

学位論文題名

# Evaluation of rice-based cropping systems from fluxes of heat, water vapor, and greenhouse gases

(熱、水蒸気および温室効果ガスのフラックスによるイネの作付体系の評価)

## 学位論文内容の要旨

The irrigated rice-based cropping system is one of Asia's most important production systems as it provides approximately three-quarters of the world's rice needs. Though this system is sustainable, it is faced with several challenges in terms of increasing population to feed, water scarcity, and its contribution to global warming through the emissions of greenhouse gases. Increasing food production is an absolute necessity for the human population and improved resource-use efficiencies are imperative to achieve this goal. However, research on increasing rice yields should focus on strategies that do not harm the environment. This study was therefore conducted to evaluate the environmental impact of different rice-based cropping systems management (continuous flooding (CF), alternate wetting and drying (AWD), aerobic rice, dry-seeded rice, and crop diversification from rice to maize) in terms of fluxes of heat, water vapor, and greenhouse gases.

Irrigated rice fields are the major source of methane ( $\text{CH}_4$ ) emissions among the rice ecosystems, which accounts for 5-19% of the world's total anthropogenic  $\text{CH}_4$  emissions. Methane production is favored in irrigated rice fields by the ample water supply, intensive soil preparation and fertilization, and improved growth of rice. However, this study has shown that  $\text{CH}_4$  emission from submerged rice fields can be reduced by about 40% with mid-season soil drying or intermittent irrigation (AWD) during the rice growing season. The AWD also saves up to 15-30% irrigation water. These water-saving techniques are all effective in reducing  $\text{CH}_4$  emissions but they may enhance nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emissions as well. Results of this study also confirmed that AWD lowered the global warming potential contribution of both  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions compared to continuous flooding even if rice straw residues were incorporated.

The aerobic rice production system can further save up to 30-50% irrigation water; however, it would cause significant loss of soil organic carbon through increased carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) emissions and may also have an impact on heat fluxes. Aerobic rice production is a new cropping system in which specially-developed varieties are directly seeded in well-drained and non-puddled soils and rice is grown in unsaturated soil moisture conditions for most of the crop duration. As observed in this study, the net carbon (C) uptake of aerobic rice fields was about 2.5 times lower than that of flooded rice fields. This was evident because the GPP or photosynthetic capacity of aerobic rice is lower than that of flooded rice. More so, the ratio of  $R_e$  (plant and soil respirations) to GPP in aerobic rice fields was higher than that in flooded fields because of faster organic matter decomposition in aerobic soils. In turn, converting flooded rice production to an aerobic rice system to conserve water would mean less stored organic carbon in the soil. This study has also shown that the aerobic rice fields had about 45% higher sensible heat flux (the energy used to warm the surrounding air) and 11% lower evapotranspiration (ET) than flooded rice fields because of the drier soil conditions. The higher  $\text{CO}_2$

emissions and more sensible heat flux in aerobic fields may contribute to global warming. In addition, further breeding is needed to develop aerobic rice varieties that have higher yield potentials. Better water management is also needed to prevent extreme dry soil conditions that can enhance sensible heat transfer leading to warmer rice environments.

Another water-saving alternative is dry-seeded rice grown with the overhead sprinkler irrigation system which can save about 55% of the typical lowland rice water consumption. This water-savings was obtained during land preparation because minimal irrigation was required before the establishment of dry-seeded rice as compared to flooded rice. Additional water was also saved through the use of non-flooded but saturated soil conditions during the growing period. This water management seemed to be fairly efficient because the net C uptake, ET, and crop water productivity ( $WP_{ET}$ ) of the dry-seeded rice were comparable to those of conventional flooded rice. The yields of the dry-seeded rice can be improved as crop management practices are further developed and refined for high-yielding dry-seeded rice.

However, even with water-saving technologies for rice cultivation, the water requirements for rice remain higher than for other cereal crops. Diminishing supplies for irrigation water and increasing opportunities for higher income from non-rice crops can serve as drivers for diversification from rice monoculture with soil submergence to a rotation of rice with other crops such as maize grown on well-drained aerobic soils. The rice-maize cropping system is gaining importance on lowland soils across tropical and subtropical Asia in response to the increasing demand of maize for feed and biofuel. This study has shown that the maize crop had 1.4 times higher net C uptake and twice as much grain yield as dry-seeded rice because of its greater photosynthetic capacity due to its  $C_4$  physiology. The canopy light use efficiency (CLUE),  $WP_{ET}$  and photosynthetic water use efficiency ( $WUE_p$ ) of maize were 1.8, 1.9 and 1.6 times higher, respectively, than those of dry-seeded rice. However, even if maize crop has a higher capacity for C uptake, most of the carbon will be respired back to the atmosphere owing to higher soil organic matter decomposition brought about by the aerobic soil condition and thus, leads to low storage of carbon in the soil. This study has also shown that climate variability can significantly influence maize production because of the crop's sensitivity to excess soil water logging brought by erratic rainfall, which resulted in about 20% reduction in net C uptake as well as yield of maize. This implies that a good drainage is necessary in converting paddy fields to maize cultivation.

Future research should focus on evaluating the global warming potential and carbon sequestration capacity of these water-saving rice cultivation practices and diversified cropping systems. Therefore, it will be a continuous effort to evaluate the short and long-term effects of such changes in cropping management in order to establish the process-level understanding for developing pathways for a conversion of rice-based systems in Asia towards higher yield potentials under minimized environmental impacts.

# 学位論文審査の要旨

|     |     |                  |
|-----|-----|------------------|
| 主 査 | 教 授 | 平 野 高 司          |
| 副 査 | 教 授 | 波多野 隆 介          |
| 副 査 | 教 授 | 鮫 島 良 次          |
| 副 査 | 領域長 | 宮 田 明（農業環境技術研究所） |

## 学 位 論 文 題 名

### Evaluation of rice-based cropping systems from fluxes of heat, water vapor, and greenhouse gases

（熱、水蒸気および温室効果ガスのフラックスによるイネの作付体系の評価）

本論文は図 65, 表 34, 引用文献 284 を含む 211 頁の英文論文であり, 参考論文 5 編が添えられている。

水田による稲作はアジアにおける最も重要な作物栽培システムであり, 世界の米需要の約 3/4 を産出している。水田による栽培システムは持続可能であるが, 人口増加, 水不足, 温室効果ガスの放出などの大きな問題に直面している。食料増産は増え続ける人口を支えるために必須であり, 資源の有効利用が不可欠である。しかし, 米の増収だけでなく, 環境に負荷を与えない栽培システムについても焦点を当てた研究が重要である。そこで本研究は, 熱, 水蒸気および温室効果ガスのフラックスを実測し, 得られた結果を用いて異なる作付体系（慣行の連続湛水（灌漑水田）, 間断灌漑（AWD）, 乾田, 乾田直播, イネーメイズ二毛作）を比較し, それらが環境に与える影響を評価することを目的として行われた。

灌漑水田は温室効果ガスであるメタンの主要な放出源であり, そこからのメタン放出量は世界全体の人為的な放出量の 5~19% を占める。湛水条件で施肥が行われ, イネが存在する水田は, メタンの生成および大気への放出にとって良好な環境である。本研究の結果は, 湛水条件でのメタン放出量が中干しや間断灌漑によって約 40% 削減されることを示した。また, 間断灌漑により灌漑水量が 15~30% 少なくなった。間断灌漑はメタンの発生を抑制するのに効果的であるが, 一酸化二窒素の発生を増加させる可能性がある。しかし, これらの温室効果ガスを合わせた温室効果ポテンシャルで評価すると, 例え稲わらがすきこまれたとしても, 間断灌漑は連続灌漑に比べて地球温暖化に与える影響が小さいことがわかった。

乾田栽培はさらに 30～50%の節水となるが、土壌有機物の好氣的分解により多くの二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) を放出するとともに、周囲の気象に与える影響も懸念される。乾田栽培では、代掻きを行わない排水土壌に新たに開発された品種を直接播種し、不飽和状態で栽培する方法である。乾田栽培における純生態系生産量（正味の炭素固定量，NEP）は、灌漑水田と比べて 40%程度であった。このような炭素固定量の減少は、イネの品種の光合成能が異なることに起因する。それ以上に、不飽和土壌における土壌有機物の好氣的分解が促進されたことが大きく寄与している。このように、灌漑水田を乾田方式に切り替えることで大幅な節水となるが、土壌炭素の蓄積を減少させる結果となる。また、エネルギー収支の点からみると、乾田は、水田に比べて顕熱フラックスを 45%増加させ、潜熱フラックス（蒸発散）を 11%減少させた。土壌からの  $\text{CO}_2$  放出量の増加と顕熱フラックスの増加は、地球温暖化を促進させるかもしれない。他の節水技術として、約 55%の節水効率があると報告されている乾田直播栽培がある。この方式における炭素固定量、蒸発散量および収量の水利用効率は、灌漑水田と比較してほぼ同程度であった。

このような節水技術が発達しても、他の穀物栽培に比べて稲作における水需要は大きい。灌漑水量を減らすとともに農家の収入を増やすためには、作付体系をイネ単作から二毛作に変換することが有効であると考えられる。本研究では、裏作として排水を行った後にメイズを導入した。メイズは、飼料やバイオ燃料の原料として熱帯・亜熱帯アジアで需要が高まっており、イネーメイズ二毛作は有効であると考えられる。 $\text{C}_4$ 植物であるメイズの栽培地では、イネの乾田直播栽培に比べて、炭素固定量が 1.4 倍に、収量が 2 倍にそれぞれ増加した。また、メイズ畑の群落光合成の光利用効率および水利用効率、また収量の水利用効率は、イネの乾田直播栽培のそれぞれ 1.8, 1.9, 1.6 倍大きかった。しかし、メイズの光合成は土壌水分による影響を強く受け、強い降雨が引き起こした短期的な湛水により、炭素吸収量が 20%低下し、結果として減収となった。このことは、水田地帯へのメイズの導入には排水システムの完備が重要であることを示している。

増加を続ける世界人口を養うためには食糧の増産が不可欠であるが、同時に水資源の不足が大きな問題となっている。そのため、農業における節水技術の開発および利用が重要な課題になってきた。本論文は、イネ栽培における節水灌漑を目的として開発された異なる作付体系において、熱、水蒸気および温室効果ガスのフラックスを実測してエネルギー収支および炭素収支を定量化し、それらの比較により開発された作付体系の環境に対する影響を評価したものである。本論文は、学術的に価値の高い知見を示すとともに、節水灌漑の適用における指針を与えたといえる。よって審査委員一同は、Ma. Carmelita R. Alberto が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有していると認めた。