はく離を有する粘弾性積層はりの損失係数*

中川 紀 壽^{*1}, 池 田 隆^{*1}, 金 明 坤^{*2}

Loss Factors of Viscoelastic Laminated Cantilevers with Delamination

Noritoshi NAKAGAWA, Takashi IKEDA and Myung-Gon KIM

This paper deals with the damping properties of a viscoelastic three-layered cantilever with partial delamination. The expression for the loss factor of this cantilever is presented as the ratio of the dissipation energy to the strain energy. In analysis, the loss factors due to shearing and bending are determined independently, and the total loss factor is derived from their collective sum. According to this analysis, the effects of the delamination length, delamination position and thickness of each layer on the loss factor corresponding to each vibration mode are investigated. As a result, it is clarified that delamination makes the magnitude of the loss factor larger than in the case of no delamination, and that the value of the loss factor increases as the delamination length becomes large. In experiments, it was ascertained that the experimental values of the loss factor were in good agreement with the theoretical ones.

Key Words: Delamination, Damping Material, Laminated Construction, Damping Property, Loss Factor, Longitudinal Strain, Shearing Strain, Strain Energy, Dissipation Energy

1. 緒 言

粘弾性制振材が含まれた積層板は、優れた制振性能を有するため、自動車、機械構造物、および電機製品などに多く用いられている。積層板の減衰特性に関しては、Oberst ら⁽¹⁾、Ross ら⁽²⁾をはじめとし、これまでに多くの研究が報告されている。これらの報告は積層板の制振性能の解析や測定法に関するものがほとんどである。工業的には、大きな減衰性能をもつ積層板の開発が望まれており、例えば、各層の厚さと剛性の組合せによる方法⁽³⁾、制振材の塗布位置とその面積の変化による方法⁽⁴⁾、制振材の材料組成の改良による方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾などが提案されている。しかし、積層板の製作時や使用中に受ける振動によって生じるはく離⁽⁷⁾⁽⁸⁾については、積層板の減衰特性の観点から重要であるにもかかわらず、あまり報告されていないようである。

本研究では、中間層(制振材)にはく離を有する粘弾性三層片持はり(以下、三層はく離はりと呼ぶ)を対象とし、特に、はく離の長さ、はく離の位置、および三層はりの各層の寸法が損失係数に及ぼす影響を理論的、

実験的に調べる。まず、理論解析では、Lall ら⁽⁴⁾の理論解析に基づいて三層はりの各層に生ずる最大ひずみエネルギーと分散エネルギーを算出し、それらのエネルギーの比より各振動モードに対する三層はく離はりの損失係数を求めた。実験では、これらの損失係数の理論値が実験結果とほぼ一致することを確認した。これにより、はく離が損失係数を増加させることを示した。

2. 三層片持はりのひずみ

図1に、Lall ら⁽⁴⁾による三層はりの微小要素 dx についての解析モデルを示し、以下では単位幅 ($b=1$) のはりを考える。図1(a)は変形前の形状を示し、第 i 層の厚さを H_i ($i=1, 2, 3$) とする。図1(b)は変形後の形状を示すが、破線は縦変位の基準線を表し、三層はりの第1層および第3層における中央面の縦変位をそれぞれ u_1, u_3 、第2層のせん断ひずみを γ とする。また、ここでは各層の横変位 w は同じであり、第1、第3層のせん断ひずみは無視できるものと仮定する⁽²⁾。図1(b)において、せん断変形後の第2層の両境界面のずれ AB に関し、幾何学的関係より次式を得る。

$$\gamma H_2 = \left(u_3 + \frac{H_3}{2} \frac{dw}{dx} \right) - \left(u_1 - \frac{H_1}{2} \frac{dw}{dx} \right) + H_2 \frac{dw}{dx}$$

* 原稿受付 平成6年3月22日。

^{*1} 正員、広島大学工学部 (〒724 広島市鏡山 1-4-1)。^{*2} 正員、広島大学大学院。

(a) 変形前の形状

(b) 変形後の形状

(c) 各層の自由物体図

図1 三層はりの解析モデル

したがって、 γ は次式のようになる。

$$\gamma = \frac{1}{H_2} \left\{ u_3 - u_1 + \left(\frac{H_1 + 2H_2 + H_3}{2} \right) \frac{dw}{dx} \right\} \quad (1)$$

次に、図1(c)に、各層についての自由物体図を示す。ここに、 $F_i, M_i, S_k (i=1, 3, k=1, 2, 3)$ はそれぞれ各層に作用する引張り力、モーメント、せん断力である。第2層の境界面に作用するせん断応力を τ とすると、図1(c)より第3層における x 方向の力の釣合いより $dF_3 = \tau b dx$ なる関係が得られ、この式に $F_3 = E_3 H_3 b (du_3/dx)$ を代入すると次式を得る。

$$\tau = E_3 H_3 \frac{d^2 u_3}{dx^2} \quad (2)$$

また、 x 方向の力の釣合いより、次式が成立する。

$$dF_1 = -\tau b dx, \quad dF_3 = \tau b dx$$

上式の辺々を加え、 $x=0$ での境界条件 $F_1(0) + F_3(0) = 0$ を用いて積分を行うと、次式を得る。

$$F_1 + F_3 = 0$$

ここで、 $F_1 = E_1 H_1 b (du_1/dx)$ 、 $F_3 = E_3 H_3 b (du_3/dx)$ 、および $b=1$ を上式に代入すると次式を得る。

$$E_1 H_1 \frac{du_1}{dx} + E_3 H_3 \frac{du_3}{dx} = 0 \quad (3)$$

式(2)、(3)中の $E_i (i=1, 3)$ は、第 i 層のヤング率である。ここで、 $\tau = G^* \gamma$ (G^* : 第2層の複素せん断弾性係数) の関係を式(2)に適用し、また式(3)を x について零から x まで積分し、境界条件 $u_1(0) = u_3(0) = 0$ を

用いて得られる関係式 $u_1 = -u_3 E_3 H_3 / (E_1 H_1)$ を式(1)に使い、その式を式(2)に代入することにより、次式⁽⁴⁾を得る。

$$\frac{d^2 u_3}{dx^2} - g u_3 = s \frac{dw}{dx} \quad (4)$$

ここに、

$$g = \frac{G^*}{H^2} \left(\frac{1}{E_1 H_1} + \frac{1}{E_3 H_3} \right) \\ s = \frac{G^* (H_1 + 2H_2 + H_3)}{2E_3 H_3 H_2}$$

である。ここでは、三層片持はりの各層の横変位は同じであると仮定しているの、片持はりの場合の固有関数より、 n 次振動モードに対する形状関数 w_n は次式となる。ただし、 L ははりの長さである。

$$w_n = c \{ \cos(\lambda_n x) - \cosh(\lambda_n x) \\ + \sin(\lambda_n x) - \sinh(\lambda_n x) \} \quad (5)$$

ここに、 $\lambda_n L$ は境界条件と振動モードによって決まる無次元数 ($\lambda_1 L = 1.875$, $\lambda_2 L = 4.694$, $\lambda_3 L = 7.855$, ...) であり、 c は次式で与えられる。

$$c = - \frac{\sin(\lambda_n L) + \sinh(\lambda_n L)}{\cos(\lambda_n L) + \cosh(\lambda_n L)}$$

式(5)を式(4)に代入し、境界条件が $u_3|_{x=0} = 0$ 、 $(du_3/dx)|_{x=L} = 0$ を用いて式(4)を解くと、次式を得る。

$$u_3 = a_1 \sinh(\sqrt{g} x) + a_2 \cosh(\sqrt{g} x) \\ + a_3 \sin(\lambda_n x) + a_4 \sinh(\lambda_n x) \\ + a_5 \cos(\lambda_n x) + a_6 \cosh(\lambda_n x) \quad (6)$$

ここに、上式中の係数 $a_1 \sim a_6$ は次のようである。

$$a_1 = \frac{-1}{\sqrt{g} \cosh(\sqrt{g} L)} \{ a_2 \sqrt{g} \sinh(\sqrt{g} L) \\ + a_3 \lambda_n \cos(\lambda_n L) + a_4 \lambda_n \cosh(\lambda_n L) \\ - a_5 \lambda_n \sin(\lambda_n L) + a_6 \lambda_n \sinh(\lambda_n L) \} \\ a_2 = \frac{s \lambda_n}{\lambda_n^2 + g} + \frac{s \lambda_n}{\lambda_n^2 - g} \\ a_3 = s c \lambda_n / (\lambda_n^2 + g) \\ a_4 = -s c \lambda_n / (\lambda_n^2 - g) \\ a_5 = -s \lambda_n / (\lambda_n^2 + g) \\ a_6 = -s \lambda_n / (\lambda_n^2 - g)$$

式(6)の u_3 を x で微分すれば、第3層の縦ひずみ $\epsilon_3 (= du_3/dx)$ が求まる。また、この ϵ_3 を式(3)に代入することにより、第1層の縦ひずみ $\epsilon_1 (= du_1/dx)$ が求まる。さらに、式(1)~(6)を用いると、 γ が求められる。

3. 三層はく離はりの損失係数

図2(a)にはく離を有する三層片持はりの解析モデルを示す。ここでは、第2層の制振材にはく離が縦(長

図 2 三層片持はく離はりの解析モデルと変形状

さ)方向に存在する場合を考える。 d_1 と d_2 はそれぞれ三層はく離はりの固定部からはく離の始点および終点までの距離、 H_a は第1層と第2層の境界面(以下、P12とする)からはく離までの制振材の厚さ、 H_b は第2層と第3層の境界面(以下、P23とする)からはく離までの厚さを表す。

ところで、第2層のヤング率が他の層に比べて十分小さい場合には、はく離のない三層はりが横変位を受けると、第2層の制振材に生じる曲げ変形はせん断変形に比べ十分小さい⁽²⁾ので、せん断変形のみが生じると考えてよい。一方、三層はく離はりが横変位を受けると、第2層には、全長にわたって生じるせん断変形に加え、長さ $d_2 - d_1$ のはく離が存在する部分に曲げ変形が生じると考えられる。なぜなら、はく離が存在する部分は上下二つの二層はりと等価であり[図2(b)]、二層はりでは曲げ変形のみが生じるからである⁽²⁾。また、せん断変形が全長にわたって生じる理由は、ここでははく離が制振材に埋没している場合を考えているため、はく離の存在する部分の制振材もはく離の左右の制振材により拘束されているからである。このように三層はく離はりでは、制振材のせん断変形による減衰効果に加え、さらにはく離の部分と等価的に置き換えた二つの二層はりにおける制振材の曲げ変形による減衰効果が前者とは独立に加算されると考えられる。以上より本章では、三層はく離はりに生じるせん断変形、および曲げ変形のそれぞれによるひずみエネルギーと分散エネルギーを独立に求め、その比からそれぞれの損失係数を算出し、それらの和をとることにより三層はく離はり全体の損失係数を求めることができる。

3・1 制振材のせん断変形による損失係数 第2層のヤング率、および第1、第3層の損失係数は、それぞれ第1、第3層のヤング率、および第2層の損失係数に比べ十分小さいため⁽¹⁰⁾、はく離のない三層はりの伸縮、曲げ、およびせん断変形によるひずみエネルギー

— T_0 、分散エネルギー D_0 、および損失係数 η_0 は次式で与えられる⁽⁴⁾。

$$T_0 = \frac{E_1 H_1}{2} \int_0^L \epsilon_1^2 dx + \frac{E_3 H_3}{2} \int_0^L \epsilon_3^2 dx + \frac{E_1 H_1^3}{24} \int_0^L M_t^2 dx + \frac{E_3 H_3^3}{24} \int_0^L M_t^2 dx + \frac{G H_2}{2} \int_0^L \gamma^2 dx \dots (7)$$

$$D_0 = \frac{G H_2 \beta}{2} \int_0^L \gamma^2 dx \dots (8)$$

$$\eta_0 = \frac{D_0}{T_0} \dots (9)$$

ここに、 $M_t = d^2 w / dx^2$ 、 G は複素せん断弾性係数 G^* の実部、 β は制振材のせん断変形による損失係数である。式(7)の右辺の第1、第3項は第1層の伸縮と曲げによるひずみエネルギー、第2、第4項は第3層の伸縮と曲げによるひずみエネルギー、第5項は第2層のせん断によるひずみエネルギーである。

次に、三層はく離はりに対するひずみエネルギーを考える。まず、第2層のせん断変形によるエネルギーは、前述のようにはく離が存在しても、はり全体にせん断ひずみが作用する。また、式(7)における第3、第4項の曲げ変形によるエネルギーのうちはく離区間におけるエネルギーは、後述(3・2節)の曲げ変形に対してのみ生じるから、はく離の区間では式(7)の M_t を零とする。したがって、三層はく離はりに対するひずみエネルギー T_s 、分散エネルギー D_s は次式で与えられる。

$$T_s = \frac{E_1 H_1}{2} \int_0^L \epsilon_1^2 dx + \frac{E_3 H_3}{2} \int_0^L \epsilon_3^2 dx + \frac{E_1 H_1^3}{24} \left(\int_0^{d_1} M_t^2 dx + \int_{d_2}^L M_t^2 dx \right) + \frac{E_3 H_3^3}{24} \left(\int_0^{d_1} M_t^2 dx + \int_{d_2}^L M_t^2 dx \right) + \frac{G H_2}{2} \int_0^L \gamma^2 dx \dots (10)$$

$$D_s = \frac{G H_2 \beta}{2} \int_0^L \gamma^2 dx \quad (= D_0) \dots (11)$$

ゆえに、せん断変形による損失係数 η_s は次式となる。

$$\eta_s = \frac{D_s}{T_s} \dots (12)$$

3・2 制振材の曲げ変形による損失係数 図2(b)に示すように、はく離が存在する部分は上下二つの二層はりに等価的に置き換えることができる。式(10)の第3、第4項においてははく離部分ではせん断変形による M_t を零としたので、その代わりとして曲げ変形による M_t を求め、それによるひずみエネルギーを考慮する。この場合、はく離部分の左右は拘束されているため、上下二つの二層はりの横変位は同じであ

と考えることができる。したがって、はく離部分における曲げ変形によるひずみエネルギー T_B 、および分散エネルギー D_B は次式で与えられる⁽⁹⁾。

$$T_B = \pi \left\{ \frac{E_1 H_1^3}{12} + \frac{E_3 H_3^3}{12} + E_2 H_a \left(\frac{H_1 + H_a}{2} \right)^2 + E_2 H_b \left(\frac{H_3 + H_b}{2} \right)^2 \right\} \int_{d_1}^{d_2} M_t^2 dx \dots \dots \dots (13)$$

$$D_B = \pi \eta_2 E_2 \left\{ H_a \left(\frac{H_1 + H_a}{2} \right)^2 + H_b \left(\frac{H_3 + H_b}{2} \right)^2 \right\} \int_{d_1}^{d_2} M_t^2 dx \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 η_2 は制振材の曲げ変形による損失係数で、せん断変形による損失係数 β と同じ値とする。第2層内にはく離が存在する場合の曲げ変形による損失係数 η_B は、式(13)と(14)の比(D_B/T_B)をとることにより求められる。ただし、ここでははく離の長さを考慮して、全長 L に対するはく離の長さ $\alpha = (d_2 - d_1)/L$ を掛けた次式を用いる。

$$\eta_B = \alpha \frac{\eta_2 B}{E_1 H_1^3 + E_3 H_3^3 + B} \dots \dots \dots (15)$$

ここに、 $B = 3E_2 \{ H_a (H_1 + H_a)^2 + H_b (H_3 + H_b)^2 \}$ である。後述の実験でははく離が境界面に存在する場合を扱っているが、境界面 P 12、または P 23 に存在する場合には、損失係数 η_B は式(15)より次式で与えられる。

$$\eta_B = \alpha \frac{3\eta_2 E_2 H}{(E_1 H_1^3 + E_3 H_3^3) + 3E_2 H} \dots \dots \dots (16)$$

ここに、 H ははく離が P 12、または P 23 に存在する場合、それぞれ $H = H_2 (H_1 + H_2)^2$ 、または $H = H_2 (H_3 + H_2)^2$ である。

3・3 三層はく離はりの損失係数 式(12)、(15)の和をとることにより、三層はく離はりの損失係数 η は次式となる。

$$\eta = \eta_s + \eta_B \dots \dots \dots (17)$$

はく離が境界面に存在する場合には、式(15)の代わり式(16)を用いばよい。

以上の解析で求められた η_0 [式(9)], η_s [式(12)], η_B [式(15)], および η [式(17)] の値の大小関係を検討する。せん断変形によるひずみエネルギーははく離部分 $d_2 - d_1$ では $M_t = 0$ として計算しているため、 $T_0 > T_s$ であり、同時に $D_0 = D_s$ の関係式より、 $\eta_0 < \eta_s$ となる。また曲げ変形による損失係数 η_B は $\eta_B > 0$ である。したがって、三層はく離はりの損失係数 η は、式(17)より常に $\eta > \eta_0$ の関係が成立することがわかる。すなわち、本解析ははく離によって損失係数が増大する可能性を示唆している。

表 1 試験片に用いた各層の厚さ

H_1	0.6 ~ 1.0 (0.1mm step)
H_2	1.2 mm
H_3	0.2 ~ 0.6 (0.1mm step)

表 2 各層の物性値

Layer	Material properties	
1st	$\eta_1 = 0.0025$	$E_1 = 186.06 \text{ GPa}$
2nd	$\eta_2 = 0.2506$	$E_2 = 970.79 \text{ MPa}$
	$\beta = \eta_2$	$G_2 = 117.74 \text{ MPa}$
3rd	$\eta_3 = \eta_1$	$E_3 = E_1$

4. 三層はく離はりの実験装置と試験片

実験装置は、はく離のない三層はりの場合に用いたものと同じ⁽³⁾で、室内温度は $18 \pm 3^\circ\text{C}$ であった。三層はく離はりの試験片の形状は既報⁽¹⁰⁾と同じで、第1層と第3層はSK材(炭素工具鋼)であり、第2層にはアスファルト系の粘弾性制振材を用いた。本実験では、はく離が弾性層と粘弾性層の間で起きやすいことを考慮し、境界面 P 12、または P 23 にはく離を有する場合を扱った。はく離の製作方法は、境界面に厚さ約 0.1 mm のタック紙の台紙(その表面にはシリコンが塗布されている)を挟み、そのまま 150°C のオープンのなかで 30 分間焼付け、冷却した後に台紙を引き出した。

表 1 に本実験で用いた試験片の各層の厚さを示す。試験片の長さは $L = 300 \text{ mm}$ 、幅は 12.7 mm 、および制振材の厚さは $H_2 = 1.2 \text{ mm}$ として一定にした。

試験片の各層の物性値(ヤング率、損失係数)は、既報⁽³⁾⁽¹⁰⁾と同じ方法で測定し、その測定結果を表 2 に示す。ただし、表 2 中には、 η_1 (または η_3)の測定値が参考のため示してあるが、この値は前述のように小さいため、本論文の計算では無視している。

5. 三層はく離はりの損失係数の 実験値と計算値の比較

図 3 は、はく離の長さ、および厚さ方向の位置が損失係数に及ぼす影響を調べた実験結果と理論結果である。各図の横軸ははりの全長に対するはく離の長さ α (%), 縦軸は三層はく離はりの損失係数 η を表す。ここで用いた試験片は、図 3(a), (b)ではそれぞれ $H_1 = H_3 = 0.4 \text{ mm}$, $H_1 = H_3 = 0.6 \text{ mm}$ の対称形はり、図 3(c), (d)ではそれぞれ $H_1 = 0.8$, $H_3 = 0.4 \text{ mm}$, $H_1 = 0.9$, $H_3 = 0.3 \text{ mm}$ の非対称形はりである。図 3 中の ●, ■, ▲印ははく離が境界面 P 12 に存在する場合、

(a) 対称形, $H_1=0.4$, $H_2=1.2$, $H_3=0.4$ mm (b) 対称形, $H_1=0.6$, $H_2=1.2$, $H_3=0.6$ mm (c) 非対称形, $H_1=0.8$, $H_2=1.2$, $H_3=0.4$ mm (d) 非対称形, $H_1=0.9$, $H_2=1.2$, $H_3=0.3$ mm

図3 三層はく離はりの損失係数

図4 三層はく離はりの損失係数の計算値
($H_1=0.8$, $H_2=1.2$, $H_3=0.4$ mm)

○, □, △印は境界面 P23 に存在する場合の 1 次, 2 次, および 3 次モードの実験値を表す。また実線, 破線は, それぞれはく離が境界面 P23, P12 に存在する場合の理論値である。図 3 より, はく離が長くなるにつれ損失係数は増加し, 例えば 1 次モードに対しては, 50%のはく離が存在する場合の損失係数ははく離がない場合よりも 3 倍以上の大きい値になることがわかる。また, はく離の位置が損失係数に与える影響については, 図 3(c), (d) より, 境界面 P23, すなわちはく離が薄い弾性層の側に存在する場合のほうが境界面 P12 のほうより損失係数は多少大きくなる傾向があることがわかる。全体的に理論結果は実験結果とほぼ

一致していることから, 本解析は妥当であることがわかる。

図 4 に, セン断変形による損失係数 η_s と曲げ変形による損失係数 η_B を分離して計算した結果を示す。ここで用いた三層はく離はりの各層の寸法は, 図 3(c) の場合と同じものである。一点鎖線と破線はそれぞれ η_s と η_B , 実線はそれらを加えた三層はく離はり全体の損失係数 η を表す。式 (13)~(16) よりわかるように, 破線で示された η_B は, 振動モードに依存しない。一方, η_s ははく離の長さによらずほぼ一定である。これは, はく離の左右が拘束されており, 横振動の振幅が微小であるためである。また, 1 次モードでは η_s と η_B は同程度の大きさであるため, はく離の長さに対する η_B の大きな変化により, 1 次モードに対する η の値に著しい増加が現れている。

図 5(a), (b) は, はく離の長さが 10% (30 mm) である場合, はく離の位置 d_1 の変化による損失係数を示す。図 5(a) は厚さ $H_1=H_3=0.4$, $H_2=1.2$ mm の対称形はり, 図 5(b) は $H_1=0.8$, $H_2=1.2$, $H_3=0.4$ mm の非対称形はりである。図 5 より, はく離の長さが一定である場合には, 長さ方向の位置の変化によらず損失係数はほぼ一定になることがわかる。

図 6(a), (b) は, はく離の長さが, それぞれ 10%

(a) 対称形, $H_1=0.4$, $H_2=1.2$, $H_3=0.4$ mm (b) 非対称形, $H_1=0.8$, $H_2=1.2$, $H_3=0.4$ mm

図 5 長さ方向のはく離の位置による損失係数

(a) はく離 10%

(b) はく離 20%

図 6 一定質量の三層はく離はりに対する損失係数

と 20% であり, $H_1+H_3=1.2$ mm, $H_2=1.2$ mm である形状の一定質量をもつ三層はく離はりの損失係数を示す。図 6 より, H_1 と H_3 が同じ厚さである場合のほうがそれらの差が大きい場合よりも損失係数が大きくなることわかる。

6. 結 言

はく離を有する三層片持はりの損失係数に関し, はく離長さが全長の 50% の範囲内について理論的, 実験的に調べた結果, 以下のことが明らかとなった。

(1) はく離を有する三層片持はりの各振動モードに対する損失係数は, はく離がない場合より大きくなり, はく離の長さの増加とともに増大する。

(2) 曲げ変形による損失係数 η_B が, 三層はく離はりの損失係数の増加に大きく寄与する。

(3) はく離の長さの増大に対する損失係数の増加は, 一次モードの場合が他のモードに比べ顕著である。

(4) はく離が三層はりの境界面に存在するとき,

二つの弾性層のうち, 薄い層の側の境界面にはく離のある場合の方が損失係数が大きい。

(5) はく離の長さが一定である場合, はく離の長さ方向の位置の変化は損失係数にあまり影響を及ぼさない。

文 献

- (1) Oberst, H. and Frankenfeld, K., *Acustica*, 2(1952), AB181.
- (2) Ross, D., ほか 2 名, *Structural Damping, Section Three*, (1959), 49, Pergamon Press.
- (3) 中川・ほか 2 名, 機論, 59-563, C(1993), 2053.
- (4) Lall, A. K., ほか 2 名, *J. Sound Vib.*, 123-2(1988), 247.
- (5) 安達・ほか 2 名, 機論, 58-546, C(1992), 390.
- (6) 藤本・宇郷, NEC 技報, 44-5(1991), 28.
- (7) 遠藤, 熱処理, 31-1(1991), 28.
- (8) Mujumdar, P. M. and Suryanarayan, S., *J. Sound Vib.*, 125-3(1988), 441.
- (9) Cremer, L., Heckl, M. and Ungar, E. E., *Structure-Borne Sound*, (1973), 217, Springer-Verlag.
- (10) 中川・ほか 2 名, 機論, 60-572, C(1994), 1182.