

アクティブノイズコントロールを用いた農業機械騒音の低減に関する基礎的研究

日野, 翔太

九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻生産環境科学講座生産システム設計学研究室

梅野, 覚

九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻生産環境科学講座生産システム設計学研究室

井上, 英二

九州大学大学院農学研究院環境農学部門生産環境科学講座生産システム設計学研究室

岡安, 崇史

九州大学大学院農学研究院環境農学部門生産環境科学講座生産システム設計学研究室

他

<https://doi.org/10.15017/1543575>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 70 (1), pp.7-14, 2015-02-27. 九州大学大学院農学研究院

バージョン：

権利関係：

アクティブノイズコントロールを用いた農業機械騒音の 低減に関する基礎的研究

日 野 翔 太¹・梅 野 覚¹・井 上 英 二^{*}

岡 安 崇 史・平 井 康 丸・光 岡 宗 司

九州大学大学院農学研究院環境農学部門生産環境科学講座生産システム設計学研究室

(2014年10月31日受付, 2014年11月14日受理)

Basic study on noise reduction of agricultural machinery
by active noise control.

Shota HINO¹, Satoru UMENO¹, Eiji INOUE^{*},
Takashi OKAYASU, Yasumaru HIRAI and Muneshi MITSUOKA

Laboratory of Bioproduction Engineering, Division of Bioproduction Environmental Sciences, Department of
Environmental Agriculture, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

はじめに

1960年代以降急速に進展した稲作関連の機械化により、農業機械の性能は著しく向上し、自動化、ロボット化も含め、機能面においては成熟した機械として普及している。その一方で、農作業環境について言及すると、作業者は常時農業機械による比較的大きな騒音に晒されている。農研機構の調査によると、乗用型農業機械からは83dBA以上の騒音が、特にコンバインから90dBA以上と非常に大きな騒音が発生している(表1)。また、表2に示すように騒音許容基準の騒音レベルに対して、作業者は一時的な聴力障害、難聴等の肉体的苦痛を受けるだけでなく、集中力の低下や疲労の蓄積等による精神的苦痛も受け、作業効率の低下にも繋がっている。そのため、農業機械から発生する騒音を許容範囲内に低減することが必要不可欠である。

従来、騒音を低減するための手段として、キャビンの構造の改良や防音材を装着するといった受動的な騒音制御法(Passive Noise Control以下、PNC)が採用されてきた。しかしながら、Sarpら(2006)やBilski(2013)によると、PNCによって低減されるのは主に

高周波の騒音であり、低周波の騒音に対しては効果が低いことが指摘されている。

近年、騒音に対して同振幅逆位相の音を再現することで、能動的に騒音を低減する手法であるアクティブノイズコントロール(Active Noise Control以下、ANC)が実用化されている。このANCは特に低周波の騒音に対して有効であることが知られている(西村ら, 2006)。既往の研究として、今野ら(2009)は自動車内にANCシステムを搭載し最大で約10dBの消音効果が有ることを報告している。また、井上ら(1994)はキャビンを装着しない自脱型コンバインにおける騒音状況及びANC使用時に有用な参照信号について報告し、彭ら(1996)はキャビンを装着しない農業トラクタにANCシステムを搭載し、最大で約14dBの減音結果が有ることを報告している。

以上の背景から、本研究では高周波数帯の騒音が受動的に低減可能で、しかも低周波数帯の騒音を能動的なANCシステムで低減・実装可能なキャビン付き農業機械を対象に騒音低減を試みた。そこで、本研究では、キャビンを有する農業用トラクタの騒音レベルの把握及びANCによるトラクタ騒音に対する消音効果

¹九州大学大学院生物資源環境科学府環境農学専攻生産環境科学講座生産システム設計学研究室

¹Laboratory of Bioproduction Engineering, Division of Bioproduction Environmental Sciences, Department of Environmental Agriculture, Faculty of Agriculture, Kyushu University

^{*}Corresponding author (E-mail:inoeiji@bpes.kyushu-u.ac.jp)

表1 騒音を測定した農業機械の作業条件等とアイドリング時・作業時の騒音レベル

機械名	定格出力 (W)		作業時の速度 (m/s)	騒音レベル (dBA)	
				アイドリング時	作業時
コンバイン	a	24.3	1.0	85	96
	b	14.3	0.8	84	94
	c	15.4	0.4	80	92
トラクタ	d	33.8	0.4		83
	e	16.9	0.7	81	88

注) トラクタ d はキャビン付き

(独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 HP より抜粋)

表2 騒音の許容基準

騒音レベル (dBA)	暴露時間 (min)
85	～ 480
88	～ 240
91	～ 120
94	～ 60
97	～ 30

(独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 HP より抜粋)

表3 供試トラクタの諸元

全幅	2.25 m
全長	5.10 m
高さ	2.80 m
重量	5,340 kg
エンジン排気量	6,600 cm ³
エンジン出力	101 kW

を検討した。まず初めにトラクタのキャビン内外での騒音測定を行い、キャビンによって騒音がどの程度低減されているか検証を行った。その後、測定の際に録音した騒音を用いたANCによる騒音低減の実験を行った。その結果及び考察について報告する。

材料及び方法

1. トラクタ騒音測定実験

農業用トラクタはキャビン等のPNCによって騒音対策が施されている。しかし、このPNCは高周波の騒音の低減に対しては比較的有效であるが、低周波の騒音低減には困難であるとされている。そこで、農業用トラクタのキャビン内外での騒音の測定を行い、キャビンによって騒音がどの程度低減されているかの検証を行った。

(1) 実験方法

トラクタのキャビンによる騒音の低減量及びキャビン内で騒音が最大になる位置を明らかにするため、九州大学附属原町農場のトラクタ (Ford 7840, Basildon England) を用いて測定を行った。表3に供試トラクタの諸元を示す。トラクタから発生する騒音をキャビン内 (左右作業者足元、ハンドル上部、左右前後作業者頭部、左右キャビン後方上部) 及びキャビン外 (トラ

クタ前方、左右前輪前、左右後輪前、ロータリ耕うん装置 (以下、ロータリ) 前) において表4に示す1～5の5つの条件下で測定した。図1に示す通り、トラクタキャビン内で作業者左右足元、ハンドル付近、作業者頭部の前後左右、作業者後方上部左右の9箇所、トラクタキャビン外で前方、左右前輪側方、左右後輪側方、ロータリ後方の6箇所測定を行った。測定の際、トラクタは静止状態 (定置) でロータリを空転させた状態で測定した。測定に関しては普通騒音計 (NL-42, RION 社) を用い、サンプリング周波数 48 kHz で 30 秒間録音を行った。その後、波形分析ソフトウェア (CAT-WAVE, RION 社) を用いて周波数及び音圧レベルの分析を行った。表5に測定に用いた普通騒音計の仕様を示す。

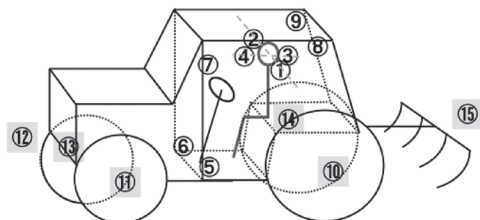


図1 トラクタの騒音測定箇所

表4 供試トラクタの測定条件

条件番号	エンジン回転数	ロータリ
1	2,000 rpm	非稼働
2	2,000 rpm	稼働
3	2,200 rpm	非稼働
4	2,200 rpm	稼働
5	非稼働	非稼働

表5 普通騒音計 NL-42 の仕様

測定範囲	25 - 130 dB (A 特性) 33 - 130 dB (C 特性) 38 - 130 dB (Z 特性)
測定周波数範囲	20 - 8,000 Hz
動特性	FAST SLOW
校正	内蔵電気信号による電氣的校正
マイクロホン型式	UC-52
マイクロホン感度レベル	-33 dB

2. ANCを用いた騒音低減実験

測定実験にて録音した騒音を用いてANCによる騒音低減の実験を行った。本実験では、ANCシステムの制御にシングルフィードフォワード制御を、制御アルゴリズムにfiltered-Xアルゴリズムを用いた。

(1) 実験方法

本実験では、実験室内において騒音測定実験で得られたトラクタの騒音を再生し、トラクタキャビン内の騒音状況を再現して消音を行った。騒音測定実験において、トラクタキャビン内で最も騒音レベルの高かったエンジン回転数2,200 rpm、ロータリ稼働時の作業右足元付近の騒音を使用し、スピーカからその騒音を発生することで騒音源とみなした。実際の走行時には騒音量が測定値よりも増大する可能性を考慮して、作業右足元で騒音のピークレベルが90 dBとように騒音レベルを調整した。従って、騒音源となるスピーカにパワーアンプを接続し、これによって騒音を90 dBに増幅した。参照信号用マイクロホン、誤差信号用マイクロホン及び騒音制御用スピーカはANC制御装置(ANC-Duo (Core), Redec 社)に接続されており、騒音制御用スピーカから出力される制御信号は以下の(1-1)式によって表される。

$$y(n) = W(n)x^T(n) \quad (1-1)$$

$y(n)$: 出力信号

$W(n)$: フィルタ係数

$x^T(n)$: 参照記号の転置

また、適用フィルタ $W(n)$ は以下の(1-2)式によって更新される。

$$W(n+1) = vW(n) + \mu e(n)r(n) \quad (1-2)$$

v : リーク係数

μ : ステップサイズパラメータ

e : 入力信号と出力信号の誤差信号

表6にANC制御装置の諸元を示す。トラクタキャビン内の測定の結果、作業右足元から作業右足元までの距離は1.6 mであり、作業右足元からキャビン側方の壁までの距離は0.4 mであった。そのため、騒音発生スピーカ前面から1.6 m離れた位置に誤差信号入力用マイクロホンを設置し、騒音制御用スピーカは誤差信号マイクロホンから0.4 m離れた左側方で誤差信号

マイクロホンと騒音発生スピーカに対して67.5度, 90度, 112.5度に設置してそれぞれの場所で実験を行った。90度に設置した際の設置場所を図2に示す。また, コヒーレンスの高い参照信号を得るため, 騒音発生スピーカの前面0.1 mの位置に参照信号入力用マイクロホンを設置した。実験に用いた騒音制御装置はRedec社のANC-Duo (Core) を, マイクロホン, スピーカに関してはそれぞれANC-Duo (Core) に同梱されているマイクロホン, スピーカを用いた。騒音発生用スピーカに接続したパワーアンプの周波数特性は40 ~ 20,000 Hz, +0/-3 dBであること, トラクタキャビン内の正確な再現や70 Hz以下の騒音状況が再現できていないことを考慮し, ロータリ稼働時及び非稼働のどちらでも高い騒音レベルであった100 ~ 200 Hz付近の騒音を消音対象とするため, 本実験ではANC消音適用範囲を40 ~ 200 Hzとした。また, 誤差信号用マ

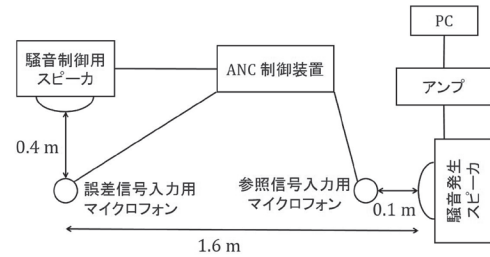


図2 騒音制御実験配置図

イクロホンとほぼ同位置に測定用レコーダ (DR-05, ティアック社) と普通騒音計 (NL-05, RION 社) を設置し, レコーダでは騒音の録音を, 普通騒音計では騒音の瞬時値の測定を, ANC装置の起動前後でそれぞれ30秒間行った。普通騒音計において, 補正無しの周

表6 ANC制御装置の諸元

サンプリング周波数	125 Hz ~ 48 kHz
カットオフ周波数	5 kHz
制御遅延	420 μ sec (空間距離: 0.15 m)
周波数特性	5 ~ 45 kHz
DSP	Motorola 社 DSP56311 (300MIPS) $\times$ 2 個

表7 ANC装置の設定

ステップアップパラメータ	0.001
リーケッジ係数	0.999999
サンプリング数	8,000
適用周波数帯	40 ~ 200 Hz

表8 測定用レコーダの仕様

サンプリング周波数	44.1 kHz 48 kHz 96 kHz
入力インピーダンス	25 k Ω
周波数特性	20 ~ 20 kHz (Fs 44.1 kHz) 20 ~ 22 kHz (Fs 48 kHz) 20 ~ 40 kHz (Fs 96 kHz)
歪率	0.05 %以下
S/N 比	92 dB 以上

表9 普通騒音計 (NL-05) の仕様

測定範囲	30 - 130 dB (A 特性) 35 - 130 dB (C 特性) 40 - 130 dB (F 特性)
測定周波数範囲	20 - 8,000 Hz
動特性	FAST SLOW
校正	内蔵電気信号による電氣的校正
マイクロホン型式	UC-52
マイクロホン感度レベル	-33 dB

波数を使用するため、音響特性としてF特性 (FLAT) を用いており、

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1-3)$$

L_p : 音圧レベル (dB)

p : 測定された音圧の瞬時値の実効値 (p_e)

p_0 : 基準音圧 (p_a) ($= 2 \times 10^{-5} p_a$)

で表される式 (1-3) を用いて音圧レベルを算出した。その後、周波数解析ソフトウェアの WaveSpectra を用いて録音したデータの周波数解析を行った。表7, 表8, 表9にそれぞれANC装置の設定、測定用マイクロホン、騒音計の仕様を示す。

結 果

1. 騒音測定実験

条件3における作業員耳元の騒音とトラクタキャビン内外での最大騒音量、条件4における作業員左足元付近、右前輪側方、作業員左耳、キャビン内外での最大騒音量、条件5におけるキャビン外及びキャビン内の作業員耳元の騒音を図3～12に示す。

2. 騒音低減実験

最も高い消音効果が認められたのは制御用スピーカを誤差信号マイクロホンと騒音発生スピーカに対して90度に配置した場合であった。その時のANCの起動前後の騒音を比較したものを図13に示す。縦軸のレベルはWaveSpectraソフトウェアによって補正されたレベルであるため、実際の音圧レベルとは一致しないことを補足しておく。

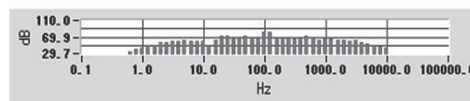


図3 条件3 右耳付近騒音

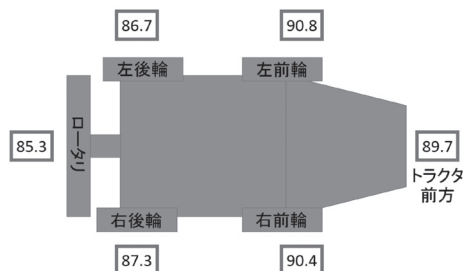


図4 条件3 キャビン外騒音ピーク値 (dB)

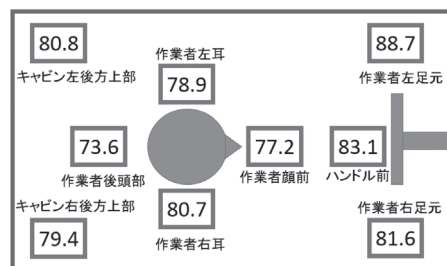


図5 条件3 キャビン内騒音ピーク値 (dB)

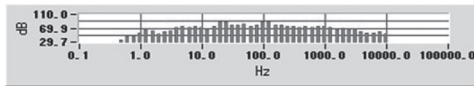


図6 条件4 作業者左足元付近騒音

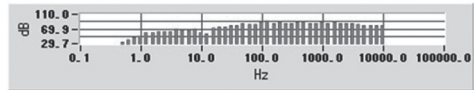


図7 条件4 右前輪付近騒音

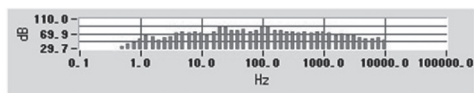


図8 条件4 左耳付近騒音

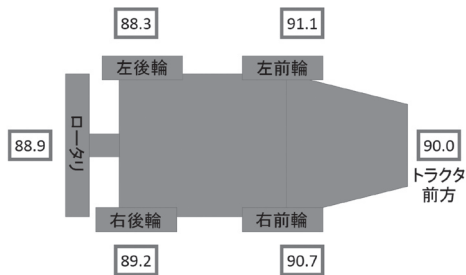


図9 条件4 キャビン外騒音ピーク値 (dB)

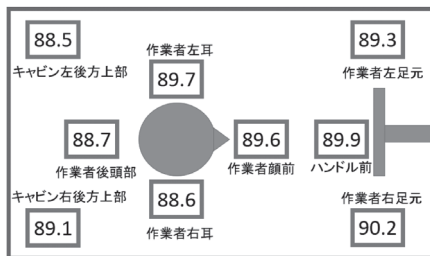


図10 条件4 キャビン内騒音ピーク値 (dB)

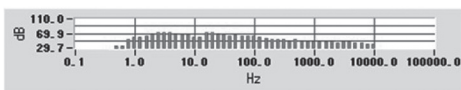


図11 条件5 キャビン外騒音

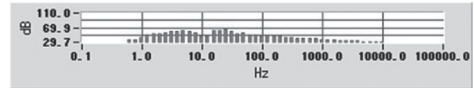
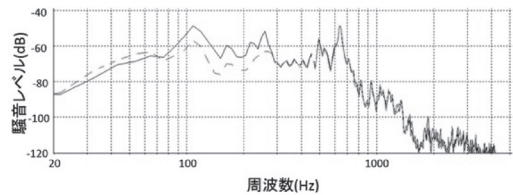


図12 条件5 耳元騒音

図13 90度配置時のANC起動前後の騒音比較
(実線：ANC無，破線：有)

考 察

1. 騒音測定実験

測定して得られた結果から、エンジン周囲の騒音が最も大きく農業用トラクタの主な騒音源はエンジンであることが確認された。また、ロータリ稼働時は非稼働時と比較して40～70 Hz付近の騒音が増加しているため、この周波数帯の騒音は作業機から発生した騒音であることが推定された。また、100～200 Hzの騒音はロータリの稼働状態にかかわらず常に存在しているため、この周波数帯の騒音がエンジンから発生する騒音であると考えられた。キャビン内の作業者足元の騒音とキャビン内の前輪付近の騒音を比較すると、300 Hz以上の周波数の騒音は大きく減少しているが、300 Hz以下の周波数の騒音は減少していなかった。また、今回の測定実験では、農業トラクタは静止状態かつロータリ稼働時空転での測定を行ったため、実際の作業ではより低周波の大きな騒音が発生していると思われる。従って、さらなる低周波騒音の低減をすることが必要不可欠であることが明らかとなった。

2. 騒音低減実験

いずれの配置においても70～300 Hzの周波数帯の音に対して消音効果が確認された。制御用スピーカを90度に配置すると音圧レベルが最大で約9 dB減音し、全体の音圧レベルとしても平均3 dBの減音が見られた。この3 dBの減音とは元々の騒音の約29 %の減音

に相当する。現在、一般的な乗用車に用いられている ANC 装置は音圧レベルが最大で約 10 dB の消音量であることを考慮すると、本実験では十分な低減結果が得られたと推測される。

しかしながら、本実験では 60 Hz 以下の周波数の騒音が実際の作業員耳元での騒音よりも大きく減衰している、この要因としてはスピーカの特性上、1 台のスピーカでは広範囲の周波数における十分な出力が出来ず、60 Hz 以下の騒音が再現出来なかったことが考えられる。また、実際のトラクタキャビン内空間は本実験で行った実験室と比較して狭く、壁面による音の反響により騒音が変化することが考えられる。従って、今後は実験環境を実際のキャビン内の音響状況に近づける必要がある。また、本実験は基礎的な実験であるため、制御方法としてシングルフィードフォワード制御を、更新アルゴリズムとして filtered X LMS アルゴリズムを用いた実験を行ったが、実際は騒音源が複数存在するため、マルチフィードフォワード制御もしくはマルチフィードバック制御を行う、最適なアルゴリズムを導入することが必要である。従って、今後は複数の騒音源を持つ農業機械の測定実験、制御特性のシミュレーション及び最適パラメータの調整、シミュレーションを用いたスピーカの最適な位置の特定などを行っていく予定である。

要 約

本研究では、農作業時のオペレータ耳元騒音の低減を目的として、キャビンを装備する農用トラクタ (Ford7840) の実騒音を普通騒音計 (NL-42) で測定し、騒音レベルならびに周波数特性を明らかにするとともに、騒音測定データを用いて、ANC による消音実験を行った。初めにトラクタキャビン内外での騒音データを録音し、全録音データを解析の後、キャビン内での騒音データの中から騒音源として考えられた作業員右足元の騒音を選択し、実験室内で録音した騒音を再現し、ANC 装置を用いて騒音低減実験を行った。

騒音測定の結果からキャビンによる消音効果は 300 Hz 以上の周波数の音に対しては有効であるが、それ以下の周波数の騒音に対しては効果が低いことが明らかとなった。また、作業機のロータリ稼働による騒音ならびにエンジンによる騒音は各々 40 ~ 50 Hz と 100 ~ 200 Hz の周波数帯に存在することが明らかになった。

騒音測定実験の結果を踏まえて、低周波騒音に対して効果的な技術として注目されている ANC 装置を用

いた消音実験を行った。本実験では、実験室内で簡易的にトラクタキャビン内の作業員右足元騒音を録音データから再現し、ANC 装置を接続したスピーカを用いて騒音低減効果を確認した。実験に用いた音響機器の特性や実験室内の状況を考慮し、トラクタの主な騒音源であるエンジンからの騒音を消音することを目的として 40 ~ 200 Hz の周波数帯の騒音に対して ANC による消音実験を行った。実験の結果、70 ~ 300 Hz の周波数帯で約 3 dB、各周波数帯で見ると最大 9 dB の消音効果が得られた。しかしながら、60 Hz 以下の騒音については低減効果が得られなかった要因として、スピーカの特性上、60 Hz 以下の騒音が再現できなかったことが考えられる。また、本研究では簡易的な実験のためにシングルチャネル制御を行ったが、実機では騒音源が複数存在するため、複数のスピーカを使ったマルチチャネル制御が望ましいと思われる。

従って、今後は音響状況を正確に再現した状態での実験、実機による測定実験、及びコンピュータを用いた音響シミュレーションを行い、最適なスピーカ、マイクの配置場所及び適応フィルタの更新アルゴリズムの検証を進めていく。最終目標としてトラクタに搭載可能にするための消音装置の小型化を目指す予定である。

キーワード：アクティブノイズコントロール、トラクタキャビン

参 考 文 献

- Bartosz Bilski 2013 Exposure to audible and infrasound noise by modern agricultural tractors operators. *Applied Ergonomics*, 44 : 210-214
- 彭彦昆, 笹尾彰, 澁澤栄, 澤村篤, 吉田智一 1996 農業機械作業員耳元騒音の能動制御 (第2報) : トラクタに搭載時の消音効果. *農業機械學會*, 58 : 57-63
- 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 HP, <https://www.naro.affrc.go.jp/>, (2014/10/10 アクセス)
- Eiji Inoue, Osamu Kinoshita, Jun Kashima and Jun Sakai 1993 Distribution and Spectrum Analysis of Noise on a Combine Harvester. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 38 : 137-145
- 井上英二, 鹿島潤, 高橋仁康, 坂井純, 金咲根 1994 コンバイン騒音のアクティブノイズコントロールに関する基礎的研究. *九州大学農学部学芸雑誌*, 49 : 67-80
- 金子貢, 齊藤俊 2006 農耕車両キャビンのこもり音

- 低減に関する研究（音響的動吸振器による空洞共鳴周波数の制御）. 日本機械学会論文集, 72: 765-771
- 金学先, 笹尾彰, 酒井憲司 2004 農業機械騒音の可視化による低減化に関する研究: 自脱型コンパインの騒音特性と音の流れ. 農業機械學會誌, 66: 69-76
- 小泉孝之, 辻内伸好, 中村紳, 石田榮一, 赤松克児 2005 トラクタキャビン内部空間の音響解析に基づくANCの2次音源配置. 関西支部講演会講演論文集, 8: 51-52
- 今野文靖, 大西将秀, 小手川和久 2009 エンジンこもり音を低減するアクティブ騒音制御システム. パナソニック技報, 54(4): 49-54
- 西田貴則, 辻内伸好, 小泉孝之, 石田榮一, 赤松克児 2003 トラクタキャビン内騒音に対するアクティブノイズコントロールに関する研. 関西支部講演会講演論文, 78: 5-6
- 西村正治, 伊勢史郎, 宇佐川毅 2006 アクティブノイズコントロー. コロナ社, 東京
- 吉田智一, 石川文武 1993 作業被曝騒音のアクティブコントロー (第2報) -評価システムとその性能-. 農業機械學會誌, 55(5): 67-74
- 吉田智一 1997 音の干渉と騒音制御-アクティブノイズコントロール. 農業機械學會誌 59: 102-106
- Sarp Korkut Sümer, Sait M. Say, Fikri Ege, Alaettin Sabanci 2006 Noise exposed of the operators of combine harvesters with and without a cab. *Applied Ergonomics* 37: 749-756

Summary

Uncomfortable noises occurred by agricultural machinery cause operator's fatigue. These noises are generally reduced to some extent by the cabin. However this approach is known as not effective method at low frequency noise. In this research, the characteristics of noise level inside and outside the cabin of an agricultural riding tractor are verified by recording and analyzing the frequency and acoustic power of noises. Noise reducing experiment are carried out using ANC system. As a result, the highest sound pressure level reached to 90dB at the around operator's head. Main noises were generated from the engine part and the low-frequency noises were not almost reduced by the current type of the cabin. The noise are reduced about 3dB from 70 to 300 Hz and reduced about 9dB at the maximum.

Key words: Active noise control, agricultural tractor's cabin