2 足歩行機械の非定常歩行* (第1報, 脚機構の運動)

岩 附 信 行**, 舟 橋 宏 明***

On Transient Walks of a Biped Walking Machine (1st Report, Motions of Leg Mechanisms)

by Nobuyuki IWATSUKI and Hiroaki FUNABASHI

This paper describes motions of leg mechanisms of a biped walking machine which walks straight on flat grounds, changing stride or walking speed. A stride-adjustable leg-mechanism which is composed of an ankle-path-generator equipped with a crank-length adjusting mechanism and a foot-driving mechanism is proposed in order to change the stride. Input motions of these mechanisms are determined under the conditions on motions of feet and upper body. The biped machine in which the leg mechanisms are installed can walk without a swing motion or a backward motion of the upper body.

Key Words: Biped Walking Machine, Leg Mechanism, Transient Walk, Stride, Walking Speed

1. 緒 言

著者らはさきに、2足歩行機械に水平面上における一定の歩幅および歩行速度での直進定常歩行を行わせる場合に、その脚機構を回転対偶のみからなる一自由度平面リンク機構により構成することを提案しその機構学的総合を行うとともに、さらに歩行中の重力および慣性力によるモーメントを補償するための姿勢制御機構をその脚機構に組み込んだ歩行機械を試作して歩行実験を行い、歩行速度 92 歩/分の高速歩行を実現した⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究では、さらに歩幅および歩行速度の変更を伴う非定常歩行を実現することを目的として、まず歩幅の変更を可能にする脚機構の構造を明らかにし、その脚機構と歩行機械腰部の間の相対運動を機構学的に定め、脚機構を駆動するサーボアクチュエータの目標値を決定する。

2. 歩幅可変脚機構

2足歩行機械に定常歩行を行わせるために開発された脚機構を図1に示す。その諸元は表1のとおりである。図1中の対偶 J_H, J_K および J_A はそれぞれ人間の股関節、膝関節、足関節に対応する。この脚機構は、足関節 J_A が腰部に対して所要の軌跡を描くための足関節軌跡創成機構(太線の機構)、および足部 PQ に足関節まわりの所要の角運動を与えるための足部駆動機構(細線の機構)より構成され、両機構の原動節 J_1, J_2, J_H, J_K を、2脚ともに同一の一定角速度で回転させることにより歩行機械の水平面直進定常歩行が実現できる⁽¹⁾⁽²⁾。この脚機構を用いて歩幅の変更を行うためには、足関節軌跡創成機構を可調整機構として図中の足関節の軌跡曲線を拡大、縮小しなければならない。この場合、歩幅変更後も歩容に著しい変化が生じないように、足関節軌跡の形状を変化させることなく、その寸法のみを大きく変化させる必要がある。

そこで、著者らが提案した原動節長調整機構⁽³⁾を足関節軌跡創成機構に組み込んでその原動節長 J_1, J_2 を調整して足関節軌跡を変化させることにする。原動節長調整機構には図2(b)に示すねじ対偶を含む空間3節機構を採用する。足関節軌跡創成機構の原動軸に直

* 昭和61年10月7日 第64期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年4月4日。

** 正員、東京工業大学大学院 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*** 正員、東京工業大学工学部。

進対偶で連結された節 L_m を調整用入力節とし、原動軸の回転 (回転角 θ_A) とは独立な入力 a を変換・伝達して、図 2 (a) の原動節の回転平面 Π 上の点 C において回転対偶で連結された節 J_2C に角変位 φ を与えて足関節軌跡創成機構の原動節長 $b = \overline{J_1J_2}$ を調整する。このようにすれば足関節軌跡創成機構の原動軸の回転中に足関節軌跡を変化させることができる。

調整角 φ は a に比例して変化するので φ と b の関係を考える。図 2 において $\overline{J_1C} = \overline{J_2C} = l$ とすれば、原動節長 b は

$$b = 2l \sin(\varphi/2) \quad (1)$$

で表され、調整角 φ が最大値 $\varphi = \varphi_{\max} (\leq \pi)$ をとるとき原動節長は最大値 $b = b_{\max}$ をとり、また $\varphi = 0$ のとき $b = 0$ となり原動軸の回転、停止に無関係に足関節 J_A の運動は停止し、歩行機械は両脚をそろえて直立することになる。 $b_{\max}$ と $\varphi_{\max}$ を与えれば、 l は次式で定まる。

$$l = b_{\max} / \{2 \sin(\varphi_{\max}/2)\} \quad (2)$$

図 1 の足関節軌跡を描くときに最大歩幅をとるもの

図 1 定常歩行を行う脚機構

図 2 原動節長調整機構

とし、表 1 より

$$b_{\max} = a_2 = 26.87 [\text{mm}] \quad (3)$$

と定める。このとき原動節長調整機構を組み込んだ可調整足関節軌跡創成機構において例えば $\varphi_{\max} = \pi/3$, $l = b_{\max}$ とした場合、足関節軌跡は φ の値により図 3 のように変化する。軌跡曲線の形状はあまり変化せず大きさのみが φ の値にほぼ比例して変化しており、この可調整足関節軌跡創成機構と足部駆動機構を連結した歩幅可変脚機構により歩幅の変更が可能であることがわかる。

さらに、歩幅可変脚機構を駆動するためのすべてのアクチュエータを腰部上に集中して搭載できるので、脚の軽量化が可能となり、脚に作用する重力および慣性力の低減が期待できる。

表 1 脚機構の諸元

a_1	$\overline{J_H J_1}$	74.44 mm	a_{15}	$\overline{J_K J_{10}}$	45.21 mm
a_2	$\overline{J_1 J_2}$	26.87	a_{16}	$\overline{J_K J_{11}}$	32.00
a_3	$\overline{J_2 J_3}$	47.07	a_{17}	$\overline{J_{11} J_{12}}$	180.00
a_4	$\overline{J_H J_3}$	75.00	a_{18}	$\overline{J_A J_{12}}$	40.00
a_5	$\overline{J_3 J_4}$	64.25	b_1	$\angle \infty J_H J_1$	1.2333π rad
a_6	$\overline{J_H J_K}$	200.00	b_2	$\angle J_2 J_3 J_4$	0.4267π
a_7	$\overline{J_4 J_5}$	139.67	b_3	$\angle J_3 J_H J_K$	0.1667π
a_8	$\overline{J_K J_5}$	78.28	b_4	$\angle J_5 J_K J_A$	0.1551π
a_9	$\overline{J_K J_A}$	180.00	b_5	$\angle J_7 J_8 J_9$	0.5667π
a_{10}	$\overline{J_H J_6}$	20.00	b_6	$\angle J_{10} J_K J_{11}$	0.0073π
a_{11}	$\overline{J_6 J_7}$	88.45	l_1	$\overline{P_H}$	110.25 mm
a_{12}	$\overline{J_7 J_8}$	35.80	l_2	$\overline{Q_H}$	30.51
a_{13}	$\overline{J_8 J_9}$	71.41	l_3	$\overline{J_A H}$	58.76
a_{14}	$\overline{J_9 J_{10}}$	43.75

図 3 可調整足関節軌跡創成機構

3. 定常歩行および歩行速度の変更

3.1 定常歩行 2章で提案した歩幅可変脚機構により定常歩行を行わせるには、図2の原動節長調整機構の調整角 φ を一定にして足関節軌跡創成機構と足部駆動機構のみを同期駆動すればよい。このとき文献(2)で示したように両機構の原動節を同一の一定角速度で駆動することも可能であるが、この場合、両脚支持期間において足部と歩行面との間にすべりを生じる。このすべりを皆無とするために、本研究では足部駆動機構を足関節軌跡創成機構と独立に駆動する。

両脚の足関節軌跡創成機構はその原動軸に位相差 π を与えて等速回転させるものとする。図1において足部駆動機構の原動節角変位を $\theta_F = \angle x J_H J_6$ で表し、その変化をつぎの条件のもとに定める。

定常歩行時の脚機構の相対運動条件：

(1) 足部の運動条件

(i) 足部の接地パターンは図4のとおりとする。すなわち、まず時刻 $t=t_0$ において脚Iのかかとが着地して両脚支持期間となり、ついで $t=t_1$ において脚IIのつま先が離地し、 $t=t_2$ において脚Iのつま先が着地した後、足底全面接地期間となり、さらに $t=t_3$ において脚Iのつま先のみでの支持期間となり、 $t=t_0+T/2$ において再び両脚支持期間となるものとする。ここに T は歩行周期であり、歩行機械が2歩歩行するのに要する時間である。

図4 定常歩行時の足部接地パターン

図5 定常歩行時の足部駆動機構の原動節角変位

(ii) 両脚支持期間において足部と歩行面との間にすべりを生じない。

(iii) つま先およびかかとの着地速度は零である。

(2) 腰部の運動条件

(i) 腰部は一定の姿勢角を保ち揺動しない。

(ii) 腰部は後退しない。

(iii) 腰部の運動は加速度まで連続である。

静止座標系 $O-XY$ を X 軸が歩行面に一致するように固定し、腰部の姿勢角を股関節 J_H に固定した動座標系 J_H-xy の x 軸と X 軸のなす角 β で表すことにする。条件(2)-(i)において $\beta=0$ 一定とし、歩幅を最大歩幅 $S=S_{\max}=286.76\text{ mm}$ としたときの足部駆動機構の原動節角変位 θ_F の変化を、 $t_0=0$ として図5に示す。なお図5中の添字I, IIは図4の脚の番号を表す。足部駆動機構の原動節は逆転を伴わない不等速回転を行うことになる。

定常歩行時の脚機構の相対運動を上述のように定めた場合の腰部の運動を、股関節 J_H の静止座標系 $O-XY$ における変位 (X_H, Y_H) で表せば図6となり、歩行状態をスティック線図で示せば図7となる。なお静止座標系の原点 O は両脚支持期間開始時の後脚つま先にとっている。図6, 7より腰部は後退することなく進

図6 定常歩行時の腰部の変位

図7 定常歩行時のスティック線図

行方向にはほぼ等速に運動しており、良好な歩行特性が得られることがわかる。

3.2 歩行速度の変更 定常歩行時には足関節軌跡創成機構の原動軸は等速で、歩行1周期 T 中に1回転する。したがって、その回転角速度 $\dot{\theta}_A$ を用いて歩行機械の歩行速度 V は次式で表される。

$$V = 60 \dot{\theta}_A / \pi \text{ (歩/分)} \quad (4)$$

3.1 節において定常歩行時の脚機構の相対運動を定めたので、足部駆動機構の原動節角変位 θ_F を足関節軌跡創成機構の原動軸の回転角 θ_A の関数：

$$\theta_F = F(\theta_A) \quad (5)$$

で表すことができる。また θ_F の時間導関数 $\dot{\theta}_F, \ddot{\theta}_F$ は

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_F &= \frac{dF}{d\theta_A} \dot{\theta}_A \\ \ddot{\theta}_F &= \frac{d^2F}{d\theta_A^2} \dot{\theta}_A^2 + \frac{dF}{d\theta_A} \ddot{\theta}_A \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と表され、 $dF/d\theta_A$ および $d^2F/d\theta_A^2$ は既知である。種々の歩行速度の定常歩行を行わせる場合には式(4)において V を与えて $\dot{\theta}_A$ を求め、 $\ddot{\theta}_A = 0$ として式(5)、(6)より θ_F の時間的变化を定めることになる。

ここでは、歩行速度を変更する場合の遷移期間について考える。いま時刻 $t \leq t_a$ における歩行速度を V_a 、 $t \geq t_b$ における歩行速度を V_b とし、 $t_a \leq t \leq t_b$ の間に歩行速度を V_a から V_b に変更するものとする。この期間においても定常歩行時の足部の接地パターンをとるものとし、両脚の相対位置関係も不変とすれば、式(5)の関数関係は変更せず θ_A の時間的变化のみを変更すればよい。したがって式(6)において $\dot{\theta}_A, \ddot{\theta}_A$ を時間の関数として定める。 V_a, V_b に対応する $\dot{\theta}_A$ の値をそれぞれ $\dot{\theta}_a, \dot{\theta}_b$ とする。まず速度変更期間の前後における接続条件から

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}_A(t_a) &= \dot{\theta}_a, \dot{\theta}_A(t_b) = \dot{\theta}_b \\ \ddot{\theta}_A(t_a) &= \ddot{\theta}_A(t_b) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

である。さらに、速度変更期間中に脚部に大きな加速度が生じないことを考慮して、 $\dot{\theta}_A$ を次式に示す時刻 t の5次関数で与える。

図8 足関節軌跡創成機構の原動軸角速度

$$\dot{\theta}_A(t) = (\dot{\theta}_b - \dot{\theta}_a) \left\{ \frac{6(t-t_a)^5}{T^{*5}} - \frac{15(t-t_a)^4}{T^{*4}} + \frac{10(t-t_a)^3}{T^{*3}} \right\} + \dot{\theta}_a \quad (8)$$

ただし、 $T^* = t_b - t_a$ である。式(8)を時間で微分すれば次式が得られる。

$$\ddot{\theta}_A(t) = (\dot{\theta}_b - \dot{\theta}_a) \left\{ \frac{30(t-t_a)^4}{T^{*5}} - \frac{60(t-t_a)^3}{T^{*4}} + \frac{30(t-t_a)^2}{T^{*3}} \right\} \quad (9)$$

式(8)の関数 $\dot{\theta}_A(t)$ の変化を示せば図8となる。また、歩行機械が1歩歩行する間、すなわち足関節軌跡創成機構の原動節が半回転する間に歩行速度の変更を完了するものとして、式(8)を積分して

$$\int_{t_a}^{t_b} \dot{\theta}_A(t) dt = (\dot{\theta}_a + \dot{\theta}_b) T^* / 2 = \pi \quad (10)$$

とする。よって歩行速度変更期間は

$$T^* = 2\pi / (\dot{\theta}_a + \dot{\theta}_b) \quad (11)$$

と求められる。したがって、式(11)、(8)、(9)を用いて式(5)、(6)より歩行速度変更時の足部駆動機構の原動節角変位の時間的变化が得られ、脚機構の相対運動が求まり、さらに腰部の運動も決定できる。

例として $V = 15, 30$ 歩/分の間の加速および減速時における腰部の変位を図9に示す。このときの歩行速度変更期間はいずれも $T^* = 2.67$ s である。図9より、腰部に大きな加速度変動が生じることなくなめらかな歩行速度変更が可能であることがわかる。

4. 歩幅の変更

4.1 歩行開始・終了 はじめに、歩幅 $S = 0$ の直立静止状態から歩幅を拡大して定常歩行へ、また逆に定常歩行から歩幅を縮小して $S = 0$ の直立静止状態に至る、最大の歩幅変化を伴う歩行開始・終了を実現す

図9 歩行速度変更時の腰部の変位

る。この期間の脚機構の運動条件を定めるために、まず成人男子5人について、歩行開始、定常歩行、歩行終了に至るときの腰部の運動および各関節角の変化を測定し、あわせて足部の接地パターンを観察した。その結果、関節角の変化には個人差があるが、足部の接地パターンはほぼ同じであること、また歩行の開始および終了に要する時間はほぼ等しくいずれも定常歩行時の半周期以下であることがわかった。そこで本研究の歩行機械においても歩行半周期 $T/2$ 中に歩幅の変更を完了するものとして脚機構の相対運動条件を定める。人間の歩行を観察した結果より、歩行開始・終了時においても、3・1節で定めた定常歩行時の脚機構の相対運動条件のうち、足部の運動条件(1)-(ii), (iii)および腰部の運動条件(2)-(i)~(iii)はそのまま適用できることがわかった。足部の接地パターンについては新たに条件(1)-(i)'として、図10および図11のパターンをとるものと定める。すなわち、歩行開始時では、時刻 $t=t_{s0}$ において脚IIのつま先とかかとが同時に離地し、 $t=t_{s1}$ において支持脚Iのかかとが離地し、 $t=T/2$ において脚IIのかかとが着地して、以後は定常歩行を行う。歩行終了時では、 $t=t_{f0}$ において両脚支持期間が開始し、 $t=t_{f1}$ で脚IIのつま先が離地して片脚支持期間となり、 $t=t_{f2}$ で足底全面が接地して $t=t_{f3} < t_{f0} + T/2$ において脚IIのつま先とかかとが同時に着地して脚Iと並んで歩行を停止する。さらに、歩行開始・終了時に固有の条件(1)-(iv)として、不支持脚の足部が後方へ運動しないことを追加する。以上の条件のもとに歩行開始・終了時における脚機構の運動を決定する。

2章で提案した歩幅可変脚機構においては、図2の原動節長調整機構により調整角 φ を与えれば足関節軌跡創成機構の原動軸の回転中に歩幅を変更することができる。そこで歩幅変更期間においても、両脚の足関節軌跡創成機構の原動軸に位相差 π を与えて等速

回転させるものとし、また両脚の原動節長調整機構も連動させて両脚の足関節軌跡創成機構の原動節長は常に相等しくなるようにする。このようにすれば足部駆動機構を加えても両脚でわずかに自由度4の歩幅可変脚機構となる。しかも足関節軌跡創成機構の原動軸は等速回転するので原動節長調整機構および両脚の足部駆動機構のみを時間の関数として駆動すればよく、脚部の運動制御が容易になると考えられる。

まず調整角 φ を定める。図12のように、足関節 J_A が歩行面と直接接触する場合を考え、足関節の動座標系 J_A-xy 上の位置を (x_A, y_A) 、静止座標系 $O-XY$ 上の位置を (X_A, Y_A) で表し、支持脚にI、不支持脚にIIの添字を付す。条件(2)-(i)より、腰部が揺動せずに x 軸と X 軸が常に平行であるとすれば、腰部の進行方向変位 X_H は次式で与えられる。

$$X_H = -x_{AI} + X_{AI}$$

したがって条件(2)-(ii)は

$$\dot{x}_{AI} \leq 0 \quad (12)$$

で表される。さらに条件(1)-(iv)は

$$\left. \begin{array}{l} \text{歩行開始時: } x_{AIH} - x_{AI} \geq 0 \\ \text{歩行終了時: } x_{AIH} - x_{AI} \leq 0 \end{array} \right\} \quad (13)$$

で与えられよい。これらの条件を満足して、調整角 φ を、歩行開始時には $\varphi=0$ から $\varphi=\varphi_{\max}$ に、歩

図12 足関節の接地

図10 歩行開始時の足部接地パターン

図11 歩行終了時の足部接地パターン

図13 歩幅可変期間と最大調整角の関係

行終了時においては $\varphi = \varphi_{\max}$ から $\varphi = 0$ に変化させる。 φ の時間的変化は未定であるから、種々の $\varphi_{\max}$ を与えて $0 \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$ の範囲内の任意の φ の値に対して常に式(12), (13)を満足する歩幅変更期間を求めれば図13の斜線部となる。図13中の境界線①は両脚支持期間の終了時刻を表し、両脚支持期間では歩幅変更を行わない。また境界線②および③は $\varphi = \varphi_{\max}$ のときにそれぞれ $\dot{x}_{A1} = 0$, $x_{A11} - x_{A1} = 0$ となる時刻を表し、④および⑤は $\varphi \rightarrow 0$ としたときにそれぞれ $\dot{x}_{A1} = 0$, $x_{A11} - x_{A1} = 0$ となる極限の時刻を表している。図13より $\varphi_{\max}$ を大きくすると歩幅変更期間が小さくなることがわかる。また $\varphi_{\max}$ を小さくすれば l が大きくなり、原動節長調整機構の占有空間が大きくなる。そこで、

$$\varphi_{\max} = \pi/6 \quad \dots\dots\dots (14)$$

と定めると、式(2)より

$$l = 26.87 / \{2 \sin(\pi/12)\} = 51.91 \text{ [mm]} \quad \dots\dots (15)$$

となり、歩幅変更の可能な期間は

$$\text{歩行開始時: } 0.238 \leq t/T \leq 0.452$$

$$\text{歩行終了時: } 0.100 \leq t/T \leq 0.196$$

となる。この期間内に歩幅を変更するのであれば、 φ

図14 原動節長調整角の変化

図15 歩行開始・終了時の足部駆動機構の原動節角変位

の時間的変化は任意に与えることができるが、調整用アクチュエータの応答を考慮して時刻 t の指数関数で与えることにする。 φ の関数形を定めたので、改めて式(12), (13)を満足する期間を探索して、歩幅変更期間をつぎのように決定した。

$$\begin{aligned} \text{歩行開始時: } 0.222 \leq t/T \leq 0.472 \\ \text{歩行終了時: } 0.111 \leq t/T \leq 0.222 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (16)$$

この期間における調整角 φ の時間的変化を $t_{f0} = 0$ として示せば図14となる。

調整角 φ を定めたことにより足関節の運動が決定

図16 歩行開始・終了時の腰部の変位

図17 歩行開始時のスティック線図

図18 歩行終了時のスティック線図

図 19 歩幅拡大・縮小時のスティック線図

されるので、つぎに足部駆動機構の原動節角変位 θ_F を条件(1)-(iv)を除いた残りの条件のもとで決定する。このとき、 θ_F が定常歩行期間、歩幅変更期間および歩行停止期間を通して2階導関数まで連続となるようにする。得られた θ_F の時間的変化は図15のようになり、歩行開始・終了時の脚機構の運動がすべて決定された。

脚機構が上述の運動を行った場合の腰部の運動を示せば図16となり、歩行状態をスティック線図で示せば図17, 18となる。図16~18より、歩行機械は腰部の運動に揺動や後退を伴うことなくなめらかに歩行を開始し、また終了することがわかる。

4.2 歩行中の歩幅の拡大・縮小 種々の歩幅での定常歩行を行う場合、また定常歩行状態から歩幅を拡大・縮小して新たな歩幅での定常歩行に移行する場合も、4.1節の歩行開始・終了時の場合と同様にして脚機構の運動を決定することができる。このとき指定する脚機構の相対運動条件は3.1節に示した定常歩行時の場合の条件と同じでよい。

図19は最大歩幅の約75%の $S=215.0\text{ mm}$ の歩幅での定常歩行状態から1歩で歩幅を拡大して最大歩幅に達し、つぎの1歩で歩幅を縮小して再びもとの歩幅に復帰して定常歩行に至る過程のスティック線図である。

以上のように、2章で提案した歩幅可変脚機構により2足歩行機械の歩幅の変更が可能となり、歩行開始・終了および種々の歩幅での定常歩行を含む一連の歩行が実現できる。

5. 結 言

水平面上を直進歩行する2足歩行機械の、歩幅およ

び歩行速度の変更を伴う非定常歩行を実現するために、歩幅の変更が可能な脚機構を提案し、その運動を定めた。得られた結果を要約すれば次のとおりである。

(1) 定常歩行を行う脚機構の足関節軌跡創成機構に、原動節長調整機構を組み込んでその原動節長を調整する可調整機構とすれば、歩行中に足関節軌跡をほぼ相似的に拡大・縮小することができる。この機構に足部駆動機構を連結すれば、両脚で自由度4の歩幅可変脚機構を構成することができ、これを駆動するすべてのアクチュエータを腰部上に搭載することができる。

(2) 前項(1)の歩幅可変脚機構の運動を決定するための条件を、足部の運動条件および腰部の運動条件に分類して定めた。それらの条件下で、定常歩行時には足関節軌跡創成機構の原動軸を等速回転させるものとして足部駆動機構の原動節角変位を決定した。

(3) 歩行速度変更時の脚機構の運動は、足関節軌跡創成機構の原動軸の回転角速度を時刻の5次関数で与え、足部駆動機構の原動節角変位と足関節軌跡創成機構の原動軸の回転角の関数関係を定常歩行の場合と同じにすれば、容易に決定できる。

(4) 歩行開始・終了時の脚機構の運動を定めるためには、まず不支持脚の足部が後方に運動しない条件を追加して歩幅変更期間を求め、この期間における足関節軌跡創成機構の原動節長調整入力の時間的変化を決定した後、足部駆動機構の原動節角変位を決定する。

(5) 上記の各原動節角変位を各機構のサーボアクチュエータの目標値とすれば、定常歩行時、歩行速度変更時、および歩行開始・終了を含む歩幅変更時を通して、腰部は揺動および後退することなく運動するので、搬送機として優れた特性を有する2足歩行機械を得ることができる。

最後に本研究の一部は昭和60年度文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記する。

文 献

- (1) 舟橋・ほか3名, 機論, 50-455, C(昭59), 1285.
- (2) 舟橋・ほか3名, 機論, 50-455, C(昭59), 1292.
- (3) 舟橋・ほか2名, 機論, 51-470, C(昭60), 2737.