

圧砕機による 9 階建て SRC 造建物解体工事の振動測定

A VIBRATION MEASUREMENT OF A DEMOLITION WORK OF A 9-STORY SRC BUILDING BY CONCRETE CRUSHERS

成田 修英*¹, 保井 美敏*², 山本 健史*¹

Nobuhide NARITA, Mitoshi YASUI and Takeshi YAMAMOTO

This paper presents the results of a measurement of vibrations of a demolition work. A target of the demolition work is a 9-story SRC building that demolished by concrete crushers. The measurement is done twice, one is at the time of demolishing 9th floor, and the other is at the time of demolishing 3rd floor. At the times, we measured vibrations of 1st floor in a vertical direction. We analyzed the data of the measurement, and concluded as follows.

1. Pulse inputs to a demolished floor is predominant in the excitation force of the demolition work.
2. Works satisfied the condition is as follows. Those are moving cranes over steps, and pulling down the building skeletons.
3. On the contrary, works that have a small influence is as follows. Those are moving cranes, idling cranes, crushing the building skeletons, splitting the debris, landing the debris, and exporting the debris.
4. The vibrations are increased by the building in the case of the excitation force being at the top floor of the building. On the other hand, the vibrations are decreased by the building in the case of the excitation force being at 1st floor of the building.

Keywords : *Vibration of demolition work, Shock, Frequency characteristic, Soil structure interaction*
 解体振動, 衝撃, 周波数特性, 地盤と建物の相互作用

1. はじめに

全国の地方公共団体が受理した振動に係る苦情の件数は、1970年代～1990年代までは減少傾向にあったが（1974年に4,095件あった苦情が1993年には2,083件に減少）、その後は、（短期的には減少する年もあるものの）全体的に微増傾向にあり、2014年の苦情件数は、1993年の約1.5倍もの数（3,180件）に達している¹⁾。このうち建設工事振動に関する苦情は約6割を占めており¹⁾、建設工事振動低減技術のニーズは日増しに大きくなっているものと考えられる。

本報は、合理的な建設工事振動低減技術の開発を最終的な目標とし、その端緒として、まず建設工事振動の中でも振動が大きくなりがちな、解体工事振動を対象として振動測定を行い、測定データを分析した結果について報告する。

2. 検討対象

2.1 建物概要

図-1に振動測定の対象とする解体建物（以下、建物Aと呼ぶ）の立面図を示す。建物Aは地上9階・地下2階建てのSRC造建物であり、平面的には、同図に示す梁間方向29.9m×桁行方向66.7mの矩形の建物となっている。

解体作業は塔屋からR階、その下階へ向かって、順次、圧砕機を用いて行われる。写真-1は9階解体時の状況である。本検討では、2016年8月27日の9階解体時、および同年11月10日の3階解体時、における1階の振動（鉛直加速度）を測定する。

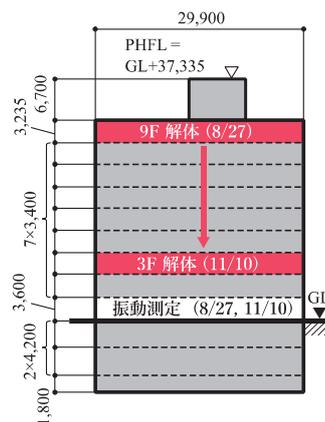


図-1 解体振動測定対象建物



写真-1 9階解体時状況

2.2 地盤概要

表-1に建物Aの敷地地盤のPS検層結果から得た、

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士（工学）

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

*2 戸田建設株式会社技術開発センター 工学修士

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

地盤の諸元を示す。なお、この調査は建物解体にあたって、改めて実施したものである（新築当時の地盤に関する資料は入手できなかった）。

当該地盤は GL-10.9m までは $V_s \leq 150\text{m/s}$ の比較的軟弱な地層（地層 1~3）から成り、対象建物の基礎底はその地層の下、 $V_s = 190 \sim 280\text{m/s}$ の地層（地層 4~7）の上端に概ね対応する。また、GL-25.8m 以深では $V_s \geq 470\text{m/s}$ 以上の堅固な砂層・砂礫層が現れる。

表 - 1 地盤諸元

地層番号	土質	下端深度 (m)	弾性波速度		密度 (t/m^3)
			V_s (m/s)	V_p (m/s)	
1	埋土	3.85	140	1,070	1.70
2	シルト質砂	8.85	150	1,210	1.70
3	シルト	10.90	130	1,500	1.60
4	シルト質砂	11.75	190	1,590	1.80
5	シルト	15.50	220	1,570	1.75
6	砂	18.20	280	1,600	1.85
7	砂	22.65	220	1,500	1.55
8	砂礫	25.80	480	1,990	2.10
9	砂	26.60	470	1,750	1.95
10	砂	29.60	490	1,790	1.85
11	砂	-	490	1,870	1.95

2.3 工事振動

表 - 2 に、建物 A 解体工事において発生すると考えられる、振動の分類を示す。振動源毎に適切な低減方法が異なるため、合理的な振動対策を実施するためには、全振動エネルギーに対して、どの振動源がどの程度寄与しているのか、把握する必要がある。

本検討では、振動測定データを分析し、建物 A の 1 階の振動に対して、どの振動源の寄与が大きいかと考えるか、絞り込みを行う。

表 - 2 建物 A 解体工事における振動源の分類

振動源		発生地点	加振力の経時特性
物体	動作		
重機	走行（平時）	解体階	継続的
	走行（段差）	解体階	パルスの
	アイドリング	解体階	継続的
躯体	圧砕	解体階	継続的
	引き倒し	解体階	パルスの
	小割	解体階	継続的
	落下	1階	パルスの
	搬出	1階	継続的

3. 解体振動の検討方法

3.1 振動測定

前述の通り、解体工事作業中の建物 A の 1 階での振動を測定する。測定は加速度計、富士電機社の CPUSNSS-00 を用い、サンプリングレート 200Hz で、5 時間連続して行う（9 階解体時（8/27）は 12~17 時、3 階解体時（11/10）は 10~15 時）。

3.2 建物 - 地盤系の周波数応答解析

解体工事現場の近隣で観測される振動は、振動源（加振力）の特性と伝播経路（解体建物の上屋と基礎、地盤、近隣建物（近隣構造物））の特性の積み込みの結果として表れる。最終的に観測される振動に、振動源の特性がどの程度残っているか、伝播経路の各要素の特性がそれぞれどの程度寄与するか把握するため、軸対象 FEM を用いて周波数応答解析を実施する。

図 - 2 に解析モデルを示す。基礎は剛体、半径 $r = \sqrt{22.9 \times 66.7 / \pi} = 25\text{m}$ とし、地盤は GL-40m までモデル化、側方境界をエネルギー伝達境界、底面境界を粘性境界とする。減衰はモデル全域で $h = 5\%$ である。また、図中の dx は FEM のメッシュサイズ、地盤に振ってある番号は表 - 1 の地層番号である。本検討では、簡単のため、鉛直加振力に対する鉛直応答のみに着目する。

表 - 2 に解析に用いた上部構造の諸元を示す。上部構造のモデル化は、9 階解体時の解析には 9 質点系を用い、3 階解体時の解析には 3 質点系を用いる。質量は建物 A の図面より躯体の容積を算出して推定し、バネ定数は解析結果が 1 階の実測振動と整合するように設定する（4.2、4.3 節参照）。なお、設定したバネ定数に対する上部構造の鉛直 1 次固有周波数は 7.0Hz、3 質点モデルで 20.5Hz である。

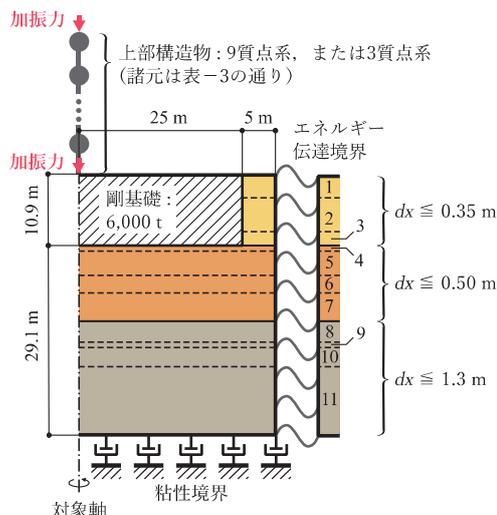


図 - 2 解析モデル（軸対象 FEM モデル）

表 - 2 解析に用いた上部構造の諸元

質量 (t)	1階~9階	3,000
	基礎	6,000
鉛直バネ (kN/m)	4階~9階	1.6×10^8
	1階~3階	2.7×10^8

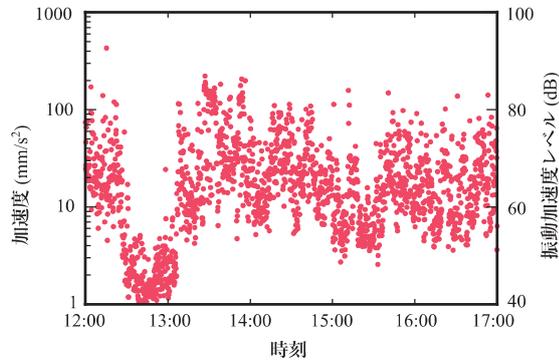
4. 検討結果

4.1 経時特性

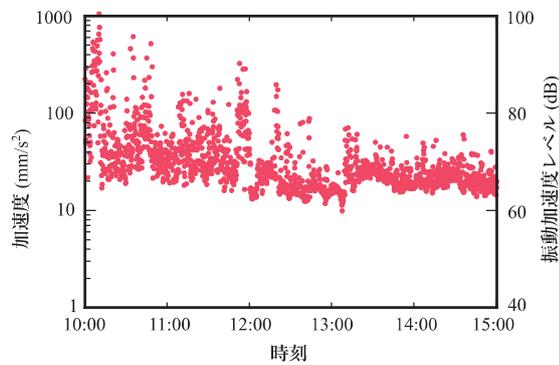
(1) 10 秒でデータを区切った時の最大値の変動

図 - 3 に、建物 A 解体工事における、測定データを 10 秒間隔で区切って、各 10 秒間の最大加速度（以

下、10 秒間最大加速度と呼ぶ) を、図 - 4 に 10 秒間最大加速度の度数分布を示す。これらの図より、10 秒間最大加速度の最大値と最小値の間には、9 階解体時・3 階解体時とも 10 倍以上 (デシベル値で 20dB 以上) の開きがあり、ばらつきが非常に大きいことが分かる。また図 - 3 より、各 10 秒間での最大加速度の変動も大きい。つまり、建物 A 解体時の加振力は、間欠的な性質を持っていることが分かる。



(a) 9 階 解体



(b) 3 階 解体

図 - 3 建物 A 解体工事における 10 秒間最大振動

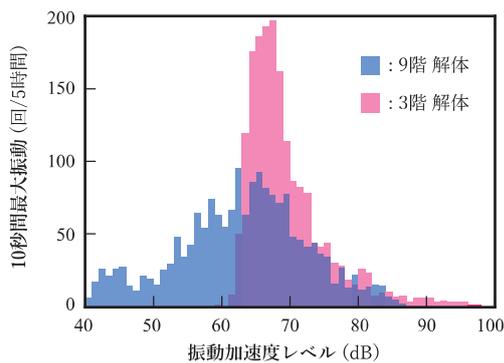


図 - 4 10 秒間最大加速度の度数分布

(2) 継続的かパルスのか

前項の結果だけでは、継続的な振動が間欠的に発生しているのか、パルスの振動が繰り返し発生しているのか、どちらか判別するのは難しい。そこで、より詳細に経時特性を調べるため、測定データを 2.5 秒間隔で区切り、各 2.5 秒間で振動の継続時間を算出 (詳しい算出方法と、その数学的背景は付録に示す)、振動加速度レベル値ごとにその平均をとった結果を

図 - 5 に示す。同図より、建物 A の解体振動は、9 階解体時・3 階解体時ともに、大きな振動ほど継続時間が短い傾向を示しており、パルスの振動が卓越していることが分かる。したがって、振動源の経時特性もパルスの成分が卓越していることが予想される。

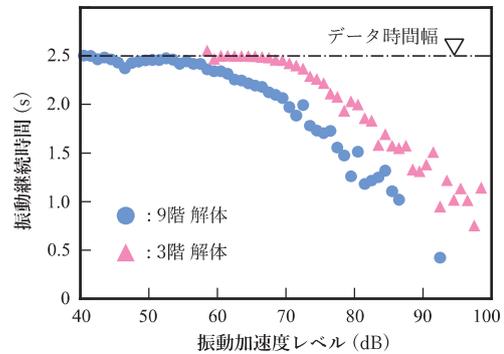


図 - 5 建物 A 解体における振動の大きさと継続時間

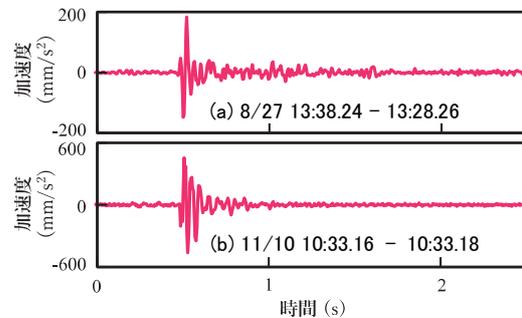


図 - 6 建物 A 解体における典型的なパルス振動

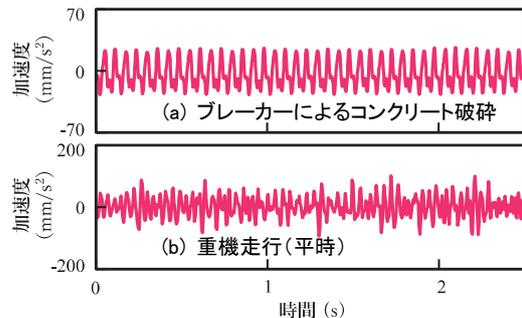


図 - 7 典型的な継続振動の例 (他現場)

表 - 3 上記振動データより算出される振動継続時間

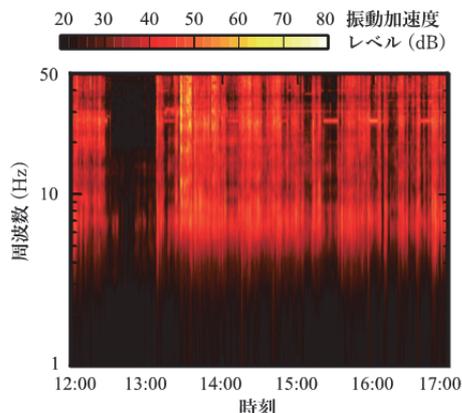
データ	振動継続時間 (s)
9階 解体	0.97
3階 解体	0.45
ブレイカー	2.47
重機走行 (平時)	2.46

図 - 5 の結果の補足として、典型的なパルス振動の例を図 - 6 に、典型的な継続振動の例を図 - 7 に、それぞれのデータから算出される振動継続時間を表 -

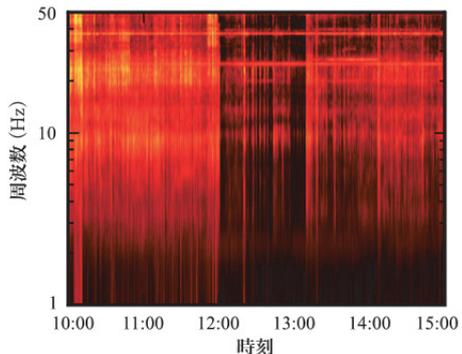
3に示す。これらの図表より、パルスのな振動（図-6）では振動継続時間が短く、継続的な振動（図-7）では振動継続時間がデータ時間幅にほぼ等しくなることが確認できる。

4.2 周波数特性

(1) 平均的な周波数特性



(a) 9階解体



(b) 3階解体

図-8 建物A解体における振動のランニングスペクトル

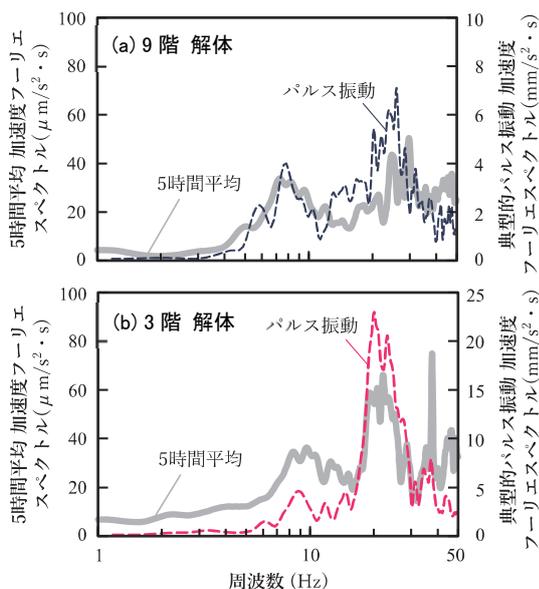


図-9 建物A解体における平均的な周波数特性

図-8に、建物A解体工事における、測定データを10秒間隔で区切り、各10秒間のデータをフーリエ変換したランニングスペクトルを示す。同図より、図-3でも見た通り、振幅の変動は大きい（コンターの色の濃淡の時刻による変化が激しい）ものの、同じ時刻内で振幅が大きくなる周波数帯は概ね安定している（9階解体時6~7Hz付近、3階解体時20Hz強）。図-9に、この平均と図-6のパルス振動をフーリエ変換した結果を比較して示す。同図より、5時間の平均値とパルス振動のスペクトルは、ピーク周波数やその周辺の裾の広さが概ね整合しており、パルスのな振動の特性が、全体の特性に大きく影響していることが確認できる。

(2) パルス振動の実測値と周波数応答解析の比較

図-10に、単位加振力に対する周波数応答解析の結果をパルス振動の実測値と比較して示す。同図より、解体階加振の周波数応答解析結果と、実測のパルス振動は概ね対応している。単位加振力に対する周波数応答はインパルス応答のフーリエ変換になるので、この結果から、解体階へのインパルス入力に対する応答振動と、実測において卓越する振動成分とが、概ね対応しているということが読み取れる。

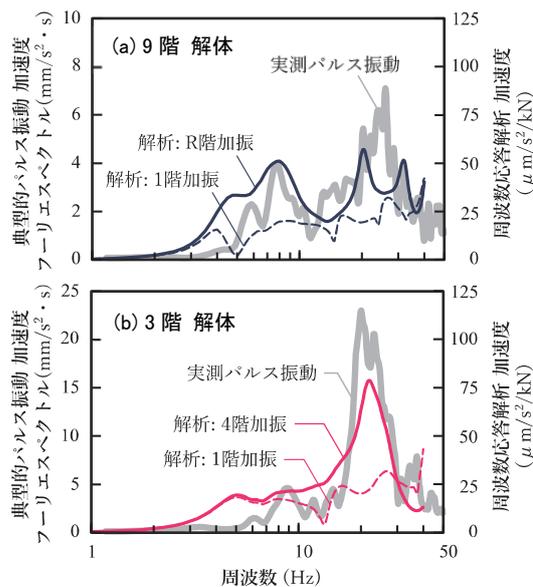


図-10 解体階加振・1階加振それぞれの解析結果と実測値との比較

4.3 考察

(1) 寄与の大きい振動源の絞り込み

以上の検討より、建物A解体工事では、解体階においてパルスのな加振力を発生させる振動源の寄与が大きいものと考えられる。これは表-2のリストの中では、解体階において、重機が段差を乗り越える際に発生する加振力と、小割前の比較的大きな塊の躯体を引き倒した際に発生する加振力に対応する。

(2) 建物の高さ（固有周波数）の影響

図-10より、建物最上階加振の振動は、1階加振の影響よりも顕著に大きい傾向がある。このことに

ついて検討するため、図 - 11 に 9 階解体時の解析結果と 3 階解体時の解析結果を比較して示す。同図より、最上階加振時には建物の固有周波数が振動のスペクトルの山に対応し（既往の研究による知見^{2), 3)}とも整合している）、1 階加振時には、地盤 - 建物連成固有周波数が振動のスペクトルの谷（また別の研究による知見⁴⁾と整合）に対応している。つまり、振動源が最上階にある場合には、建物は振動を増大させる方向に働き、振動源が 1 階にある場合には、逆に減少させる方向に働いている。一般に、振動源より上方の構造物は、1 階（最下階）の振動を減少させる方向に、下方の構造物は 1 階の振動を増大させる方向に働くものと思われる。

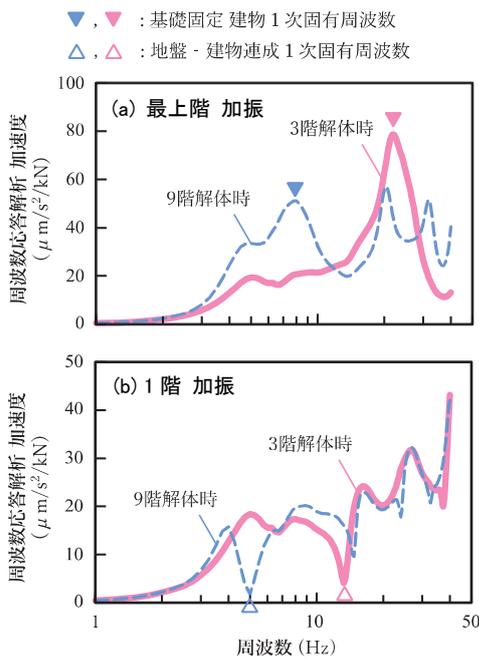


図 - 11 建物高さと 1 階応答加速度の周波数特性の関係

5. おわりに

9 階建て SRC 造建物の 9 階解体時の振動と、3 階解体時の振動を測定し、データを分析した結果、以下の知見を得た。

- 1) 当該建物解体時に発生する加振力は、解体階における、パルス的な成分が卓越する。
- 2) 当該建物解体時中の作業で、上記条件に該当するような加振力の発生する作業は、重機走行（移動）中の段差の乗り越えと、小割前の比較的大きな塊の躯体を引き倒し、と考えられる。
- 3) 逆に、当該建物解体工事において、以下の作業、重機の走行・アイドリング、解体躯体の圧砕・小割・落下・搬出、などによって発生する振動の影響は小さいと考えられる。
- 4) 振動源が解体建物の最上階にある場合には、建物は振動を増大させる方向に働き、振動源が 1 階にある場合には、建物は振動を減少させる方向に働く。

上記の知見には、解体工事一般に成り立つ部分と、この現場固有の条件の寄与が大きい部分、両方が含まれているものと考えられる。両者の切り分けを行い、合理的な解体工事振動対策を実施するためには、更なるデータの蓄積が必要である。

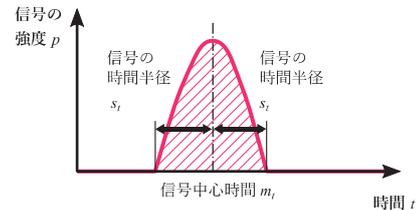
謝辞

本測定は 2014・2015 年度、戸田建設技術開発プロジェクト「インパクト抑制プロジェクト（プロジェクトマネージャー、戸田建設、美輪明広主管）」の一環として実施したものである。測定にあたっては、建物 A の解体工事業務所関係者各位に多大なご協力を頂いた、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省 「振動規制法施行状況調査」、環境省ウェブサイト、<<http://www.env.go.jp/air/sindo/>>（参照 2016.8）
- 2) 吉岡清 「建物解体工事振動の隣接建物における実測例と考察」、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学 I、p.379-380、2009.8
- 3) 小島宏章、高野真一郎 「解体工事建物と隣接建物における振動実測及び解析的検討 その 1」、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学 I、p.333-334、2014.9
- 4) 文学章、福和伸夫 「隣接建物の存在が直接基礎の動的相互作用特性に与える影響」、日本建築学会構造系論文集、第 600 号、p.97-105、2006.2

付録： 振動継続時間の定義



付図 - 1 時間変動する信号の時間半径の概念図

振動加速度データの出力値を $a(t)$ とし、振動信号の強度 $p(t)$ を $(a(t))^2$ とする。

$$p(t) := (a(t))^2 \tag{A.1}$$

このとき、信号の中心時間と信号の時間半径（付図 - 1 に概念を示す）を次式で定義する。

$$m_t := \frac{\int p(t) dt}{\int p(t) dt} \tag{A.2}$$

$$s_t^2 := \frac{\int p(t)(t - m_t)^2 dt}{\int p(t) dt} \tag{A.3}$$

さらに s_t を使って、振動継続時間 t_c を次のように定義する。

$$t_c := 2bs_t \tag{A.4}$$

ここに、 b ：調整用の係数

係数 b はケースバイケースで様々な値を用いることが考えられるが、ここでは、(A.2)～(A.4)式に基づいて、周期 T の正弦波 n サイクル分のデータの振動継続時間を、正確に算出することのできるような b を考える。まず、問題とする正弦波は次式で表せる。

$$a = \sin \frac{2\pi t}{T} = \sin x \tag{A.5}$$

ここに、 $x := 2\pi t/T$

(A.2)・(A.3)式の積分は、正弦波の性質より、区間幅が nT でありさえすれば、区間の位置自体は自由に選べる（どこを切り取って積分しても結果は変わらない）ので、ここでは簡単のため $m_t = 0$ になる区間, $[-nT/2, nT/2]$ を積分区間として選ぶこととする。この条件を(A.3)式に代入すると、次式のようになる。

$$s_t^2 = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \frac{\int_{-n\pi}^{n\pi} x^2 \sin^2 x \, dx}{\int_{-n\pi}^{n\pi} \sin^2 x \, dx} \quad (\text{A.6})$$

(A.6)式の定積分を実行すると次式が求まる。

$$s_t^2 = \left(\frac{nT}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{\pi^2}{3} - \frac{1}{2n^2}\right) \quad (\text{A.7})$$

ここで、条件を追加し、検討の対象としている正弦波データの継続時間が十分に長い($n \gg \sqrt{3/2\pi^2} \approx 0.39$)とすると、(A.7)式について次の近似が成り立つ。

$$s_t^2 \sim \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{nT}{2\pi}\right)^2 = \left(\frac{nT}{2\sqrt{3}}\right)^2 \quad (\text{A.8})$$

したがって、 t_c は次のようになる。

$$t_c \sim \frac{nbT}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.9})$$

初めに決めたように、このデータの継続時間は nT であるので、(A.9)式の t_c がこれと一致するためには、

$$b = \sqrt{3} \quad (\text{A.10})$$

とすれば良い。本文 4.1 節(1)の検討も、この値を用いている。