

長期施肥連用黒ボク土水田における 水稲収量の変動と気温との関係

米川和範¹・菅原慶子¹・比企 弘¹・林 久喜²

¹筑波大学農林技術センター

305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1

²筑波大学大学院生命環境科学研究科

305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1

要 旨

筑波大学農林技術センターの黒ボク土水田で、1978年から28年間にわたって継続して実施した12種類の異なる肥料要素試験区をもつ長期施肥連用試験における日本晴の収量データを収量の変動と気温との関係から解析した。水稲の玄米収量は肥料要素の種類や施用の有無により大きく変動し、平均収量は標準的な施肥量である三要素区で330kg/10aであったのに対し、無肥料区で45kg/10a、三要素倍量区で481kg/10aと、試験区により10.6倍の開きがみとめられた。このとき、収量の年次間変異も試験区により大きく異なり、変動係数は三要素区で23.2%であったのに比べ、最小はリン酸倍量区の18.0%、最大は無リン酸区の62.7%であった。平均収量と収量の変動係数との間には有意な負の相関関係がみられ、平均収量が低い区ほど年次間変動が大きいことが明らかとなった。この年次間変動を、気温を指標として解析した結果、収量レベルの低い無肥料区および堆肥単用区では玄米収量と平均気温との間に正の相関関係がみられ、これら試験区では気温が地力の発現に影響を及ぼし収量に影響していることが推察された。

キーワード：気温，玄米収量，水稲，淡色黒ボク土，肥料要素，変動

緒 言

我が国の各試験研究機関の水田で実施されている施肥試験は、グライ土（安西ら1989, 1990, 1993）や灰色低地土（神谷ら1994, 宮川ら1994, 津田ら1995）などの低地土についての報告が主である。一方、黒ボク土に関する試験では主に畑土壌が対象になっており、水田における三要素試験の報告自体はさほど多くない。また、日本ではこのような施肥試験や長期試験が各地で中止されてきており、持続的な水稲生産を検討する上で貴重な実験の場が消滅しつつある。

* Corresponding Author: nori@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

筑波大学農林技術センター（以下、センターと略記）の水田は、畑地を1977年に造成したもので、土壌統群は淡色黒ボク土に属しており、土壌の性質が日本における一般的な水田土壌とは様相を異にしている（香川ら1998、永塚ら1982）。

黒ボク土は水田として必ずしも適しているとはいえないが、全国では全水田面積の11%を占めており（鳥山2004）、主要な水田土壌の一つである。この痩せた地力をいかにして高め、教育研究の場として長期にわたり安定的に使える高生産性水田に変身させていくかは大学における重要な課題であるばかりか、一般圃場においても必要となる技術である。

そこで、まず黒ボク土水田における施肥反応データをできるだけ正確にかつ時系列的に把握する必要がある。前報では、センターの水田において1978年～1999年の22年間にわたり実施された施肥連用試験結果をまとめ、淡色黒ボク土における長期連用施肥が水稻の収量および収量構成要素に及ぼす影響を検討した（米川ら2001）。本報告は、1978年から2005年までの28年間の施肥連用水田における収量データについて、収量の変動と気温データの面から解析した。

材料および方法

1. 土壌

調査対象水田の位置は洪積台地上平坦面、海拔約20m、土壌は淡色黒ボク土（赤ノッポ）で、母材は火山灰である。表層から1～2 m下には厚さ数mに及ぶ重粘土層があり、更にその下層は砂質土からなっている（香川ら1998、永塚ら1982）。

2. 灌漑水

灌漑水は、揚水ポンプによって汲み上げられた人工池の水を用いた。生育中の水管理は、原則として中干し期までは常時湛水、それ以後は間断灌漑として、さらに黄熟期以後は落水した。

3. 試験設計

供試水田は、1978年にコンクリート畦畔で1ブロック50m²(10m×5 m)に区画された小区画を、「無肥料区」、「無窒素区」、「無リン酸区」、「無カリ区」、「三要素区」、「三要素+堆肥区」、「堆肥単用区」の7試験区として割り当て、長期連用試験を開始した。その後1986年からは、新たに「窒素倍量区」、「リン酸倍量区」、「カリ倍量区」、「三要素倍量区」を加え、更に1988年には「三要素+ケイカル区」を加えて、計12試験区とした。

各試験区の施肥設計を表1に示す。基肥は代かき時に全層施肥し、追肥は1回目を幼穂形成期に、2回目を出穂20日前にそれぞれ表層施肥した。肥料には硫酸アンモニウム（N21%含有）、重過磷酸石灰（P₂O₅34%含有）および硫酸カリ（K₂O50%含有）を使用した。堆肥は2年間腐熟させた稲わら堆肥（材料は稲わらのみ）を用いた。なお、試験期間中は各試験区とも収穫後の稲わらは全量、圃場から搬出した。

供試品種には日本晴を使用した。基本的な栽培時期として4月下旬に播種し、5月中旬に30cm×15cmの栽植密度で移植したが、これらの時期は試験年によって多少変動した。いずれの試験年も21日間育苗した稚苗を用いて、1株4本植えに揃えた。殺虫剤、殺菌剤、除草剤などの使用を含めた管理作業はセンターの慣行に従った。

表1 各試験区の施肥設計.

試験区名	基肥 (kg/10a)			追肥 N(kg/10a)		追肥 K ₂ O(kg/10a)		備 考
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	1 回目	2 回目	1 回目	2 回目	
無肥料区	0	0	0	0	0	0	0	
無窒素区	0	7.5	7.5	0	0	0	0	
無リン酸区	5.0	0	7.5	1.25	1.25	0	0	
無カリ区	5.0	7.5	0	1.25	1.25	0	0	
三要素区	5.0	7.5	7.5	1.25	1.25	0	0	
三要素+堆肥区	5.0	7.5	7.5	1.25	1.25	0	0	堆肥1000kg/10a
堆肥単用区	0	0	0	0	0	0	0	堆肥1000kg/10a
窒素倍量区	10.0	7.5	7.5	2.50	2.50	0	0	
リン酸倍量区	5.0	15.0	7.5	0	1.25	0	0	
カリ倍量区	5.0	7.5	10.0	0	1.25	2.5	2.5	
三要素倍量区	10.0	15.0	10.0	2.50	2.50	2.5	2.5	
三要素+ケイカル区	5.0	7.5	7.5	0	1.25	0	0	ケイカル100kg/10a

注1) 堆肥は基肥施用時に投入した。

注2) 追肥の1回目は幼穂形成期に、2回目は出穂20日前に行った。

注3) Nは硫酸アンモニウム、P₂O₅は重過リン酸石灰、K₂Oは硫酸カリを使用した。

収量調査は、代表株法により収量構成要素を求め、それらの結果から玄米収量を算出した。具体的には、各試験区とも成熟期に1区から50株を採取し、そこから平均値に近い穂数をもつ20株について穂重を測定し、平均穂重に最も近い5株について総粒数、登熟歩合、玄米千粒重、玄米水分含有率を測定し、これらの値から株当たり精玄米重を求めた。これに単位面積当たりの栽植株数を乗じて10a当たりの玄米収量を算出した。なお、登熟歩合は比重1.06の塩水選から算出し、玄米収量は含水率15%に換算した。

気温のデータは筑波大学農林技術センター筑波実験林の計測データを使用した。ただし、欠損データについては気象庁高層気象台つくば市館野のデータを使用した。

試験データは統計解析ソフト JMP6(SAS Institute Japan 株式会社) を使用して解析した。

結 果

試験期間中の玄米収量の平均値、最高値、最低値および変動係数を表2に示す。玄米収量は無肥料区で最も少なく、平均45kg/10aであり、最も高かったのは三要素倍量区の481kg/10aであった。三要素区は330kg/10aであったことから、肥料要素の違いにより、平均値で三要素区に対して、無肥料区の13.7%から三要素倍量区の145.8%までの開きが見られた。平均収量は無肥料区のほか、無リン酸区および堆肥単用区では100kg/10a程度の低い値で、無窒素区では200kg/10aレベルとこれら試験区の2倍以上の単収をあげており、それ以外の試験区では300kg/10a以上の単収レベルであった。

標準的な施肥量である三要素区と、試験期間中の平均玄米収量が最も低い無肥料区および最も高い三要素倍量区の玄米収量の推移を図1に示した。無肥料区は試験年次の進行にかかわらず100kg/10aまでの範囲で変動していたのに比べ、三要素区では試験年次の進行に伴い玄米収量が増加する傾向が見られた。また、三要素倍量区においても三要素区と同様に試験年次の進行に伴い玄米収量が増加したように見られた。

表2 肥料要素が玄米収量とその変動に及ぼす影響。

試験区	試験期間	平均収量 (kg/10a)	最高収量 (kg/10a)	最低収量 (kg/10a)	変動係数 (%)
無肥料区	1978～2005	45	89	9	56.6
無窒素区	1978～2005	213	340	114	30.0
無リン酸区	1978～2005	71	166	4	62.7
無カリ区	1978～2005	351	497	215	19.6
三要素区	1978～2005	330	457	162	23.2
三要素+堆肥区	1978～2005	354	503	171	28.1
堆肥単用区	1978～2005	101	245	29	57.4
窒素倍量区	1986～2005	467	622	318	18.9
リン酸倍量区	1986～2005	432	565	259	18.0
カリ倍量区	1986～2005	364	501	217	21.3
三要素倍量区	1986～2005	481	662	290	20.9
三要素+ケイカル区	1988～2005	367	499	258	22.4

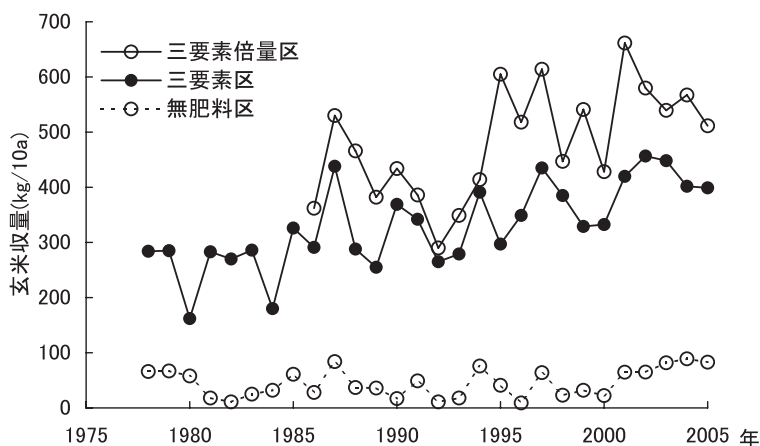


図1 三要素区、無肥料区、三要素倍量区における玄米収量の年次変動。

そこで玄米収量と試験年次との関係を相関分析してみると、無肥料区のほか、無窒素区、無リン酸区、無カリ区、堆肥単用区では両者の間に一定の関係は認められなかったが、三要素区、三要素+堆肥区、窒素倍量区、リン酸倍量区、カリ倍量区、三要素倍量区および三要素+ケイカル区では試験年次との間に1%あるいは0.1%で有意な正の相関関係が認められた(表3)。

図2に1978年から2005年までの、水稻生育期間である5月～10月の平均気温、最高気温および最低気温の推移を示した。最低気温、最高気温および平均気温の平均値および変動係数はそれぞれ最低気温16.6℃、5.2%、最高気温25.8℃、3.3%、平均気温20.7℃、3.8%であった。これら気温要因と試験年次との相関を検討したが、いずれの気温要因も試験年次の進行との間に一定の関係は認められなかった。

玄米収量と気温との相関を検討してみたが、平均気温は無肥料区、無カリ区、堆肥単用区、カリ倍量区の平均玄米収量との間に有意な正の相関関係が認められたものの、他の試験区では

表3 玄米収量と年次および気温との相関.

試験区名	年	平均気温	最高気温	最低気温
無肥料区	0.26 ns	0.40 *	0.25 ns	0.42 *
無窒素区	0.43 ns	0.37 ns	0.36 ns	0.17 ns
無リン酸区	-0.11 ns	0.32 ns	0.21 ns	0.30 ns
無カリ区	0.36 ns	0.42 *	0.30 ns	0.34 ns
三要素区	0.71 ***	0.20 ns	0.11 ns	0.07 ns
三要素+堆肥区	0.68 ***	0.33 ns	0.25 ns	0.21 ns
堆肥単用区	-0.01 ns	0.38 *	0.33 ns	0.28 ns
窒素倍量区	0.63 **	0.28 ns	0.22 ns	0.24 ns
リン酸倍量区	0.63 **	0.41 ns	0.26 ns	0.44 ns
カリ倍量区	0.56 **	0.54 *	0.43 ns	0.59 **
三要素倍量区	0.57 **	0.37 ns	0.29 ns	0.34 ns
三要素+ケイカル区	0.61 **	0.37 ns	0.27 ns	0.36 ns

注) ***, **, *はそれぞれ0.1%、1%および5%で有意であることを示す。nsは有意でないことを示す。

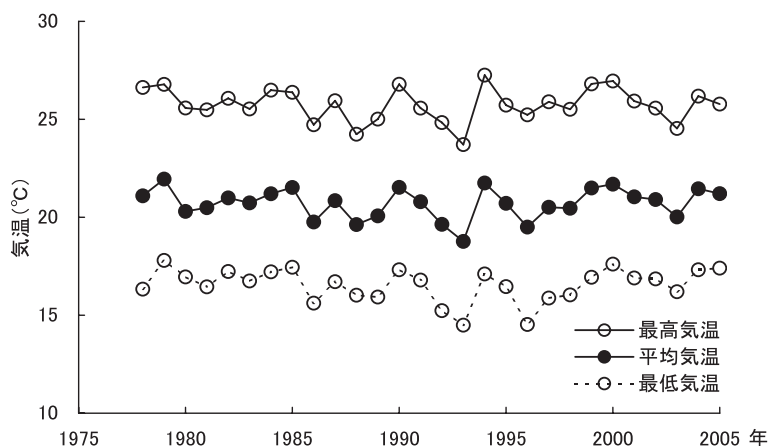


図2 試験期間(5~10月)の平均気温、最高気温、最低気温.

相関が見られなかった。最高気温はいずれの試験区の玄米収量との間にも相関関係は認められず、最低気温は無肥料区およびカリ倍量区との間に正の相関が認められた(表3)。

三要素区では平均330kg/10aの単収であったが、試験年次により10a当たり162kgから457kgまで単収が変動し、試験年次の平均収量を100%としたときに、49%から138%までの変動幅であった(表2)。このように各試験区の玄米収量の変動についてみると、試験区により変動の幅が異なっていた。最も平均単収が低かった無肥料区は、最低収量が9kg/10aであったのに対し、無リン酸区は平均単収では無肥料区の157%であったものの、最低収量は無肥料区より低い4kg/10aであった。このような試験区の玄米収量の変動をみる指標として、平均単収の大きさに左右されない変動係数を使用した。玄米収量の変動は三要素区で23.2%であったのに対し、窒素倍量区、リン酸倍量区、カリ倍量区、三要素倍量区、では安定しており、無カリ区も変動係数が19.6%と安定していた。一方、無リン酸区では変動係数が62.7%と最も高く、無肥料区、堆肥単用区でも変動が大きかった。玄米収量の変動と平均玄米収量との関係を検討し

てみると、両者の間には0.1%で有意な負の相関関係が認められ、両者の決定係数は0.88と極めて高く、収量の変動は収量レベルが大きく影響していることが明かとなった（図3）。

考 察

1978年から2005年までの試験の結果、無肥料区の玄米収量は三要素区の14%と低レベルであった。無肥料栽培における水稻の生育は窒素で規制されていると考えられ、吸収窒素が土壤窒素の放出量とみなすことができる。これは、湛水期間中の藻類や微生物の増殖と前年水稻の刈株、残根などの無機化によるところが大きく、微生物等による窒素固定作用が関与している（塩田ら1984）。微生物による固定窒素量は平均して4 kg/10a程度（川口桂三郎1997）であり、本試験においても土壤微生物による窒素固定が無窒素区における収量確保につながったと考えられる。本試験における年次変動について検討した結果、無肥料区の玄米収量は平均気温および最低気温と有意な正の相関関係が認められ、気温がこれら有機物の生成およびその無機化に影響して収量にまで影響が及んだものと考えられた。同様な結果は平均単収の低い堆肥単用区でも認められた。堆肥単用区では平均気温が直接的に有機物の無機化に影響しているものと考えられる。一方、無リン酸区では玄米収量と気温との間に一定の関係が認められなかった。供試した土壌は淡色黒ボク土で、リン酸吸収係数は2500~3100の値を示し、作物のリン酸欠乏症状の出やすい土壌である（永塚・大羽1982）。要素欠乏の影響はリン酸で最も顕著であり、三要素に対して無リン酸区の相対収量は21%と著しく低かった。リン酸の欠乏は生育の抑制、出穂・登熟の遅延などを招き重大な低収の要因である（星川1980）。無リン酸区の玄米収量が気温との間に一定の関係がみられなかったのは、土壤有機物の無機化では補いきれないリン酸不足の影響があったためと考えられる。無リン酸区の収量は他の要素区に比べて年次変動が大きいが（表2）、その原因については明らかではない。一方、リン酸の倍量施肥は玄米収量が増加したが、これは穂数、一穂粒数の増加が影響したことが要因であった。リン酸施用によって

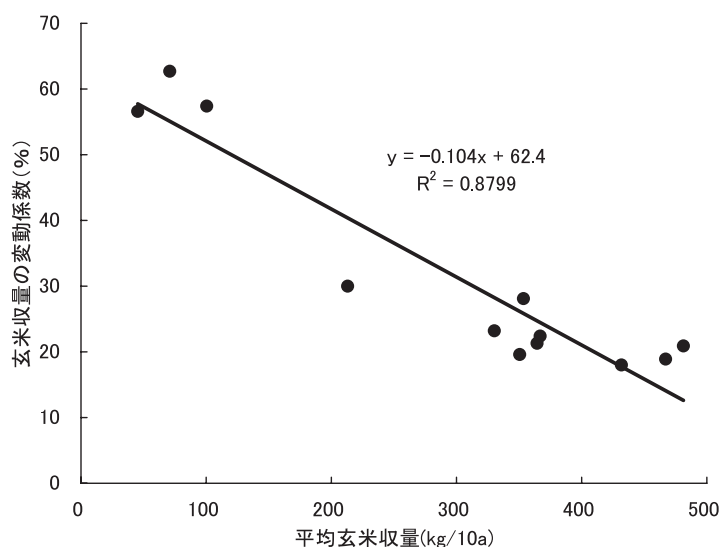


図3 玄米収量の変動と平均玄米収量との関係。

藻類などの生育が旺盛となり、窒素固定が無リン酸区よりも多くなってリン酸施用が窒素施用と同様の効果を持ったものと考えられる。

収量の増加は化学肥料の多投入で達成されてきたが、その一方で化学肥料のみに依存した施肥法による地力の低下が問題化し、有機物施用の重要性が再認識されるようになってきている(塩田1980)。有機物の効果は化学的効果として有機物中に含まれる無機要素の効果である。リン酸吸収力の強い火山灰土壌などでは有機物中のリン酸は土壌に直接接触することがなく不可給態化を免れ、植物根によって吸収され、極めて有効である(川口1997)。しかし、本試験の結果、1t/10aの堆肥投入は28年間連用施用しても収量が試験年次の継続により増加するまでには至らなかった(表3)。

稲わら堆肥に含まれる窒素が施用年次に吸収利用される割合は15%程度で、大半が土壌窒素あるいは一部堆肥の状態で残留し、数年にわたって徐々に吸収利用される(塩田ら1980, 塩田ら1982)。試験年次と玄米収量との相関は三要素+堆肥区で認められたが、三要素区でも同様に正の相関がみられたことから、これは堆肥の連用施用による土壌有機物の蓄積効果によるというよりは、施肥による土壌中の根量および切り株量が蓄積した結果、地力が増大したためと考えられた。このことについては、三要素区のほか、平均単収の高かった窒素倍量区、リン酸倍量区、カリ倍量区、三要素倍量区および三要素+ケイカル区ではいずれも試験年次との間に正の相関が認められたことから裏付けられた。玄米収量レベルが低いほど、収量の変動係数が大きい(図3)。無肥料区の収量は気温との相関が認められたが、無リン酸区では関係が認められず、収量変動に及ぼす要因については、気温だけでなく、環境要因も検討する必要がある。

地球温暖化が懸念される中で、今後の水稲生産を収量面においてもいかに維持するかは大きな課題である。温暖化が作物生産に及ぼす影響は本試験のような長期試験の解析により明らかになるものと考えられる。本試験は28年間に及ぶ同一品種、同一施肥設計の試験結果を解析したものであるが、この試験年次の気温変動を検討した結果、年次の進行により気温が上昇する傾向はみられなかった。このことは四半世紀程度の試験期間では温暖化といった地球規模の気候変動を論じるには短い期間であることを示している。各地で長期試験が中止されてきている中で、本センターで実施されている試験の継続が今後大きな意味をもってくるものと思える。

引用文献

- 安西徹郎・金子文宣・松本直治 1989. グライ土水田に対する有機物の連用効果. 第1報 水稲の生育収量からみた有機物の連用効果. 千葉県農試研報. 30:71-80.
- 安西徹郎・金子文宣 1990. グライ土水田に対する有機物の連用効果. 第2報 水稲の窒素吸収および土壌の窒素発現からみた有機物の連用効果. 千葉県農試研報. 31:9-18.
- 安西徹郎 1993. グライ土水田に対する有機物の連用効果. 第3報 稲わら灰の施用が水稲の生育収量、養分吸収量および土壌の化学性におよぼす影響. 千葉県農試研報. 34:13-21.
- 星川清親 1980. 水稲. 新編食用作物. 養賢堂, 東京. 19-72.
- 香川邦雄・今野 均・米川和範・軽部 潔 1998. 農林技術センター水田の灌漑水量とその水質並びにそれに伴う養分の供給. 筑波大農林研報. 11:31-38.
- 神谷径明・大石達明・嶋田昭史・水本順敏・堀 兼明 1994. 中粗粒灰色低地土水田における有機物及び珪カルの連用が土壌及び水稲に与える影響. 静岡県農試研報. 38:1-10.
- 川口桂三郎 1997. 土壌有機物. 土壌学概論. 養賢堂, 東京. 29-41.

- 永塚鎮男・大羽 裕 1982. 筑波台地における土壤の分布様式と成因的特徴. 土肥誌. 53(5) : 457-464.
- 宮川 修・塩口直樹・島田義明 1994. 石川県下の異なる土壤タイプの水田への有機物連用が土壤理化学性と水稲収量に及ぼす影響. 石川県農総研報. 18 : 21-31.
- 塩田悠賀里・稲垣 明・長谷川徹・沖村逸夫 1980. 四要素及び堆肥の長期施用による水田土壤の理化学性の変化と水稲の生育について. 愛知農総試研報. 12 : 52-60.
- 塩田悠賀里・長谷川徹・沖村逸夫 1982. 無肥料, 化学肥料単用及び堆肥連用水田土壤における施肥窒素の動向. 愛知農総試研報. 14 : 53-59.
- 塩田悠賀里・佐野勝昭・沖村逸夫 1984. 水稲の窒素吸収からみた稲わら堆肥連用の短期及び長期的評価. 愛知農総試研報. 16 : 43-51.
- 鳥山和伸 2004. 水田土壤. 山崎耕宇・久保田祐雄・西尾敏彦・石原 邦監修, 新編農学大事典. 養賢堂, 東京. 207-272.
- 津田和久・片山 理・小林秀臣・文屋千代・城山 豊 1995. 灰色低地土水田における有機物とけいカルとの連用効果. 第1報 土壤の理化学性におよぼす影響. 京都農研報. 17 : 51-59.
- 米川和範・今野 均・菅原慶子・林 久喜・坂井直樹 2001. 黒ボク土における水稲の収量に及ぼす連用施肥の影響. 筑波大農林研報. 14 : 7-18.

The Relation of the Fluctuation of Paddy Rice Yield and Temperature in Long Term Experiment of Successive Application of NPK Elements and Rice Straw Compost in Andosol

Kazunori YONEKAWA¹, Keiko SUGAWARA¹,
Hiroshi HIKI¹ and Hisayoshi HAYASHI²

¹ Agriculture and Forestry Research Center, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577

² Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572

Abstract

We carried out the experiment of successive application of NPK elements and rice straw compost in the paddy field of Light-colored Andosol from 1978 to 2005 at Agriculture and Forestry Research Center, the University of Tsukuba. Rice cultivar 'Nipponbare' was cultivated in 12 different experimental plots and yield data was analyzed in the viewpoint of its fluctuation and air temperature. Brown rice yield was fluctuated by the different application of NPK elements. Average yield of brown rice was 330kg/10a in NPK plot. The lowest yield which was 45kg/10a in no-fertilizer plot and the highest yield was 481kg/10a in double amount application of NPK element plot. The coefficient of variation (cv) of brown rice yield was varied by plots was 23.2% in NPK plot. The lowest and the highest fluctuation were 18.0% in double phosphate plot and 62.7% in no phosphate plot. There is a negative correlation between brown rice yield and its cv. There is a positive correlation between brown rice yield and average temperature in no-fertilizer plot and straw compost plot. It was clear that yield was affected by the mineralization of soil organic components as affected by the temperature.

Key words: Brown rice yield, Fluctuation of yield, Light-colored Andosol, NPK elements, Paddy rice, Temperature

* Corresponding Author: nori@sakura.cc.tsukuba.ac.jp