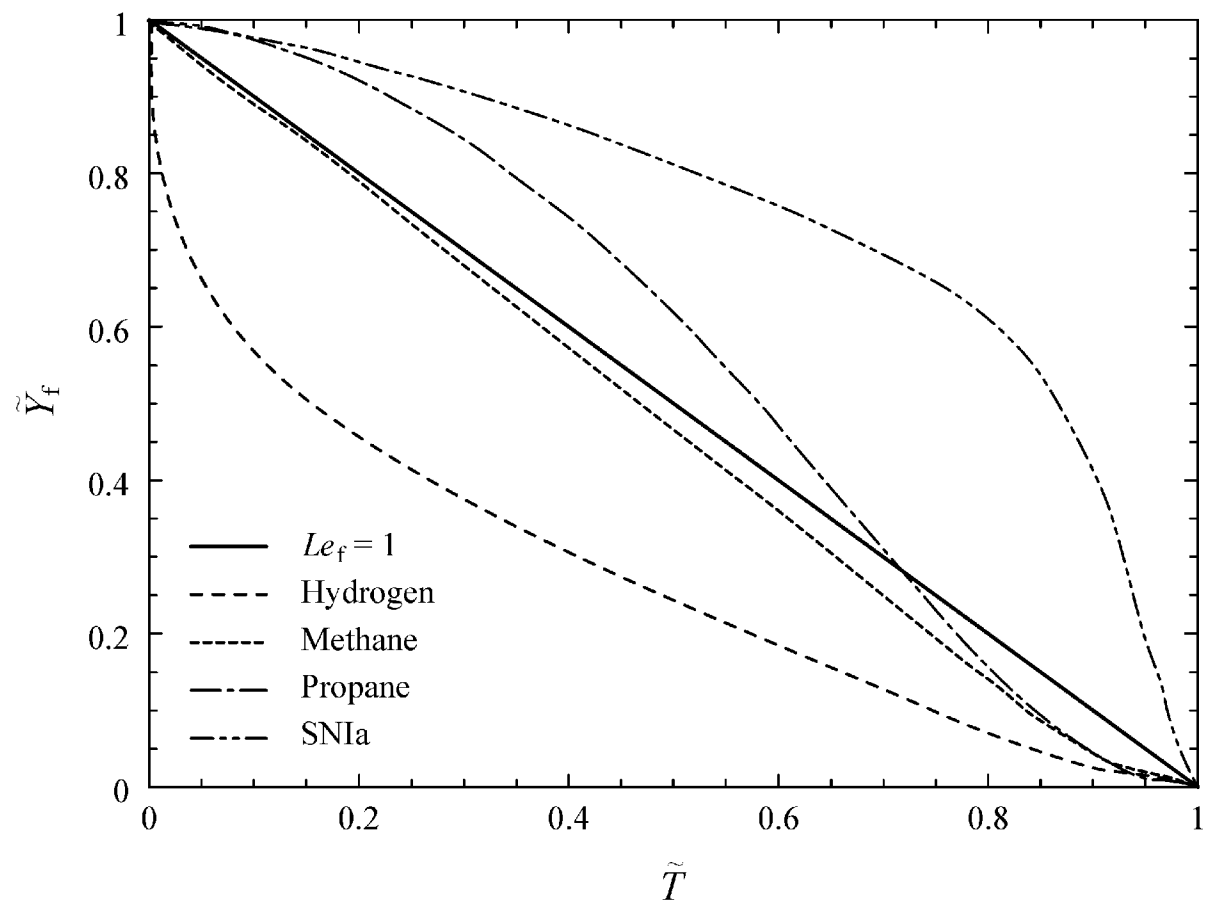
[図2]



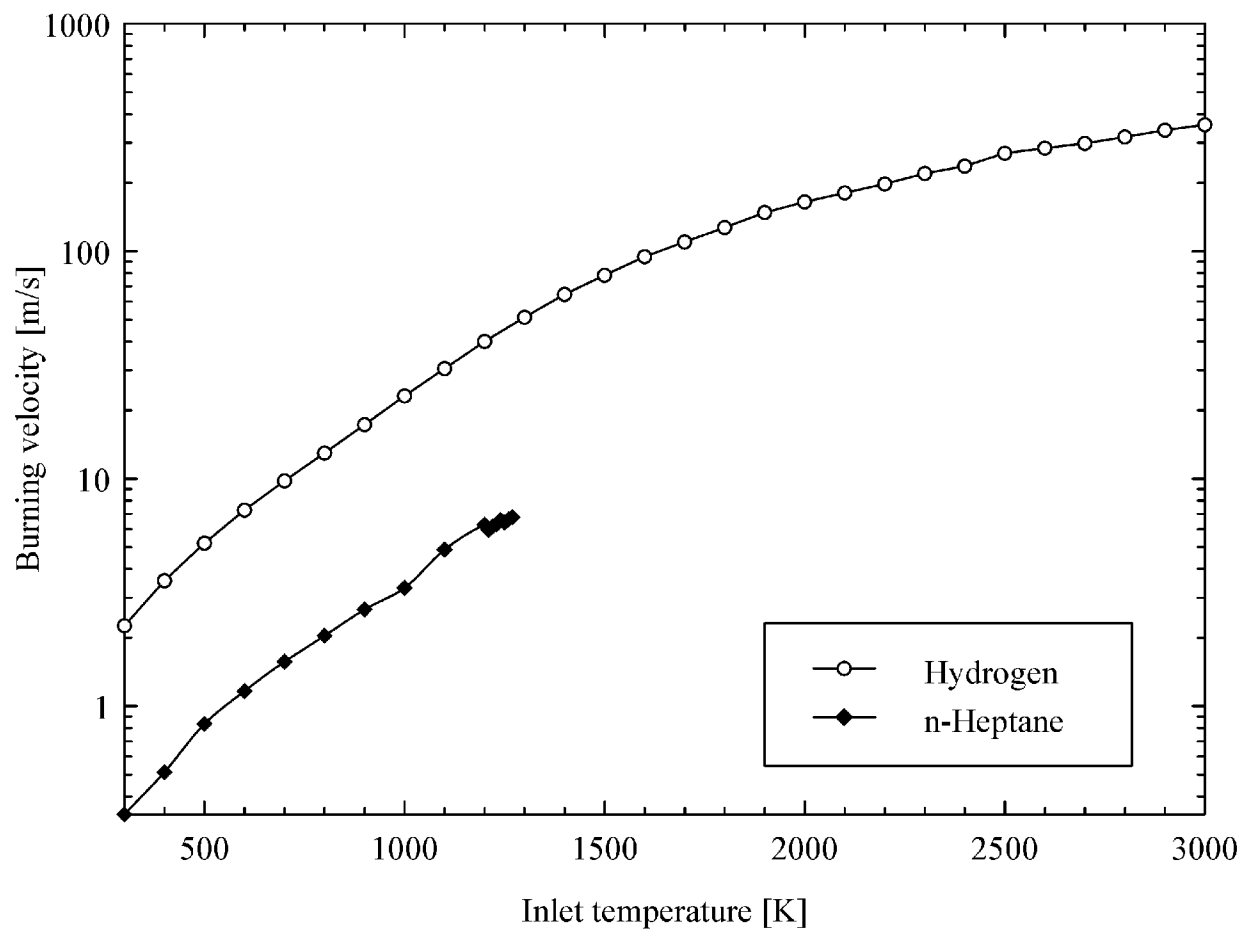
[図3]

物 理 量	記 号
k 番目の種の質量分率	Y_k
k 番目の種の化学生成速度	$\dot{\omega}_k$
k 番目の種の分子量	W_k
質量密度	ρ
温度	T
化学種の総数	K
k 番目の種のエンタルピー	h_k
平均比熱	c_p
時間	t
ガス定数	R
多変量関数	f
多変量関数	g
多変量関数 f の温度 T に関する偏微分	α
正規化質量分率	$\tilde{Y}_f$
質量分率の初期値	$Y_{f,0}$
質量分率の最終値	$Y_{f,1}$
正規化温度	$\tilde{T}$
温度の初期値	T_0
温度の最終値	T_1
正規化進行変数	$\tilde{C}$
滞留時間	τ
流体パーセルの速度	u
流体パーセルの位置	x
層流燃焼速度	s_L
k 番目の種の混合拡散係数	D_k
燃料の混合拡散係数	D_f
熱伝導率	λ
ルイス数	Le_f

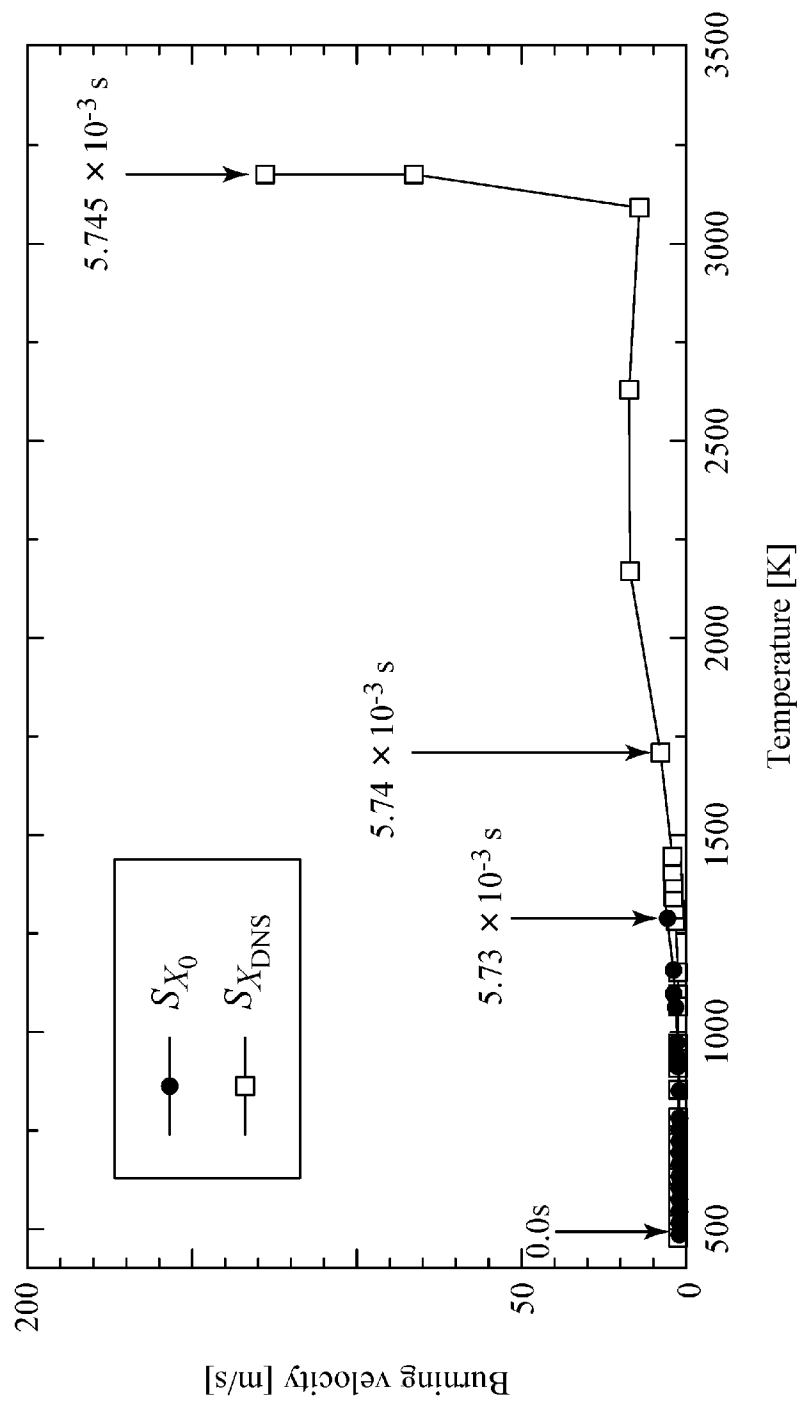
[図4]



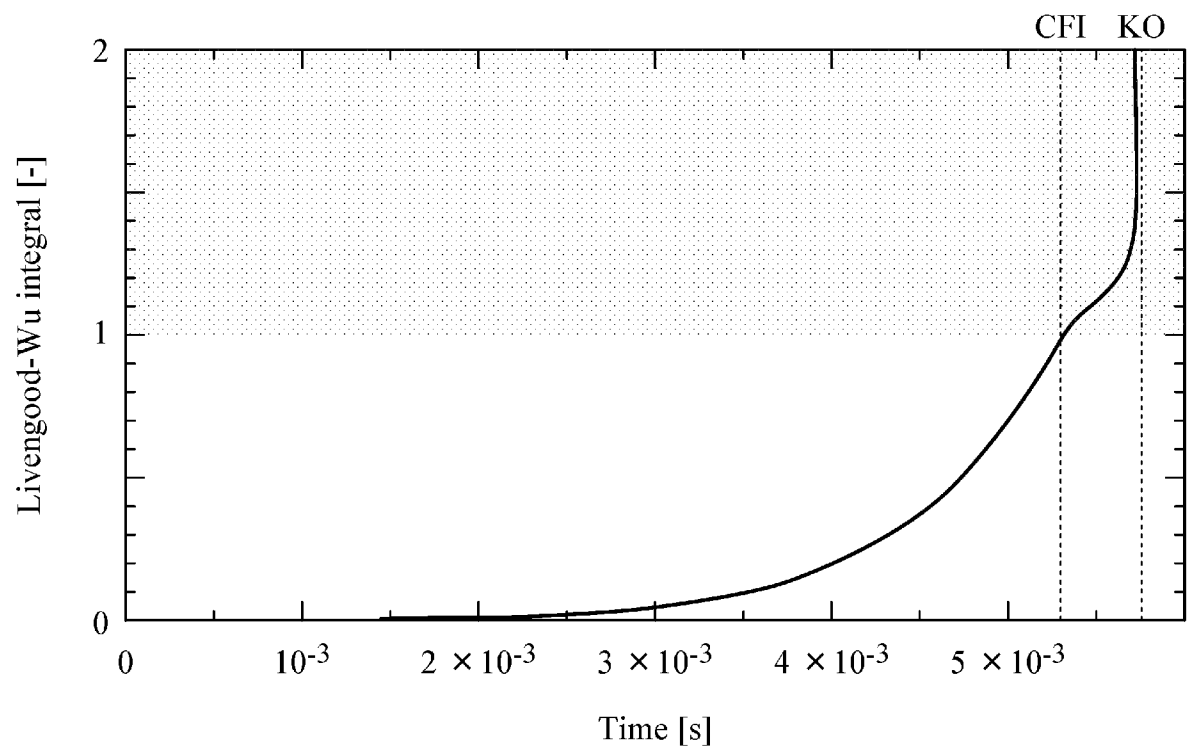
[図5]



[図6]



[図7]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/020935

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**F02D 45/00**(2006.01)i

FI: F02D45/00 368A

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F02D45/00, G01M15/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023

Registered utility model specifications of Japan 1996-2023

Published registered utility model applications of Japan 1994-2023

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	MORII, Youhi et al., What connects ignition and deflagration? - On explosive transition of deflagration -, arXiv [online], 18 January 2023, Internet <URL: https://arxiv.org/abs/2212.01978 > [retrieved on 17 August 2023] entire text, all drawings	1-2
A	LAPALME, D. et al., Assessment of the method for calculating the Lewis number of H ₂ /CO/CH ₄ mixtures and comparison with experimental results, International Journal of Hydrogen Energy, 11 March 2017, Volume 42 (2017), pp. 8314-8328, Internet <URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917302665 > particularly, pages 8314-8315	1-2
A	CN 112345259 A (UNIV. TONGJI) 09 February 2021 (2021-02-09) entire text, all drawings	1-2
A	JP 2008-31916 A (TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA) 14 February 2008 (2008-02-14) entire text, all drawings	1-2



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 August 2023

Date of mailing of the international search report

29 August 2023

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)

3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915

Japan

Authorized officer

Telephone No.

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

The claims are classified into the following two inventions.

Invention 1: Claims 1-2

Claims 1-2 have the special technical feature of "a knocking prediction method" based on "normalized fuel mass fraction" and "normalized temperature," and thus are classified as invention 1.

Invention 2: Claims 3-12

Claims 3-12 share the technical feature of "predicting knocking that can occur in a premixed combustion field" with claim 1 classified as invention 1. However, said technical feature is so well known that it is not necessary to provide any example thereof and does not make a contribution over the prior art, and therefore cannot be said to be a special technical feature. Moreover, there are no other same or corresponding special technical features between claims 3-12 and claim 1.

In addition, claims 3-12 do not depend from claim 1. Furthermore, claims 3-12 are not substantially identical to or similarly closely related to any of the claims classified as Invention 1.

Accordingly, claims 3-12 cannot be classified as invention 1.

Claims 3-12 have the special technical feature of "sequentially calculating burning velocity when the inlet temperature is gradually increased by means of one-dimensional steady state analysis of a premixed combustion field," "determines whether or not it has become impossible to acquire the burning velocity because flames can no longer exist in the premixed combustion field," and "acquires the inlet temperature corresponding to the last burning velocity acquired as the knocking outbreak condition," and thus are classified as invention 2.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☒ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.: **Claims 1-2**

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2023/020935

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	112345259	A	09 February 2021	(Family: none)	
JP	2008-31916	A	14 February 2008	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） F02D 45/00(2006.01)i FI: F02D45/00 368A		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） F02D45/00, G01M15/00 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2023年 日本国実用新案登録公報 1996-2023年 日本国登録実用新案公報 1994-2023年 国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	MORII, Youhi, MARUTA, Kaoru, What connects ignition and deflagration? - On explosive transition of deflagration -, arXiv [オンライン], 2023.01.18 [検索日 2023.08.17], インターネット: <URL : https://arxiv.org/abs/2212.01978> 全文, 全図	1-2
A	LAPALME, Denis, LEMAIRE, Romain, SEERS, Patrice, Assessment of the method for calculating the Lewis number of H2/CO/CH4 mixtures and comparison with experimental results, International Journal of Hydrogen Energy, 2017.03.11, Volume 42 (2017), p. 8314-8328, インターネット: <URL : https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917302665> 特にp. 8314-8315	1-2
A	CN 112345259 A (TONGJI UNIVERSITY) 09.02.2021 (2021-02-09) 全文, 全図	1-2
A	JP 2008-31916 A (トヨタ自動車株式会社) 14.02.2008 (2008-02-14) 全文, 全図	1-2
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 17.08.2023	国際調査報告の発送日 29.08.2023	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 津田 真吾 3G 3430 電話番号 03-3581-1101 内線 3355	

第III欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるとこの国際調査機関は認めた。

請求の範囲は、以下の2つの発明に区分される。

（発明1）請求項1-2

請求項1-2は、「正規化燃料質量分率」及び「正規化温度」に基づく「ノッキング予測方法」という特別な技術的特徴を有しているので、発明1に区分する。

（発明2）請求項3-12

請求項3-12は、発明1に区分された請求項1と、「予混合燃焼場で発生し得るノッキングを予測する」という共通の技術的特徴を有している。しかしながら、当該技術的特徴は、例示するまでもなく周知の技術であり、先行技術に対する貢献をもたらすものではないから、特別な技術的特徴であるとはいえない。また、請求項3-12と請求項1との間に、他に同一の又は対応する特別な技術的特徴は存在しない。

さらに、請求項3-12は請求項1の従属請求項ではない。また、請求項3-12は、発明1に区分されたいずれの請求項に対しても実質同一又はそれに準ずる関係にはない。

したがって、請求項3-12は発明1に区分できない。

そして、請求項3-12は、「予混合燃焼場の1次元定常解析によって入口温度を徐々に増加させた場合の燃焼速度を順次計算」し、「前記予混合燃焼場に火炎が存在できなくなるために前記燃焼速度が取得不能になったか否かを判定」し、「最後に取得された前記燃焼速度に対応する前記入口温度を前記ノッキングの発生条件として取得する」という特別な技術的特徴を有しているので、発明2に区分する。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。
2. ☐ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。
4. ☒ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。 請求項1-2

追加調査手数料の異議の
申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- ☐ 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/020935

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
CN	112345259	A	09.02.2021	(ファミリーなし)	
JP	2008-31916	A	14.02.2008	(ファミリーなし)	