

歩道橋の振動使用性に関する一考察

CONSIDERATION OF VIBRATION SERVICEABILITY ON PEDESTRIAN BRIDGES

小幡 卓司* 林川 俊郎** 桑島 正樹***

By Takashi Obata, Toshiro Hayashikawa, Masaki Kuwajima

In general, pedestrian bridges are more flexible than highway bridges, because design load is small and stiffness is low. The vibration serviceability of pedestrian bridges has become an important problem in all over the world as well as in Japan.

In recent years, the fuzzy sets theory is often used as a method of analyzing problems including ambiguity.

In this study, the human vibration sensibility is analyzed by means of fuzzy reasoning. It is concluded that the application of fuzzy sets theory to the problems of vibration serviceability of pedestrian bridges is considerably effective. And it shows that designers obtain a quantitative solution of a human vibration sensibility by this method.

1. まえがき

昭和40年から50年頃にかけて、道路横断のための歩道橋が盛んに建設された。歩道橋は道路橋に比べ、剛性が小さく細長い構造であるため、歩行者の通行によって振動が生じ易く、その振動使用性が設計において検討すべき項目として、重要視されるようになった。振動使用性問題は、日本のみならず世界各国でも注目され、盛んに研究が行われた。その結果、各国において照査方法が設計基準として示されるようになってきた。その主なものとして、イギリスのBS5400(1978年)、カナダのOntario code(1983年)等があり、日本においては立体横断施設技術基準・同解説(昭和54年)(以下基準と称す)がある。

一般道路における横断歩道橋は、歩行者の立場からはその利用がかえって不便であることや美観上の問題から、最近ではあまり建設されなくなった。その反面、道路橋に並行して架けられる側道橋や、河川や高速道路によって分断された地域の歩行者交通を円滑にする人道橋、さらにはゴルフ場、サイクリングロードや公園内に架設される遊歩道橋と称される橋梁の建設は数多く行われている。このような歩道橋は、従来の横断歩道橋に比してスパンがかなり長く、幅員も広いものが多い。とりわけスパンが40mを越える

* 正会員 北海道大学助手 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

*** 学生会員 北海道大学大学院 土木工学専攻 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

ような大規模な歩道橋では、その低次の固有振動数について基準に示されている範囲（1.5Hz～2.3Hz）を避けることが困難である場合がしばしばある。そのため、設計に際し必要以上の剛性を付加したり、高強度の材料を使用する場合も少なくないと思われる。また、概ね死荷重が150tを越え、道路橋と同型式の支承を採用しているような大規模な歩道橋では、共振周期で歩行してもその使用性は問題が少なく、さらに人間の走行周期に近い 3Hz前後の振動数にも注意が必要であるとの報告もある¹⁾。以上より、ある程度大規模な歩道橋では、基準の振動数を盲目的に守るよりは、むしろ海外で行われているように、動的応答量を求め、その解と振動じょ限度を比較して振動使用性を評価すべきであると思われる。そのためには、明確で理解しやすい振動じょ限度が示される必要がある。日本における振動じょ限度の主な研究は、小堀・梶川の研究²⁾³⁾、梶川の研究⁴⁾、三輪・米川の研究⁵⁾等がある。表－1に小堀・梶川の歩行位における振動じょ限度を示す。

近年、ランダム性以外の不確かさを含んだ問題を取り扱う手法として、ファジィ理論が注目されている。ファジィ理論では、人間の振動感覚のような命題に含まれるあいまいさを、グレードまたはメンバーシップ値と呼ばれる数値を与えることによって、定量的に解析することが可能である。本研究ではファジィ理論の応用手段の一つであるファジィ推論を用いて、表－1の振動じょ限度を基準としたそれぞれの振動感覚についてのメンバーシップ関数と推論規則を作成し、人間の振動感覚の定量的な解析手法について検討を行ったので、その結果を報告する。

表－1 小堀・梶川のじょ限度

No	振 動 感 覚	振動速度 (cm/sec)	
		最大値	実行値
0	全く感じない	－	－
1	少し感じた	0.6	0.42
2	明らかに感じた	1.2	0.85
3	少し歩きにくい	2.4	1.7
4	大いに歩きにくい	3.8	2.7

2. 解析手法

2－1 ファジィ推論

ファジィ推論はIF－THEN形式で表現された推論規則に基づいて前件部（IF～の部分）の適合度を求め、それに応じた後件部（THEN～の部分）の適合度を得るものである。したがって、ファジィ推論を行うためには、IF－THEN規則群とそれに対応したメンバーシップ関数（ファジィラベル）が必要である。本研究では振幅、振動数および振動感覚をパラメータとした前件部2変数、後件部1変数からなる、次のような推論規則を用いる。

規則例：もし振幅が大きくて振動数が高ければ不快感を感じる。

IF x is A and y is F THEN z is S

ここで、A：振幅のファジィ集合 F：振動数のファジィ集合 S：振動感覚のファジィ集合
 ファジィ推論にはいくつかの方法があるが、ここでは最も多く用いられている直接法（Mamdaniの推論法）を採用した。表－2にファジィ推論の種類を、また図－1にファジィ関係Rを用いた直接法概念図を示す。直接法を用いる場合、まず各規則から個々のファジィ関係R_iを求め、この各規則のファジィ関係R_iを全規則のファジィ関係Rにまとめる必要がある。各規則のファジィ関係R_iは

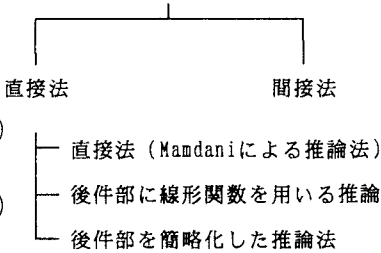
$$R_i = A_i \text{ and } F_i \rightarrow S_i = A_i \times F_i \times S_i \\
= \{x \times y \times z \mid (\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{F_i}(y) \wedge \mu_{S_i}(z)) \mid (x,y,z) \cdots (1)$$

メンバーシップ値の定義式で表現すれば

$$\mu_{R_i}(x,y,z) = \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{F_i}(y) \wedge \mu_{S_i}(z) \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、A_i , F_i , S_i：各規則におけるファジィ集合

表－2 ファジィ推論の種類
 ファジィ推論



$\mu_{A_i}, \mu_{F_i}, \mu_{S_i}$: A_i, F_i, S_i におけるグレード

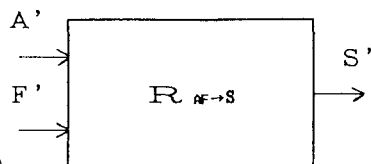
X, Y, Z : A_i, F_i, S_i の台集合

$\int$: ファジィ集合の連続表現

さらに式(1)または式(2)によって、得られた R_i から最終的なファジィ関係 R に変換する。

$$R = R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cdots \cdots \cup R_n = \cup R_i \cdots \cdots (3)$$

ここで n : 規則数



前件部変数が2つの場合には R は3項ファジィ関係となるので、推

論結果は2段階の合成演算で求めることができる。式(3)で得られたファジィ関係 R から、台集合 X 上のファジィ集合 A' と台集合 Y 上のファジィ集合 F' の入力に対する Z 上の推論結果のファジィ集合 S' はmax-min合成を行うことにより、以下の式で求めることができる。

$$\begin{aligned} S' &= (A' \text{ and } F') \circ R \\ &= A' \circ (F' \circ R) = F' \circ (A' \circ R) \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

式(4)で得られる S' は台集合 Z 上におけるファジィ集合であるので、本研究ではこれを定量的に取り扱うために非ファジィ化によって確定値を出力する操作を行う。非ファジィ化は、得られた S' の重心を求めることによって確定値を得る方法を用いる。以下にその式を示す。

$$z_0 = \int \mu'_s(z) \cdot z \, dz / \int \mu'_s(z) \, dz \cdots \cdots (5)$$

以上の手法をプログラム化することにより、パソコン等で振動感覚を解析的に求めることが可能となる。

2-2 メンバースhip関数

上記のようなファジィ推論を行うためには、 A_i (振幅)、 F_i (振動数)、 S_i (振動感覚)のそれぞれのメンバースhip関数を定義する必要がある。一般に、メンバースhip関数は状況に応じて経験的に決められることが多く、汎用的な決定方法は確立されていない。

人間の振動感覚における刺激と感覚の関係は、刺激がある値より小さいと脳への伝達経路中に吸収されてしまい感覚として認識されない範囲が存在するといわれている²⁾。この関係を図-2に示す。図-2における S_0 は閾値または刺激閾と呼ばれるもので、計量心理学では閾値は反応の起きる確率が50%の刺激値であると定義されている。これらの関係の特性は、刺激と感覚が一次的な関係でなく、刺激 S とその増分 dS の比が一定であるという Weberの法則から、感覚的増分 dR と刺激増分 dS が比例的に変化するものとすれば次の式が与えられる³⁾。

$$dR = C \frac{dS}{S} \quad (C \text{は定数}) \cdots \cdots (6)$$

式(6)を微分方程式と考えれば、感覚量 R は

$$R = C \log_e S + A \cdots \cdots (7)$$

ここで定数 A は刺激閾($S = S_0$)で $R = 0$ となるから $A = -C \log_e S_0$ とおくと

$$R = C \log_e \left(\frac{S}{S_0} \right) \cdots \cdots (8)$$

S_0 を単位($S/S_0 = 1$)とし、自然対数を常用対数で表せば

$$R = k \log_{10} S \quad (k = C \log_e 10) \cdots \cdots (9)$$

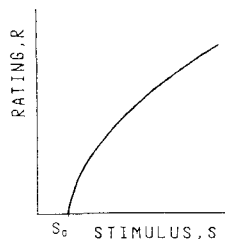


図-2 刺激と感覚の関係

式(9)はFechnerの法則と呼ばれるものである。以上より刺激 S と感覚量 R は対数関係にあることがわかる。しかしながら、各規則のメンバースhip関数をすべて対数で表現することは困難であり、またコンピュータ上で離散的に取り扱う際にも極めて不便である。したがって、本研究のファジィラベルは一般的な三角形メンバースhip関数を用い、振幅および振動数とメンバースhip値の関係が対数関係であると考え、

ファジィラベルの横軸（台集合）に対数座標を用いることとした。台集合の単位は、振幅についてはmm、振動数についてはHz、振動感覚については百分率（例えば10人うち5人が不快を感じた場合、50%とする）とした。図-3に推論規則のファジィラベルの一例を示す。

3. 解析およびその結果

まず解の線形性および一意性を確認するために、推論規則をそれぞれ25組（台集合の離散化数17個）、81組（33個）、289組（33個）に設定して計算を行った。台集合の範囲は振幅が0.25～4.0mm、振動数が1.0～9.0Hzとした。図-4～6に、振幅を1mmとした場合の振動感覚の計算結果を示す。これらの結果から次のことが考えられる。

3つの結果のうち、規則数が81組と289組の場合は、ほぼ線形なグラフが得られた。よって任意の振幅、振動数に対して個々の計算結果を得るには最低でも81組程度の規則数が必要である。また、2Hz～4.5Hzでは3つのグラフはよく一致しているが、規則数の増加にともなって低振動数領域（1.5Hz程度以下）では解が大きくなり、高振動数領域（7Hz程度以上）では解が小さくなる傾向がある。これは推論結果のファジィ集合S'が台集合の下限および上限付近で、その重心の移動が限定されてしまうためと思われる。したがって、規則数の増加に応じて台集合の範囲も広く設定し、重心の移動量を確保する必要がある。

以上の点を考慮して、表-3に示す4つのカテゴリ-について解析を行った。推論規則は81規則とし、台集合はそれぞれのカテゴリ-に応じて表-3のように設定した。その結果を図-7～10に示す。それぞれの図に、表-1の小堀・梶川のじよ限度も併記した。また、図-9にはBS5400とOntario codeのじよ限度も示してある。各振動感覚における50%値（閾値）は、基準とした小堀・梶川のものとはほぼ一致し、本研究のファジィラベルと推論規則の設定は妥当であることがわかる。したがって、本研究の解析手法

を用いれば、任意の振幅および振動数に対する各カテゴリ-における振動感覚や、50%以外の等感覚線等を計算によって求めることができる。このことは、振動使用性検討の対象となる橋梁の動的応答量を把握することによって、現行の基準よりもはるかに綿密で具体的な照査が行える可能性を示している。また、それぞれのカテゴリ-に対する解が得られることから、海外で用いられているような固定的なじよ限度で評価するのではなく、歩道橋の設置場所や利用状況に応じたじよ限度を設定し評価することもできると思

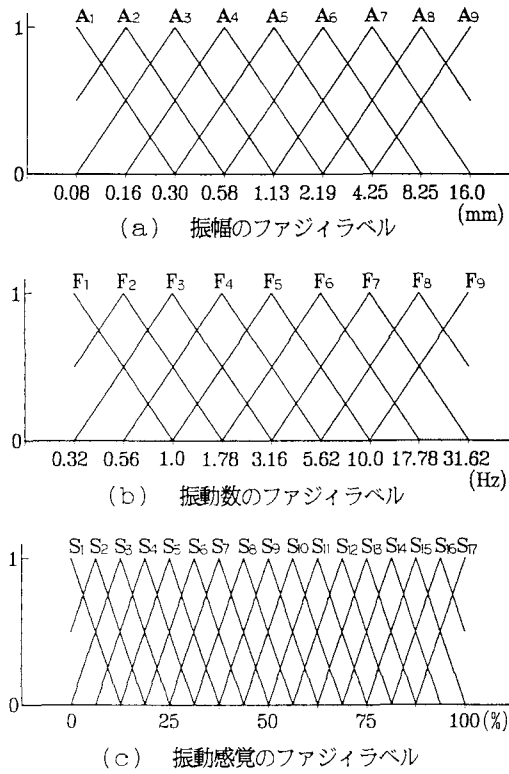


図-3 ファジィラベル

表-3 振動感覚のカテゴリ-

No	カ テ ゴ リ-	振幅の台集合 (mm)	振動数の台集合 (Hz)
1	振動を感じはじめる	0.02 ～ 4.12	0.32 ～ 31.6
2	明らかに振動を感じる	0.04 ～ 8.25	0.32 ～ 31.6
3	少し不快である	0.08 ～ 16.0	0.32 ～ 31.6
4	大いに不快である	0.16 ～ 31.0	0.32 ～ 31.6

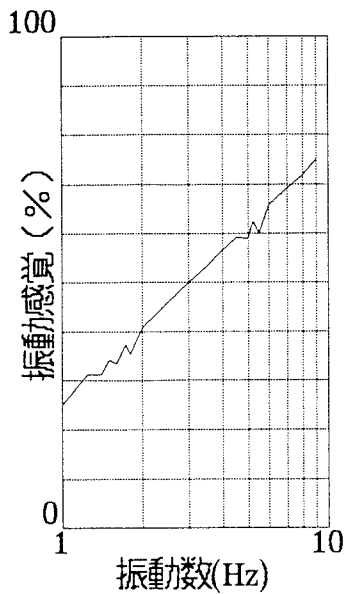


図-4 25規則の場合

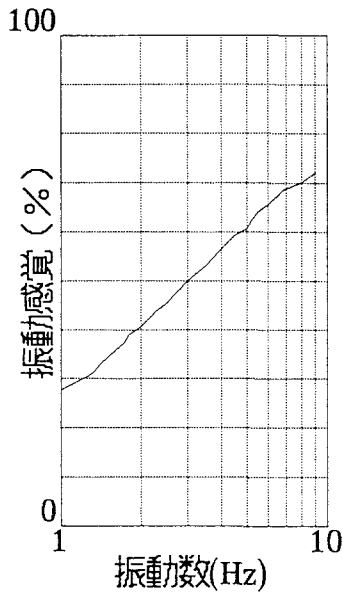


図-5 81規則の場合

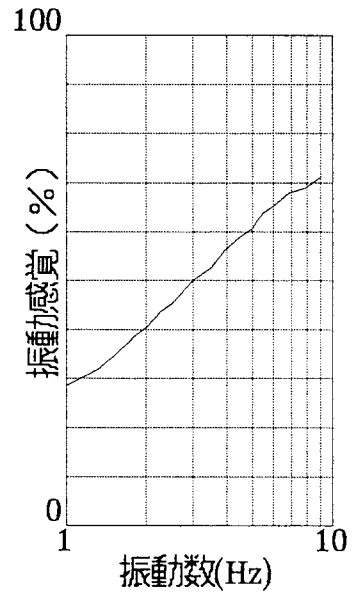


図-6 289規則の場合

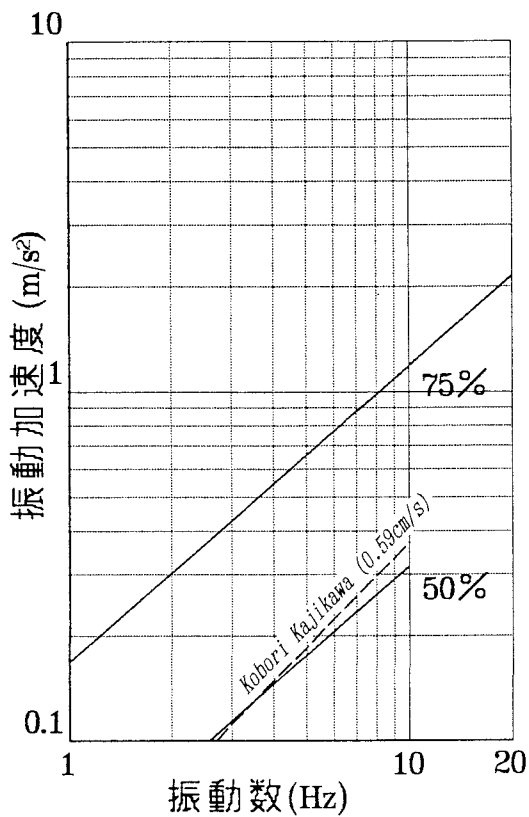


図-7 カテゴリー1（振動を感じ始める）

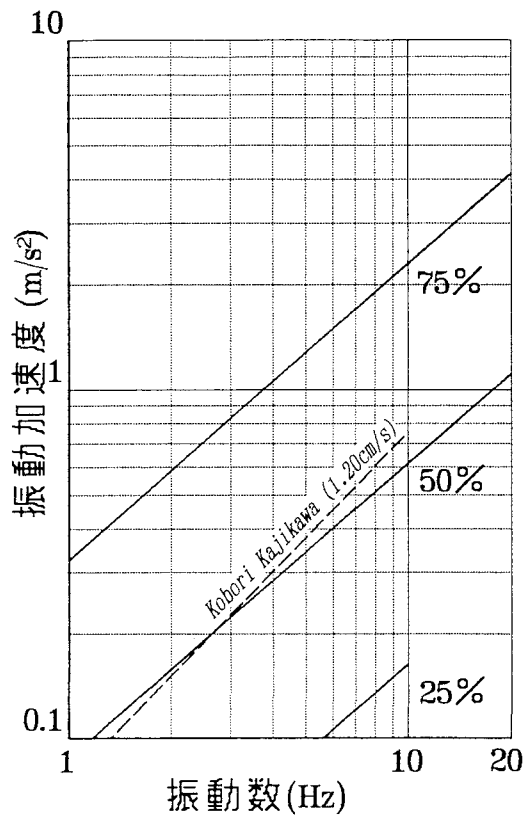


図-8 カテゴリー2（明らかに振動を感じる）

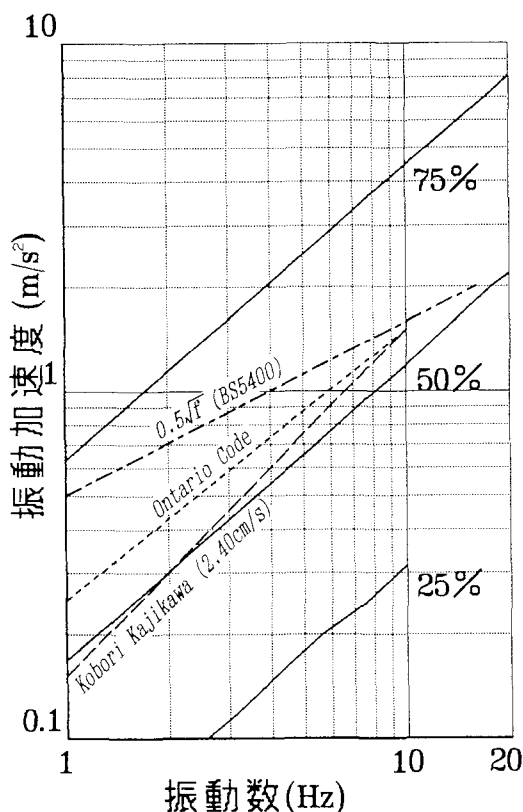


図-9 カテゴリー3 (少し不快である)

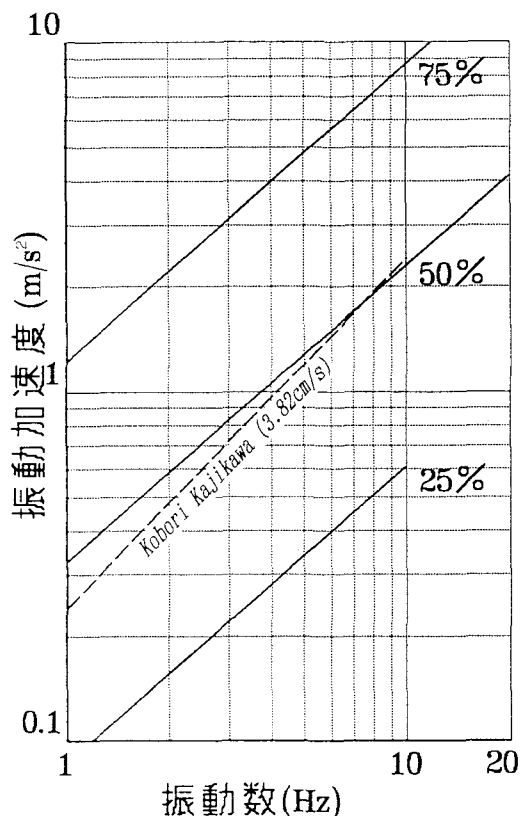


図-10 カテゴリー4 (大いに不快である)

われる。以上より、本解析手法は、振動感覚の解析的な予測結果を提供できるため、設計段階や供用前の実験による使用性検討に際して、非常に有効な手段であると考えられる。図-9における、少し不快を感じる場合の解析結果を用いてBS5400とOntario codeのじよ限度を評価すると、前者では1~4Hzで60~70%程度、4Hz以上では55~60%程度であり、後者ではおよそ55%の感覚量であることがわかる。BS5400は、Ontario code、オーストラリアのWheeler、チェコスロバキア等でじよ限度の参考とされているが、採用されるには至っていない⁷⁾。その理由は許容値が大きすぎるためと考えられるが、本研究はこれを解析的に証明したと言えよう。また、Ontario codeのじよ限度は比較的良好であると思われるが、例えば走行状態や共振周期で歩行した場合は少し不快に感じるケースが多いと推定される。

4. あとがき

前述のように、本研究の解析結果は従来の研究と比較してほぼ妥当であり、振動使用性問題におけるファジィ推論の適用は非常に有効であると思われる。今回は、振幅と振動数をパラメータとしたが、例えば減衰等を考慮することも、前件部変数を増加することにより対応が可能である。ただし、直接法では前件部変数が増えるごとに規則数が指数関数的に増大するため、解析には大型計算機が必要になる。著者らの計算では、MS-DOSシステムのパソコンで289規則、台集合の離散化数33個がほぼ限界であった。また、解析で得られる振動感覚は、ある刺激を受けた人々のうち反応の起きる人のパーセンテージで与えられるため、じよ限度に関する特別な知識が無くても容易に理解できる。さらに、任意の振幅および振動数に対して計算できるため、設計段階での使用性検討には極めて有効な手段であると考えられる。最後に問題点

として、振動感覚の閾値についての研究は過去に多数あるが、例えば25%や75%等の場合の実験データは意外と公開されていない。したがって、今後の課題として、本研究で得られた解析結果を実験的に検証する必要があると思われる。

なお、本研究の一部に平成4年度文部省科学研究費 奨励研究(A) (研究代表者 小幡 卓司、課題番号 04750445) の援助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田中信治・加藤雅史・鈴木森晶：支間40mを越える歩道橋の実振動特性，構造工学論文集 Vol.38A pp773～780,1992
- 2) 小堀為雄・梶川康男：道路橋の振動とその振動感覚，土木学会論文報告集第222号 pp15～23,1974
- 3) 小堀為雄・梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法，土木学会論文報告集第230号 pp23～31,1974
- 4) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集第325号 pp23～33,1982
- 5) 三輪俊輔・米川善晴：振動の評価法1，2，3，日本音響学会誌27巻1号 pp11～39,1971
- 6) 田中良久：心理学的測定法，東京大学出版会，1971
- 7) 梶川康男・加藤雅史：歩道橋の振動と使用性設計，振動制御コロキウムPARTB論文集 pp9～14,1991
- 8) 小幡 卓司・林川俊郎・桑島正樹・金子達哉：ファジィ推論を用いた体感振動解析について，土木学会北海道支部論文報告集 pp209～212,1992
- 9) 小堀為雄・梶川康男・城戸隆良：振動感覚を考慮した歩道橋の設計，橋梁と基礎，Vol.8, No.12, pp23～29,1974
- 10) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，丸善，昭和54年
- 11) 三矢直城・田中一男：C言語による実用ファジィブック，ラッセル社，1989
- 12) 田中一男：応用をめざす人のためのファジィ理論入門，ラッセル社，1991
- 13) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988

(1992年 9月21日受付)