

# 小型の台風7912号通過時の倉敷における水稻の揺れの観測

誌名	農業氣象
ISSN	00218588
著者	米谷, 俊彦
巻/号	36巻4号
掲載ページ	p. 251-255
発行年月	1981年3月

# 小型の台風7912号通過時の倉敷における 水稲の揺れの観測

米谷俊彦

(岡山大学農業生物研究所)

Measurements of Vibration of Rice Plants during the Period  
of Passing Typhoon (7912) at Kurashiki Area

Toshihiko MAITANI

(Institute for Agricultural and Biological Sciences,  
Okayama University, Kurashiki 710)

## 1. はしがき

風による動揺が植物体に物理的、生理的影響を与えることは良く知られている。しかし、野外における植物体の揺れについての資料は極めて乏しいのが現状である。近年、植物体の揺れを測定する技術が著しく進歩してきた。多くの方法の中で比較的容易に行えるものとして、植物体の表面に歪ゲージを取りつけて歪を測定する方法が採用されるようになってきている(Finnigan and Mulhearn, 1978; Finnigan, 1979; 佐藤ら, 1980)。この方法では植物体の揺れを電気信号として取り出すことができるので、長時間継続して測定でき、デジタル処理にも適している。

1979年秋に、倉敷にある岡山大学農業生物研究所の水稲群落において、超音波風速計と歪計を用いて風速と植物体の揺れの同時観測を実施した。観測期間中にたまたま小型の弱い台風12号が岡山県を通過した。倉敷においては台風の通過時の最低気圧は約990 mb, 平均風速10 m/s以下であり、風による被害は軽微であった。しかし、台風通過時に台風特有の風向、風速の経時変化が認められた。水稲の動揺と風速との関係については坪井(1961), 谷(1963), 水高(1968)らによって詳細な実験的研究が報告されている。しかし著者の知るかぎりでは、台風通過時の植物体の揺れに関する定量的な解析結果は見当たらない。

この論文では観測の概要と台風通過時に得られた風速と植物体の歪の資料の解析結果について報告する。

## 2. 観測および解析方法

観測は1979年9月上旬に岡山大学農業生物研究所の水稲群落(水稲の平均草高約80 cm)で行った。水稲は8月下旬に出穂し、この期間は乳熟期にあたる。群落上1 mの高度における風速変動の測定は20 cmのスペンをもつ超音波風速計を3次元に組み合わせて行った。水平方向2成分、鉛直方向1成分の風速から次のような風に関係する量が得られる。一般流の風向およびその方向の風速 $U$ 、一般流に直交する水平風速成分 $v$ 、鉛直成分 $w$ 、水平風速 $U_T$ 等である。また、50  $\mu$ mの直径をもつ熱電対温度計を用いて1 mと0.5 mの高度で気温の測定を行った。水稲の稈の南側の表面上50 cmの高度に歪ゲージ(新興通信工業社製B-FAE-8N-12)を接着して、植物体の歪を測定した。歪計は2台の動歪計(同社製DS-6001-F)を使用した。この歪計は交流増幅方式を採用したものであり、2 kHzまでの変動を測定できる。1個の歪ゲージ( $S_1$ )は超音波風速計の近くに設置し、他の歪ゲージ( $S_2$ )は4 m程離れた位置に設置した。以下ではそれぞれの歪計の出力に対して $S_1$ 、 $S_2$ を付して表わす。植物体の歪が変位と比例することは前報に示されている(佐藤ら, 1980)。穂の先端の変位が10 cmのときの歪値は $S_1$ 、 $S_2$ に対してそれぞれ $1.6 \times 10^{-4}$ 、 $5.7 \times 10^{-4}$ であった。

風速、気温、歪のアナログ信号はアナログテープに記録した。テープを実験室に持ちかえり再生し、各チャンネル12.5/秒のサンプリング率でA/D変換を行い、デジタルテープに集録し解析を行った。

Fig. 1は観測期間中に得られたスカラー風速 $U_T$ と歪

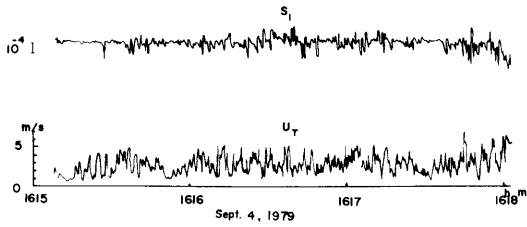


Fig. 1. A chart record of a wind speed ( $U_T$ ) at 1 m and a strain rate of culm of a rice plant.

( $S_1$ )の自記記録の一例である。歪の記録には水稻の固有振動に対応する周期的な変動がみられ、風速が強くなると歪の変動幅が大きくなっていることがわかる。

このような振動現象の時間変化を表現するには、平均値よりもむしろ一定期間における標準偏差 $\sigma_s$  ( $\equiv \{(s-\bar{s})^2\}^{1/2}$ )を用いる方が適していることが知られている。バー(—)は時間平均を表わす。以下の解析においても水稻の揺れの状態を表現するために標準偏差 $\sigma_s$ を用いる。解析に使用した資料は9月4日正午前から16時迄に観測された約4時間のものである。1分間又は10分間毎に区切って統計計算を行った。

### 3. 観測結果と考察

#### (i) 台風通過時の概要

観測期間中の1979年9月4日に小型の弱い台風12号が岡山県を通過した。岡山地方気象台(1979)の防災業務実施状況報告、号外によれば、9月4日0時には台風は九州南部にあり、中心気圧は991 mbであった。その後、日向灘を抜けて四国西部を通過後、瀬戸内海から岡山県に上陸し、夕方には日本海に抜けた。Fig.2に倉敷における9月3日12時~9月5日12時の気圧の自記記録を示す。倉敷においては台風の中心が通過した9月4日正午頃に992 mbの最低値を示した。

このような気圧変化に伴って、風向は9月4日の午前中東寄りであったが、正午頃南寄りに変化し午後は南西の風になった。中心通過時に一旦弱まった風速は、中心通過後次第に強まり、6 m高度の平均風速は7~8 m/sに達し、4~5時間継続し、急激に弱まった。午前中は断続的に降雨があったため超音波風速計、歪計による変動量の測定はできなかった。降雨がおさまった11時過ぎか

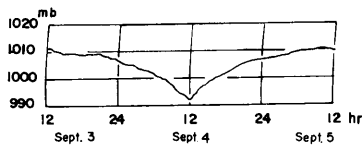


Fig. 2. Barogram at Kurashiki on Sept. 3-5, 1979.

ら観測を開始した。観測期間中は曇り勝ちで顕熱輸送は下向きであったので中立に近い安定気層であった。

#### (ii) 水稻の稈の歪と風速との関係

台風を中心通過時を含む約3時間の間に1分毎に評価された1 m高度における風向、風速、単位質量あたりの運動量の鉛直輸送量( $-w\bar{u}$ )の平均値および水稻の稈の歪の標準偏差 $\sigma_{s1}$ を示す(Fig.3)。ここで $u$ 、 $w$ は一般流方向および鉛直方向の風速変動である。1分間平均でもこれらの値が十分代表性のある値になることが後のスペクトル解析結果から示される。

正午前の東寄りの風が正午には1 m/s弱の南風になり、午後には西寄り2~3 m/sの風が変わっていく様子がわかる。弱い台風でしかも粗な群落表面近くの測定であるので最大風速は3 m/s程度にすぎなかった。運動量の鉛直輸送量 $-w\bar{u}$ は風速の増加に伴って大きい値になっている。また風速や運動量輸送量の時間変化に対応して歪の標準偏差 $\sigma_{s1}$ も顕著な時間変化を示している。風速が2 m/s以上になると $\sigma_{s1}$ の値は $0.5\sim 1.0 \times 10^{-4}$ 程度の値を示した。

Fig.4-a, bは風速と鉛直輸送量の1分間平均値 $\bar{U}_T$ 、 $-w\bar{u}$ と歪の標準偏差 $\sigma_{s1}$ の間の関係を示す。 $\sigma_{s1} \propto \bar{U}_T^2$ お

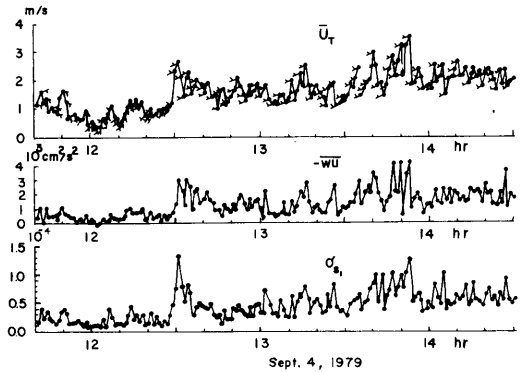


Fig. 3. Time series of  $\bar{U}_T$ ,  $-w\bar{u}$  and  $\sigma_{s1}$ . The plotted values show 1-min averages.

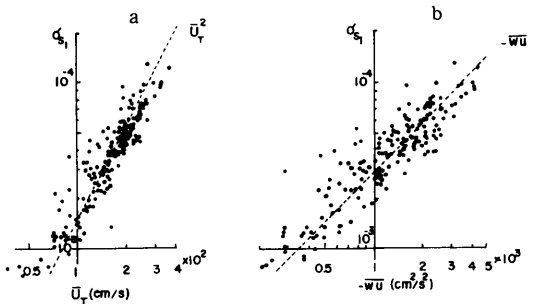


Fig. 4-a. Relationship between  $\sigma_{s1}$  and  $\bar{U}_T$ .  
4-b. Relationship between  $\sigma_{s1}$  and  $-w\bar{u}$ .

よび  $\sigma_{s_1} \propto -\overline{w\bar{u}}$  の関係がほぼ成立していることがわかる。ただ弱風時には  $\sigma_{s_1} \propto \overline{U_T^2}$  の関係は幾分ずれているようにみえる。歪と変位の比例性を考慮すると(佐藤ら, 1980), この  $\sigma_{s_1} \propto -\overline{w\bar{u}}$  の関係は植物体の変位が応力に比例することに対応している。10分間の平均風速と歪の標準偏差の関係調べても同様の傾向が認められた。

歪の観測を行ったのは台風の通過時約4時間であった。そこで、上で得られた関係を用いて、台風が近づき、通過し、遠ざかっていった9月4日の1日間の水稻の揺れの状態の評価を試みた。平均風速には研究所に設置されている気象庁の地域気象観測システムで測定されている6mにおける10分間の平均風速  $\overline{U_T}$  (6m) とこの風速を用いて評価した歪の標準偏差 ( $\sigma_{s_2}$ ) を示す (Fig. 5)。黒丸 (●) は評価された歪の標準偏差, 白丸 (○) は実測された歪の標準偏差である。両者の時間変化の類似性から  $\sigma_{s_2} \propto \overline{U_T^2}$  の関係がほぼ成立していることがわかる。先にも述べたように  $\overline{U_T}$  は午前中約4m/sであったが、中心が接近した正午頃に2m/sに弱まった。その後風速は急激に増して6~7m/sになり、17時頃から次第に弱まった。台風通過前後の風速の非対称性が増幅されて歪の時間変化に著しい非対称性がみられる。つまり、中心通過後の揺れは通過前に比較して著しく大きかったことがわかる。また、台風が日本海に抜けた17時以後は水稻の揺れは急激に減少した。

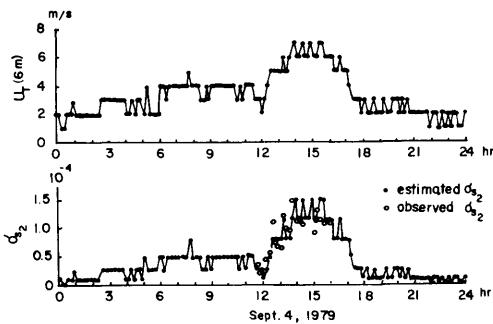


Fig. 5. Daily variation of mean wind speed  $\overline{U_T}$  at 6 m and standard deviation ( $\sigma_{s_2}$ ) of strain rate estimated from it.

●: Estimated value, ○: Measured value.

(iii) 水稻の揺れと抵抗係数との関係

以上の結果は風速の増加につれて水稻の揺れが激しくなることを示している。そこで、風速と群落の抵抗係数  $C_D$  の間の関係を調べてみた。Fig. 6には  $C_D$  と  $\overline{U_T}$  (1m) の間の関係を示す。ここで  $C_D$  は  $-\overline{w\bar{u}}/\overline{U_T^2}$  によって定義される量であり、直接測定によって得られた  $-\overline{w\bar{u}}$  と平均風速  $\overline{U_T}$  によって評価された。平均時間は10分間である。 $\overline{U_T}$  の増加につれて、 $C_D$  が幾分減少する傾向がみられる。

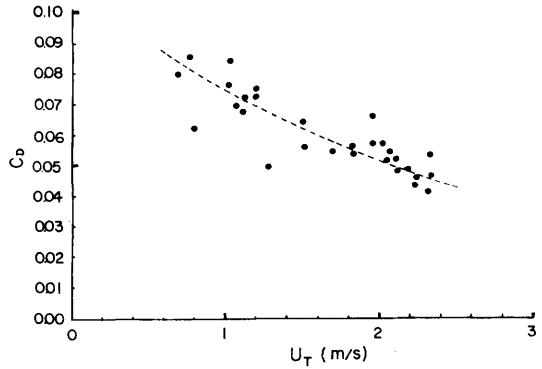


Fig. 6. Relationship between mean wind speed  $\overline{U_T}$  at 1 m and drag coefficient  $C_D$ .

中立状態における平均風速の対数則を仮定すると無次元高さは  $(Z-d)/Z_0 = \exp\{-(1/k) \cdot C_D^{1/2}\}$  と表わすことができる。ここで、 $k$  はカルマン定数 (=0.4),  $d$  は零面変位量,  $Z_0$  は粗度長である。 $d=55$  cm と仮定すると  $\overline{U} = 70$  cm/s, 220 cm/s における  $Z_0$  はそれぞれ  $Z_0 \approx 10$  cm, 5 cm となる。風速の増加に伴う  $C_D$  の減少する傾向は、Fig. 4-a に示した弱風時における  $\sigma_{s_1}$  と  $\overline{U_T^2}$  の比例性のずれに関係しているように思われる。一方、これは平均風速の増加に伴って植被が揺れ、群落表面が滑らかになったことを意味している。

(iv) 水稻の稈の歪のスペクトル特性

Fig. 7に平均風速が70, 141, 197 cm/sの場合の水稻の稈の歪のパワースペクトルを示す。ここで、 $n$  は周波数,  $S(n)$  はスペクトル密度を示す。いずれの平均風速に対しても1Hz付近に顕著なピークがみられる。また、平均風速が増加すると全周波数帯に亘ってスペクトル密度が増加していることがわかる。これは先述した風速の増加に伴って歪の標準偏差が増加することに対応している。

上で示した異なる平均風速に対する無次元スペクトルをFig. 8に示す。いずれの平均風速に対しても1Hz付近

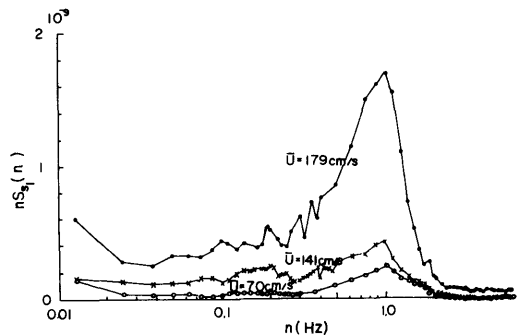


Fig. 7. Power spectra of strain rate at different mean wind velocities.

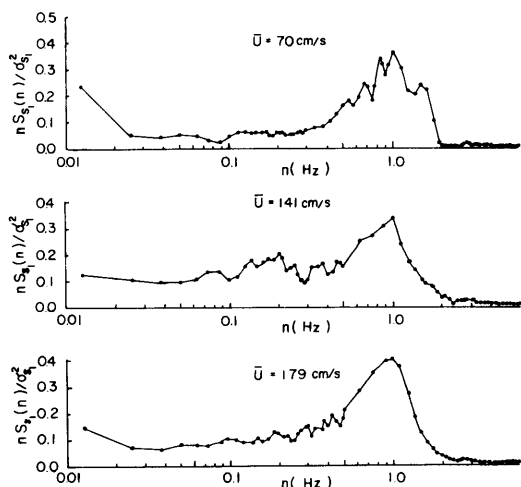


Fig. 8. Non-dimensional spectra of strain rate for different mean wind velocities.

の水稻の固有振動に伴う周波数帯に分散値に大きく寄与する部分がある。70 cm/s の弱風の場合にこの周波数帯の寄与が特に顕著である。一方、141, 179 m/s の平均風速の場合には 0.5 Hz 以下の周波数帯でも 0.1 程度の値をとり 70 cm/s の場合に比較して分散値への寄与の割合が増加している。この部分は個々の水稻の固有振動ではなくて群落の穂波現象に対応していると考えられる。そしてこの結果は風速が強くなると水田上に穂波現象が顕著になることを意味している。

Fig. 9-a, b に平均風速が約 2 m/s の場合の風速と水稻の稈の歪のスペクトルおよび風速変動と歪の間のコヒーレンシー  $R_{xy}(n)$  の一例を示す。ここで  $R_{xy}(n)$  は  $R_{xy}(n) = \{Co_{xy}^2(n) + Qua_{xy}^2(n)\}^{1/2} / \{S_x(n)S_y(n)\}^{1/2}$

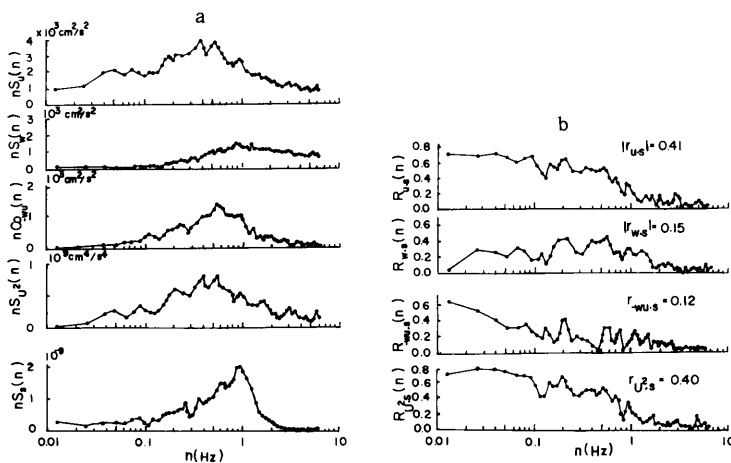


Fig. 9-a. Power spectra of strain rate and wind velocities.

9-b. Coherency between strain rate and wind velocities.

で表わされる量で位相と無関係な  $x$  と  $y$  の間の周波数毎の相関係数の絶対値を表わす。 $x$  と  $y$  は変動量を表わす。 $Co_{xy}(n)$  は  $x$  と  $y$  の間のコスペクトル密度、 $Qua_{xy}(n)$  は  $x$  と  $y$  の間のクォドレチャ・スペクトル密度である。風速変動のスペクトル  $nS_u(n)$ ,  $nS_w(n)$ ,  $nS_{U^2}(n)$  やコスペクトル  $nCo_{-wu}(n)$  にも歪のスペクトルのピークに対応して 0.9~1.0 Hz 付近に小さいながらピークがみられる。しかし、風速変動  $u$  や動圧に比例する  $U^2$  のスペクトルおよび  $w$  と  $u$  の間のコスペクトルの最大値は、1 Hz より幾分低周波数側にある。またいずれのスペクトル、コスペクトルも 0.01 Hz 付近で値が小さくなっている。このことは 1 分程度の周期をもつ変動が分散や共分散に大して寄与していないことを意味している。従って 1 分間の平均時間を用いても十分意味のある分散、共分散を得ることが期待できる。Fig. 9-b によると歪  $s$  と  $u$  および  $U^2$  の間のコヒーレンシーは 0.5 Hz より低周波数側では 0.5 以上になっており、1 Hz 以上の高周波数帯では小さい値になっている。 $-wu$  および  $w$  と  $s$  の間のコヒーレンシーも 0.5 Hz 以下の低周波数帯で 0.2 かそれ以上の値になっている。また相関係数の絶対値は図中に示すように  $|r_{u-s}| = 0.41$ ,  $|r_{w-s}| = 0.15$ ,  $|r_{-wu-s}| = 0.12$ ,  $|r_{U^2-s}| = 0.40$  であった。歪の標準偏差の大部分が固有周期に対応する周波数帯からの寄与によっていることを考えると、これらの相関係数の値から予想される以上に風速と歪の関係は密接であることがわかる。低周波数帯におけるコヒーレンシーの高い値が風速と歪の密接な関係を裏づけている。

#### 4. ま と め

1979 年 9 月 4 日、倉敷において、小型の弱い台風 12 号通過時の水稻の稈の歪と風速変動の測定を行った。得られた結果は次のようにまとめられる。

1) 水稻の稈の歪の標準偏差は風速、運動量の鉛直輸送量の時間変化と良い相関を示した。歪の標準偏差  $\sigma_s$  は平均風速の 2 乗および運動量の鉛直輸送量  $-wu$  にほぼ比例していることが示された。

2) 気象庁の地域気象観測システムで観測された 6 m 高度の 10 分間平均風速を用いて歪の標準偏差  $\sigma_s$  の一日間の変化の評価を試みた。水稻の揺れにも台風の中心通過に伴う特有の風速変化に対応した変化がみられた。また、台風

中心通過前後で著しい非対称な揺れの時間変化がみられた。

3) 風速の増加による水稻の揺れの増大に対応して群落の抵抗係数  $C_D$  が減少した。

4) 70 cm/s から 200 cm/s の風速範囲内で歪のスペクトルに、水稻の固有振動に対応する顕著なピークがみられた。このピークに対応して風速変動にも小さいながらピークが認められた。

5) 歪  $S$  と一般流方向の風速変動  $u$  および  $U^2$  の間のコヒーレンシーは 0.5 Hz 以下の低周波数側で 0.5 以上の高い値を示した。この周波数帯では風速と植被の揺れが密接に関係していると考えられる。

### 謝 辞

本研究を行うにあたり有益な御助言を賜った井上栄一博士ならびに岡山大学教授瀬尾琢郎博士に謝意を表わす。また台風12号に関する気象資料を提供戴いた岡山地方気象台に感謝する。測器設置の際に協力戴いた平松良夫氏に感謝する。なお、研究費の一部として文部省科

学研究費補助金の交付を受けた。

### 引用文献

- 1) Finnigan, J. J., 1979: Turbulence in waving wheat. 1. Mean statistics and Honami. *Boundary-Layer Meteor.*, **16**, 182-211.
- 2) Finnigan, J. J. and Mulhearn, P. J., 1978: Modeling waving crops in a wind tunnel. *Boundary-Layer Meteor.*, **14**, 253-277.
- 3) 氷高信雄, 1968: 水稻の倒伏と被害の発生に関する実験的研究, 農技研報告, A, **15**, 1-175.
- 4) 岡山地方気象台, 1979: 昭和54年9月4日の台風12号に関する異常気象速報, 昭和54年防災業務実施状況報告, 号外, 1-11.
- 5) 佐藤 勉, 米谷俊彦, 大滝英治, 1980: 歪計による植物体の揺れの測定, 農業気象, **36**, 103-107.
- 6) 谷 信輝, 1963: 耕地風に関する研究, 農技研報告, A, **10**, 1-99.
- 7) 坪井八十二, 1961: 水稻の風害に関する生態学的研究, 農技研報告, A, **8**, 1-156.

### Summary

The strain rate of culm of rice plants and wind velocity fluctuations over plant canopies were measured during the passage of a weak typhoon (Typhoon 7912) with a central pressure of about 990 mb. The results are summarized as follows.

(1) The standard deviation of culm strain rate of a rice plant ( $\sigma_s$ ) was highly correlated with wind speed ( $\bar{U}_T$ ) and momentum flux ( $-\bar{w}u$ ). The following relations were obtained such as  $\sigma_s \propto \bar{U}_T^2$  and  $\sigma_s \propto -\bar{w}u$ .

(2) The daily variation of  $\sigma_s$  was estimated from the mean wind speed ( $\bar{U}_T$ ) at the height of 6 m from the ground surface. The vibrations of a rice plant showed a typical variation with the passing of the typhoon. They also showed a remarkable antisymmetry before and after the passage of center of the typhoon.

(3) Drag coefficient  $C_D$  decreased with an increasing wind speed. This may be probably related to the change in surface conditions due to the increase of vibration.

(4) The spectrum of strain rate had a remarkably high peak at about 1 Hz, corresponding to the natural frequency of a rice plant. The spectra of wind velocity fluctuations and cospectrum between  $u$  and  $w$  had also small peaks within the same frequency range.

(5) Within the lower frequency range less than 0.5 Hz, the coherency  $R_{u,s}(n)$  and  $R_{U^2,s}(n)$  showed higher values than 0.5. This implies that the vibration of rice plant was mainly due to the oscillation forced by the wind of this frequency range.